

Geotecnia y Prospección Geofísica

Tema 5. Comportamiento de suelos en compresión confinada. Ensayo edómetro



Jorge Cañizal Berini
Gema Fernández Maroto
Marina Miranda Manzanares

Departamento de Ciencia e Ingeniería del
Terreno y de los Materiales

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



ÍNDICE

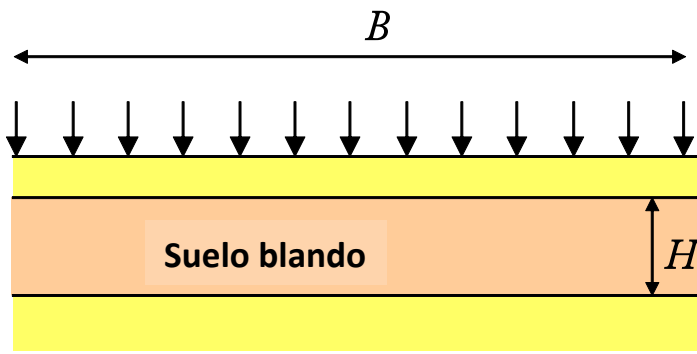
- 5.1.** Planteamiento inicial.
- 5.2.** Cambio de volumen: Razón, propiedades de los suelos, duración, caracterización.
- 5.3.** El ensayo edométrico.
- 5.4.** Deformaciones finales. Curva edométrica.
- 5.5.** Procesos de sobreconsolidación del terreno.
- 5.6.** Consolidación unidimensional.

5.1. PLANTEAMIENTO INICIAL



Asienta, pero:
¿Cuánto?
¿En cuánto tiempo?

Hipótesis simplificativa: Compresión confinada



Carga (p.ej terraplén)

B / H muy grande

$$(\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0)$$



$$\varepsilon_{vol} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \varepsilon_z$$

5.1. PLANTEAMIENTO INICIAL



**Ensayo de laboratorio.
(Ensayo edométrico)**



**Interpretación.
Modelo de Comportamiento.**

- Edométrico.
- Consolidación.



**Predicción del
comportamiento
real de la obra.**

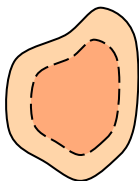


5.2. CAMBIO DE VOLUMEN

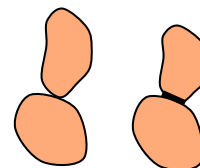
Razones

- **Compresión de la materia sólida:**

a) Deformación partícula de suelo:



b) Aplastamiento contactos:



– No es posible para los niveles de tensiones habituales ($\approx 10^2$ - 10^3 kPa).

- **Variación del volumen de huecos:**

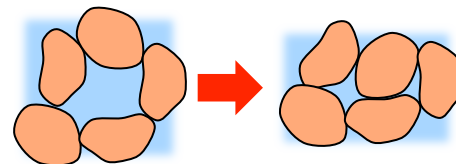
a) Compresión elástica del agua (agua incompresible).

b) Compresión elástica del aire (no por estar saturado).

c) Disolución de aire en el agua (no por estar saturado).

d) Expulsión de aire (no por estar saturado).

e) Expulsión de agua.



Si el terreno está saturado



Sólo expulsión de agua

5.2. CAMBIO DE VOLUMEN

Propiedades de los terrenos

Índice de poros

- Cohesivo (arcillas o limos): $e = 0,4-1$.
- Granular: $e = 0,2-0,5$.

Módulo de rigidez

- Cohesivo: 0,5-10 MPa.
- Granular: 10-100 MPa.

- Suelo granular **mucho más rígido** que suelo cohesivo.
- Asiento suelo cohesivo **mucho mayor** que en suelo granular.

Coeficiente de permeabilidad

- Cohesivo: $k \leq 10^{-6}$ m/s
- Granular: $k \geq 10^{-5}$ m/s

- Suelo granular **mucho más permeable** que suelo cohesivo.
- Expulsión de agua **mucho más rápida** en suelo granular.

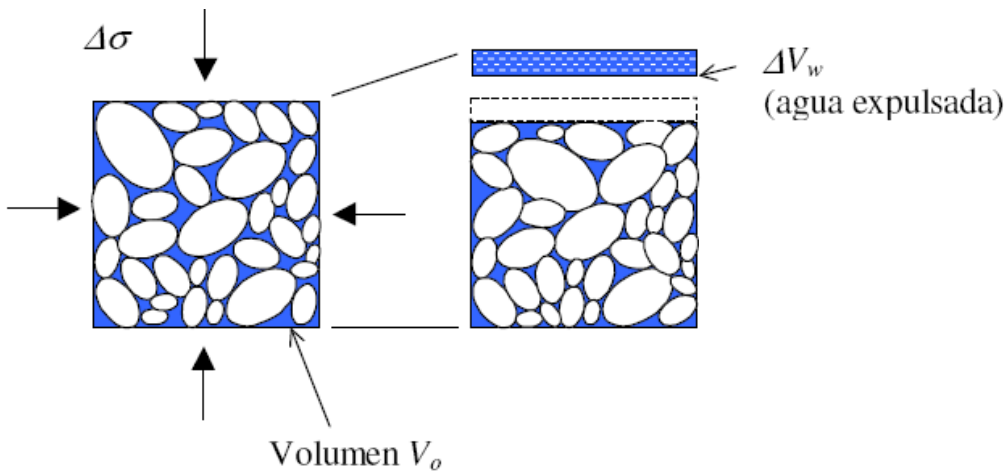
Asiento

- | | | | |
|---|------------|---|----------------------------|
| { | • Cohesivo | ➔ | Diferido en el tiempo. |
| | • Granular | ➔ | Prácticamente instantáneo. |

5.2. CAMBIO DE VOLUMEN

Duración del proceso

- Situación inicial (sin drenaje) y final (con drenaje completo):



Suelos	Aplicación cargas construcción	Expulsión de agua	Deformaciones
Gravas, arenas.	Semanas, meses.	Minutos, horas.	Prácticamente instantáneas.
Arcillas, limos.	Semanas, meses.	Meses, años.	Mayoritariamente posteriores a la construcción.

5.2. CAMBIO DE VOLUMEN

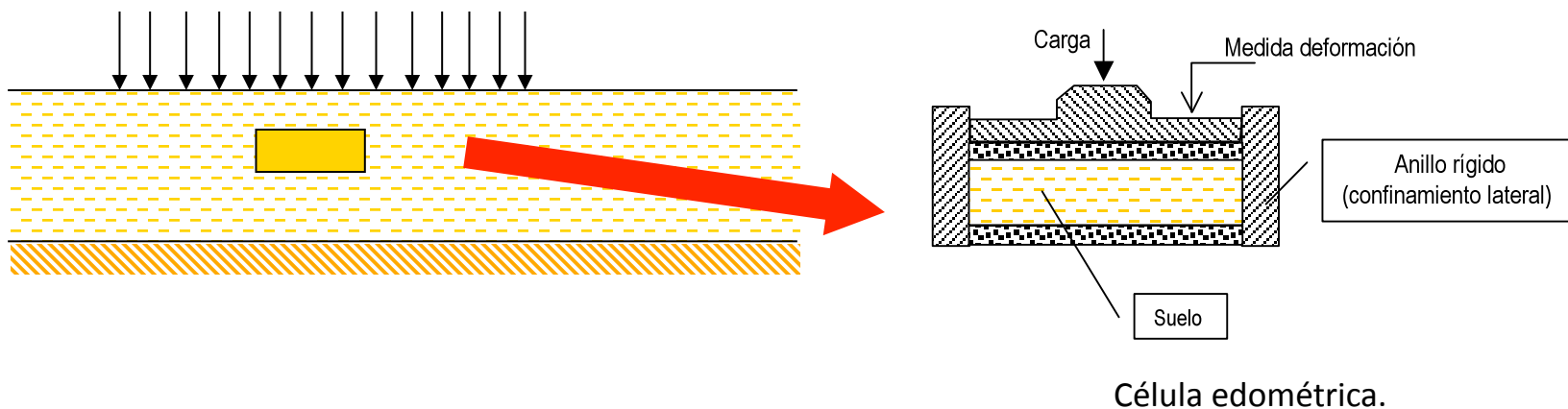
Ensayos según terreno

• Suelos granulares:

- Dificultad de muestras inalteradas para ensayo de laboratorio.
- Caracterización de la deformabilidad (módulo) mediante ensayos in situ (correlaciones empíricas).

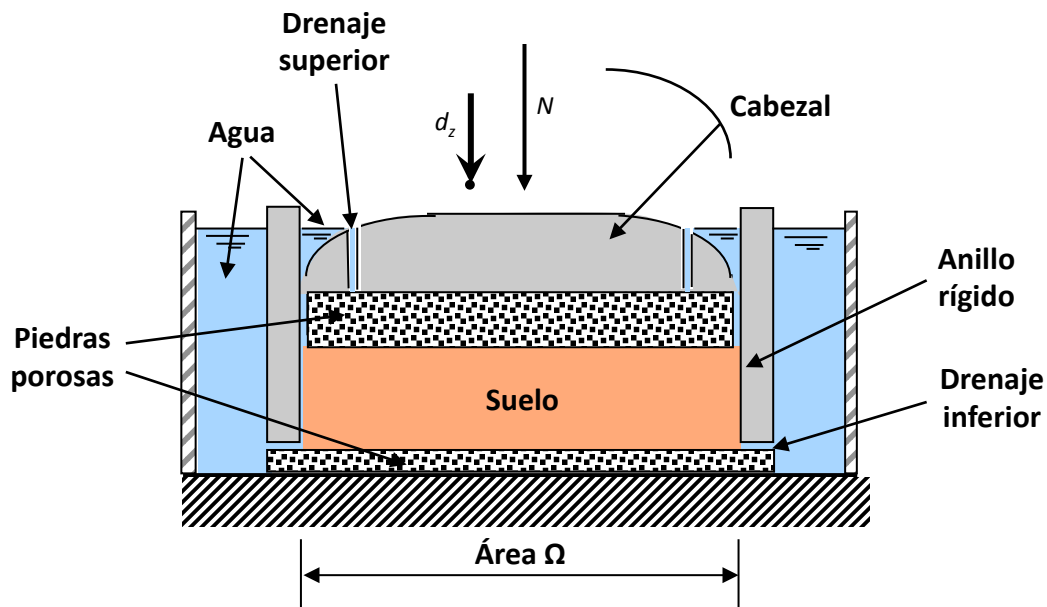
• Suelos cohesivos:

- Caracterización de la deformabilidad (módulo) a partir de ensayos de laboratorio (ensayo edométrico).



5.3. ENSAYO EDMÉTRICO

Descripción



Esquema edómetro

$$\sigma_z = \frac{N}{\Omega}$$



Dimensiones usuales ($d = 45$ ó 70 mm y $h = 12$ a 20 mm).
Relación $d/h \geq 2.5$.

5.3. ENSAYO EDMÉTRICO

Descripción



1. Tallado de la muestra.



2. Introducción en el anillo.



3. Pistón de carga. Piedra porosa.



4. Comparador. Medida de asientos.

5.3. ENSAYO EDMÉTRICO

Descripción



Vista general. Aplicación de la carga.



Detalle de las células.

- **Escalones de 24 horas:**

Carga 5, 10, 20, 40, 80, 150, 300, 600, 1000, 1500 kPa y descarga (en 3 ó 4 escalones).

- **En cada escalón:** se lee el comparador durante el tiempo (24 horas).

5.3. ENSAYO EDMÉTRICO

Resultados del ensayo

- **Curva edométrica:**

Relaciona la tensión efectiva vertical al final de cada escalón con el asiento (deformación) al final del escalón $(\sigma' - \varepsilon)_{escalón}$



Cuánto se deforma.

- **Curvas de consolidación:**

Para cada uno de los escalones de carga:

– Relacionan la evolución del asiento (deformación) ε_z con el tiempo t .



Cuánto tarda en deformarse.

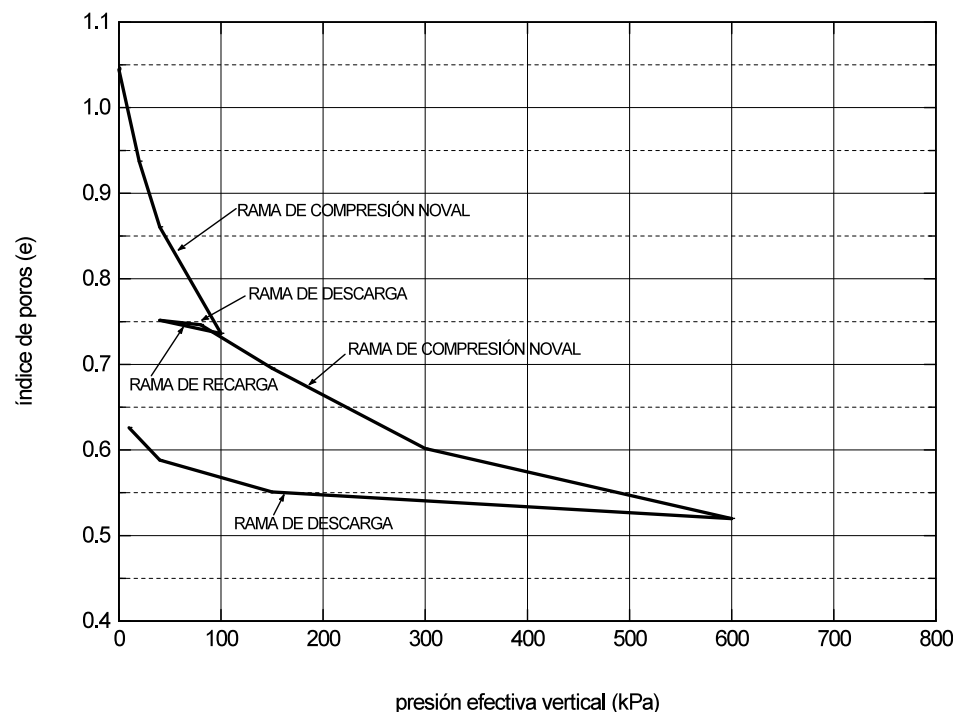
5.4. CURVA EDMÉTRICA

Curva edométrica

- El suelo se va rigidizando al aumentar la carga (deformaciones menores para igual $\Delta\sigma$ al aumentar σ) $\rightarrow E$ no cte.

Curva edométrica (escala natural)

- Descarga y recarga más rígida que carga.
- Deformaciones remanentes (plásticas).



5.4. CURVA EDOMÉTRICA

Relación entre el índice de poros y la deformación

$$e = \frac{V_h}{V_s} = \frac{V_{muestra} - V_s}{V_s} \quad \rightarrow \quad V_{muestra} = (1 + e) \cdot V_s \quad \rightarrow \quad \Omega \cdot H_{muestra} = (1 + e) \cdot \Omega \cdot H_s$$

$$H_{muestra} = (1 + e) \cdot H_s$$

- Entre dos estados 1 y 2:

$$\varepsilon_{vol} = \varepsilon_z = \frac{\Delta V}{V_1} = \frac{\Delta H}{H_1} = \frac{H_2 - H_1}{H_1} = \frac{(1 + e_2) \cdot H_s - (1 + e_1) \cdot H_s}{(1 + e_1) \cdot H_s} = \frac{e_2 - e_1}{1 + e_1}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta H}{H_1} = \frac{\Delta e}{1 + e_1}$$

5.4. CURVA EDMÉTRICA

Construcción de la curva edométrica

- Durante el ensayo se mide la variación de altura H de la pastilla.

- Al final del ensayo se mide:

- Peso húmedo (saturado) de la pastilla.
- Peso seco (después de secado en estufa).
- Obtención de γ_s (otro ensayo).

$$\left. \begin{array}{l} \text{Peso húmedo (saturado) de la pastilla.} \\ \text{Peso seco (después de secado en estufa).} \\ \text{Obtención de } \gamma_s \text{ (otro ensayo).} \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} e_f = w_f \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \\ H_s = \frac{V_s}{\Omega} = \frac{P_s}{\gamma_s \cdot \Omega} \end{array} \right.$$

- De la expresión vista anteriormente: $H_{muestra} = (1 + e) \cdot H_s$
 - Se obtiene el índice de poros en función de la altura de la pastilla medida al final de cada escalón:

$$e_{escalón} = \frac{H_{escalón}}{H_s} - 1$$

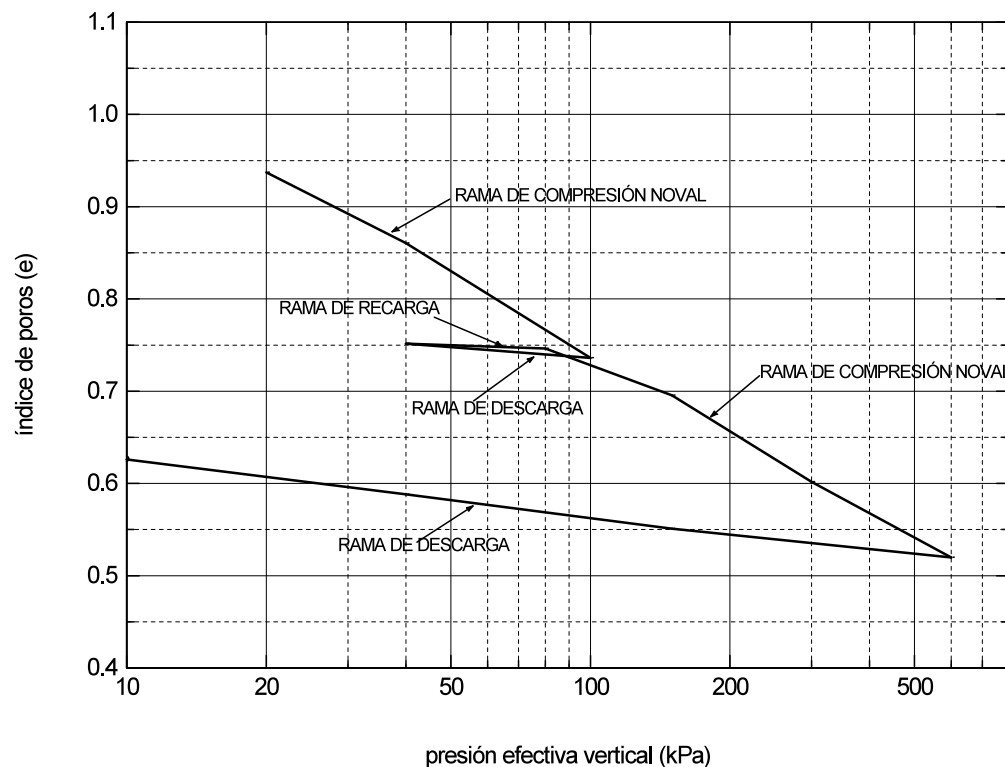
- La curva edométrica se dibuja con el eje de tensiones en escala logarítmica.

