



Mecanica de Rocas & GeoMec. de Macizos, en Ing Civil y del Petróleo

Tema 4: Tensiones “in situ”

Tensiones y técnicas “in situ”

1. Introducción
2. Tensiones iniciales y campos de tensiones
 - a) Importancia de las tensiones iniciales
 - b) Campos tensionales
3. Estimación de las tensiones iniciales
 - a) Tensión vertical
 - b) Tensión horizontal
 - c) Dirección de las tensiones horizontales
 - d) Cavidad circular en roca homogénea
 - e) Efecto de las juntas sobre las tensiones in situ
4. Procedimientos de medida de tensiones in situ
 - a) Introducción
 - b) Métodos de medición
 - c) Métodos de liberación de tensiones
 - d) Métodos de restitución de tensiones
 - e) Fractura hidráulica
 - f) Medida de cambios de tensiones

1

Introducción

Introducción

- Cualquier macizo rocoso en estado natural contiene in situ **tensiones no nulas**:
 - Peso del material por encima
 - Confinamiento
 - Historia previa de tensiones (e.g. de origen tectónico)
- Cerca de la **superficie** las tensiones in situ pueden ser:
 - Cercanas a cero
 - *Caída de rocas de la superficie, o de excavaciones subterráneas si las juntas están abiertas y son débiles*
 - Cercanas a la resistencia de la roca
 - *Alteración del campo de tensiones debido a la excavación de túneles o incluso en superficie puede provocar una liberación violenta de la energía almacenada*
- Determinación de la **magnitud** y **dirección** de las tensiones iniciales in situ: proc. experimentales o estimación numérica

2

Tensiones iniciales y campos de tensiones

Importancia de las tensiones iniciales

- Existe un estado tensional inicial en el terreno que es necesario conocer y entender → **proyecto**
- Conocer los **efectos de la ejecución** de una obra sobre el campo tensional del macizo rocoso, para poder minimizarlos
- Durante la ejecución de la obra el **estado tensional inicial cambia** en mayor o menor medida, pudiendo dar lugar a problemas de **estabilidad**

Importancia de las tensiones iniciales



- Los **criterios de rotura** están formulados en términos de tensiones
- Estimación del **orden de magnitud** y de la **dirección** de las tensiones: en teoría posible, pero con un margen de error incierto sin medidas apropiadas
- Las mediciones de tensiones **son caras** y no es algo rutinario

Importancia de las tensiones iniciales

- En algunas situaciones, puede ser más caro NO hacer estas mediciones. También en ocasiones disponer de datos fiables puede justificar el gasto adicional de las medidas de tensiones:
 - Elección de la **orientación** de una **caverna subterránea** (evitar situarla perpendicular a la tensión principal mayor) y su **forma** (para minimizar concentración de tensiones)
 - Evitar que una fisura iniciada en un hueco **se propague** hacia otro hueco (peligro de formar cuñas o bloques inestables)
 - Revestimiento o no de **túneles de presión**, en función de la relación entre las tensiones in situ y la presión de agua: reducción de costes constructivos

Importancia de las tensiones iniciales

- En ocasiones las tensiones iniciales son tan altas que **cualquier actividad** de ingeniería **puede provocar la rotura**:
 - Cuando la tensión mayor en la zona de una excavación supera $0.25q_u$, es probable que se produzcan **fisuras a raíz de la construcción** incluso si se adoptan todas las precauciones posibles
 - En Noruega, en valles que tienen unas laderas con **mucha pendiente** (fiordos), se tienen problemas cuando el peso de la roca por encima de la excavación supera tan sólo $0.15q_u$
 - **"Rock bursts"** en minas profundas (~ 3000 m)
 - **Túneles de carretera o ferrocarril** bajo montañas muy altas (túnel del Mont Blanc)
 - El **"tiempo de aguante"** de un túnel (sin sostenimiento) está estrechamente relacionado con q_u

Campos tensionales

- **Regional:**
 - Es el resultado de los **fenómenos tectónicos** que tienen lugar en la corteza terrestre (contacto entre placas, etc.). Este campo tensional afecta a superficies del orden de cientos de kilómetros cuadrados (<http://www.world-stress-map.org>)
- **Local:**
 - Responde al **perfil topográfico** de la zona. Es, por tanto, el reflejo de las estructuras geológicas presentes en la zona. Este campo tensional actúa sobre superficies de varios kilómetros cuadrados.

Campos tensionales

- **Inducido:**
 - Es debido a la **actividad constructiva próxima**. Su área de influencia es menor, abarcando una superficie del orden de un kilómetro cuadrado.

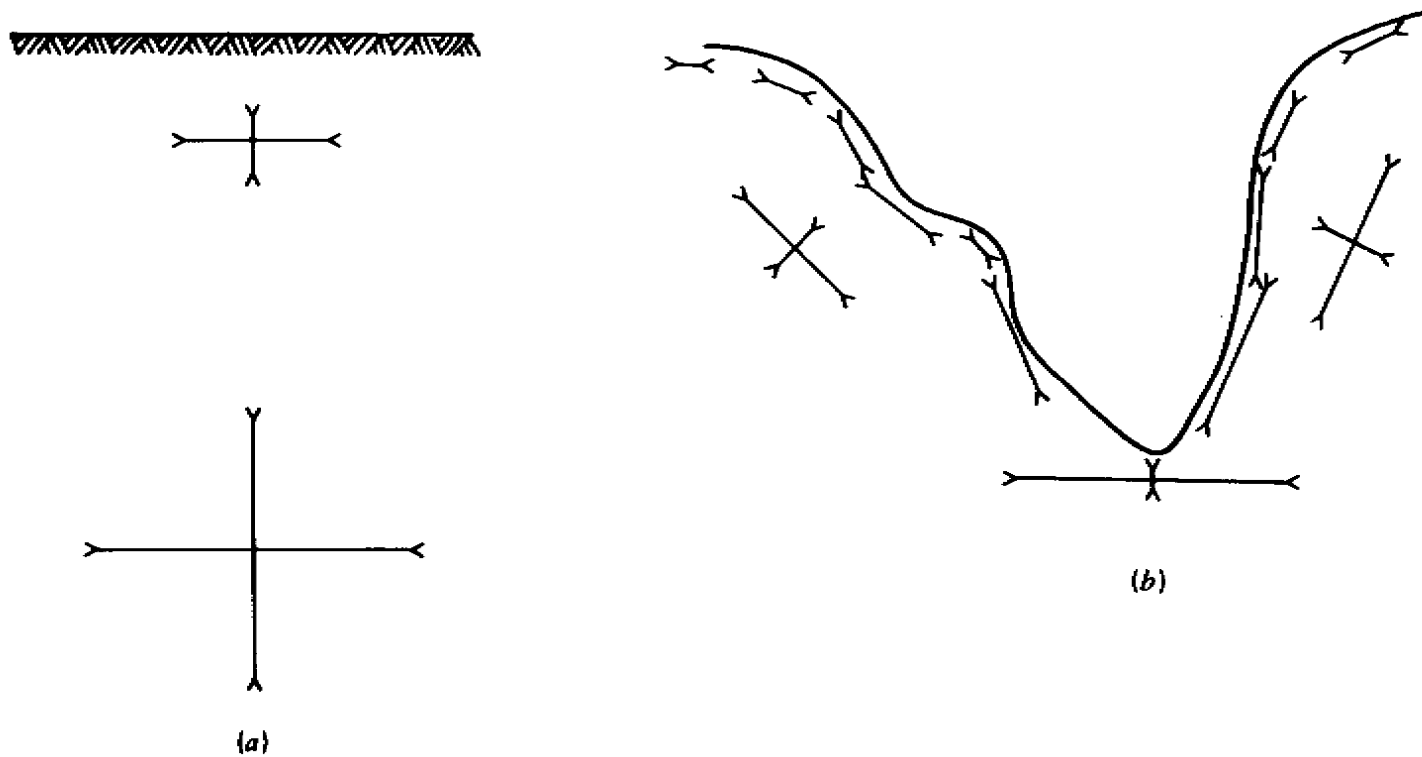
3

Estimación de las tensiones iniciales

Tensión vertical

- Se suele **suponer** que la tensión vertical es igual al peso del material por encima (27 kN/m^3)
- Cierta bajo superficies horizontales, pero no cuando hay pendientes pronunciadas: la superficie del terreno siempre forma una **trayectoria de tensiones principales** — una tensión principal es perpendicular a la vertiente y vale cero, las otras dos son paralelas al plano de la vertiente.
- Cerca del fondo del valle, las tensiones in situ pueden alcanzar q_u

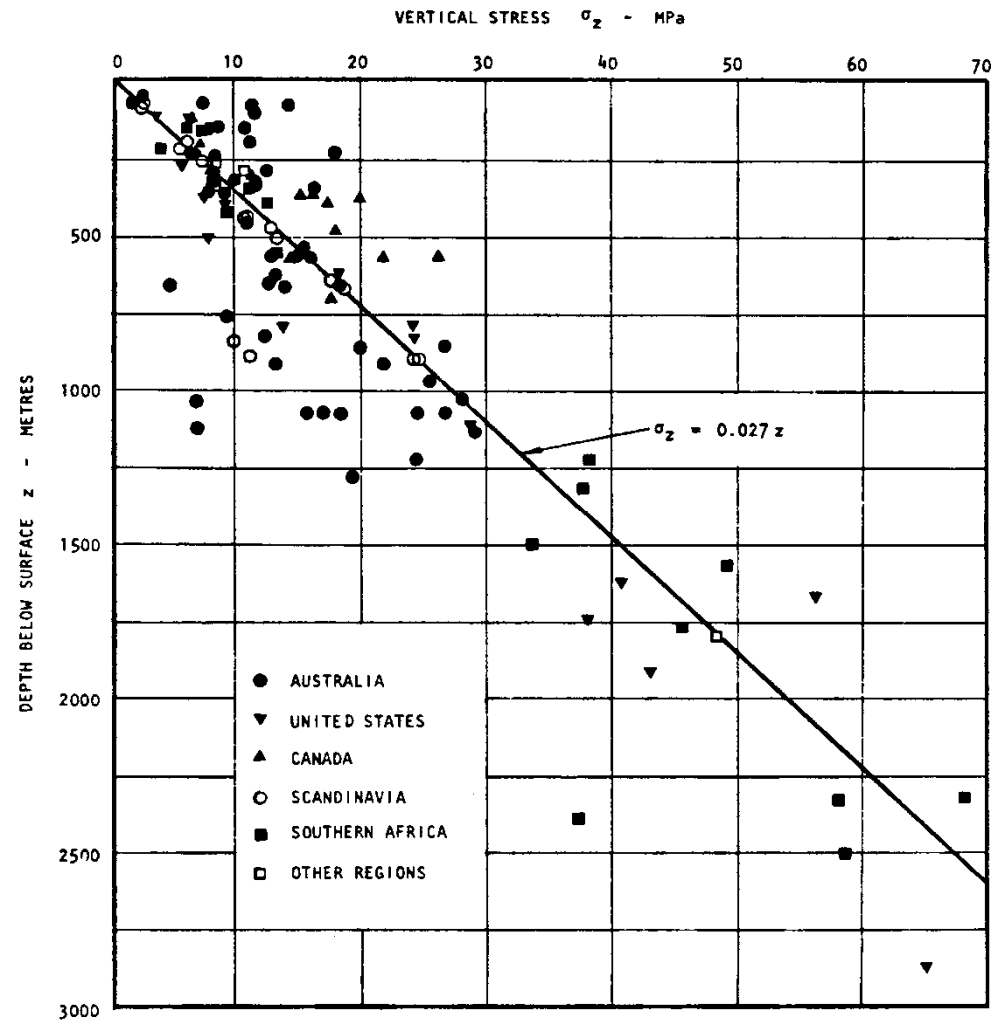
Tensión vertical



Influencia de la topografía en las tensiones iniciales

Tensión vertical

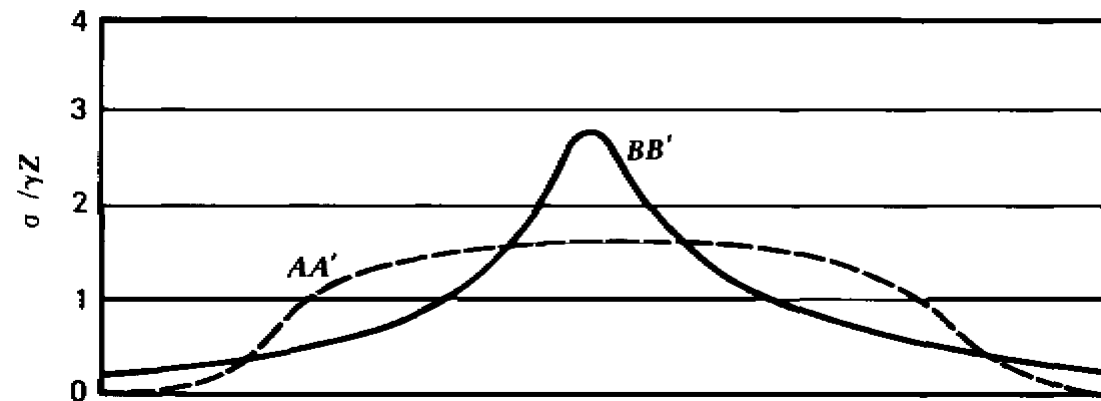
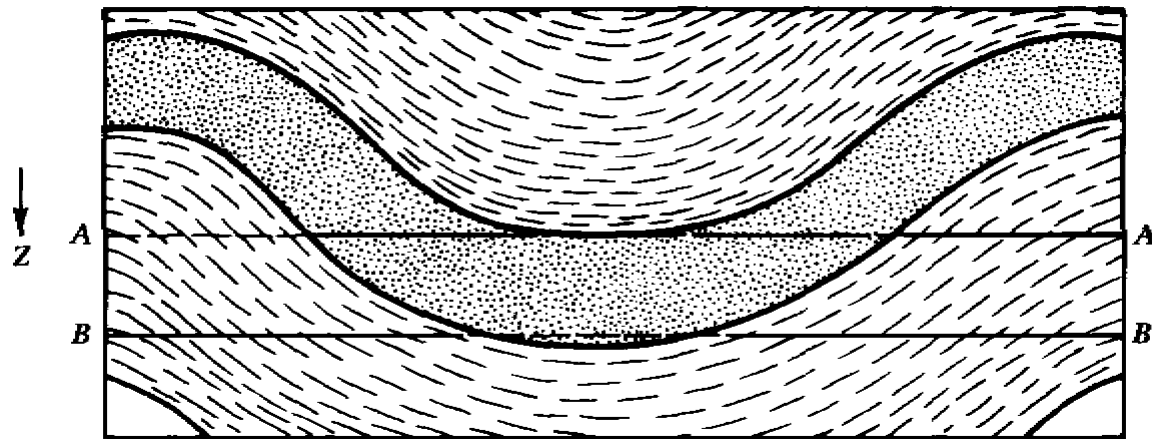
- Bajo superficies horizontales, la relación $\sigma_V = \gamma z$ es adecuada y ha sido validada con numerosos experimentos (Hoek & Brown, 1980):



Tensión vertical

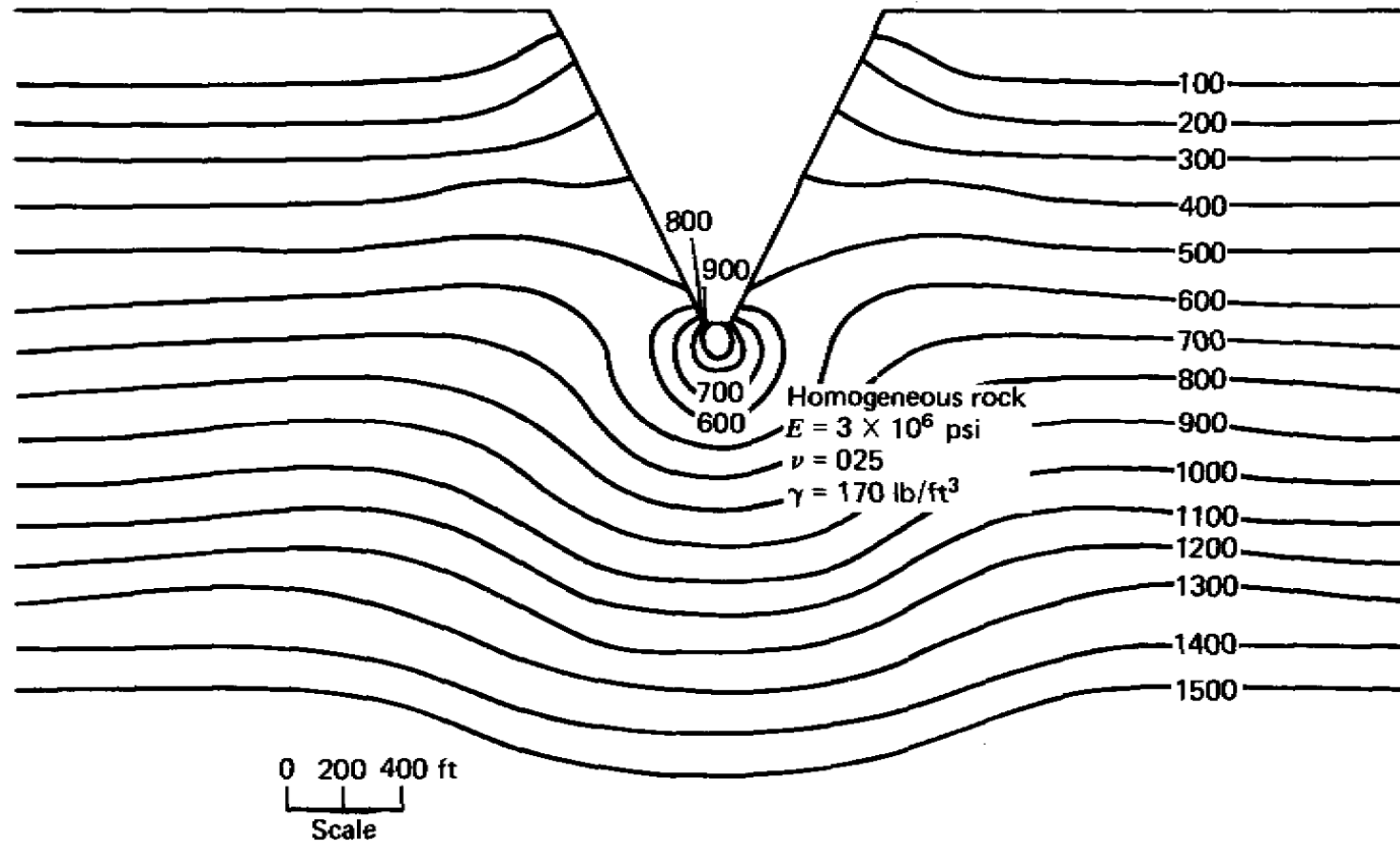
- Sin embargo, hay limitaciones:
 - **Ejemplo 1:** variación de la tensión vertical sobre planos horizontales cortando estratos plegados de distinta rigidez
 - **Ejemplo 2:** influencia de una estructura geológica heterogénea (análisis por el MEF)

