



Maestría en Ingeniería Geotécnica - MIG
(Carrera Binacional Argentina - Alemania)



Asignatura ACMIG10:

Uso sustentable de residuos sólidos y geomateriales

Dra. Irma MERCANTE

itmercante@gmail.com

Dr. Juan Pablo IBAÑEZ

jpablo.doc@gmail.com



Maestría en Ingeniería Geotécnica - MIG
(Carrera Binacional Argentina - Alemania)



Geotécnica de RSU

Compresibilidad de RSU

Uso sustentable de residuos sólidos y geomateriales

Dra. Irma MERCANTE

Dr. Juan Pablo IBAÑEZ

- **Rehabilitación de rellenos sanitarios**

- Ya en la década del 1940, Watts & Charles (1990) del Building Research Establishment, expresaban su preocupación por la dificultad de encontrar terrenos disponibles para nuevas construcciones y la necesidad de construir en terrenos artificiales o de rellenos, con el peligro de construir en áreas de rellenos debido a la presencia de materiales degradables y en descomposición.
- Construir sobre rellenos sanitarios puede traer variados problemas, como:
 - **Asientos diferenciales,**
 - ataque químico a las cimentaciones y estructuras,
 - riesgos de explosión en el interior del relleno,
 - peligro de contaminación de los suelos,
 - Problemas de estabilidad de los taludes,
 - problemas de rozamiento negativo en pilotes causado por el asiento del relleno.
 - Pero los mayores problemas geotécnicos están asociados al **asiento a largo plazo** del relleno.

- **Asientos de rellenos sanitarios**

Los asientos diferenciales pueden producir:

- fracturas en los sistemas de drenaje de los lixiviados, lo cual pone en peligro a la construcción y puede ocasionar saturación de la masa de residuos;
- producir variaciones en la superficie del terreno, áreas de depresión que causarían acumulación permanente de aguas transformándose en una carga adicional para los residuos y aumentar así los asientos diferenciales.

La compresibilidad de un RSU expresa su capacidad de deformarse y reducir su volumen bajo carga.

La compresibilidad de los rellenos sanitarios importa:

- porque cualquier proyecto de uso futuro necesitará cuantificar cual será el asiento a largo plazo.
- porque el estudio de los asientos en un relleno sirve para predecir el incremento de la capacidad de los vertederos para recibir RSU.

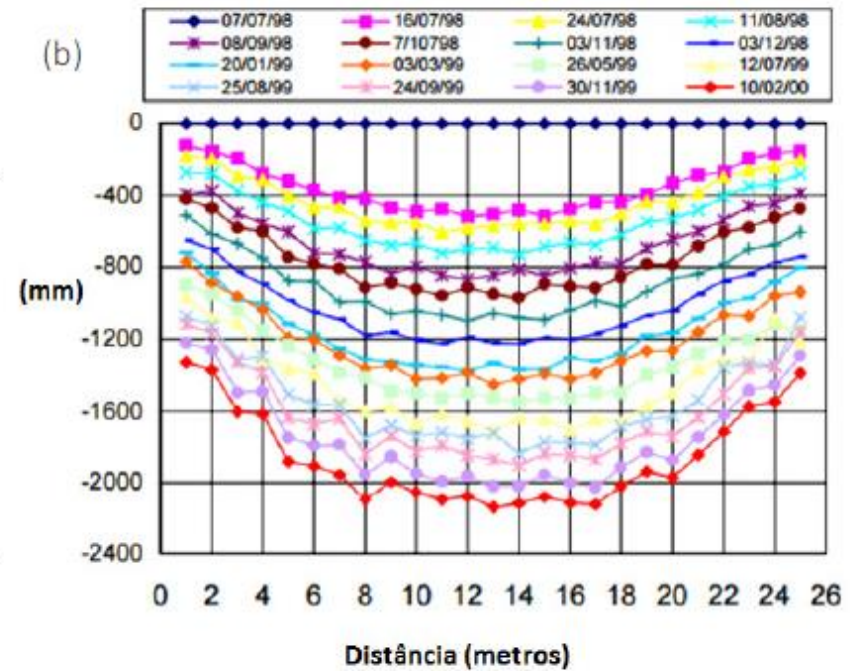
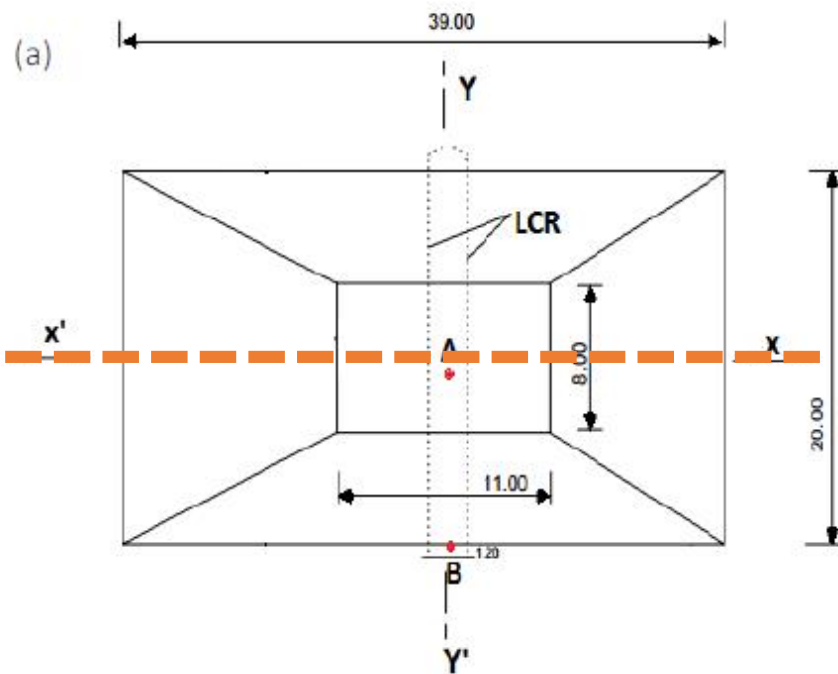
- **Mecanismos de compresión**

Según Sowers (1973) los mecanismos de compresión que provocan los asentamientos que se desarrollan en los residuos son:

- **Mecánico:** que se produce por medio de un colapso estructural de las partículas y consolidación similar a los suelos.
- **Ravelling:** Es la migración de partículas finas hacia el interior de espacios vacíos entre partículas mayores.
- **Cambio físico-químico:** Por medio de corrosión, oxidación y combustión.
- **Descomposición bioquímica:** A través de los procesos de fermentación y descomposición, tanto aeróbicos como anaeróbicos.
- **Interacción:** ocurre por la interacción de los dos últimos procesos citados.

• Ejemplo de asientos en RSU

- Relleno de Valdemingomez, España.
- Ensayo de placa de carga y medición de línea de asientos.



• Ejemplo de asientos en RSU

- Relleno de Valdemingomez, España.
- Ensayo de placa de carga y medición de línea de asientos.
- Ajuste de las curvas de asiento en el centro de la placa.

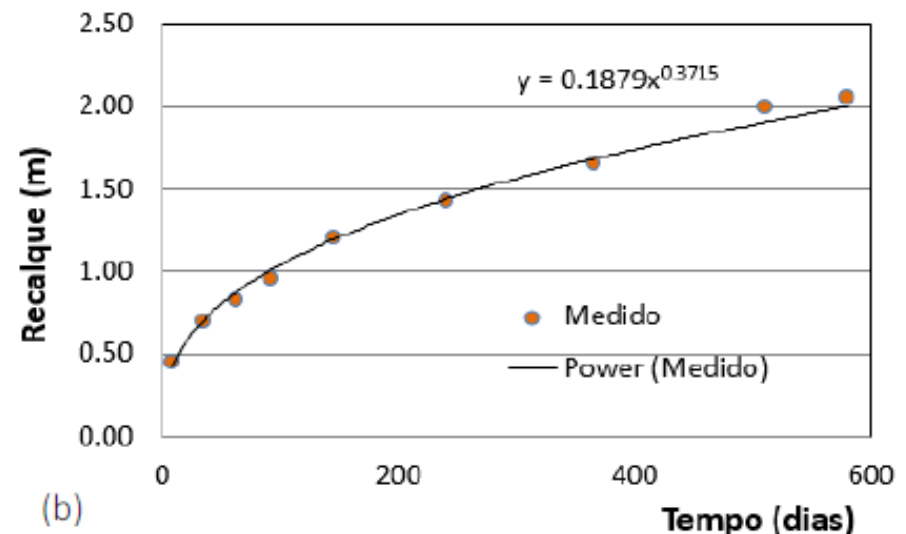
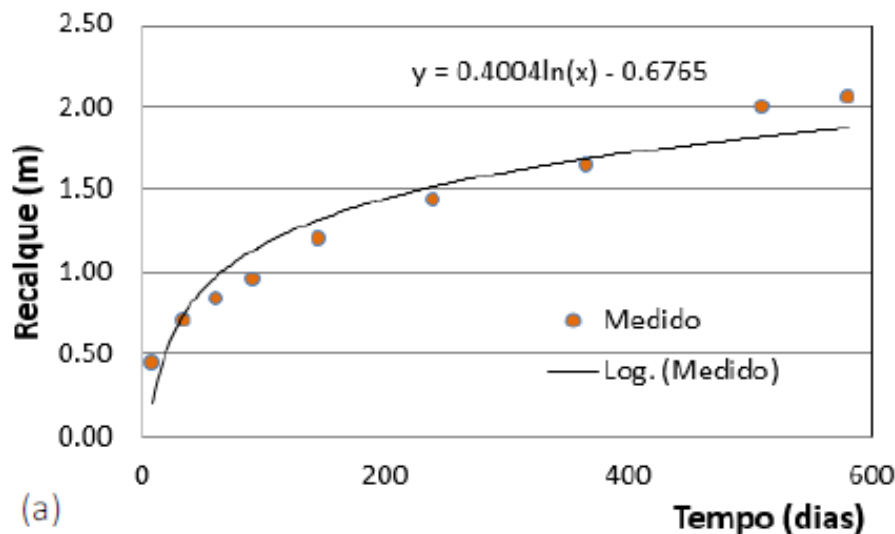


