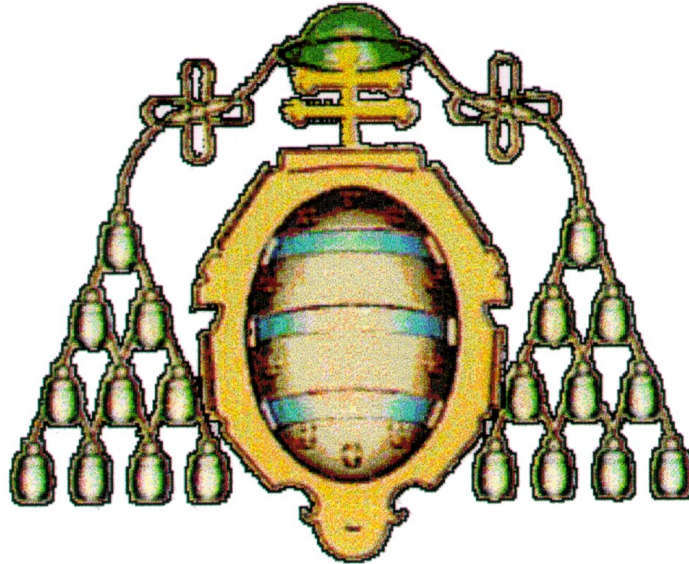


**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

Dpto. de Explotación y Prospección de Minas



TESIS DOCTORAL

COMPRESIBILIDAD DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS  
URBANOS

Autor

Ana Ghislane Henriques Pereira

Directores

Luis Sopeña Mañas

Maria Teresa Mateos García

Oviedo, 2000

**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

Dpto. de Explotación y Prospección de Minas

**TESIS DOCTORAL**

**COMPRESIBILIDAD DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS  
URBANOS**

Ana Ghislane Henriques Pereira

Oviedo, 2000

## ÍNDICE

Dedicatoria.....	iii
Pensamiento de Salomón.....	iv
Agradecimientos.....	v
Índice de figuras.....	vii
Índice de fotos.....	xi
Índice de tablas.....	xiii
<b>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
I.1 Generalidades.....	2
I.2 Objetivo.....	6
I.3 Metodología.....	7
<b>CAPÍTULO II REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>10</b>
II.1 Residuos Sólidos.....	11
II.1.1 Definición, clasificación y composición de los RSU.....	12
II.1.2 Destino final de los residuos sólidos.....	17
II.1.3 Impacto ambiental causado por los residuos sólidos.....	20
II.2 Lixiviados.....	21
II.2.1 Introducción.....	21
II.2.2 Formas de control de la cantidad de lixiviados.....	24
II.3 Gases.....	26
II.3.1 Introducción.....	26
II.3.2 La formación microbiana del metano.....	28
II.3.3 Factores que afectan a la producción de metano.....	30
II.4 Propiedades físicas de los RSU.....	34
II.4.1 Humedad.....	35
II.4.2 Densidad.....	39
II.4.3 Granulometría.....	42
II.4.4 Permeabilidad.....	43
II.4.5 Temperatura.....	45
II.5 Compresibilidad.....	46
II.5.1 Generalidades.....	46
II.5.2 Mecanismos de compresión.....	48
II.5.2.1 Procesos mecánicos.....	49
II.5.2.2 Procesos bioquímicos.....	51
II.5.3 Factores que afectan los mecanismos de asentamiento.....	60
II.5.3.1 Densidad.....	60
II.5.3.2 Cantidad de materia orgánica.....	62
II.5.3.3 Altura del relleno y sobrecarga adicional.....	62
II.5.3.4 Nivel y fluctuación de lixiviados.....	63
II.5.3.5 Factores ambientales.....	64
II.5.3.6 Edad.....	64
II.5.4 Modelos de Compresibilidad.....	65
II.5.4.1 Modelo de Sowers.....	65

II.5.4.2 Modelo de Yen & Scalon.....	70
II.5.4.3 Modelo Meruelo.....	72
II.5.4.4 Modelo de Gandola .....	76
II.5.4.5 Otros modelos .....	78

**CAPÍTULO III LOS RSU DE LA COMUNIDAD DE MADRID: EL VERTEDERO INVESTIGADO..... 79**

III.1 Situación actual de la gestión de RSU de la Comunidad de Madrid.....	80
III.1.1 Estructura territorial actual.....	81
III.1.2 Actividades económicas.....	82
III.1.3 Generación de RSU.....	83
III.1.4 Recuperación y reciclaje.....	87
III.2 Características del vertedero.....	87
III.2.2 Elección del emplazamiento.....	88
III.3 Características del terreno.....	89
III.3.1 Geología.....	89
III.3.2 Climatología.....	90
III.3.3 Hidrogeología.....	92

**CAPÍTULO IV EQUIPOS Y TÉCNICAS DE ENSAYOS UTILIZADAS PARA EL RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DEL MATERIAL..... 93**

IV.1 Introducción.....	94
IV.2 Ensayos de humedad.....	94
IV.3 Ensayo de densidad.....	94
IV.4 Sondeos mecánicos con ensayos SPT.....	95
IV.5 Análisis espectral de ondas superficiales.....	98
IV.5.1 Desarrollo histórico: aspectos teóricos y prácticos.....	98
IV.5.2 Descripción de la técnica AEOS utilizada.....	102
IV.5.3 Ensayos realizados.....	106
IV.6 Técnicas eletromagnéticas.....	109
IV.6.1 Descripción del equipo utilizado.....	109
IV.6.2 Ensayos electromagnéticos realizados.....	113
IV.7 Métodos eléctricos.....	115
IV.7.1 Descripción del equipo utilizados.....	115
IV.7.2 Ensayos eléctricos realizados.....	118

**CAPÍTULO V EQUIPOS Y TÉCNICAS DE INSTRUMENTACIÓN Y AUSCULTACIÓN..... 120**

V.1 Introducción.....	121
V.2 Construcción del terraplén experimental.....	122
V.3 Campaña de instrumentación y auscultación.....	124
V.3.1 Control topográfico.....	124
V.3.1.1 Punto fijo.....	126
V.3.1.2 Puntos de referencia.....	127
V.3.2 Línea continua de asiento.....	128
V.3.2.1 Definición.....	128
V.3.2.2 Descripción del aparato.....	129

V.3.2.3 Instalación.....	131
V.3.2.4 Lecturas.....	132
V.3.3 Inclinómetro.....	134
V.3.3.1 Definición.....	134
V.3.3.2 Descripción del aparato.....	134
V.3.3.3 Instalación.....	138
V.3.3.4 Lecturas.....	138
V.3.4 Micrómetro deslizante.....	140
V.3.4.1 Definición.....	140
V.3.4.2 Descripción del aparato.....	140
V.3.4.3 Instalación.....	142
V.3.4.4 Lecturas.....	145
V.3.5 Línea de termistancia.....	146
V.3.5.1 Descripción del aparato.....	146
V.3.5.2 Instalación.....	147
V.3.5.3 Lecturas.....	149

**CAPÍTULO VI PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS  
OBTENIDOS EN EL RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO DEL  
MATERIAL.....**

150

VI.1 Introducción.....	151
VI.2 Ensayo de densidad.....	151
VI.2 Ensayo de humedad.....	151
VI.4 Ensayos de penetración estandar (SPT).....	152
VI.4.1 Introducción.....	152
VI.4.2 Presentación de los resultados.....	162
VI.5 Análisis espectral de ondas superficiales.....	168
VI.5.1 Introducción.....	168
VI.5.2 Análisis de los resultados obtenidos con el método AEOS.....	169
VI.6 Otras técnicas geofísicas.....	174
VI.6.1 Introducción.....	174
VI.6.2 Ensayos electromagnéticos.....	175
VI.6.3 Ensayos eléctricos.....	178

**CAPÍTULO VII PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE  
AUSCULTACIÓN.....**

183

VII.1 Introducción.....	184
VII.2 Línea continua de asiento.....	186
VII.2.1 Introducción.....	186
VII.2.2 Comportamiento a corto plazo.....	186
VII.2.3 Comportamiento a largo plazo.....	193
VII.3 Puntos topográficos de referencia.....	195
VII.3.1 Introducción.....	195
VII.3.2 Comportamiento a corto plazo.....	196
VII.3.3 Comportamiento a largo plazo.....	203
VII.4 Micrómetro deslizante.....	203
VII.4.1 Introducción.....	203
VII.4.2 Presentación y análisis de resultados.....	204

VII.5 Análisis global de los resultados: LCA, puntos de referencia y micrómetro.....	209
VII.6 Inclinómetro.....	211
VII.6.1 Introducción.....	211
VII.6.2 Presentación y análisis de resultados.....	212
VII.7 Línea de termistancia.....	216
VII.7.1 Introducción.....	216
VII.7.2 Análisis de los resultados.....	216
<b>CAPÍTULO VIII ANÁLISIS MEDIANTE LOS MODELOS DE COMPRESIBILIDAD.....</b>	<b>221</b>
VIII.1 Introducción.....	222
VIII.2 Modelo de Sowers.....	223
VIII.2.1 Línea continua de asiento.....	224
VIII.2.2 Micrómetro deslizante.....	226
VIII.3 Modelo de Gandola.....	231
VIII.4 Modelo Meruelo.....	234
VIII.5 Análisis global.....	236
<b>CAPÍTULO IX CONCLUSIONES.....</b>	<b>241</b>
IX.1 Conclusiones.....	242
IX.2 Sugerencias para futuras líneas de investigación.....	248
<b>CAPÍTULO X BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>249</b>
<b>ANEJO.....</b>	<b>266</b>

A Paul, mi dulce y tierno amor....

A mis Padres, Antonio Pereira y Zeni, que me enseñaron el amor por los libros...

A mi otra Madre, Nana, que me ha generado en el vientre del amor, dedicación y cariño.

A mis Hermanos, Joao, Lamarck, Silvana, Germana y Georgeana, por ellos, intento hacer lo mejor, aunque....

Ciencia sin conciencia no es sino la  
ruína del alma...  
Salomón



## AGRADECIMIENTOS

Creo que nadie consigue sus objetivos sin el apoyo de otros. En mi caso, puedo decir que este trabajo se ha hecho posible gracias a la ayuda de muchas personas, algunas me han ayudado en el día a día, otras en ocasiones al darme una idea en una hora apropiada, un consejo en un momento de desespero, es decir, todos aquellos pequeños gestos de muchas personas que tiempo y espacio me impiden de nombrar, pero que, aunque no las mencione en esta página, las traigo en mi corazón.

Agradezco al ICI (Instituto de Cooperación Iberoamericana) por haberme concedido la beca que ha permitido la realización de este trabajo. Del mismo modo agradezco al Laboratorio de Geotecnia del CEDEX por haber puesto a disposición todos los medios técnicos y científicos necesarios para la realización de este trabajo.

A Celestino Gonzalez, Jefe del Departamento de Terreno en la Universidad de Oviedo, mi tutor, consejero, amigo.

A mi Director de Tesis, Luis Sopeña, quiero expresar mi eterna gratitud, y resaltar mi admiración al profesional, y al hombre, humor estupendo, paciencia, sencillez y capacidad.

A mi Directora de Tesis, Teresa Mateos, por la amistad, incentivo y sugerencias valiosas que fueron indispensables para la conclusión de este trabajo.

A mi queridísimo, Luis Quero, imprescindible en la realización de los ensayos de campo, por su capacidad técnica, por la perfección en su trabajo, por la dedicación, por su alegría, por su música andaluza...

A los técnicos de campo, en especial a Rafa, Jose, Pedro y Pedro Juan que en el frío, bajo el sol, con el olor nauseabundo de las basuras, hacían el ambiente agradable con sus risas y su gran compromiso con la labor, mi estima, admiración y gratitud.

A Encina, por la inestimable ayuda en la búsqueda de las referencias bibliográficas, por la amistad y cariño que, siempre, me ha dispensado.

A Manolo Pastor, mi eterna gratitud, por facilitarme el convenio con el Cedex, por acogerme en su área, por su amistad.

A Marga, Secretaria del Departamento, por la presteza en esclarecerme todos los trámites de la Universidad de Oviedo, siempre con mucha dedicación y cariño.

A los expertos de la Geofísica en el CEDEX, Julián Valerio, Antonio Cuadra, José Luis Fonticiella por la inestimable ayuda en la elaboración y interpretación de los ensayos geofísicos.

A María Eugenia Boscov, Ricardo Abreu y Juan Palma por las conversaciones enriquecedoras sobre el comportamiento complejo de las basuras

A Claudio Olalla, mi confidente, amigo, consejero y por haberme introducido en la literatura hispánica.

A mi querido amigo Cristian, por la convivencia armoniosa, por su generosidad y ayuda en la elaboración de este trabajo.

A mi querida amiga Yocling, por su dedicación, incentivo y cariño.

A mi amiga, Verusckha, que me ha enseñado el camino hacia una visión amplia de los residuos sólidos.

A los amigos queridos y colegas que han convivido conmigo en este período de mi vida: Cristina, María Eugenia, Jesús, Enrique, Carmen Villalobos, Digna, Ceíça, Juca, Joao Alberto, Beth, Marina, Inma, Rosa, Yane, Junior, Paulo Maia, Marcela, Javier, Pelusa, David, Pablo Mira, Elena Sanchez, Elena, Jose Antonio, Pablo Ortiz, Maria del Mar, Paul (padre), Marion, Eduard, Jose Estaire, Nina, Begoña, Gaspar, Teresa, Angel, Adriana...

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO II

FIGURA II.1 - Variación de la humedad, LL, LP en profundidad (Gabr & Valero,1995).....	37
FIGURA II.2 - Contenido en humedad medido en el vertedero de ano Liossia (Atenas,Grecia).....	38
FIGURA II.3 - Distribución típica de los componentes de un vertedero de RSU, (Tchobanougous, et. al., 1994)...	43
FIGURA II.4 - Variación de la temperatura en profundidad en el vertedero de ano Liossia ( Atenas, Grecia).....	45
FIGURA II.5 - Índice de compresión ( $C_c$ ) en función del índice de poros, (Sowers,1973).....	66
FIGURA II.6 - Índice de compresión secundaria $C_\alpha$ en función del índice de poros, (Sowers,1973).....	68
FIGURA II.7 - Ley Exponencial de asientos con relación al tiempo, (Gandola et al., 1994).....	77

### CAPÍTULO III

FIGURA III.1 - Zonificación de las unidades territoriales de gestión....	81
FIGURA III.2a - Porcentaje medio en RSU domiciliarios.....	84
FIGURA III.2b - Porcentaje medio en RSU comercios.....	84
FIGURA III.2c - Porcentaje medio en RSU oficinas.....	85
FIGURA III.2d - Porcentaje medio en RSU urbanos.....	85
FIGURA III.3 - Cantidades de RSU generados en la UTG4.....	86

## CAPÍTULO IV

FIGURA IV.1 - Distribución de la amplitud y de los movimientos de la partícula en función de la profundidad de las ondas Rayleigh.....	100
FIGURA IV.2 - Deformación superficial del semiespacio elástico ante una carga vertical aplicada en superficie.....	102
FIGURA IV.3 - Disposición de los equipos en el método del Análisis Espectral de Ondas Superficiales.....	104
FIGURA IV.4 - Función de coherencia $\gamma_{2f}$ – y de fase $\theta_{ab}(f)$ – calculadas por el PC para una separación de sensores de 8 m.....	105
FIGURA IV.5 - Formas de las ondas del sistema.....	111
FIGURA IV.6 - Corrientes difusivas en un conductor .....	112
FIGURA IV.7 - Curva transitoria y parámetros que la definen.....	113
FIGURA IV.8 - Plano de situación de los ensayos geofísicos realizados	114
FIGURA IV.9 - Disposición de electrodos para la configuración dipolo-dipolo.....	116

## CAPITULO V

FIGURA V.1 - Planta de disposición de la instrumentación.....	123
FIGURA V.2 - Esquema del funcionamiento del micrómetro deslizante..	142

## CAPÍTULO VI

FIGURA VI.1a - Perfil de SPT- Sondeo 1.....	156
FIGURA VI.1b - Perfil de SPT- Sondeo 1(continuación).....	157
FIGURA VI.2 - Perfil de SPT- Sondeo 2.....	158
FIGURA VI.3 - Perfil de SPT- Sondeo 3.....	159
FIGURA VI.4 - Perfil de SPT- Sondeo 4.....	160
FIGURA VI.5 - Perfil de SPT- Sondeo 5 .....	161

FIGURA VI.6 - Ensayos de SPT.....	162
FIGURA VI.7 - Curvas de dispersión experimentales.....	169
FIGURA VI.8 - Curvas de dispersión teórica y experimental.....	170
FIGURA VI.9 - Perfil de velocidades.....	171
FIGURA VI.10 - Módulo de Corte.....	173
FIGURA VI.11 - Sondeos electromagnéticos transitorios SEM-1, SEM-2, SEM-3, SEM-4 y SEM-5.....	176
FIGURA VI.12 - Perfil correspondiente a la composición de los sondeos electromagnéticos realizados.....	177
FIGURA VI.13 - Modelo de capas resultante de la interpretación de la calicata eléctrica CAL-1 (error RMS 11,4%).....	179
FIGURA VI.14 - Modelo de capas resultante de la interpretación de la calicata eléctrica CAL-2 (error RMS 10%).....	180
FIGURA VI.15 - Sondeos eléctricos verticales SEV-1 y SEV-2 .....	180
FIGURA VI.16 - Distribución de resistividades obtenida introduciendo como modelo de partida el perfil obtenido de los sondeos electromagnéticos (error RMS 27,7%).....	181

## CAPÍTULO VII

FIGURA VII.1 - Control de asiento del terraplén de carga, Sección 1...	187
FIGURA VII.2 - Control de asiento del terraplén de carga, Sección 1...	187
FIGURA VII.3 - Control de asiento con relación al tiempo, Sección 1...	191
FIGURA VII.4 - Control de asiento con relación al tiempo, Sección 2...	192
FIGURA VII.5 - Variación de velocidad con el tiempo.....	193
FIGURA VII.6 - Movimientos verticales - Lado Norte.....	197
FIGURA VII.7 - Movimientos verticales - Lado Sur.....	197
FIGURA VII.8 - Velocidades de asientos, Puntos 1,6 y 7.....	199
FIGURA VII.9 - Velocidades de asientos, Puntos 2,5 y 8.....	199
FIGURA VII.10 - Velocidades de asientos, Puntos 3,4 y 9.....	200
FIGURA VII.11 - Velocidades de asientos, Puntos 10, 15 y 16.....	200
FIGURA VII.12 - Velocidades de asientos, Puntos 11, 14 y 17.....	201
FIGURA VII.13 - Velocidades de asientos, Puntos 12, 13 y 18.....	201
FIGURA VI.14 - Variación de velocidad media con relación al tiempo.	202

FIGURA VII.15 - Asientos diferenciales obtenidos con el micrómetro...	204
FIGURA VII.16 - Asientos acumulados.....	206
FIGURA VII.17 - Velocidades de asiento diferencial.....	208
FIGURA VII.18 - Velocidades de asiento acumulado.....	208
FIGURA VII.19 - Asientos diferenciales.....	210
FIGURA VII.20 - Medidas inclinométricas relativas: movimiento positivo AB hacia el Norte.....	213
FIGURA VII.21 - Medidas inclinométricas relativas: movimiento positivo CD hacia el Este.....	214
FIGURA VII.22 - Control de temperatura en profundidad.....	217
FIGURA VII.23 - Comparación entre los valores de temperatura medidos en invierno y verano.....	219

## **CAPÍTULO VIII**

FIGURA VIII.1 - Valores medidos y estimados por el modelo de Sowers.....	231
FIGURA VIII.2 - Valores medidos y estimados por el modelo de Gandola.....	233
FIGURA VIII.3 - Valores medidos y estimados por el modelo de Meruelo.....	235
FIGURA VIII.4 - Valores medidos y previstos a través de modelos de Sowers, Gandola y Meruelo.....	236

## ÍNDICE DE FOTOS

### CAPÍTULO III

FOTO III.1 - Compactación de los residuos sólidos.....	89
FOTO III.2 - Área de pruebas.....	90

### CAPÍTULO IV

FOTO IV.1 - Sondeo con ensayo de SPT.....	97
FOTO IV.2 - Equipo de ensayo de las Ondas Superficiales .....	107
FOTO IV.3 - Interior del equipo movel.....	108
FOTO IV.4 - Bucle emisor (tx) empleado em los sondeos electromagneticos transitorios.....	109
FOTO IV.5 - Antena receptora 8rx) y receptor empleado em los sondeos electromagneticos transitorios .....	110
FOTO IV.6 - Disposición de los electrodos para la relaización de la calicata eléctrica.....	117
FOTO IV.7 - Resistivimitro desarrollado em el CET para la realización de ensayos electricos.....	118

### CAPÍTULO V

FOTO V.1 - Construcción del terraplén de carga.....	124
FOTO V.2 - Nivel de precisión Zeiss NI -2.....	125
FOTO V.3 - Detalhe del punto de referencia.....	127
FOTO V.4 - Distribución de los puntos de referencia .....	128
FOTO V.5 - Esquema de instalación de la LCA.....	133
FOTO V.6 - Montaje del sistema inclinométrico.....	139
FOTO V.7 - Montaje del micrómetro deslizante.....	143
FOTO V.8 - Toma de medidas del micrómetro.....	145
FOTO V.9 - Instalación de las lineas de termistancia.....	148
FOTO V.10 - Cables de la linea de termistancia.....	149

**CAPÍTULO VI**

FOTO VI.1 - Observación de la composición de los residuos.....	153
FOTO VI.2 - Composición de los RSU, Sondeo S2 0-13m.....	154
FOTO VI.3 - Composición de los RSU, Sondeo S2 13-20m.....	155
FOTO VI.4 - Líquidos lixiviados expelidos del sondeo S1.....	165

**CAPÍTULO VII**

FOTO VII.1 - Situación de la caja de lectura tras la ocurrencia del asiento inmediato.....	187
FOTO VII.1 - Situación de la caja de lectura a medida que se incrementaban los asientos.....	188



## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO II

TABLA II.1 - Datos típicos sobre la composición de los lixiviados.....	23
TABLA II.2 - Constituyentes típicos encontrados en el gas de vertedero de RSU.....	27
TABLA II.3 - Composición química típica de los residuos sólidos.....	28
TABLA II.4 - Rango de valores típicos de humedad.....	39
TABLA II.5 - Rango de valores típicos de densidad.....	42
TABLA II.6 - Rangos de valores típicos de coeficiente de permeabilidad.....	44

### CAPÍTULO III

TABLA III.1- Actividad económica de la Comunidad de Madrid.....	82
TABLA III.2 - Cantidades de residuos generados en la Comunidad de Madrid (tX1000/a).....	86

### CAPÍTULO IV

TABLA IV.1 - Profundidad de los sondeos.....	96
TABLA IV.2 - Dirección y separación de los ensayos.....	108

### CAPÍTULO V

TABLA V.1 - Procedimiento de construcción del terraplén experimental	122
--	-----

### CAPÍTULO VI

TABLA VI.1 - Valores de humedad.....	152
--------------------------------------	-----

**CAPÍTULO VII**

TABLA VII.1 - Valores de asiento.....	209
---------------------------------------	-----

**CAPÍTULO VIII**

TABLA VIII.1 - Coeficientes de compresibilidad obtenidos a través de LCA.....	225
TABLA VIII.2 - Índices de compresión secundaria obtenidos con LCA...	227
TABLA VIII.3 - Valores de $C\alpha$ obtenidos con el micrómetro deslizante..	228
TABLA VIII.4 - Predicción de los asientos del micrómetro deslizante.....	229
TABLA VIII.5 - Valores de "a" y "k" recogidos de la literatura técnica.....	232
TABLA VIII.6 - Valores de asientos relativos previstos y recogidos de la literatura técnica.....	237

# CAPÍTULO I

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

## INTRODUCCIÓN

## **I.1. GENERALIDADES**

El hombre, en su ansia de sobrevivir y dominar el medio en que vive, siempre busca soluciones para que la sociedad progrese sin interrumpir su dinámica. La técnica, en su aspecto más amplio, siempre tendrá la función de servir al hombre y crear armonía entre él y el medio ambiente. Este equilibrio, dependerá de la búsqueda de nuevos caminos a través de la investigación para que cumpla este oficio: sobrevivir. El problema de la contaminación de suelos, de aguas, del aire, será parte de la vida de las generaciones futuras que tendrán obviamente menos recursos naturales de los que disponer. Estas preocupaciones ya no serán elucubraciones de una sociedad apocalíptica, sino una cuestión de pura supervivencia.