5.4. CURVA EDOMÉTRICA

Curva edométrica

• Comentarios:

- Suelo N.C.
- Suelo S.C.
- *RSC.*



$$\Delta e = e_1 - e_2 = C_c \log_{10} \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1} \quad \text{Carga noval}$$

$$\Delta e = e_1 - e_2 = C_s \log_{10} \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1} \quad \text{Descarga/recarga}$$

5.4. CURVA EDMÉTRICA

Modelo edométrico de deformación

- Índices de compresión e hinchamiento:

$$\Delta e = e_1 - e_2 = C_c \log_{10} \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1} \quad \text{carga noval}$$

$$\Delta e = e_1 - e_2 = C_s \log_{10} \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1} \quad \text{descarga/recarga}$$

C_c : índice de compresión.

C_s : índice de hinchamiento o de entumecimiento.

– Valores usuales: $C_c = 0.2 - 0.4$ $\frac{C_c}{C_s} = 4 - 10$

- Módulo edométrico

$$E_m = \frac{\Delta \sigma'}{\varepsilon} \quad \text{Módulo de deformación en compresión confinada.}$$

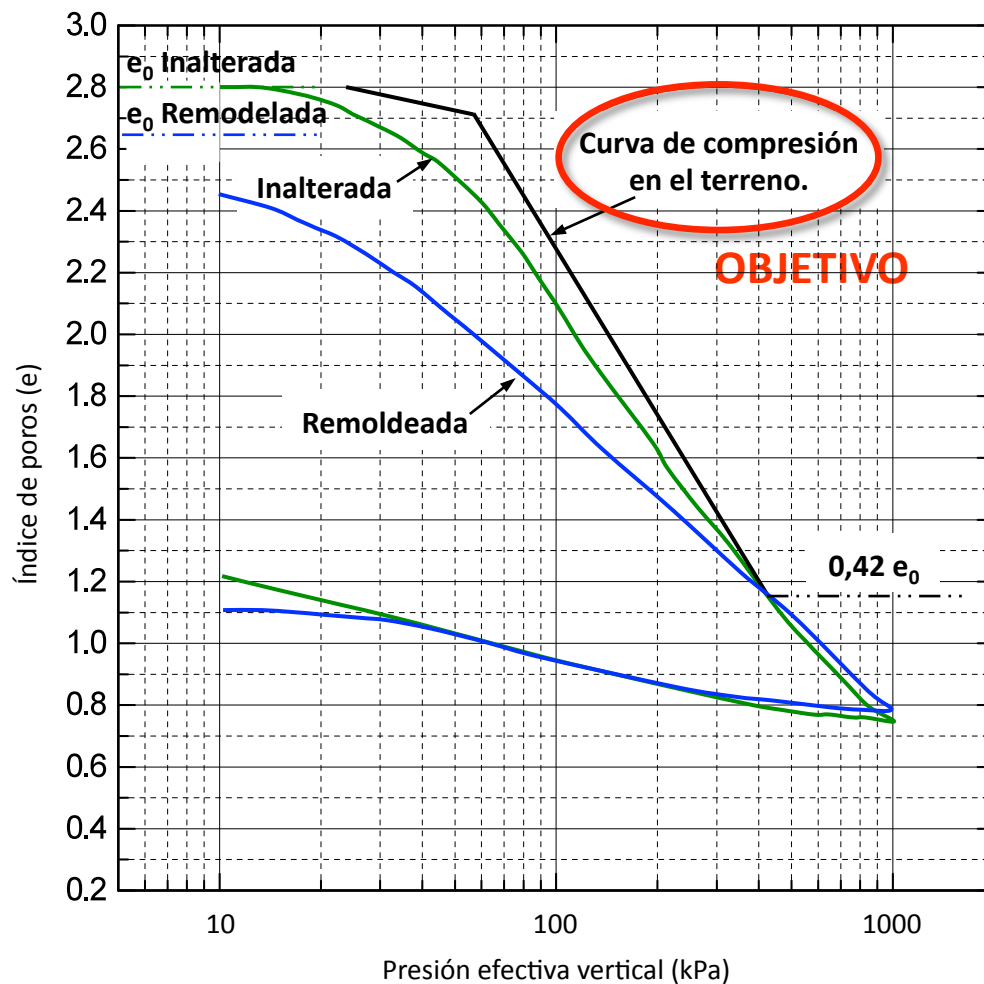
El valor del módulo edométrico varía con el intervalo de tensiones.

5.4. CURVA EDOMÉTRICA

Muestras reales, inalteradas y amasadas

• La alteración supone:

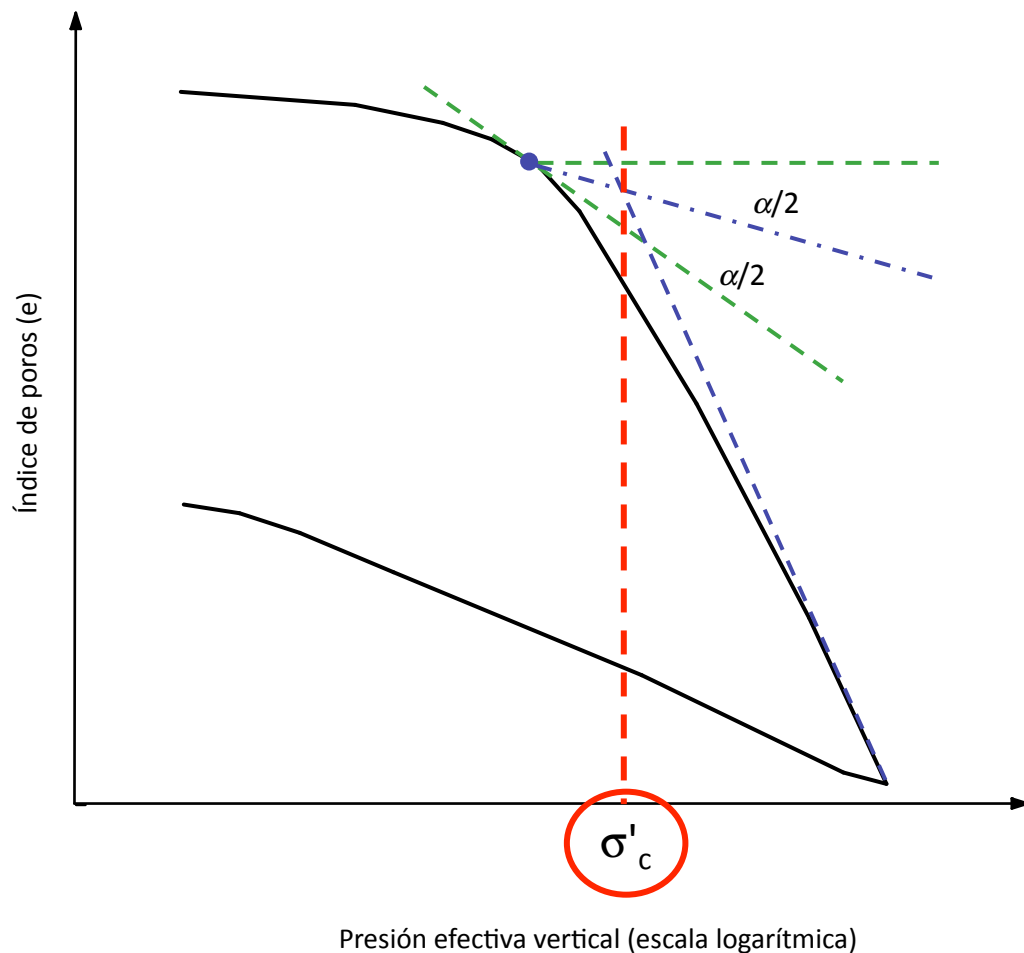
- Disminución de e .
- Se oscurece la historia tensional.
- C_c disminuye.



5.4. CURVA EDOMÉTRICA

Método de Casagrande

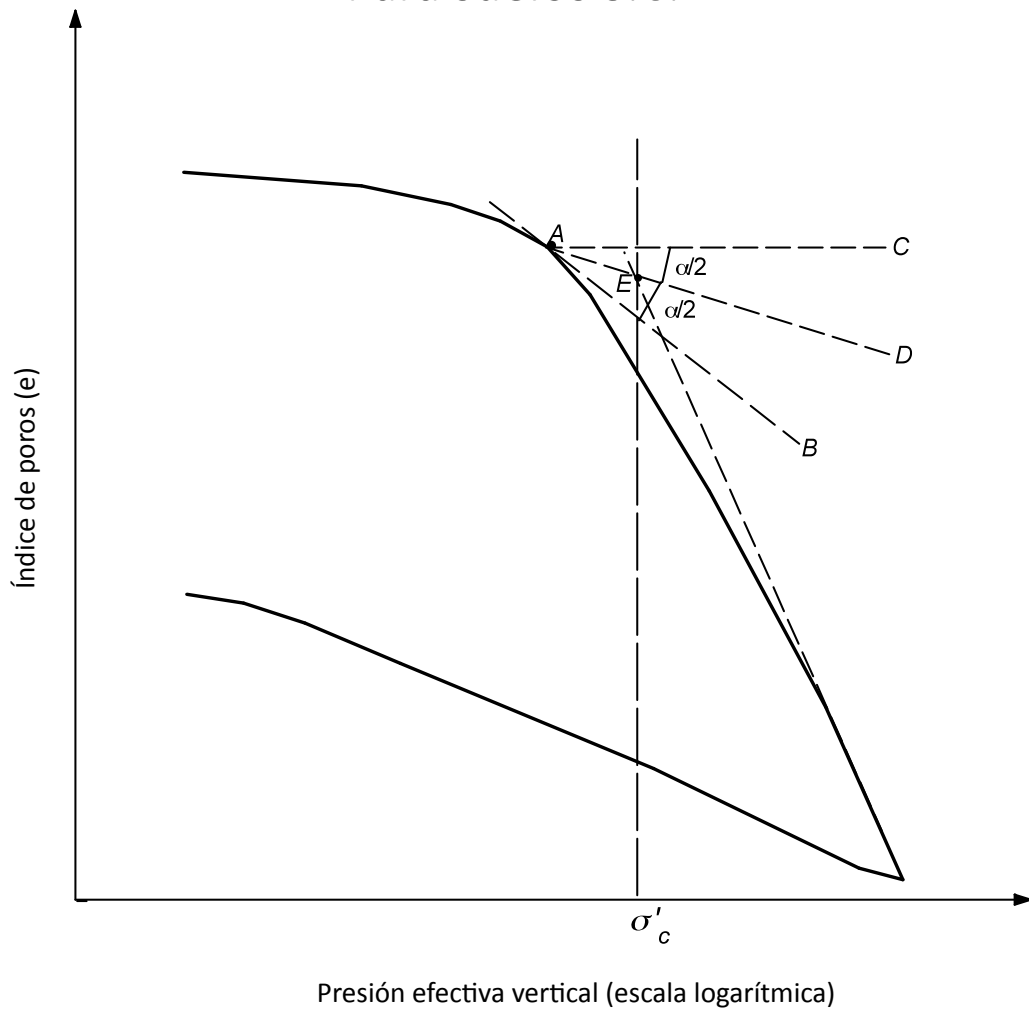
Para obtención de la presión de preconsolidación σ'_c



5.4. CURVA EDOMÉTRICA

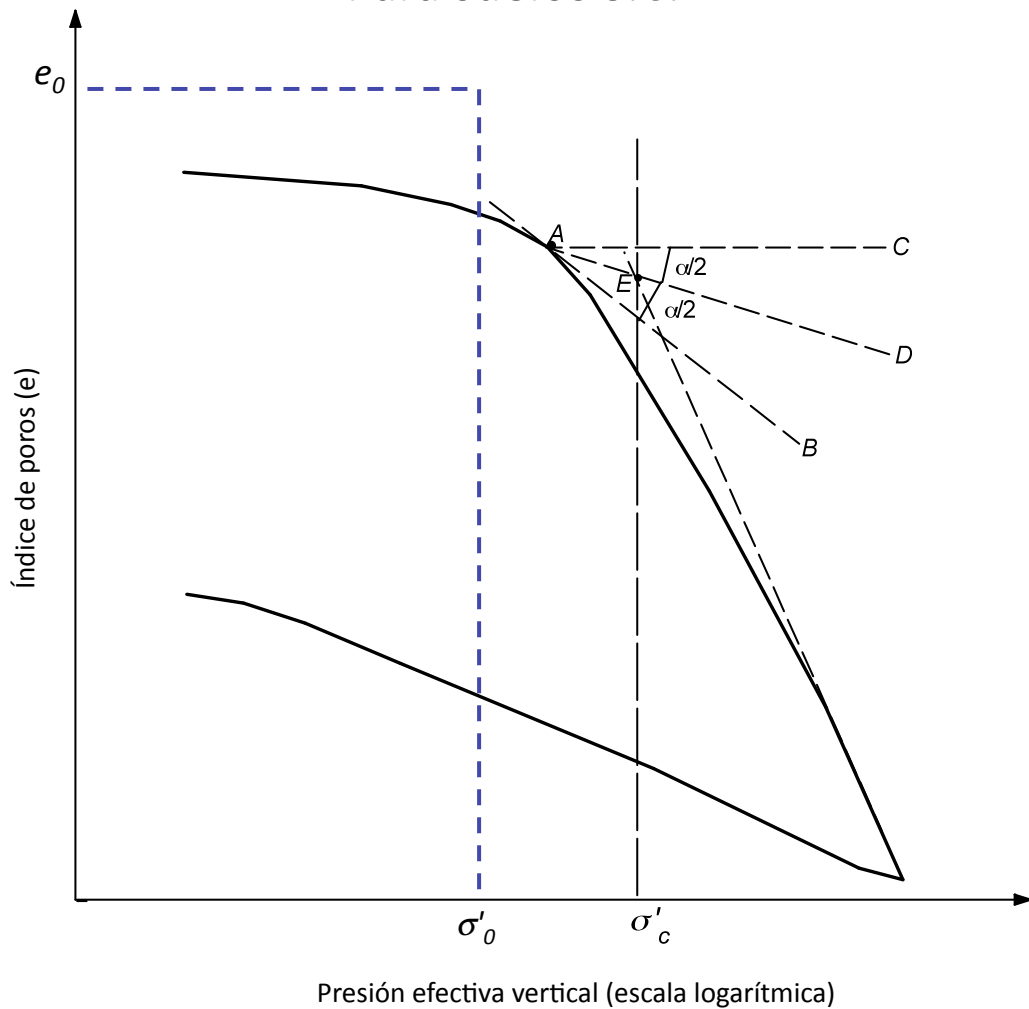
Corrección completa

Para suelos S.C.



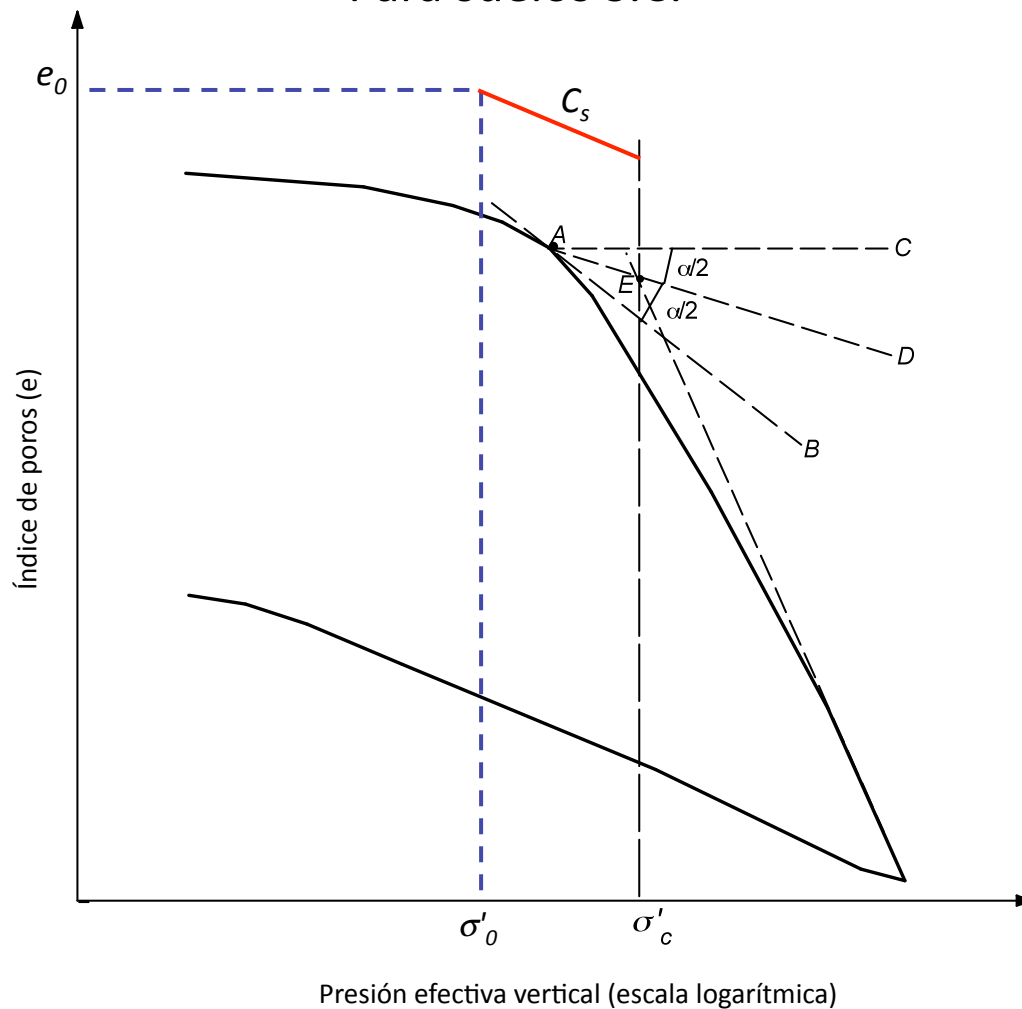
5.4. CURVA EDOMÉTRICA

Corrección completa Para suelos S.C.