Figura 2. Ajuste dos recalques medidos mediante lei a) logarítmica; b) de potência.

• Ejemplo de asientos en RSU

- Relleno de Valdemingomez, España.
- Ensayo de placa de carga y medición de línea de asientos.
- Efecto de la humedad en la magnitud de los asientos medidos.

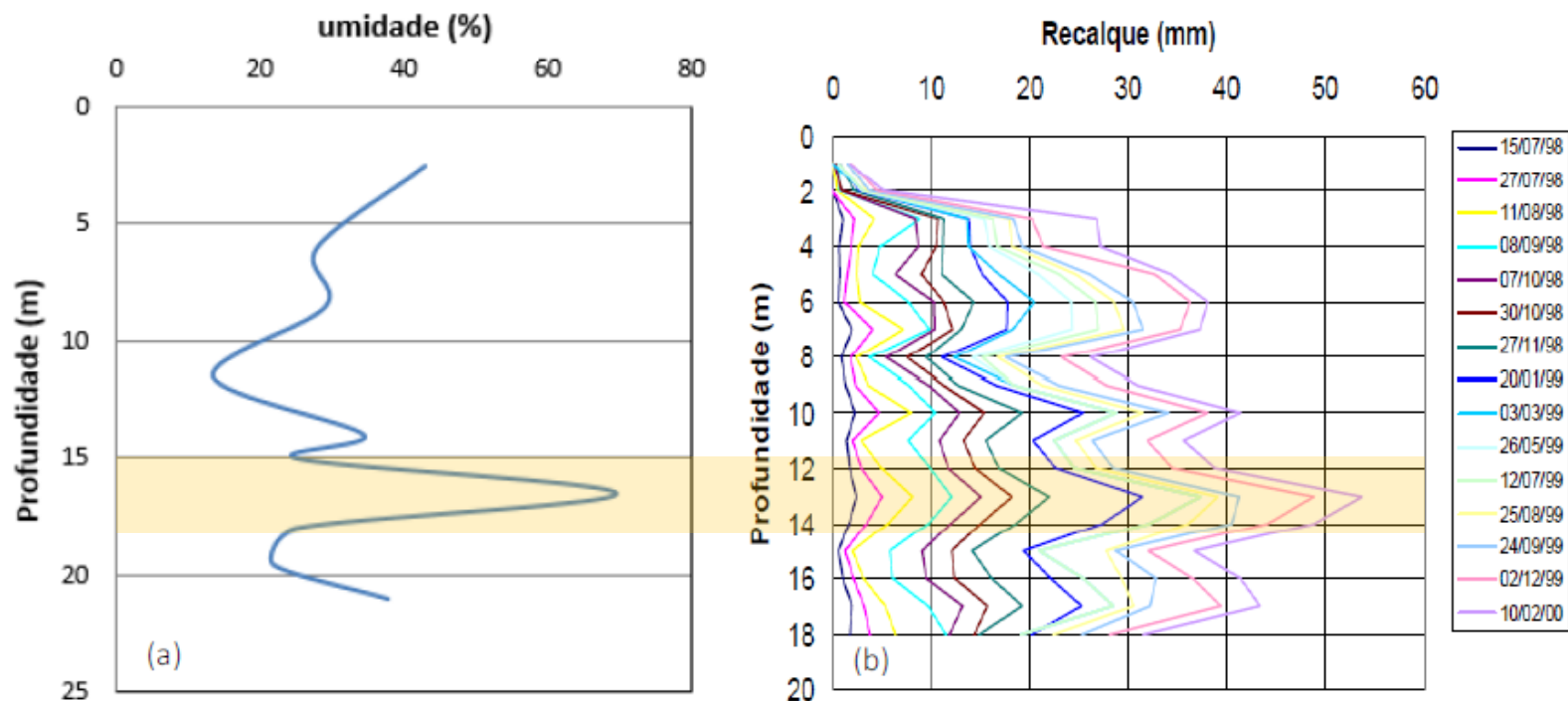


Figura 6. a) Distribuição da umidade no depósito de RSU debaixo do aterro de carga (modificado de Pereira, 2000); b) Recalques diferenciais em profundidade no ponto "A" no eixo X-X (modificado de Pereira, 2000).

- **Etapas de desarrollo de los asientos en RSU**

Los asientos mecánicos se producen bajo carga se dividen en:

- **asiento inicial (instantáneo)**. Respuesta “elástica” del material.
- **asiento primario (a corto plazo)**. Ocurre debido a la disipación de la presión intersticial y gas de los vacíos de la masa de residuos, y al comportamiento viscoplástico del material. Este proceso se asemeja a la consolidación de los suelos, aunque es diferente. Se suele asumir que se producen en torno a los 30 días.

Los **asientos secundarios**, diferidos en el tiempo (largo plazo), que se producen a carga constante, son:

- **asiento por creep**. Ocurre debido a procesos de fluencia lenta por el peso propio.
- **Asiento bioquímico**. Ocurre debido a la descomposición biológica de la materia orgánica del material. La velocidad de los asientos es decreciente en el tiempo y pueden durar décadas. Influye la temperatura y la humedad, no la carga.

- **Otros tipo de asientos en RSU**

- **asiento esporádico.** causado por “ravelling” por desplazamiento de partículas finas hacia el interior de espacios vacíos. Puede ser causado por percolación a través del relleno, por vibraciones, explosiones, sismos, cambios inducidos por la descomposición química y biológica, intensas lluvias o fluctuaciones repentinas del nivel de agua.

- Factores que influyen en los asentos

Existen distintos factores que influyen en la **magnitud** y en la **velocidad** de asentamiento de los RSU, y que condicionan el comportamiento mecánico de un relleno sanitario.

De acuerdo con Edil et al (1990), los **principales factores** son:

- Grado de Compactación
- Cantidad de materia orgánica
- Altura del relleno
- Sobrecarga adicional
- Nivel y fluctuación de lixiviados
- Humedad, temperatura y producción de biogás
- Edad del relleno sanitario.

- Factores que influyen en los asientos

Altura del relleno (efecto de profundidad).

- Yen & Scalon (1975), investigaron los asientos producidos en tres rellenos cuyas profundidades variaban de 6 a 40m aproximadamente.
- Se observó que la velocidad de asentamiento aumentaba con la profundidad del relleno en general.
- Sin embargo, a partir de los **30 metros**, no había aumento significativo de la velocidad de asentamiento.
- La explicación es que en profundidad se simula un **medio anaeróbico** con procesos más lentos de descomposición
- En cambio, en profundidades cercanas a la superficie hay mayores niveles de oxígeno y por lo tanto **procesos aeróbicos.**

- Factores que influyen en los asientos

Cantidad de humedad y circulación de fluidos.

- Powrie et al (1998) indican que el aumento del contenido de humedad en una masa de residuos contribuye en el aumento de la velocidad de degradación, y por lo tanto mayor volumen de asientos.
- Aumentando la velocidad de flujo (fase líquida) de los fluidos, sin variar el contenido de humedad, aumenta la generación de metano entre un 25% y un 50%.
- También se estableció que la velocidad de degradación de los residuos depende de la velocidad en que el agua circula por los mismos.

Edad del relleno

- Yen & Scalon (1975) señalan que la velocidad de asentamiento decrece linealmente con el logaritmo de la edad del relleno.



