

"LA INCERTIDUMBRE EN EL PROYECTO DE UN TÚNEL"

Alcibíades Serrano

Catedrático Emérito Universidad Politécnica de Madrid

CONTENIDO

A. LA INCERTIDUMBRE EN EL PROYECTO

1. INTRODUCCIÓN
2. TIPOS DE OBRAS
3. FENÓMENOS MECÁNICOS EN EL TÚNEL
4. EL TERRENO
5. COMPORTAMIENTO MECÁNICO
6. ESTRATEGIA FRENTE A LA INCERTIDUMBRE
7. ASPECTOS ECONÓMICOS

B. LA INCERTIDUMBRE EN LA CONVERGENCIA

1. EL PROCESO TENSODEFORMACIONAL
2. RELAJACIÓN DE TENSIONES
3. CONVERGENCIA
4. CONCLUSIONES

A. LA INCERTIDUMBRE EN EL PROYECTO

- 1 INTRODUCCIÓN

- La incertidumbre está presente en todas las obras de ingeniería civil.
- Todas las obras tienen asociado un cierto riesgo, consecuencia de la incertidumbre
- La técnica trata de minimizar el riesgo y llevarlo a valores aceptables por la sociedad.
- La sociedad en general no tiene concepto del riesgo.
- Si en todas las obras hay incertidumbres, en las obras subterráneas hay muchas circunstancias que la aumentan.

- Todo túnel, aún el más inocente aparentemente, tiene un cierto riesgo.
- En toda obra civil se asume un cierto riesgo. Hay que distinguir muy bien entre riesgo asumido e imprudencia temeraria que es un delito.
- El concepto de previsible-imprevisible separa la imprudencia temeraria del riesgo asumido.

2.- TIPOS DE OBRA

Las obras de las que se ocupa la Ingeniería civil se pueden clasificar en dos tipos, según su relación con el terreno:

- Obras aditivas
- Obras sustractivas

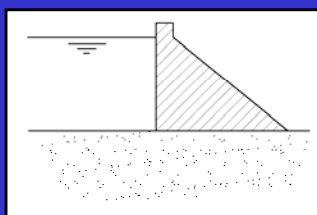
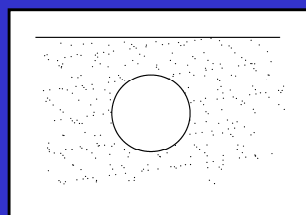


Fig. 1 a) Obra aditiva



b) Obra sustractiva

Ejemplos:

De obra aditiva: Presa, puente, terraplén, firme

De obra sustractiva: Desmonte, túnel, caverna

NOTAS DISTINTIVAS

TIPO	ESENCIA	ACCIÓN EN EL TERRENO	CONSECUENCIAS DE LA ACCIÓN		ATENCIÓN DEL PROYECTISTA SOBRE
			TENSIONES	MOVIMIENTOS	
Obra aditiva	CUERPO	PONE	CARGA	ASIENTOS	EL CUERPO Y SU INTERACCIÓN CON EL TERRENO
Obra Sustractiva	VACÍO	QUITA	CARGA Y DESCARGA	CONVERGENCIA	LA FRONTERA DEL VACÍO Y SU INTERACCIÓN

3.- FENÓMENOS MECÁNICOS EN EL TÚNEL

- El túnel es un vacío, un hueco que se abre dentro del terreno.
- Antes de abrir el hueco del túnel el terreno estaba ya tensionado.
- La apertura del hueco implica la eliminación del terreno que lo ocupaba y con él, la desaparición de las tensiones que ejercía sobre la superficie que pasa a ser entonces el contorno del túnel.
- La eliminación de esas tensiones desencadena un proceso de relajación tensional en el macizo.
- La relajación tensional implica unas deformaciones asociadas lo que se visualiza en un proceso de convergencia del contorno del túnel.
- Todos estos fenómenos tensodeformacionales se producen preferentemente en el contorno del túnel lo que obliga a que el ingeniero centre su atención sobre el terreno del contorno, frontera del vacío.

4.- EL TERRENO

a) En las obras aditivas

- La atención del proyectista se vuelca preferentemente en el cuerpo de la obra que:
 - está constituido por un material perfectamente conocido.
 - está fabricado con unas especificaciones de proyecto.
 - se conoce su comportamiento mecánico.
 - se conocen las acciones sobre él.
- La atención del proyectista sobre el terreno es en muchos casos secundaria:
 - aunque no debiera ser así.
 - delega en el geotécnico y muchas veces le presiona.

b) En las obras sustractivas

- No existe el cuerpo de la obra
- La atención se centra en el terreno porque el resto es el vacío
 - El proyectista es el geotécnico, en general.
 - El terreno está dado. No se fabrica.
 - El terreno no se conoce, hay que investigarlo.
 - El terreno es como un libro cerrado.
 - El libro hay que abrirlo, leerlo e interpretar lo leído.

