

EXPERIENCIAS DE APLICACIÓN DE MODELOS PARA LA DETERMINACION DE LOS ASENTAMIENTOS DE RELLENOS SANITARIOS.

R. Espinace A. y J. H. Palma G.

Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Ingeniería en Construcción, Valparaíso, Chile.

J. M. Sánchez -Alciturri

Universidad de Cantabria, E.T.S.I.C.C. y P., Santander, España.

XI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Agosto, 1999, Foz de Iguazu, Brasil

SUMARIO: Normalmente los asientos en un vertedero controlado puede prolongarse por varias décadas hasta que los procesos de degradación alcancen su estabilización. Desde los primeros estudios de la compresibilidad de los vertederos controlados se ha procurado conocer con precisión los asientos que se pueden esperar en este tipo de rellenos, para determinar con mayor exactitud la vida útil del relleno y la posible utilización que se pueda dar a los vertederos en el período posterior a la clausura.

En este artículo, se darán a conocer los modelos estudiados y las experiencias recogidas por los investigadores de la Universidad Católica de Valparaíso en 18 años de trabajo continuo en esta nueva línea denominada geotecnia ambiental. Se discutirá la evolución ocurrida en el empleo de diferentes modelos y parámetros para la estimación de los asientos en vertederos controlados que responden a distintas realidades y características.

PALABRAS CLAVES: Relleno sanitarios, geotecnia ambiental, asientos, residuos sólidos, modelos de asiento

1 INTRODUCCION

Actualmente los rellenos sanitarios son considerados como la mejor alternativa técnica, económica y sanitaria, para disponer los residuos sólidos, y son la solución más utilizada. En este escenario la Geotecnia comienza a tener una activa participación tanto en las etapas de estudio previo a la selección de un lugar destinado a relleno sanitario, como en las de diseño, de construcción; de cierre y de rehabilitación de antiguos vertederos.

Entre los temas que el estudio geotécnico debe cubrir, están aspectos relacionados con: la estabilidad del suelo de fundación y la de los taludes; las características del material para el recubrimiento de los residuos; la facilidad para efectuar excavaciones; las condiciones para el sellado de fondo, lateral y superficial de la obra; las condiciones hidrogeológicas del lugar; la determinación de la resistencia del relleno, así como la

evolución de los parámetros resistentes con el tiempo, entre otras.

Sin embargo, uno de los temas que más ha interesado observar es el análisis de la compresibilidad y el tiempo de estabilización de las deformaciones en los rellenos, con el propósito de determinar la vida útil y los futuros usos de los vertederos sanitarios.

Sobre este tema, en Chile se han desarrollado algunas experiencias durante la construcción de rellenos sanitarios o en proyectos de rehabilitación de estas áreas impactadas, principalmente en la ciudad de Santiago. Los primeros trabajos realizados por la Universidad Católica de Valparaíso fueron presentados en los congresos de ingeniería sanitaria de Viña del Mar y Temuco (Oyarzún, a. et al., 1979 y (Espinace, 1983). Las investigaciones han continuado hasta hoy abordando el problema geotécnico de la construcción sobre estos rellenos, y se han propuesto parámetros y modelos de cálculo.

2 DIVERSOS CRITERIOS DE DETERMINACION DE LA COMPRESIBILIDAD DE LOS VERTEDEROS CONTROLADOS.

Los primeros estudios de la compresibilidad de los vertederos controlados datan de la década de 1940 en Estados Unidos, aunque las primeras publicaciones datan de los años 70.

El ritmo de producción de asientos en un vertedero es variable con la edad, presentando velocidades de asiento que disminuyen con el tiempo, pero que en todo caso se mantienen perceptibles durante años. Hirata et. al, (1995) plantean que en vertederos con alto contenido de residuos orgánicos, los asientos son importantes durante los primeros 10 años.

La compresibilidad y en general el comportamiento mecánico de un vertedero controlado está afectado por múltiples factores, siendo los principales:

- Composición, características de las basuras y espesor de la celda en el relleno.
- Humedad del residuo, capacidad de campo del relleno.
- Tipo y metodología de rellenos empleada; equipo usado en la operación de compactación y densidades alcanzadas por los residuos y el material de cobertura.
- Tipo y espesor del material de cobertura, lo que condiciona la evolución de la temperatura y la humedad, entre otros factores, que influyen en el proceso anaerobio de descomposición.
- Las condiciones climáticas, tanto de pluviometría, como las temperaturas ambientales
- Edad del vertedero, condición fundamental en la estabilidad de este.