Maestría en Ingeniería Geotécnica - MIG
(Carrera Binacional Argentina - Alemania)



Geotécnica de RSU

Modelos Teóricos de asentos

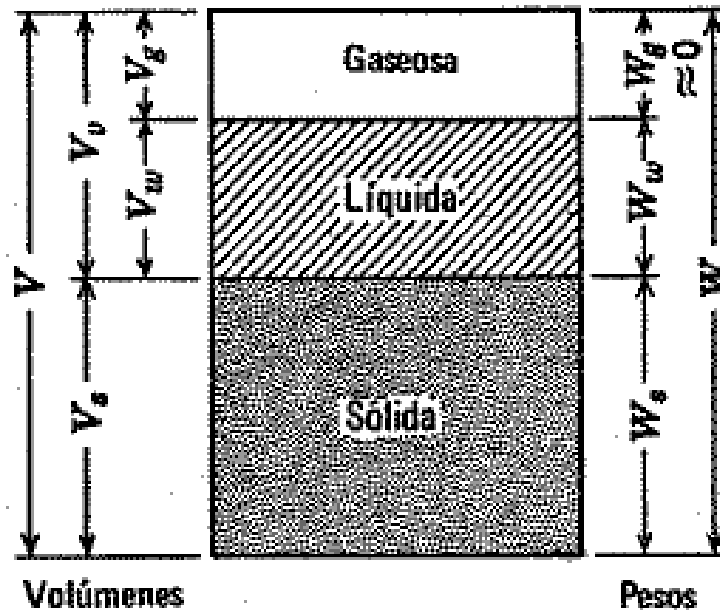
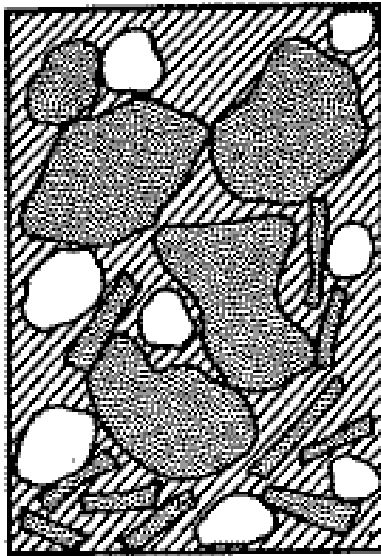
Uso sustentable de residuos sólidos y geomateriales

Dra. Irma MERCANTE

Dr. Juan Pablo IBAÑEZ

• Densidad y relación de vacíos en RSU

- La densidad se compone de una combinación de las densidades de sus fases:
 - El peso es el peso de las fases sólida y líquida.
 - El volumen es el volumen de las fases sólida, líquida y gaseosa.
 - La relación de vacíos (también llamada índice de pros) se puede obtener a partir de los pesos y densidades.



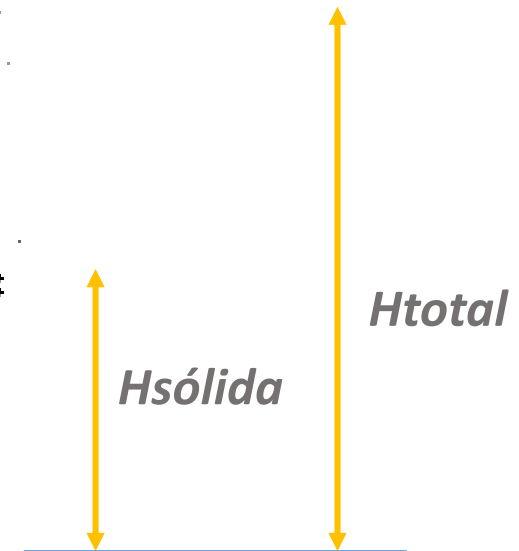
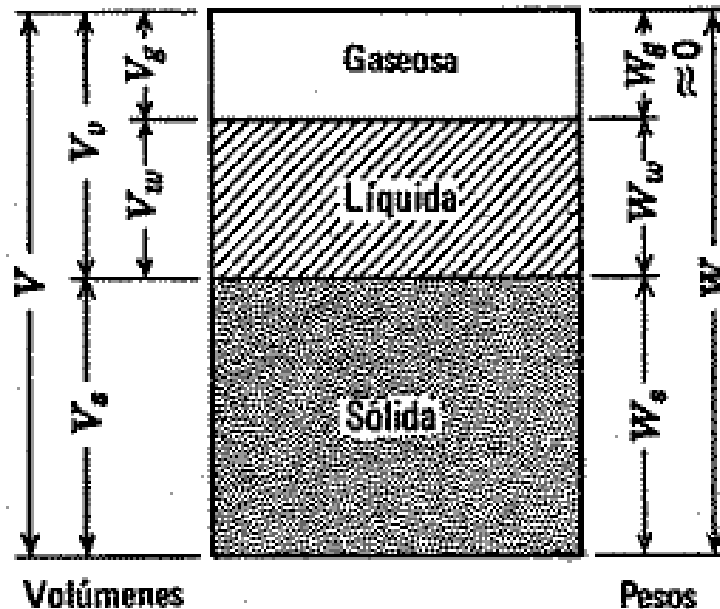
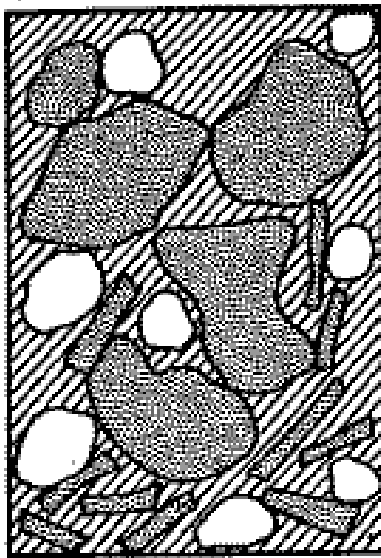
- Densidad y relación de vacíos en RSU

- Para un volumen unitario de RSU se puede obtener:

$$H_{sólida} = (\text{Peso fase sólida RSU}) / (\text{Densidad sólida RSU})$$

$$H_{vacios} = H_{total} - H_{sólida}$$

$$e \text{ (rel. vacíos)} = H_{vacios} / H_{sólida}$$



- **Densidad y relación de vacíos en RSU**

- Ejemplos de cálculo:

$$H_{sólida} = (\text{Peso fase sólida RSU}) / (\text{Densidad sólida RSU})$$

$$H_{vacios} = H_{total} - H_{sólida}$$

$$e \text{ (rel. vacíos)} = H_{vacios} / H_{sólida}$$

Volumen RSU = 1 m³

Area = 1 m²

Altura = 1 m

Peso fase sólida RSU = 0.25 t

Densidad sólida RSU = 0.5 t/m³

H_{solido} =

H_{vacios} =

e =

Volumen RSU = 1 m³

Area = 1 m²

Altura = 1 m

Peso fase sólida RSU = 0.20 t

Densidad sólida RSU = 0.6 t/m³

H_{solido} =

H_{vacios} =

e = 2,0

- **Densidad y relación de vacíos en RSU**

- Ejemplos de cálculo:

$$H_{sólida} = (\text{Peso fase sólida RSU}) / (\text{Densidad sólida RSU})$$

$$H_{vacios} = H_{total} - H_{sólida}$$

$$e \text{ (rel. vacíos)} = H_{vacios} / H_{sólida}$$

Volumen RSU = 1 m³

Area = 1 m²

Altura = 1 m

Peso fase sólida RSU = 0.25 t

Densidad sólida RSU = 0.5 t/m³

H_{sólida} = 0.50 m

H_{vacios} = 0.50 m

e = 1,0

Volumen RSU = 1 m³

Area = 1 m²

Altura = 1 m

Peso fase sólida RSU = 0.20 t

Densidad sólida RSU = 0.6 t/m³

H_{sólida} = 0.33 m

H_{vacios} = 0.66 m

e = 2,0

• Capacidad de un Relleno Sanitario

- La vida útil de un relleno es un factor clave para la planificación ambiental de una dada ciudad o región. Se necesita saber:
 - Tasa de ingreso de RSU al relleno (en Toneladas / día).
 - Puede tener variación estacional.
 - Puede tener crecimiento interanual.
 - Volumen del relleno:
 - Número de celdas.
 - Volumen de cada celda.
 - Objetivo de compactación
 - Densidad final del RSU compactado.