EL LIBRO DEL TERRENO

- El libro del terreno es como un libro de J.L. Borges.



- Tiene infinitas páginas.
- Entre cada dos páginas hay siempre una tercera.
- Las páginas están en mal estado.

Se leen mal
 No pueden leerse en su totalidad porque
 están borrosas
 En el mejor de los casos sólo algunas
 frases sueltas y truncadas.
 A veces sólo unas pocas palabras

- Con esa lectura tan precaria, unas pocas páginas, frases truncadas y palabras sueltas el proyectista tiene que componer un relato ajustado a lo que tiene y que de sentido al libro.
- Y con ese relato se proyecta y construye el túnel.

5.- COMPORTAMIENTO MECÁNICO

- a) Ensayos de laboratorio
 - Las incertidumbres del relato sobre el terreno son aún mayores, si cabe, en relación al comportamiento mecánico.
 - Se tienen pocas muestras para ensayar.
 - Su representatividad es discutible:
 - Los materiales de peor calidad se pierden o están en mal estado.
 - Casi siempre sólo se ensayan los mejores.
 - Los tipos de ensayos son muy limitados.
 - Las trayectorias de tensiones reales son muy complejas y las que se imponen en los ensayos son muy simples.
 - El tamaño de las muestras ensayadas es muy pequeño.

b) Ensayos de campo

- Los ensayos in situ a escala suficiente son prácticamente inviables.
- Los ensayos in situ reales son de volumen pequeño y muy simples.
- No se hacen ensayos in situ de larga duración.
- El comportamiento a gran escala en campo puede ser y es muy distinto al de laboratorio.
- En los materiales reológicos las predicciones de la evolución de la convergencia son casi siempre irreales.

MODELOS CONSTITUTIVOS

- Se dispone de códigos y programas de cálculo muy perfeccionados.
- Los modelos constitutivos que se introducen en los programas son muy groseros:
 - Los modelos elastoplásticos no son buenos. La realidad no es elastoplástica.
 - La teoría de la plasticidad no es suficiente. Le falta la dimensión tiempo.
 - La viscoelasticidad es insuficiente. Le faltan las deformaciones irreversibles.
 - Las ecuaciones constitutivas de la viscoplasticidad que hemos encontrado en la literatura no son mecánicamente ni rigurosas ni consistentes.

6.- ESTRATEGIA FRENTE A LA INCERTIDUMBRE

6.1 EN EL PROYECTO

- El cuerpo del túnel es un vacío, un hueco.
- El proyecto del túnel versa sobre la construcción y mantenimiento de ese hueco.
- El hueco se abre en el terreno.
 - El conocimiento que se tiene del terreno es incierto.
 - La asunción de esa incertidumbre es fundamental en el proyecto del túnel y no debe olvidarse nunca.
- Si el proyecto del túnel es en esencia el proyecto de la ejecución y mantenimiento del hueco, para su concepción y elección de la solución hay que tener en cuenta, la:
 - Evaluación de la incertidumbre final inherente a cada solución.
 - Y la repercusión de esa incertidumbre en el coste, plazo y riesgos humanos por accidentes.

➤ **La incertidumbre debe ser contemplada en cada fase del proyecto. En particular en:**

1. La contratación, por la propiedad, de todas y cada una de sus partes.
 - Proyecto propiamente dicho
 - Dirección de Obra y Asistencia Técnica.
 - Construcción.
 - Conservación, mantenimiento y explotación.
2. El proyecto propiamente dicho, por el proyectista.
3. La construcción (por el constructor, por la Dirección de Obra y la Asistencia Técnica).
4. La conservación y mantenimiento por la Propiedad y el Adjudicatario de la concesión, en su caso.