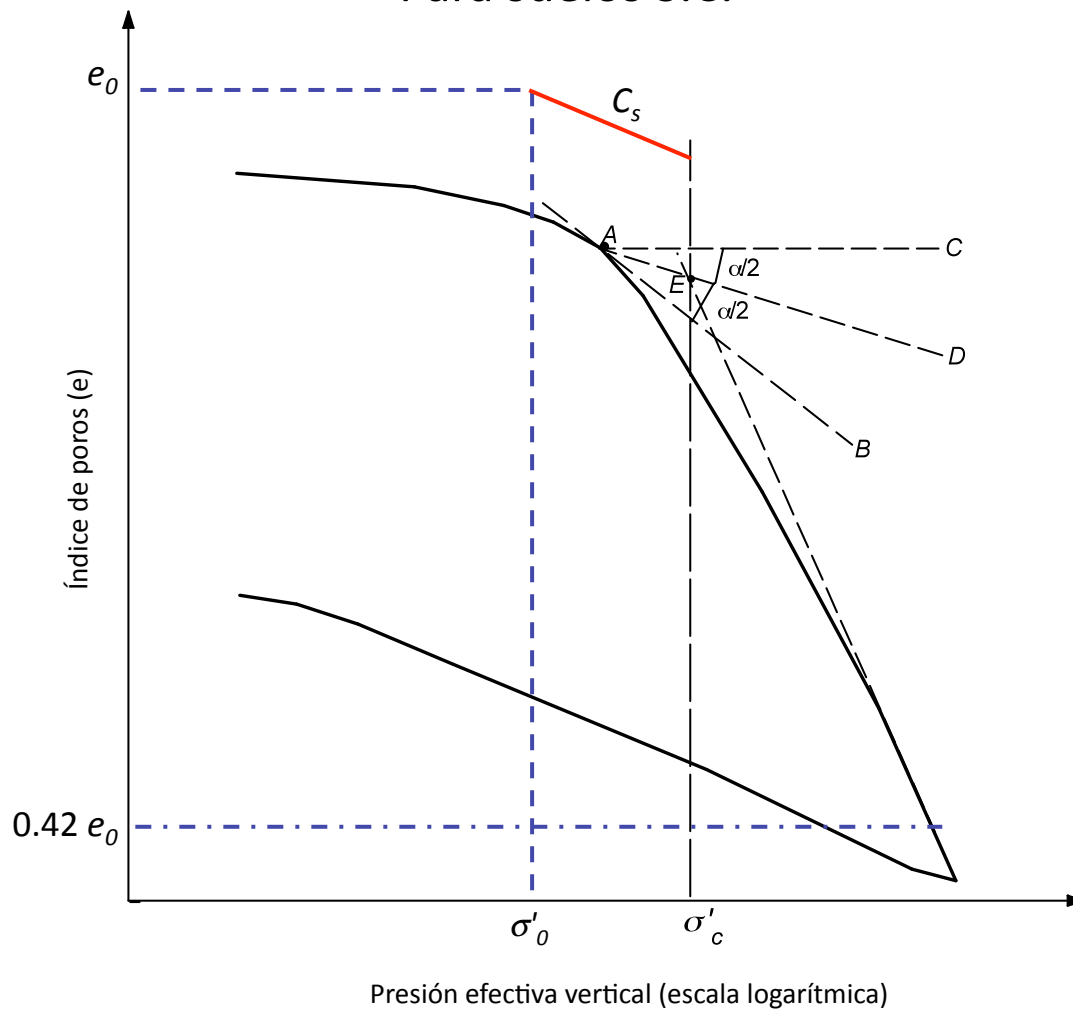
5.4. CURVA EDOMÉTRICA

Corrección completa Para suelos S.C.



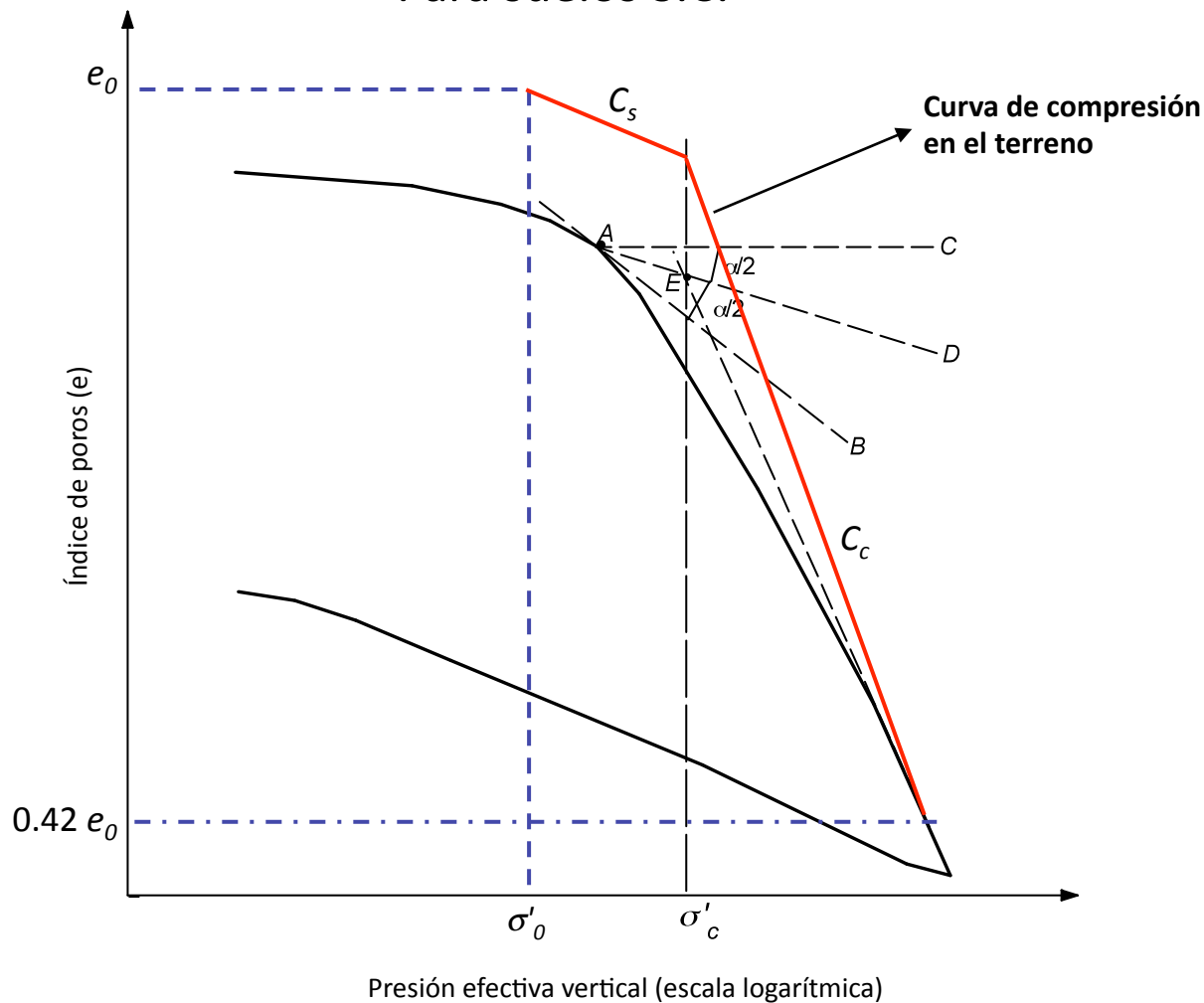
5.4. CURVA EDOMÉTRICA

Corrección completa Para suelos S.C.



5.4. CURVA EDOMÉTRICA

Corrección completa Para suelos S.C.



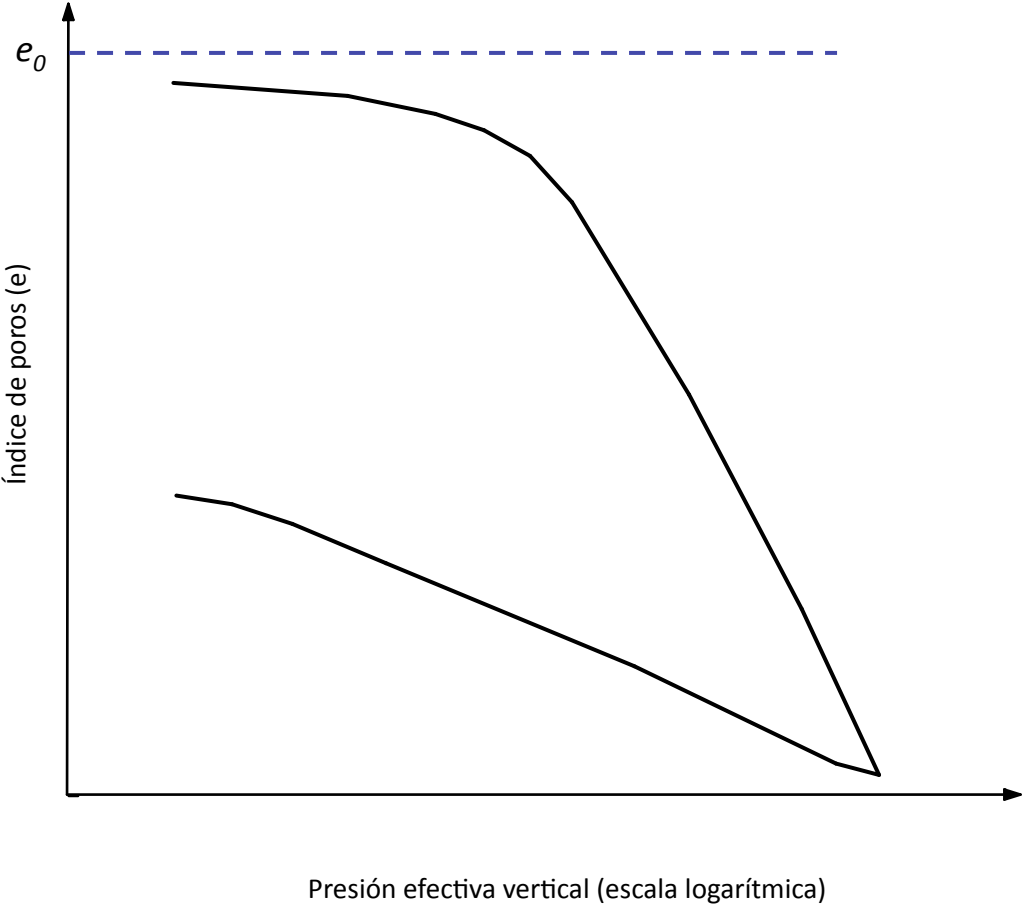
5.4. CURVA EDOMÉTRICA

Corrección simplificada Para suelos N.C.



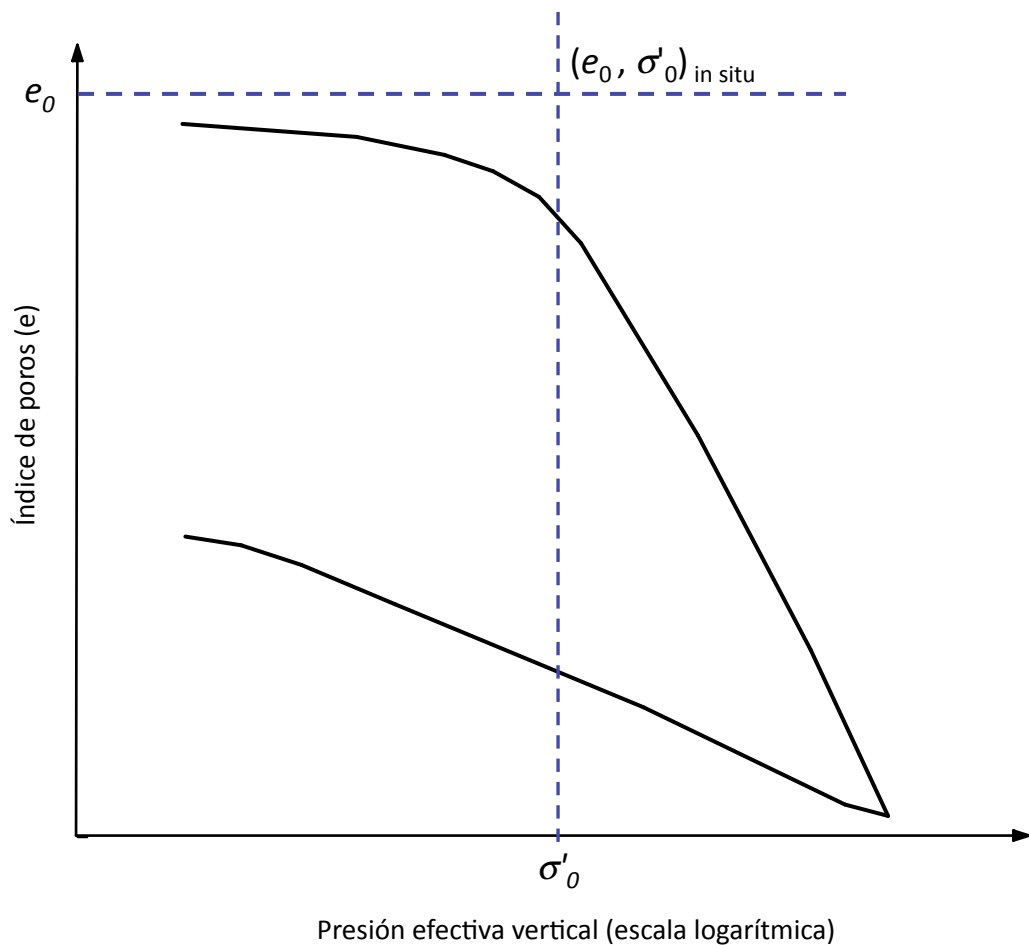
5.4. CURVA EDOMÉTRICA

Corrección simplificada Para suelos N.C.



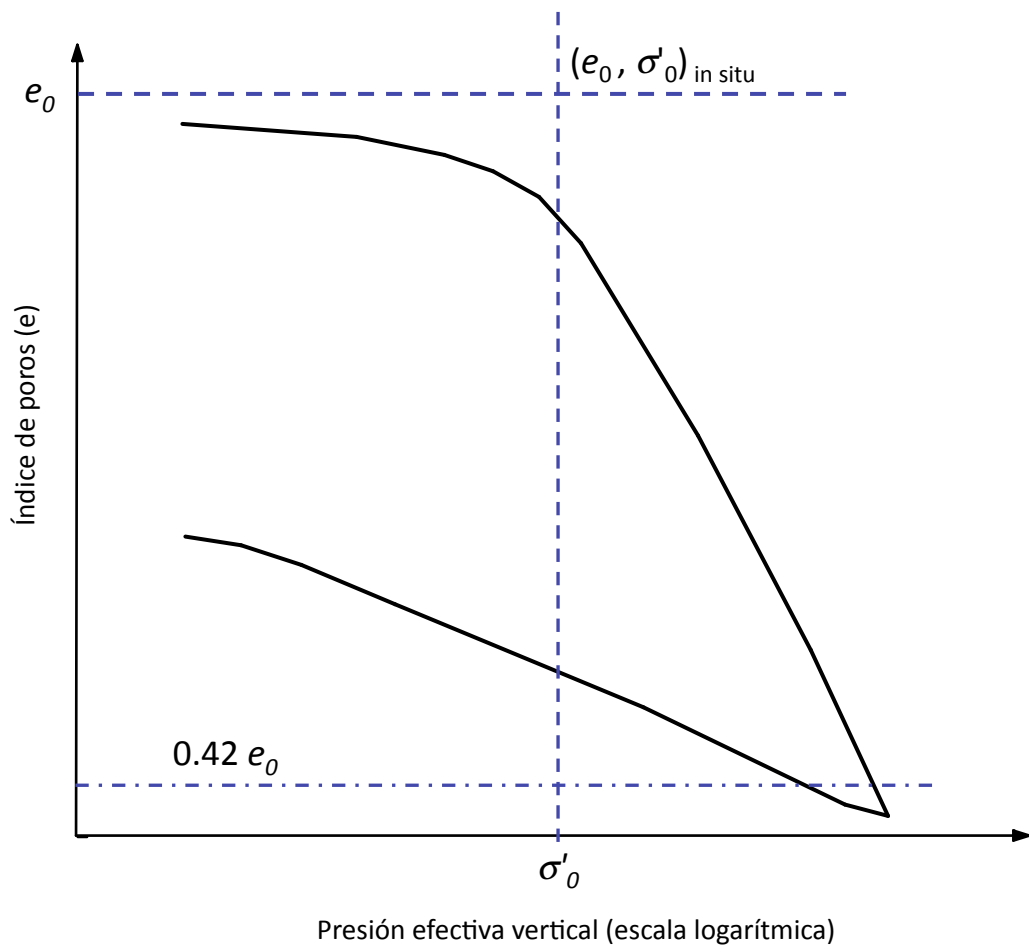
5.4. CURVA EDOMÉTRICA

Corrección simplificada Para suelos N.C.