- Producción de RSU por crecimiento poblacional

- La población P_t a futuro se puede calcular como:

$$P_t = P_o (1 + r)^n$$

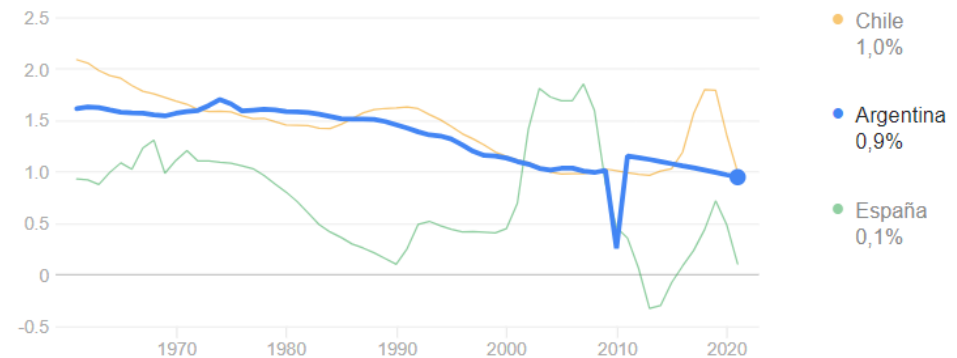
P_o : Población inicial

r : tasa de crecimiento anual

n : número de años entre el año base y el año “t”

Argentina / Tasa de crecimiento demográfico

0,9% cambio anual (2021)



- La producción de RSU se obtiene mediante una tasa de producción.

- Producción poblacional [Ton/día] = $P_t * \text{Tasa de producción [kg/habitante.día]}$

Tasa de producción = 1.0 kg/habitante.día

- **Modelos matemáticos de asientos**

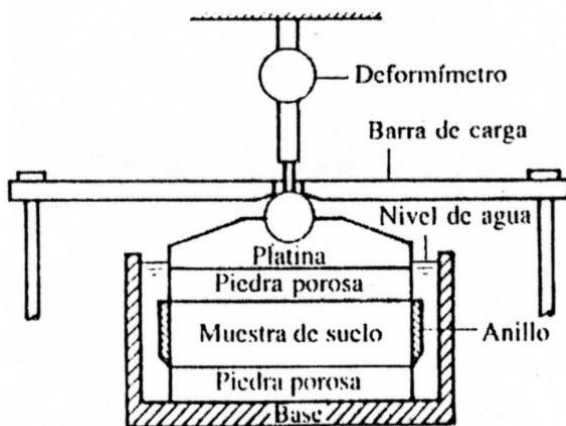
- La forma de abordar el análisis de la compresibilidad en los rellenos sanitarios es la utilización de la experiencia en el comportamiento de suelos blandos que brinda la Geotecnia.
- La validez de estos modelos es cuestionada, ya que el RSU presenta un comportamiento complejo controlado por la degradación química y la descomposición biológica de la materia orgánica, factores ambientales y sociales.
- Algunos modelos:
 - **Sowers (1973)**
 - Yen & Scalon (1975)
 - Gandola et al (1994)
 - **Meruelo (1995)**

• Ensayo de consolidación en suelos

La probeta (pastilla) de suelo

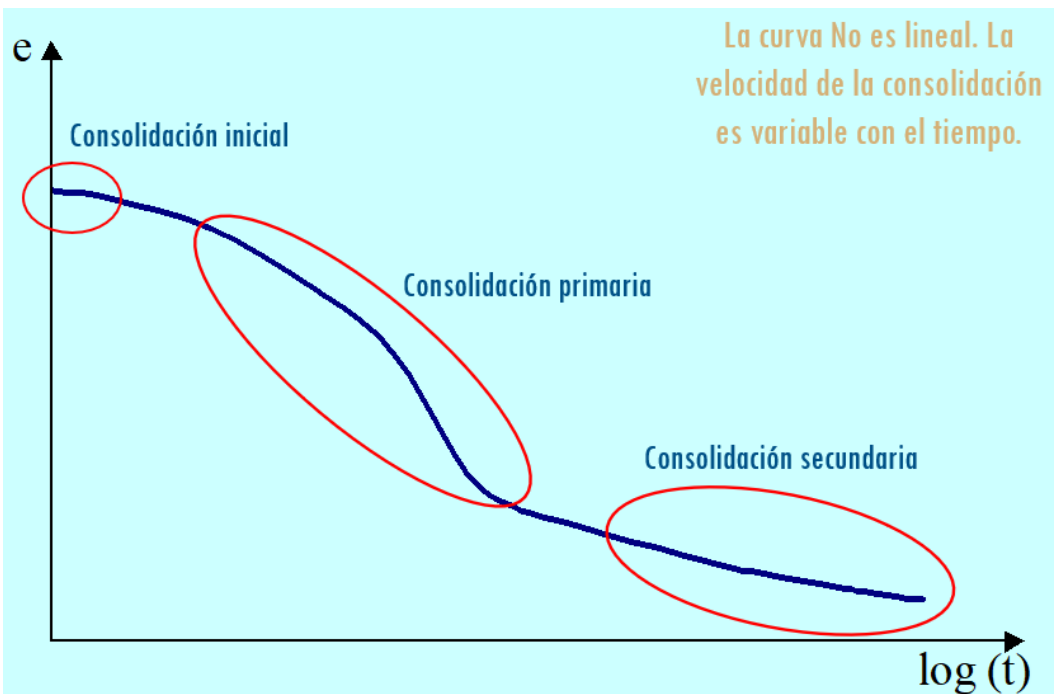


La celda edométrica



La pastilla se satura de agua en la celda;
 Se aplican escalones de carga vertical;
 Se mide desplazamiento vertical de la platina en el tiempo;
 → Final del proceso ($\approx 24\text{hs}$);
 Se determina relación de vacíos (e) en función del tiempo (t)
 → Curva de Consolidación;

Curva de consolidación



• Modelo de SOWERS

- Se basa en la clásica Teoría de la Consolidación propuesta por Terzaghi (1943).
- Hipótesis: los asientos se dividen en:
 - Asiento por **consolidación inicial y primaria** (expulsión de líquidos y reducción de vacíos).
 - Asiento por **consolidación secundaria** (*creep* diferido en el tiempo).
- La fase primaria es dominante en la producción de asientos en la fase de operación del vertedero y la fase secundaria es la más evidente una vez que ha concluido la operación del relleno.

Según la *Ley de Terzaghi* ($\sigma = \sigma' + u$) la tensión total σ actuante sobre la masa de residuos, se puede descomponer en una tensión efectiva σ' sobre la fracción sólida de los mismos y u la presión intersticial actuante en los poros que contiene agua.

• Asientos primarios de SOWERS

S_p = asiento al final de la consolidación primaria

H_0 = altura inicial del relleno

C_c = coeficiente de compresibilidad

$\sigma_{v0'}$ = presión efectiva en el relleno

$\Delta\sigma_{v0'}$ = sobrecarga efectiva

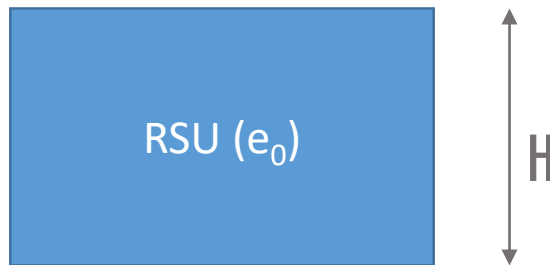
e_0 = relación de vacíos

$$S_p = \frac{C_c}{1 + e_0} \cdot H_0 \cdot \log \frac{\sigma_{v0'} + \Delta\sigma_{v0'}}{\sigma_{v0'}}$$

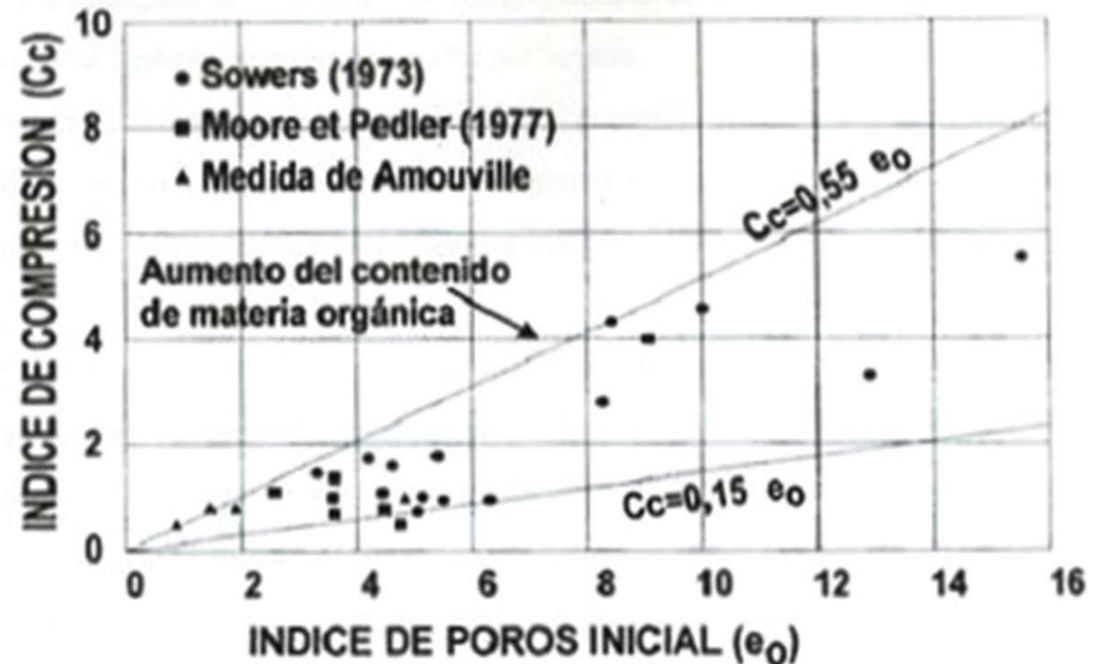
coeficiente de compresibilidad “ C_c ”

$C_c = 0,15 \cdot e_0$ para bajo contenido de materia orgánica.