6.2 EN LA CONSTRUCCIÓN

a) Ideas básicas

- El proyecto del túnel está basado en incertidumbres y la construcción debe ir desvelando esas incertidumbres.
- La estrategia del proyecto en ese sentido es simple.
 - El Proyectista debe tener previsto los distintos escenarios que puedan presentarse y no sólo los que el incierto relato del terreno le podría sugerir.
 - A cada escenario debe tener asociada una actuación oportuna.
 - Y no debe olvidar que siempre es posible que exista una situación no prevista.

b) Acciones

Si la construcción debe ir desvelando las incertidumbres, debe quedar claro tanto en los contratos como en el proyecto:

- Cómo se desvela (Planes de control, reconocimiento del terreno y auscultación).
- Quién desvela.
- Quién interpreta lo desvelado.
- Quién dictamina las medidas que correspondan.
- Quién decide la adopción de las medidas.
- Quién las ejecuta.
- Cómo se controla la ejecución de las medidas y sus resultados.
- Cómo se evalúan las medidas, cómo se pagan y quién paga.
- Finalmente, quién se enfrenta con los escenarios no previstos.

7. ASPECTOS ECONÓMICOS

-Los aspectos económicos tienen una importancia capital en el proyecto de un túnel.

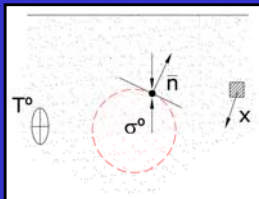
-La claridad de todos los aspectos económicos es fundamental. Su falta en algún eslabón de la cadena de la ejecución tiene repercusiones que aumentan el riesgo de la obra.

-Esa falta de claridad puede impedir o dificultar la realización de una actividad encargada de desvelar alguna incertidumbre o la implementación de una medida necesaria.

-En el proyecto de un túnel puede haber y hay incertidumbres técnicas que se desvelarán en la ejecución. En los aspectos económicos no debe ni puede quedar ningún resquicio a la incertidumbre.

B.- LA INCERTIDUMBRE EN LA CONVERGENCIA

1.1 TENSIONES Y DEFORMACIONES ANTES DE LA APERTURA



- El terreno está tensionado con la tensión T^0 , debido a:
 - el campo gravitatorio
 - empujes tectónicos
- Las tensiones están en equilibrio con las fuerzas de masa

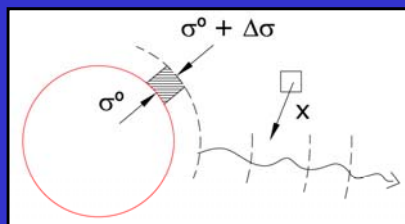
$$\text{div } T^0 + X = 0$$
- El terreno tiene unas deformaciones iniciales D^0
- Tiene almacenada una cierta energía elástica W^0

$$W^0 = (1 - \alpha) \left[\frac{1}{2} T^0 D^0 \right]$$

- Sobre el contorno de lo que va a ser el hueco del futuro túnel hay unas tensiones (vectoriales) σ^0

$$\sigma^0 = T n^0$$

1.2 TENSIONES DESPUÉS DE LA APERTURA



- Se abre el hueco del túnel eliminando el terreno
 - Se elimina así la tensión σ^0 sobre el elemento diferencial del contorno.
 - El elemento queda desequilibrado y se mueve.
 - El desequilibrio se traslada al elemento contiguo y así sucesivamente a todo el espacio y con él, el movimiento.
 - Se llega a la situación final de equilibrio

$$\text{div } T^1 + X = 0 \quad T^1 n = 0$$

- Se produce así una relajación de tensiones ΔT^0

$$\Delta T^0 = T^1 - T^0$$

que verifica las ecuaciones: $\text{div } \Delta T^0 = 0 \quad \Delta T^0 n = -\sigma^0$

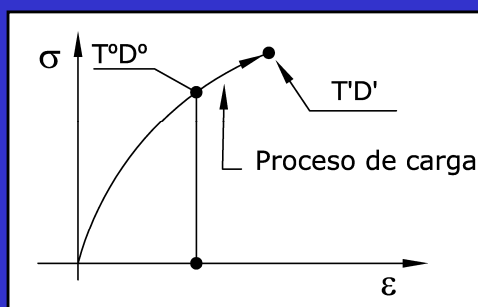
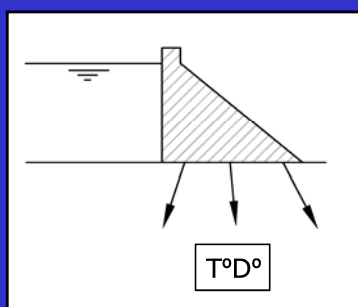
1.3 PROCESO DE CONVERGENCIA

- Se desencadena un proceso de convergencia en el contorno del túnel.
 - Su evolución con el tiempo depende de la reología del material.
 - La convergencia siempre necesita un cierto tiempo para llegar a su valor final.
- Se produce una liberación de parte de la energía W^0 almacenada inicialmente.
 - La forma en que se libera depende de varios factores:
 - Reología del material.
 - Cantidad total de energía relativa.
 - Forma de la excavación etc.
 - Puede tener carácter explosivo en túneles profundos.
- La influencia del túnel teóricamente en medios elásticos y elastoplásticos llega hasta el infinito. En la práctica su influencia está mucho más limitada (sistemas elíptico e hiperbólico).