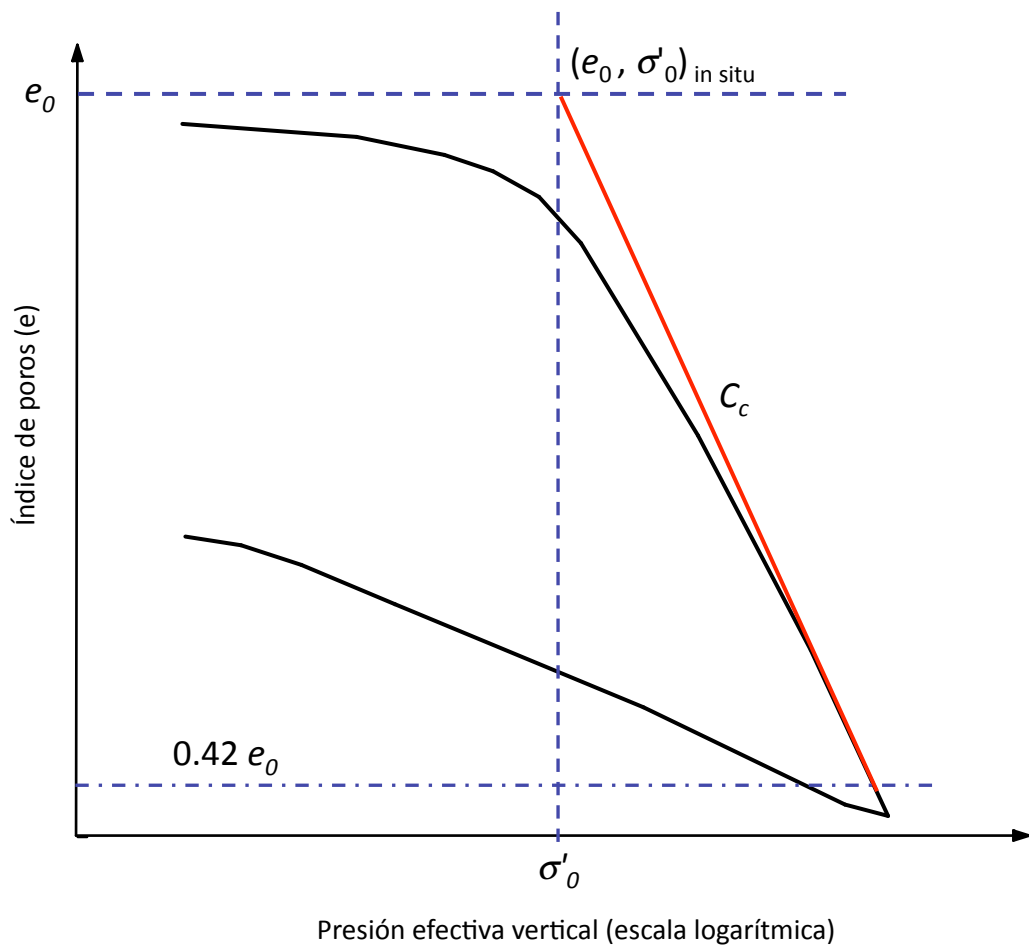
5.4. CURVA EDOMÉTRICA

Corrección simplificada Para suelos N.C.



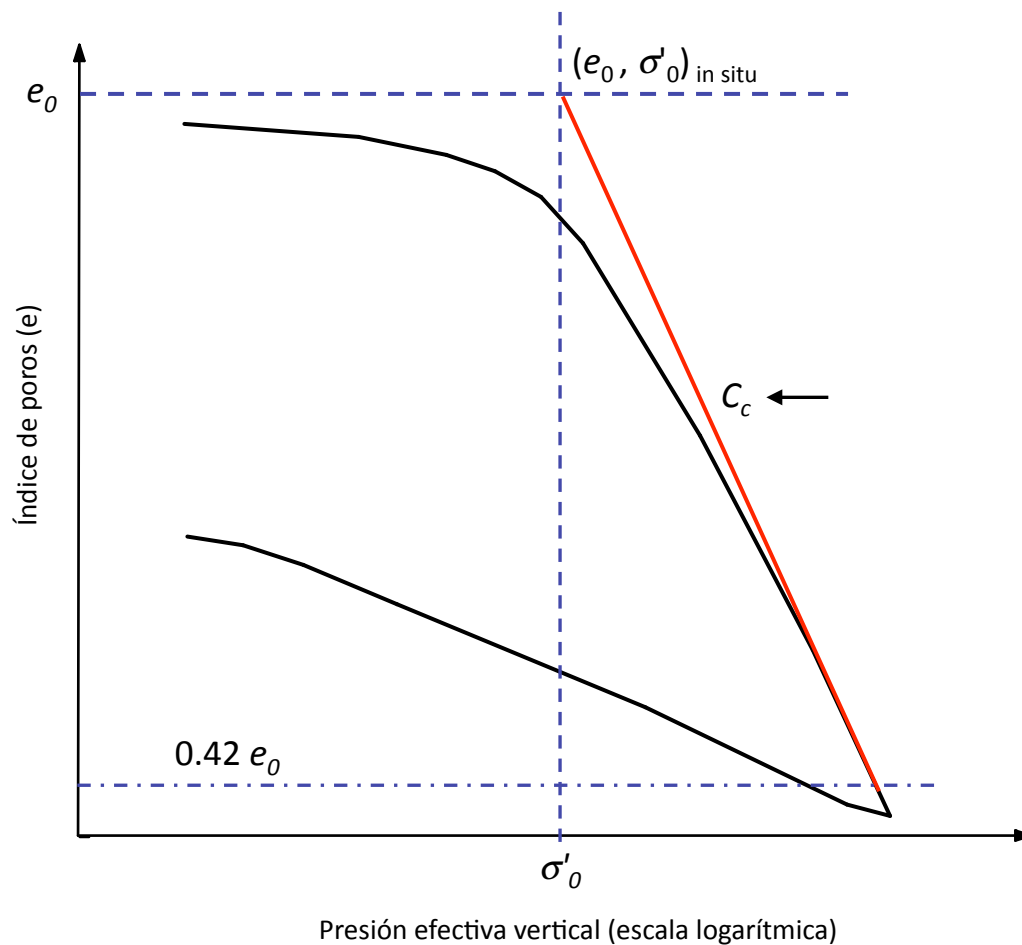
5.4. CURVA EDOMÉTRICA

Corrección simplificada Para suelos N.C.



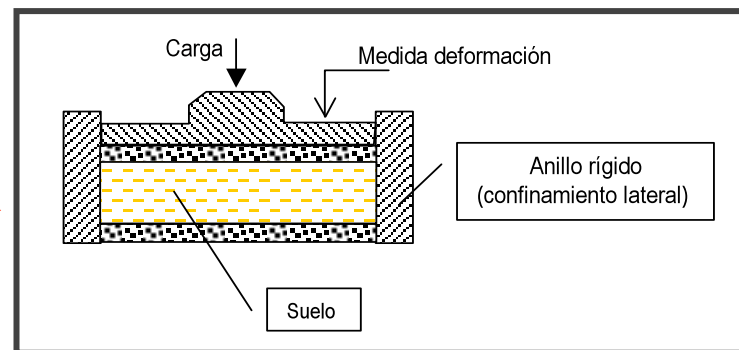
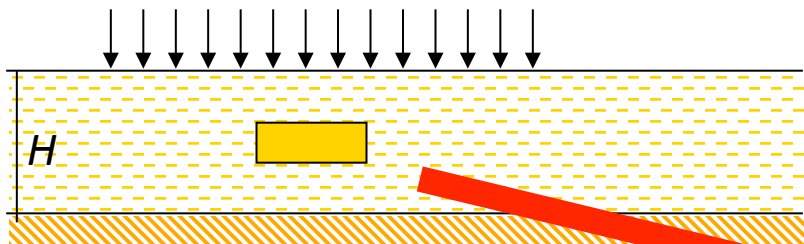
5.4. CURVA EDOMÉTRICA

Corrección simplificada Para suelos N.C.



5.4. CURVA EDOMÉTRICA

Aplicación al terreno. Cálculo del asiento



• Punto medio representativo:

– Ensayo edométrico $\rightarrow \sigma'_c, C_c, C_s$

$$s = \varepsilon \cdot H \quad \varepsilon = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

$$\Delta e = \begin{cases} C_c \cdot \log\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_0}\right) & \text{Para suelos normalmente consolidados} \\ C_s \cdot \log\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_0}\right) & \text{Para suelos sobreconsolidados si no se supera } \sigma'_c \\ C_s \cdot \log\left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_0}\right) + C_c \cdot \log\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_c}\right) & \text{Para suelos sobreconsolidados si se supera } \sigma'_c \end{cases}$$

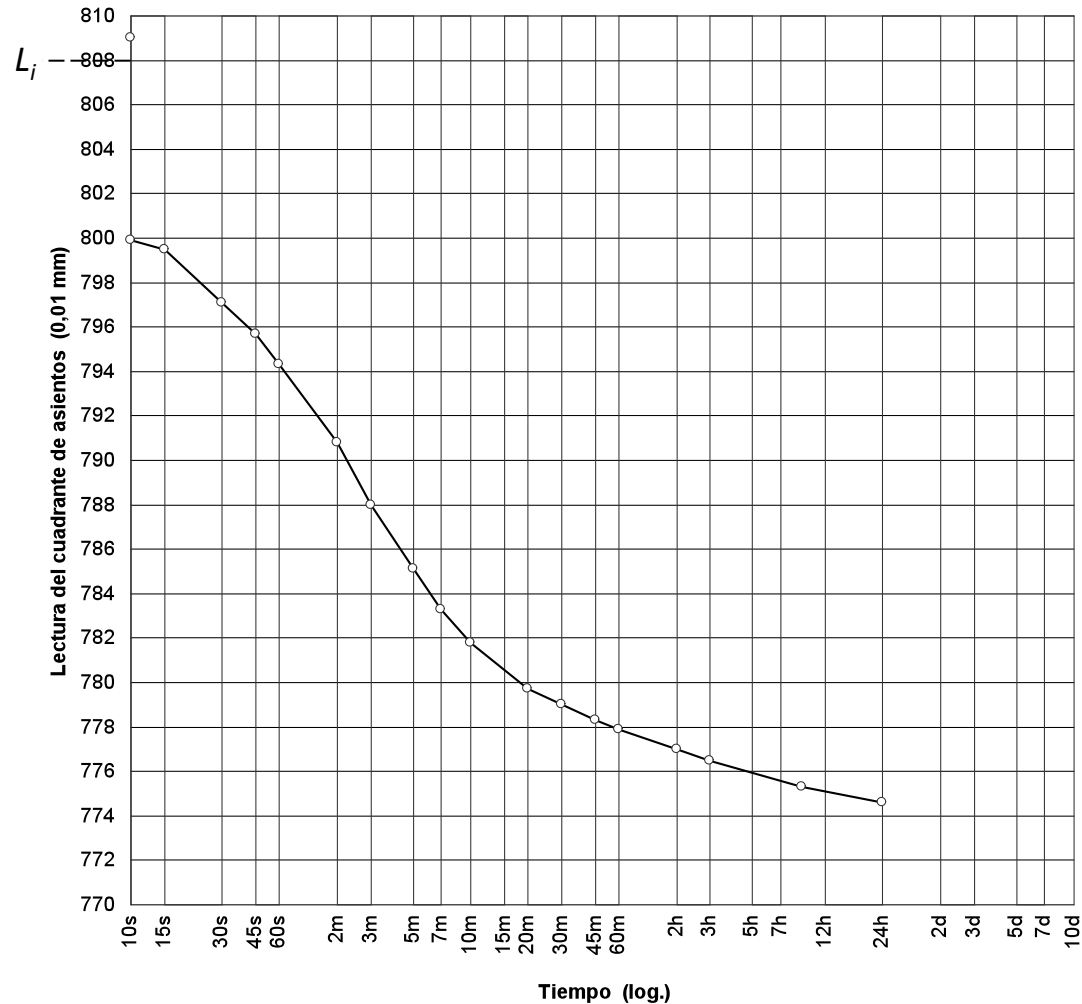
Si H muy grande $\rightarrow$ Dividir en capas

5.5. PROCESOS DE SOBRECONSOLIDACIÓN

- **Razones por las que un terreno está sobreconsolidado:**
 - Por erosión o eliminación de una capa de terreno de la zona superior.
 - Por variación de la posición del N.F.
 - Por otras razones.

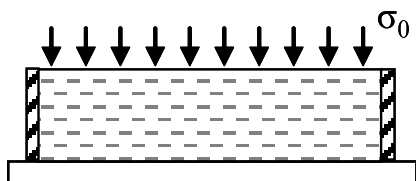
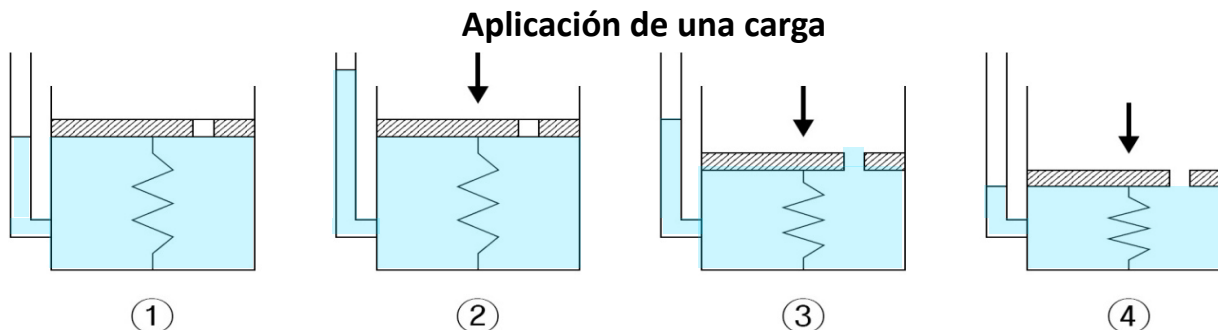
5.6. CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

Curva de consolidación de un ensayo edométrico



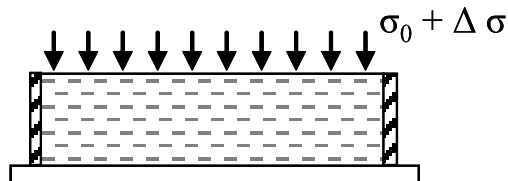
5.6. CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

Evolución en el tiempo del asiento y las tensiones



$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_0 \\ u &= u_0 = 0 \\ \sigma' &= \sigma - u = \sigma_0\end{aligned}$$

a) Antes de un escalón



$t = 0$

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_0 + \Delta \sigma \\ \Delta u &= \Delta \sigma \\ u &= u_0 + \Delta u = \Delta \sigma \\ \sigma' &= \sigma - u = \sigma_0\end{aligned}$$

$t = t$

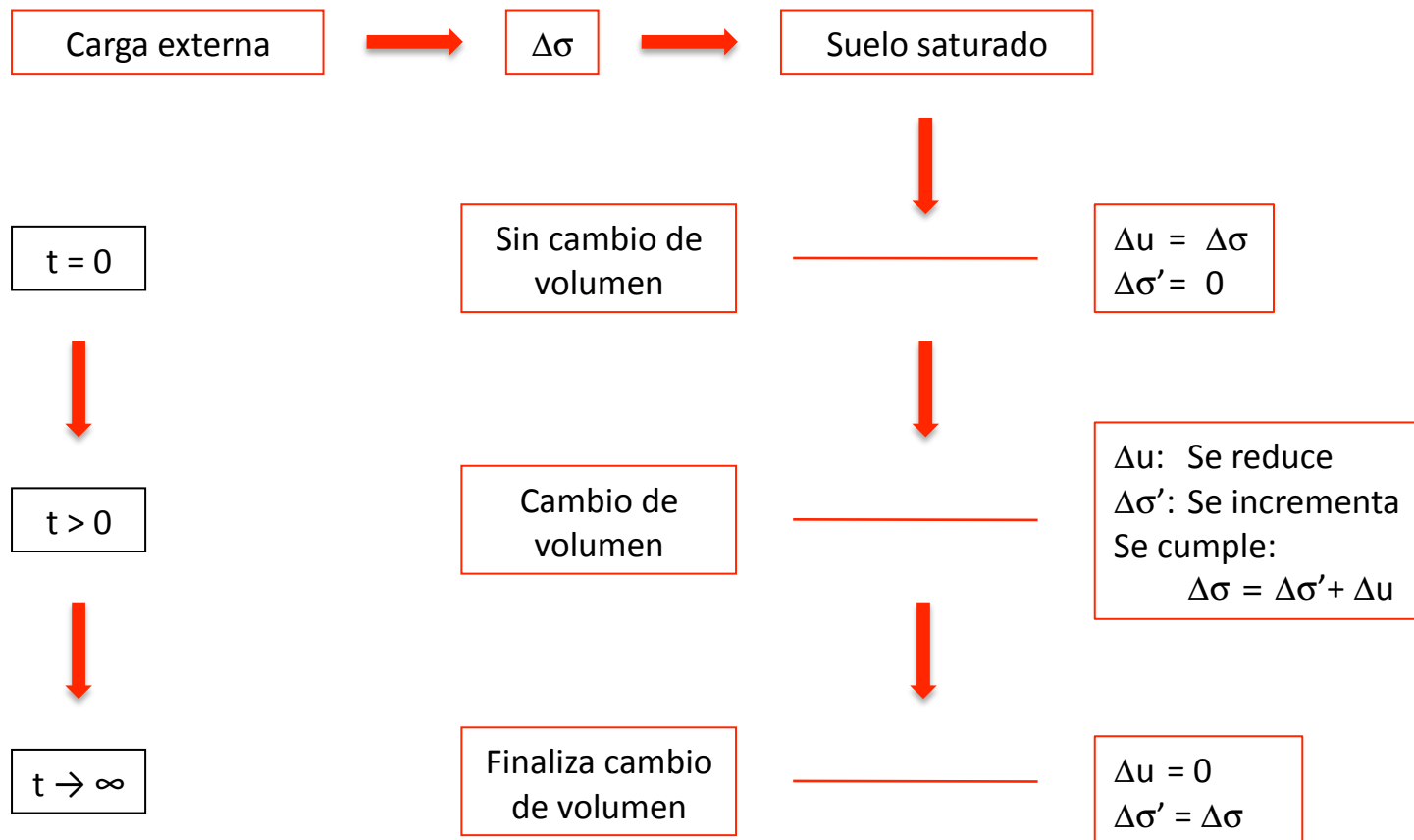
$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_0 + \Delta \sigma \\ \Delta \sigma &> \Delta u > 0 \\ \Delta \sigma' &= \Delta \sigma - \Delta u \\ u &= u_0 + \Delta u \\ \sigma' &= \sigma - u\end{aligned}$$

b) Durante un escalón

$t = \infty$

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_0 + \Delta \sigma \\ \Delta u &= 0 \\ u &= u_0 + \Delta u = 0 \\ \sigma' &= \sigma - u = \sigma_0 + \Delta \sigma\end{aligned}$$

5.6. CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL



- Este proceso se denomina consolidación primaria.

5.6. CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

Consolidación primaria

- El tiempo necesario para que finalice la consolidación primaria depende de la velocidad de expulsión del agua.



– Depende de la permeabilidad del suelo.

- Entre otras cosas, la teoría o modelo de la consolidación primaria estudia:
 - Variación del asiento con el tiempo.
 - Obtención del tiempo **práctico** para el asiento final.
 - Variación de las tensiones efectivas y presiones intersticiales en el terreno.