El problema de eliminar los residuos sólidos producidos por los hombres y animales viene de tiempos muy remotos, cuando los hombres empezaron a congregarse en tribus, aldeas y comunidades. En esta época no había conciencia sobre gestión de residuos sólidos, y estos eran tirados en las calles, terrenos vacíos, carreteras, etc. Los problemas no tardaron en surgir, la proliferación de vectores provenientes de los focos infectados trajeron la plaga bubónica, la Muerte Negra, las epidemias, etc. Como consecuencia de estas enfermedades, casi la mitad de la población europea murió.

Estos problemas continuaron durante algunos siglos, hasta que en el siglo XIX los organismos públicos empezaron a darse cuenta de que el almacenamiento, recogida y evacuación de residuos hechos de forma inapropiada podían traer serios peligros a la salud pública. Además de los peligros a la salud humana, la contaminación del agua, del aire, del suelo puede ser atribuida a la gestión inapropiada de los residuos sólidos.

A principios del presente siglo, el aumento de la densidad poblacional en las grandes ciudades como consecuencia de la revolución industrial, provocó la necesidad de buscar fórmulas de eliminar la basura sin riesgos para las comunidades. Sin embargo, apenas en la década de los 40, países como Estados Unidos e Inglaterra, empezaron a utilizar los vertederos controlados como una forma inteligente de gestión de residuos sólidos. Este método resulta satisfactorio debido a su relativo bajo coste económico y a su capacidad de conseguir un control seguro y suficiente sobre el producto terminado.

Después de la segunda guerra mundial, este método de deposición de residuos sólidos se ha propagado enormemente en los demás países del mundo. A partir de entonces la generalización del uso de los vertederos sanitarios ha traído como consecuencia la realización de abundantes investigaciones con la finalidad de mejorar las técnicas de empleo, como la impermeabilización, la trituración y compactación de las basuras, el drenaje de aguas lixiviadas, la eliminación de los gases, etc. No obstante, quedan todavía por resolver muchos aspectos relacionados con el medio ambiente, la estética y ocupación de grandes áreas, etc

Los países más desarrollados están optando recientemente por el empleo de nuevas técnicas de vertido, intentando restringir al máximo el uso de los vertederos, pero todavía no ha surgido ninguna otra técnica viable, que sea capaz de absorber toda la basura que es producida por el mundo moderno. La incineración parece limitada porque contamina el aire; además siempre permanece el problema del destino de las cenizas, producto de este proceso. El compostaje y reciclaje también sufren del mismo mal, ya que no todos los productos son reciclables. Aunque han surgido nuevas técnicas, muchos países continúan utilizando los vertederos sanitarios para la absorción de más del 50% de los residuos sólidos que producen.

Como consecuencia de la escasez de terrenos en las grandes ciudades, hoy en día, se emplean vertederos cada vez mas altos, verdaderas montañas de

basuras que llegan a medir hasta cien metros de altura. Obviamente, el diseño de estos vertederos es más riguroso, con técnicas especializadas para estudiar la estabilidad de estos taludes, además de otros problemas inherentes al diseño de un vertedero normal y corriente como, la impermeabilización de la base y de la capa superior, el drenaje de los lixiviados, la compactación de los residuos, etc.

Mientras los países desarrollados buscan nuevas soluciones para la deposición de los vertidos o intentan mejorar las técnicas de uso de los vertederos sanitarios, en los países menos desarrollados es todavía incipiente el empleo de estos vertederos controlados. En general se continúan utilizando los vertederos de forma no controlada, provocando la aparición de áreas fuertemente contaminadas, principalmente en el entorno de las grandes ciudades.

Actualmente hay una nueva conciencia sobre la cuestión ambiental en el mundo. Países que antiguamente contaminaban sus territorios, hoy en día exigen compromisos de otros países para que su avance tecnológico o su proceso de desarrollo no implique una mayor contaminación. Por este motivo en los países en vía de desarrollo también existe una preocupación con la cuestión ambiental de sus proyectos de infraestructura.

Hoy en día además existe otro tipo de preocupación, concerniente con las nuevas áreas y las antiguas ocupadas por los vertederos sanitarios. La producción de basuras por el mundo moderno es inagotable, haciendo que las áreas ocupadas por residuos sean cada vez más necesarias y extensas. Por otra parte, las ciudades están creciendo mas allá de los límites planificados por la ordenación urbanística. En las grandes ciudades existe un anillo de basura que impide su crecimiento a un coste razonable. Por ello surge el interés en utilizar estas superficies como áreas de ocupación, mediante la construcción de parques, vías de acceso, calles, aeropuertos, nuevas urbanizaciones, taludes de carreteras, etc. Ejemplos de construcciones en tales situaciones

son abundantes y se puede encontrar en la literatura técnica. Para citar un caso concreto muy conocido, en la ciudad de Nueva York, el aeropuerto de "La Guardia" además de otras edificaciones como industrias, parques, calles, etc, fueron construido sobre rellenos sanitarios.

Construir en áreas de este tipo es bastante difícil y costoso, debido la composición fuertemente heterogénea del material. Además es un material cuyo comportamiento frente a cargas externas se conoce poco. Uno de los principales problemas técnicos que suele ocurrir es el asentamiento a corto y largo plazo. Estos problemas son típicos de los procesos ya estudiados por los geotécnicos con diferentes tipos de suelos. Por este motivo los geotécnicos investigan el comportamiento de este material como si fuera un suelo, utilizando las mismas técnicas de campo y laboratorio en los aspectos más amplios y con una concepción más abierta.

La dificultad es grande frente a los múltiples mecanismos, físicos, químicos y biológicos que se desarrollan en este proceso. Los conocimientos son escasos todavía y limitados al entorno, ya que cada sociedad produce su propia basura, variable con el clima, la cultura y con su nivel de desarrollo. Adicionalmente a estos factores existe la incidencia de la topografía, del propio terreno donde está ubicado el vertedero, del clima de la región, de las técnicas de compactación empleadas, edad y composición de los rellenos, etc.

El factor tiempo es indispensable en el análisis del comportamiento de los residuos sólidos. Hay que analizar las características de resistencia y compresibilidad asumiendo esta variable, pues el material está compuesto de residuos inertes y degradables. Este material sufre procesos de degradación química y biológica, lo que supone la variación de sus características con el tiempo.

El estudio del asentamiento, además de servir para el aprovechamiento del área de vertido, sirve también para aumentar la capacidad de absorción del

vertedero que en la mayoría de los casos tiene su capacidad inicial subestimada.

## **I.2. OBJETIVO**

El presente trabajo es parte de un programa desarrollado por el Laboratorio de Geotecnia perteneciente al Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, (CEDEX), que dentro de sus líneas maestras de investigación y desarrollo viene impulsando todos aquellos temas técnicos relacionados con las políticas medioambientales que se inscriben dentro de las actividades que le son propias.

Con vistas a realización de este proyecto, el Departamento de Explotación y Prospección de Minas de la Universidad de Oviedo realizó un convenio de colaboración con el CEDEX por el hecho de que este Centro se encuentra especialmente facultado para desarrollar este trabajo tanto por los medios materiales de que se dispone, como también por la alta cualificación de su personal científico e investigador.

En este contexto, se plantea estudiar el comportamiento geotécnico de los residuos sólidos urbanos con énfasis en el comportamiento resistente y deformacional de los mismos, con la finalidad de reutilizar áreas de vertederos clausurados como zonas verdes o para usos recreativos, incluso para la construcción de otras estructuras con mayores requerimientos de estabilidad y deformabilidad.

El presente trabajo de investigación contempla como actividades específicas básicas la realización de ensayos a escala natural en un vertedero de RSU, de Madrid. La investigación de Campo, se ha diseñado en base a la



instrumentación de una determinada área del vertedero, y la ejecución de ensayos de carga mediante la técnica de “terraplenes experimentales”.

Entre las técnicas especiales a utilizar en los ensayos de Campo, disponibles en la actualidad en el Laboratorio de Geotecnia, cabe destacar la medida incremental de deformaciones en sondeos y el empleo del análisis de ondas superficiales en la caracterización de este tipo de material, de tan difícil muestreo y testificación (en esta técnica, precisamente el Laboratorio de Geotecnia se encuentra a la cabeza, a nivel internacional, de las investigaciones y su aplicabilidad a obras reales).

En definitiva, el conocimiento del comportamiento de los residuos debe llevar a evaluar la aplicación de las diversas técnicas y métodos de la Geotecnia para el estudio de estos materiales y, en cada caso, adecuarlas según las necesidades de cada momento o sustituirlas por otras más específicas.

### **I.3. METODOLOGÍA**

Basándose en los objetivos propuestos anteriormente, los estudios y análisis desarrollados en este trabajo se encuentran distribuidos en nueve capítulos que son descritos a continuación:

En el capítulo II se hace un estudio y recopilación de la información bibliográfica disponible sobre el tema en cuestión. En el primer apartado se discute sobre la problemática de la generación vertiginosa de los residuos sólidos en la sociedad actual, origen, tipos y composición, las formas más tradicionales de eliminación y el impacto ambiental causado por los mismos. El segundo y tercero apartados se abordan, respectivamente, algunos aspectos referentes a generación de lixiviados y gases en el interior de los vertederos sanitarios. El apartado II.4 se refiere al estudio de las propiedades físicas de los residuos, se discute sobre las dificultades de obtención de los referidos

parámetros y se presentan datos de estas propiedades recogidos de la literatura técnica. El tema central de este trabajo, la compresibilidad de los residuos sólidos urbanos, es abordado en el apartado II.5, que discute sobre los mecanismos físicos y biológicos de compresión desarrollados en la masa de residuos y se presentan algunos modelos teóricos de compresibilidad como el modelo de Sowers (1973), Yen & Scalon (1975), Meruelo (1995), entre otros.

El capítulo III es dedicado a la descripción de las características de los RSU de la Comunidad Autónoma de Madrid, como situación actual de la gestión de los RSU, estructura territorial actual, actividades económicas y generación de los residuos. También se presentan las características del vertedero y del emplazamiento elegido.

En el capítulo IV se describe con detalles los equipos utilizados para el reconocimiento del área en estudio, como ensayos de densidad y humedad, sondeos con ensayos de SPT, métodos geofísicos como análisis espectral de ondas superficiales, métodos eléctricos y electromagnéticos.

En el capítulo V se describe la construcción del terraplén experimental, los equipos utilizados para la campaña de auscultación, como líneas continuas de asientos, puntos de referencia, micrómetro deslizante y inclinómetro. Además se describen las líneas de termistancia instaladas con el objeto de medir temperatura en profundidad.

En los capítulos VI Y VII se presentan los resultados y análisis de los equipos descritos en los capítulos IV y V respectivamente.

El capítulo VIII se hace un análisis de la compresibilidad de los residuos sólidos según los modelos de Sowers (1973), Gandola et al (1994) y el modelo Meruelo.

El capítulo IX es dedicado a las conclusiones sobre los resultados obtenidos, presentado algunas sugerencias con vistas a la continuidad de esta investigación.

Finalmente, el capítulo X presenta las referencias bibliográficas consultadas.

# CAPÍTULO II

## CAPÍTULO II

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA  
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

## **II.1. RESIDUOS SÓLIDOS**

La evolución y la fuerte industrialización ocurrida en este siglo, colaboraron para al crecimiento vertiginoso de residuos, que determinaron un proceso continuo de deterioración ambiental, con serias implicaciones para la salud del hombre.

Es evidente que la producción en masa ha traído mas confort a las sociedades y ha proporcionado oportunidades de consumo para ciertos sectores sociales que antes no tenían acceso a determinados productos. Sin embargo, ha contribuido a una cultura consumista devastadora, desperdicio de energía y de recursos naturales.

La cultura perversa de adquirir siempre, el nuevo, el más sofisticado, el más moderno de los productos tecnológicos cuya creación no tiene límite, a raíz de asegurar buena calidad de vida, nos hacen reflexionar que en la visión humana corriente, los recursos naturales son infinitos o fácilmente sustituibles. Estas necesidades se crían a partir de un intenso marketing que seduce, manipula y materializa al hombre hasta el punto de no saber lo que es, si no posee, acumula y representa.

Las prospecciones científicas son bastante elocuentes a cuanto a las dificultades que están en camino, si se mantiene el patrón vigente de producción y consumo, especialmente en países de alta industrialización. Entre los desperdicios más notorios se encuentran el no-aprovechamiento de los residuos y la casi absoluta inexistencia de iniciativas de reducción en origen de las industrias.

Otro factor interesante es que en el imaginario social todos los productos son reciclables; las empresas promueven este pensamiento para garantizar mayor credibilidad y eximir de culpa a los consumidores. Es evidente que el reciclaje,

contribuye a atenuar la contaminación y recuperar materiales, sin embargo el reciclaje no puede reducir el flujo de materia, porque no se recicla el cien por cien de los productos.

Organizaciones internacionales son conscientes de qué medidas se deben tomar a fin de reducir el consumo de materias primas y energía, pues la extracción intensiva de materiales como también la emisión de gases tóxicos está excediendo la capacidad de absorción de la biosfera y alterando el equilibrio ecológico del planeta. Varias empresas en el mundo están adoptando programas para reducir el consumo de materia prima y energía, obteniendo ganancias del orden de 20 a 30%.

En el medio científico también hay estudios para reducir los flujos de materia y energía. Los científicos alertan que la manera más eficaz de desmaterializar consiste en optimizar la utilización de productos, prolongar su duración, aumentar su vida útil. Además, esta optimización permite crear empleos estables y cualificados principalmente relacionados con la reparación y el mantenimiento de estos productos.

### **II.1.1 Definición, clasificación, y composición de los RSU**

Hay diversas formas de definir y clasificar los residuos sólidos. En general, se definen los residuos de acuerdo con la conveniencia de cada sector de interés por los mismos.

De acuerdo con Tchobanoglous, et al. (1994), los residuos sólidos comprenden todos los residuos que provienen de actividades animales y humanas, que normalmente son sólidos y que son desechados como inútiles o superfluos.

Cuando se considera el valor agregado a cada material, se puede definir los residuos sólidos, como siendo aquellos que no tienen valor para una persona, en un cierto tiempo y en un determinado local.

Puede decirse, aún, que los residuos son las sobras de las actividades humanas, considerados por los generadores como inútiles, no deseables o desechables. IPT/CEMPRE, 1995.

En la visión geotécnica, Grisolia & Napoleoni (1996), definen los residuos sólidos como un medio multifásico, igualmente que los suelos, constituidos de elementos sólidos, líquidos y gaseosos.

La generación de residuos depende principalmente de factores culturales, nivel y hábito de consumo, renta y patrones de vida de la población, factores climáticos y de las características de sexo y edad de los grupos poblacionales. La economía de un país interfiere directamente en la generación de residuos; cuando en periodos de recesión económica, la cantidad de residuos recogidos disminuye debido al aumento de la reutilización y decrecimiento de la generación. Es interesante notar que en los países del primer mundo, la generación de residuos capaces de reciclaje son mayores que en países más pobres, y el desperdicio es el menor posible. Esto se evidencia, por ejemplo, en lo que se refiere a materia orgánica, cuando se comparan los porcentajes en peso encontrados en los residuos sólidos urbanos de Brasil y Japón, con resultados medios de 50% y 20% respectivamente.

Los orígenes de los residuos sólidos en una comunidad están, en general, relacionados con el uso del suelo y su localización. De acuerdo con Tchobanoglous et al (1994), los residuos, entre otros, pueden ser originados de las siguientes actividades:

- doméstico
- comercial
- institucional
- construcción y demolición
- servicios municipales
- zonas de plantas de tratamiento
- industrial y agrícola.

Los residuos sólidos urbanos incluyen todos los residuos de la comunidad con la excepción de los residuos de procesos industriales y residuos agrícolas.

Los tipos de residuos sólidos asociados a cada uno de sus orígenes son relatados a seguir llevando en consideración la clasificación propuesta por Tchobanoglous et al., (1994):

Residuos domésticos: consisten en residuos sólidos orgánicos (combustibles) e inorgánicos (incombustibles) generados en las actividades diarias de las casas, pisos y otros tipos de viviendas. Típicamente la fracción orgánica está formada por, residuos de comidas, papeles de todos los tipos, cartón, plásticos, textiles, goma, cuero, madera, residuos de jardín. La fracción inorgánica está formada por vidrio, cerámica, latas, aluminio, metales férricos, suciedad.

Residuos Comerciales: son los residuos producidos en establecimientos destinados al comercio en general, en oficinas, bancos, cines, restaurantes, etc. Los componentes de estos residuos son básicamente los mismos de los residuos domiciliarios.



Residuos institucionales: las fuentes de residuos sólidos incluyen centros gubernamentales, escuelas, cárceles y hospitales. Excluyendo a los residuos de fabricación de las cárceles y los residuos sanitarios de los hospitales.

Construcción y Demolición: los residuos de la construcción, remodelación y arreglos de viviendas individuales, edificios comerciales y otras estructuras, son clasificados como residuos de construcción. Las cantidades generadas son difíciles de estimar. La composición es variable, pero puede incluir suciedad; piedras; hormigón; ladrillos; escayola; maderas; gravas, y piezas de fontanería, calefacción y electricidad. Los residuos de los edificios demolidos, calles levantadas, aceras, puentes y otras estructuras, son clasificados como residuos de demolición. La composición de los residuos de demolición es similar a la de los residuos de la construcción, pero puede incluir vidrios rotos, plásticos y acero de armaduras.

Servicios municipales: otros residuos de la comunidad, que se derivan de la operación y del mantenimiento de las instalaciones municipales y de la provisión de otros servicios municipales, incluyen barraduras de la calle, basuras en la calle, residuos de los cubos de basuras municipales, recortes del servicio de jardín, residuos de sumideros, animales muertos y vehículos abandonados. Como no es posible predecir donde se van a encontrar los animales muertos y los automóviles abandonados, estos residuos frecuentemente son identificados como de origen difuso no especificado. Estos residuos se pueden comparar con aquellos de orígenes domésticos, que también son difusos pero específicos, ya que la generación de estos residuos es un acontecimiento repetitivo.

Zona de plantas de tratamiento: los residuos sólidos y semi-sólidos de agua, agua sucias e instalaciones de tratamiento de residuos industriales son llamados *residuos de planta de tratamiento*. Las características específicas de estos materiales varían, según la naturaleza del proceso de tratamiento. De momento su recogida no corre a cargo de la mayoría de las agencias

municipales responsables de la gestión de residuos sólidos. Sin embargo, los fangos de plantas de tratamiento de aguas sucias con frecuencia son evacuados junto con los RSU en los vertederos municipales. En el futuro, la evacuación de los fangos de plantas de tratamiento probablemente llegara a ser un factor importante dentro de cualquier plan de gestión de residuos sólidos.

Residuos industriales: son los residuos resultantes del proceso de producción de las industrias, pueden ser representados por cenizas, lodos, aceites, residuos ácidos y alcalinos, metal ferroso y no ferroso, vidrio, plástico, residuos orgánicos, etc.

Residuos Agrícolas: los residuos y rechazos que se obtienen de diversas actividades agrícolas – tales como plantar y cosechar cultivos en hilera, de campo y de árbol; la producción de leche; la crianza de animales para el matadero, y la operación de ganadería intensiva – colectivamente se llaman residuos agrícolas.

Grisolia & Napoleoni (1996), clasifican los residuos sólidos desde un punto de vista geotécnico como:

- materiales inertes estables (metales, vidrios, escombros), cuyo comportamiento es asumido como el de uno suelo heterogéneo de granulometría gruesa.
- materiales altamente deformables (fragmentos, cartón, plástico y textiles) que presentan grandes deformaciones y comportamiento anisotrópico.

- materiales fácilmente degradables ( materiales orgánicos, vegetales, sobras de comida) que pasan por transformaciones físico-químicas, causando reducción de volumen y generando gases y líquidos.

De acuerdo con Knochenmus et. al., (1998), la clasificación de los RSU, es en general hecha con base en la evaluación de parámetros como, contenido en humedad, contenido orgánico, distribución de los tamaños de las partículas e identificación de las diferentes categorías de residuos contenidas en una muestra.

Finalmente, no hay que olvidar que la composición de los RSU controla los procesos de degradación bioquímicos que gobiernan la producción de gases y lixiviados. Además, la composición, así como las propiedades físicas y mecánicas, varían con el tiempo como consecuencia de estos procesos.

### **II.1.2 Destino final de los residuos sólidos**

Existen varios procesos para eliminar o disponer los residuos sólidos, compostaje, reciclaje, incineración y disposición en vertederos sanitarios. No obstante, todos estos procesos no eliminan los impactos ambientales causados por la generación exponencial de los residuos.