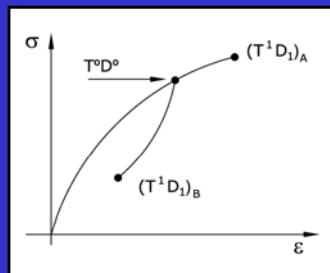
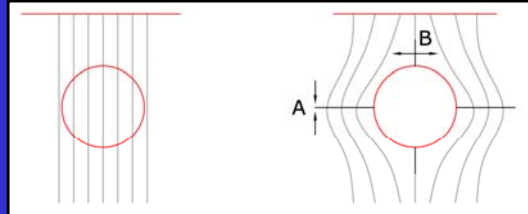
2.- RELAJACIÓN DE TENSIONES

2.1 SEGÚN EL TIPO DE OBRA

- En las obras aditivas el cuerpo de la obra carga el terreno



- En las obras sustractivas pueden producirse procesos de carga o de descarga según la posición



Este efecto añade nuevas posibilidades de incertidumbre, ya que el comportamiento mecánico en carga y descarga es muy diferente

2.2.- TENSIONES EN MEDIOS ACRÓNICOS

a) Hipótesis simplificatoria

- Simetría axial en solicitaciones y en formas.
- Medio sin peso cargado con una tensión inicial p^0 .
- Se estudia el caso de la sección del túnel a través de las variables de Hill.

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

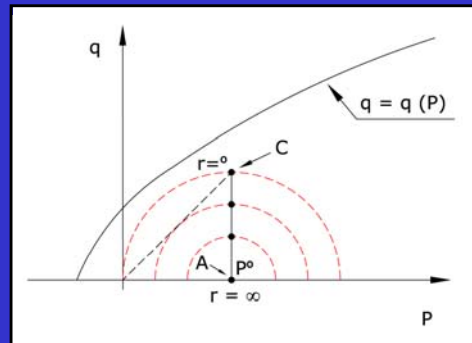
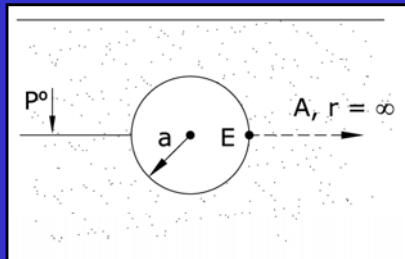
- Se desprecia la influencia de la tensión principal intermedia, σ_2 .
- El medio tiene un criterio de rotura expresable en la forma:

$$q = q(p)$$

- Se tiene que si :
 $q(p) - q > 0$ El medio está en estado elástico.
 $q(p) - q \leq 0$ El medio está en rotura

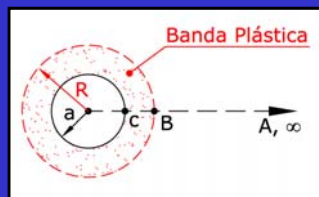
b) El caso elástico

Si no hay fuerzas de filtración, el centro del círculo de Mohr (variable p) no varía en el macizo durante el proceso tensoformacional.



c) El caso elástoplástico

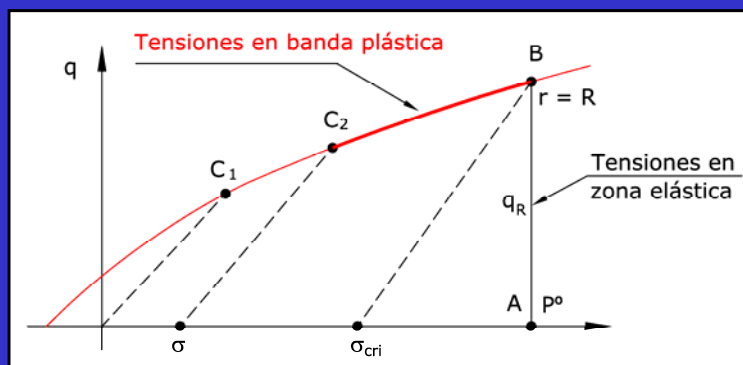
- Zona elástica



$$\left(\frac{1}{\sin \rho} - 1 \right) \cdot \frac{dq}{q} = \frac{2dr}{r}$$

con $\sin \rho = \frac{dq}{dp}$

$q_R = q(p^0)$



2.3 DEFORMACIONES EN MEDIOS ELASTOPLÁSTICOS

a) Bases

-Deformación elástica definida por los parámetros σ , μ

-Deformación plástica definida por la ley de fluencia

$$\text{sen } \psi = N(\text{sen } \rho)$$

ψ dilatación
 ρ rozamiento interno

b) Sistema resolvente

$$(1 - \text{sen } \psi) \frac{d\gamma}{dq} + B(q) \gamma = -\frac{1}{G} \left(\text{sen } \psi + \frac{1-2\mu}{\text{sen } \rho} \right)$$