Tensión vertical



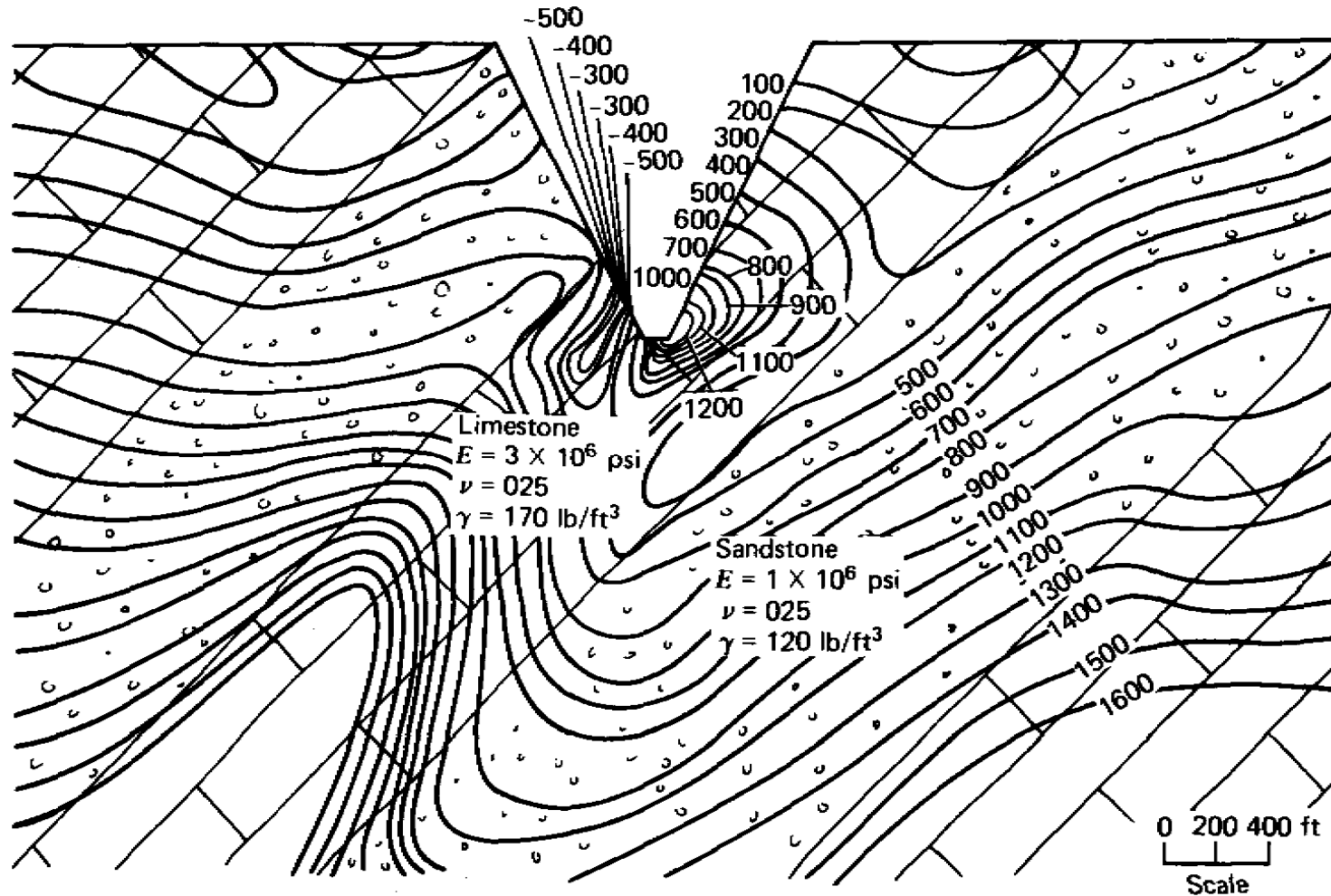
Ejemplo 1 – influencia del plegamiento

Tensión vertical



Ejemplo 2 – influencia de una estructura geológica heterogénea (1)

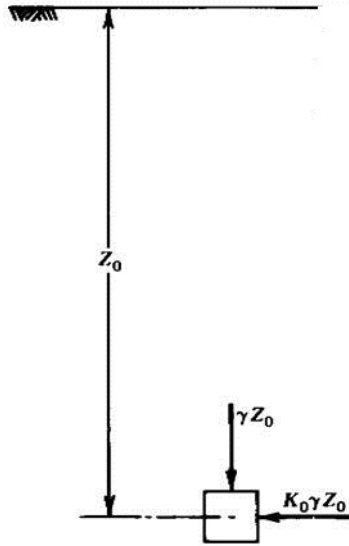
Tensión vertical



Ejemplo 2 – influencia de una estructura geológica heterogénea (2)

Tensión horizontal

- Por aplicación directa de la gravedad

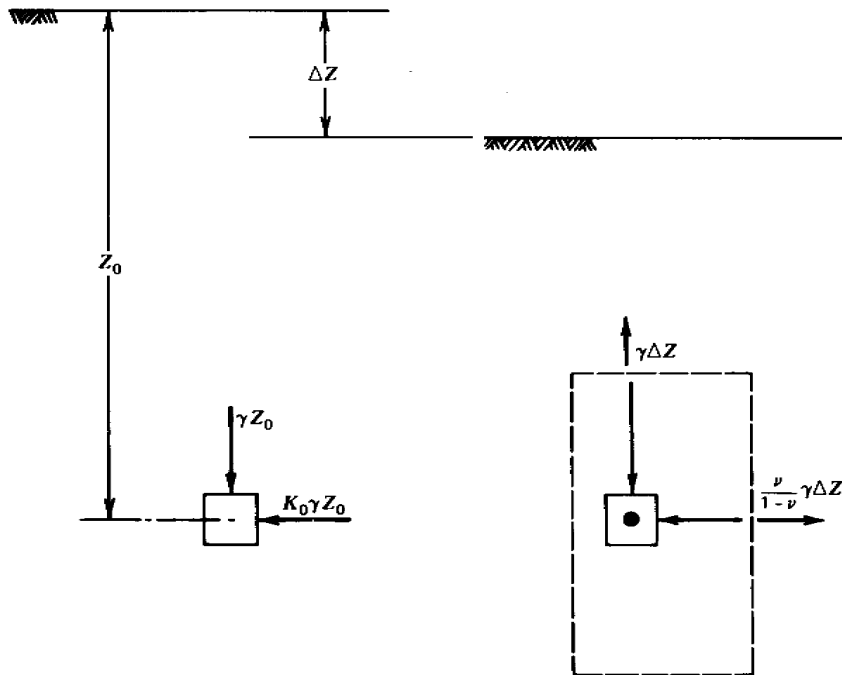


$$K = \frac{\sigma_H}{\sigma_V} \dots \text{Elasticidad} \Rightarrow K = \frac{\nu}{1-\nu}$$

- Limitación básica con este proced. $K_0 < 1$!
- Pero en muchos casos $K_0 < 1$, por lo tanto se requieren otros procedimientos

Tensión horizontal

➤ Efecto de la erosión (o excavación) sobre K_0



Consideremos un elemento de roca a profundidad Z_0 , con valor inicial de $K = K_0$, sometido a una descarga al quitar un espesor de material ΔZ :

$$\left. \begin{array}{l} \Delta \sigma_V = \gamma \Delta Z \\ \Delta \sigma_H = \gamma \Delta Z \frac{\nu}{1-\nu} \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \sigma_V = \gamma (Z_0 - \Delta Z) \\ \sigma_H = K_0 \gamma Z_0 - \gamma \Delta Z \frac{\nu}{1-\nu} \end{array} \right.$$

$$K(Z) = \frac{\sigma_H}{\sigma_V} = K_0 + \left[\left(K_0 - \frac{\nu}{1-\nu} \right) \Delta Z \right] \cdot \frac{1}{Z}$$

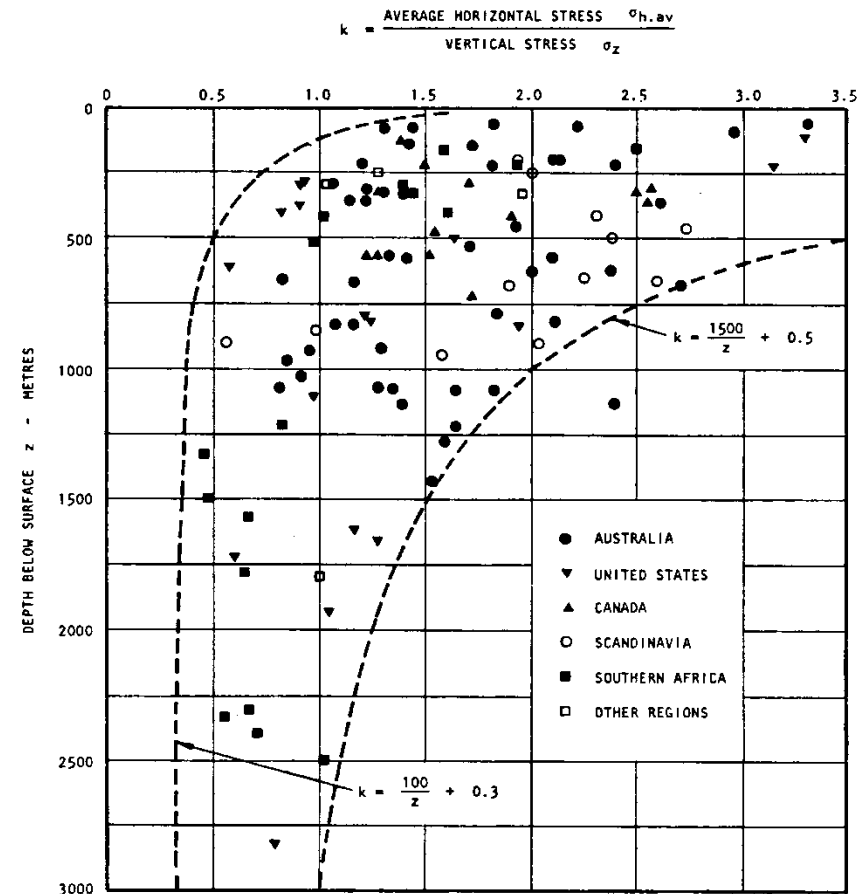
Si $K_0 > \nu/(1-\nu) \Rightarrow K > K_0$ al quitar ΔZ !

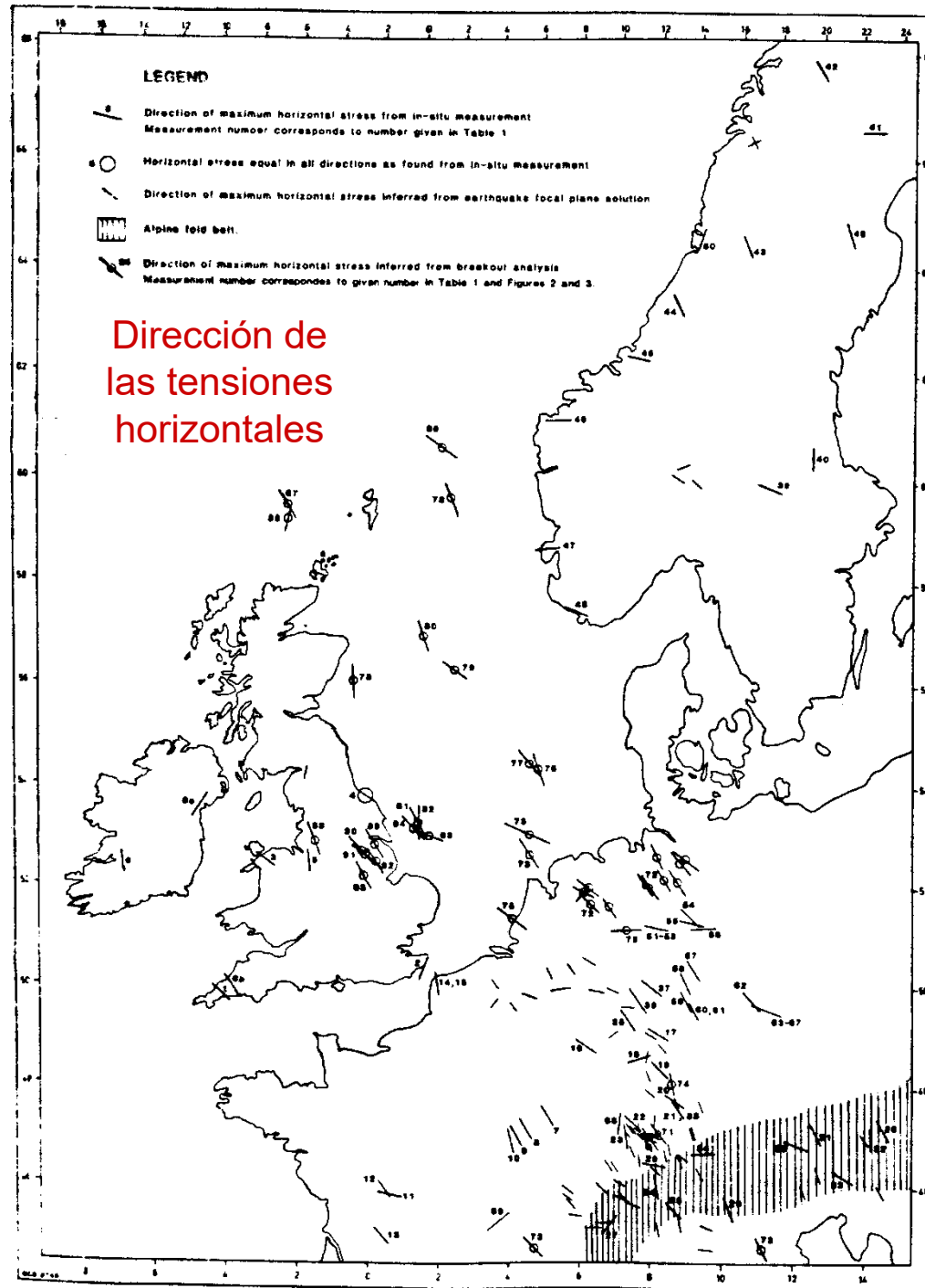
Tensión horizontal

- La erosión tiende a aumentar el valor de K , con lo cual la tensión horizontal puede ser mayor que la vertical a profundidades bajas:

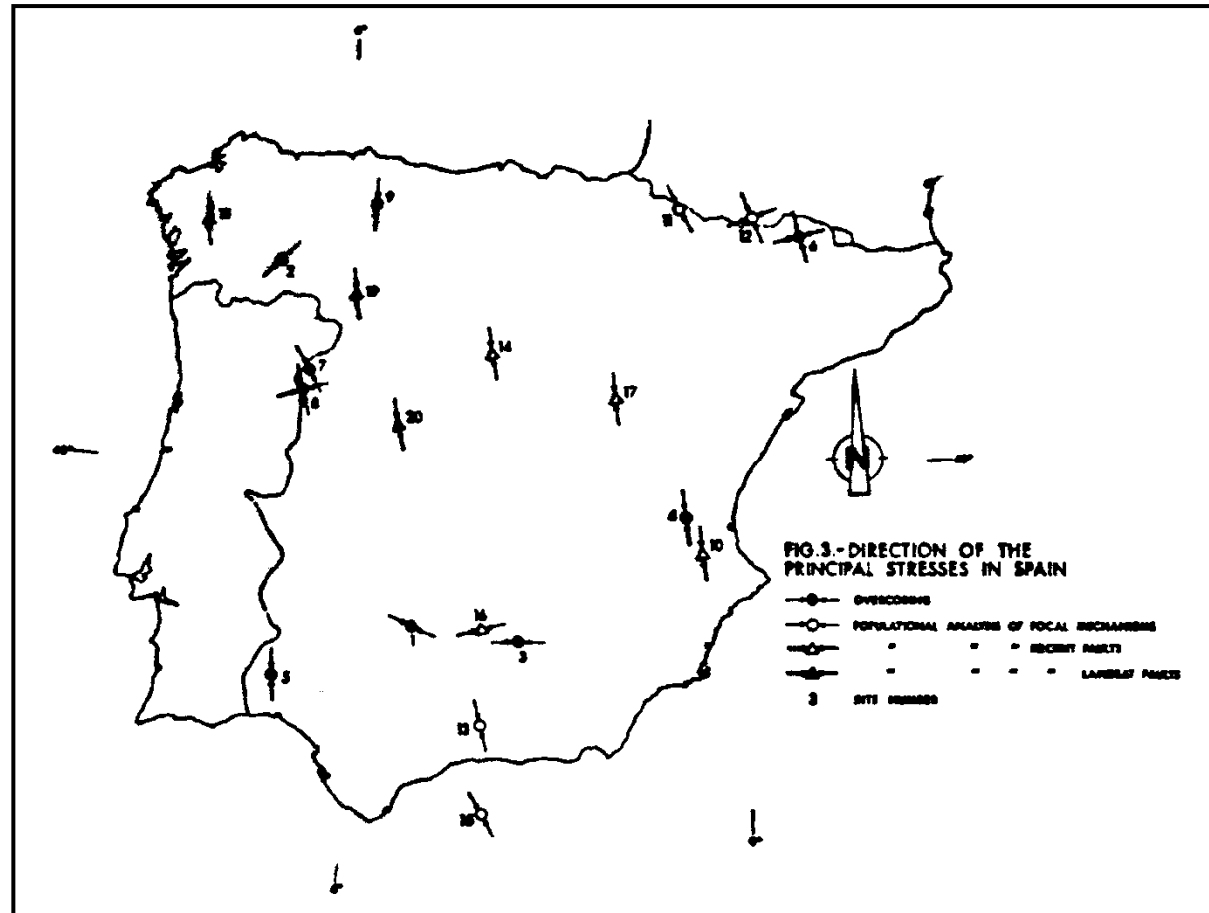
$$0.3 + \frac{100}{Z} < K(Z) < 0.5 + \frac{1500}{Z}$$

(Hoek & Brown)

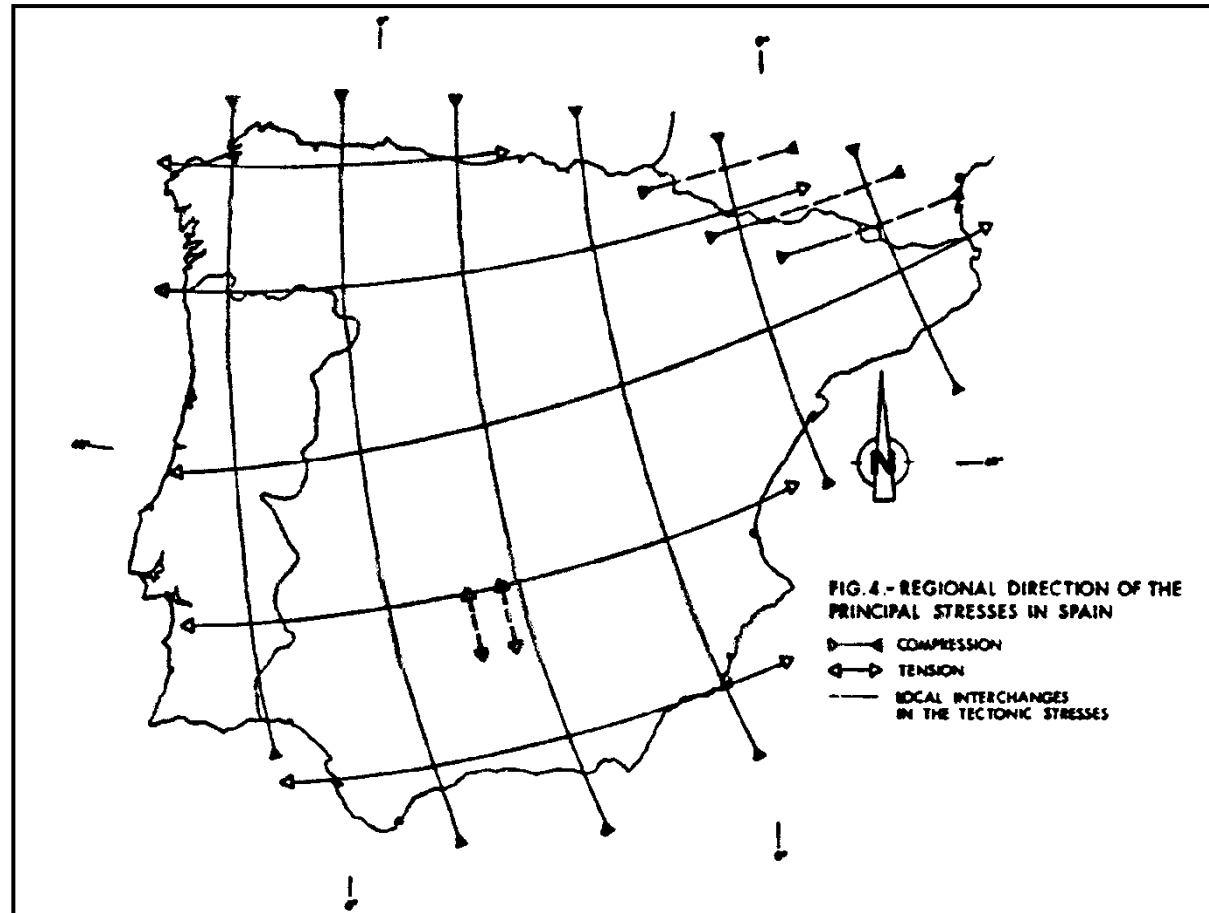




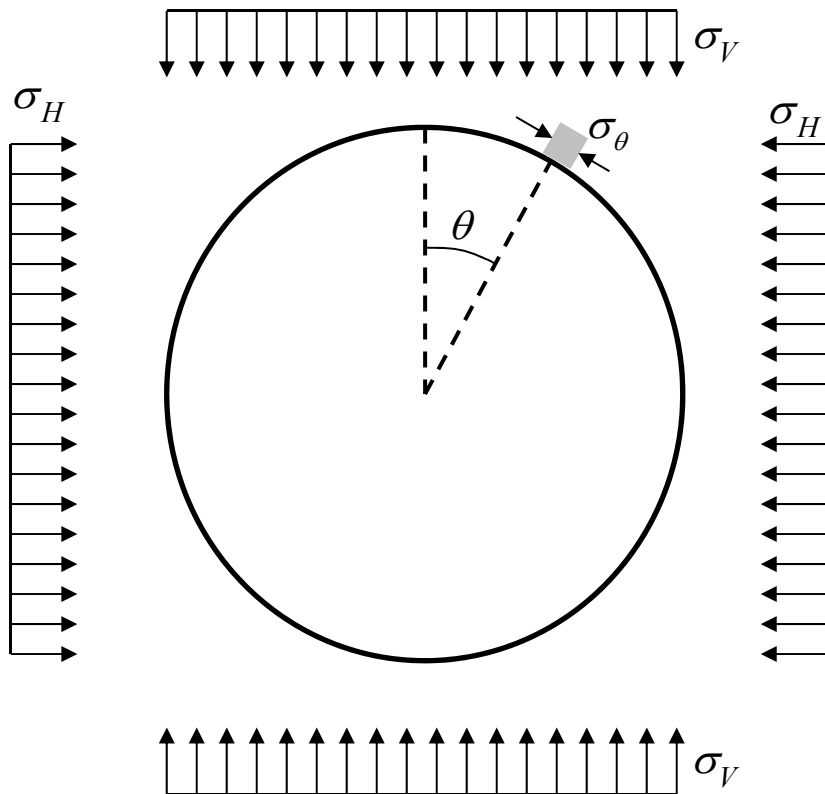
Tensión horizontal



Tensión horizontal



Cavidad circular



$$\sigma_{\theta} = \sigma_V \left[(1 + \lambda) - 2(1 - \lambda) \cos 2\theta \right]$$

$$\rightarrow \lambda = \frac{\sigma_H}{\sigma_V}$$

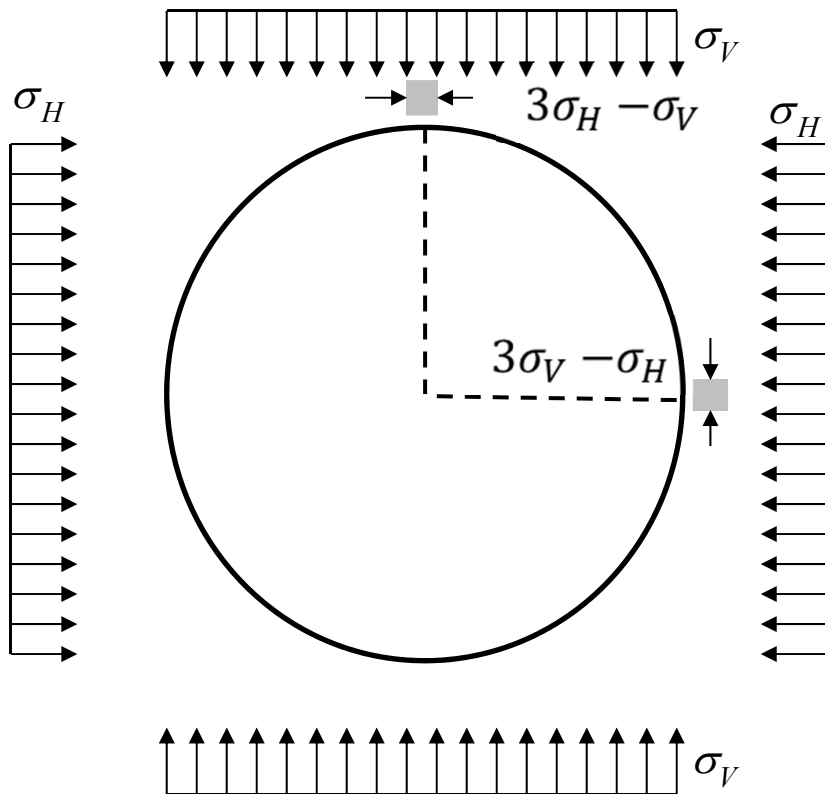
$$\dots \theta = 0 \Rightarrow \sigma_{\theta} = \sigma_V (-1 + 3\lambda)$$

$$\dots \theta = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \sigma_{\theta} = \sigma_V (3 - \lambda)$$

λ	$\sigma_{\theta}(\theta = 0)$	$\sigma_{\theta}(\theta = \pi/2)$
1/3	0	$\frac{8}{3}\sigma_V$
1	$2\sigma_V$	$2\sigma_V$
3	$8\sigma_V$	0

Cavidad circular

(tensiones cerca de la superficie)



4

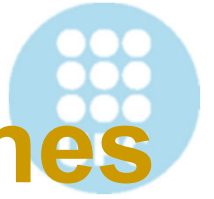
Procedimientos de medida de tensiones *in situ*

Introducción

- Medidas in situ: **sondeos, afloramientos, paredes de galerías subterráneas**, calculadas a partir de medidas de desplazamientos
- Todos los métodos: **alterar la roca** para crear una respuesta que pueda ser medida
- Precisiones normalmente **bajas**, se aceptan resultados si el error es menor a 0.3 MPa
- Determinación de 6 parámetros independientes: las 6 componentes del tensor de tensiones

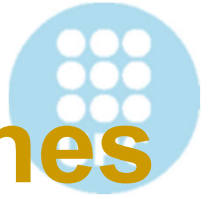
Métodos de medición

- Métodos directos
 - Liberación de tensiones
 - **Overcoring**
 - *CSIR Doorstopper*
 - *USBM Deformation gage*
 - *LNEC Triaxial Solid Inclusion Cell*
 - *CSIRO Triaxial Hollow Inclusion Cell*
 - Restitución de tensiones
 - **Gato plano**
 - Fractura hidráulica



Métodos de liberación de tensiones

- Liberación de tensiones + elasticidad lineal
- Perforación de un agujero cilíndrico hasta el punto de estudio
- A partir de este punto, perforar otro agujero cilíndrico concéntrico al anterior, pero de diámetro inferior
- Instrumentar
- Ejecución del overcoring: corte en forma de corona circular alrededor del segundo hueco cilíndrico



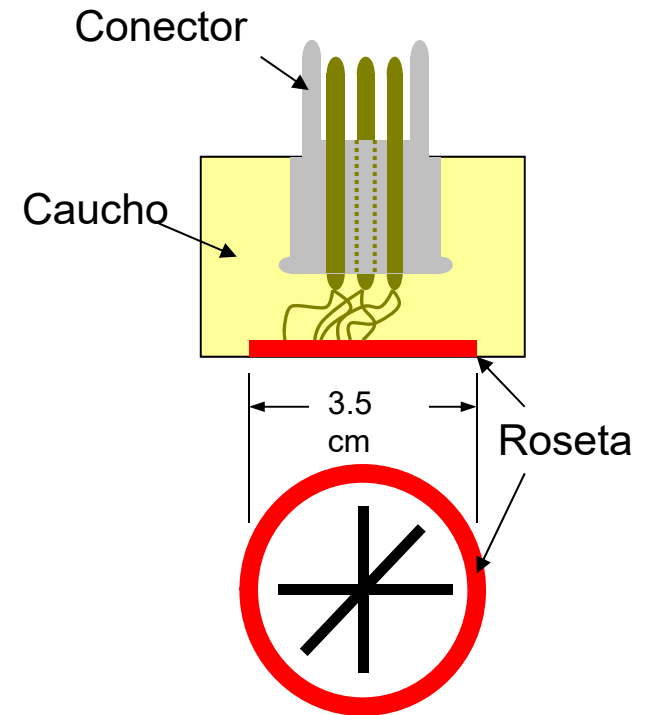
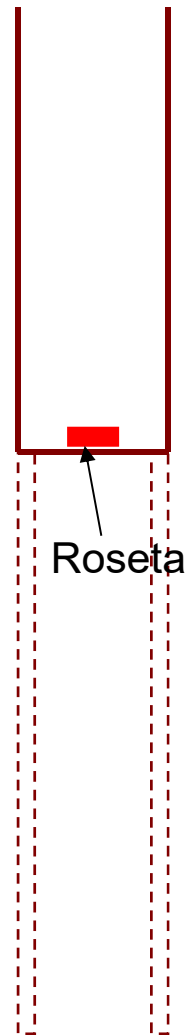
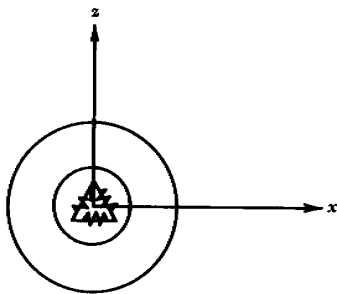
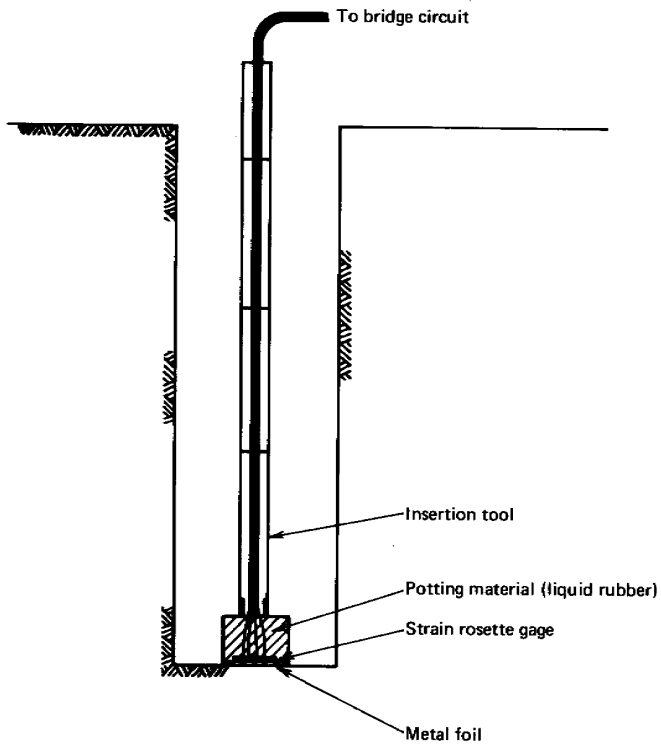
Métodos de liberación de tensiones

- El material que queda en su interior se descarga y se deforma
- Se mide la deformación mediante la instrumentación instalada
- La disposición de la instrumentación caracteriza cada método.
- Células:
 - biaxiales (3 componentes del tensor de tensiones)
 - triaxiales (6 componentes del tensor de tensiones)

Doorstopper de Leeman (1971)

- Uno de los métodos pioneros en la determinación de tensiones in situ y aún hoy en día está bastante extendido.
- Ventajas frente a otros alternativos a gran profundidad: rapidez de ejecución y menor tamaño requerido para el taladro de sobreperforación (diámetro y longitud)
- Adecuado cuando la roca está fracturada, sometida a grandes tensiones ya que se necesita recuperar un testigo más corto
- Inconveniente (al igual que los demás métodos que trabajan con galgas extensométricas): no se pueden emplear sumergido o en ambientes muy húmedos