$C_c = 0,55 \cdot e_0$ para alto contenido de materia orgánica.

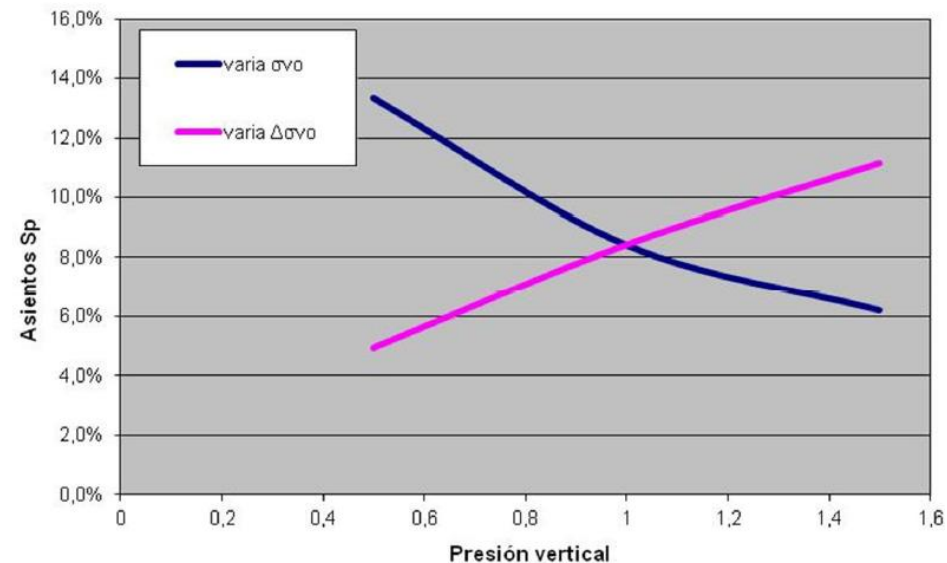
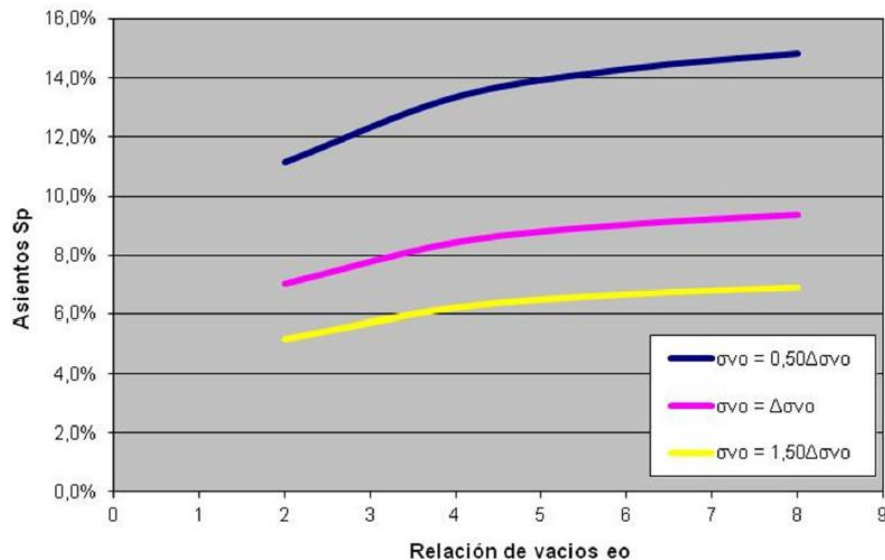
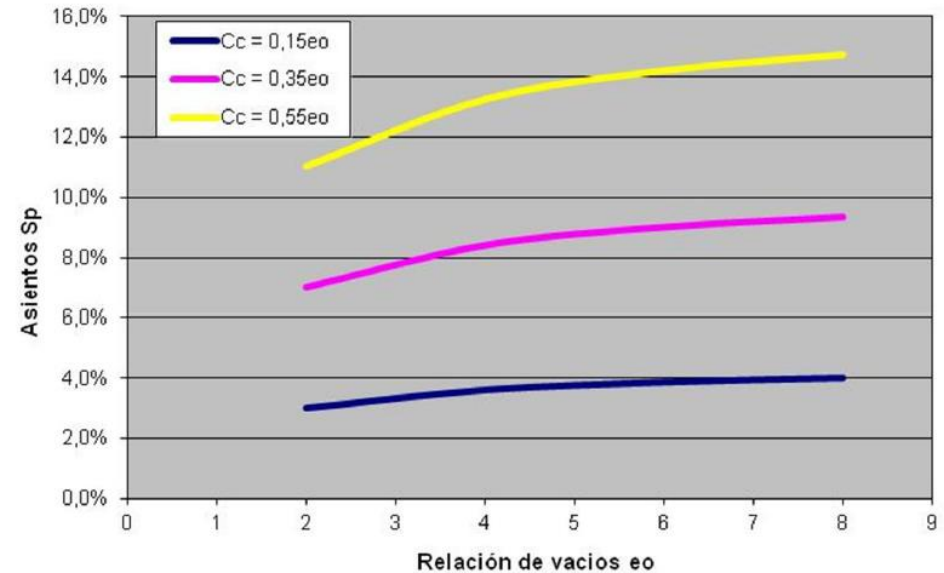


- La presión efectiva se calcula como promedio a mitad de la altura H.
- La sobrecarga efectiva corresponde a una carga superior (sea otra celda o la capa de cobertura).



• Asientos primarios de SOWERS

- Influencia de la relación de vacíos del RSU.
- Influencia del coeficiente de compresibilidad.
- Influencia de los niveles relativos de presión vertical.



• Asientos secundarios de SOWERS

S_s = asiento durante la consolidación secundaria al tiempo t_2

H = altura de la celda al tiempo t_1

$C\alpha$ = índice de compresión secundaria

t_2 = tiempo de estimación de asientos

t_1 = tiempo de inicio de la consolidación secundaria

e_0 = relación de vacíos

$$S_s = \frac{C\alpha}{1 + e_0} \cdot H \cdot \log \frac{t_2}{t_1}$$

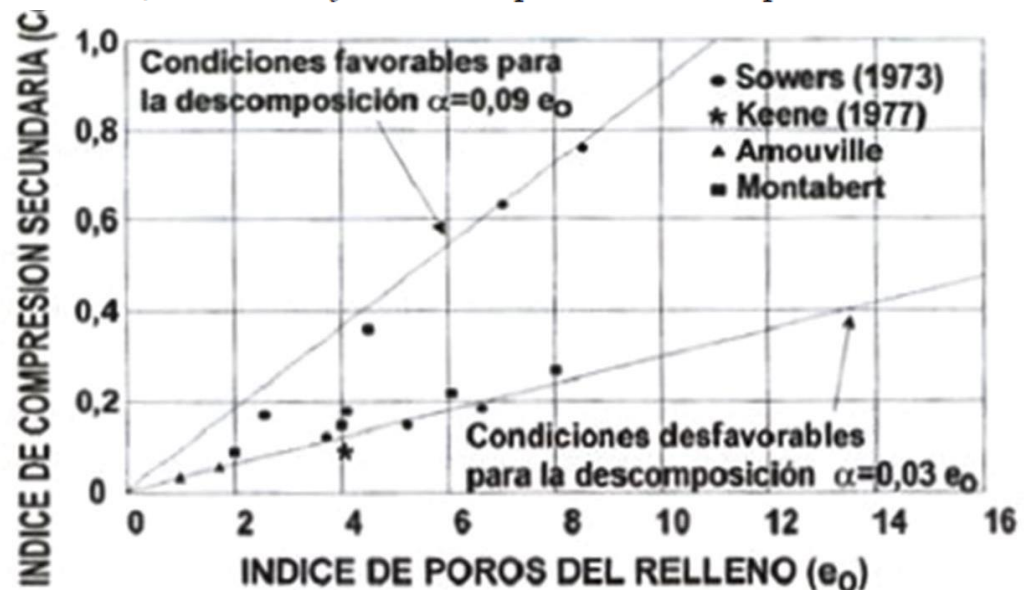
$C\alpha = 0,03 \cdot e_0$ *desfavorables para la descomposición.*

$C\alpha = 0,09 \cdot e_0$ *favorables para la descomposición.*

Tiempo de inicio de la consolidación secundaria: 30 días según algunos autores.