Como forma de aclarar ciertos conceptos de tratamiento de residuos, se pasa revista a los procesos anteriormente citados:

El **reciclaje** como solución para la disminución de residuos presenta muchos aspectos que deben ser mejor esclarecidos, principalmente con relación a su concepto y sus beneficios reales. El reciclaje es un proceso de recuperación de materiales desechables, cambiando sus características físicas. El reciclaje puede ser directo, o *pre-consumo*, cuando son reprocesados materiales en la propia línea de producción o de forma indirecta, *post-consumo*, cuando son

reprocesados materiales que fueron desechados como basuras por sus usuarios. En ambos casos los materiales retornan a su estado original como materia prima para un ciclo productivo adicional, Revista Polis, 1998.

Las actividades de separar, recoger y reciclar están muy asociadas, pero no son necesariamente dependientes. El reciclaje de materiales puede ocurrir sin la separación previa de los residuos en las fuentes generadoras, exactamente como es recogido por el servicio de limpieza. En estos casos, sin embargo, la calidad y los productos de los procesos son muy inferiores.

Con relación a sus beneficios reales se puede decir que no todos los residuos mundialmente producidos son reciclables y que así, no habría parque industrial reciclador para absorberlos. Aunque el reciclaje contamine menos el ambiente y use menos de materia prima virgen, agua y energía, como proceso final para el tratamiento de residuos, no cuestiona el actual patrón de producción.

El **compostaje**, es una forma muy antigua de tratamiento de residuos, ya empleada por las primeras sociedades agrícolas. El compostaje es un método de descomposición de la materia orgánica putrecible existente en los residuos sólidos, en condiciones adecuadas, para obtener un compuesto orgánico (humus). El material resultante de este proceso, humus, puede ser utilizado como fertilizantes para uso agrícola, doméstico y municipal.

Este proceso posibilita una enorme reducción en la cantidad de material a ser evacuado en los vertederos sanitarios. A pesar de ser considerado un método de tratamiento, el compostaje también puede ser entendido como un proceso de reciclaje del material orgánico presente en los residuos sólidos, Pereira Neto & Lelis, 1999.

La **incineración** se define como el proceso de reducción de peso y volumen de las basuras a través de combustión controlada. Los remanentes de la

incineración de los residuos son en general, gases como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>), gas inerte proveniente del aire utilizado como fuente de oxígeno y de la propia basura, oxígeno (O<sub>2</sub>) proveniente del aire en exceso que no consigue ser completamente quemado, agua (H<sub>2</sub>O), cenizas y escorias que se componen de metales ferrosos y inertes como vítreos y piedras, Lima, 1995.

El horno incinerador cuando no es construido y operado de forma adecuada es un gran peligro a la salud pública, pues los residuos que contienen organoclorado, a altas temperaturas, pueden expeler dioxinas sino se completa la combustión.

Los procesos de compostaje e incineración son procesos caros, poco eficientes y que requieren mano de obra especializada. Además, en los procesos de reciclaje, compostaje e incineración siempre sobrarán residuos para ser vertidos en el suelo, de forma que siempre será necesario disponer de áreas apropiadas para la construcción de vertederos sanitarios.

**Vertederos** son las instalaciones físicas utilizadas para la evacuación, en los suelos de la superficie de la tierra, de los rechazos procedentes de los residuos sólidos. En el pasado, el término “*vertedero sanitario controlado*” se utilizaba para denominar un vertedero en el que se cubrían los residuos colocados en el vertedero al finalizar cada día de operación. Actualmente, *vertedero sanitario controlado* se refiere a una instalación ingenieril para la evacuación de RSU, diseñada y explotada para minimizar los impactos ambientales y sobre la salud pública, Tchobanoglous, 1994.

Además de ser la forma técnica más empleada en el mundo para almacenamiento de residuos sólidos, los vertederos sanitarios son el elemento final obligatorio en un sistema de gestión integrada de residuos sólidos. Incluso con la implantación de la reducción de residuos, reciclaje, y de las tecnologías

de transformación los rechazos provenientes de los residuos sólidos siguen siendo colocados en vertederos sanitarios.

### **II.1.3 Impacto Ambiental causado por los residuos sólidos**

Los residuos sólidos representan un serio peligro a la salud pública; su composición heterogénea puede contener agentes biológicos patogénicos o residuos químicos que pueden llegar al hombre directo o indirectamente, afectando a su salud.

De acuerdo con la *agenda 21* apud Revista Polis (1998), 5,2 millones de personas – incluyendo 4 millones de niños mueren a cada año, de enfermedades relacionadas con las basuras.

Además de los problemas relacionados con la salud pública, según Sisino (1999), los residuos sólidos son responsables de:

- Contaminación del suelo a través de los residuos y lixiviados;
- Contaminación de aguas superficiales y subterráneas, a partir del suelo, o como consecuencia del lanzamiento directo de los residuos o de los lixiviados en los cursos de agua;
- Contaminación del aire, resultante de la quema no controlada de residuos, de la operación en el área de vertido y la producción de biogás;
- Contaminación visual, resultante del aspecto antiestético de los residuos cuando no están almacenados adecuadamente.

Con relación a estos problemas, la cuestión de la recogida, tratamiento y destino final de los residuos son aspectos importantes relacionados con la salud pública y el medio ambiente y que merecen la debida atención no

solamente de las autoridades competentes sino también de la comunidad científica y de la población en general.

## **II.2 LIXIVIADOS**

### **II.2.1 Introducción**

El lixiviado es el líquido con gran potencial contaminante que se filtra a través de los residuos sólidos en descomposición arrastrando consigo materiales disueltos y en suspensión.

Los lixiviados son originados por varias fuentes: de la humedad natural de los residuos que pueden retener líquidos a través de absorción y atracción capilar; de fuentes externas como agua de lluvias, superficiales y de manantiales subterráneos; del agua de constitución de la materia orgánica que percola durante los períodos de descomposición y de las bacterias existentes en la basura que expelen enzimas que disuelven la materia orgánica con formación de líquido. Parte de este líquido es absorbido por los microorganismos presentes en la basura y parte se transforma en lixiviados.

Cuando los residuos son depositados en un relleno su humedad está entre 29 y 40 %, (Owess y Khera, 1993). Aguas provenientes de lluvias y de aguas superficiales al infiltrarse a través de los residuos, elevan gradualmente la humedad hasta un valor máximo correspondiente a la capacidad de campo. A partir de este punto, cualquier agua adicional que penetre en las capas de residuos no será retenida por estos y la producción de lixiviados aumentará significativamente de forma proporcional a agua adicionada.

La composición, cantidad y producción de los lixiviados depende de una serie de factores como, condiciones climáticas, temperatura, humedad, pH, composición y densidad de los residuos, formas de deposición y edad de los emplazamientos. Por ejemplo, los constituyentes y características de los

vertederos afectan la calidad de los lixiviados, un pH ácido aumenta la solubilidad de los constituyentes químicos, decrece la capacidad de absorción de los residuos y aumenta los iones de cambio entre lixiviado y materia orgánica. La Tabla II.1 señala la composición de los lixiviados y su variación según la edad de los vertederos.

Los lixiviados presentan alto contenido de sustancias sólidas y alto contenido de materia orgánica. Estos líquidos, cuando percolan a través del sustrato inferior del vertedero, sin antes haber pasado por un proceso de dilución, contaminan el agua subterránea. Por este motivo el control del nivel de lixiviados dentro de un relleno es de fundamental importancia. Lixiviados generados de residuos peligrosos pueden contener elevadas cantidades de metales pesados (mercurio, plomo), sustancias tóxicas (arsénico) y compuestos orgánicos.

En condiciones normales el lixiviado se encuentra en las capas inferiores de los vertederos. Desde allí su movimiento en vertederos sin aislamiento es hacia abajo de la capa inferior, aunque también puede producirse algún movimiento lateral según las características del material circundante.

Según Mitchel et. al., (1995), los líquidos lixiviados proveniente de vertederos modernos son más concentrados que de vertederos antiguos debido a que en estos no existen barreras de arcillas impermeables para prevenir la percolación de los lixiviados en los acuíferos, los residuos son pobremente compactados y además el suelo de cobertura tiene apenas la función de reducir los vectores y no la función de reducir la infiltración de aguas superficiales.

#### **TABLA II.1**



## Datos típicos sobre la composición de los lixiviados

CONSTITUYENTE	VALORES, MG/L <sup>A</sup>		
	Vertederos jóvenes (< 2 años)		Vertederos antiguos (> 10 años)
	Rango	Típico	Rango
DBO <sub>5</sub> (demanda de oxígeno bioquímico)	2.000-30.000	10.000	100 – 200
COT (carbono orgánico total)	1.500-20.000	6.000	80 – 160
DOC (demanda de oxígeno químico)	3.000-60.000	18.000	100 – 500
Total de sól. en suspensión	200 - 2.000	500	100 – 400
Nitrógeno orgánico	10 - 800	200	80 – 120
Nitrógeno amoniacal	10 – 800	200	20 – 40
Nitrato	5 – 40	25	5 – 10
Total de fósforo	5 – 100	30	5 – 10
Ortofosfato	4 – 80	20	4 – 8
Alcalinidad como CaCO <sub>3</sub>	1.000 - 10.000	3.000	200 - 1.000
pH	4,5 - 7,5	6	6,6 - 7,5
Dureza total como CaCO <sub>3</sub>	300 - 10.000	3.500	200 – 500
Calcio	200 - 3.000	1.000	100 – 400
Magnesio	50 - 1.500	250	50 – 200
Potasio	200 - 1.000	300	50 – 400
Sodio	200 - 2.500	500	100 – 200
Cloro	200 - 3.000	500	100 – 400
Sulfatos	50 - 1.000	300	20 – 50
Total hierro	50 - 1.200	60	20 – 200

Fuente: Tchobannoglous, G. et. al., (1994)

## II.2.2 Formas de control de la cantidad de lixiviados

La descarga de los lixiviados en el medio se considera actualmente, inviable, ya que además de contaminar el nivel freático, como se ha comentado anteriormente, la acumulación de lixiviados es un factor negativo desde el punto de vista de la estabilidad geotécnica de los vertederos, que son más grandes que antiguamente, y también porque las legislaciones son cada vez más restrictivas debido a experiencias anteriores de contaminación.

Por todas estas razones la estrategia de control de los lixiviados engloba el “input” (la entrada de basuras y agua) en el reactor (vertedero) y el “output” (salida o producto, gas y lixiviados). Christensen et al (1992b) detalla varias formas de controlar la producción de lixiviados en un vertedero:

### a) Control de la entrada de residuos (“input”)

El primero paso en la estrategia de control de la entrada de residuos sería reducir la cantidad de residuos que llega al vertedero. Esto podría ser conseguido a través de la selección de las basuras antes de la recogida, centros de reciclaje, incineración y compostaje. La separación de materiales como baterías, medicinas, lámparas de mercurio, pesticidas, etc., reduciría la concentración en los lixiviados de metales pesados, hidrocarburos halogenados y otros compuestos tóxicos.

Otro paso es reducir la cantidad de residuos que puedan ser transformados en lixiviados. Esto puede ser hecho a través de la incineración. El pretratamiento puede ser también un arma para reducir la biodegradabilidad de los vertidos, esto reduciría o eliminaría la necesidad de agua para los procesos de bioestabilización.

**b) Control de la entrada de agua (“input”)**

La estrategia para controlar la cantidad de agua está relacionada con la tipo los vertidos. En el caso de residuos no biodegradables, de acuerdo con su potencial de contaminación del medio, la prevención de la entrada de agua puede ser adaptada como opción principal. En el caso de residuos biodegradables, la entrada de agua debe permanecer hasta un nivel que asegure la bioestabilización. Así la cantidad de agua debe ser limitada a la cantidad estrictamente necesaria para asegurar la bioestabilización. Este control puede ser hecho de la siguiente manera:

- situar el vertedero en áreas de baja precipitación;
- usar sistemas de sellado;
- vegetación de superficie con especies que optimicen la evapotranspiración;
- compactación de los residuos.

**c) Control del vertedero (reactor)**

La principal opción para controlar los lixiviados a través del control del reactor es acelerar los procesos bioquímicos (cuando los vertidos son biodegradables). Otra opción importante es convertir y transportar el carbono de la fase sólida hacia la fase gaseosa antes de entrar en la fase líquida, pues este proceso acelera la producción de metano.

**d) Control de la descarga de lixiviados en el medio (“output”)**

Este es el método tradicionalmente controlado y actualmente las normas son más restrictivas. Las herramientas que se adoptan:

Sellado: el sistema de sellado está basado en el efecto de barreras múltiples (sistema de sellado doble o triple). La calidad del material y métodos de construcción deben ser optimizadas para asegurar durabilidad y seguridad.

Drenaje y sistemas de colectores: un drenaje racional y un sistema de conducción es importante para evitar acumulación de lixiviados dentro del vertedero. En general, desafortunadamente el nivel del sistema de drenaje parece ser muy pobre y representa un fallo en los proyectos corrientes de vertedero. Los principales problemas son elección del material, obstrucción, mantenimiento y durabilidad. Ningún sistema de drenaje parece ser suficientemente seguro o duradero.

Tratamiento: los lixiviados son siempre considerados como un problema de residuos/agua desde el punto de vista del tratamiento porque estos líquidos son altamente contaminantes y su calidad y cantidad se modifican con el paso del tiempo en un mismo vertedero. Actualmente con el aumento de las restricciones para la descarga de los residuos/agua, se imponen tratamientos costosos. En general, es necesario una combinación de diferentes métodos.

Monitorización ambiental: este aspecto es de extrema importancia para la evaluación de la eficiencia operacional y para la observación de los efectos ambientales a largo plazo.

## **II.3 GASES**

### **II.3.1 Introducción**

El gas de vertedero está compuesto de varios gases que están presentes en grandes cantidades (gases principales) y de varios gases que están presentes en pequeñas cantidades (oligogases). Los gases principales proceden de la descomposición de la fracción orgánica de los RSU. Algunos de los

oligogases, aunque presentes en pequeñas cantidades, pueden ser tóxicos y podrían presentar riesgos para la salud pública, Tchobogolous, 1994.

Los gases que se encuentran en los vertederos incluyen el metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y oxígeno ( $\text{O}_2$ ). En la Tabla II.2 se presentan las distribuciones porcentuales típicas de los gases que se encuentran en un vertedero de RSU.

**TABLA II. 2**

Constituyentes típicos encontrados en el gas de vertedero de RSU

COMPONENTE	PORCENTAJE (BASE VOLUMEN SECO) <sup>B</sup>
Metano	45 -60
Dióxido de carbono	40 - 60
Nitrógeno	2 - 5
Oxígeno	0,1 - 1,0
Sulfuros, disulfuros, mercaptanos, etc.	0 -1,0
Amoníaco	0,1 - 1,0
Hidrógeno	0 - 0,2
Monóxido de carbono	0 - 0,2
Constituyente en cantidades traza	0,01 - 0,6

Fuente: Tchobanoglous et al (1994).

El metano y el dióxido de carbono son los principales gases procedentes de la descomposición anaeróbica de los componentes biodegradables de los residuos orgánicos y en raros casos de reacciones químicas dentro del relleno.

Debido a la naturaleza porosa de los rellenos, el gas acumulado escapa lentamente a través del sellado. Existe usualmente gran número de "pockets" y aperturas alrededor de la masa de vertidos con lo cual el gas acumulado representa un serio peligro de explosión. El gas impide el crecimiento de la vegetación encima de la capa de sellado y, además es un peligro para la salud

pública. En un diseño de vertedero la eliminación del gas es de fundamental importancia.

Cuando el metano está presente en el aire en concentraciones de entre 5 y 15 por 100, es explosivo. Como en el vertedero solo están presentes cantidades limitadas de oxígeno, cuando las concentraciones de metano llegan a ese nivel crítico hay poco peligro de que el vertedero explote. Sin embargo, pueden formarse mezclas de metano que están dentro del rango explosivo si el gas del vertedero migra fuera del lugar y se mezcla con el aire.

### II.3.2. La formación microbiana del metano

Los procesos de formación de los gases serán discutidos, más detalladamente, en el apartado sobre compresibilidad, ya que la transformación de los residuos sólidos en gases y lixiviados se refleja por la pérdida de masa del conjunto del vertedero. Sin embargo, en este apartado, son discutidos de forma resumida, los tipos de bacterias y como ellas son transformadas por medio de procesos microbianos. De acuerdo con Barlaz & Ham (1993), los residuos sólidos presentan la siguiente composición química, Tabla II.3.

**TABLA II.3**  
Composición química típica de los residuos sólidos

Constituyente Químico	% de peso seco	Potencial de metano
Celulosa	51,2	73,4
Hemicelulosa	11,9	17,1
Proteína	4,2	8,3
Lignina	15,2	0
Allmidón	0,5	0,7
Pectina	<3,0	-
Azúcares solubles	0,35	0,5
Total de sólidos volátiles	78,6	

Fuente: Barlaz & Ham (1993)

Los principales constituyentes son la celulosa y la hemicelulosa. Estos dos constituyentes forman el 91 % del potencial de metano. El resto, consiste en proteína, 8,3% y azúcares solubles, 0,5 %. La lignina y otros componentes de los residuos no se descomponen de forma significativa bajo condiciones anaeróbicas.

La transformación de la materia orgánica en gases es realizada a través de procesos anaeróbicos. Los microorganismos anaeróbicos tienen gran influencia en el proceso de metanización de vertederos. El proceso de descomposición requiere la actividad coordinada de varios grupos de bacterias: hidrolíticas, fermentativas, acetogénicas y metanogénicas. La fase de descomposición anaeróbica tiene un período de duración bastante prolongado y es responsable de la generación de asientos a largo plazo

De acuerdo con Christensen et al, (1992a), la degradación anaeróbica ocurre en varias etapas. En la primera etapa, compuestos orgánicos complejos, sólidos y disueltos son hidrolizados y fermentados por las bacterias fermentativas para formar ácidos grasos, alcohol, hidrógeno y dióxido de carbono. En la segunda etapa, el grupo acetogénico convierte los productos de la primera etapa en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. En la etapa final, el metano es producido por las bacterias metanogénicas. La metanización puede ser realizada por las bacterias acetofílicas que convierten ácido acético en metano y dióxido de carbono o por las bacterias hidrogenofílicas que convierten hidrógeno y dióxido de carbono en metano.

El proceso de hidrólisis es muy importante en el medio, pues la materia orgánica sólida puede ser solubilizada antes de que los microorganismos puedan transformarla. La hidrólisis es causada por la enzima extra celular producida por la bacteria fermentativa.

Las bacterias fermentativas son un gran grupo de bacterias heterogénicas anaeróbicas y facultativas. Las bacterias acetogénicas son también un gran grupo de bacterias heterogénicas. La bacteria acetogénica produce ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, si ácidos grasos volátiles que fueron convertidos, contienen átomos de carbono excedentes.

Las bacterias metanogénicas requieren bajo potencial redox. Un grupo, las hidrogenofílicas, convierten hidrógeno y dióxido de carbono en metano mientras otro grupo, acetofílicas, convierten ácido acético en metano y dióxido de carbono. La bacteria metanogénica puede convertir también ácido fórmico y metanol. La conversión de ácido acético en metano es el proceso más importante en la formación de metano. Finalmente, la bacteria sulforeductora juega un importante papel. Estas bacterias son obligatoriamente anaeróbicas y pueden convertir hidrógeno, ácido acético y ácidos grasos volátiles durante la reducción del sulfato.

La concentración de metano en un vertedero puede variar entre 40 % y 50 %, el dióxido de carbono entre 30 % a 45 % y el nitrógeno de 10 % a 25 %, Lima, 1995.

### **II.3.3. Factores que afectan a la producción de metano**

Hay varios factores que afectan la formación de metano, como son los factores abióticos y factores relacionados con la forma de construcción de los vertederos. Para un determinado residuo orgánico el proceso de generación de gases es influenciado por el medio, caracterizado por los factores abióticos. Los factores abióticos son la humedad, el pH, la temperatura, oxígeno, hidrógeno, sulfato, nutrientes e inhibidores. Otros factores que no están relacionados con el medio son la composición de los residuos, compactación, sistema de sellado, recirculación de lixiviados, etc. A continuación se discute la



influencia de algunos de los factores considerados más importantes como la humedad, la temperatura y el pH.

### **a) Humedad**

La presencia de agua en los vertederos es promotora de las reacciones químicas y biológicas que se procesan en el medio. En la gran mayoría de los casos los residuos sólidos cuando son dispuestos en los vertederos no están saturados, sin embargo dos factores contribuyen a saturar los residuos, primero el agua proveniente de las lluvias y segundo la presión de las capas superiores sobre las otras. Una vez esta saturación esté alcanzada, la presión del agua libre acelera las reacciones químicas y biológicas.

La velocidad del asiento secundario, en general, depende de la cantidad de agua disponible en los rellenos, pues el agua facilita la actividad microbiana y consecuentemente la descomposición de los residuos.

De acuerdo con Pereira Neto & Lelis (1999), la descomposición biológica de la materia orgánica es totalmente dependiente de la presencia de humedad en tal cantidad que permita una actividad microbiológica satisfactoria. La humedad constituye el único medio de transporte satisfactorio usado para solubilizar el sustrato, así como también para eliminar el material residual digerido. Por lo tanto, todo nutriente necesitará ser primero ser disuelto en agua, antes de ser asimilado por los microorganismos.

Los autores enfatizan que la propia constitución celular de los microorganismos contienen cerca de 90% de agua y esto demuestra la importancia de la humedad en los procesos biológicos, cuya eficiencia depende de la reproducción celular y, esta, del agua y nutrientes en la masa de residuos orgánicos a ser degradada.

Investigaciones de laboratorio muestran que la producción de metano aumenta considerablemente con el aumento de la humedad. Christensen et al (1992a) cita un trabajo realizado por Rees (1980) donde el autor recoge datos de la influencia de la humedad en la producción de metano. Rees ha concluido que ocurre un aumento exponencial en la velocidad de producción de metano en residuos que presentan humedad variando entre 25% y 60%.

### **b) Temperatura**

La temperatura es altamente importante en los procesos de formación de metano. Formaciones de metano simuladas en laboratorio muestran que la velocidad de formación de metano aumenta del orden de 100 veces cuando la temperatura alcanza valores de 20°C a 40°C. Christensen et al, (1992a) Cuanto mas elevada la temperatura, mayor será la actividad bacteriana y consecuentemente mayor será la producción de metano, Lima,1995.