Doorstopper de Leeman (1971)



Medida de deformaciones en tres direcciones

Doorstopper de Leeman (1971)

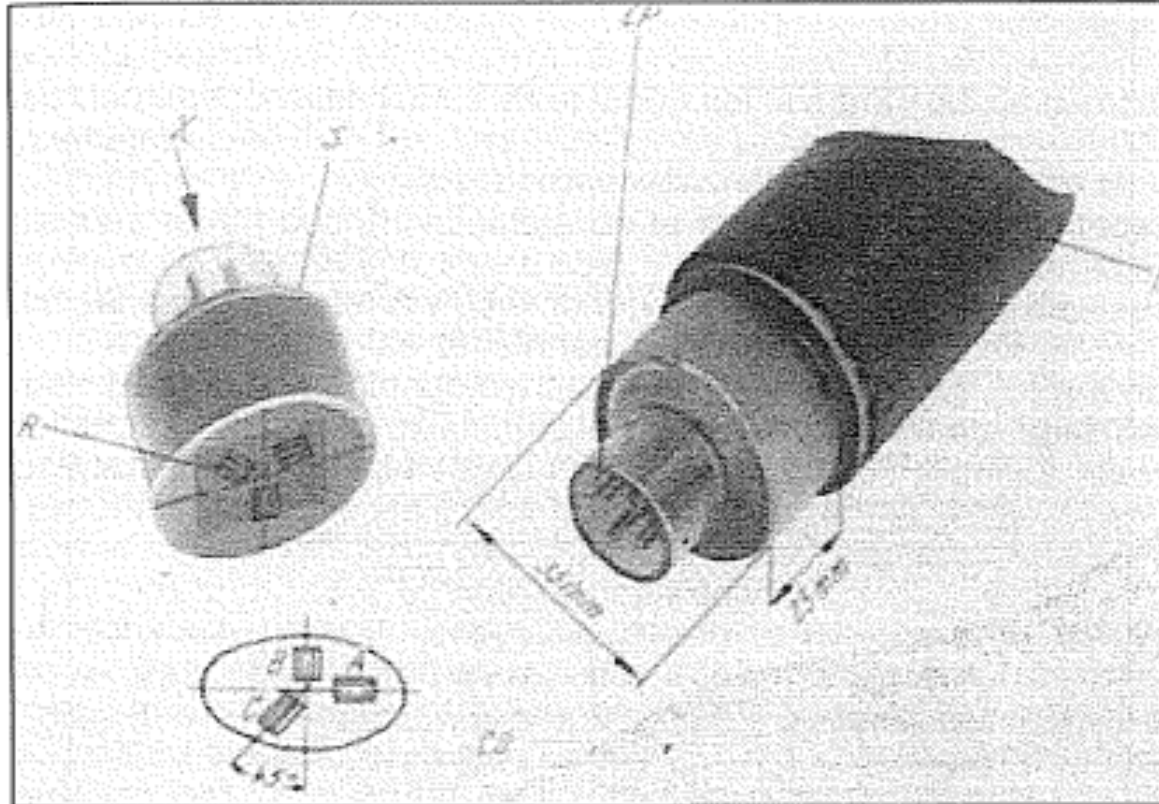
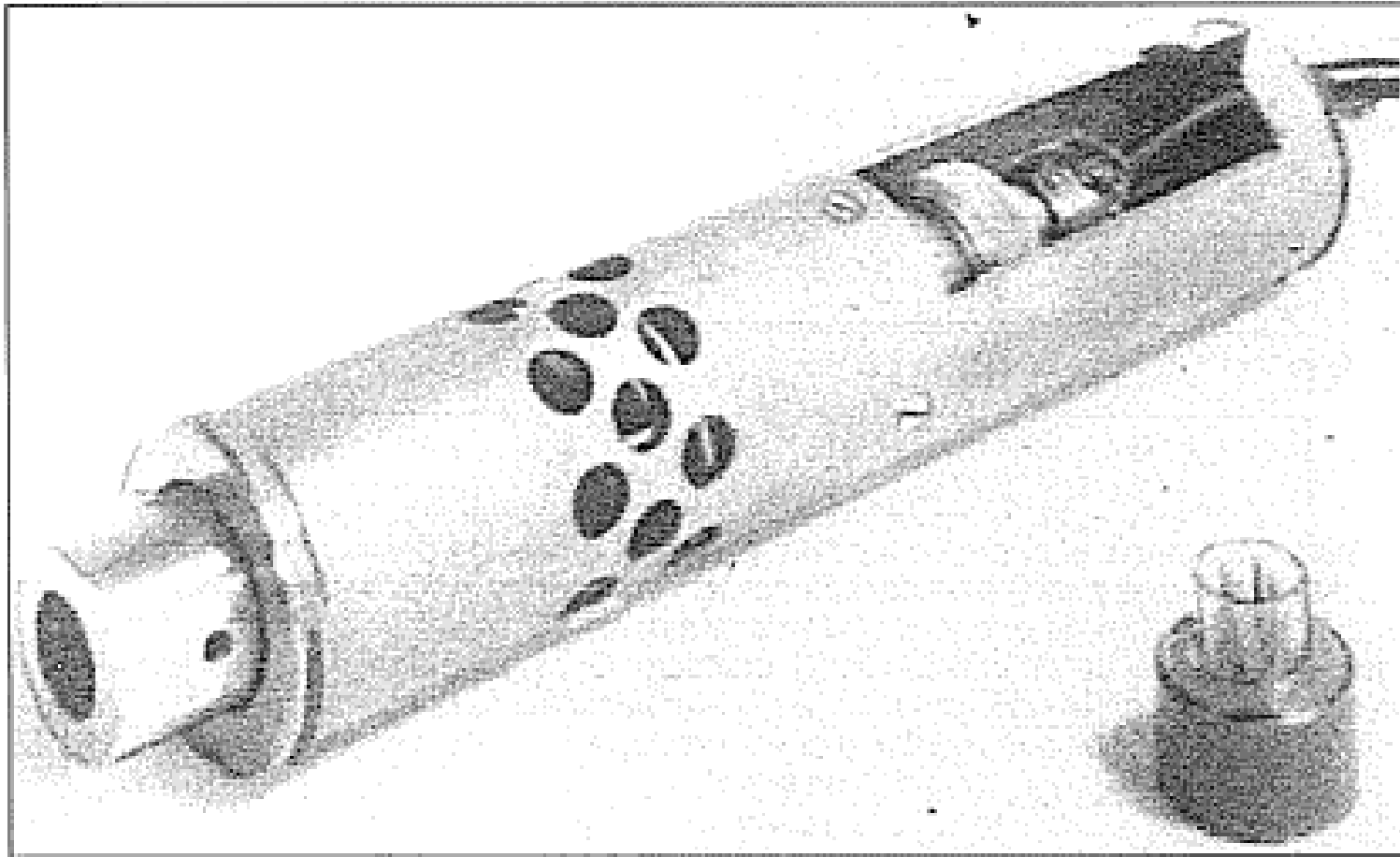


Fig. 10.—A la izquierda, «doorstopper» en el que se aprecia la roseta de extensómetros. A la derecha, «doorstopper» pegado a un testigo.
R: roseta de bandas extensométricas; S: Lámina de plástico; D: Testigo
CG: Configuración de los extensómetros en el fondo del taladro, visto en la dirección del eje x.
(Leeman, 1971)

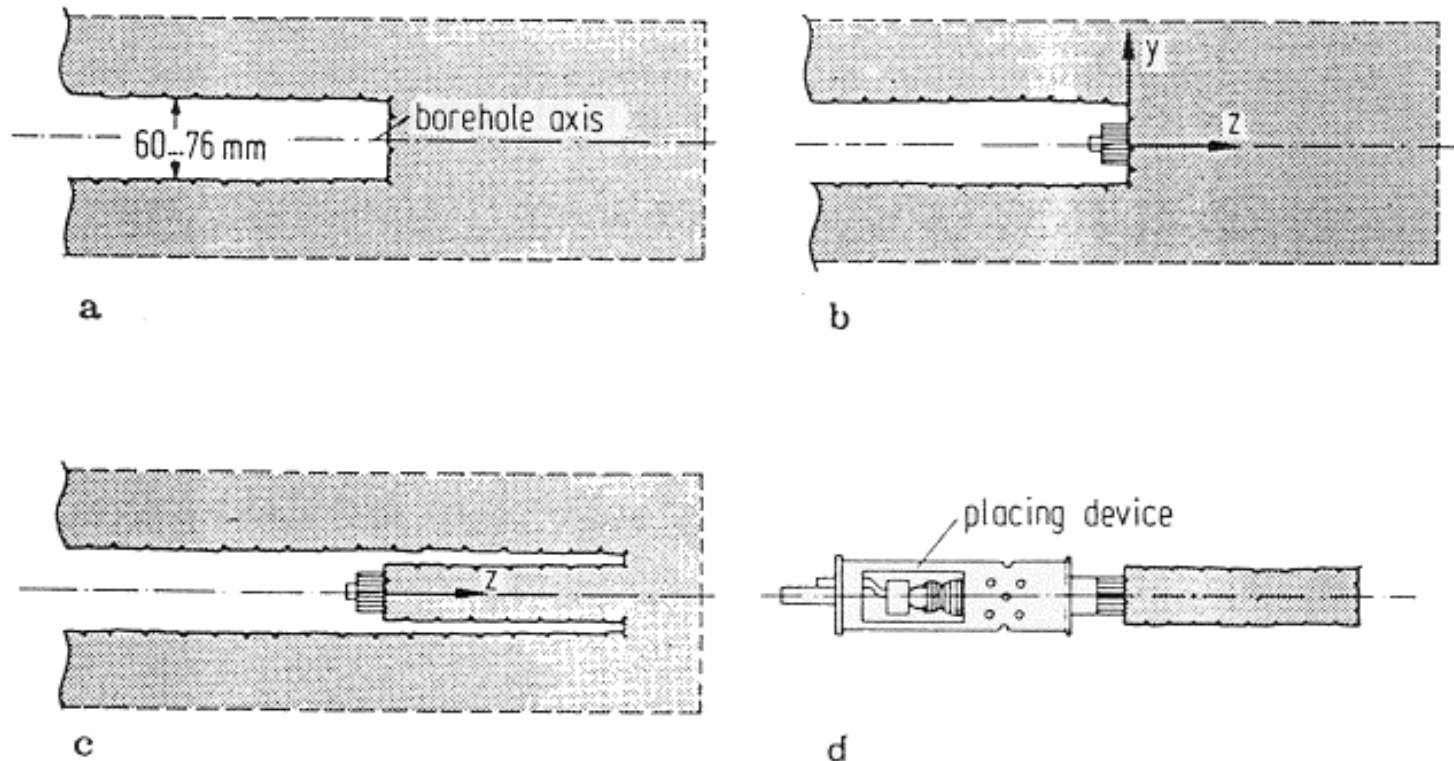
Doorstopper de Leeman (1971)



*Fig. 11.—Dispositivo de instalación y «doorstopper» en primer plano.
(Leeman, 1971)*

Doorstopper de Leeman (1971)

- Es una célula biaxial, desarrollada por el CSIR (Council for Scientific and Industrial Research) en Sudáfrica (Leeman)



Doorstopper de Leeman (1971)

- Perforación de un agujero cilíndrico de unos 60 a 76 mm, hasta la posición en que se quiere hacer el estudio
- Se coloca la célula en el fondo del agujero, pegada a la pared
- Ejecución del overcoring
- Las deformaciones son recogidas por las galgas del instrumento, y medidas al mismo tiempo
- Se extrae el instrumento junto con la porción de roca que quedaba dentro de la corona cilíndrica, para determinar en el laboratorio las constantes elásticas
- Son necesarios al menos 2 (generalmente se hacen 3) ensayos en 2 (3) agujeros no paralelos para determinar las 6 componentes del tensor de tensiones
- El fondo del agujero debe ser plano y estar limpio y seco; se requiere **buena cementación**

Doorstopper de Leeman (1971)

- Se **miden** las deformaciones en la roseta y se **calculan** las *deformaciones*, *tensiones* y *direcciones* principales:

$$\left. \begin{matrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{matrix} \right\} = (\varepsilon_H + \varepsilon_V) \pm \sqrt{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_H + \varepsilon_V)^2 + (\varepsilon_H - \varepsilon_V)^2}$$

$$\tan \theta_1 = \frac{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_H)}{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_H + \varepsilon_V)}$$

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2) \quad \sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1)$$

- Las tensiones pueden estar distorsionadas por la apertura del taladro

USBM deformation gage

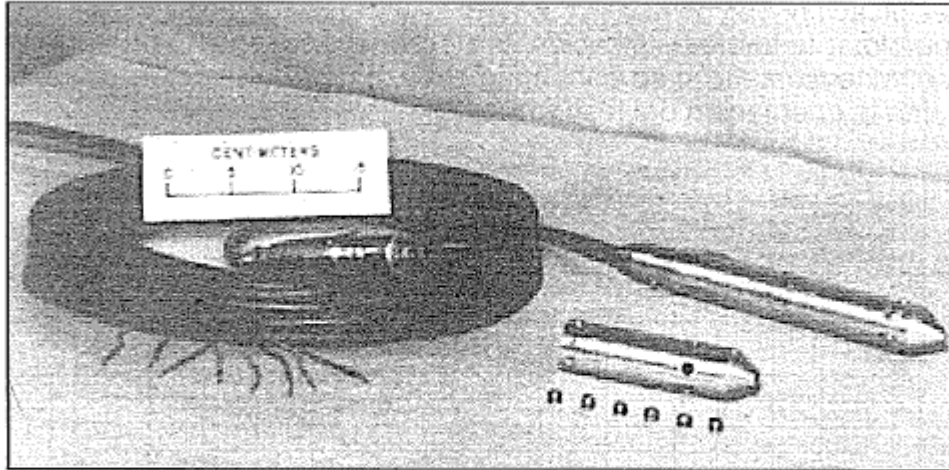


Fig.4.—Célula USBM. En la parte inferior de la fotografía se aprecia una célula desmontada, con los pistones de contacto quitados.
(ISRM, 1984)

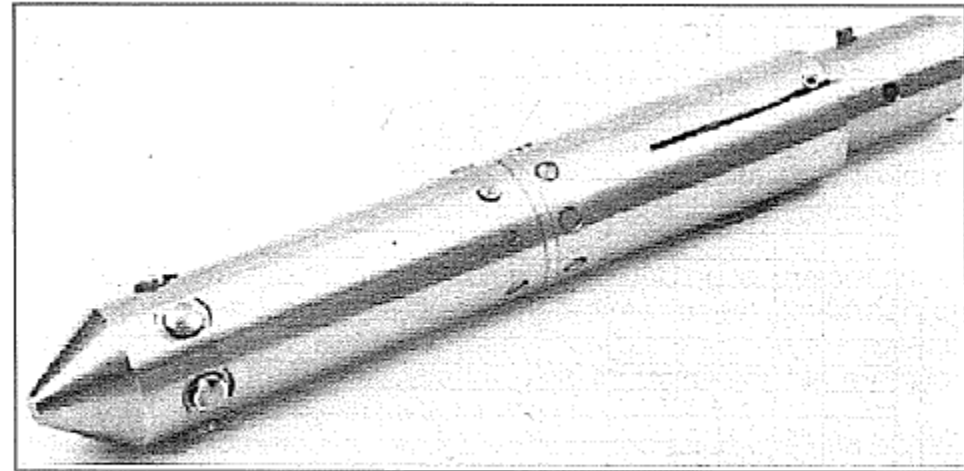


Fig. 5.—Célula USBM.
(Franklin y Dusseault, 1989)