Una forma típica de abordar la reproducción del proceso de compresibilidad en vertederos, es la utilización de experiencias de comportamientos semejantes en Geotecnia, siendo varios los autores que utilizan teorías semejantes a los estudios de suelos naturales.

Sowers, fue el primer investigador que planteó un modelo para predecir estos asientos (Sowers, 1973). Aunque con posterioridad al planteamiento de este investigador se han desarrollado una serie de modelos conducentes

al estudio de la compresibilidad de los rellenos, la mayoría de ellos se basa en sus hipótesis iniciales, las que establecen que los asientos iniciales producidos por mecanismos mecánicos, se pueden determinar mediante la expresión de la teoría de la consolidación primaria:

$$S_p = \frac{C_c}{1 + e_0} H_0 \log\left(\frac{\sigma_{v0} + \Delta\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}}\right) \quad (1)$$

donde:

- S_p = asiento al final de la consolidación primaria
- H_0 = altura inicial del relleno
- C_c = coeficiente de compresibilidad
- σ_{v0} = presión efectiva en el relleno
- $\Delta\sigma_{v0}$ = sobrecarga efectiva
- e_0 = índice de vacíos

Terminada la primera fase aproximadamente al cabo de un mes, según Sowers, los asientos debido a cambios físico químicos, degradación biológica y compresión mecánica secundaria, en condiciones ambientales estables tienen un comportamiento más o menos lineal con el log. del tiempo, similar a la compresión secundaria de suelos y se determinan mediante la teoría de la consolidación secundaria, aplicando la expresión:

$$S_s = \frac{C_\alpha}{1 + e_0} H \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (2)$$

donde:

- S_s = asiento durante la consolidación secundaria al tiempo t_2
- H = altura de la celda al tiempo t_1
- C_α = índice de compresión secundaria
- t_2 = tiempo de estimación de asientos
- t_1 = tiempo de inicio de la consolidación secundaria

La obtención del coeficiente de compresibilidad (C_c) y del índice de compresión secundaria (C_α) se hace a partir de la relación de estos parámetros con el índice de poros (e_0), en gráficos propuestos por Sowers. Estos parámetros han sido contrastados con experiencias chilenas, arrojando una adecuada correlación cuando se trata de residuos con alto

contenido de materia orgánica. Este criterio ha sido el más empleado hasta ahora, tanto en Chile como a nivel internacional, para predecir los asentamientos en un relleno sanitario.

Se ha comprobado que la compresión primaria es dominante en la producción de asentamientos en la fase de operación del vertedero, y la compresión secundaria es la más evidente una vez que ha concluido la operación del relleno.

Sin embargo, la propuesta de Sowers tiene una limitación de partida que no puede ser ignorada, ya que la utilización de la teoría de consolidación de Terzaghi-Frolich implica la aceptación de sus hipótesis, entre las cuales la de saturación completa es, por los datos con que se cuenta, de dudoso cumplimiento en el seno de un vertedero controlado.

Adicionalmente, y ya con vista a su aplicación práctica, el modelo predice, para los asentamientos lentos, un proceso de desarrollo indefinido, y además el asiento "final" se hace infinito, por lo que el modelo sólo permite la predicción de asentamientos para fechas determinadas.

Posteriormente a la propuesta realizada por Sowers, distintas referencias bibliográficas dan cuenta de la aplicación de esta propuesta a casos reales, así como presentan discusiones o críticas a la validez del parámetro C_α (Watts y Charles, 1990; Yen y Scanlon, 1975, entre otros). Fassett, Leonards y Repetto (1994) hacen una revisión concluyendo que los motivos de discrepancia se basan en la variación del parámetro C_α con el tiempo, y en la observación de su dependencia del espesor del relleno.