### **c) pH**

Hay controversias sobre el rango de valores del pH; por ejemplo, Christensen et al. (1992a), observan un rango de variación entre 6 y 8; Barlaz & Ham, (1993), señalan que la fase metanogénica es más activa cuando el pH esta variando entre 6,8 y 7,4; Lima (1995), cita un rango de variación entre 6,8 y 7,2. Lo que esta claro es que el pH influye en la producción de metano ya que la actividad de las bacterias metanogénicas está condicionado por este factor.

De acuerdo con Christensen et al. (1992a), para una buena producción de metano es fundamental una relación compensada entre los grupos de bacterias ya que el ecosistema metanogénico es bastante susceptible en un rango de variación de pH muy pequeño.

### **d) Otros factores**

Otros factores que regulan la producción de metano son las normas de los proyectos y la filosofía. Históricamente, los residuos sólidos eran vertidos y únicamente cubiertos con tierra, lo que ha llevado a la contaminación de aguas subterráneas y superficiales. Como consecuencia, se crearon reglamentaciones nuevas para la construcción de vertederos modernos con la finalidad de minimizar la entrada de agua en los rellenos y así disminuir la producción de lixiviados. Sin embargo, mientras la filosofía de vertederos secos estaba siendo adoptada, la recuperación de metano como fuente de energía estaba apenas desarrollada.

Recientemente, con la idea de recuperar energía de metano, reglamentaciones nuevas adaptan la recirculación de lixiviados neutralizados para incrementar la producción del mismo.

La producción y recuperación de metano como fuente de energía ofrece otras ventajas como:

- Reducción de la cantidad de CDO de los lixiviados y como consecuencia reducción de coste de su tratamiento y reducción del potencial de contaminación de aguas subterráneas;
- Aumento de la velocidad de descomposición, que resulta en aceleración de los de asientos. Si los asientos se producen más rápidamente, minimizan problemas de fisuras en la cobertera de los vertederos, y además, reducen los costes de mantenimiento;
- El incremento de la producción de metano hace con que el proyecto de recuperación de energía sea más económico;
- Reduce la emisión de metano a la atmósfera. El gas metano tiene un efecto 20 veces más peligroso que el dióxido de carbono;

- El Incremento de la descomposición reduce el impacto de emisión de gases y lixiviados en el futuro, reduce la necesidad de monitorización y consecuentemente sus costes.

De los muchos tipos de residuos dentro de un vertedero, la degradación variable de la fracción orgánica y la heterogeneidad de los residuos hacen del relleno un medio altamente diversificado, pero nunca un ecosistema sin eficiencia.

El incremento de la descomposición significa que los productos de la descomposición gaseosos y lixiviados son liberados cuando los sistemas de control están en pleno funcionamiento y cuando los responsables del mantenimiento y reparación están presentes cuando son necesarios.

De acuerdo con Lima (1995), la producción de metano es actualmente vista como beneficiosa en términos de mejora de la calidad de los lixiviados y también en la eficiencia de la utilización del gas del vertedero.

La conversión biológica de las basuras con fines energéticos es un tema que actualmente es bastante discutido, una vez que los residuos urbanos pasaran a ser considerados como una fuente inagotable de energía alternativa. Experiencias de recuperación de energía del gas metano en todo el mundo son detallados en el libro de Lima (1995).

## **II. 4 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**

Actualmente uno de los grandes desafíos en ingeniería geotécnica es entender y cuantificar las propiedades geotécnicas de los vertederos de residuos sólidos urbanos. El conocimiento de estas propiedades es muy importante a la hora de diseñar un sistema de gestión de residuos sólidos, en el análisis de la estabilidad y en el comportamiento a largo plazo de los vertederos. Existe poca

información sobre las propiedades geotécnicas y ocasionalmente los datos encontrados son contradictorios.

En general, la cuantificación de las propiedades geotécnicas es muy difícil debido a una variedad de factores como:

- La gran heterogeneidad de la basura y su variación con respecto a las condiciones climáticas de cada región;
- Dificultad en la obtención de muestras representativas de las condiciones in situ;
- La inexistencia de procedimientos de muestreo y ensayos generalmente aceptados y contrastados por la comunidad científica;
- Las propiedades geotécnicas de los residuos sólidos pueden cambiar con el tiempo como resultado de la descomposición bioquímica;

#### **II.4.1. Humedad**

El contenido en humedad en los vertederos de residuos sólidos urbanos varía según muchos factores que a su vez están relacionados entre sí, como la composición inicial de los residuos, las condiciones climáticas, la forma de construcción del vertedero, la presencia de sistemas de drenaje de lixiviados, la cobertura del vertedero, la cantidad de humedad generada por los procesos biológicos y la cantidad de humedad eliminada por los gases generados en el vertedero.

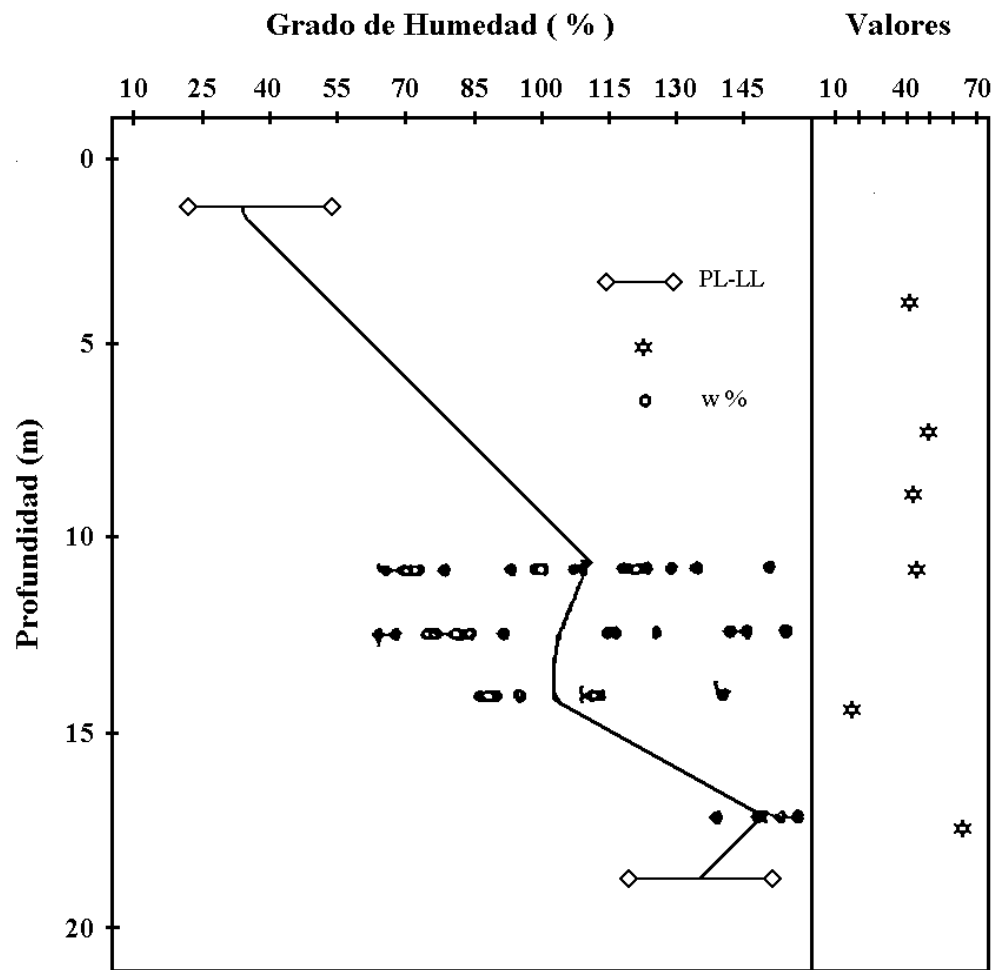
Además, el contenido de humedad dentro de un vertedero puede variar de forma significativa entre zonas compuestas por diferentes constituyentes. En general, en los vertederos, las capas de residuos están separadas por capas de tierra de recubrimiento intermedias que, usualmente, presentan humedad inferior a la de los residuos.

El contenido en humedad puede ser determinado de dos formas, a través del método peso-húmedo y a través del método peso-seco. En el primero, la humedad se expresa como un porcentaje del peso del material húmedo; en el segundo método, la humedad se expresa como un porcentaje del peso-seco. El método más comúnmente utilizado en gestión de residuos sólidos es el método peso-húmedo.

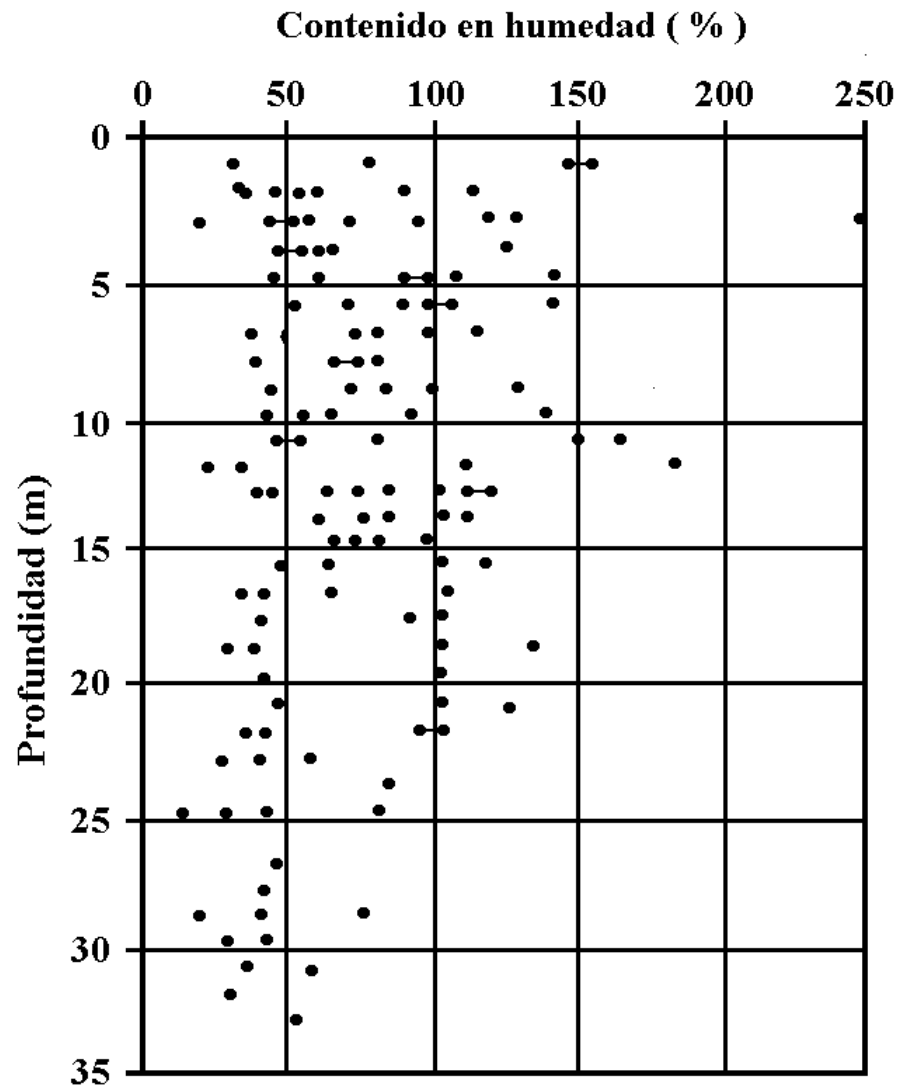
Tchobanoglous et. al. (1994) señalan que en la mayor parte de los vertederos de RSU en Estados Unidos, el contenido de humedad varía entre 15% y 40%, según la composición de los residuos, la estación del año y las condiciones de humedad y meteorológicas, particularmente la lluvia.

Otras medidas realizadas por Gabr & Valero (1995) en un vertedero de Pennsylvania (EE.UU.), indican que la humedad varía entre 30% cerca de la superficie y aumenta hasta 130% a mayor profundidad como muestra la Figura II.1. Coumoulos et al. (1995) encuentran una tendencia contraria que indica que en los primeros 15 m hay valores de humedad por encima del 60% mientras que al aumentar la profundidad los datos son menos dispersos y tienden hacia un valor medio del 40% (Figura II.2).

Mitchel et al. (1996), citan datos de Huitric et al. (1979) que dan valores entre el 10 y el 50%. Además dicen que en zonas en las que la evapotranspiración es mayor que la precipitación, la humedad se encuentra en torno de 25%.



**FIGURA II.1** - Variación de la humedad, LL, LP en profundidad (Grab & Valero, 1995)



**FIGURA II.2** - Contenido de humedad medido en el vertedero de Ano Liossia - Atenas, Grecia (Coumoulos et al., 1995)



Sowers (1973) coincide con los datos anteriores proponiendo valores de humedad entre 10 y 50%. Por su parte, Sánchez-Alciturri et al (1993a) han medido en el vertedero Meruelo (Santander, España) un valor de 48%.

En la Tabla II.4 se presentan una serie de valores de humedad recogidos de la literatura técnica:

**TABLA II.4**

Rango de valores típicos de humedad

AUTOR/AÑO	HUMEDAD (%)	OBSERVACIONES
Rao et al. (1977)	65 – 72	Con materiales vegetales
Harris, M. R (1974)	50 – 70	
López Garrido et al. (1975)	22 29	Invierno Verano
Chen (1977)	30 – 48	
Mabry (1977)	18 – 187	
York et al. (1977)	70 – 400	
Cartier & Baldit (1983)	20 – 35	Constante con la profundidad
Oliden (1987)	49 – 56	

Fuente: adaptada Olalla, C. (1993)

#### II.4.2. Densidad

En general, la densidad de los residuos sólidos es bastante difícil de determinar; hay un gran número de dificultades que impiden el conocimiento de este parámetro con exactitud, por ejemplo, la composición heterogénea del material, la variedad de tamaños de los componentes, la presencia de capas de cobertura de tierra, etc.

Landva & Clark (1990), encuentran más conveniente medir la densidad a través de la prueba de densidad nuclear que hacer uso de ensayos habituales realizados para suelos. La determinación de la densidad en residuos sólidos es el motivo principal para cuestionar el uso de los principios y aparatos utilizados en suelos, pues los residuos presentan características propias que impiden la aplicación directa de los métodos geotécnicos. Como los residuos están compuestos por varios constituyentes, la media de la densidad dependerá, del peso específico, porcentaje, porosidad y grado de saturación de cada componente individual.

Los principales factores que influyen en la densidad de los RSU incluyen: composición de los residuos, volumen del suelo de cobertura y el grado de compactación obtenido durante el vertido de los residuos. El peso específico de residuos maduros depende del grado de descomposición, profundidad y de condiciones ambientales.

La gran mayoría de los autores comentan sobre la influencia de la profundidad en el aumento de la densidad; Fasset et al., 1994; Kavazanjian et al., 1995b y Jessberger, 1996. Los autores, argumentan que la densidad aumenta con la profundidad como resultado de la consolidación y compresión de la masa de residuos bajo cargas ( peso propio, actividades de maquinaria y material de cobertura). Fasset et al (1994) indican que la densidad de una capa de residuos pobremente compactada a 10 m de profundidad se aproxima del valor de la densidad de una capa de residuos más superficial bien compactada.

Los datos existentes en la literatura técnica muestran un rango bastante amplio de variación, Jessberger (1996) señala valores que varían de  $3 \text{ kN/m}^3$  para residuos sin compactar o escasamente compactados hasta valores de  $18 \text{ kN/m}^3$  para residuos fuertemente compactados. Otros valores son detallados a continuación.

- Sowers (1973) propone los siguientes valores:

RSU sin compactar:  $\gamma = 1,2 - 3 \text{ kN/m}^3$  (  $e = 15$  )

RSU compactados:  $\gamma = 6 \text{ kN/m}^3$  (  $e = 2$  )

- Sagaseta (1993) cita los siguientes valores:

RSU sin compactar :  $\gamma = 7 - 14 \text{ kN/m}^3$

RSU compactados:  $\gamma = 5 - 12 \text{ kN/m}^3$

- Mitchel et al (1995) recogen los siguientes valores:

Landa & Clark (1990):  $\gamma = 7 - 14 \text{ kN/m}^3$

Fasset et al (1994): mal compactado  $\gamma = 3 - 9 \text{ kN/m}^3$

Medianamente compactado:  $\gamma = 5 - 8 \text{ kN/m}^3$

Bien compactado:  $\gamma = 9 - 15 \text{ kN/m}^3$

- Kavazanjian et al (1995b) proponen valores entre 8,6 y 10,2  $\text{kN/m}^3$ , aunque dicen que los mas frecuentemente utilizados en la práctica están entre 2,9 y 7,5  $\text{kN/m}^3$ .
- Sánchez Alciturri et al (1993c) publica los siguientes datos procedentes del vertedero controlado de Meruelo (Cantabria): valor inicial  $\gamma = 2 \text{ kN/m}^3$  ; Material compactado:  $\gamma = 8 - 10 \text{ kN/m}^3$ .
- Watts & Charles (1990) estimaron la densidad in situ de residuos compactados en capas de 2 m de altura obteniendo un valor de 5,9  $\text{kN/m}^3$  para los residuos y de 6,3  $\text{kN/m}^3$  incluyendo la cubierta diaria. Sin embargo, si la compactación se realizaba en capas de 0,6m la densidad aumentaba hasta 8  $\text{kN/m}^3$  incluyendo el material de cobertura.

En la Tabla II.5 se presentan una serie de valores de densidad recogidos de la literatura técnica según el grado de compactación:

**TABLA II.5**

## Rangos de valores típicos de densidad

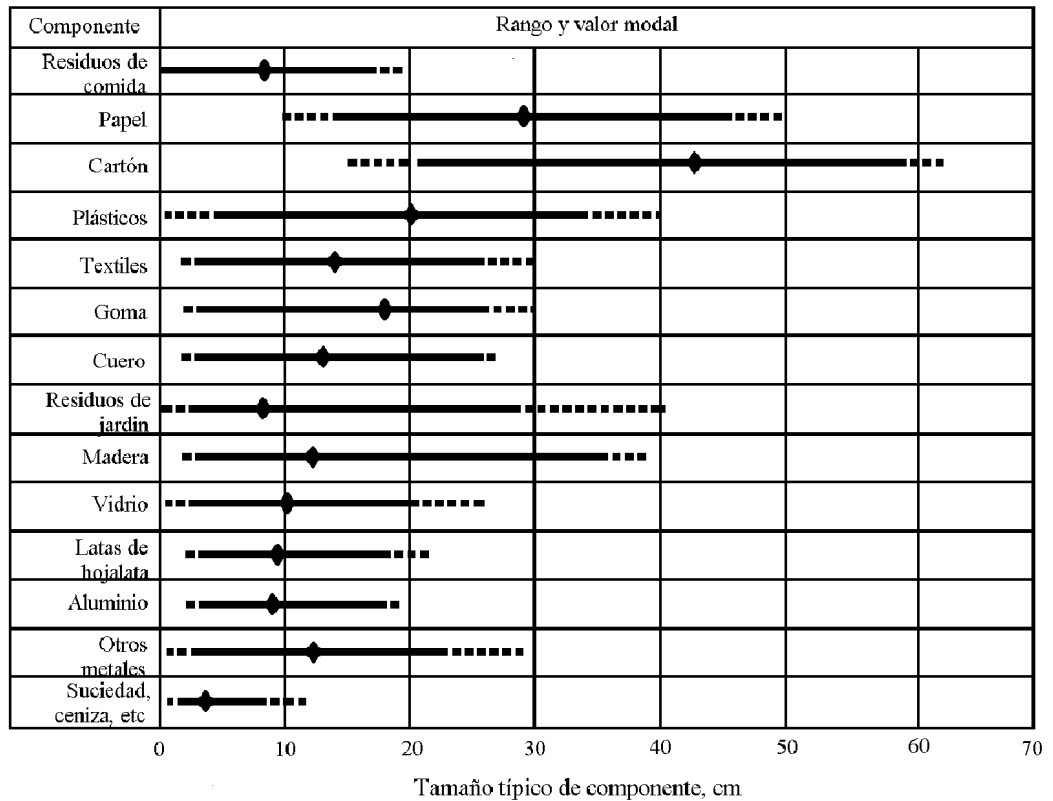
AUTOR/AÑO	DENSIDAD ( KN/M <sup>3</sup> )	OBSERVACIONES
Bruner y Keller (1971)	3,0 -10,0	Según compactación
Rao (1974)	1,5 - 2,0 3,5 - 6	Sin compactación Compactación débil
Yen y Scanlon (1975)	6,5	Compactación débil
López Garrido (1975)	0,9 - 1,25	Sin tratamiento
Bratley et al. (1976)	1,16 7,0 - 13,1	Sin compactar Según equipo de compactación
Moore et al. (1977)	2,5 - 3,5	Sin compactación
Cartier y Baldit (1983)	11,0 - 14,5 10,0	Variable con la profundidad Después de compactar
Oliden (1987)	7,5 -8,5	Precargado
Oweiss y Khera (1990)	5,5 - 7,1 6,3 4,6 - 17,3	Antes de descomposición Origen industrial y domestico Miscelaneo
Oweiss y Khera (1990)	2,8 - 3,1 4,7 - 6,3 8,6 - 9,3	Municipal sin compactar Ídem moderadamente compacto Ídem buena compactación
Arroyo et al. (1990)	10	Basuras compactadas
van Impe (1993 - 1994)	5,0	Residuos de papel fresco
van Impe (1993 - 1994)	8,0	Residuos y bloques de papel triturado
Gabr & Valero (1995)	9,3 8 12	Densidad seca maxima (w=31%) Saturación completa (w =70%) Con volumen de aire nulo (w= 31%)

Fuente: adaptada Santos, S (1997)

### II.4.3. Granulometría

Debido a la dificultad que implica la realización de este ensayo con muestras de RSU, una práctica común es separar los distintos componentes de los residuos y medir la variabilidad de tamaños que presenta. Por ejemplo, en la Figura II.3 se muestra una tabla realizada por Tchobannougous et al. (1994) en la que se recogen los rangos de variación de tamaños de los distintos materiales estudiados.

PROPIEDADES FISICAS, QUIMICAS Y BIOLOGICAS DE LOS RSU



**FIGURA II.3** - Distribución típica de los componentes de un vertedero de RSU, Tchobanoglous, et. al., 1994.

**II.4.4. Permeabilidad**

El conocimiento de esta propiedad física es muy importante a la hora de estimar los movimientos de líquidos y gases a través del vertedero. La permeabilidad varia de acuerdo con el grado de compactación empleado y con la edad de los residuos. Los ensayos comúnmente usados para medir permeabilidad in situ son lisímetros, ensayos de pérdida de agua en pozos, permeámetros de carga variable y sondeo tipo SPT.