USBM deformation gage

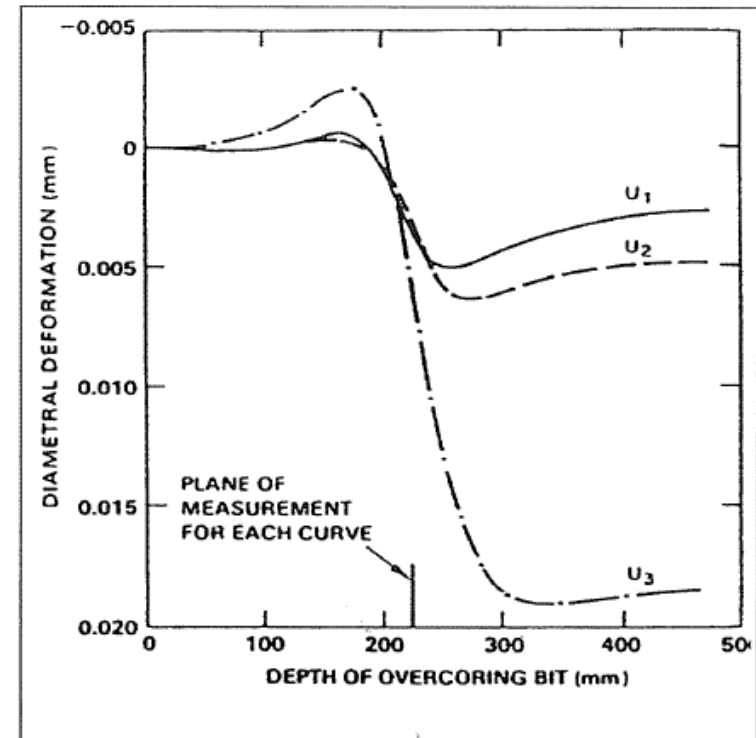
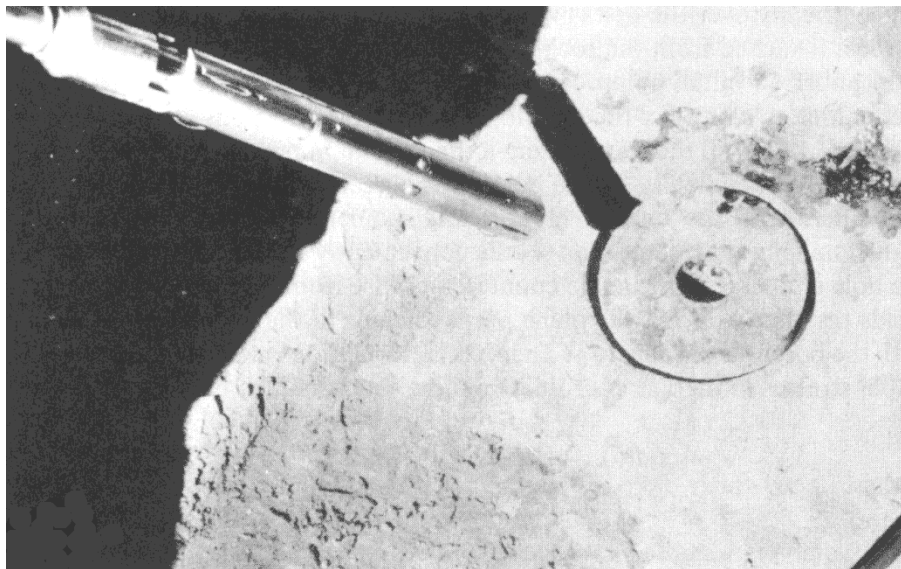
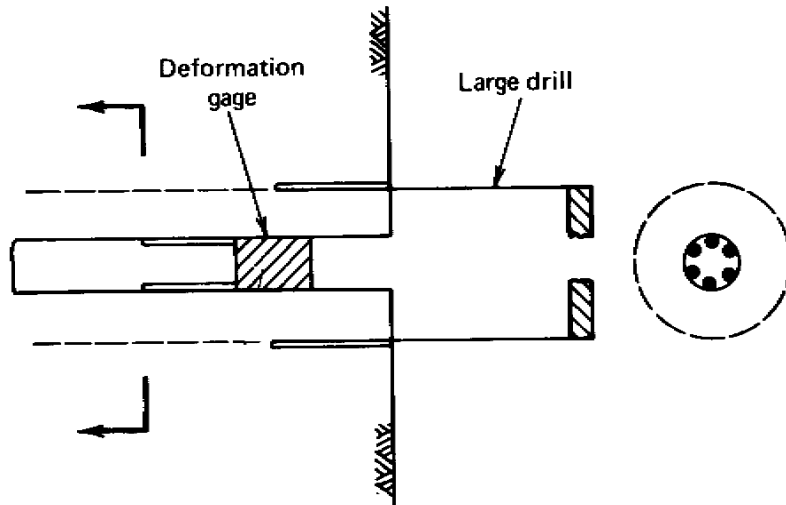


Fig. 7.—Registro típico de la deformación del taladro con la sobretestificación (ISRM, 1987)

USBM deformation gage

- Célula biaxial que proporciona tensiones sobre un plano
- 6 "botones" repartidos en el perímetro que ponen en contacto las paredes del agujero y las galgas situadas en el interior del aparato, que miden los movimientos
- Al ejecutar el overcoring, las tensiones se liberan y se producen movimientos, recogidos por los botones y transmitidos a las galgas (cada 10 a 20 mm de penetración)
- Es aconsejable continuar perforando hasta que los registros revelen que no aparecen variaciones sensibles en la longitud de los extensómetros al incrementar la profundidad
- La parte del material cortado se extrae para determinar, en el laboratorio, las constantes elásticas

USBM (US Bureau of Mines) deformation gage



- Se determina el estado tensional de la roca midiendo la variación de tres diámetros de un taladro durante la sobreperforación
- Cada medición proporciona 3 componentes del tensor de tensiones (según el plano perpendicular al eje del taladro $\Rightarrow$ como mínimo dos mediciones en direcciones perpendiculares (suelen hacerse tres))
- En ensayos profundos, llevados a cabo desde excavaciones subterráneas, las medidas deben realizarse fuera de la zona de influencia de la excavación (no superiores a 30 m, aunque se ha llegado a 70 m)
- El instrumento es reutilizable
- Al contrario que los métodos que utilizan extensómetros fijados a la pared del taladro, no se requiere que el taladro esté seco y se puede realizar en sondeos llenos de agua (del nivel freático o de la propia excavación)

USBM deformation gage

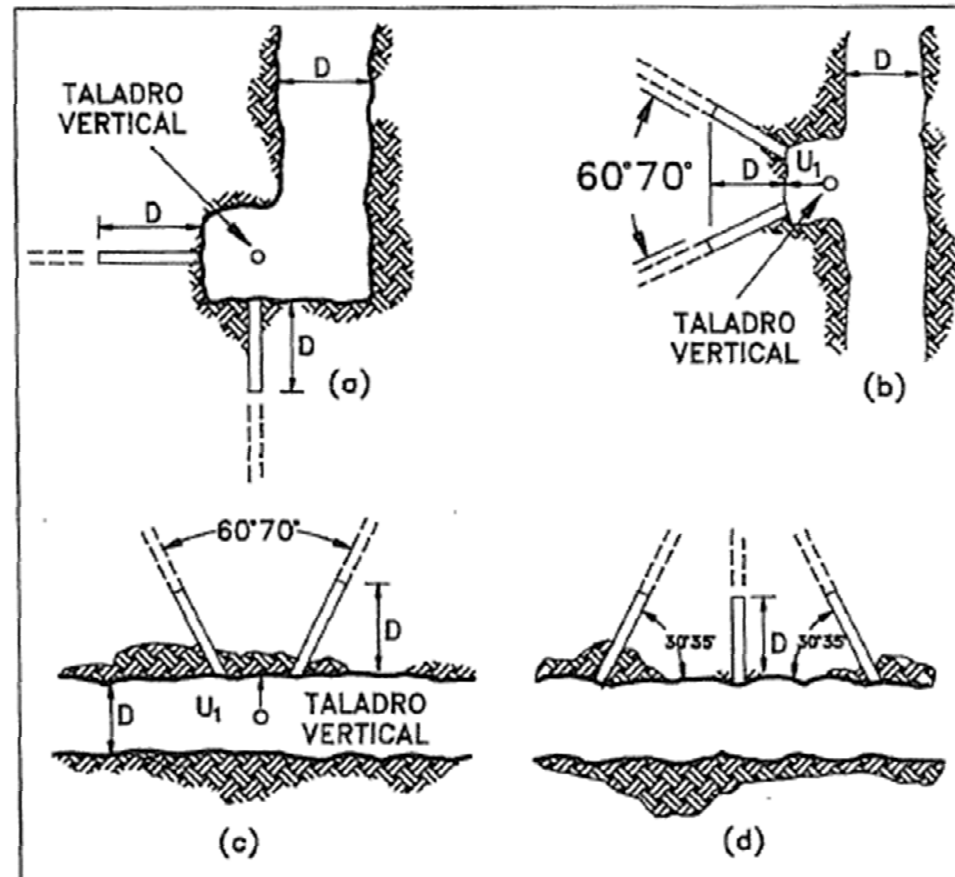


Fig. 3.—Configuraciones de perforación.
(ISRM, 1987)

USBM deformation gage

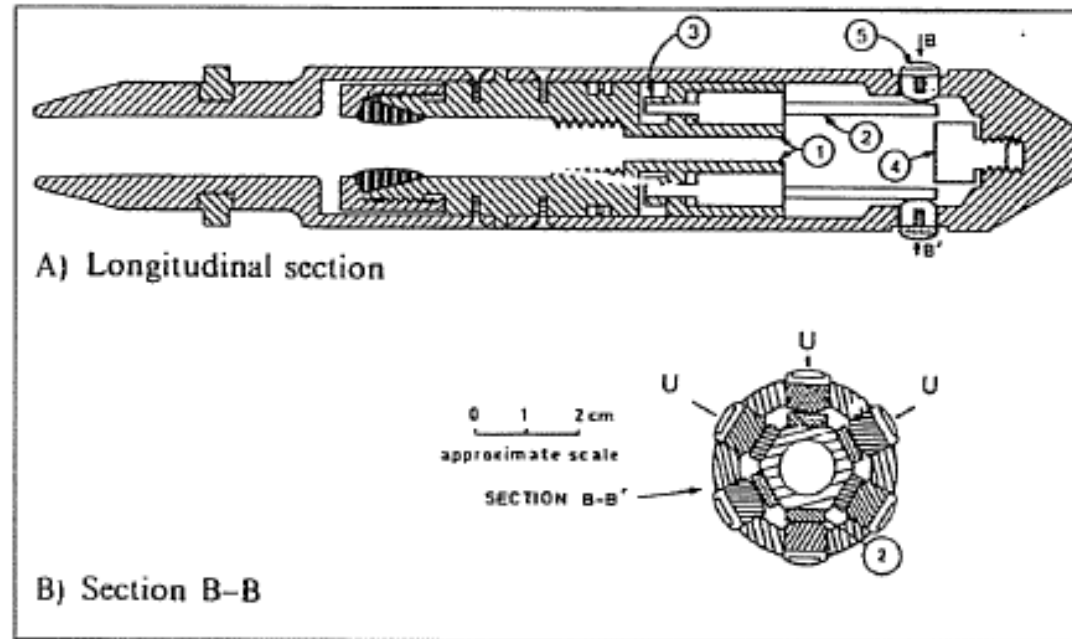


Fig. 8.—Esquema interno de una célula USBM

1. Soporte con cinta registradora; 2. Transductor; 3. Bloqueo; 4. Tapón de seguridad; 5. Pistón
(Hooker, 1974)

USBM deformation gage

- Se mide el cambio de diámetro (Δd) al descargar:

$$\Delta d(\theta) = \sigma_x f_1 + \sigma_y f_2 + \sigma_z f_3 + \tau_{xz} f_4$$

$$f_1 = d(1 + 2\cos 2\theta) \frac{1 - \nu^2}{E} + d \frac{\nu^2}{E}$$

$$f_2 = -d \frac{\nu}{E}$$

$$f_3 = d(1 - 2\cos 2\theta) \frac{1 - \nu^2}{E} + d \frac{\nu^2}{E}$$

$$f_4 = d(4\sin 2\theta) \frac{1 - \nu^2}{E}$$

USBM deformation gage

- Se plantea un sistema de tres ecuaciones que permite calcular las tensiones:

$$\begin{bmatrix} \Delta d(\theta_1) - f_2(\sigma_y) \\ \Delta d(\theta_1 + 60) - f_2(\sigma_y) \\ \Delta d(\theta_1 + 120) - f_2(\sigma_y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{13} & f_{14} \\ f_{21} & f_{23} & f_{24} \\ f_{31} & f_{33} & f_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \end{bmatrix}$$

- Es necesario recuperar el testigo para medir E y ν (hay que hacerlo con roca intacta)

USBM deformation gage

- Hay que conocer (o suponer) el valor de σ_y
- Las dos perforaciones tienen que ser concéntricas: habitualmente no se puede perforar de forma satisfactoria más de 5 m
- Dependencia lineal de las constantes elásticas
- Necesidad de usar cabezales de perforación de gran diámetro (hasta 15 cm)
- Problemas de fractura de la roca si el diámetro exterior es menor de, como mínimo, dos veces el diámetro interior

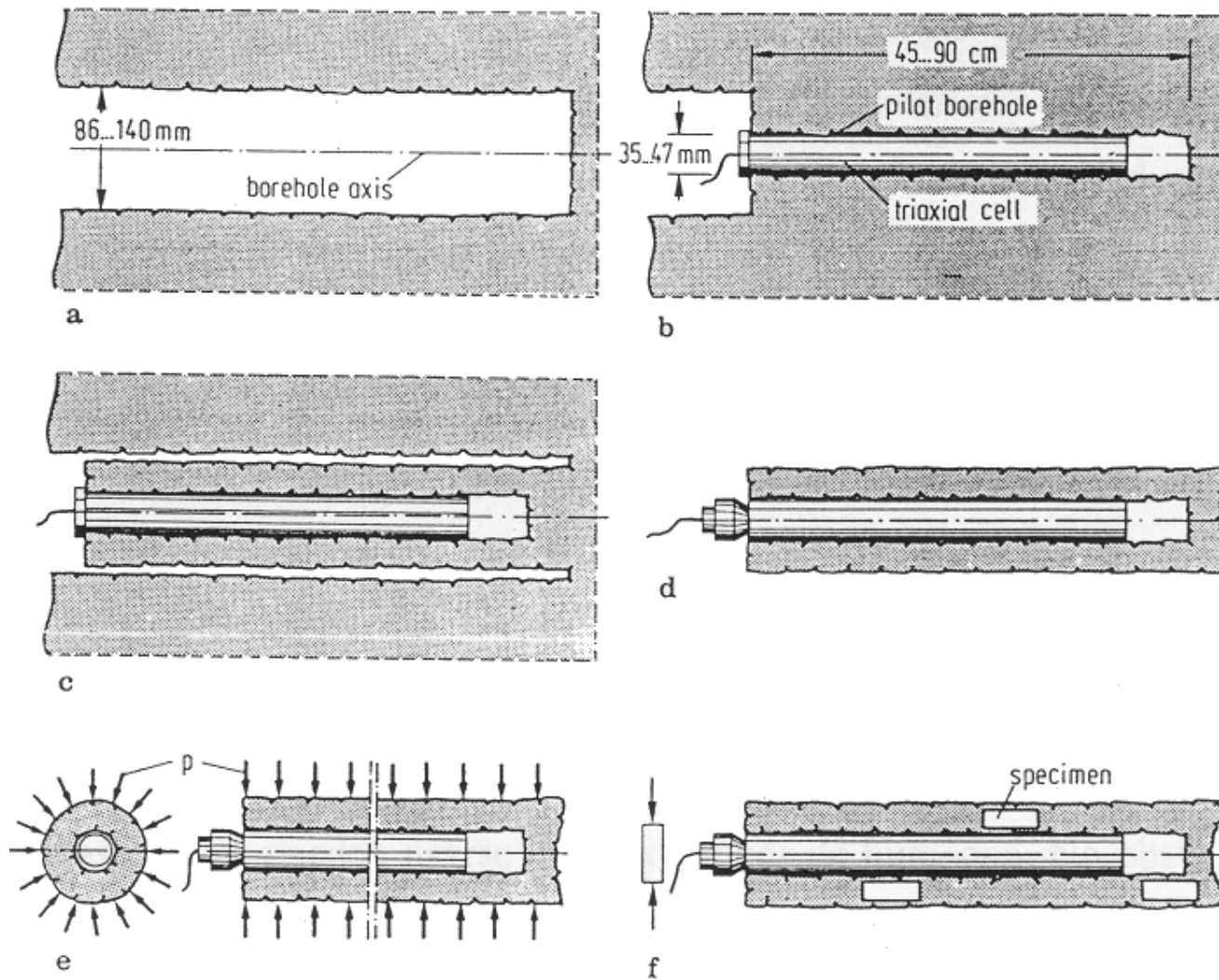
Células triaxiales

- Determinación del estado tensional completo con una única medición (excepción: USBM deformation gage)
- Perforación de un agujero cilíndrico de 86 a 140 mm de diámetro
- Perforación de un segundo agujero cilíndrico de menor diámetro (35 a 47 mm) concéntrico con el primero y a partir del fondo de éste
- Introducción de la célula triaxial en este segundo agujero

Células triaxiales

- Overcoring alrededor del segundo agujero y del mismo diámetro que el primero $\Rightarrow$ liberación de cargas
- Extracción de la célula y del material que la rodea
- Si es posible, el material extraído debe ser sometido a una carga de compresión que devuelva la muestra a sus dimensiones iniciales, siendo esta carga equivalente al estado tensional inicial, previo al corte
- Extracción de muestras del material que rodea la célula para poder determinar en el laboratorio las constantes elásticas

Células triaxiales



Células triaxiales – tipos

- **Tipo 1:**
 - Células en que las galgas extensométricas se adhieren directamente a la roca mediante un adhesivo
 - Leeman, CSIR, Sudáfrica
 - Avance respecto a la célula biaxial, un único ensayo necesario
 - Adhesión de las galgas a la pared de la perforación difícil si la superficie no es lisa
 - Problemas con la humedad, fuentes de agua
 - Modificación *Interfels*: introducir un cilindro plástico hueco que actúa como refuerzo (no confundir con Tipo 3)