En todo caso, los valores que se encuentran en las referencias disponibles están mayoritariamente por debajo de 0,1, salvo uno de los datos por Watts y Charles (1990) y los proporcionados por Druschel y Wardwell (1991), caso este último en el que los autores, aún señalando la discrepancia con respecto a la gama de valores típicos, no son capaces de suministrar una explicación.

Yen y Scanlon (1975) realizaron un estudio comparativo a partir de información obtenida de los asentamientos observados a lo largo de nueve años en tres vertederos controlados de California y propusieron que la velocidad de asiento de la superficie de un vertedero sigue una ley de disminución lineal con el logaritmo del tiempo como la que se presenta a continuación.

$$v = v_i - b \log.t \quad (3)$$

donde:

v = velocidad de asentamientos (mm/mes)
 v_i = velocidad de asiento en $t=1$. (mm/mes)
b = pendiente de la recta
t = tiempo de estimación de la velocidad (meses)

Los autores confeccionaron diferentes gráficas velocidad de asentamientos-edad del relleno, agrupando datos de forma que los valores del tiempo de construcción del relleno y del espesor del relleno fueran semejantes en cada grupo. Mediante un ajuste de mínimos cuadrados de los puntos dibujados determinaron valores de sus parámetros para rellenos con diferentes espesores y diferentes tiempos de construcción.

De los resultados presentados por estos autores puede deducirse que se consideraron de forma clara la dependencia de la velocidad con el logaritmo del tiempo, en tanto que el efecto del espesor del relleno no se introduce con nitidez. Por otra parte, la aparición del tiempo de construcción como factor condicionante de la velocidad parece que debe responder a una percepción de la importancia de la degradación aeróbica, la que es posible en los metros más superficiales y más perceptible en consecuencia cuanto más lenta es la elevación del vertedero, es decir cuanto mayor es el período de construcción. Esto no se plantea con claridad en la publicación. En todo caso, esta propuesta alternativa a la de Sowers cuenta con la ventaja, a la hora del análisis de la calidad de sus predicciones, de que, al depender de dos parámetros, en principio ha de dar un ajuste mejor que el modelo propuesto por Sowers, en el que interviene un sólo parámetro.

En su estudio, Yen y Scanlon observaron que, en general la velocidad de asiento aumentaba con el espesor del depósito, hasta un límite de unos 30 m. A profundidades mayores la velocidad de asentamientos no aumenta significativamente por que en profundidad la descomposición probablemente es más lenta que en superficie. Esta propuesta ha sido utilizada en repetidas ocasiones e incluso en el congreso de Edmonton, Canadá, otros autores (Sohn y Lee, 1994), realizaron un nuevo ajuste

de los datos, añadiendo medidas de otra investigación (Rao et al., 1977), para estimar los parámetros en función del espesor del relleno.

Otro planteamiento lo constituye el trabajo de Zimmerman et al. (1977), quienes definen una ley de comportamiento que considera dos niveles de porosidad (macro y micro porosidad) en los residuos, y proponen una relación de la disipación de la presión intersticial con el tiempo. Como marco general, plantean la condición de continuidad que incluye grandes deformaciones, la actividad químico-biológica que produce la transformación de sólidos en gas y la variación de degradación con el tiempo. Planteado para su aplicación a residuos de fabricación de papel, saturados aunque prevé la aplicación a suelos no saturados, el método emplea un gran número de parámetros e hipótesis de variación de propiedades con el cambio de volumen que lo hacen de aplicación muy problemática.

Cartier y Baldit (1983) proponen una ley de variación de la densidad media en función de la profundidad, de acuerdo a mediciones realizadas con densímetro nuclear. Además proponen valores de peso específico de los residuos sólidos. Estos datos son de gran utilidad para aplicar el modelo propuesto por Sowers (1973). Los resultados de los estudios efectuados en el vertedero controlado de D'Arnouville, propone valores del índice de compresión primaria (Cc) que están dentro de las bandas propuestas por Sowers (1973). Lo mismo hicieron los autores de este artículo (Espinace, et al., 1991), como resultado de las investigaciones realizadas en el vertedero de Limache.

Dotd et al (1987), proponen llevar a cabo controles de asientos por un período de tiempo prolongado, para confirmar la linealidad en la relación entre el asiento y el logaritmo del tiempo a largo plazo.