Manasero et al. (1997) sugiere como primera aproximación un valor de permeabilidad de  $10^{-5}$  m/s. Knochenmus et al., (1998), observan que el coeficiente de permeabilidad de los RSU varia de  $10^{-4}$  m/s a  $10^{-6}$  m/s

semejante al valor de arenas muy finas o arenas que contienen cierta cantidad de material granular fino. Además, estos autores señalan que la permeabilidad es altamente dependiente de la forma de deposición de los residuos, grado de compactación inicial, presión de sobrecarga y edad de los residuos. Otros valores de permeabilidad son detallados en la Tabla II.6

**TABLA II.6**

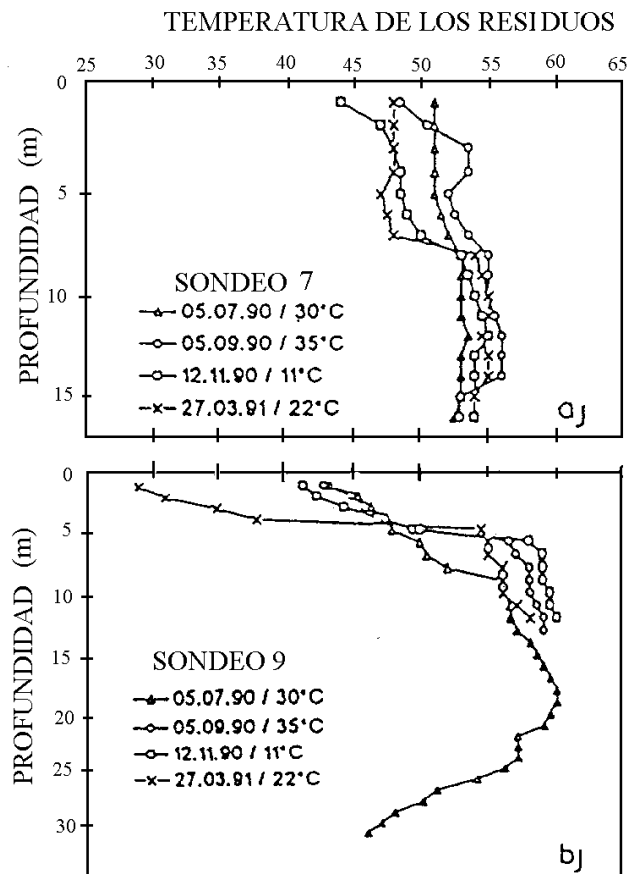
Rangos de valores típicos de coeficiente de permeabilidad

AUTOR/AÑO	TIPO DE MATERIAL	VALORES (M/SEG)	MÉTODO
Fungaroli & Steiner (1979)	muestras trituradas	$10^{-4} - 10^{-6}$	Lisímetro
Fang (1983)	muestras embaladas	$7 \times 10^{-6}$	Laboratorio
	Muestras sueltas	$1,5 \times 10^{-4}$	Laboratorio
	valores intermedios	$3,5 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-5}$	Laboratorio
Koriatis et al. (1983)		$3 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-5}$	Laboratorio
Oweiss & Khera (1986)		$10^{-5} - 2,6 \times 10^{-5}$	Laboratorio
Landa & Clark (1990)		$10^{-5} - 4,0 \times 10^{-4}$	Ensayo de percolación in situ
Massanero (1990)		$1,5 \times 10^{-5} - 7 \times 10^{-4}$	Ensayo en pozo
Brandtl (1990)	compactado con rulo	$2 \times 10^{-5} - 7 \times 10^{-6}$	Ensayo in situ
Cepollina y al. (1994)		$10^{-5}$	
Brandtl (1994)	muy compactado	$2 \times 10^{-6} - 3 \times 10^{-5}$	Laboratorio
Brandtl (1994)	Pre-tratado	De $5 \times 10^{-4}$ a $1 \times 10^{-5}$	Laboratorio
Beaven y Powrie (1995)		$10^{-5} - 10^{-4}$	Laboratorio
Gabr y Valero (1995)	variable con la profundidad	de $10^{-7}$ a $10^{-5}$	Ensayo triaxial
Blengino et.al., (1996)		$3 \times 10^{-7} - 3 \times 10^{-6}$	Ensayo in situ
Juca et. al., (1996)		$10^{-7}$	Ensayo in situ

Fuente: adaptada Santos, S (1997)

#### II.4.5 Temperatura

La temperatura en el interior de los vertederos se mide instalando termómetros electrónicos digitales en el interior de un sondeo. Un registro típico puede ser como el obtenido por Coumoulous et al. (1995) que se muestra en la Figura II.4. Dicho registro indica la temperatura en cuatro momentos, en los que también indica la temperatura exterior en el momento en el que se realizaron las lecturas. Se observa que la temperatura oscila entre 40 y 60°C a poca profundidad y que no se aprecia la influencia de la temperatura exterior. A mayor profundidad la temperatura desciende considerablemente entre 5 y 15°C.



**FIGURA II.4** - Variación de la temperatura en profundidad en el vertedero de Ano Liosa - Atenas, Grecia, Coumoulos et al ,1995.

Juca et al (1999b), han medido valores de temperatura en profundidad en el vertedero de la Muribeca en Recife-Brasil. En la celda 4 la temperatura variaba de 35°C en la capa más superficial, 63°C en la mitad de la profundidad y 50°C en la profundidad de 30 metros. Ya en la celda 2, la temperatura aumentaba con la profundidad alcanzando 55°C en la capa mas profunda (20 m). De acuerdo con los autores, los valores de temperaturas elevados indicaban que los residuos se encontraban en fase de descomposición acelerada. Justificable, según los autores, por el hecho de que las celdas 2 y 4 estarían constituidas de residuos frescos. Es interesante observar que igualmente como los resultados de Coumoulous et al (1995) la temperatura desciende en 13°C en la profundidad de 30m, en la celda 4.

Con el propósito de observar la influencia de la temperatura en la generación de metano, Rees (1980) registró valores de temperatura en profundidad en el vertedero de Aveley, California-EUA. De acuerdo con el autor la temperatura es influenciada principalmente por el grado y tipo de actividad microbiana y temperatura ambiente. Sin embargo, la temperatura ambiente no influye en los valores de temperatura obtenidos en grandes profundidades. El valor máximo de temperatura registrado fue de 43°C.

## **II.5 COMPRESIBILIDAD**

### **II.5.1. Generalidades**

La generalización del empleo de los vertederos sanitarios en el mundo ha provocado la aparición de grandes áreas contaminadas, principalmente en las grandes ciudades. Por ejemplo, en la región metropolitana de Tokio y Osaka es difícil encontrar sitios apropiados para vertederos. En estas áreas los sitios disponibles están cerca del mar, en áreas que deberían ser utilizadas para otras finalidades. Aunque, en Japón, de acuerdo con Kamon (1997), se utiliza una variedad de técnicas como la incineración, deshidratación y disolución, el



30% de los residuos generados en este país son dispuestos en vertederos sanitarios.

La escasez de terrenos para nuevas construcciones, ha preocupado a la comunidad científica al punto de buscar soluciones técnicas viables para aprovechar áreas antes ocupadas por vertederos sanitarios. Desde finales de la década de 40 en que el *Building Research Establishment* (BRE) apud Watts & Charles (1990), expresaba su preocupación sobre la dificultad de encontrar terrenos para nuevas construcciones y que con frecuencia surgía la necesidad de construir en terrenos artificiales o rellenos. No obstante, al mismo tiempo, ellos alertaban sobre el peligro de construir en áreas de rellenos debido a la presencia de materiales degradables y en descomposición.

Construir sobre vertederos sanitarios puede traer gran número de problemas, como asientos diferenciales, ataque químico en las cimentaciones y estructuras, riesgos de explosión o fuego dentro del depósito de residuos, peligros de contaminación de suelos, etc. Según Charles (1984), en el caso de vertederos construidos sobre terrenos naturales, deben ser examinadas la estabilidad del talud y la estabilidad de las capas subyacentes. Además, si las estructuras están sobre pilotes que atraviesan el relleno y el terreno natural, se puede producir rozamiento negativo causado por el asiento del relleno debido a su peso propio. Sin embargo, los mayores problemas geotécnicos estarán asociados al asiento a largo plazo del relleno.

Los asientos diferenciales excesivos pueden producir fracturas en los sistemas de drenaje de los lixiviados, los cuales pueden ocasionar peligro a la construcción o pueden causar saturación de la masa de residuos. Además pueden causar variaciones en la superficie del terreno, áreas de depresión que pueden causar la acumulación permanente de aguas, que resulta en una carga adicional para los residuos y por lo tanto provocar el aumento de los asientos diferenciales.

Dentro de este contexto, la cuestión de la compresión de los rellenos gana fundamental importancia, pues cualquier proyecto de uso futuro de este tipo de terreno necesitará saber cuanto asentarán a largo plazo. Además, el estudio del asiento sirve para poder predecir el incremento de la capacidad de los vertederos en recibir residuos sólidos, a medida que estos van asentando.

## **II.5.2. Mecanismos de Compresión**

Los primeros estudios de asentamiento en rellenos datan de 1940; sin embargo, apenas en 1973 los mecanismos de asentamiento que se desarrollan en este tipo de terreno fueron planteados por Sowers.

De acuerdo con Sowers (1973), los mecanismos son:

- i - Mecánico - que se produce por medio de colapso estructural de las partículas y consolidación similar a los suelos orgánicos;
- ii - Ravelling - es la migración de partículas finas hacia el interior de espacios vacíos entre partículas mayores;
- iii - Cambio físico-químico- por medio de corrosión, oxidación y combustión;
- iv- Descomposición bioquímica - a través de los procesos de fermentación y descomposición, tanto aeróbica como anaeróbica;
- v - Interacción - ocurre por la interacción de los dos últimos procesos citados.

### **II.5.2.1 Procesos Mecánicos**

De los cinco mecanismos planteados por Sowers (1973), el mecanismo de compresión física es el único que puede ser analizado en términos de

tensiones. El asiento físico puede ser dividido en asiento inicial o instantáneo, asiento primario o a corto plazo y asiento secundario o a largo plazo.

El **asiento inicial** ocurre inmediatamente después de la colocación de las cargas. Este tipo de asiento es análogo a la compresión elástica que ocurre en los suelos y es virtualmente instantáneo, Wall & Zeiss (1995).

El **asiento primario** ocurre debido a la disipación de presión intersticial y gas de los espacios vacíos de la masa de residuos, proceso que es, en general, bastante similar a la consolidación de los suelos. Igualmente como la compresión inicial, la compresión primaria es dependiente del incremento tensional y en este proceso ocurre variación de volumen. Este asiento se produce en un tiempo relativamente mayor que el asiento inmediato, del orden de treinta días después de la aplicación de carga, Sowers (1973), Morris & Woods (1990) y Edil et al (1990). Aunque las compresiones primaria y secundaria ocurren simultáneamente, la magnitud de la compresión primaria es mayor y enmascara el efecto de la compresión secundaria en este periodo inicial de tiempo. Después de treinta días, la compresión secundaria progresa y alcanza el mismo orden de magnitud que la compresión primaria.

De acuerdo con Wall & Zeiss (1995), existe indicios significativos de que el mecanismo de compresión primaria en residuos sólidos no puede ser explicado basándose en las hipótesis de Terzaghi (1943) para los suelos de granulometría fina, pues los rellenos están raramente saturados y además la permeabilidad de los residuos es del mismo orden de magnitud de las arenas y gravas, de manera que las presiones intersticiales no se desarrollan en este proceso, puesto que los líquidos pueden escapar rápidamente de la masa de residuos.

El **asiento secundario** o a largo plazo en los RSU es debido a procesos de fluencia (creep) y a la descomposición biológica, Sowers (1973). Los asientos

debidos a la compresión biológica serán tratados posteriormente, dentro de este mismo apartado. Los asentos debidos a procesos de "creep" son consecuencia de la acomodación gradual de las partículas sólidas en el interior de la masa de residuos. La compresión secundaria no depende del proceso de carga, pues en este caso, la variable dependiente es el tiempo. Estos asentos se prolongan por un largo período de tiempo, no obstante la velocidad es menor que en los asentos anteriores.

De acuerdo con Sowers (1968), desde un punto de vista teórico, el asiento global que ocurre en los residuos sólidos nunca cesará, aunque la mayor parte de él ocurre en el primer o segundo año después del retranqueo. Kamon (1997), por su parte, observa que para tornarse estable un vertedero necesita que transcurra un período superior a 20 años.

En cuanto a la importancia relativa de los distintos procesos de generación de asentos, es notorio que hay una concordancia en los rangos propuestos por los diversos autores, como por ejemplo, Coduto & Huitric (1990), sugieren que la compresión debida a procesos mecánicos es responsable de asentos del orden de 25% o más del espesor de un relleno. Sowers (1968), sugiere que los asentos debidos a acción del peso propio alcanzan entre el 10 y 30% del espesor original. Edil et al. (1990) sugieren un asiento de 5% a 30% y que la mayor parte de los asentos ocurren en el primero o segundo año después del retranqueo. Green & Jamnejad (1997), basándose en experimentos de laboratorio observan que cuando se someten residuos domésticos a cargas estáticas, más del 70% del asiento ocurre inmediatamente, mientras el 30% del asiento ocurre en un largo periodo de tiempo.

Obviamente, la magnitud de los asentos en rellenos debidos a su peso propio dependerá de la composición de los residuos y de la densidad de compactación empleados en la época de la deposición de los residuos en el vertedero. Una alta densidad significará que ocurrirá un menor asiento y consecuentemente un menor asiento global. El conocimiento de estos factores, densidad y composición de los residuos, es de fundamental importancia para

la previsión de los asentamientos futuros. El asentamiento físico a largo plazo determina la resistencia y las propiedades geotécnicas de los residuos.

El asentamiento causado por “**Ravelling**” es consecuencia del desplazamiento de partículas finas hacia el interior de espacios vacíos preexistentes. Este mecanismo se produce durante la compresión mecánica y la compresión por degradación de la materia orgánica. El mecanismo de “Ravelling” puede ser causado por percolación a través del relleno, por vibraciones o por cambios inducidos por la descomposición química y biológica.

Los asentamientos por “ravelling” ocurren esporádicamente, dependiendo de la ocurrencia de fenómenos como, intensas lluvias, fluctuaciones repentinas del nivel de agua o grandes choques provocados por explosiones o terremotos.

#### **II.5.2.2. Procesos bioquímicos**

La causa más importante de reducción de volumen en residuos sólidos urbanos es debido a descomposición de materia orgánica. Según Watts & Charles (1990), los asentamientos a largo plazo resultantes de biodegradación representan la mayor proporción del asentamiento total ocurrido en un relleno. Obviamente, este tipo de asentamiento merece mayor atención desde el punto de vista ingenieril que los asentamientos inmediatos y de consolidación primaria.

El asentamiento a largo plazo debido a procesos químicos y biológicos depende principalmente de factores ambientales, como temperatura, aire, humedad, pH, presencia de bacterias aeróbicas y anaeróbicas, etc. Estos asentamientos son menos previsibles que los asentamientos debidos a compresión mecánica por causa de la presencia de organismos vivos en los procesos que están involucrados, descomposición y degradación.

El proceso de **descomposición** es la transformación de materia orgánica en gases y lixiviados por la acción de bacterias y microorganismos. La **degradación** es la transformación de los complejos orgánicos existentes en otras sustancias más simples a través de reacciones químicas. Hay pocos estudios sobre la degradación química, tal vez porque la descomposición sea un proceso dominante en la formación de gases y lixiviados.

Para facilitar la comprensión de los procesos de descomposición química y biológica es necesario conocer de qué se componen los residuos sólidos urbanos, cuales son las sustancias que se descomponen y como esta masa es transformada en asientos.

Los residuos sólidos están compuestos de residuos orgánicos e inorgánicos. Los residuos orgánicos están formados por papel, cartón, textil, plástico, madera, goma, cuero (materia no putrefacta) y restos de comida (materia putrefacta). Los residuos inorgánicos están formados por metales. En general, hay una fracción significativa biodegradable en los residuos sólidos. Los productos que se descomponen son los residuos orgánicos, los inorgánicos permanecen inertes sin embargo, sufren oxidación y corrosión.

En presencia de humedad y temperatura apropiada los residuos orgánicos se descomponen para formar gases y lixiviados. Esta transformación se refleja por la pérdida de masa del conjunto del vertedero y está directamente relacionada con la magnitud y velocidad de asiento.

La descomposición bioquímica puede ocurrir en presencia de oxígeno (bacterias aeróbicas), sin oxígeno (bacterias anaeróbicas) y con muy poco oxígeno (bacterias facultativas). Las bacterias aeróbicas necesitan de oxígeno para atacar la materia orgánica si están presentes humedad y nutrientes apropiados. Las bacterias anaeróbicas permanecen inactivas en presencia de oxígeno y las bacterias facultativas son adaptables a la presencia de oxígeno.

La descomposición de residuos en metano es un proceso microbiano que requiere la actividad coordinada de varios grupos de bacterias, hidrolíticas, fermentativas, acetogénicas y metanogénicas. Estas bacterias son necesarias para la producción de metano de polímeros biológicos (celulosa, hemicelulosa y proteína).

De acuerdo con Barlaz & Ham (1993) cuando los residuos son dispuestos en un vertedero, un período de meses o años es necesario para que empiece la descomposición biológica. La observación de estos autores se basa en la composición de residuos sólidos de su país, Estados Unidos, cuyo mayor porcentaje de residuos está constituido de papel y plástico (40%). Igualmente como Estados Unidos, países desarrollados presentan mayor porcentaje de papel y plásticos en la composición de los RSU. Sin embargo, en países menos desarrollados, en general, el contenido de materia orgánica representa la mayor proporción (por ejemplo, en Brasil la materia orgánica presenta un porcentaje de 60% de la composición), y en este caso, no es necesario meses o años para empezar la descomposición biológica, sino que este proceso se desarrolla más rápidamente.

Otro factor que diferencia la velocidad de descomposición de las basuras es el clima; países de clima templado presentan mayor velocidad de descomposición que países de clima temperado. De acuerdo con Lima (1995), la velocidad de descomposición durante el invierno es la mitad de la que ocurre en verano.

Existen divergencias en la literatura técnica sobre el número de fases en que se desarrolla el proceso de descomposición bioquímica. Muchos investigadores dividen la secuencia de descomposición en número de tres a seis fases. En este trabajo se tiene en consideración la división de fases propuesta por Barlaz & Ham, (1993) que se basan en ensayos simulados en laboratorio. No obstante, los procesos que ocurren en estas fases también fueron recogidos por otros autores como, Owess & Khera, (1990), Christensen

et al (1992a), Lima (1995) y Hogland (1999) y en las tesis doctorales de Barbosa (1994), y Palma (1995).

De acuerdo con Barlaz & Ham (1993), la descomposición química y biológica de los residuos ocurre en cuatro fases, una fase aeróbica, una fase ácida anaeróbica, una fase de producción acelerada de metano y la última fase, de producción desacelerada de metano.

### **a) Fase Aeróbica**

En la fase aeróbica el oxígeno está presente en los espacios vacíos de los residuos. Este oxígeno más el oxígeno disuelto en los residuos asociado a la humedad acelera la descomposición aeróbica, generando productos como dióxido de carbono, agua y calor. La fase de descomposición aeróbica se extiende por un período de pocos días hasta que se agota el oxígeno que se encuentra en los poros del relleno.

El calor producido por la descomposición aeróbica eleva la temperatura inicial a valores del orden de 60 a 70 grados (Hogland, 1999) pudiendo llegar a la combustión. Cuando la temperatura sube a este nivel, las reacciones químicas dominan sobre las reacciones microbiológicas. Estas reacciones ocurren a altas velocidades.

Durante la fase aeróbica, los residuos están por debajo de su capacidad de campo, de manera que los lixiviados producidos fluyen hacia el interior de la masa de residuos. Como en el relleno hay capas de residuos más antiguas y los lixiviados son canalizados hacia abajo, es difícil decir las características de los lixiviados producidos por esta fase. Por otro lado, resultados de laboratorio con residuos frescos indican que los lixiviados de esta fase son muy concentrados con altos valores de DQO. En esta fase, la composición del gas



será 100% de CO<sub>2</sub>, (Barlaz & Ham, 1993). Concentraciones elevadas de cloruros y sulfatos en los lixiviados son observados por Barbosa (1994).

Lima (1995) define las principales condiciones de contorno para la fase aeróbica:

- Temperatura (gradiente): 30 a 70 °C
- pH ( neutro/alcalino) por encima de 7,0
- Potencial redox + 800 a – 100 mV

### **b) Fase ácida anaeróbica o acetogénica**

La fase ácida anaeróbica se inicia cuando la temperatura empieza a decrecer y cuando el aire se torna ocluso dentro de la masa de RSU como consecuencia de la superposición de capas de residuos. Esta fase es una fase anterior a la formación de metano, es como si el ecosistema fuese preparado de forma gradual para la formación de metano.

Cuando el oxígeno es consumido, el medio se queda propicio al desarrollo de varios tipos de bacterias, entre ellas las bacterias acetogénicas y sulfuro-reductoras. Las bacterias acetogénicas producen ácido acético y dióxido de carbono, mientras que las bacterias sulfuro reductoras producen dióxido de carbono y gas hidrógeno. Ácido acético, dióxido de carbono y gas hidrógeno son el material inicial para la producción de metano, por esto es importante que las bacterias acetogénicas realicen bien la fermentación.

Las bacterias acetogénicas se enfrentan a un problema para optimizar el proceso de fermentación. El gas hidrógeno cuando excede  $10^{-4}$  atm, inhibe las bacterias acetogénicas y no se producen el ácido acético, dióxido de carbono y gas hidrógeno necesarios para la producción de metano. Durante el

proceso de fermentación el dióxido de carbono y gas hidrógeno son producidos, en esta fase ambos gases alcanzan su concentración máxima.

El alto contenido de ácidos orgánicos que son producidos en esta fase resulta en lixiviados cuyo pH es muy bajo, (4 – 5), contiene gran cantidad de materia orgánica parcialmente degradada y presentan altos valores de DQO (demanda química de oxígeno) y DBO (demanda bioquímica de oxígeno).

Lima (1995) define las principales condiciones de contorno para la fase acetogénica:

- Temperatura (gradiente): 29 a 45 °C
- pH entre 5,2 a 6,5
- Potencial redox inferior a –100mV

### **c) Fase de producción acelerada de metano**

Esta fase es caracterizada por las condiciones estables, concentraciones de metano de 50% a 60%, bajo contenido de ácido grasos volátiles y gas hidrógeno, pH de 6-8 y concentración estable de dióxido de carbono.