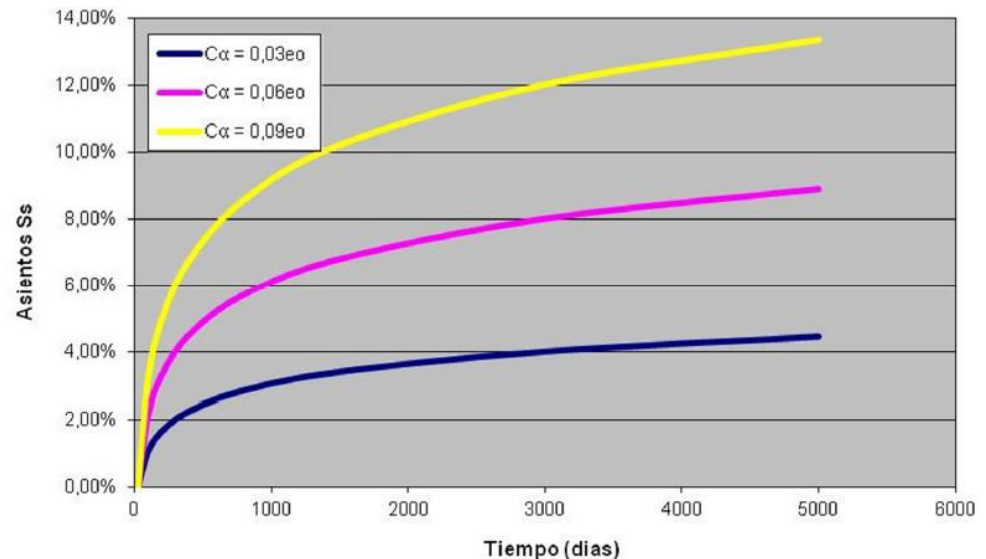
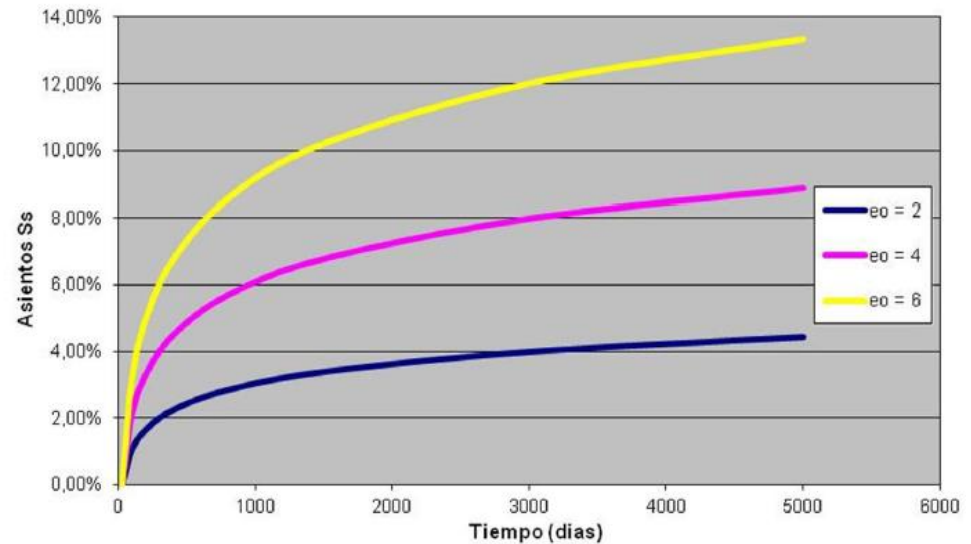
Condiciones favorables:

climas cálidos y húmedos y cuando el nivel freático sufre variaciones que aportan aire fresco al relleno sanitario.



• Asientos secundarios de SOWERS

- A mayor **relación de vacíos**, mayor aumento del asiento.
- El crecimiento de los asientos es con **tasas decrecientes**, habiendo un rápido crecimiento de los asientos los primeros meses, y un lento crecimiento para tiempos mayores.
- Un relleno sanitario con una **condición favorable** para la descomposición da lugar a mayores asientos.
- Se da con RSU de alto contenido de **materia orgánica y climas húmedos** que benefician la degradación biológica.



- **Modelo de MERUELO**

- Desarrollado por el Grupo de Geotecnia de la Universidad de Cantabria, España, con colaboración de investigadores del Grupo de Geotecnia de la Universidad Católica de Valparaíso.
- Es una formulación que incorpora y relaciona los parámetros fundamentales que determinan los procesos de degradación: **el tiempo, el contenido de materia orgánica y el ritmo de desarrollo de los procesos de degradación.**
- El modelo propone que para un periodo de tiempo suficientemente prolongado toda la materia orgánica biodegradable pasa a las fases líquidas y gaseosa.
- **No calcula asientos producidos por sobrecarga (consolidación primaria).**
- **Se puede comparar al cálculo de Sowers de los asientos secundarios.**

• Modelo de MERUELO

$$S_s = \alpha \cdot H \cdot COD \cdot \left[1 - \frac{1}{Kh \cdot T_c} \cdot \left(e^{-Kh \cdot (t - T_c)} - e^{-Kh \cdot t} \right) \right]$$

S_s = asientos (mm)

α = coeficiente de pérdida de masa transformada en asientos

H = espesor del relleno sanitario (mm)

COD = contenido de materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos (%)

T_c = tiempo de construcción del relleno (días)

Kh = coeficiente de hidrólisis (días⁻¹)

t = tiempo al cual se quiere predecir los asientos (días)

$$\alpha \cdot H \cdot COD$$

Magnitud final del asiento
(valor asintótico)

Hipótesis: crecimiento del tipo exponencial con límite asintótico de los asientos.

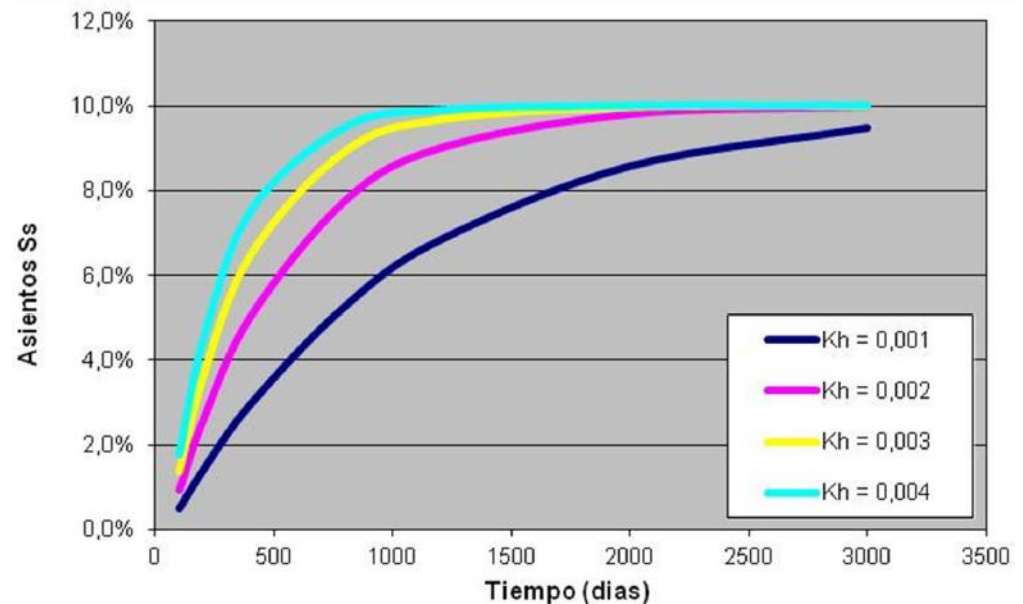
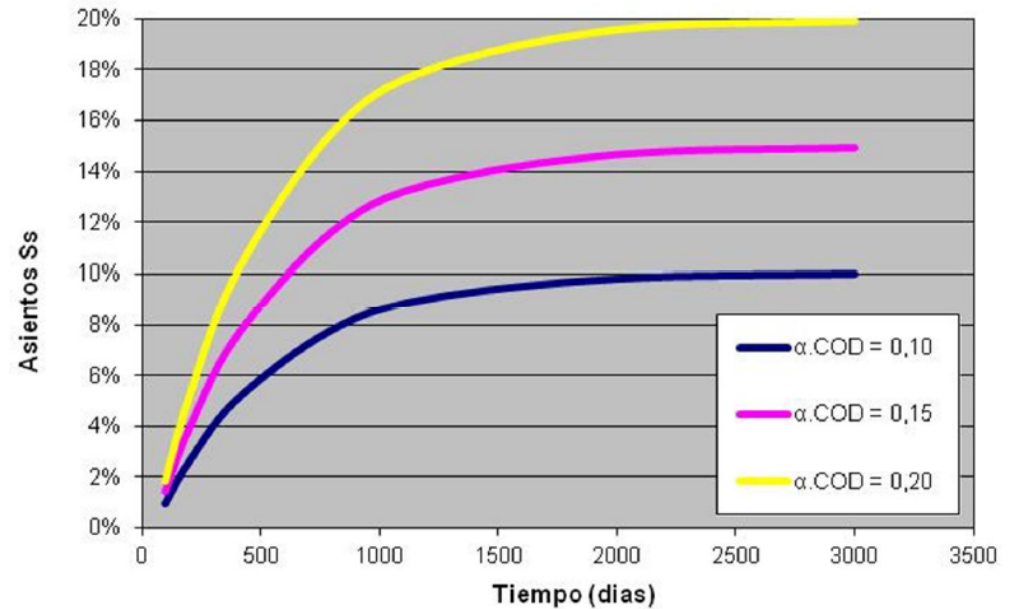
- La expresión: $\alpha \cdot COD$ = controla la magnitud final de los asientos
- Kh = tasa de crecimiento de los asientos que son no lineales.