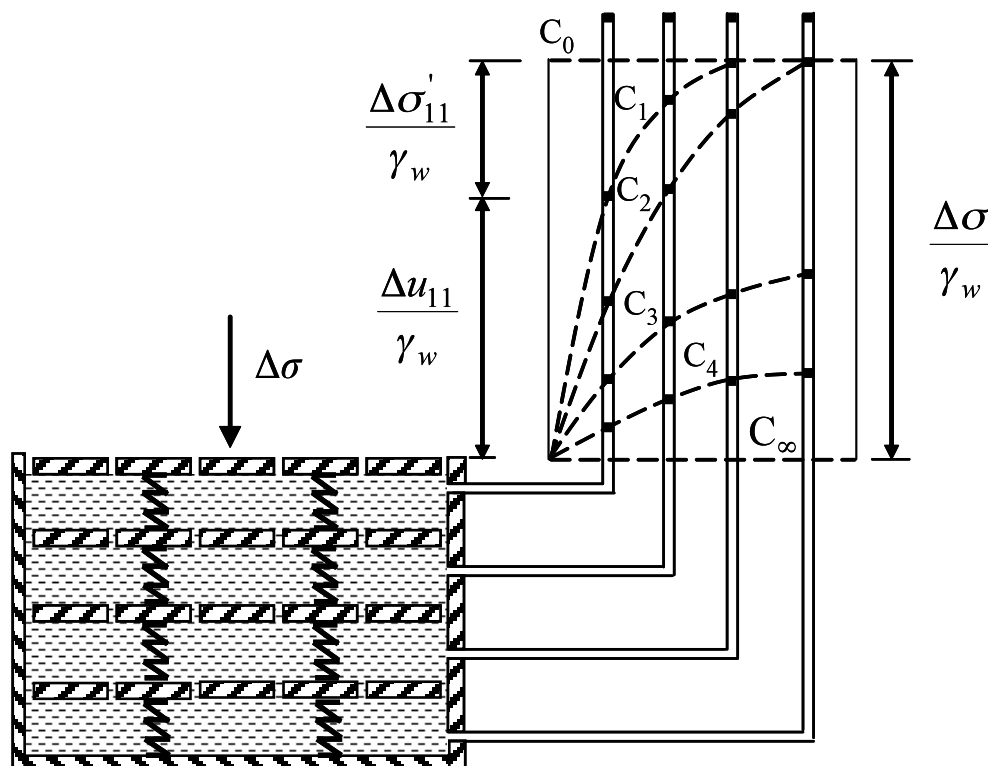
- En contraposición y, como ya se ha visto:
 - El modelo edométrico sirve para el cálculo del asiento final de un terreno por la aplicación de una carga.

5.6. CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

Introducción al fenómeno

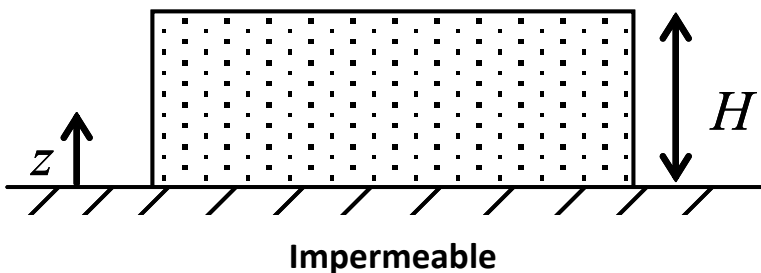
• Analogía con:

- Muelles (esqueleto sólido).
- Tabiques con agujeros (permeabilidad del suelo).



5.6. CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

Teoría de Terzaghi-Frölich (1D consolidación)



H máximo camino de drenaje

Nomenclatura:

$$\Delta u = u_e$$

- Ley de Darcy.
- Flujo de agua neto $\equiv$ Cambio volumen.



$$\frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{1}{E_m} \cdot \frac{\partial u_e}{\partial t}$$

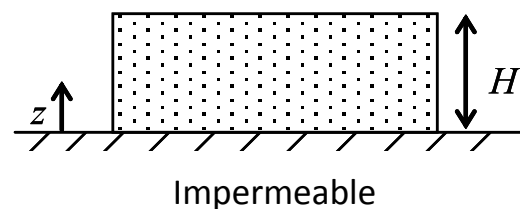


Condiciones de contorno

5.6. CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

Variables del problema

- Suelo: coef. permeabilidad k , módulo edométrico E_m
- Agua: γ_w
- Geometría: H (máximo camino de drenaje).
- Tiempo: t .
- Asiento $\left\{ \begin{array}{l} \text{— Final: } s_f \\ \text{— Variable con el tiempo: } s_t \end{array} \right.$



Con el fin de facilitar la solución se definen unos parámetros combinación de las variables anteriores.

Coeficiente de consolidación

Engloba a las variables k , E_m y γ_w

$$c_v = \frac{kE_m}{\gamma_w}$$

De dimensiones $[L^2 \cdot T^{-1}]$

Otros parámetros adimensionales

Factor tiempo

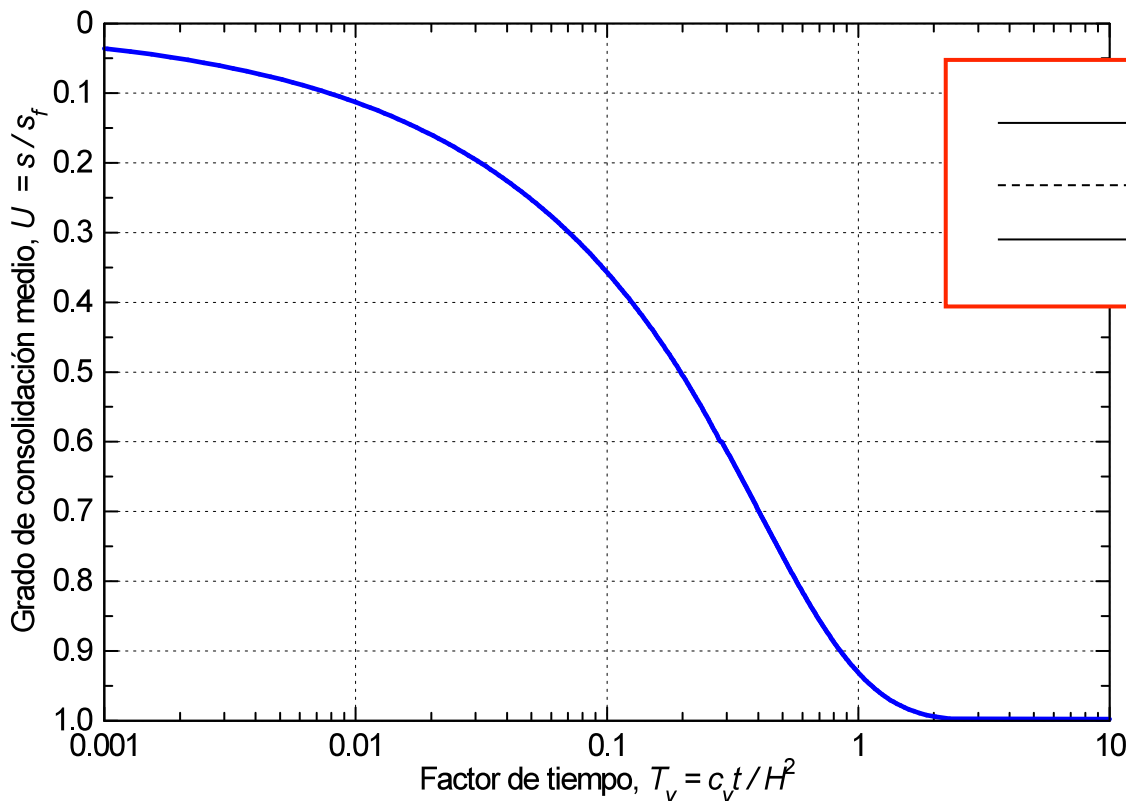
$$T_v = \frac{c_v t}{H^2}$$

Grado de
consolidación medio

$$U = \frac{s_t}{s_f}$$

5.6. CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

Curva de consolidación de Terzaghi-Frölich



Solución teórica:

$$U = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{2}{M^2} \cdot e^{-M^2 \cdot T_v} \right)$$

$$M = \frac{\pi}{2} \cdot (2 \cdot m + 1)$$

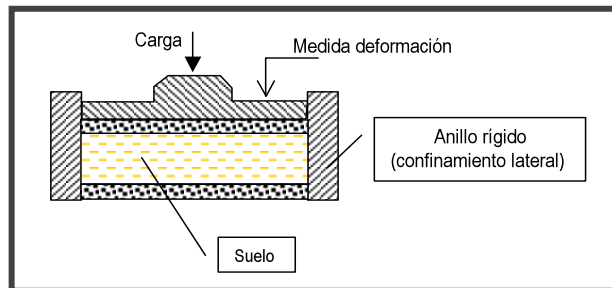
Solución aproximada: →

$$U = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot T_v} \quad \text{para : } U < 0.6$$

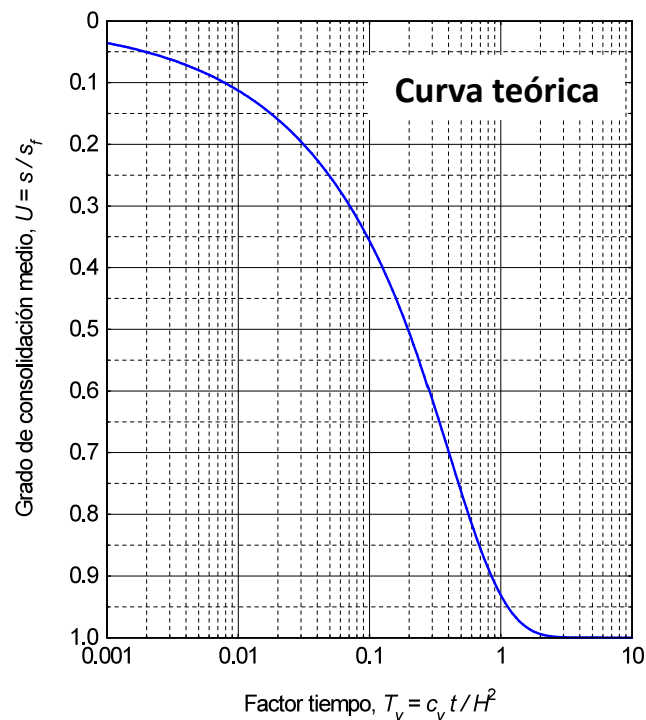
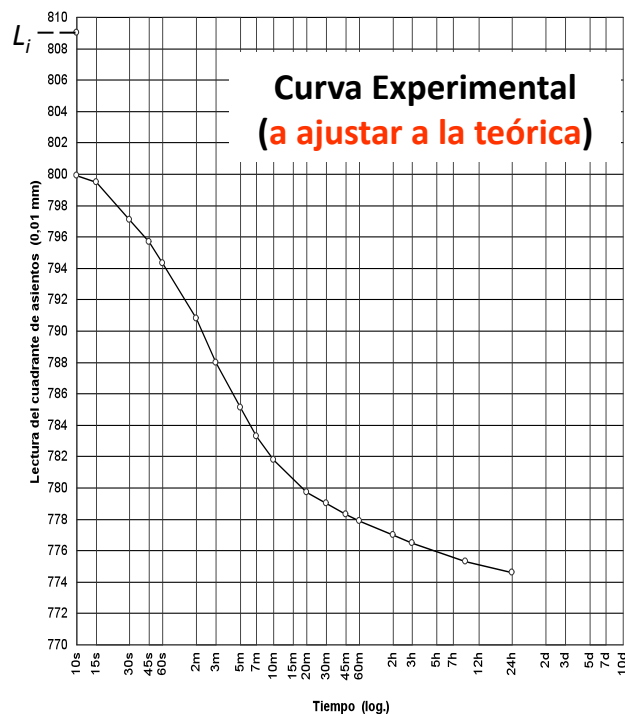
$$U = 1 - 0,8106 \cdot e^{-2,4674 \cdot T_v} \quad \text{para : } U > 0.6$$

5.6. CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

Obtención de c_v a partir de curvas de consolidación experimentales

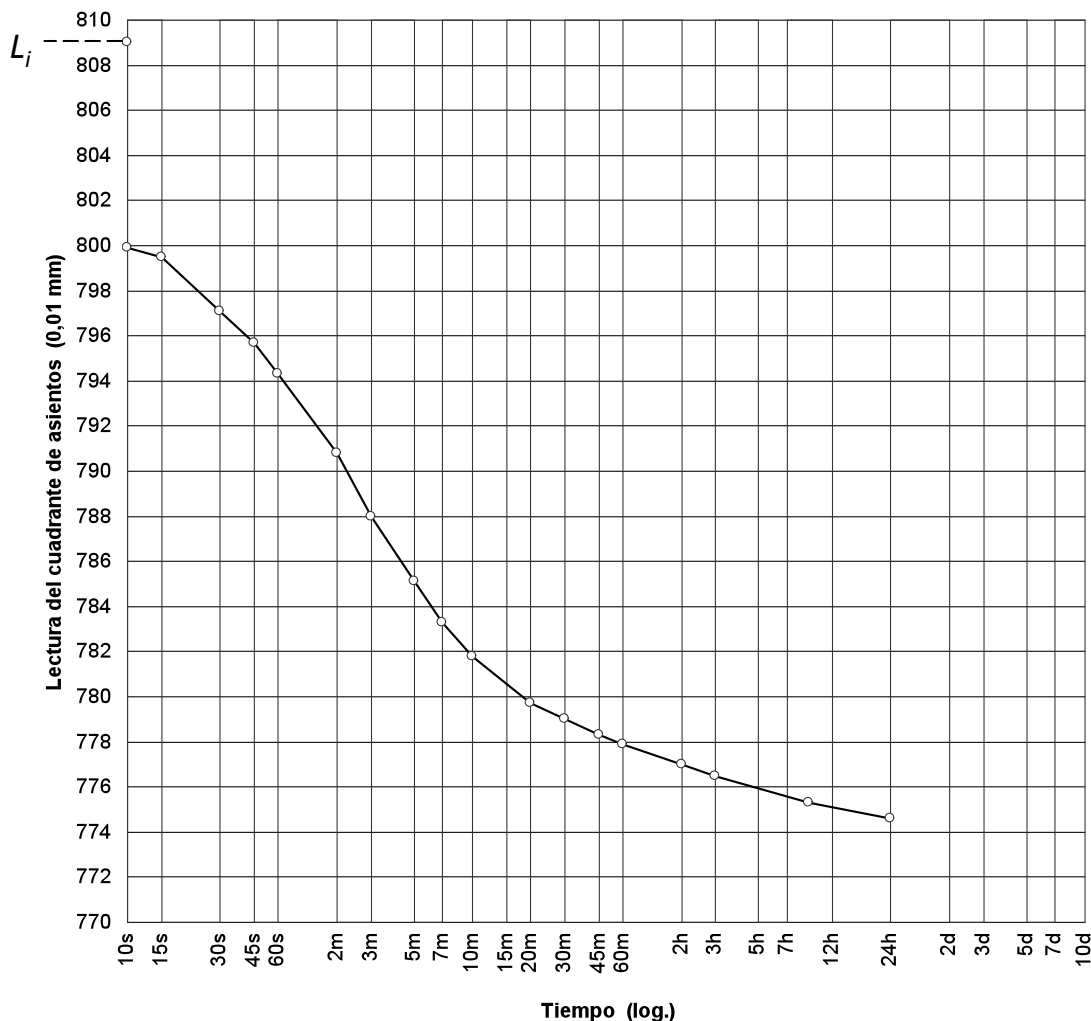


Una curva de consolidación
para cada escalón de carga.



5.6. CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

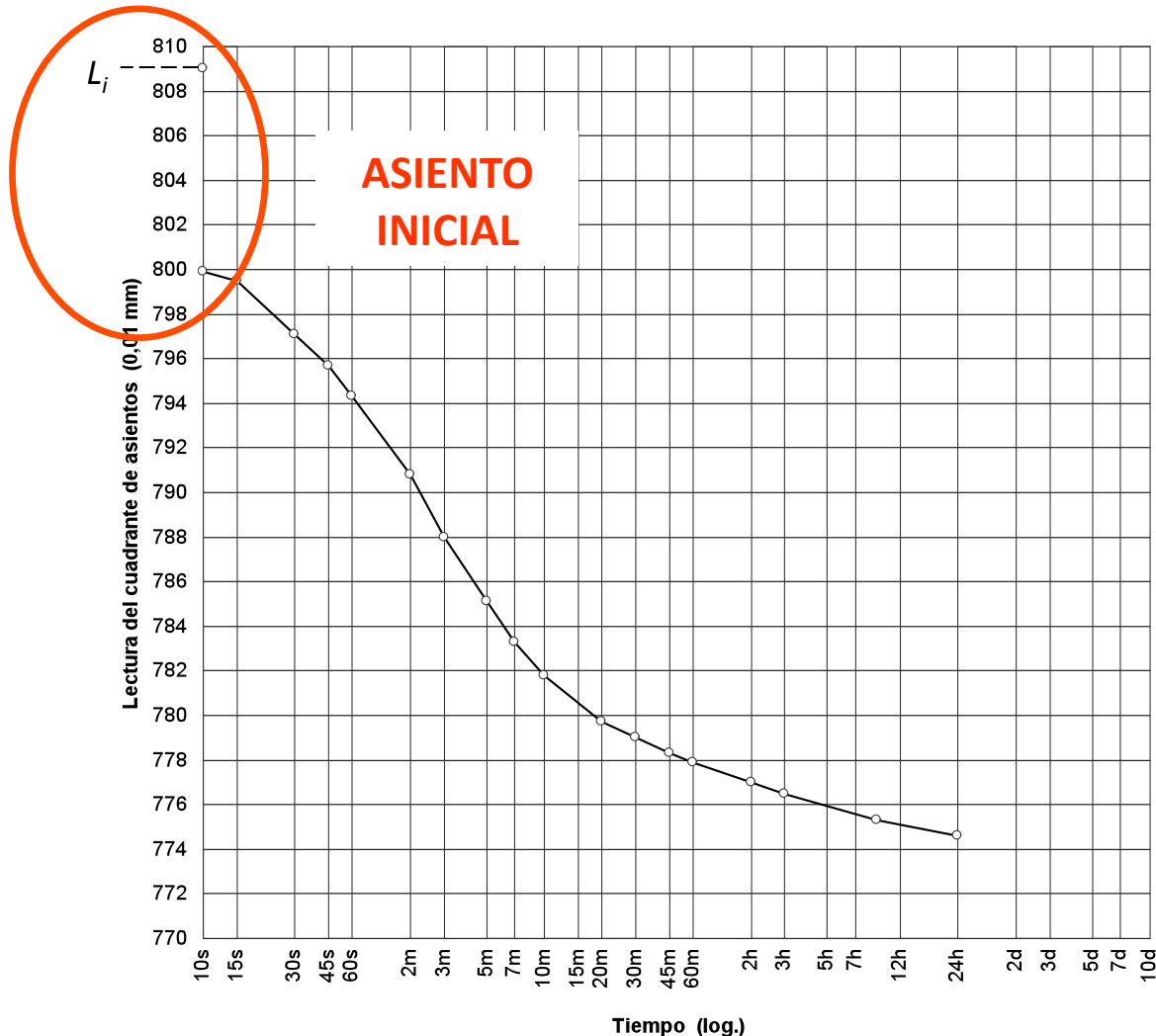
Obtención de c_v a partir de curvas de consolidación experimentales



L_i lectura inicial escalón =
lectura final escalón anterior.