Células triaxiales – tipos

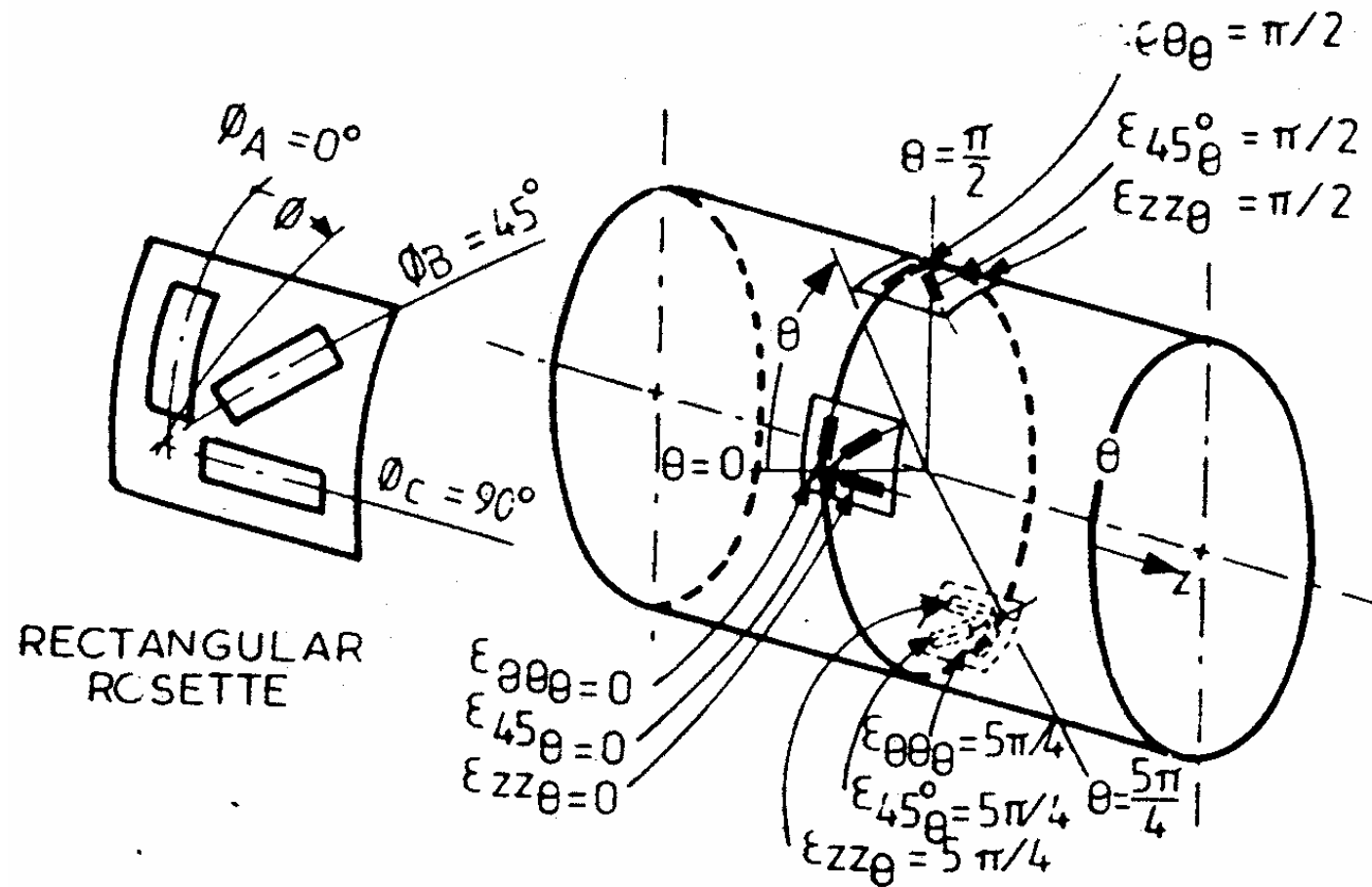
- **Tipo 2:**
 - Células que consisten en un cilindro sólido en cuya superficie se encuentran adheridas las galgas extensométricas; el propio cilindro sella el agujero (*solid inclusión cell*)
 - Rocha y Silverio, LNEC, Portugal
 - Pueden usarse en condiciones húmedas
 - Pierden efectividad durante el overcoring debido a la rigidez de la célula y a las tracciones y a las tensiones de corte que se producen durante el proceso

Células triaxiales – tipos

- **Tipo 3:**

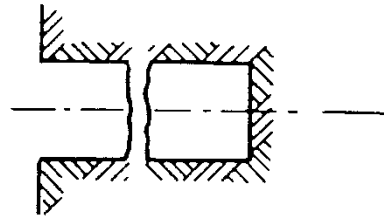
- Células consistentes en un cilindro hueco de paredes delgadas que se introduce en el agujero, sobre cuya superficie se encuentran adheridas las galgas; el propio cilindro sella el agujero (*CSIRO hollow inclusión cell*)
 - Rocha, LNEC, Portugal y Worotnicki y Walton, CSIRO, Australia
 - Menor rigidez que las del Tipo 2
 - Llevan adheridas 9 o 12 galgas en rosetas de 3
 - Redundancia de resultados

Triaxial Solid Inclusion Cell

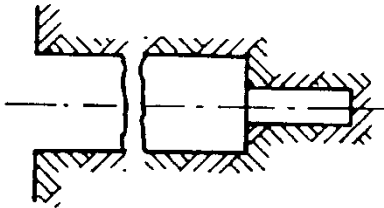


ϵ = STRAIN.

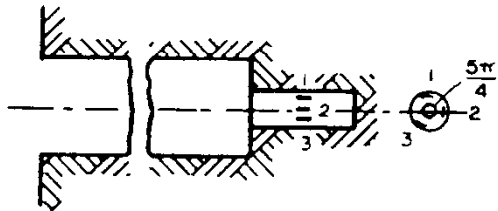
Triaxial Solid Inclusion Cell



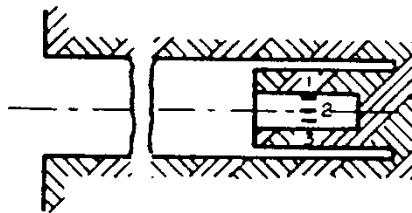
(a) NX BOREHOLE DRILLED TO THE DEPTH AT WHICH THE STRESS IS TO BE DETERMINED



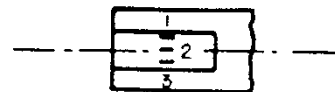
(b) EX BOREHOLE DRILLED FOR 18 INS. (SAY) INTO THE END OF THE BOREHOLE.



(c) THREE ROSSETTE GAUGES GLUED IN THE EX PORTION OF THE BOREHOLE AND STRAIN READINGS TAKEN.



(d) EX PORTION OF THE BOREHOLE OVERCORED USING AN NX CORING CROWN.



(e) CYLINDRICAL CORE REMOVED AND STRAIN READINGS TAKEN.

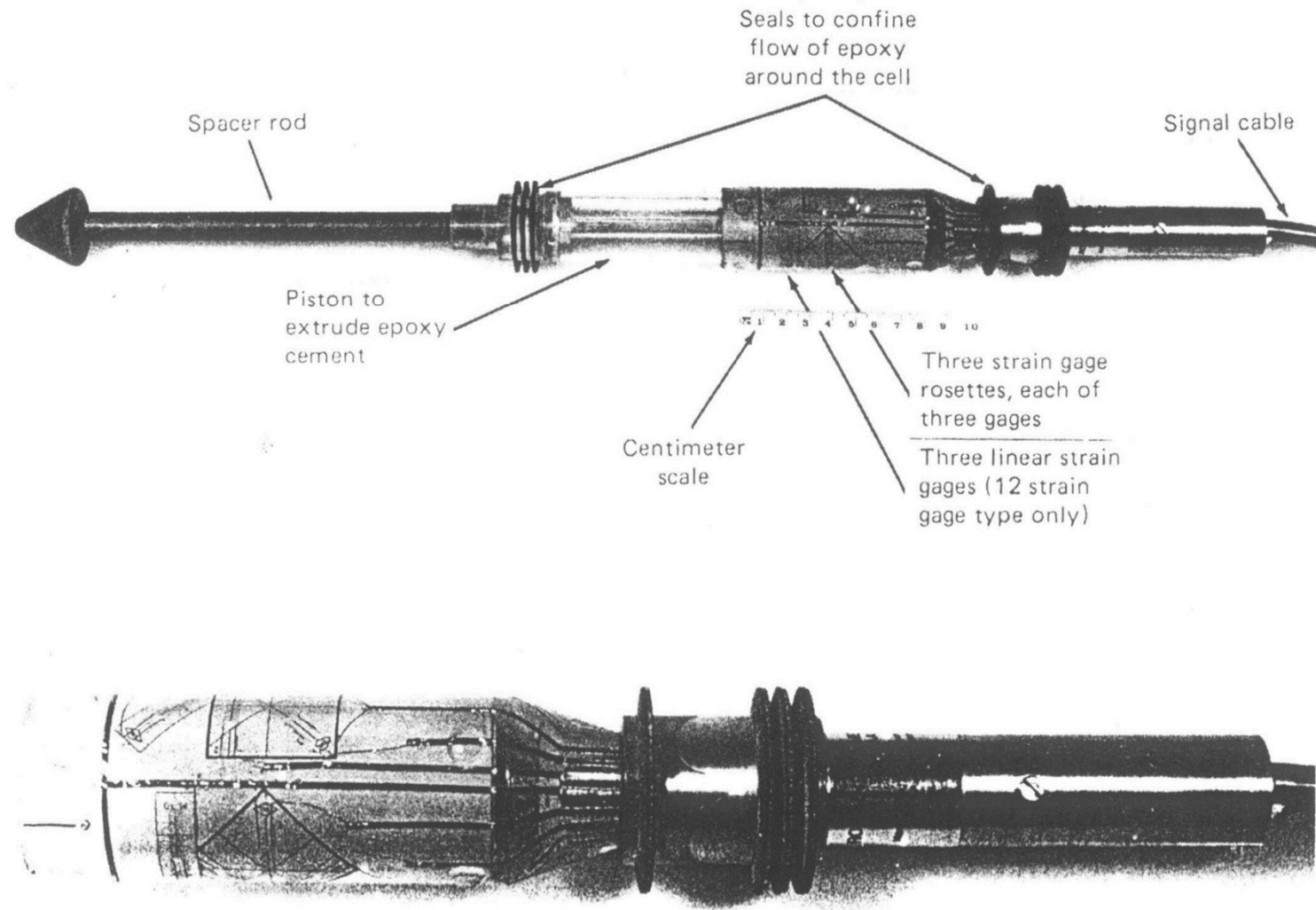
Triaxial Solid Inclusion Cell

- Permite la determinación de las seis componentes del tensor de tensiones:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_r & \tau_{r\theta} & \tau_{rz} \\ \tau_{r\theta} & \sigma_\theta & \tau_{\theta z} \\ \tau_{rz} & \tau_{\theta z} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad 6 \text{ componentes}$$

alternativamente: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$

Triaxial Solid Inclusion Cell



Triaxial Hollow Inclusion Cell



CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research

Organization)

- La célula va equipada con tres rosetas, cada una de las cuales lleva tres o cuatro extensómetros que se adhieren a la pared del taladro
- Sólo aplicable a rocas de comportamiento aproximadamente elástico y homogéneo. Debe realizarse en una zona no fracturada
- Inconveniente: el anclaje de los extensómetros si la roca está mojada (conviene entonces utilizar la célula USBM, por ejemplo)

Triaxial Hollow Inclusion Cell

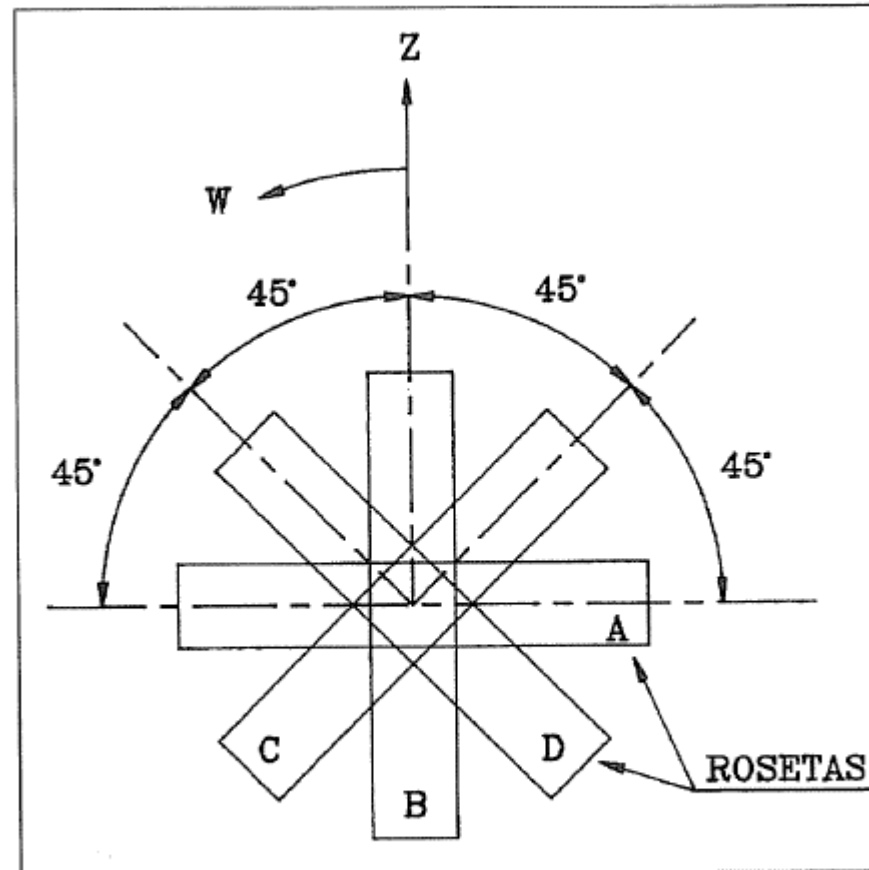
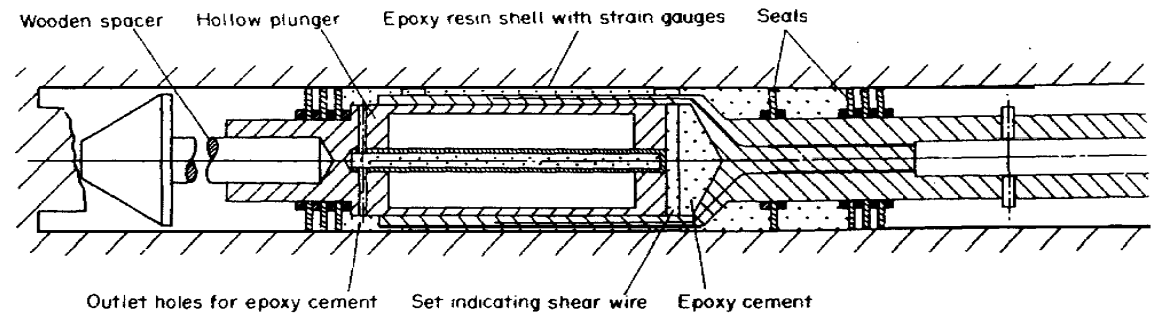
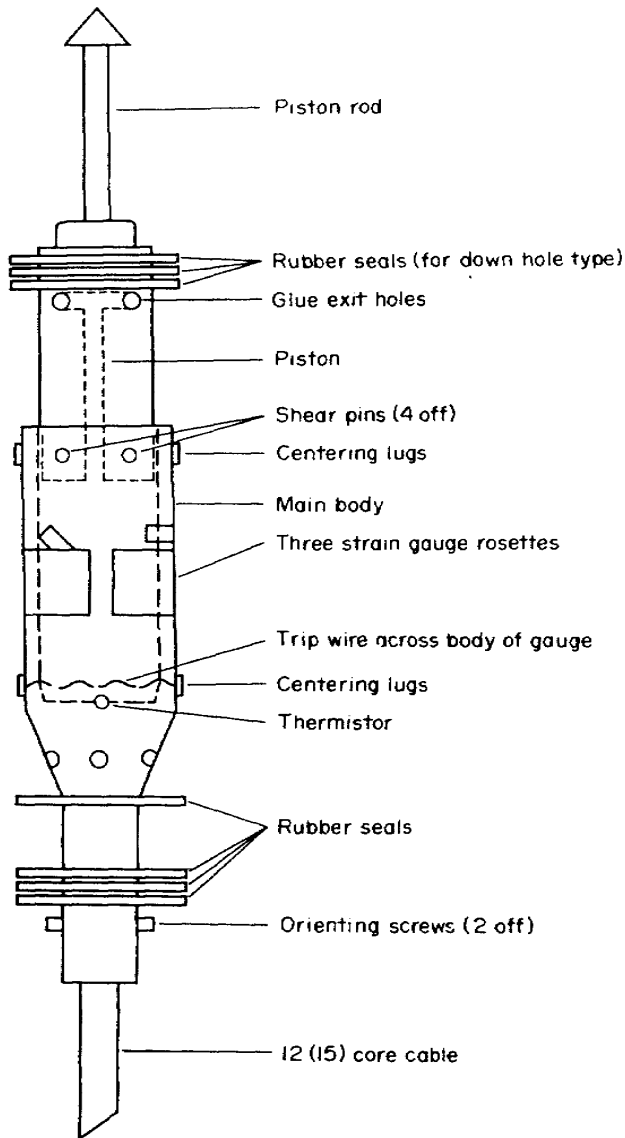
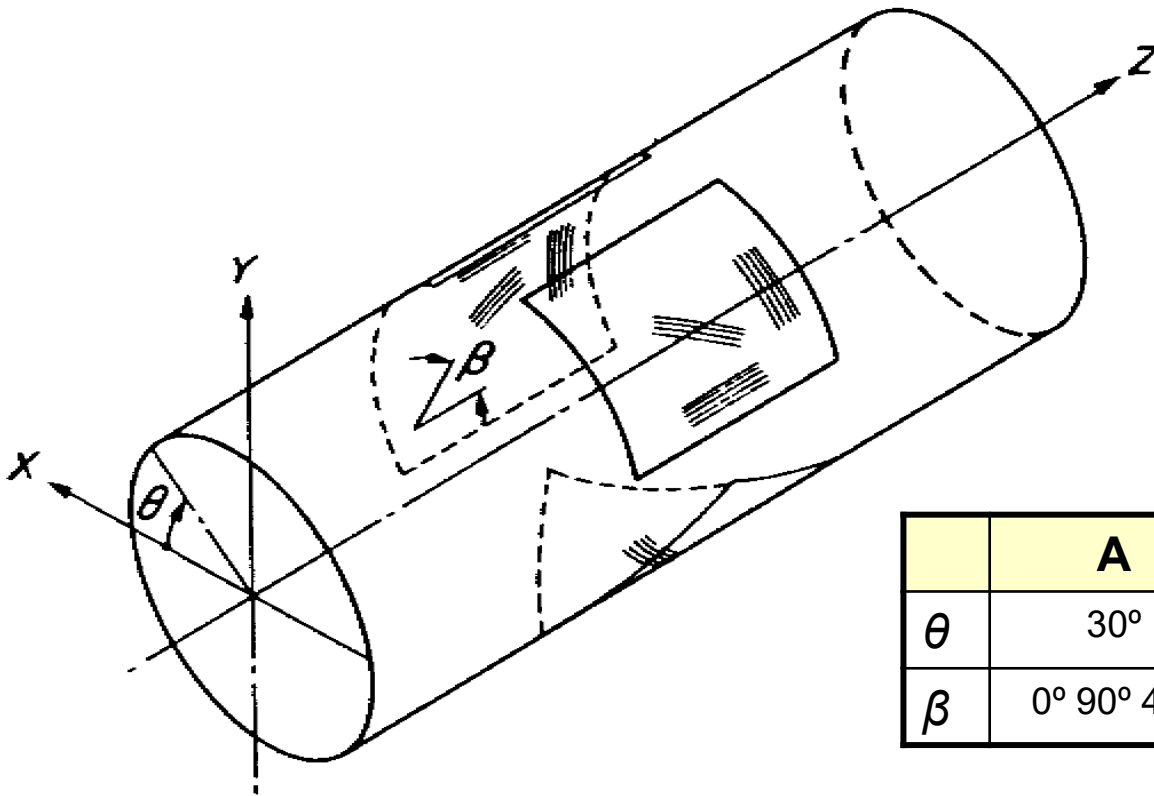