$$\frac{d\varepsilon_\theta}{dq} = -\frac{B(q)}{2} \gamma$$

$$u = r \varepsilon_\theta$$

$$B(q) = \left(1 - \frac{1}{\text{sen } \rho} \right) \frac{1}{q}$$

γ distorsión

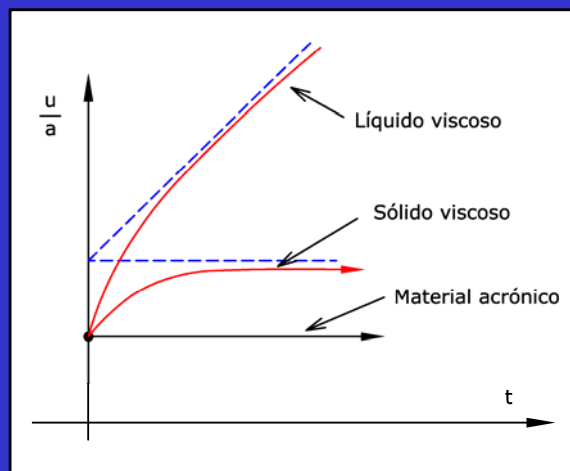
ε_θ deformación circunferencial

u convergencia

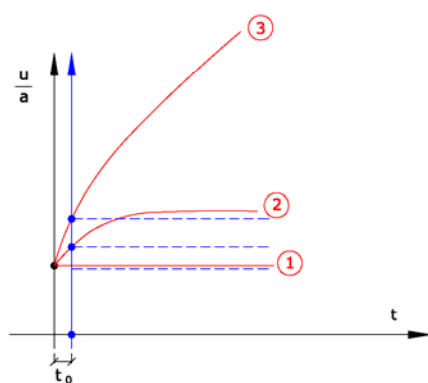
3.- CONVERGENCIAS

3.1 CURVAS DE CONVERGENCIA

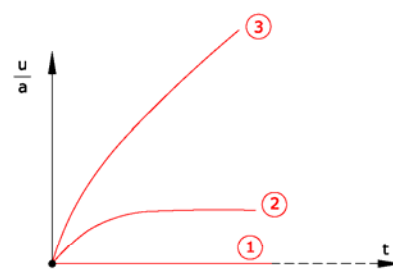
a) Teóricas



b) Medidas

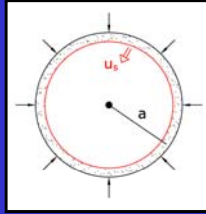


a) Evolución de la convergencia

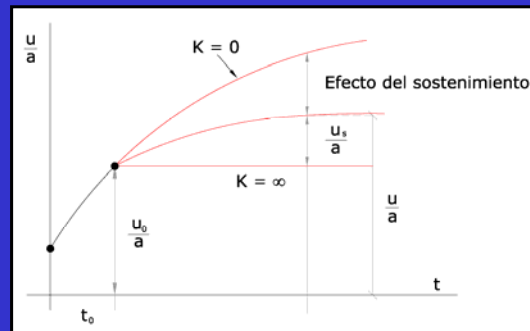
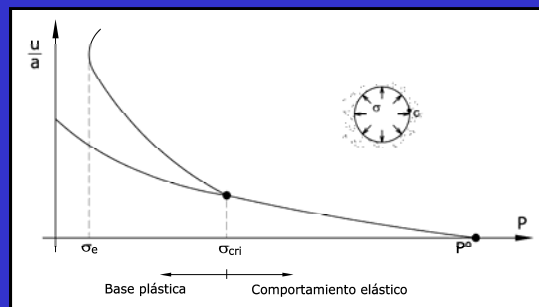