Kh muy chico \Rightarrow tasa casi lineal

Kh grande \Rightarrow tasa altamente no lineal

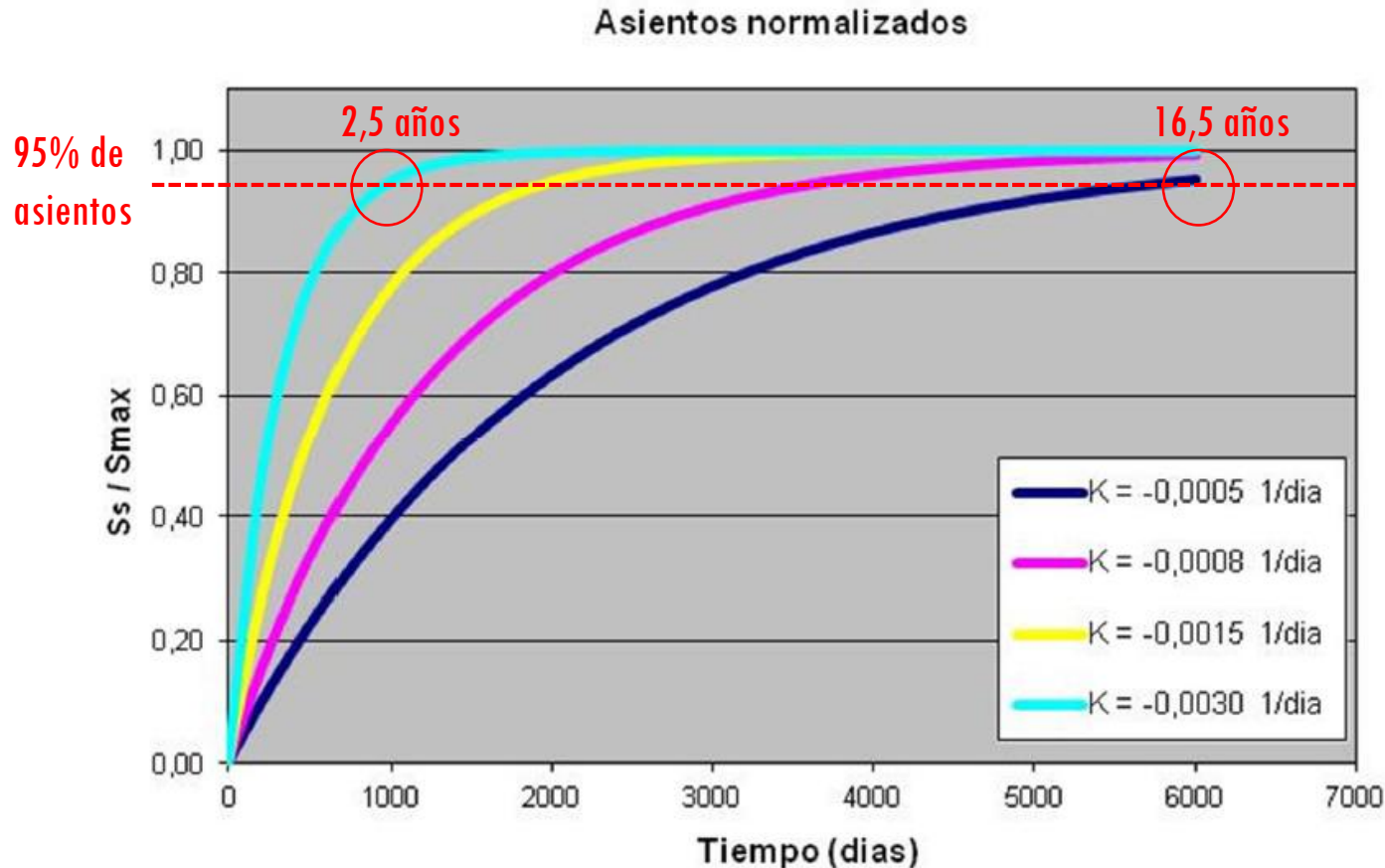
• Modelo de MERUELO

- HIDRO (agua) + LISIS (ruptura) es una reacción química entre una molécula de agua y otra macromolécula.
- La molécula de agua se divide y rompe uno o más enlaces químicos y sus átomos pasan a formar unión de otra especie química.
- La hidrólisis biológica es la escisión de biomoléculas en la que **se consume una molécula de agua para separar una molécula mayor en sus componentes.**



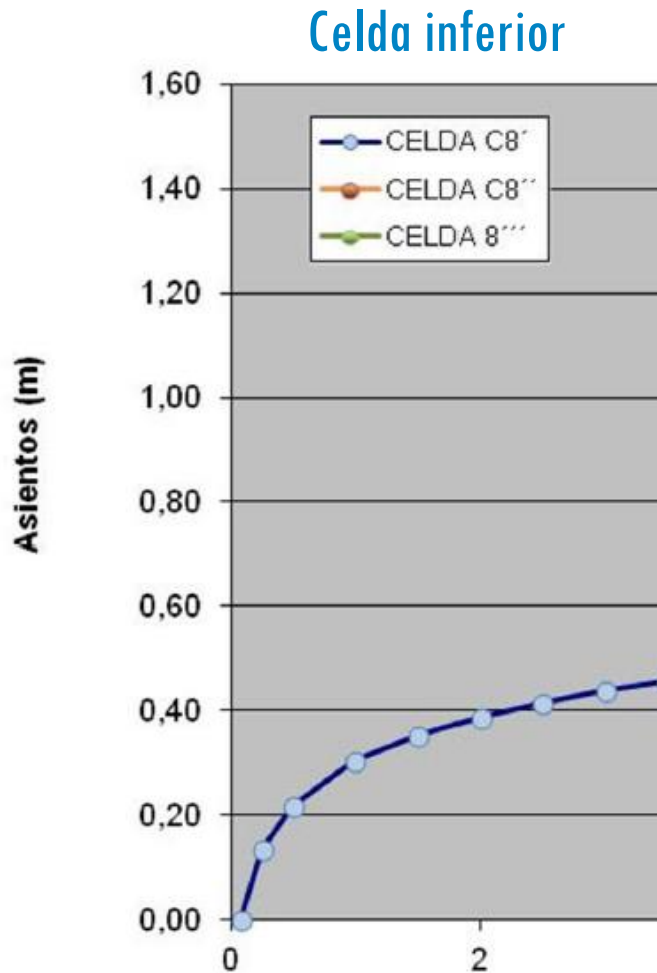
• Modelo de MERUELO

- Las condiciones favorables aceleran el crecimiento de los asientos.
- Las condiciones desfavorables demoran el crecimiento de los asientos.
- Los asientos finales no cambian, pues dependen del contenido de materia orgánica biodegradable.