En los estudios realizados con información recogida en vertederos de distintas edades y Estados del norte de los EE.UU., (Edil et al, 1990), aplicando dos modelos de predicción empleados para turbas y suelos orgánicos, el modelo de Gibson y Lo y un modelo potencial de fluencia, concluyen que los asientos de los residuos pueden ser adecuadamente modelados.

Landva y Clark (1990), recomiendan el empleo de rellenos de prueba para evaluar la compresibilidad de los vertederos. Estos ensayos a gran escala son muy eficaces y su costo puede ser relativamente bajo, mientras que los ensayos geotécnicos convencionales de laboratorio, generalmente no son aplicables para rellenos de basuras, principalmente por el tamaño y heterogeneidad de estos materiales.

Con anterioridad a esta proposición la Universidad Católica de Valparaíso ya había realizado experiencias de este tipo, durante las etapas de operación de los vertederos sanitarios El Molle de Valparaíso y Limache de la V Región (Espinace et al.1989). En las investigaciones realizadas en este último vertedero sanitario de baja densidad se midieron asientos de alrededor del 30% de la altura inicial al cabo de 7 años. Estos valores coinciden con aquellos observados en otros rellenos sanitarios de Chile, tales como "La Feria" o "Lo Erzururiz" en Santiago (Espinace et al, 1991).

Los asientos medidos por el Distrito Sanitario de Los Ángeles (USA), para su vertedero controlado SPADRA, son de aproximadamente 0,2 a 0,3 m/año en un relleno de residuos de 31 m. de espesor. Los asientos finales pueden llegar a un 30% de la altura de los desechos (Hinkle, 1990). Todos estos estudios muestran una concordancia de la influencia de la densidad de compactación en los valores de los asientos unitarios.

De los métodos de predicción de asientos no provocados por variaciones de carga y que se desarrollan a largo plazo, la propuesta de Gandolla, es una ley de ajuste empírico, basada sólo en el ajuste de una función exponencial a datos de un ensayo a escala, y sin ninguna interpretación adicional (Gandolla et al., 1992). Estos autores observaron el desarrollo de asientos de residuos en un reactor (lisímetro) con el objetivo de establecer una función de ajuste que representara los asientos en función del tiempo, considerando como condición inicial asientos nulos y como condición final asientos tendientes a un valor asintótico.

$$S_s = aH(1 - e^{-kt}) \quad (4)$$

donde:

Ss = asientos
H = espesor inicial del relleno
a = constante
k = constante
t = tiempo de estimación de los asientos

De las curvas asiento-tiempo obtenidas de las observaciones efectuadas en el lisímetro, los autores obtienen constantes mediante ajuste por mínimos cuadrados. Los asientos medidos son algunas veces mayores que los valores manejados normalmente, probablemente debido a la falta de compactación de los residuos en los ensayos.

Según este modelo el asiento unitario final del relleno corresponde al valor de una constante "a", en tanto que un parámetro "k" rige el ritmo de degradación, decreciente con el tiempo, a semejanza de las leyes que rigen procesos de reacción química o biológicos. Aun cuando los autores no mencionan este paralelismo, justifican la estructura de la ley propuesta en la semejanza de forma con las medidas experimentales.

¡Error! Marcador no definido.El Grupo de Geotecnia de la Universidad de Cantabria, España, con colaboración de investigadores del Grupo de Geotécnia de la U. Católica de Valparaíso (Arias, 1994) (Palma, 1995), plantearon un modelo que representa los asientos secundarios considerando los procesos de degradación que ocurren en los residuos sólidos. El denominado modelo Meruelo, pretende predecir los asientos que ocurren en un vertedero a partir de una formulación que incorpore y relacione los parámetros fundamentales que determinan los procesos de degradación como pueden ser el tiempo, el contenido de materia orgánica en los residuos, la humedad contenida, y el ritmo de desarrollo de los procesos de degradación, entre otros.

En el planteamiento de este modelo, se considera solamente los asientos que son dependientes del tiempo, es decir los que se deben a la descomposición de la materia orgánica biodegradable. Esta descomposición pasa por una fase aerobia, y una fase anaerobia. En condiciones de operación normales, la fase de descomposición aerobia se extiende de 10 a 50 días, hasta que se agota el oxígeno que está

en los poros del relleno. La fase de descomposición anaerobia tiene un período de duración bastante prolongado y se suceden cuatro etapas conocidas como hidrolítica, acidogénica, metanogénica y de maduración.