Fig. 19.—Configuración de una roseta de extensómetros vista desde el eje del taladro
(tomado de ISRM, 1987)

Triaxial Hollow Inclusion Cell



Triaxial Hollow Inclusion Cell



Posición de las galgas
extensométricas

CSIRO

	A	B	C
θ	30°	270°	150°
β	0° 90° 45°	45° 90° 135°	0° 90° 45°

PENDER

	A	B	C
θ	0°	90°	135°
B	0° 90° 45°	0° 90° 45°	0° 90° 45°

Métodos de restitución

- El método del gato plano (**flat jack test**)
 - Tincelin, France, 1952
 - El método consiste en realizar un **corte plano** en la pared de una galería o de un talud en el que se introduce un gato hidráulico
 - El estado tensional se obtiene en función del volumen de líquido (agua o aceite) necesario para que la roca **recupere el estado previo** a la realización del corte)

El método del gato plano

- Especialmente diseñado para la medición de tensiones paralelas a la superficie de una roca y en las proximidades de la misma
- En cada medición se determina la tensión en una única dirección. Se requiere un mínimo de seis medidas en direcciones independientes para determinar el tensor de tensiones
- Para aplicar este método a grandes profundidades se debe disponer de una galería o excavación, desde la cual poder llevar a cabo las medidas

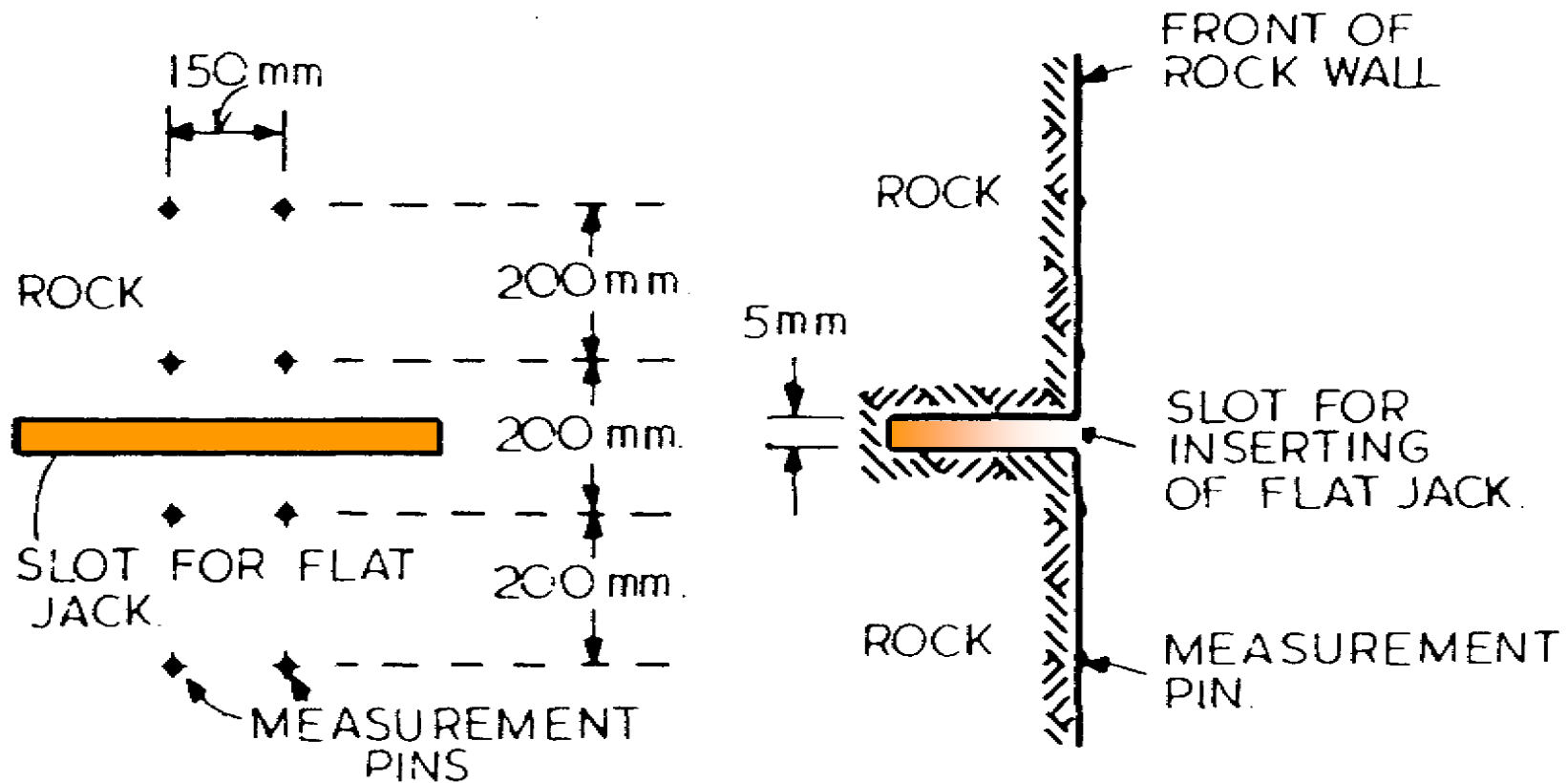
El método del gato plano

- Procedimiento:
 - Seleccionar una **pared óptima** para el ensayo (armazón para la maquinaria, etc.)
 - Instalar uno o más juegos de pernos como **puntos de referencia**, y medir su separación
 - Realizar un **agujero cilíndrico** de 1.5 m de profundidad y 17 cm de diámetro que servirá de guiado para la sierra circular — el testigo se puede utilizar para obtener E y ν en laboratorio
 - **Realizar el corte**. Los puntos de referencia se moverán (acercándose)

El método del gato plano

- Introducir el gato y **aplicar presión** hasta que los puntos de referencia vuelvan a su posición inicial. En este momento, la presión en el gato es aproximadamente igual a la tensión inicial normal al corte.
- Limitaciones
 - Las tensiones medidas se encuentran en la zona afectada por la galería de reconocimiento

El método del gato plano



a FRONT VIEW OF SLOT IN ROCK.

b SECTION THROUGH SLOT IN ROCK WALL.

El método del gato plano

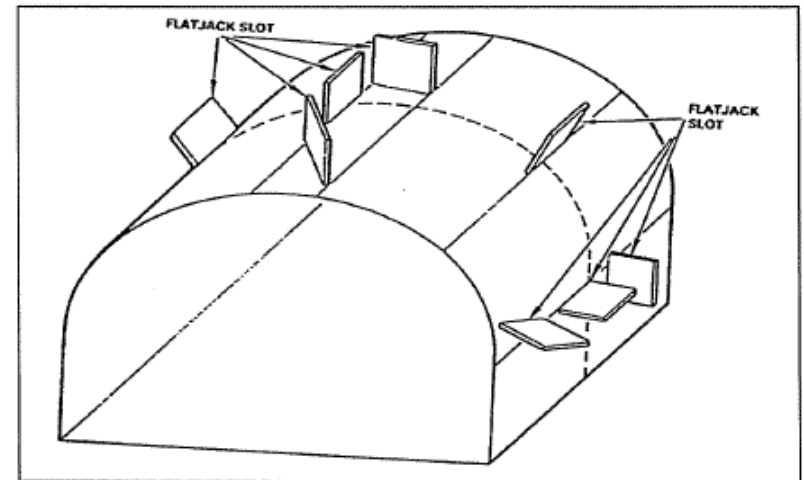
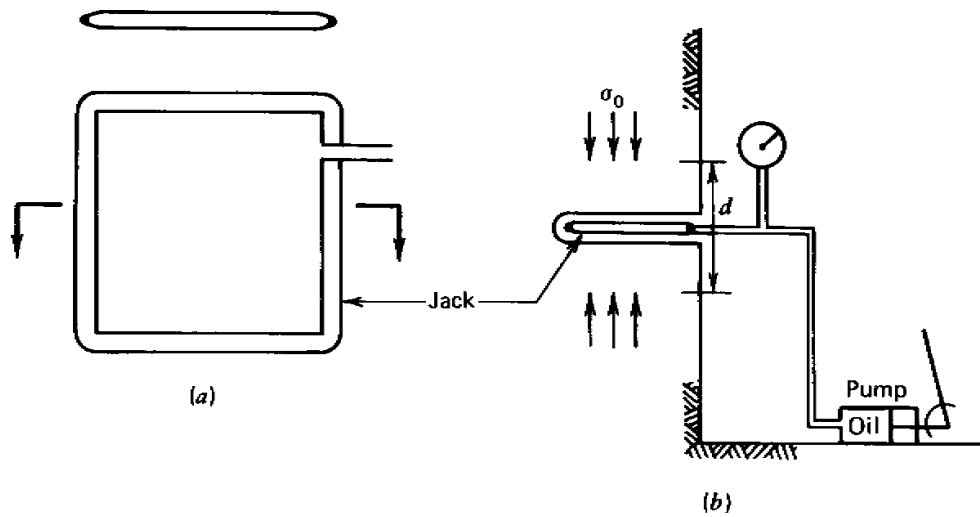
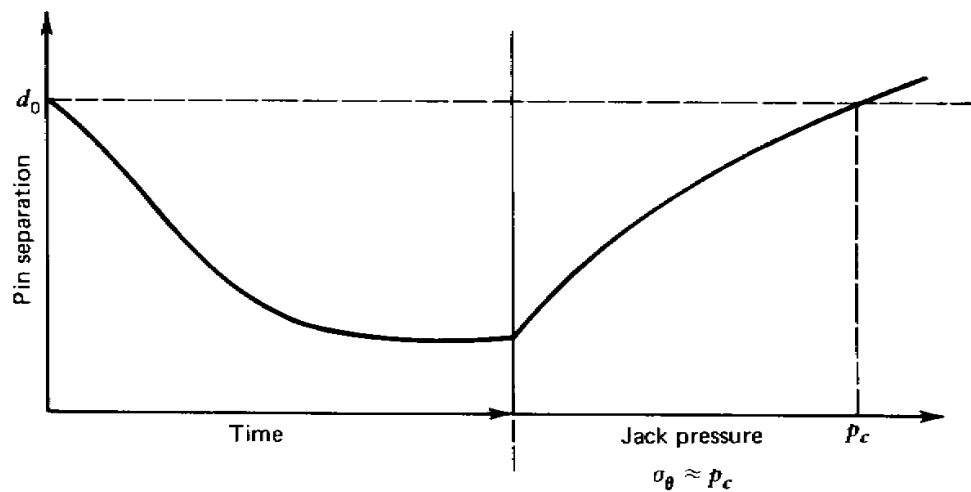


Fig. 47. Ejemplo de la colocación de gatos planos en una galería.
(ISRM, 1987).



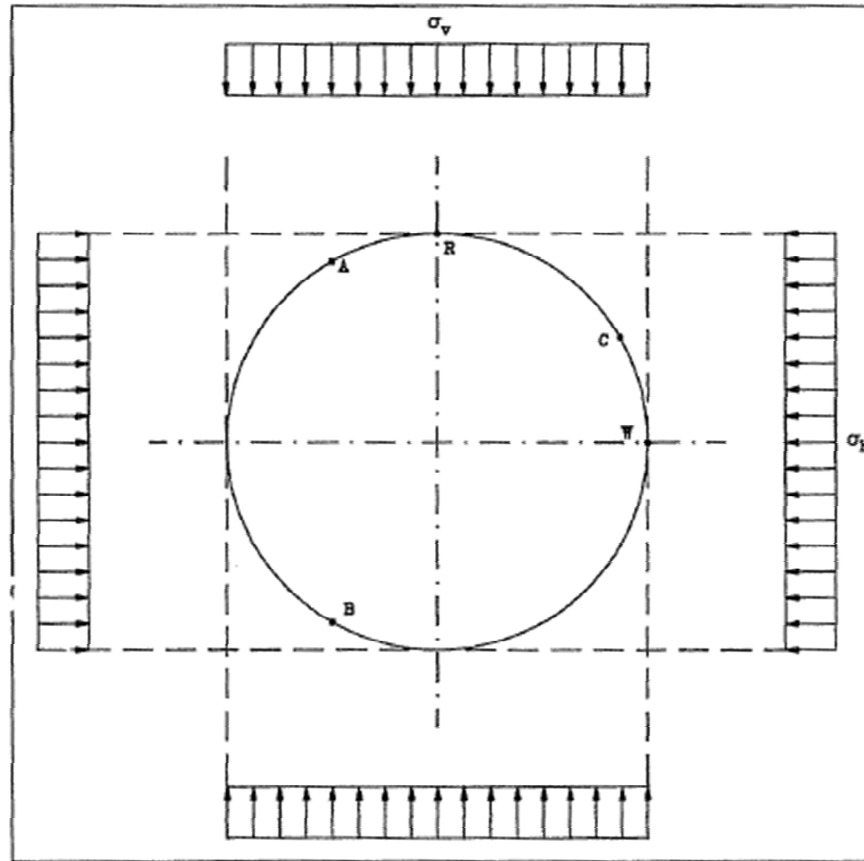
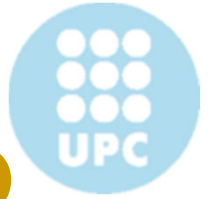
El método del gato plano

- Cálculos

- Si se toman tres medidas de la tensión normal al plano de corte en tres puntos alrededor de un túnel, se conocen entonces las tensiones cerca de la superficie de estos puntos, $\sigma_{\theta,A}, \sigma_{\theta,B}, \sigma_{\theta,C}$
- Entonces, las componentes del tensor de tensiones (en dos dimensiones) se pueden obtener resolviendo el sistema

$$\begin{bmatrix} \sigma_{\theta,A} \\ \sigma_{\theta,B} \\ \sigma_{\theta,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

El método del gato plano



El método del gato plano

- Cálculos

- Si tenemos datos en dos puntos, p.e. la clave (R) y un hastial (W) de un túnel circular:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{\theta,W} \\ \sigma_{\theta,R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 3 \\ 3 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{hor} \\ \sigma_{ver} \end{bmatrix}$$