Las bacterias productoras de metano pueden dividirse en dos grupos. La mayoría de estas bacterias forman parte del grupo que producen metano a partir de dióxido de carbono y gas hidrógeno. Las bacterias del segundo grupo, que contiene únicamente 2 a 3 especies, son capaces de generar metano a partir de ácido acético. Este segundo grupo es el principal generador de metano. Otras sustancias que producen metano, aunque con poca importancia, son el ácido fórmico y metanol, Hogland, (1999).

De todas las bacterias encontradas en el vertedero, las bacterias metanogénicas son las bacterias más sensibles al pH, y por tanto pueden ser fácilmente destruidas. La gran sensibilidad frente a interacciones entre los

diferentes grupos de bacterias hace difícil obtener un comportamiento ideal en todas las fases de campo. Por este motivo, la capacidad de producción de metano en un vertedero es de apenas 10%.

La fase de producción acelerada de metano llega al fin cuando el contenido de material de difícil descomposición aumenta, la degradación microbiana se hace más lenta y la producción de metano decrece.

Lima (1995) define las principales condiciones de contorno para la fase de producción acelerada de metano:

- Temperatura (gradiente): 30 °C
- pH de 7,0 a 7,2
- Potencial redox variando de -330 a - 600 mV

#### **d) Fase de producción desacelerada de metano**

La fase final de descomposición es llamada de fase de producción desacelerada de metano. Se caracteriza por la disminución de la concentración de ácidos carboxílicos y aumento del pH. La velocidad de producción del metano decrece, aunque las concentraciones de metano y dióxido de carbono permanezcan constantes, del orden de 60% a 40% respectivamente. La velocidad de descomposición de la celulosa y de la hemicelulosa es mayor que en cualquier otra fase.

Hogland (1999) llama esta fase como de generación de humus. El “humus” es la sustancia difícil de caracterizar aunque tenga ciertos factores comunes. Son sustancias con compuestos de alto peso molecular, difícil de disolver en agua y contiene moléculas con estructura de anillos que probablemente se originan de la degradación de la lignina. Estas sustancias (humus) pueden formar

complejos con metales, estos complejos pueden ser encontrados en los lixiviados en formas de partículas finamente granuladas.

De acuerdo con Barbosa (1994), en esta fase, zonas aeróbicas y zonas con potencial redox muy alto, para la formación de metano, empiezan a aparecer en las capas superiores del vertedero.

Las diferentes fases de conversión no están claramente definidas en el tiempo, pueden ocurrir simultáneamente en diferentes partes del vertedero. Esto es resultado de la composición heterogénea del material y de las condiciones de los micro ambientes que son generadas dentro del relleno que pueden ser considerablemente diferentes.

En general, puede ser dicho que la fase aeróbica es muy corta, mientras que otras pueden variar de meses a años. La naturaleza heterogénea de los residuos crea un ecosistema poco eficiente y complejo cuyo comportamiento es sensible a las influencias externas.

Trabajos experimentales realizados por diversos autores confirman la importancia de la cantidad de materia orgánica en el comportamiento deformacional de los residuos sólidos. Por ejemplo, Wardwell & Nelson (1981), presentaron resultados de una serie de ensayos de laboratorio con la finalidad de determinar los efectos de la compresión por descomposición orgánica. En una celda pusieron una mezcla de arcilla caolinítica, celulosa, agua y nutrientes para promover la actividad bacteriana y en la otra la misma mezcla, pero con una cantidad inferior de nutrientes.

Estas celdas fueron ensayadas en un consolidómetro sometido a carga constante por un período de 190 días. Los resultados obtenidos indicaron que los asentamientos ocurridos en la celda que contenía mayor cantidad de materia orgánica eran el doble de los asentamientos ocurridos en la celda con deficiencia de materia orgánica.

Los autores observaron que muestras que contenían 40% de materia orgánica presentaban asentamientos de 25% del espesor original y que muestras que contenían 70% de materia orgánica presentaban asentamientos del orden de 55%. Estos ensayos reflejan la influencia de la descomposición orgánica en el asentamiento global que sufre una masa de residuos sólidos.

Coduto & Huitric (1990), afirman que los asentamientos debidos a la descomposición biológica están probablemente entre 18% y 24% del espesor del relleno.

Druschel & Wardwell (1991), investigaron los asentamientos que ocurrían en un relleno muchos años después su retranqueo, con el propósito de hacer un sellado. El relleno fue monitorizado a través de inspección aérea en un periodo de 3 años y por inspección óptica durante 6 meses. Las previsiones de asentamientos se calcularon utilizando el modelo de Sowers (1973) y los resultados obtenidos fueron comparados con datos encontrados en la literatura técnica. Durante y subsecuentemente a la colocación del sellado, se observó la ocurrencia de asentamiento diferencial.

Según los autores, estos asentamientos eran debidos a la descomposición orgánica, pues se detectaron en varios puntos del vertedero, burbujas de gas y olor putrefacto, indicando que todavía ocurría descomposición orgánica.

### **II.5.3. Factores que afectan los mecanismos de asentamiento**

Existe una gran diversidad de factores que afectan a la magnitud y velocidad de asentamiento de los residuos sólidos, de acuerdo con Edil et al., (1990), los factores son los siguientes:

- densidad inicial
- cantidad de materia orgánica
- altura del relleno y sobrecarga adicional

- nivel de lixiviados y fluctuaciones
- factores ambientales como humedad, temperatura y producción de biogás.

A continuación se pasa revista en los factores sugeridos por el autor antes mencionado, no olvidando de citar otro factor bastante comentado en la literatura técnica, como es la edad de los residuos.

El hecho de que estos factores estén relacionados entre sí, aumenta la incertidumbre a la hora de analizar los datos obtenidos principalmente con ensayos de campo, cuando es casi imposible controlar todas las variables.

### **II.5.3.1 Densidad**

La densidad inicial está íntimamente relacionada con el potencial de asiento físico, primario y secundario que se producen en un vertedero. De la misma forma que los suelos, rellenos más densos naturalmente presentan menores asientos que rellenos menos densos. Existe en la literatura un gran número de casos de obra de rellenos en cuya mejora fue empleada la compactación estática y dinámica del material, (Sowers, 1973; York et al., 1977; Oliden, 1987; van Impe & Bouazza( 1996), Casanovas, 1989 ; Gifford et al, 1990, etc.).

Rao et al. (1977), realizaron ensayos de consolidación en laboratorio con muestras de residuos sólidos y observaron que las muestras que presentaban valores más altos de densidad inicial cuando eran cargadas con bajas tensiones sufrían menos asiento que muestras que presentaban densidad inicial baja. Sin embargo, muestras de densidad alta sufrían mayores asientos cuando eran sometidas a cargas que excedían un cierto valor crítico. La explicación encontrada por los autores para tal comportamiento es el efecto de la compactación en la compresión. La resistencia a compresión es proporcional a densidad inicial de la muestra, de forma que la presión requerida para superar esta resistencia es también función de la densidad inicial.

Aunque haya concordancia en que rellenos más densos presenten menor asiento global, la influencia de la densidad en la velocidad de descomposición de los residuos no es claramente entendida y cuantificada. Resultados de investigación realizados por Rees & Grainger (1982), indican que la densidad puede presentar efectos diferentes en la descomposición, dependiendo si la humedad es contemplada a los residuos. Residuos húmedos con alta densidad inicial pueden impedir la entrada de agua inhibiendo así la descomposición. Las reacciones ocurren más rápidamente cuando el agua puede penetrar en los residuos, por ejemplo cuando estos presentan densidad baja. Estas conclusiones son basadas en resultados de campo realizados en vertederos cuyos residuos presentaban valores variables de densidad. Por lo tanto, la cantidad de agua absorbida por los residuos es inversamente proporcional a su densidad.

Resultados de una investigación realizada por Christensen et al (1992a) indican que poca o ninguna compactación puede provocar una fase ácida poco vigorosa inicialmente y acelerar el inicio de la formación de metano, al menos en residuos relativamente húmedo. Por otro lado, en residuos secos la compactación puede acelerar la formación de metano por, inicialmente, aumentar la humedad y reducir la entrada de oxígeno.

### **II.5.3.2 Cantidad de materia orgánica**

A lo largo de esta revisión bibliográfica ya ha quedado claro que la cantidad de materia orgánica es fundamental en los procesos de asiento, principalmente a largo plazo. Residuos con alta proporción de materia orgánica degradable son más susceptibles de asientos a largo plazo de que residuos en cuyos constituyentes predominan materiales inertes.

### **II.5.3.3 Altura del relleno y sobrecarga adicional**

Yen & Scalon, (1975) investigaron los asentamientos ocurridos en tres vertederos cuyas profundidades variaban de 6,1 a 38 m. Según los autores, la velocidad de asentamiento aumentaba con la profundidad del relleno en general. Sin embargo, existía un límite para esta profundidad, 30,5m. Por encima de esta profundidad, no había aumento significativo de la velocidad de asentamiento. La explicación para tal comportamiento es que rellenos profundos simulan un medio anaeróbico con procesos de descomposición ocurriendo más lentamente. Rellenos de profundidad menor presentan mayor descomposición aeróbica y mayor velocidad de asentamiento, debido al hecho de que los residuos estarán más próximos al oxígeno.

Velocidades de asentamiento mayores debido a procesos aeróbicos que velocidad de asentamiento debido a procesos anaeróbicos fueron relatados por otros investigadores. Por ejemplo, Sowers (1973) comparó la velocidad de asentamiento entre medios aeróbicos y anaeróbicos con mismo índice de huecos y tensión de sobrecarga y observó que en un medio aeróbico generalmente el asiento es mayor.

Powrie et al (1998), señalan que para un determinado tipo de residuo y valor de densidad, la pérdida potencial de volumen o masa en degradación es proporcional al volumen original de los residuos, así que en términos absolutos vertederos más profundos exhiben mayores asentamientos. Green & Jamnejad (1997) y Powrie et al (1998), observan que la magnitud de los asentamientos depende principalmente del espesor del vertedero, magnitud de cargas y composición de los residuos.

El empleo de sobrecarga adicional para acelerar la velocidad de asiento es muy comentado en la literatura técnica. Ejemplos de casos de este tipo fueron citados anteriormente cuando se comentaba sobre la influencia de la densidad en el potencial de asentamientos. De acuerdo con Casanovas (1989), el proceso de



deformación parece ser prácticamente lineal con la presión transmitida, y los asientos son, prácticamente, en su totalidad de carácter no recuperable.

Palma (1995) resalta que la sobrecarga adicional influencia solamente los asientos inmediatos y los asientos por consolidación. Los asientos secundarios o a largo plazo son consecuencia de los procesos de degradación de la materia orgánica.

#### **II.5.3.4 Nivel y fluctuación de lixiviados**

De acuerdo con Grisolia & Napoleoni (1996), la presencia de fluidos modifica las propiedades de los materiales sólidos causando una diferencia en el comportamiento reológico global. Algunos componentes de los residuos ricos en microporos (papel, madera, tejido) pueden absorber gran cantidad de fluidos que bajo cargas o por el efecto del tiempo pueden causar variaciones en su estado físico y en las propiedades mecánicas. Existe un límite correspondiente a la máxima cantidad de fluidos que los residuos pueden absorber antes de estos se transformen en lixiviados.

Este límite corresponde al estado de saturación de los elementos. El contenido de agua no es constante y varía con el nivel de tensión, tiempo y velocidad de descomposición. La diferencia substancial entre materiales inicialmente saturados y no saturados es que una mayor cantidad de fluidos acelera la degradación y los procesos de descomposición.

Powrie et al. (1998) señalan que el aumento del contenido de humedad en una masa de residuos contribuye en el aumento de la velocidad de degradación, sin embargo, aumentando la velocidad del flujo sin variar el contenido de humedad, aumenta la generación de metano en aproximadamente 25 – 50%. Los autores comentan también que la velocidad de degradación de los residuos depende de la velocidad en que el agua circula por los mismos.

### **II.5.3.5 Factores ambientales como humedad, temperatura y producción de biogás**

Estos factores fueron discutidos anteriormente en el apartado que trata sobre gases.

### **II.5.3.6 Edad**

La pérdida de masa por combustión en rellenos más jóvenes es mayor que en rellenos antiguos. De acuerdo con los estudios de Harris (1979), la pérdida de masa en residuos jóvenes fue de 55%, mientras que en los residuos antiguos la pérdida era del orden de 20%. Aunque los estudios de Harris (1979) deriven de ensayos de laboratorio realizados con muestras muy pequeñas, está claro que residuos jóvenes que contienen mayor cantidad de carbón pierden más masa de que los residuos maduros cuyos procesos de descomposición ya fueron desarrollados.

La conclusión de Harris esta de acuerdo con otros autores como por ejemplo: Yen & Scalon (1975) realizaron un estudio más profundo en tres vertederos durante un periodo de nueve años, y concluyen que la velocidad de asentamiento decrece linealmente con el logaritmo de la edad media del relleno.

El ritmo de producción de asientos en un vertedero es variable con la edad, presentando velocidades de asiento que disminuyen con el tiempo, pero en todo caso se mantienen perceptibles durante años y aún decenios, Palma, 1995. Edil et. al., 1990 y Manasero et al.,1997 observan que la velocidad de asiento decrece con el tiempo y aumentan con la profundidad.

## **II.5.4. Modelos de Compresibilidad**

### II.5.4.1. Modelo de Sowers (1973)

Sowers (1973), fue el primero en plantear un modelo de compresibilidad para los residuos sólidos urbanos basándose en la clásica teoría de la consolidación unidimensional de los suelos propuesta por Terzaghi (1943). Según este autor la compresibilidad de los residuos sólidos puede ser dividida en compresibilidad inicial y primaria y compresibilidad secundaria. Los mecanismos que intervienen en el proceso de compresión de los rellenos fueron explicados en el apartado anterior.

La compresión inicial y primaria se producen rápidamente, en un período igual o inferior a un mes, sin que se generen grandes incrementos de presión intersticial. La magnitud de la compresión primaria se expresa por la siguiente relación:

$$S_p = \frac{C_c}{1 + e_0} H_0 \log \frac{\sigma_{v0} + \Delta\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \quad (\text{II.1})$$

Donde:

$S_p$  = asiento al final de la consolidación primaria.

$H_0$  = altura inicial del relleno.

$C_c$  = coeficiente de compresibilidad.

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

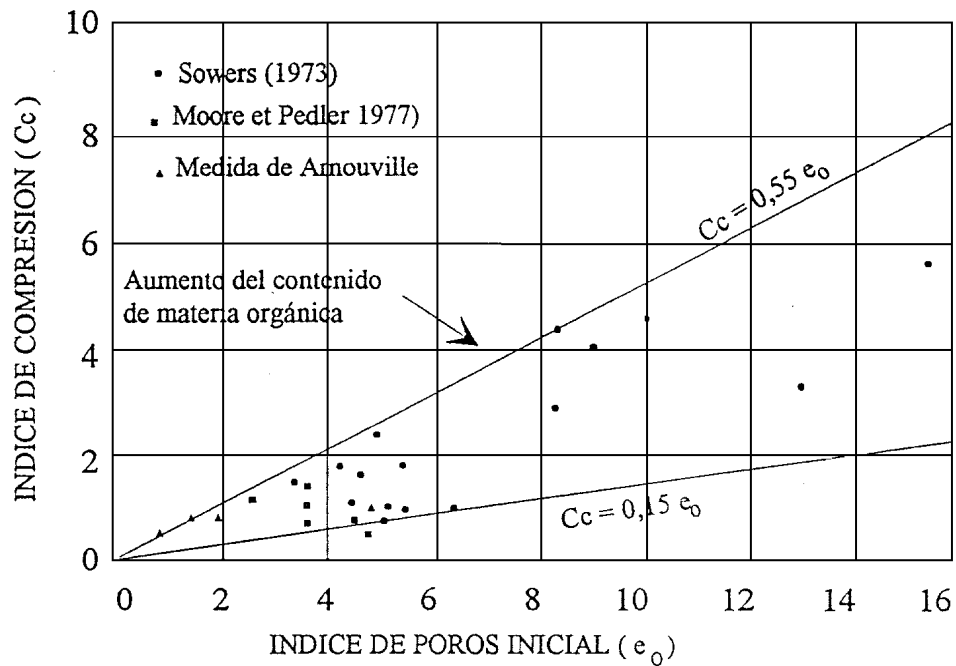
$\Delta\sigma_0$  = sobrecarga efectiva.

$e_0$  = índice de poros.

El índice de compresión primaria,  $C_c$  es función del índice de vacíos como muestra la Figura II.5, aunque hay una gran dispersión en función de la composición de los residuos:

$C_c = 0,15 e_0$     bajo contenido en materia orgánica.

$C_c = 0,55 e_0$     alto contenido en materia orgánica



**FIGURA II.5** - Índice de compresión ( $c_c$ ) en función del índice de poros inicial, (Sowers, 1973).

La compresión secundaria o a largo plazo se expresa por la siguiente relación:

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

Donde:

$S_s$  = asiento por consolidación secundaria al tiempo  $t_2$

$H$  = altura del relleno al tiempo  $t_1$

$C_\alpha$  = índice de compresión secundaria

Igualmente como el caso anterior, el coeficiente de compresión secundaria  $C_\alpha$  es función del índice de poros según muestra la Figura II.6. Sin embargo este coeficiente varía mucho según sean las condiciones favorables o desfavorables a la descomposición. Así, su valor es mayor en condiciones cálidas, húmedas y cuando el nivel freático sufre variaciones que aportan aire fresco al vertedero:

$C_\alpha = 0,03 \cdot e_0$  condiciones desfavorables;

$C_\alpha = 0,09 \cdot e_0$  condiciones favorables.

La obtención de los parámetros  $C_\alpha$  y  $C_c$  así como del índice de vacíos es bastante difícil puesto que resulta muy complicado la toma de muestras representativas de este material, además de la escasez existente de equipos de laboratorio para realizar ensayos fiables.

Una solución para esta dificultad consiste en adoptar como parámetros las siguientes expresiones:

$$C'_c = \frac{C_c}{1 + e_0} \quad (II.3)$$

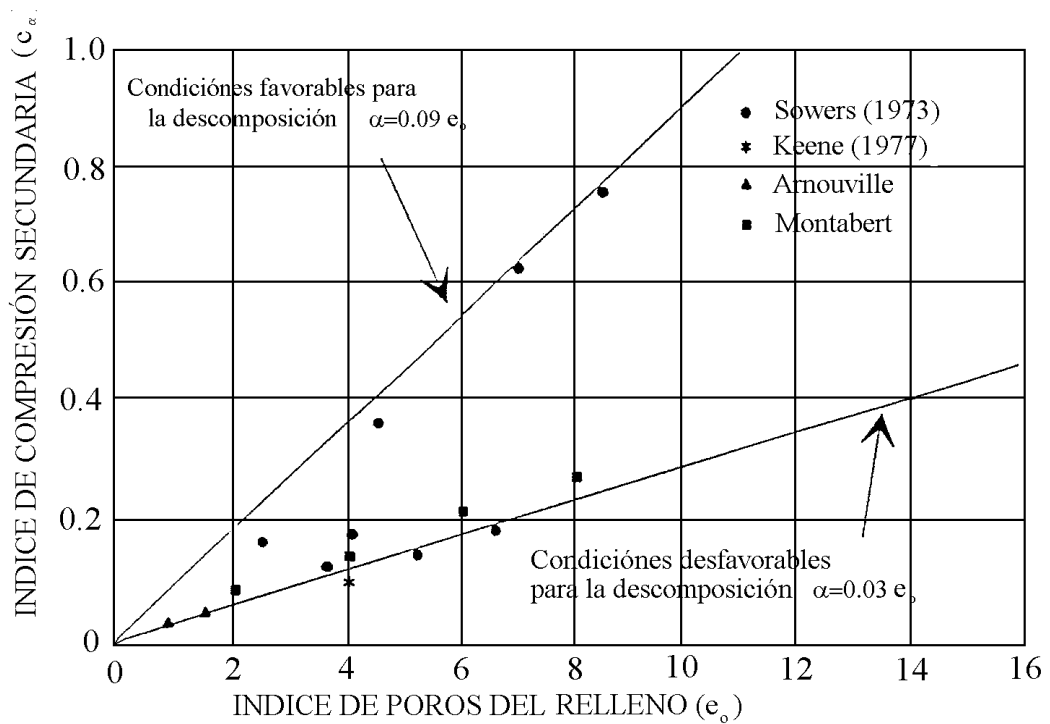
$$C'_\alpha = \frac{C_\alpha}{1 + e_0} \quad (II.4)$$

Por lo tanto, la ecuación para el cálculo de la magnitud de la compresión primaria se expresa de la siguiente forma:

$$S_p = C'_c H_0 \log \frac{\sigma_{v0} + \Delta\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \quad (II.5)$$

De igual forma que en el caso anterior, la ecuación para calcular la magnitud de asiento secundario se expresa de la siguiente manera:

$$S_s = C'_\alpha H \log \frac{t_2}{t_1} \quad (II.6)$$



**FIGURA II.6** - Índice  $C_\alpha$  en función del índice de poros, (Sowers, 1973).

El modelo de Sowers predice para los asientos a largo plazo un proceso de desarrollo indefinido y además el asiento final se hace infinito, por lo que el modelo solo permite la predicción de asientos para fechas determinadas. Otros tipos de asientos, como los producidos por fenómenos de colapso, combustión o la interacción de varios fenómenos no pueden ser estimados por estos medios

Muchas incertidumbres están envueltas en la evaluación de la compresibilidad de los RSU y se cuestiona la validez de resultados calculados utilizando la clásica teoría unidimensional de los suelos, según Manassero et. al (1997), la utilización de la teoría de la consolidación está limitada por las siguientes razones:

- a) El uso de las relaciones de compresión y recompresión son dependientes del valor inicial de “e” o “H” y estas propiedades frecuentemente no son conocidas;
- b) Las relaciones (  $e \times \log \sigma$  ) o (  $e \times \log t$  ) frecuentemente no son lineales y por lo tanto los coeficientes de compresión  $C_c$  y  $C_\alpha$  varían considerablemente con la tensión inicial dentro del vertedero y estas tensiones varían con el tiempo.
- c) La cantidad de asiento primario depende de la tensión efectiva, que a su vez es función del peso unitario de los residuos y del nivel de lixiviados, los cuales pueden ser pobremente conocidos y pueden variar con el tiempo.

Sin embargo, se podrían usar valores conservadores de parámetros de compresibilidad para prever una estimación de la magnitud general de los asientos que debería esperarse durante las distintas fases y períodos post clausura y vida activa del vertedero.