b) Convergencia medida

c) Influencia de sostenimiento

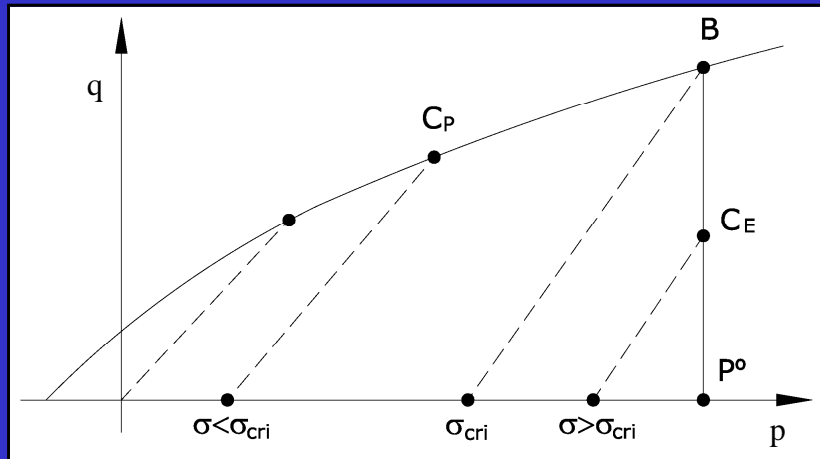


Características del sostenimiento $\frac{u_s}{a} = \frac{\sigma}{K}$

3.2.- LÍNEA CARACTERÍSTICA DEL TÚNEL

- Hipótesis básica:
 - La tensión sobre el contorno pasa directamente de p^0 a σ
 - La línea característica es la relación entre la presión de confinamiento σ y la convergencia $\frac{u}{a}$
 - Ecuación de la línea característica

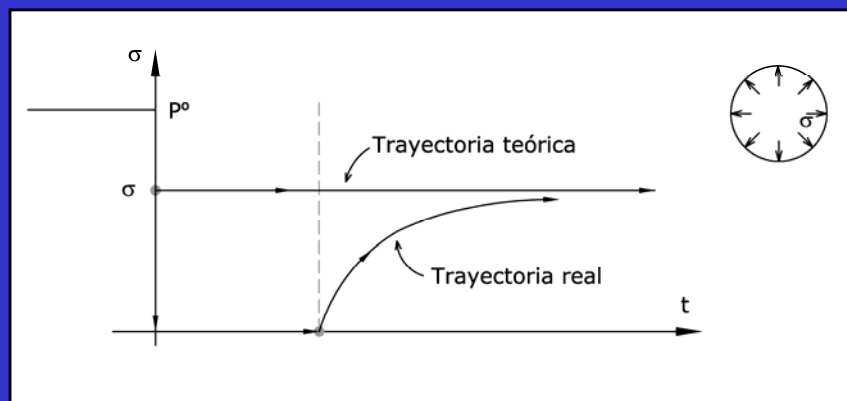
$$\frac{u}{a} = F(\sigma)$$



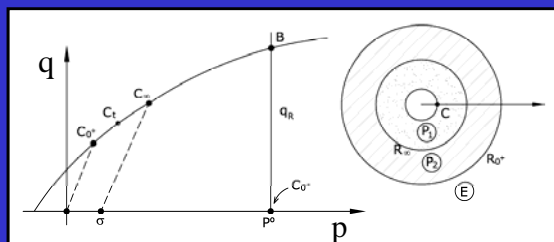
4.- ANÁLISIS

4.1 TRAYECTORIA DE CARGA

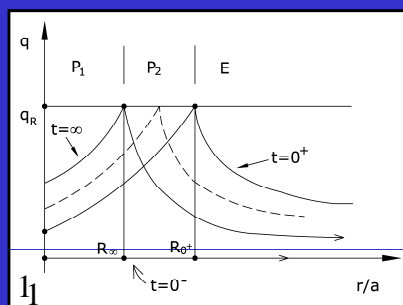
a) Cargas sobre el sostenimiento



b) Trayectorias de tensiones en el terreno



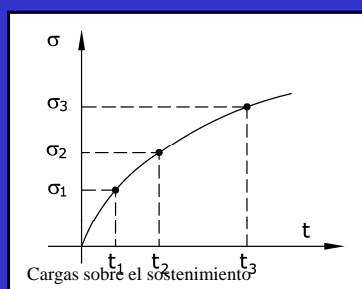
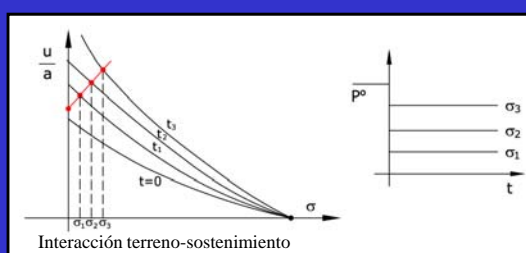
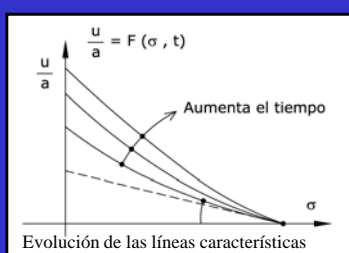
Zona E siempre elástica