Para el desarrollo de este modelo de predicción de asientos se examinaron modelos que representan la eliminación de la materia orgánica biodegradable. En general, los modelos de degradación estudiados, y utilizados en ingeniería sanitaria, se aplican al análisis de procesos en reactores de laboratorio, considerando el proceso con un inicio definido y aplicado a una masa de material degradable también definida, existente en el instante inicial, sin aportes adicionales de masa una vez que el proceso de degradación ha comenzado. En este caso, al plantear el modelo de degradación de un vertedero se han tenido que considerar los aportes de masa que se producen durante la etapa de explotación.

El planteamiento anterior implica que, para un período de tiempo prolongado, la materia orgánica biodegradable debería desaparecer en su totalidad. Sin embargo, se debe considerar que una parte de los RSU no son orgánicos y por lo tanto no sufren degradación, y que por otra no toda la materia orgánica se degrada. Para aplicar las propuestas de degradación sólo al material susceptible de sufrir degradación, se puede optar por determinar la cuantía del material degradado con relación al total de los residuos sólidos.

Si se hace la diferencia entre el total del material aportado y el material remanente en cualquier momento (t), se puede determinar el material degradado en ese momento. En todo caso, esto supone sólo una estimación de la masa de material degradado, expresada como una proporción del total. Habrá en consecuencia que establecer una relación de la degradación con los asientos producidos en el vertedero.

La pérdida de masa puede tener lugar produciendo también la pérdida del volumen ocupado por ella, manteniendo constante la densidad del vertedero, y traduciéndose en aparición de asientos en consecuencia, o bien puede producir pérdida de densidad, desarrollándose huecos o zonas en las que, en todo caso posteriormente pero con ritmo no condicionado por la degradación, tendrían

lugar procesos de colapso y la consiguiente producción de asientos.

En todo caso, la relación entre el total de pérdida de masa y el de pérdida de volumen parece razonable que se plantee como una constante para todos los residuos de un vertedero, que sea independiente del tiempo y que no dependa tampoco del estado tensional.

Por lo tanto, y atendiendo a la evaluación de los asientos, éstos pueden expresarse para todo el período posterior a la etapa de explotación de un vertedero como función de los siguientes parámetros en la forma:

$$S_s = \alpha H COD \left[1 - \frac{1}{k_h T_c} (e^{-k_h(t - T_c)} - e^{-k_h t}) \right] \quad (5)$$

donde:

- S_s = asientos (mm)
- α = coeficiente de pérdida de masa transformada en asientos
- H = espesor del relleno (mm)
- COD = contenido de materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos (tanto por uno)
- T_c = tiempo de construcción del relleno (días)
- k_h = coeficiente de hidrólisis (días⁻¹)
- t = tiempo al cual se quiere predecir los asientos (días)

En esta expresión se reproducen las formulaciones para la degradación de residuos orgánicos, modificadas para tener en cuenta que la masa de residuos experimenta en forma continua la degradación y que ha sido aportada durante un tiempo determinado con un ritmo constante, ritmo que cesa pasado ese tiempo. Además, el material degradado (y con él el remanente) se expresan como fracción del total de material del vertedero. En cuanto a la relación entre el volumen de asientos producido y el correspondiente a la masa perdida por degradación, el coeficiente α se considera constante y característico del tipo de vertedero y de residuos depositados.

La expresión permite plantear en consecuencia la predicción de asientos a largo plazo en un vertedero de residuos compactados. De todos modos, la dificultad ya planteada inicialmente para determinar la cota de

superficie al inicio del proceso de degradación, que es aún más grande cuando se trata de vertederos, en los que la degradación se inicia cuando aún se están aportando residuos, hace adecuado expresar los asientos en términos de descenso con respecto a un momento determinado, considerado como inicial. Hay que señalar que en las condiciones reales los asientos en un vertedero controlado se obtienen con respecto a una primera nivelación llevada a cabo en un momento $t_0 > T_c$.