5.6. CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

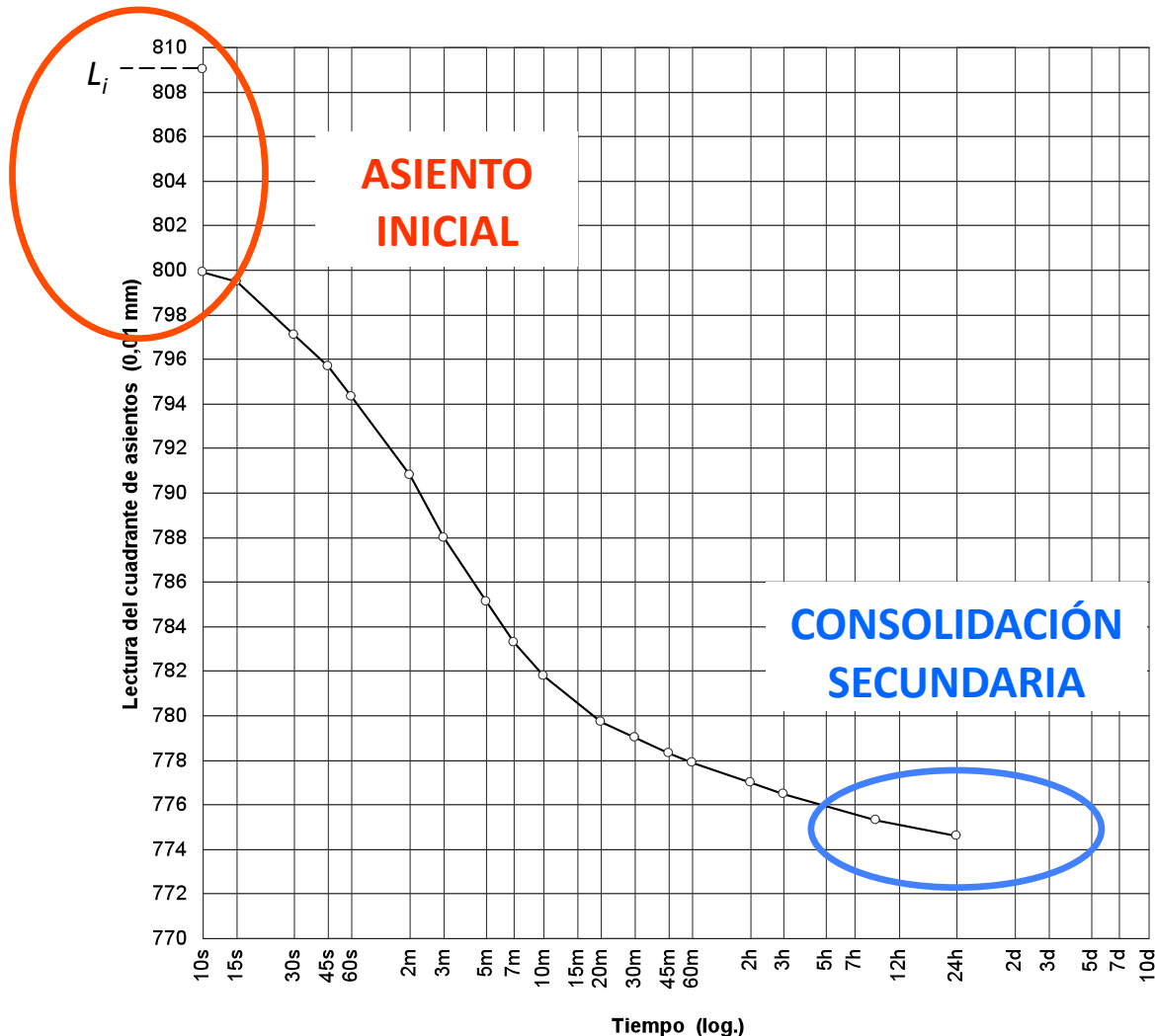
Obtención de c_v a partir de curvas de consolidación experimentales



L_i lectura inicial escalón =
lectura final escalón anterior.

5.6. CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

Obtención de c_v a partir de curvas de consolidación experimentales



L_i lectura inicial escalón =
lectura final escalón anterior.

5.6. CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

Obtención de c_v a partir de curvas de consolidación del ensayo

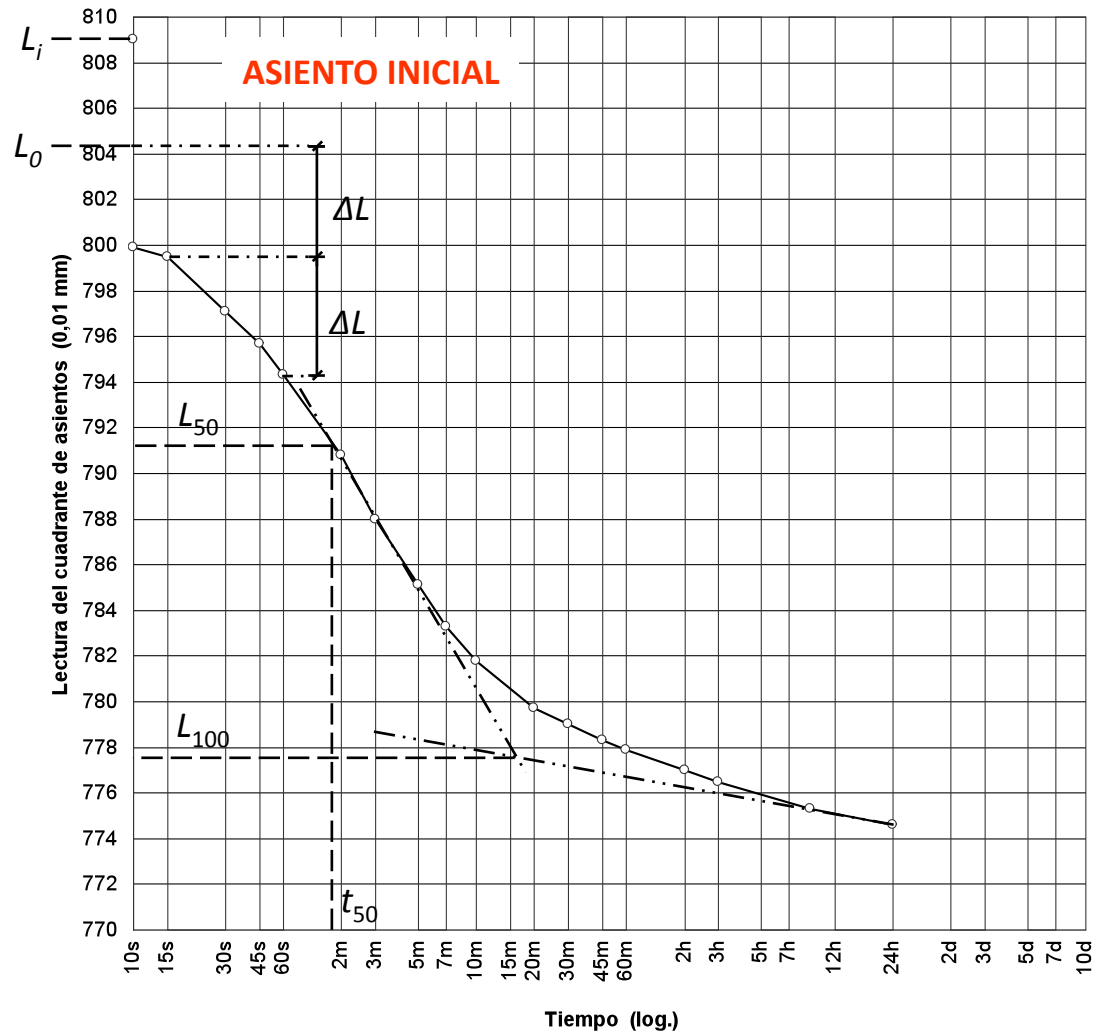
- En la curva experimental hay que eliminar:
 - Asiento inicial (poros o fisuras sin saturar, reajustes del aparato).
 - Continuación de la deformación cuando los Δu ya se han disipado (CONSOLIDACIÓN SECUNDARIA).
- Para poder hacer el ajuste con la curva teórica y obtener el coeficiente de consolidación.
- El **método** más utilizado es el de **Casagrande**.

Consolidación secundaria

- Debida a la viscosidad del suelo/micro-macro poros.
- En cualquier caso, menos importante en el terreno que en los ensayos de laboratorio (influencia del elevado gradiente hidráulico aplicado en los ensayos).

MÉTODO DE CASAGRANDE

(Obtención de c_v)

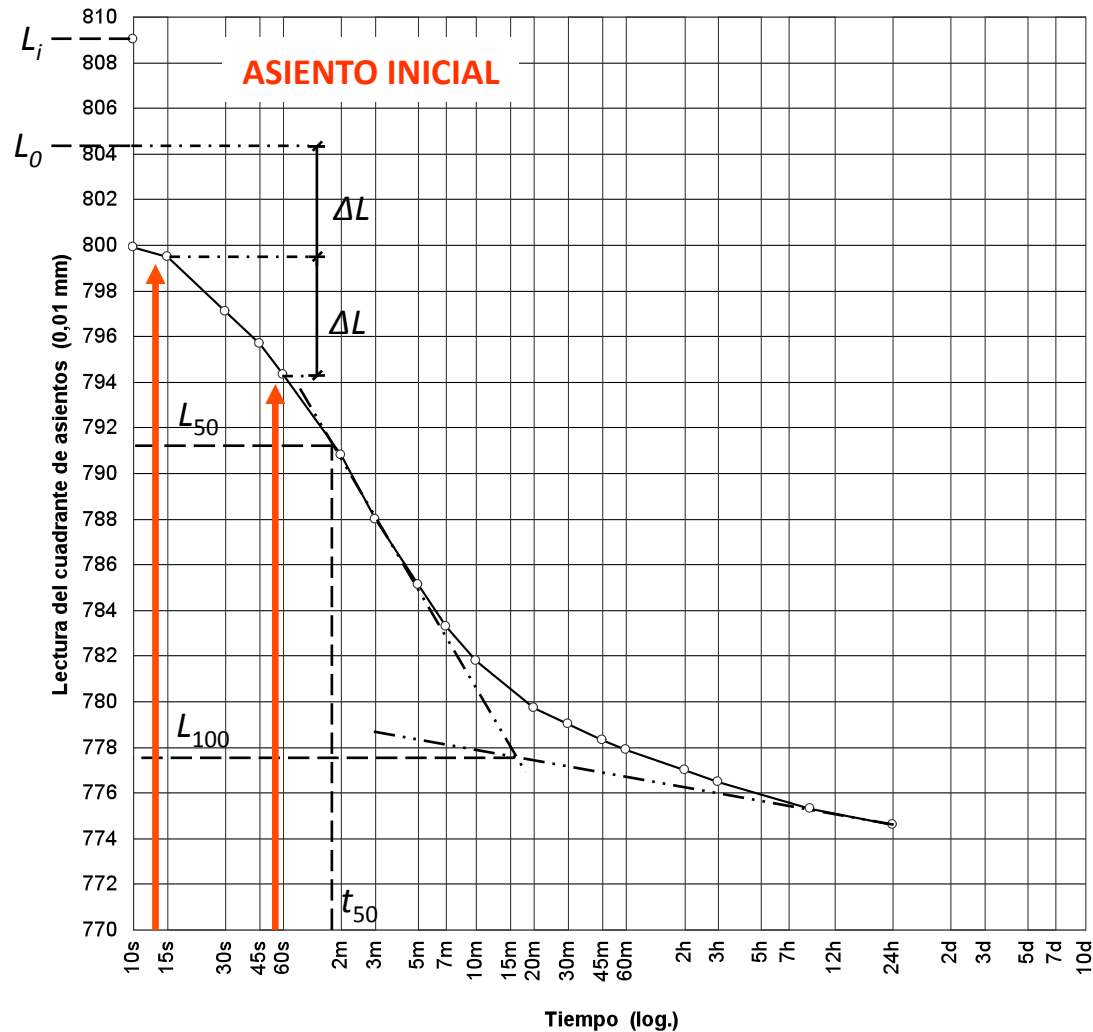


L_i lectura inicial escalón =
lectura final escalón anterior.

L_0 lectura inicial escalón
corregida.

MÉTODO DE CASAGRANDE

(Obtención de c_v)

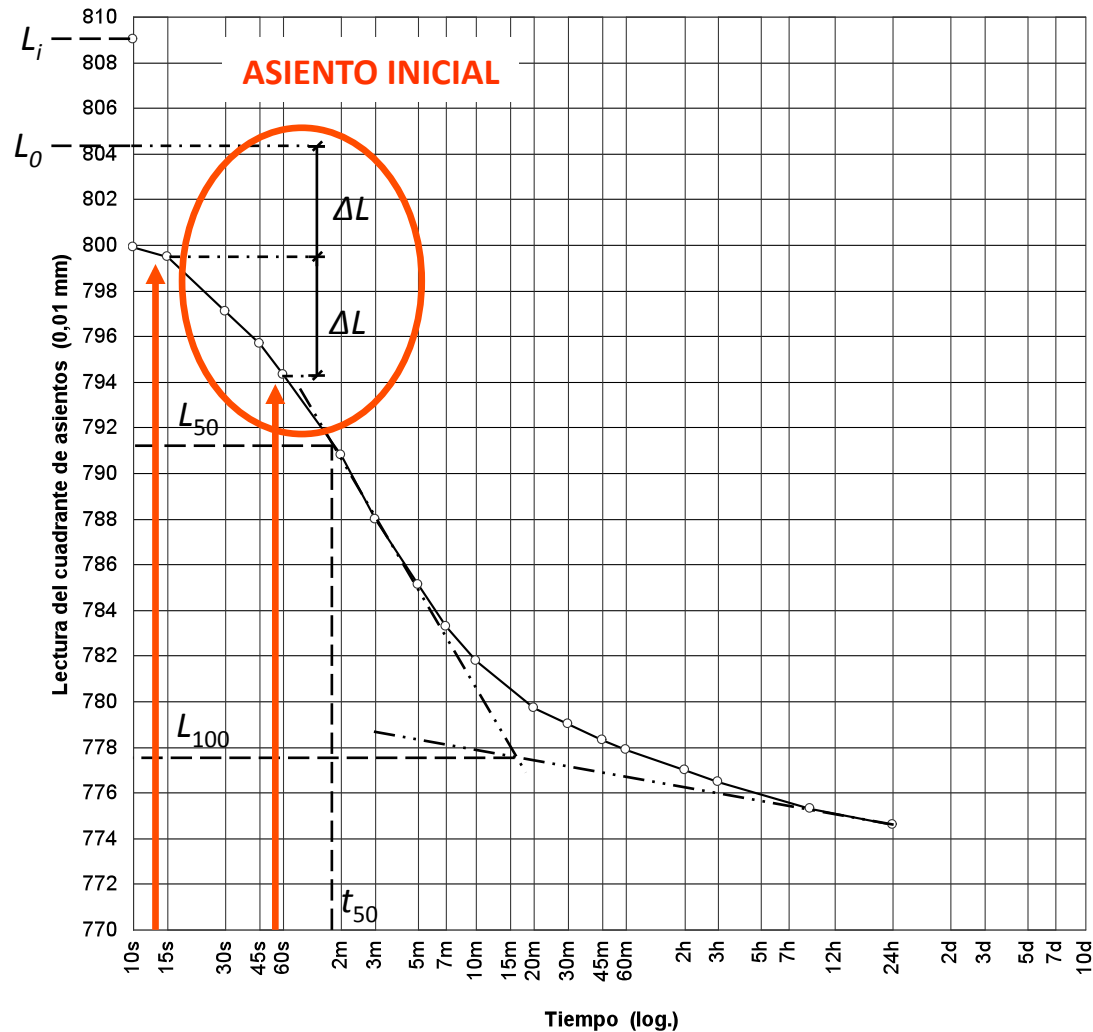


L_i lectura inicial escalón =
lectura final escalón anterior.

L_0 lectura inicial escalón
corregida.