Zona P₂ Elástica → Plástica → ElásticaZona P₃ Elástica → Plástica

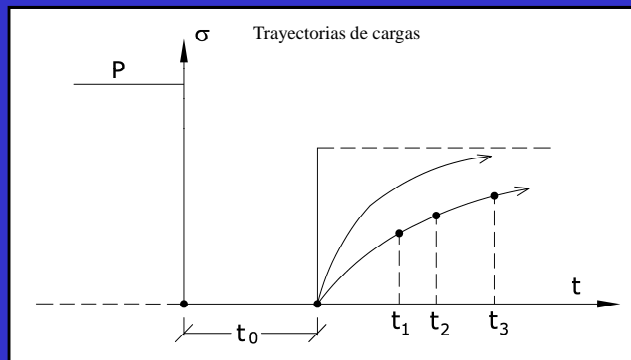
4.2 LA LÍNEA CARACTERÍSTICA Y LA TRAYECTORIA DE CARGA

a) Influencia del tiempo

Hipótesis básica aceptada si el material no es acrónico



b) Proceso real



La convergencia no es función de punto $\frac{u}{a} \neq F(\sigma, t)$

Forma diferencial $d\left(\frac{u}{a}\right) = F'_\sigma(\sigma, t) d\sigma + F'_t(\sigma, t) dt$

La forma diferencial no es una diferencial exacta.
Su integral depende de la trayectoria de σ

El concepto de línea característica se desvanece porque el material nunca esacrónico

4.3 ENFOQUE REOLÓGICO

a) Bases del estudio

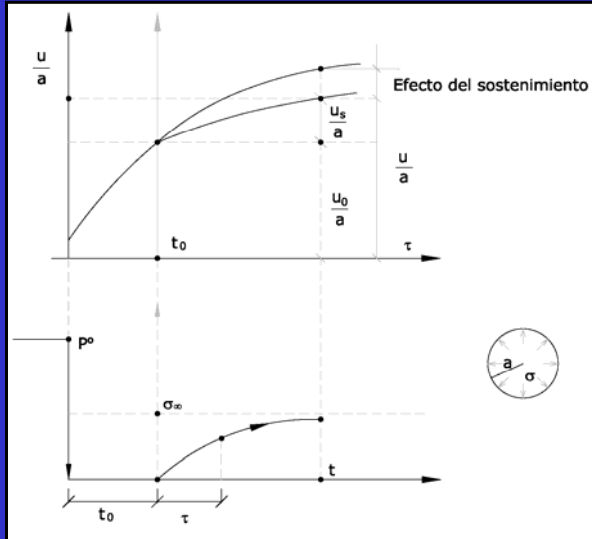
- Material viscoelástico-plástico frágil

- Cualquier criterio de rotura del tipo $q = q(p)$
- Cualquier ley de dilatación del tipo $\psi = \lambda \cdot \rho + b$
- Cualquier tipo de viscosidad lineal en forma diferencial

- Limitaciones

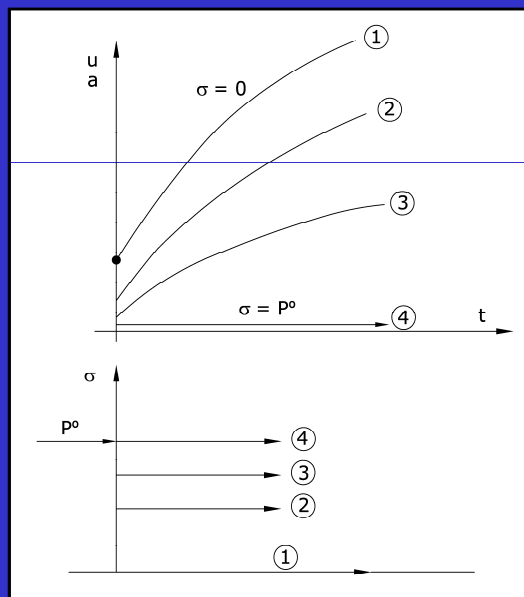
- Criterios de rotura fijo
- Viscosidad asociada a la componente elástica de la deformación