A partir de la ecuación anterior, y conocidos los valores de los parámetros, se pueden predecir los asientos a lo largo del tiempo. También se puede, al contrario, y contando con medidas reales de asiento, entre un período determinado de tiempo ($t > t_0$), estimar el coeficiente de pérdida de masa que se transforma en asientos (α), y además ajustar valores como el coeficiente de hidrólisis k_h .

En la Universidad Católica de Valparaíso las Escuelas de Ingeniería en Construcción y de Ingeniería Bioquímica, están desarrollando un proyecto de investigación desde 1996, sobre la velocidad de estabilización y la modelación de los asientos registrados en dos vertederos controlados a escala, que ha sido rellenado con residuos sólidos representativos de país (Espinace et al 1997). El primero ha sido alimentado con líquidos lixiviados y en el segundo no se ha realizado ningún proceso de recirculación.

A los asientos medidos en los dos lisímetros, se han ajustado los modelos de Sowers y de Meruelo; se ha obtenido los parámetros para cada caso y se ha realizado una predicción de los asientos esperados en los próximos dos años. Los modelos geotécnicos utilizados se ajustan bien a las medidas reales y los parámetros obtenidos en cada caso, permiten predecir los asentamientos que ocurrirán en los lisímetros para períodos posteriores.

3 CONCLUSIONES

Se han revisado los más significativos modelos propuestos para el análisis y predicción del comportamiento en deformación a largo plazo de los residuos sólidos. Además se estudian las

propuestas de tipo fenomenológico como la de ajuste exponencial de Gandolla et al. (1992), y las de base empírica como la de Yen y Scanlon (1995). Los modelos de Sowers suponen un escalón adicional, al introducir un análisis cualitativo de los procesos que se consideran responsables de la producción de asientos diferidos y proponen formulaciones adecuadas en base a la experiencia en Geotecnia.

Sin embargo, el sentido de los parámetros que aparecen en las propuestas, no es consecuencia de un planteamiento geotécnico inicial y, por tanto, no representan las condiciones ambientales de degradación, ni las características de los rellenos. Únicamente, los ábacos de relación de C_c y C_u con el índice de poros y las condiciones ambientales de degradación (favorables o no) que propone Sowers suministran una puesta en situación adecuada.

Por otra parte, la constatación de que el índice de compresión secundaria propuesto por Sowers no es una constante para cada tipo y forma de deposición del residuo, sino que parece depender del espesor del relleno e incluso variar a lo largo del proceso, e igualmente la no linealidad de la velocidad de asiento con el espesor de relleno que se deduce de las propuestas de Yen y Scanlon hacen que la fiabilidad de estas propuestas se reduzca.

Adicionalmente, las limitaciones típicas de los ajustes empíricos en cuanto a la bondad del ajuste en rangos extremos aparecen en todos los modelos, encontrándose que las velocidades de asiento al inicio del proceso o el valor final de dicho asiento se hacen infinitas.

En un intento de solventar todo lo anterior, se ha propuesto el modelo Meruelo, basado en una serie de hipótesis iniciales que consideran una relación entre los fenómenos de degradación y los asientos producidos. Este modelo presenta como ventaja la representatividad de los procesos y factores que intervienen en los asientos a largo plazo, pero su desventaja está en la carencia actual de parámetros representativos.

Con el propósito de contar con elementos actualizados para predecir asientos en vertederos, se propone tomar como referencia los métodos clásicos como el de Sowers, pero ampliando la base de datos disponible, con

información que se haya generado a la fecha. Todo estos mientras se validan los modelos cuyas hipótesis son más cercanas a la realidad, como el modelo Meruelo, para lo cual se requerirá de una mayor difusión, aceptación y posteriormente, la generación de parámetros representativos.