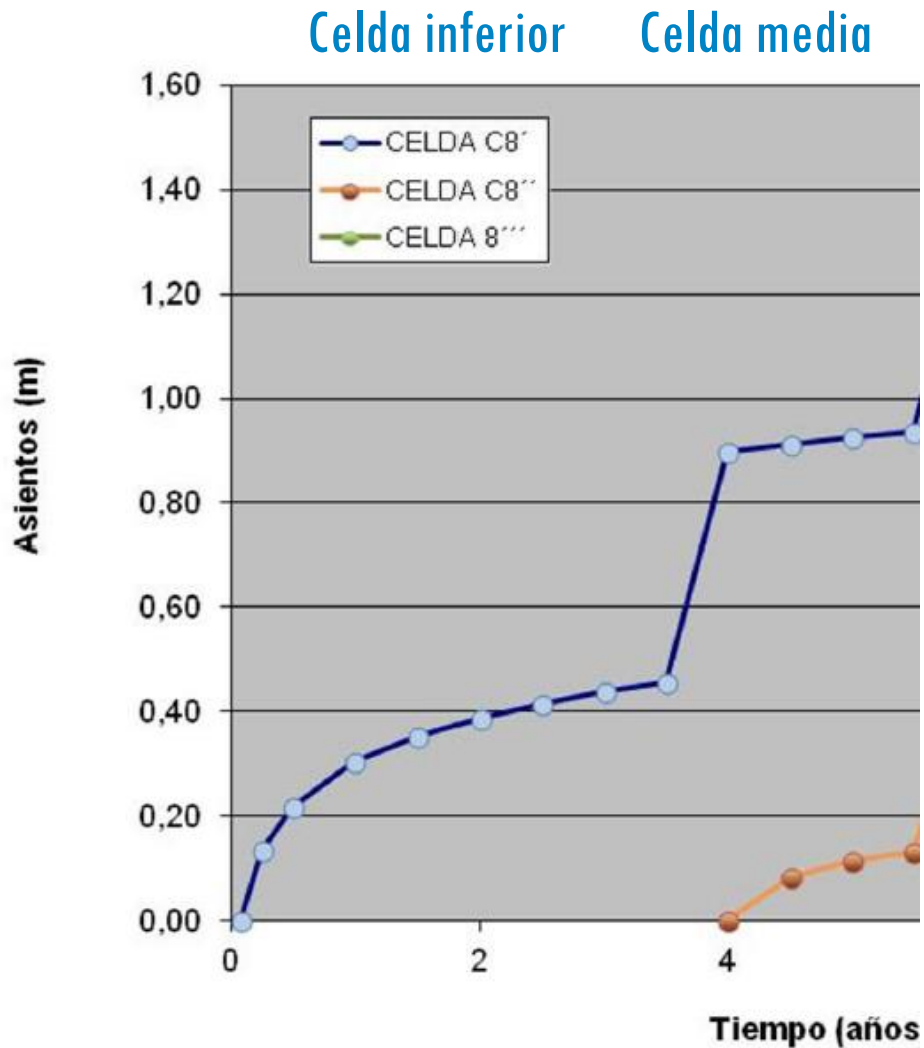


Este comportamiento de los asientos es clave para la definición de la fecha para el cambio de uso del emplazamiento, por ejemplo para construir un ecoparque.

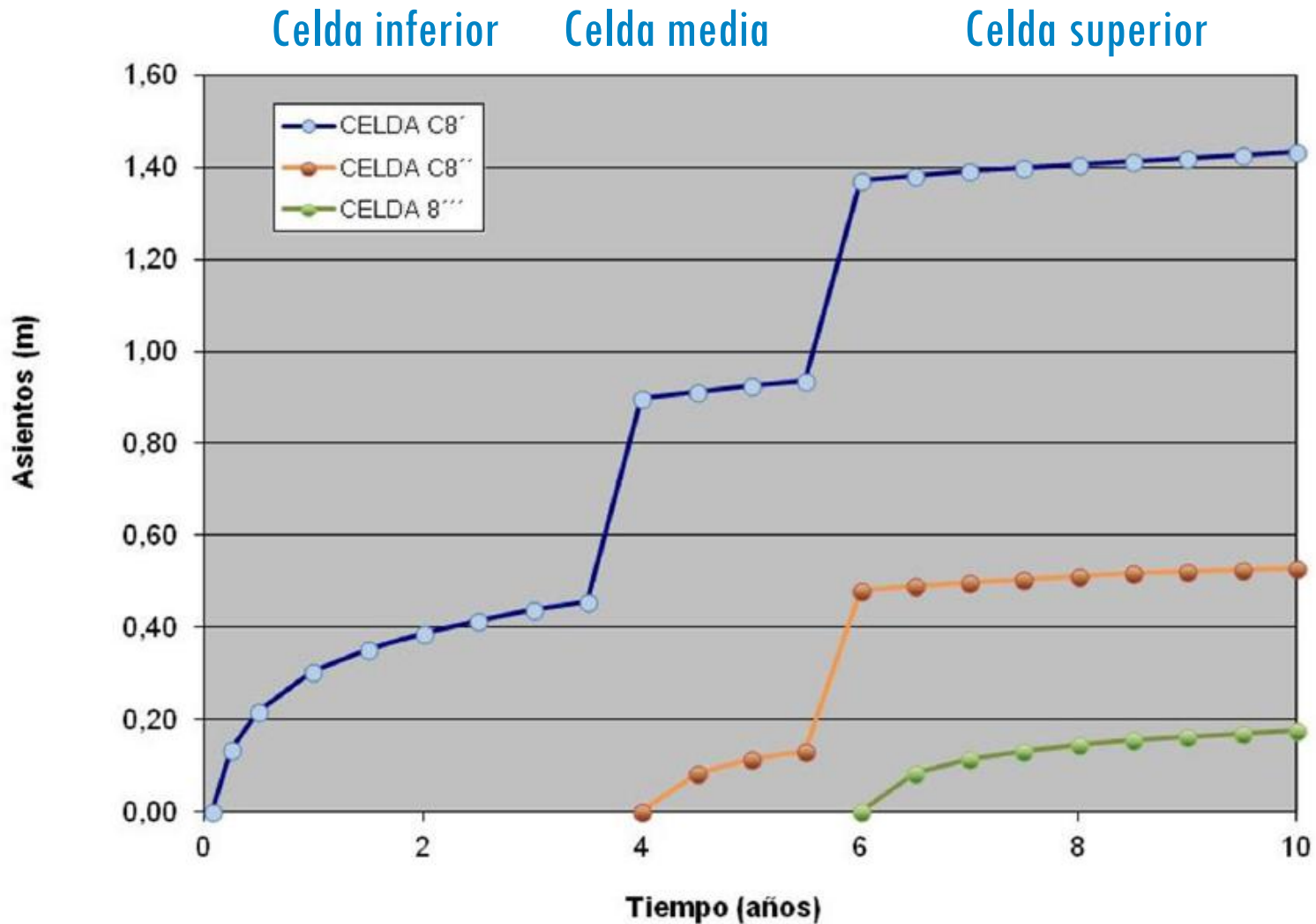
- Combinación de asientos en tres niveles de celdas



- Combinación de asientos en tres niveles de celdas



- Combinación de asientos en tres niveles de celdas



- Comparación de SOWERS y MERUELO

ITEM	SOWERS	MERUELO
FENÓMENO MODELADO	<ul style="list-style-type: none"> • Consolidación primaria (disipación de presiones intersticiales y compresibilidad bajo carga) • Consolidación secundaria (creep y biodegradación) 	<ul style="list-style-type: none"> • Consolidación secundaria (creep y biodegradación)
HIPÓTESIS	Crecimiento logarítmico de los asientos	Crecimiento exponencial de los asientos con valor máximo asintótico

• Comparación de SOWERS y MERUELO

	SOWERS	MERUELO
NÚMERO DE PARÁMETROS	<ul style="list-style-type: none"> • 2 para consolidación primaria • 3 para consolidación secundaria 	<ul style="list-style-type: none"> • 4 para consolidación secundaria
SENTIDO FÍSICO DE LOS PARÁMETROS	<ul style="list-style-type: none"> • Consolidación primaria: parámetros con sentido físico, relacionados a la porosidad y la compresibilidad de los rellenos. • Secundaria: parámetros con sentido físico, relacionados a la porosidad y biodegradación del relleno, y al tiempo asociado a la consolidación primaria 	<ul style="list-style-type: none"> • “α” estima la pérdida de masa transformada en asientos • “COD” es el contenido de materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos • “Tc” es el tiempo de construcción del relleno • “Kh” es el coeficiente de hidrólisis

• Comparación de SOWERS y MERUELO

	SOWERS	MERUELO
AJUSTE DE LOS PARÁMETROS	<ul style="list-style-type: none"> • C_c y C_α: Se pueden estimar a partir de la “e”, mediante uso de los ábacos de Sowers. Dificiles de medir. • “e”: Se puede estimar de bibliografía. Dificil de medir de forma representativa. 	<ul style="list-style-type: none"> • “α” se debe estimar u obtener de mediciones previas • COD se estima por región, ó se mide directamente • T_c es un dato real ó estimado del relleno • K_h se estima a partir de datos disponibles en la literatura