MÉTODO DE CASAGRANDE

(Obtención de c_v)

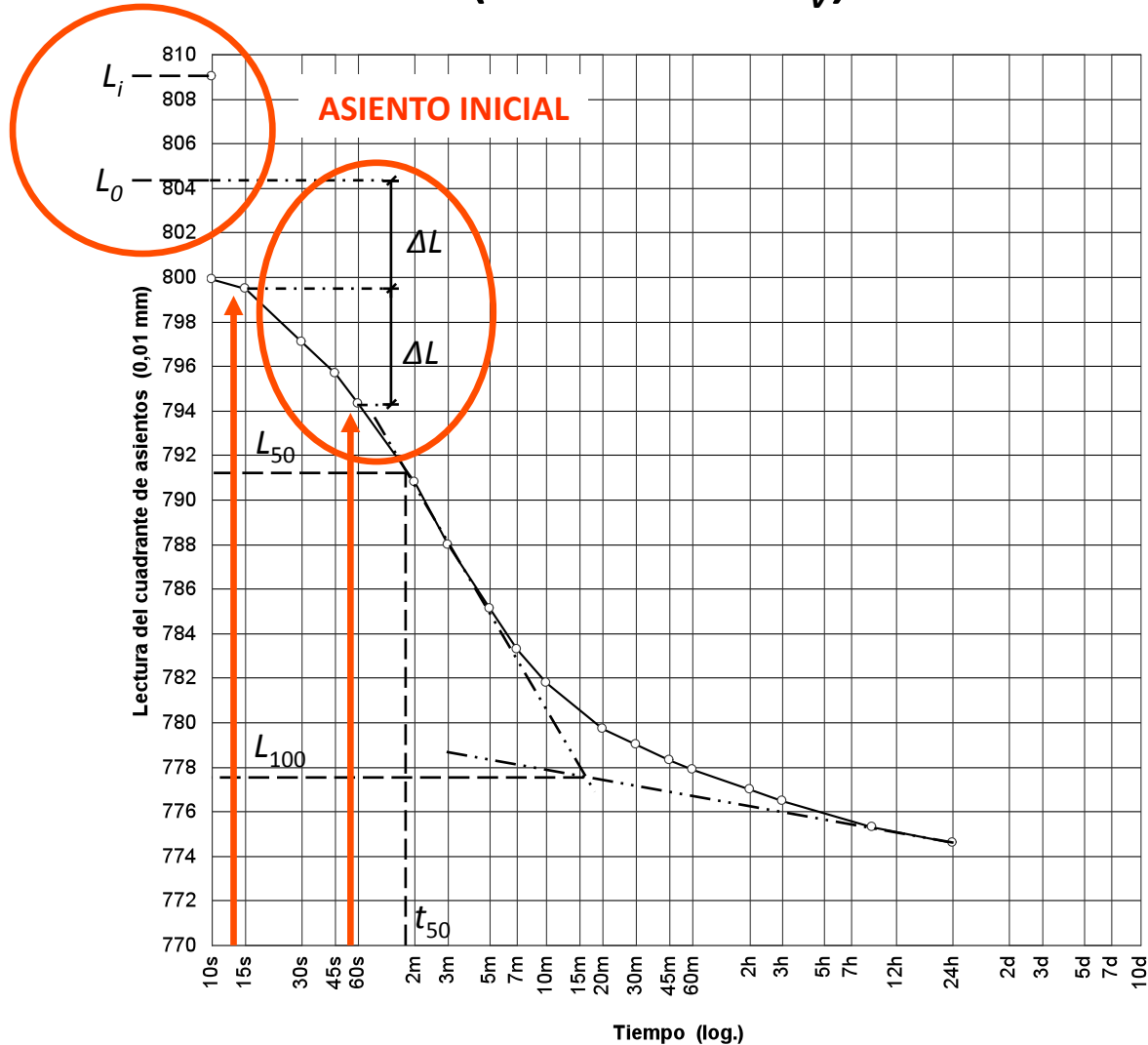


L_i lectura inicial escalón =
lectura final escalón anterior.

L_0 lectura inicial escalón
corregida.

MÉTODO DE CASAGRANDE

(Obtención de c_v)

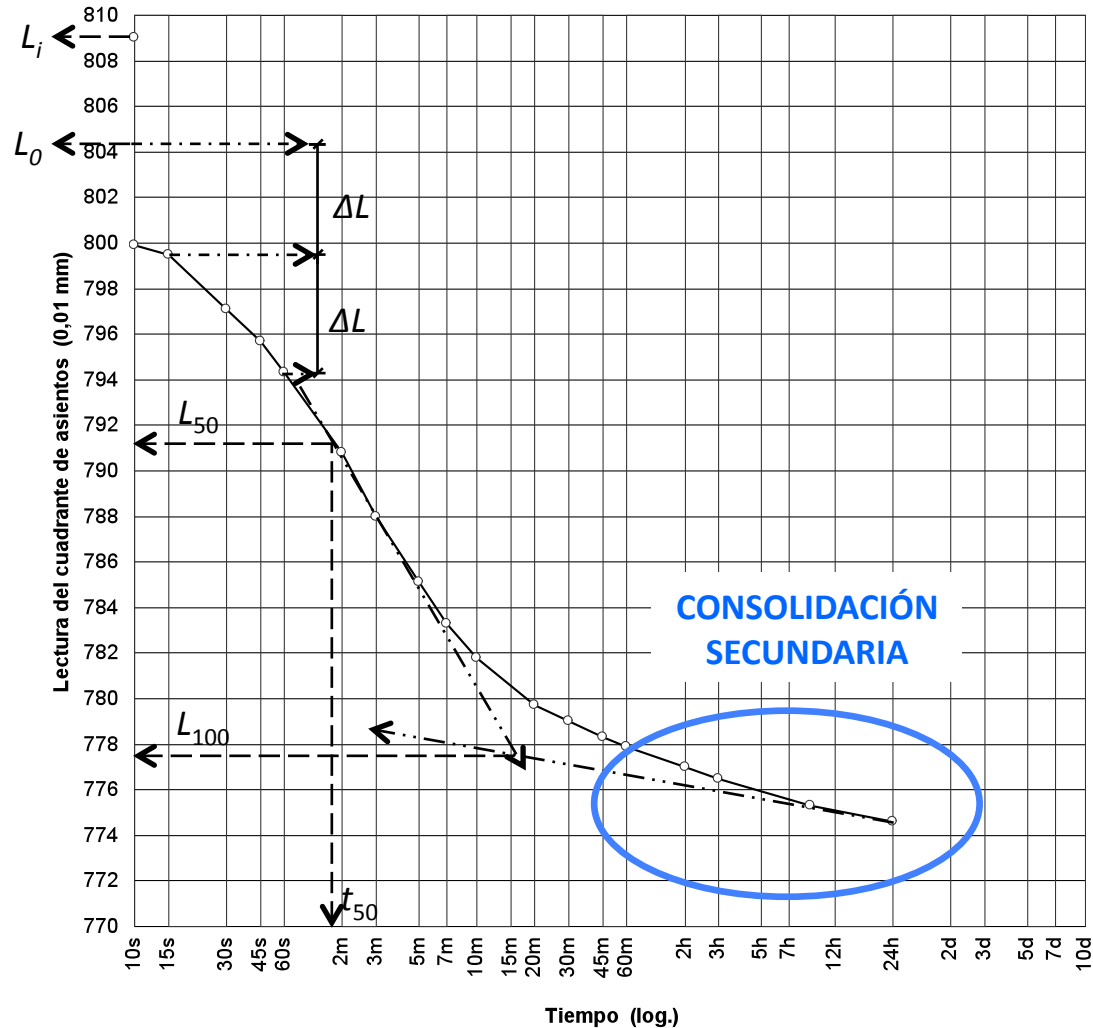


L_i lectura inicial escalón =
lectura final escalón anterior.

L_0 lectura inicial escalón
corregida.

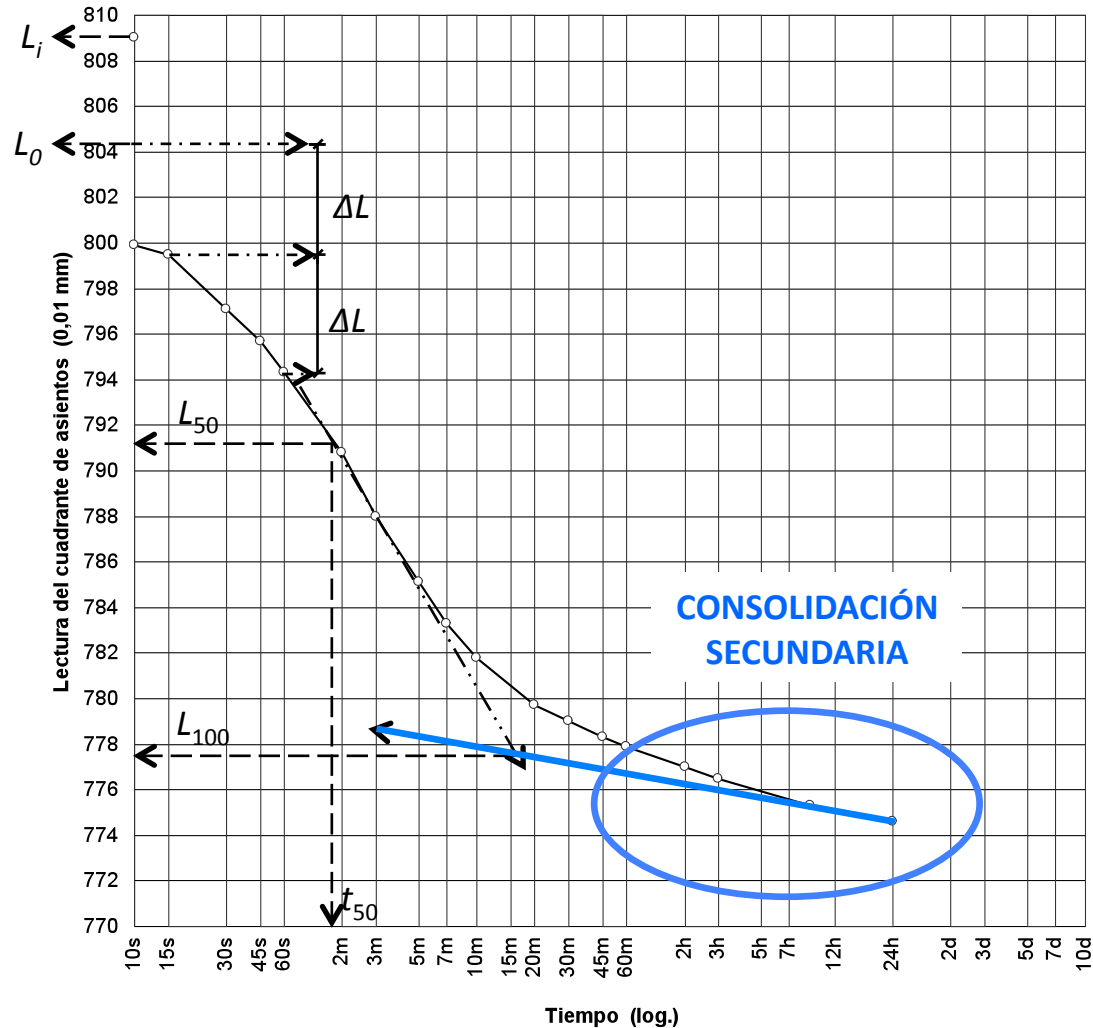
MÉTODO DE CASAGRANDE

(Obtención de c_v)



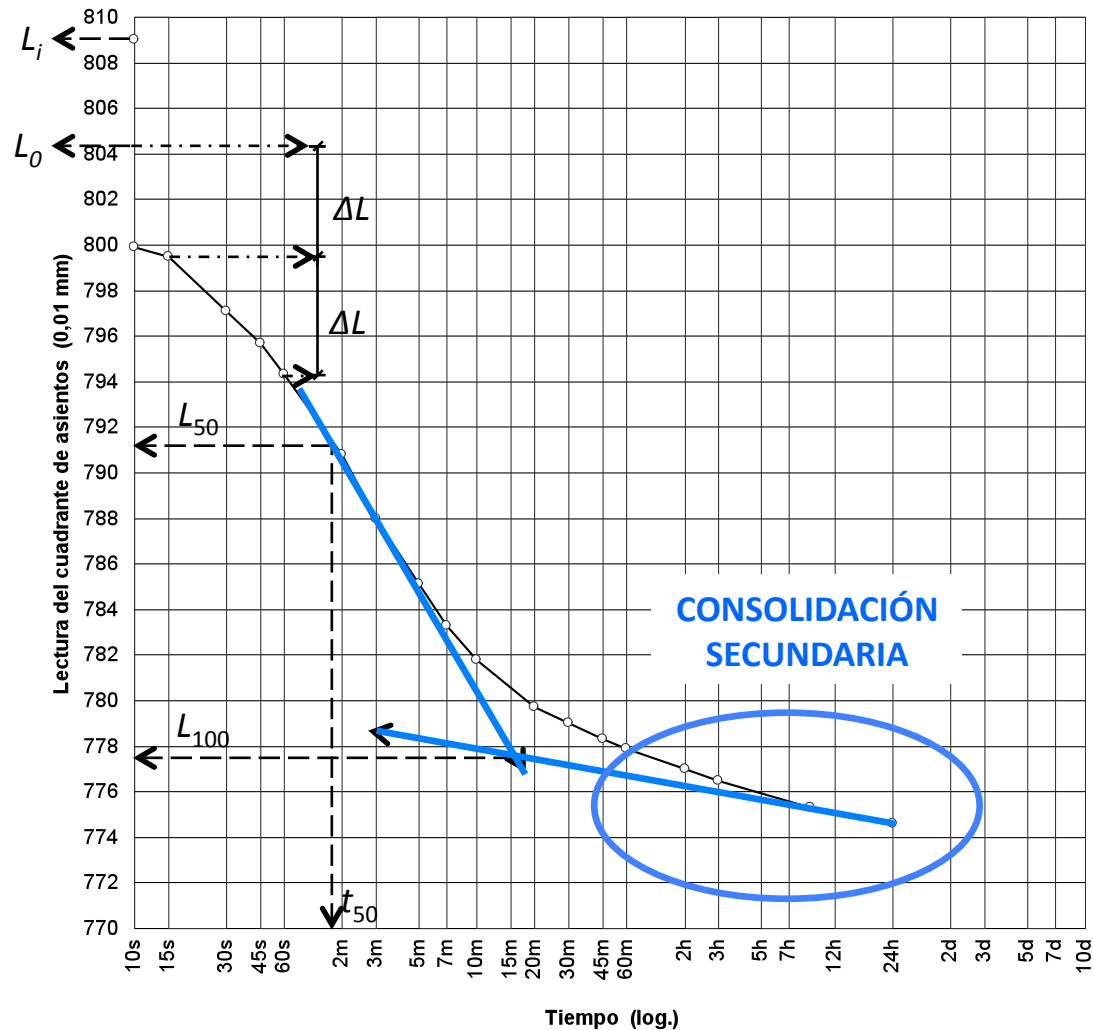
MÉTODO DE CASAGRANDE

(Obtención de c_v)



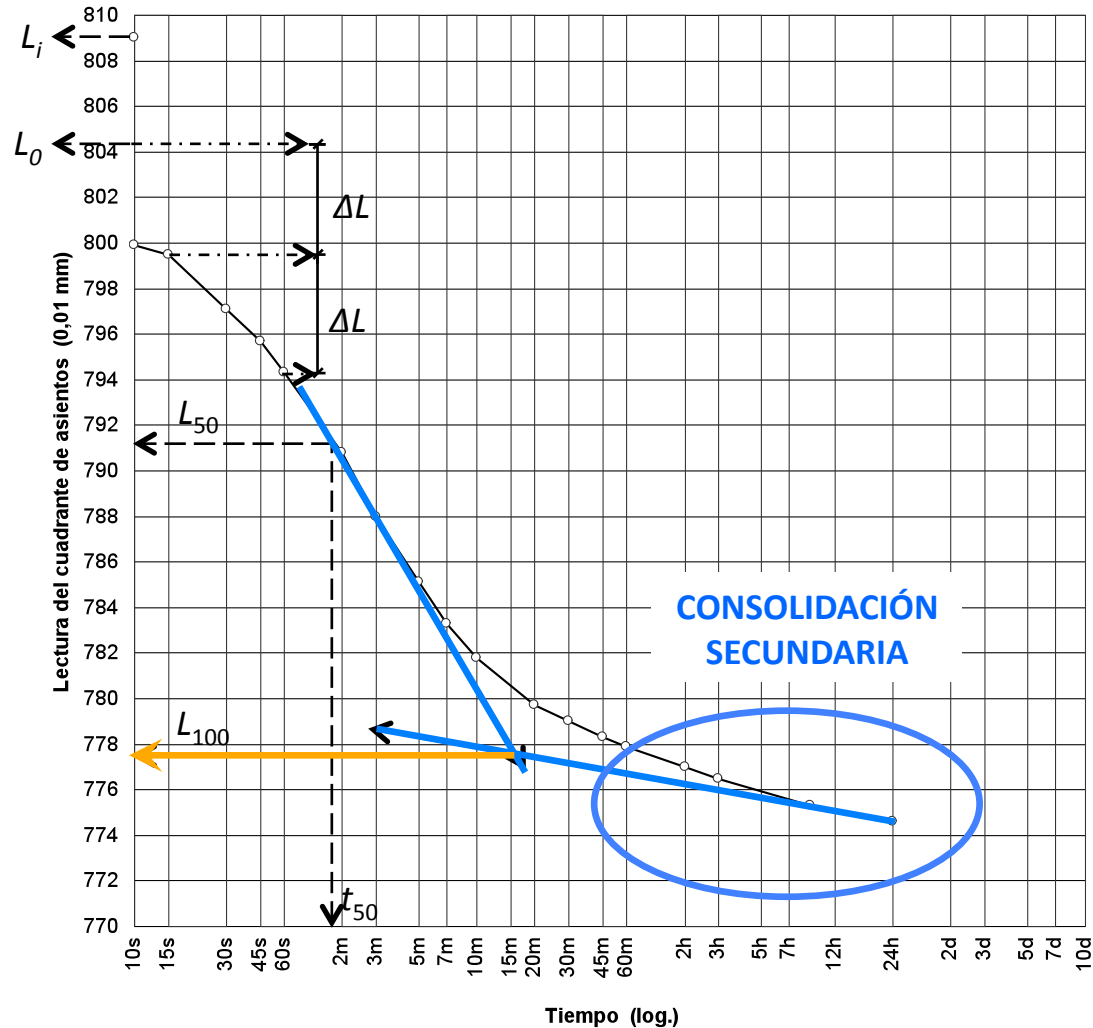
MÉTODO DE CASAGRANDE

(Obtención de c_v)