b) Planteamiento



Ecuación característica del sostenimiento

$$\frac{\sigma}{K} = \frac{u_s}{a} = \frac{u}{a} - \frac{u_0}{a}$$

c) Efecto de una descarga hasta la tensión σ 

$$\frac{u}{a} = U(t, \sigma)$$

Convergencia para una descarga constante σ

$$U(t, \sigma) = \sum \phi_D(t) F_D(\sigma)$$

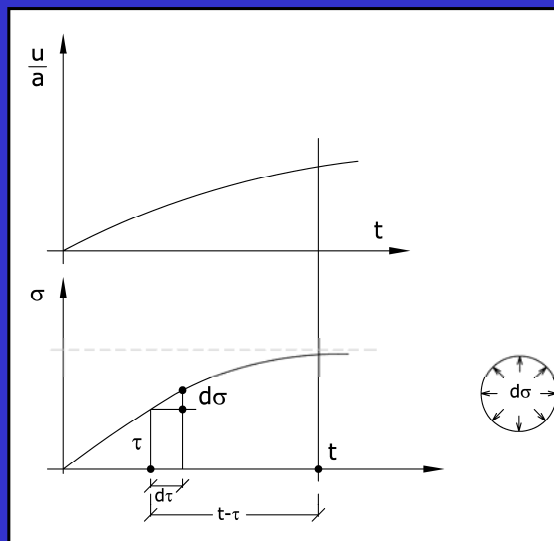
- Se desacoplan las propiedades reológicas de la resistencia y fluencia plástica

$\phi_D(t)$ Funciones temporales. Dependen exclusivamente de las propiedades reológicas. (Sandoval, 2009)

$F_D(\sigma)$ Funciones tensionales. Dependen del criterio de rotura, tipo de rotura y de la Ley de fluencia plástica. (Reig, 2004)

- El sufijo D, indica descarga tensional.

b) Efecto del sostenimiento



Efecto de la carga incremental $d\sigma$ en el tiempo t

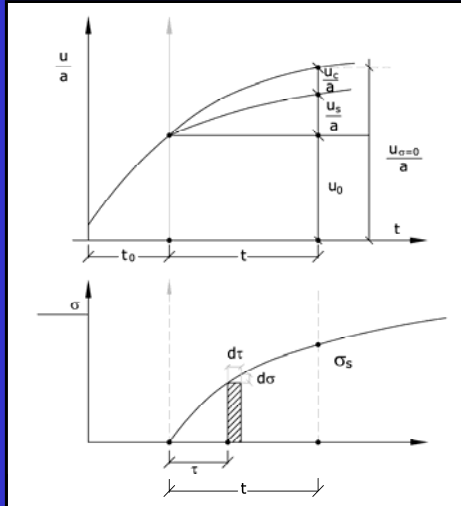
$$\left(\frac{d u_e}{d t} \right)_t = - \sum \phi_R(t-\tau) f_R(\sigma) d\sigma$$

$$f_R(\sigma) = \frac{d F_R(\sigma)}{d \sigma}$$

$$U_e = \frac{d u_e}{d t} = - \sum \int_0^t \phi_R(t-\tau) f_R(\sigma) d\sigma$$

- El sufijo R indica recarga tensional.

c) Ecuación característica



$$\frac{u_s}{a} = U(t_o + t, 0) - U(t_o, 0) - \frac{u_c}{a}$$

Ecuación integral de la convergencia

$$\frac{u_s}{a} = [U(t + t_o) - U(t, o)] - \frac{u_c}{a}$$

$$\frac{u_s}{a} = \frac{\sigma(t)}{k}$$

$$U(t + t_o) - U(t, o) = F_D(\sigma) \sum [\phi_D(t + t_o) - \phi_D(t_o)]$$

$$\frac{u_c}{a} = \sum \int_o^t \phi_R(t - \tau) f_R(\sigma) d\sigma$$

$$\frac{\sigma(t)}{k} + \sum \int_o^t \phi_R(t - \tau) f_R(\sigma) d\sigma = \sum [\phi_D(t + t_o) - \phi_D(t_o)] F(t_o)$$

CONCLUSIONES

- La línea característica es un concepto relativo ya que depende de la trayectoria de las tensiones de confinamiento.
- La línea característica definida como la relación entre la convergencia que se obtiene para una presión de confinamiento constante y esa presión es un concepto sin rigor.
- La evolución de las presiones sobre el sostenimiento se obtiene resolviendo la ecuación integral de la convergencia.
- El método expuesto se puede extender fácilmente a sostenimientos de rigidez variable en el tiempo y a la consideración del confinamiento del frente.