- de donde

$$\sigma_{hor} = \frac{1}{8}\sigma_{\theta,W} + \frac{3}{8}\sigma_{\theta,R}$$

$$\sigma_{ver} = \frac{3}{8}\sigma_{\theta,W} + \frac{1}{8}\sigma_{\theta,R}$$

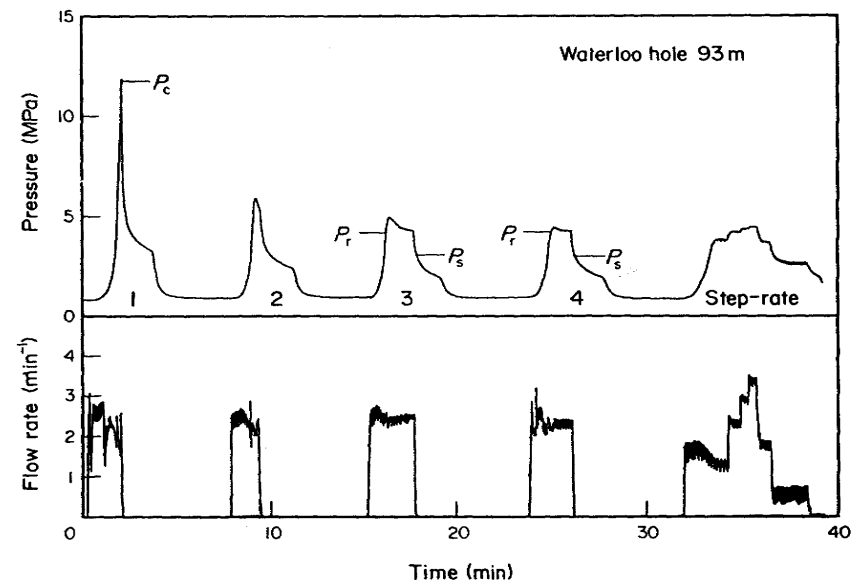
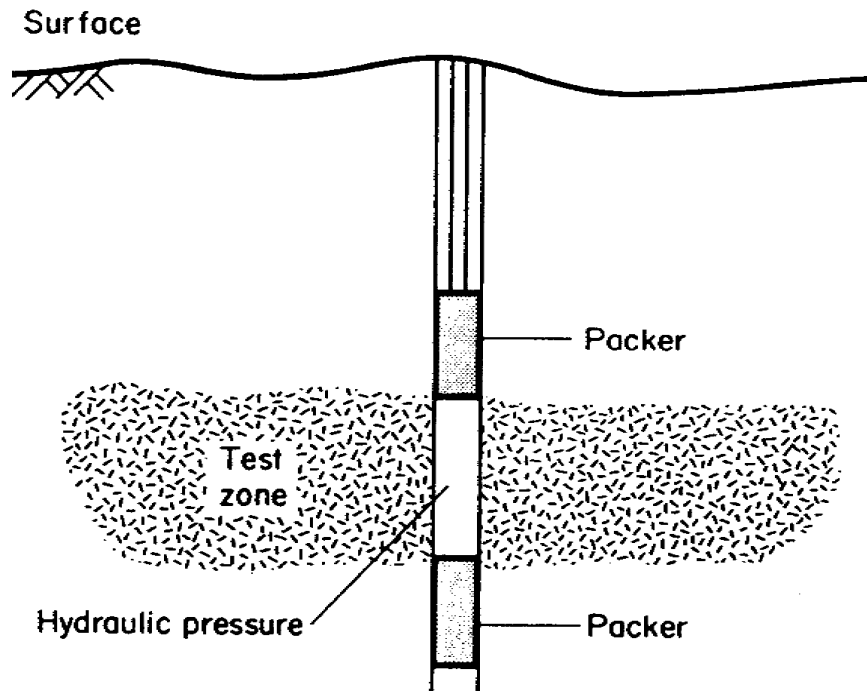
Fractura hidráulica

- Método estándar de medida de tensiones in situ a grandes profundidades (mayores de 500 m, fuera del alcance de otros métodos)
- Proporciona dos resultados, a partir de los cuales hay que determinar el tensor de tensiones: la **presión de rotura** y la **presión de fondo**
- El ensayo se realiza en un sondeo con el siguiente procedimiento:
 - Seleccionar el tramo donde se realizará el ensayo como mínimo de 1 m de longitud
 - Sellar el tramo con dos "packers" (obturadores)
 - Inyectar agua a presión en el tramo sellado hasta que se produce rotura

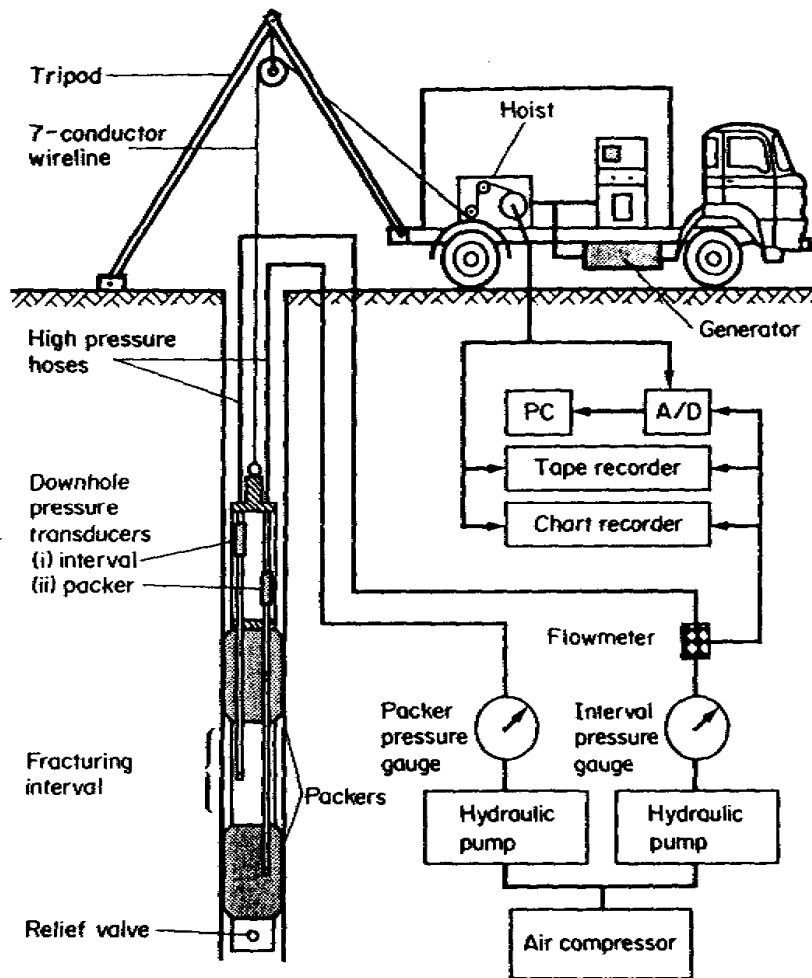
Fractura hidráulica

- Se supone que la fractura se inicia cuando la presión del fluido supera la tensión circunferencial en la pared del sondeo y la resistencia a la tracción de la roca
- La fractura hidráulica se propaga entonces desde el sondeo siguiendo el plano perpendicular a la tensión principal menor
- Ventaja: no necesita a priori el conocimiento de las propiedades elásticas de la roca

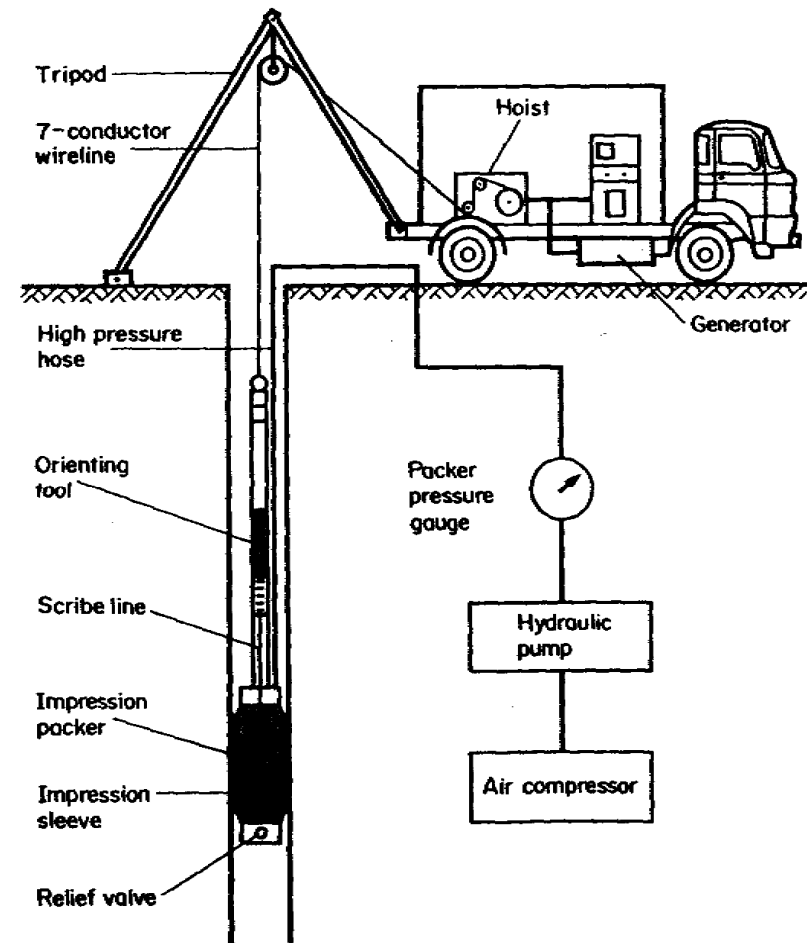
Fractura hidráulica



Fractura hidráulica



fractura hidráulica



determinación de la orientación de la fractura

Fractura hidráulica

- Precauciones
 - Asegurarse que el tramo que va a ser sellado se encuentra **libre de fisuras**, para que una fisura nueva pueda ser creada
 - Para evitar errores es recomendable que la presión del agua se mida **en el fondo del sondeo**
 - Si se usa la técnica básica, debe suponerse que el sondeo es **paralelo a una tensión principal**
 - Contar con algún medio que nos permita determinar la **orientación de la fractura** formada (paquete de sellado o cámara de TV)

Fractura hidráulica

modelo elástico lineal

- Hipótesis básicas (Hubert & Willis, 1957)
 - El estado general de tensiones en un punto de la corteza de la tierra es de compresión y puede ser representado por tres tensiones principales, una vertical, S_v , y dos horizontales, S_h y S_H
 - El taladro de ensayo será vertical y paralelo a la dirección de la tensión principal vertical S_v
 - S_v puede ser calculada en función de la profundidad
 - El comportamiento de la roca es elástico lineal, y se supone que es isótropa, homogénea y continua

Fractura hidráulica

modelo elástico lineal

- Hipótesis básicas (Hubert & Willis, 1957)
 - La presión en los poros (P_0) de la roca, permanece constante durante el proceso de fractura hidráulica lo cual implica que durante el proceso se supone que el fluido no penetra en los poros de la roca (la roca se supone impermeable)
 - El efecto que tiene el fluido sobre las tensiones de la roca esta gobernada por el principio de las tensiones efectivas (Terzaghi, 1943)

$$\sigma'_{ij} = S_{ij} - P_0 \delta_{ij}$$

Fractura hidráulica

modelo elástico lineal

- Hipótesis básicas (Hubert & Willis, 1957)
 - La fracturación hidráulica se inicia según el criterio de máxima tracción: cuando en la pared del taladro se cumple que las tracciones son mayores que la resistencia a tracción de la roca.
 - En la pared del taladro la tensión circunferencial en los dos puntos alineados perpendicularmente a la mínima tensión horizontal principal (S_h), será la primera en llegar al criterio de rotura cuando la presión está aumentando.
 - La fractura hidráulica se iniciará y se extenderá en la dirección de la tensión horizontal principal mayor (S_H)

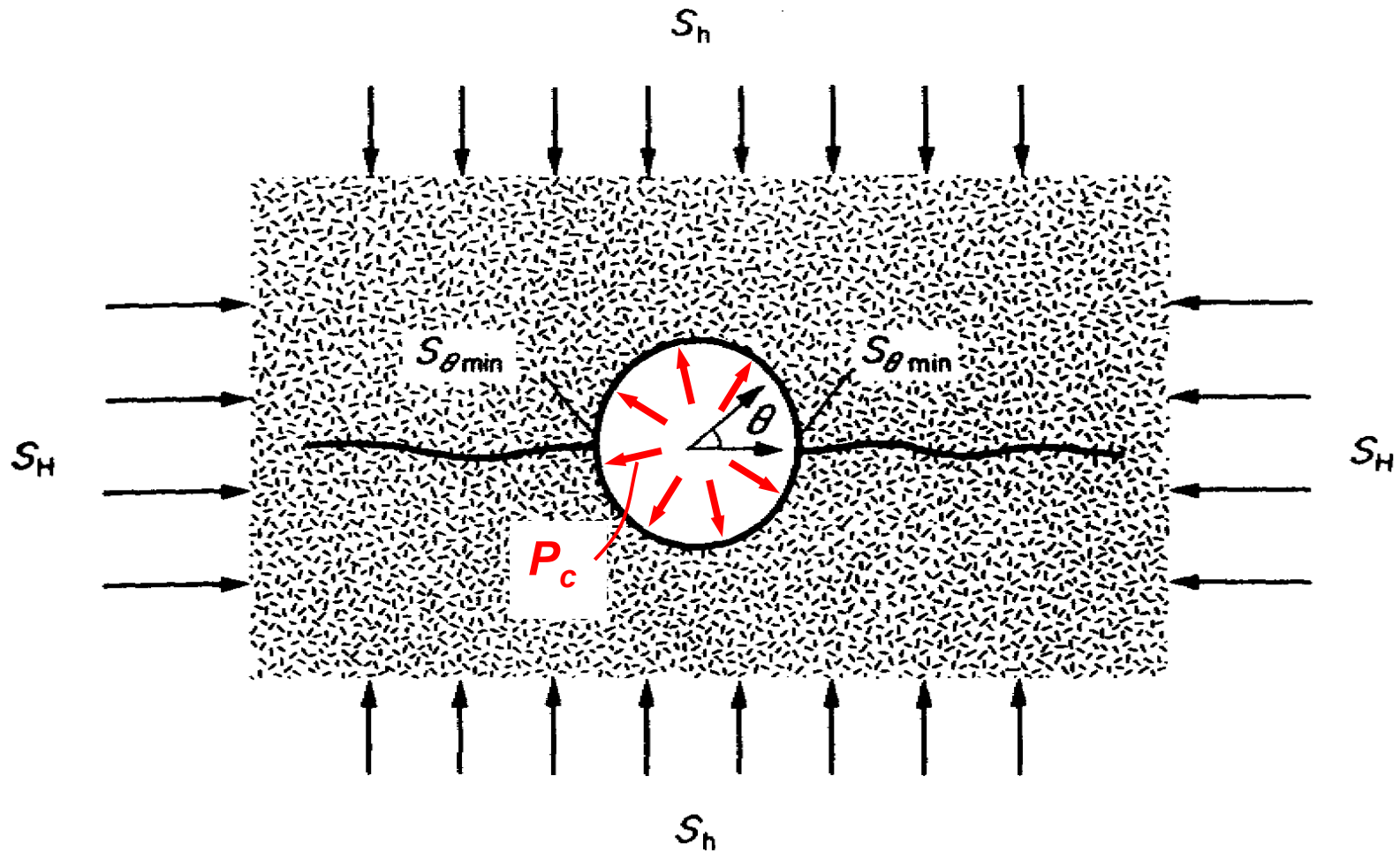
Fractura hidráulica

modelo elástico lineal

- Hipótesis básicas (Hubert & Willis, 1957)
 - La presión crítica del fluido, P_c , para la generación de la fractura es la presión suficiente para igualar la presión circunferencial inicial y para superar la resistencia a tracción de la roca
 - La presión necesaria para mantener abierta la fractura inducida, P_s , corresponde a la tensión principal actuante en dirección perpendicular al plano de fractura
 - La presión de reapertura de la fractura, P_r , es la presión suficiente para igualar la tensión circunferencial de la pared del taladro en la fractura

Fractura hidráulica

modelo elástico lineal



Fractura hidráulica

modelo elástico lineal

- Solución elástica:

$$S_{\theta\min} = (3S_h - S_H) - P_0 - P_c$$

fractura:

$$-T = S_{\theta\min}$$

$$-T = (3S_h - S_H) - P_0 - P_c$$

$$S_h = P_s$$

$$S_H = T + 3S_h - P_0 - P_c$$

siendo:

- $P_c \rightarrow$ presión de inicio de fractura
- $P_0 \rightarrow$ presión de poros
- $P_s \rightarrow$ presión de fondo (presión mínima para que una fractura abierta vuelva a cerrarse una vez el bombeo ha parado)
- $T \rightarrow$ resistencia a la tracción
- $S_h \rightarrow$ tensión horizontal mínima
- $S_H \rightarrow$ tensión horizontal máxima

Fractura hidráulica

modelo poroelástico

- Hipótesis básicas
 - Normalmente la roca no será impermeable y existirá **fuga de líquido** en sentido radial
 - Haimson & Fairhurst (1967): aplicar la teoría de la **poroelasticidad** de Biot (1941) para incorporar el efecto de la inyección de fluido en la distribución de tensiones alrededor del taladro

$$P_c - P_0 = \frac{T + 3(S_h - P_0) - (S_H - P_0)}{K}$$

$$K = 2 - \alpha \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu}$$

C_r = compresibilidad de grano

$$\alpha = \text{parámetro poroelástico de Biot} = 1 - \frac{C_r}{C_b}$$

C_r = compresibilidad de roca

Fractura hidráulica

modelo poroelástico

- Hipótesis básicas
 - Para cada ensayo **hace falta otro ensayo** complementario para determinar K
 - Para valores de las tensiones horizontales tales que $0 < 3S_h - S_H < 25$ MPa, las discrepancias entre el modelo elástico y el poroelástico son irrelevantes

- Fin Tema 4