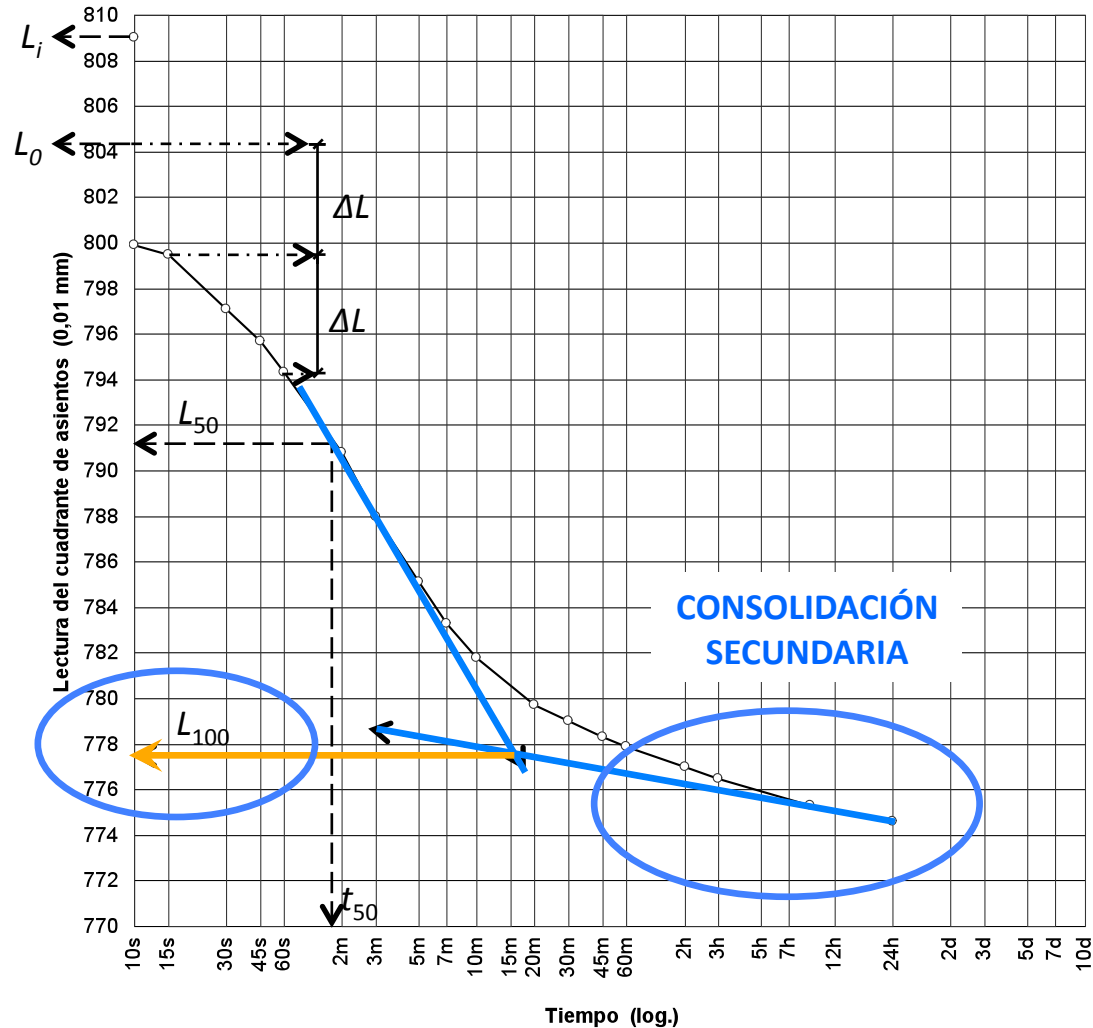
MÉTODO DE CASAGRANDE

(Obtención de c_v)



MÉTODO DE CASAGRANDE

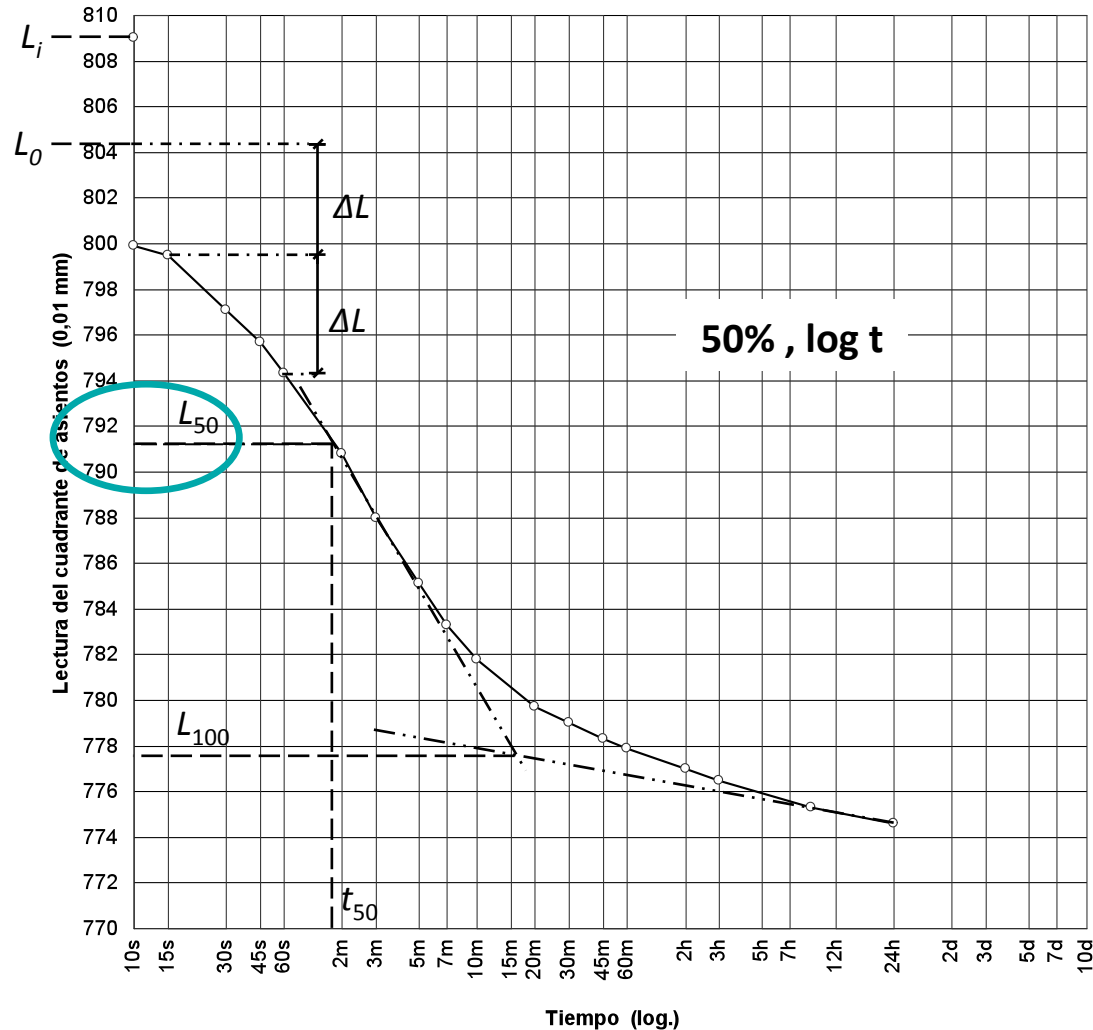
(Obtención de c_v)



$$C_v = \frac{T_{50} \cdot H^2}{t_{50}} = \frac{0,196 \cdot H_{50}^2}{t_{50}}$$

MÉTODO DE CASAGRANDE

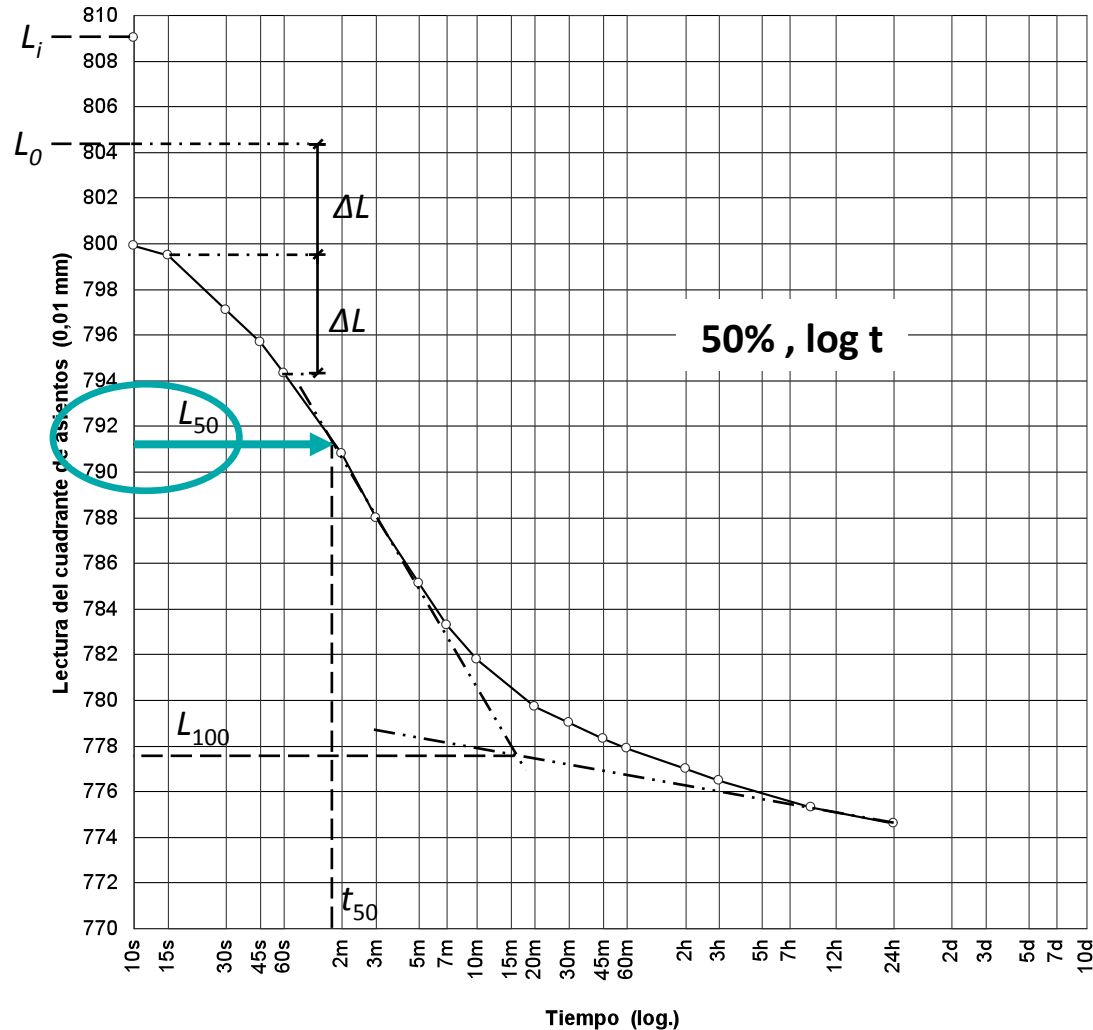
(Obtención de c_v)



$$c_v = \frac{T_{50} \cdot H^2}{t_{50}} = \frac{0,196 \cdot H_{50}^2}{t_{50}}$$

MÉTODO DE CASAGRANDE

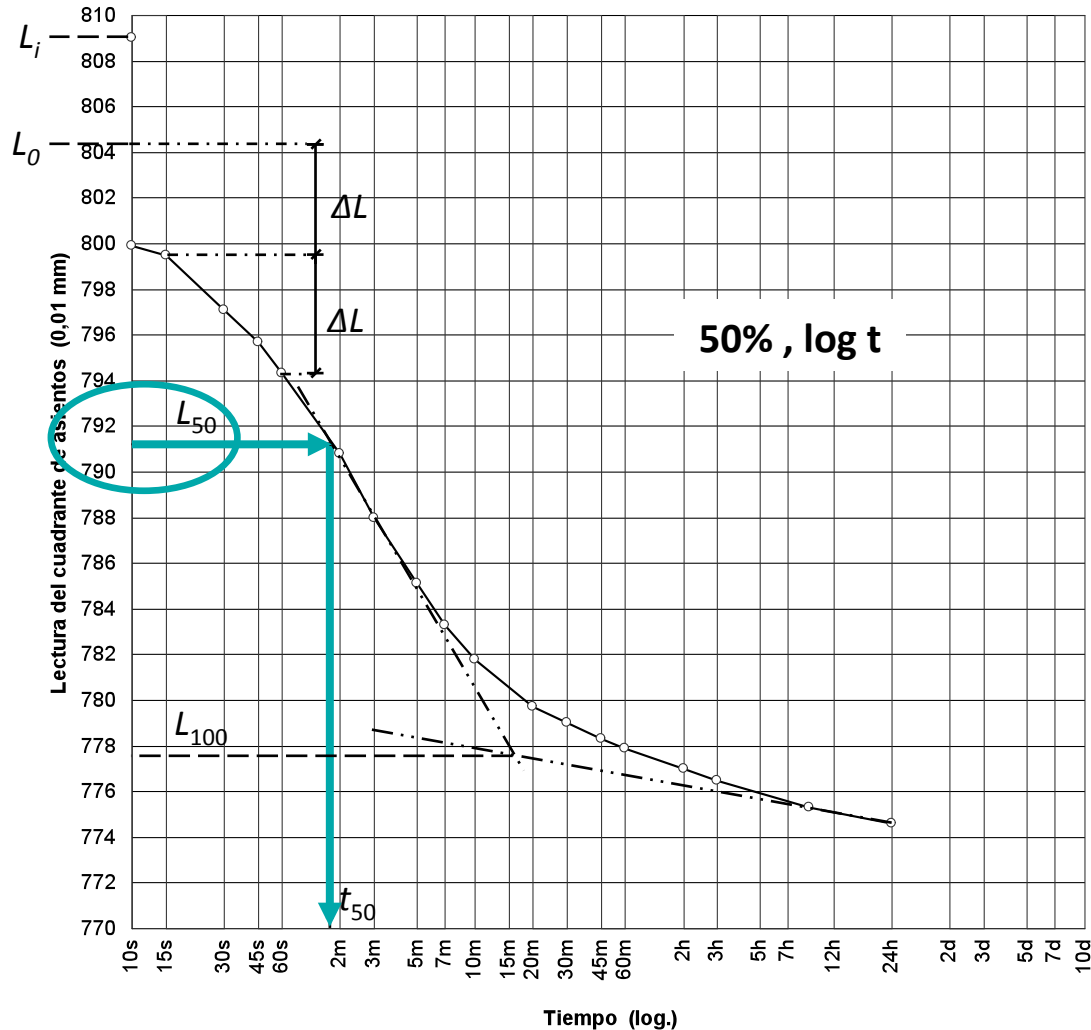
(Obtención de c_v)



$$c_v = \frac{T_{50} \cdot H^2}{t_{50}} = \frac{0,196 \cdot H_{50}^2}{t_{50}}$$

MÉTODO DE CASAGRANDE

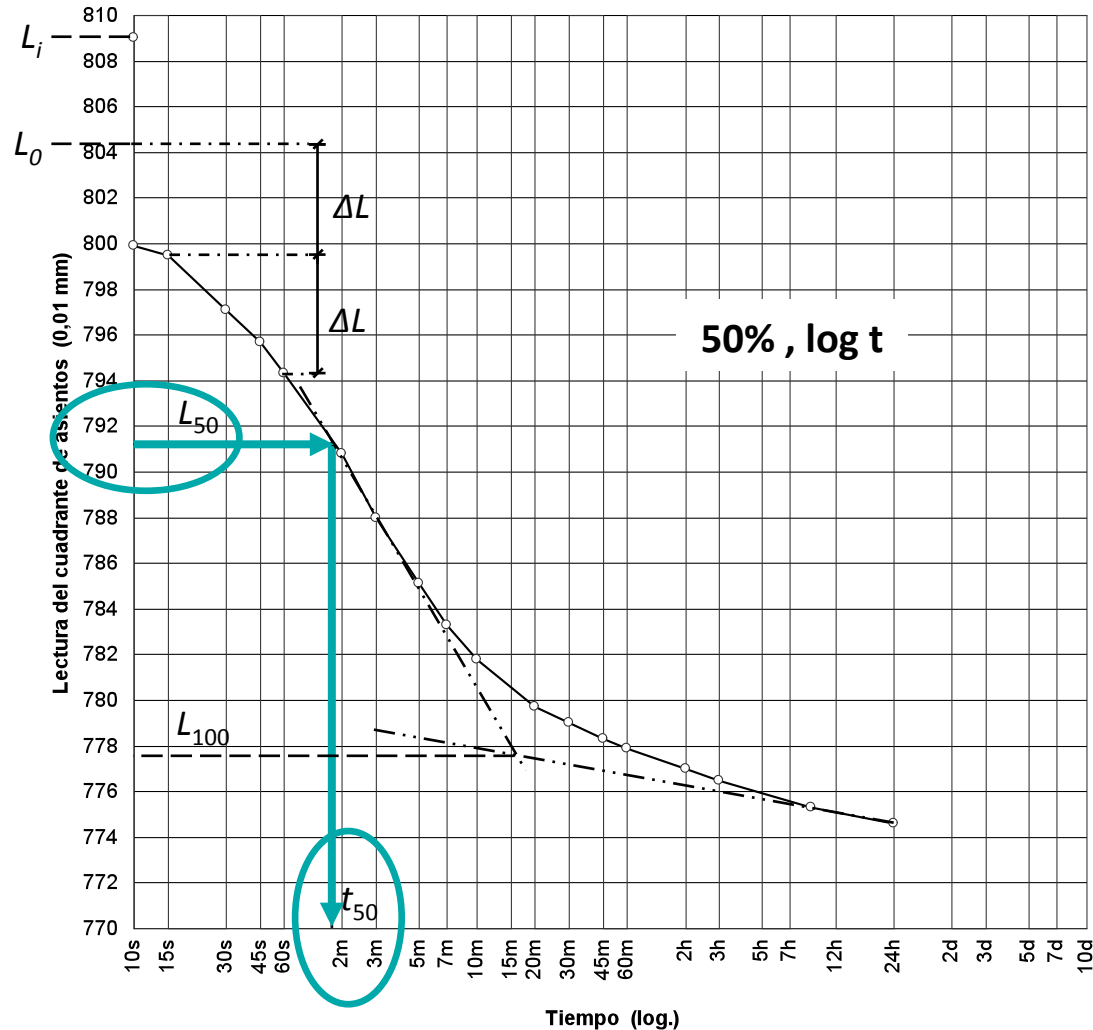
(Obtención de c_v)



$$c_v = \frac{T_{50} \cdot H^2}{t_{50}} = \frac{0,196 \cdot H_{50}^2}{t_{50}}$$

MÉTODO DE CASAGRANDE

(Obtención de c_v)



$$c_v = \frac{T_{50} \cdot H^2}{t_{50}} = \frac{0,196 \cdot H_{50}^2}{t_{50}}$$