Existen observaciones que muestran que los modelos, y principalmente los parámetros involucrados, son muy sensibles a las condiciones particulares de cada relleno sanitario. De igual forma las experiencias realizadas han demostrado la necesidad de profundizar las investigaciones en rellenos sanitarios que respondan a diferentes realidades, con el propósito de obtener modelos de comportamiento propios a cada uno de ellos y así alcanzar tendencias de carácter más universal.

#### **II.5.4.2. Modelo de Yen & Scalon (1975)**

Los autores realizaron un estudio basado en observaciones de campo a lo largo de nueve años en tres vertederos cuya profundidad estaba comprendida entre 6,1 y 38 m y sugieren que los asientos en vertederos sanitarios sean

calculados en términos de velocidad. Según los autores la velocidad de asiento sigue una ley de disminución lineal con el logaritmo del tiempo como expresa la siguiente ecuación:

$$v = v_1 - b \cdot \log(t) \quad (II.7)$$

donde:

$v$  = velocidad de asientos (mm/mes)

$v_1$  = velocidad de asiento en  $t = 1$  mes (mm/mes)

$b$  = pendiente de la recta

$t$  = tiempo de estimación de la velocidad (meses)

La velocidad de asientos que sugieren los autores proporciona una velocidad inicial infinita; no obstante la velocidad decrece con el tiempo, tornándose cero cuando ha pasado un período de 200 o 300 meses. Un aspecto adicional a considerar es que los autores observan que, en general, las tasas de asientos son mayores en vertederos de más profundidad. Sin embargo, sugieren que debe haber un límite en la profundidad a partir del cual no aumentan significativamente, y debe estar en relación con el paso de un ambiente aeróbico, en el que la descomposición biológica es muy activa, a otro anaeróbico, en el que los procesos de descomposición son más lentos.

Con el propósito de analizar la tendencia de la velocidad de los asientos, los autores hicieron un estudio comparativo entre sus propios datos y los obtenidos por Sowers. Como conclusión, sugieren un procedimiento para obtener la velocidad de asentamiento partiendo de la ecuación II.5 dada por Sowers y dividiendo ambos miembros por el tiempo de duración del fenómeno. Así llegan a la siguiente expresión:



$$\frac{\Delta H}{t_2 - t_1} = \frac{C_\alpha}{1 + e_\alpha} \frac{H}{t_2 - t_1} \log \frac{t_2}{t_1} \quad (\text{II.8})$$

donde:

$\Delta H$  = asientos totales (mm)

$C_\alpha$  = índice de compresión secundaria

$H$  = altura inicial del relleno (mm)

$e$  = índice de poros

$t_2$  = tiempo final (meses)

$t_1$  = tiempo de inicio de la consolidación secundaria (meses)

La velocidad de asiento en (mm/mes) viene expresada por:

$$m = \frac{\Delta H}{t_2 - t_1} \quad (\text{II.9})$$

Por consiguiente la ecuación se transforma en:

$$m = \frac{C_\alpha}{1 + e} \frac{H}{t_2 - 1} \log t \quad (\text{II.10})$$

donde  $t_1 = 1$  mes y  $t = t_2$  tiempo para el cual se calcula la velocidad de asiento "m" en meses.

La ecuación (II.12) puede ser utilizada para calcular la velocidad de asientos para un relleno dado usando los valores de  $C_\alpha$  sugeridos por Sowers (1973).

Yen & Scalon (1975) encontraron que las velocidades de asientos eran mayores en rellenos en los que las condiciones fuesen favorables a la descomposición que en rellenos con condiciones menos favorables. Sin embargo, Landva et.al (1984) mostraron que no hay ninguna diferencia entre velocidades de compresión secundaria en rellenos antiguos que en rellenos

jóvenes. Rao et. al (1977) a través de ensayos señalan que los efectos de la descomposición biológica no afectan de forma significativa a la velocidad de compresión secundaria.

#### **II.5.4.3. Modelo Meruelo (1995)**

Este modelo fue 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. A continuación, se pasa revista a la formulación del referido modelo. La información fue recogida de la tesis de Palma (1995) y del artículo de Espinace et al (1999).

El modelo pretende predecir los asentamientos que ocurren en un vertedero a partir de una formulación que incorpore y relacione los parámetros fundamentales que determinan los procesos de degradación, como puede ser el tiempo, el contenido de materia orgánica, la humedad, y el ritmo de desarrollo de los procesos de degradación.

En el planteamiento de este modelo se consideran solamente los asentamientos que son dependientes del tiempo, es decir los que se deben a la descomposición de la materia orgánica biodegradable.

Para el desarrollo de este modelo tuvieron que considerar los aportes de masa que se producen durante la etapa de explotación de un vertedero.

Ese planteamiento implica que, para un periodo 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 parte no toda la materia orgánica se degrada. Para aplicar los procesos de degradación solo 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 este momento. En todo caso, esto supone solo 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.

El proceso de pérdida de masa y volumen se puede descomponer en dos sumandos: uno a volumen constante, que se manifiesta como pérdida de densidad; y otro a densidad constante, que da lugar a un cambio de volumen y, en consecuencia, a asientos.

La relación entre el total de pérdida de masa y el de pérdida de volumen parece ser 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 se expresan para todo el período posterior a la etapa de explotación de un vertedero como función de los siguientes parámetros en la forma:

$$S_s = \alpha HCOD \left[ 1 - \frac{1}{k_h T_c} \left( e^{-k_h(t - T_c)} - e^{-k_h t} \right) \right] \quad (11.11)$$

donde:

$S_s$  = asientos (mm)

$\alpha$  = 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 ( $\text{días}^{-1}$ )

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 la masa de residuos que experimentan en forma continua la degradación y que ha sido aportada durante un tiempo determinado con un ritmo constante. Además, el material degradado (y con 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 " $\alpha$ " se considera constante y característico del tipo de vertedero y de los 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, hace adecuado expresar los asientos en términos de descenso con respecto a un momento determinado, considerado como inicial. Hay que señalar que las condiciones reales en un vertedero controlado se obtienen con respecto a una primera nivelación llevada a cabo en un momento  $t_0 > T_c$ . Introduciendo esto se llega a la expresión que refleja a la producción de asientos:

$$\Delta S = \frac{\alpha HCOD}{k_h T_c} (1 - e^{-k_h T_c}) (e^{-k_h t'} - e^{-k_h t_0}) \quad \text{II.12}$$

donde:

$\Delta S_s$  = variación de asientos (mm)

$\alpha$  = coeficiente de pérdida de masa transformada en asientos

A partir de esta ecuación, se pueden predecir los asientos a lo largo del tiempo. También se puede estimar el coeficiente de pérdida de masa ( $\alpha$ ), y ajustar otros valores como el coeficiente de hidrólisis  $K_h$ .

Los autores observan que la velocidad de asiento no es lineal con el logaritmo de tiempo cuando se considera períodos de tiempo más largos ( $\Delta t > 5 - 10$  años).

#### **II. 5.4.4. Modelo de Gandola et al (1994)**

Gandola et al (1994) basándose en resultados experimentales efectuados con lisímetros formularon un modelo exponencial para previsión de asientos no provocados por variación de cargas.

Los autores hicieron una interpolación analítica de las mediciones efectuadas con el objeto de establecer una función matemática que pudiera expresar las variaciones de asiento en función del tiempo, considerando como condición inicial asientos nulos y como condición final asientos tendiendo a un valor asintótico.

De acuerdo con los autores se observa en la Figura II.17 que los puntos correspondientes a las mediciones realizadas durante la experiencia forman una buena aproximación a una ley exponencial decreciente del tipo:

$$S_s = aH(1 - e^{-kt}) \quad (\text{II.13})$$

donde:

$\Delta H$  = asientos

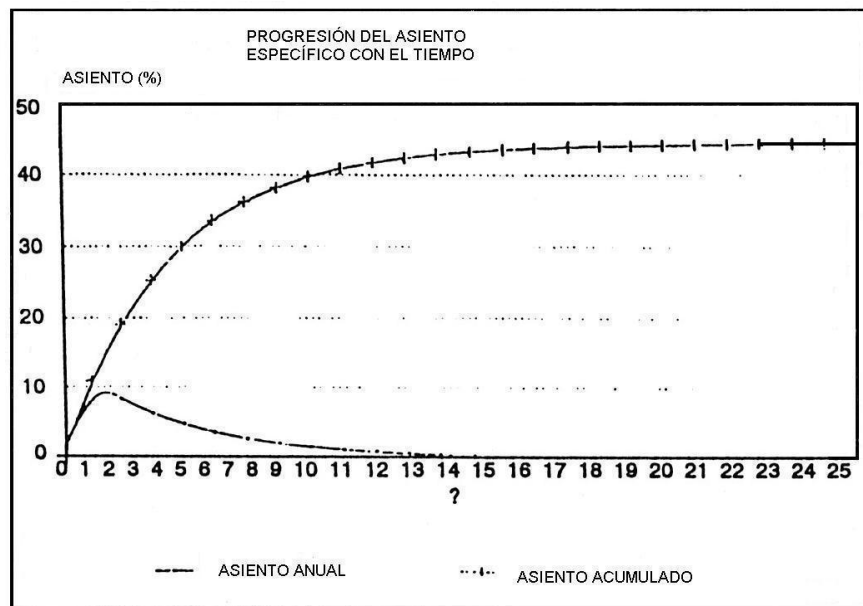
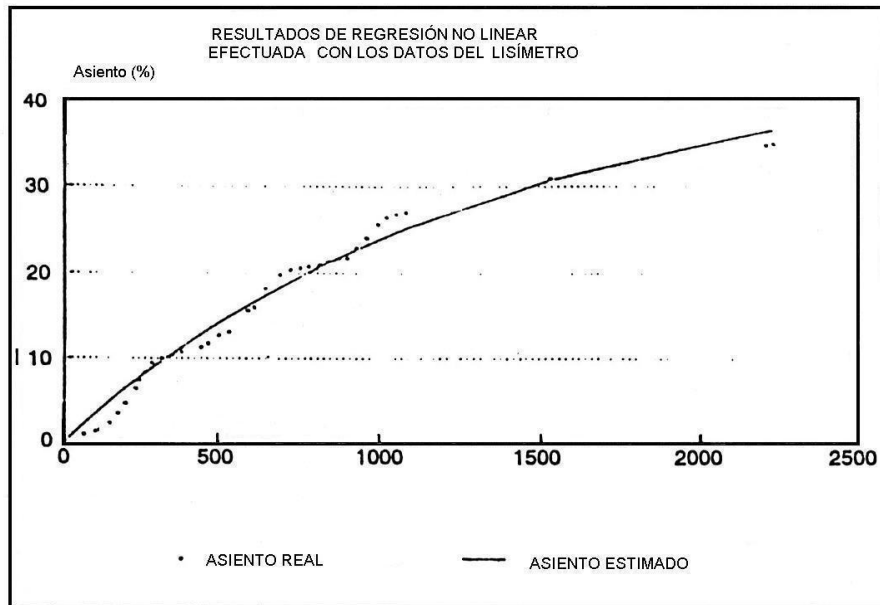
H = espesor inicial del relleno

a = constante

K = constante

t = tiempo de estimación de los asientos

De acuerdo con Palma (1995) 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.



**FIGURA II.7** - Ley Exponencial de asientos con relación al tiempo, (Gandola et al., 1994)

#### **II.5.4.5 Otros Modelos**

Los modelos existentes para la previsión de asentos en vertederos de residuos sólidos en su gran mayoría se basan en el planteamiento propuesto por Sowers (1973), salvo algunas excepciones cuya interpretación del proceso de asentos es mas o menos compleja. A continuación se pasa muy brevemente revista a estos modelos:

- Rao et. al (1977) realizaron estudios de deformabilidad en terrenos y laboratorio, desarrollando una técnica para predecir el asentamiento en rellenos sanitarios sometidos a sobrecarga. Además estudiaron la estabilización mediante inyección de cenizas volantes al terreno.
- Zimmerman et al., (1977), han desarrollado un modelo reológico que tiene en cuenta la macro y micro porosidad en el vertedero y proponen una relación de la disipación de la presión intersticial con el tiempo. Además, plantean una ecuación de continuidad que incluye las deformaciones y la actividad químico-biológica. Los resultados son bastante buenos para residuos triturados y reproducen bien la consolidación secundaria.
- Con el propósito de obtener una única ecuación para asentos primario y secundarios en residuos Edil et al. (1990) hicieron uso de dos modelos de predicción empleados para turbas y suelos orgánicos para describir la compresión secundaria de estos materiales. Los dos modelos en que estos autores se basaron fueron el modelo reológico de Gibson & Lo (1961) y la ley "power-creep" de Edil et al. (1990). Los autores llegaron a dos conclusiones interesantes: primero que los asentos de los residuos pueden ser modelados satisfactoriamente, que la compresión primaria es completada en la fase de operación del vertedero, y la compresión secundaria es más evidente una vez que ha concluido el relleno.



# CAPÍTULO III

## CAPÍTULO III

LOS RSU DE LA COMUNIDAD DE MADRID:

**LOS RSU DE LA COMUNIDAD DE MADRID:**

EL VERTEDERO INVESTIGADO

**EL VERTEDERO INVESTIGADO**

### **III.1 SITUACIÓN ACTUAL DE LA GESTIÓN DE RSU DE LA COMUNIDAD DE MADRID**

En la Comunidad de Madrid, se ha desarrollado un Plan de Gestión de residuos sólidos urbanos para ser implantado durante el periodo de 1997 – 2005. Este Plan de Gestión presenta como finalidades principales desarrollar un nuevo modelo de recogida selectiva en origen, una política de fomento de la reutilización y el reciclado de los residuos, la implantación del compostaje para los residuos orgánicos, así como también la construcción de nuevos vertederos sanitariamente controlados y estaciones de transferencia, y la instalación de contenedores específicos para vidrio y papel–cartón, etc. A estos objetivos se añade una gran campaña de concienciación de los distintos colectivos sociales para prevenir en origen los residuos sólidos urbanos.

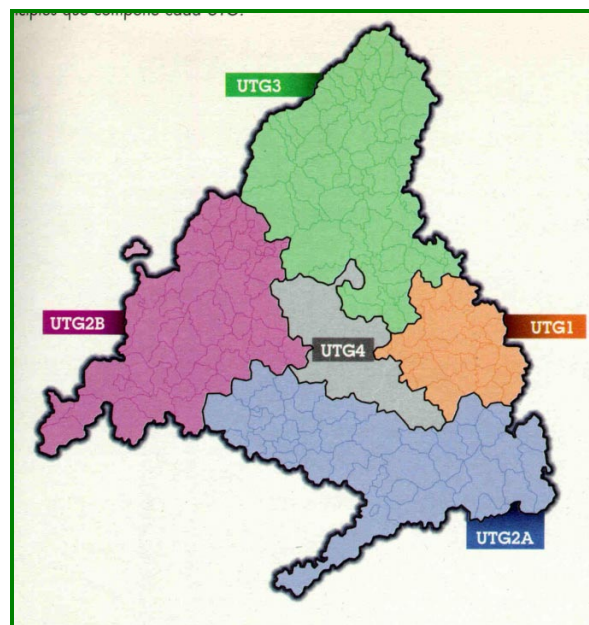
Actualmente en la Comunidad de Madrid (CM), existen siete estaciones de transferencia (cinco fijas y dos móviles) y cinco vertederos sanitariamente controlados (VSC), para el tratamiento de los RSU. Los residuos que admiten los vertederos de la CM son RSU de recogida general y residuos asimilables a urbanos, que proceden de empresas particulares ubicadas en las zonas de influencia de cada vertedero, y de otros municipios, con el permiso correspondiente de la Dirección General de Calidad Ambiental. No se permite el vertido de residuos inertes, industriales, peligrosos, ni biosanitarios especiales.

A continuación se describe las características de los RSU generados en la Comunidad de Madrid, como también su procedencia, recuperación y reciclaje. Los datos presentados son los mismos catalogados en época de la elaboración del referido Plan de Gestión (1995).

### III.1.1 Estructura Territorial Actual

La Comunidad de Madrid, a efectos de gestión de RSU, está dividida en tres zonas territoriales (Norte, Este y Sur) que comprenden a su vez cinco Unidades Territoriales de Gestión (UTGs), definidas bajo los criterios de alterar lo menos posible las mancomunidades existentes y reducir costes de transporte y el tamaño de área de gestión.

Las UTGs comprenden una serie de municipios y las estaciones de transferencia y vertederos ubicados en su territorio. La Comunidad de Madrid ha asignado a cada municipio la instalación correspondiente para la entrega de los RSU. La Figura III.1 presenta el mapa de la Comunidad de Madrid y su zonificación en forma de UTGs. El vertedero investigado está ubicado en la UTG4, que comprende los municipios de Madrid, Arganda del Rey y Rivas-Vaciamadrid.



**FIGURA III.1** Zonificación de las unidades territoriales de gestión

### III.1.2 Actividades Económicas

La actividad económica de la Comunidad de Madrid esta subdividida en cuatro sectores, de acuerdo con la Tabla III.1

**TABLA III.1**

Actividad económica de la Comunidad de Madrid

Sector Económico	Distribución (%)
Agricultura	1
Industria	25
Construcción	7
Servicios	67

Fuente: Plan de gestión de RSU de la Comunidad de Madrid

El 75% de los municipios de la Comunidad de Madrid, entre los que se encuentran Madrid y la corona metropolitana de la Comunidad, están claramente dedicados a los servicios. En cuanto a la generación y composición de RSU se distinguen dos grandes grupos:

Comercios, oficinas, centro públicos y centros educativos. Dentro de este grupo, los RSU están compuestos, básicamente, por papel y cartón y, en menor medida, envases y materia orgánica.

Bares, restaurantes y hoteles. Dentro de este grupo predomina la producción de vidrio y materia orgánica, con lo que también se pueden diseñar actuaciones específicas para la recuperación de vidrio dentro de este colectivo.

### **III.1.3 Generación de RSU**

La población equivalente de la UTG4, correspondiendo a los municipios de Madrid, Rivas-Vaciamadrid y Arganda es de 3.008.000 habitantes. Esta población genera una tasa de producción de residuos de recogida general de 1,05 Kg/hab/día, (datos del año de 1995).

De acuerdo con el Plan de Gestión de RSU de la Comunidad de Madrid, la población equivalente es la suma de la población estable más la población estacional. En la ciudad de Madrid hay el mayor porcentaje de población estacional.

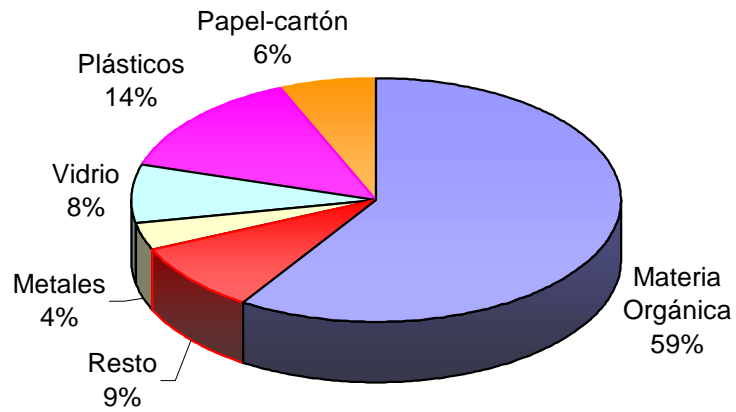
A continuación se presentan gráficas en las Figuras III.2a y III.2d de la UTG4 que representan la generación de RSU por diferentes tipos de productores:

- Domiciliares
- Comercios (minoristas y mayoristas, bares y restaurantes y talleres mecánicos)
- Oficinas (administración central y autonómica y empresas privadas de servicios profesionales)
- Industrias asimilables a urbanos

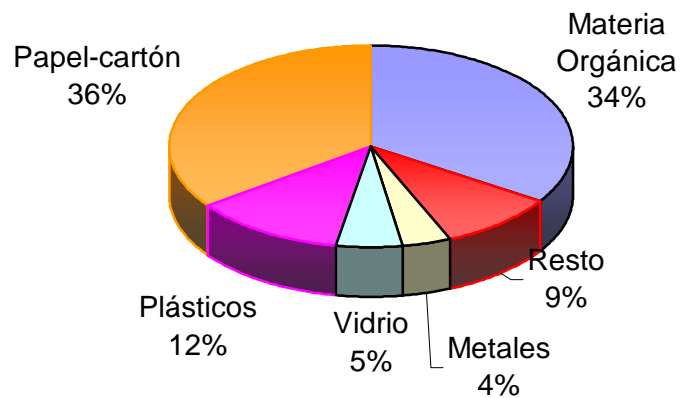
Al no tener datos actuales de la generación de RSU por cada uno de los grupos, las cantidades generadas por los tres últimos grupos se han calculado en función de los prorates europeos existentes de generación por empleado. El primero grupo, domiciliario, se ha obtenido restando de la cantidad total de RSU la estimada para los tres últimos grupos.

Asimismo, se presentan los porcentajes de composición para cada una de las diferentes fracciones, aplicando los datos de composición que existen para los

residuos domiciliarios de la referida UTG y los datos que se posee para el resto de los grupos (comercios, oficinas e industrias).