REFERENCIAS

- Arias, A., (1994), "*Modelo de Asentamiento de Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos*". Tesina de Magister en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y Medio Ambiente, Universidad de Cantabria.
- Cartier, G., y Baldit, R., (1983), "*Comportement Géotechnique des Décharges de Residus Urbains*". Bull. Liaison, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 128, Nov-Dec, pp. 55-64.
- Doty, M.E., Swetman M.B., y Bergstrom, W.R., (1987), "*Field measurements of landfill surface settlements*". Proc. Spec. Conf. on Geotechnical practice for waste disposal '87. Univ. of Michigan, ASCE, pp. 406-417.
- Druschel, S.J., y Wardwell, M.B., (1991), "*Impact of Long Term Landfill Deformation*". Proceedings of Geotechnical Engineering Congress, Boulder, Co.,
- Espinace, R., (1983), "*Compresibilidad de los vertederos sanitarios*". V Congreso chileno de Ingeniería Sanitaria y del Ambiente, Temuco, Chile.
- Espinace, R., et al., (1990), "*Problemas Geotécnicos de los Rellenos Sanitarios*". Revista Ingeniería Civil, CEDEX-MOPU, 77, Dic., pages 77-83.
- Espinace, R., et al., (1991), "*Comportamiento mecánico del relleno sanitario de Limache*". Proc. IX Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Viña del Mar - Chile, pp. 1091-1104.
- Espinace, R. Et al., (1997), "*Asentamientos de un vertedero controlado a escala con recirculación de lixiviados*". Proc. IV Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica. Octubre, Valparaíso - Chile.

- Fasset, J.B., Leonards, G.A., and Repetto, P.C., (1994), "*Geotechnical Properties of Municipal Solid Wastes and Their Use in Landfill Design*". Proceedings, WasteTech '94 -Landfill Technology Conference, Charleston SC, National Solid Waste Management Association, 31 pages.
- Gandolla, M., Dugnani, L., Bressi, G., y Acaia, C., (1992), "*The determination of subsidence effects at municipal solid waste disposal sites*". Proc. Int. Solid Waste Association Conference. pp 1-17 (sin paginar). Madrid, Junio 1992.
- German Geotechnical Society for ISSMFE, (1993), "*Geotechnics of Landfills and Remedial Works, Technical Recommendations GLR*". Ernest y Sohn, Berlín.
- Hinkle, R.D., (1990), "*Landfill site reclaimed for commercial use as container storage facility*". Geotechnics of Waste fills - Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, editors, ASTM, Philadelphia, pp. 331-344.
- Hirata, T., Hanashima M., Matsufuji, Y., Yanase, R., and Maeno Y., (1995), "*Construction of facilities on the closed landfills*". Sardinia 95. Fifth International Landfill Symposium, (1995), Proceedings, volumen I, II y III, editorial CISA, Italia.
- Landva, A.O., y Clark, J.I., (1990), "*Geotechnics of waste fill*". Geotechnics of Waste fills -Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, editors, ASTM, Philadelphia, pp.86-103.
- Oyarzún, A., y Rojas, L., (1979), "*El Relleno Sanitario y la Posibilidad de Recuperación y Utilización de un Suelo*". Síntesis para optar al título de Constructor Civil, Universidad Católica de Valparaíso, Chile, octubre.
- Palma, J.H., (1995), "*Comportamiento geotécnico de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos*". Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, Santander, España.
- Sohn, K. C., Lee, S., (1994), "*A Method for Prediction of a Long Term Settlement of a Sanitary Landfill*". Proceedings of The First International Congress on Environmental Geotechnics, Edmonton, 11-15 de julio, pp. 807-812.
- Sowers, G.F., (1973), "*Settlement of waste disposal Fills*". 8^o Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineerings, vol. 2, pp. 207-210. Moscú.
- Sowers, G.F., (1968), "*Foundation Problems in Sanitary Landfills*". Journal of the sanitary division, ASCE, vol. 94, N° SA1, pp. 103-116.
- Watts, K.S., Charles, J.A., (1990), "*Settlement of recently placed domestic refuse landfill*". Proc. Instn. Civ. Engrs, Part 1, Dec., pp. 971-993.
- Yen, B.C., y Scanlon, B., (1975), "*Sanitary landfill settlement rates*". ASCE Jnl. Geotechnical Engineering Division, 101, GT5, pp. 475-487
- Zimmerman, R.E., Chen, W.H., Franklin, A.G., (1977), "*Mathematical Model for Solid Waste Settlement*". Proc. Conf. on Geotechnical practice for disposal of solid waste materials. Univ. of Michigan, ASCE pp. 210-226.