**FIGURA III.2a** - Porcentaje medio en RSU domiciliarios



**FIGURA III.2b** - Porcentaje medio en RSU comercios

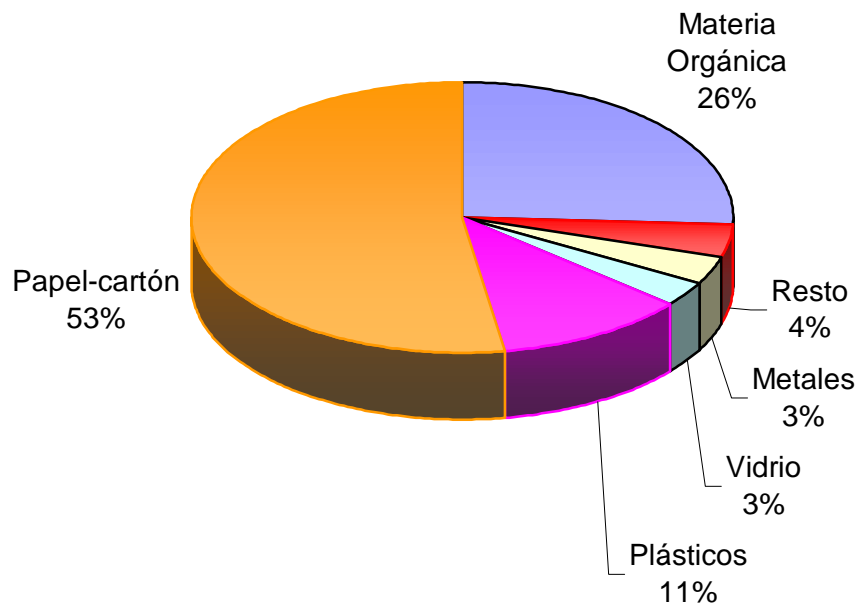


FIGURA III.2c - Porcentaje medio en RSU oficinas

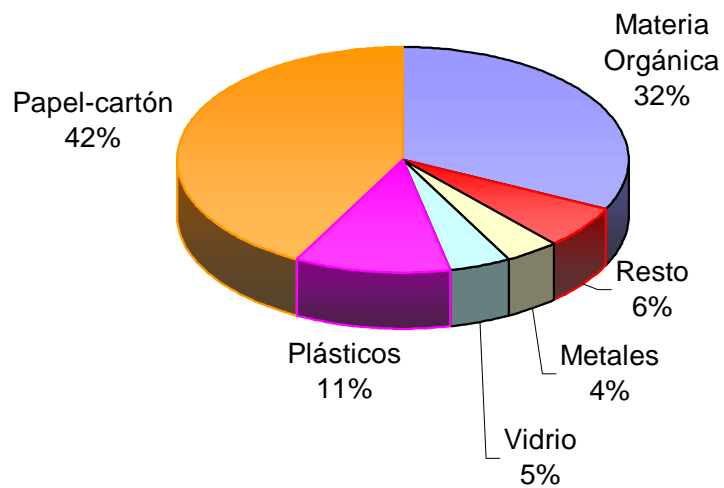
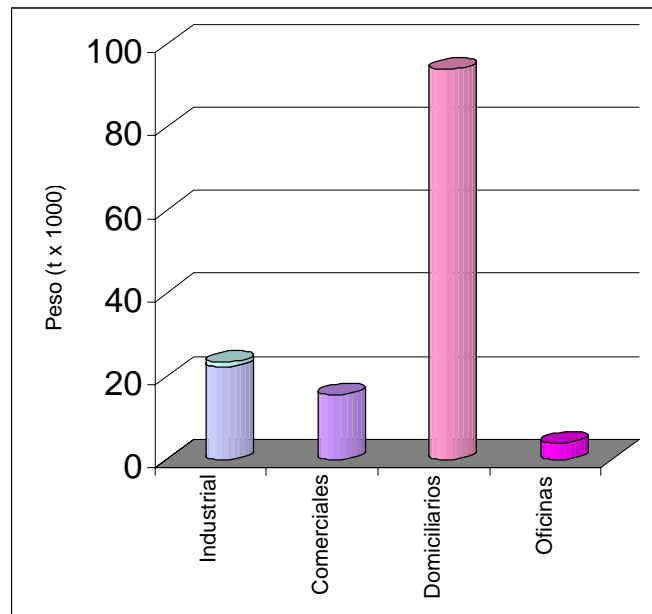


FIGURA III.2d - Porcentaje medio en RSU asimilables a urbanos

El gráfico de la Figura III.3 presenta las cantidades de RSU en toneladas originados por diferentes productores.



**FIGURA III.3** - Cantidades de RSU generados en la UTG 4

En la Tabla III.2 se presenta un resumen con los datos de generación de residuos urbanos a nivel de las UTGs de la comunidad de Madrid.

**TABLA III.2**

Cantidades de residuos generados en la Comunidad de Madrid (ton x1000/a)

TIPO DE RESIDUO	UTG 1	UTG 2 <sup>a</sup>	UTG 2B	UTG 3	UTG 4	TOTAL
Domiciliarios	131	318	157	99	715	<b>1420</b>
Comerciales y Servicios	23	58	16	20	370	<b>487</b>
Ind.asimilable a urbanos	38	61	5	22	122	<b>248</b>
Rec. Especial (contenedores)	4,2	11,6	4,3	3,7	30,8	<b>54,6</b>
Fracción recup. de RSU domic. UTG4	0,4	1	0,9	-	4	<b>6,3</b>



### **III.1.4 Recuperación y Reciclaje**

En el municipio de Madrid están operativos según datos de 1996, 4 Centros de Recogida y Reciclaje (CRR) repartidos por la ciudad. Estos centros dan servicio a particulares y reciben productos reciclables, residuos voluminosos y pequeñas cantidades de escombros que se generan en los hogares. A diferencia de los Puntos Limpios, los CRR no reciben residuos peligrosos de origen domiciliario.

En la Comunidad de Madrid solamente el municipio de Madrid cuenta con una infraestructura para la recuperación y valorización de los RSU recogidos.

El municipio de Madrid dispone de dos plantas de clasificación que conjuntamente gestionan el 52% de los RSU de Madrid. Estas plantas separan y compostan la fracción orgánica y, mediante separación magnética y manual, recuperan metales férricos, papel y cartón, envases plásticos y vidrio. En una de las plantas también se recuperan envases de aluminio.

Los rechazos de una planta (TGM) son llevados al vertedero de Valdemingomez, mientras que la segunda planta (TIRMADRID) está dotada de una planta de incineración con recuperación de energía para los rechazos. De este modo el 19% de los RSU domiciliarios del municipio de Madrid se valoriza energéticamente.

### **III.2 CARACTERÍSTICAS DEL VERTEDERO**

El vertedero investigado está situado al SE de Madrid, se extiende sobre un área aproximada de 100 Ha, siendo en la actualidad uno de los vertederos más grandes de Europa. El tiempo de funcionamiento es de 20 años y su clausura está prevista en un plazo máximo de 3 años. Se encuentra ubicado sobre

materiales de baja permeabilidad como margas, arcillas y yesos, no crustificados.

Hace algunos años, casi la totalidad de los RSU generados eran tratados en este vertedero. En la actualidad, se ha instalado una planta de trituración con recuperación magnética de metales férricos, de modo que prácticamente el total de los RSU domiciliarios se recuperan los metales férricos y dos plantas de compostaje. En una se hace clasificación y compostaje y en la otra, clasificación, compostaje e incineración.

De acuerdo con el Plan de Gestión de RSU, se hace compostaje de un total de 192.000t/a de materia orgánica en estas plantas, produciendo así 45.000 t/a de compost que se vende como abono orgánico. Para la UTG4 esto corresponde a una recuperación de 35 – 40 % de la materia orgánica. En el resto de la comunidad no se dispone en la actualidad de plantas de compostaje.

El resto de los residuos son trasladados al vertedero, extendidos y compactados en capas de 2 m de altura, cubiertas a diario con 30 cm de material de cobertura, procedentes de la zona (Foto III.1).

### **III.2.1 Elección del Emplazamiento**

El área elegida ( Foto III.2) para la realización de este trabajo, presenta una extensión de aproximadamente 2 ha y está ubicada en un enclave próximo a las instalaciones de tipo industrial.

En esta zona, el vertido de residuos sólidos se inició en el año de 1994 concluyendo en abril de 1998. En parte de esta zona, durante un cierto intervalo de este período, el vertido fue hecho en forma de bloques prensados para, posteriormente, seguir de forma normal. Con la excepción del estudio de

reconocimiento realizado con los métodos geofísicos, que se ha hecho en toda la zona elegida, todos los demás estudios fueron realizados sobre un área donde el vertido de residuos se hizo de la forma descrita anteriormente.



**FOTO III.1** – Compactación de los residuos sólidos

La zona elegida fue sellada con una capa de suelo de aproximadamente 0,8 m de espesor y delimitada mediante un cordón de tierra de 0,80 m de altura. Trazados los perfiles de la zona, se eligió, para desarrollar este trabajo, un lugar cuya altura de residuos fuera máxima.

### **III.3 CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO**

#### **III.3.1 Geología**

Los materiales de la zona donde está ubicado el vertedero investigado corresponden a depósitos terciarios continentales. Litológicamente se trata de margas yesíferas, en alternativas que comprenden desde arcillas consolidadas poco calcáreas a yesos masivos. Se encuentran en estratos horizontales de espesores variables. Tienen su origen en episodios sedimentarios producidos

en medios palustres, bajo condiciones climáticas de sensible aridez, que proporcionan la formación de materiales evaporíticos (especialmente, yesos). Se trata de formaciones que colmataron la fosa tectónica del Tajo, individualizada durante la orogenia Alpina del Sistema Central, masa orográfica de la que proceden los materiales sobre los que se emplaza el vertedero. A alguna distancia del mismo existen arenas y gravas geológicamente recientes (cuaternarias) asociadas al río Manzanares.



**FOTO III.2 - Área de pruebas**

### **III.3.2 Climatología**

De igual modo que sucede en todo el área central de la geografía peninsular, el clima de Madrid es un clima marcadamente continental, caracterizado por importantes contrastes térmicos tanto mensuales, como diarios, con inviernos severos y veranos cálidos, y también por una clara estacionalidad de las precipitaciones que no llegan a ser nunca muy abundantes.

La temperatura máxima en cada mes varía entre los 10 °C en enero y diciembre hasta los 35 °C en los meses de verano, mientras que las mínimas oscilan entre 2 °C y 17 °C para los mismos meses del año. La diferencia entre la temperatura máxima y mínima mensual refleja las importantes oscilaciones térmicas diarias que llegan a producirse.

Así mismo, las precipitaciones se reparten de modo desigual a lo largo del año, siendo más abundantes entre los meses de octubre y mayo y con un período seco en los meses de estío.

La precipitación media en la ciudad de Madrid y sus proximidades está alrededor de 430mm/año. En los meses más lluviosos caen entre 40 y 60 mm de lluvia por mes, mientras que en los más secos sólo caen entre 10 y 13 mm, siendo además en este período básicamente en forma de fenómenos tormentosos.

Por otro lado, el clima del área de Madrid está condicionado por la existencia del Sistema Central que es causante de que haya un gradiente de temperatura y precipitaciones desde el noroeste hacia el sudeste.

Así, la temperatura media anual en el borde noroeste es de 8 °C mientras que hacia el sudeste asciende hasta 15 °C. En consecuencia, el período de heladas se extiende en las zonas próximas a la sierra entre los meses de Septiembre y Junio, mientras que en las zonas más alejadas se reduce al período comprendido entre Diciembre y Abril.

Por su parte, el valor de la precipitación anual oscila entre los 1000 mm correspondientes a la zona noroccidental y los 400 mm del sector suroriental.

En general, se puede decir que el área de Madrid se caracteriza por un claro predominio del tiempo estable sobre el perturbado. Así, durante el invierno, la primavera y el otoño el 58 % de los días son anticiclónicos, mientras que en verano este número asciende el 79 %.

### **III.3.3 Hidrogeología**

El balance hídrico es fuertemente negativo debido a la baja pluviometría y a la elevada evapotranspiración, con lo que la escorrentía superficial en la zona es casi nula, existiendo sólo pequeños arroyos, que sufren desecación estacional o casi total, siendo su red de drenaje principal al río Manzanares, situado a unos 2 Km, Carreras et al. (1997).

Por otra parte, la escorrentía subterránea, que está condicionada por la permeabilidad de las margas yesíferas, es escasa (sólo de forma local la permeabilidad puede aumentar debido a procesos de disolución en las formaciones yesíferas). El flujo definido para las aguas subterráneas tiene dirección N-S, estando situada la zona de recarga al N del vertedero y la descarga se localiza en el río Manzanares, Carreras et al. (1997).

# CAPÍTULO IV

## CAPÍTULO IV

EQUIPOS Y TÉCNICAS DE ENSAYOS

**EQUIPOS Y TÉCNICAS DE ENSAYOS  
UTILIZADAS PARA EL RECONOCIMIENTO  
UTILIZADAS PARA EL RECONOCIMIENTO  
GEOTÉCNICO DEL MATERIAL  
GEOTÉCNICO DEL MATERIAL**

## **IV.1 INTRODUCCIÓN**

La primera fase de la campaña de ensayos programada para este trabajo consistió en el reconocimiento del terreno, a través de sondeos mecánicos con ensayos de penetración estándar (SPT) y métodos geofísicos del tipo análisis espectral de ondas superficiales (AEOS), sondeos eléctricos y electromagnéticos.

Con la finalidad de investigar las propiedades físicas del material, se realizaron ensayos de densidad y humedad. Los ensayos de humedad fueron ejecutados con muestras obtenidas en profundidad, a través de un sondeo destinado a instalación de un nuevo micrómetro, (ya que el anterior había salido de rango, como consecuencia de las grandes deformaciones ocurridas). A continuación se describe las técnicas empleadas y los ensayos realizados.

## **IV.2 ENSAYOS DE HUMEDAD**

Los ensayos de humedad se realizaron con muestras obtenidas del sondeo destinado a instalación de un nuevo micrómetro deslizante, ya que el primer se quedó fuera de servicio en mayo de 1999.

Las muestras fueron obtenidas a distintas profundidades, introducidas en bolsas plásticas y llevadas al laboratorio. Los ensayos se ejecutaron según la norma NLT –102/98. Los valores están detallados en el capítulo V.

## **IV.3 ENSAYO DE DENSIDAD**

Con la finalidad de determinar la densidad aparente de la masa de vertidos, se llevó a cabo un ensayo in situ en septiembre de 1999. Para ello, se excavó una



zanja, después de quitar la capa de cobertura de aproximadamente 80 cm, con las dimensiones medias siguientes:

Longitud = 1,50m

Ancho = 1,00m

Altura = 0,50m

El peso del material extraído se determinó mediante 36 pesadas con una báscula de precisión de 1Kg. Con los valores de peso y volumen se obtuvo el valor de densidad húmeda aparente a través de la expresión siguiente:

$$\gamma = \frac{P}{V} \quad (IV.1)$$

Donde:

$\gamma$  = densidad aparente

V = volumen

P = peso

#### **IV.4 SONDEOS MECÁNICOS CON ENSAYOS DE PENETRACIÓN ESTANDAR (SPT)**

Se realizaron un total de cinco sondeos, a rotación, con tubería de revestimiento para impedir el derrumbamiento de las paredes y recuperación de testigo continuo. A los niveles exigidos se realizaron ensayos SPT. Las maniobras de revestimiento se hacían con agua y la perforación en seco. Posteriormente, en los sondeos se procedió a instalar la correspondiente instrumentación, (capítulo V).

La idea inicial (con excepción del sondeo utilizado para termistancia) era llevar todos los sondeos hasta el sustrato natural; sin embargo debido a las dificultades surgidas en la realización del primer sondeo (S1), destinado a la

instalación del punto fijo, se decidió por establecer las profundidades de los demás a una profundidad equivalente a 20 m. En ese sondeo (S1), aparecieron grandes emanaciones de gases, precisamente a los 26 m de profundidad, cuando se intentaba sacar la tubería de revestimiento. Según el detector de gases, esta concentración era bastante elevada de forma que existía riesgo de producirse una explosión o ignición de este gas al saltar una chispa procedente de alguna maniobra al rozar dos elementos metálicos. Además se hacía molesta la permanencia en las proximidades del sondeo, ya que el mal olor era intenso, produciendo mareos, vómitos y dolor de cabeza.

Las profundidades alcanzadas en todos los sondeos realizados como también la situación del fondo de los mismos se encuentra en la Tabla IV.1 A continuación se describe las técnicas del ensayo SPT.

**TABLA IV.1**  
Profundidad de los sondeos

SONDEO	APLICACIÓN	PROFUNDIDAD (M)	SITUACIÓN DE FONDO
S-1	Punto fijo	30	2,5 m en terreno natural
S-2	Inclinómetro	20	En vertedero
S-3	Micrómetro	21	En vertedero
S-4	Micrómetro	21	En vertedero
S-5	Termistancia	20,50	En vertedero

El ensayo de penetración estándar (SPT) determina la resistencia del suelo a la penetración de un tomamuestra tubular de acero, en el interior de un sondeo, al tiempo que permite obtener una muestra representativa para su identificación, aunque con su estructura alterada.

Para efectuar este ensayo es preciso avanzar con un sondeo normal. Al llegar al punto que se desea ensayar, se introduce la cuchara normalizada hasta el

fondo y se hinca mediante el golpeo sobre una sufridera de una maza de 63.5 Kg cayendo libremente desde de una altura de 76,2 cm. No se tiene en cuenta el número de golpes necesario para introducir los primeros 15 cm, ya que se supone que el terreno en el fondo del sondeo puede estar alterado. Se cuentan, sin embargo, el número de golpes necesarios para introducir los 30 cm siguientes. Este es el “número de penetración estándar” N.

La gran ventaja que ofrece este método es la simplicidad en la realización del ensayo y el gran número de correlaciones con otros parámetros geotécnicos de gran interés en el estudio del comportamiento estático y dinámico de suelos. El mayor inconveniente es la gran cantidad de variables que intervienen en su realización, lo que hace difícil su normalización. A continuación se muestran las fotos sacadas en la ejecución del primer sondeo, (S-1).



**FOTO IV.1 - Sondeo con ensayo de SPT**

## IV.5 ANÁLISIS ESPECTRAL DE ONDAS SUPERFICIALES

El **Análisis Espectral de Ondas Superficiales (AEOS)** constituye un método no destructivo muy adecuado para obtener la velocidad de las ondas S del terreno,  $V_s$ , sobre todo cuando existen capas superficiales más rígidas en las que no es posible utilizar los métodos tradicionales de refracción. Por otro lado, su rapidez de ejecución y su carácter “global” ofrecen ventajas frente a otras técnicas como el “cross-hole” y “down-hole” que exigen la perforación de sondeos.

### IV.5.1 Desarrollo histórico: Aspectos teóricos y prácticos

La primera contribución fundamental al estudio de la propagación de ondas superficiales en el terreno fue publicada por Rayleigh en 1885. Anteriormente, se sabía que la vibración en un medio elástico, homogéneo e infinito se propagaba en forma de ondas esféricas con dos velocidades distintas:  $V_s$  (Onda S) y  $V_p$  (Onda P).

Dentro del marco de la teoría elástica, Rayleigh demostró, planteando las ecuaciones del movimiento, que podía existir un tercer tipo de onda en la superficie libre de un sólido. Este nuevo tipo de onda, ahora conocida como onda Rayleigh, tiene una velocidad de propagación  $V_r$  ligeramente inferior a la de las ondas transversales,  $V_s$  y, como esta última, no depende más que de las propiedades elásticas y de la densidad del material:

$$V_r = k \cdot V_s \quad (IV.2)$$

Donde:

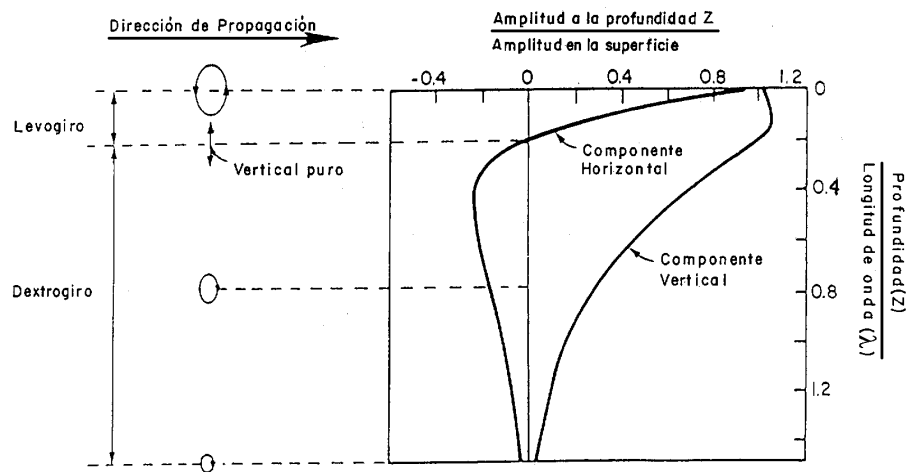
$k$  = es una función que solo depende del coeficiente de Poisson “ $\nu$ ” y varía entre 0,874 para  $\nu = 0$  y 0.955 para  $\nu = 0,5$ .

En 1904, Lamb demostró que una excitación puntual de corta duración en la superficie de un semiespacio elástico produce ondas Rayleigh además de ondas longitudinales y transversales. Posteriormente, Miller y Pursey (1955) encontraron, para el campo lejano, que la distribución de la energía producida por la vibración vertical de una pequeña carga circular colocada en la superficie de un semiespacio elástico, homogéneo e isótropo con un coeficiente de Poisson de 0.25, era: 67% onda R, 26% onda S y 7% onda P.

Así mismo, puede demostrarse (Ewing et al.,1957) que en la superficie del semiespacio, la amplitud de los tres tipos de ondas señalados originados por una carga puntual aplicada en superficie se atenúan con la distancia a la fuente ( $x$ ) según las siguientes relaciones: proporcional a  $x^{-2}$  (Ondas internas P y S) y proporcional a  $x^{-1/2}$  (Ondas superficiales R).

El hecho de que  $2/3$  de la energía producida por la vibración vertical de una pequeña carga circular colocada en la superficie del semiespacio se propague en forma de ondas R y que estas ondas superficiales se atenúen con la distancia a la fuente vibratoria mucho más lentamente que las ondas internas (P y S), indican que las ondas R son las de máximo interés para el tipo de ensayo no destructivo objeto de este trabajo.

Además, hay que señalar un aspecto práctico muy interesante de este tipo de ondas superficiales: se trata de la profundidad del bulbo de energía de las ondas R. Según se muestra en la Figura IV.1. (Richard et al.,1970) esta profundidad es aproximadamente de una longitud de onda.



**FIGURA IV.1** – Distribución de la amplitud y del movimiento de la partícula en función de la profundidad de las ondas Rayleigh

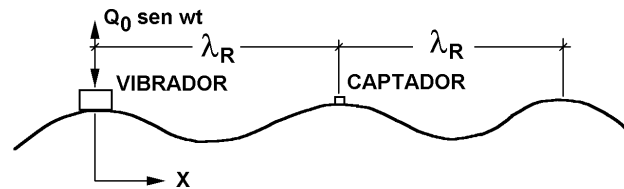
El haber asimilado el suelo a un semiespacio elástico es, muchas veces, una modelización sólo aproximada. En realidad, el terreno suele estar formado por capas de diversa naturaleza, por lo que una mejor aproximación es considerarlo como un semiespacio elástico estratificado. La heterogeneidad de los estratos hace que el sistema multicapa se comporte como un medio dispersivo frente a las ondas superficiales (se dice que un medio es dispersivo cuando dos ondas "monocromáticas" de frecuencias distintas se propagan a distinta velocidad). Precisamente, la determinación de la velocidad  $V_r$  en función de la frecuencia  $f$  (o de la longitud de onda  $\lambda_r = V_r/f$ ) es lo que se llama "curva de dispersión" y ha sido el objetivo teórico y experimental de esta técnica desde sus orígenes.

Los primeros ensayos conocidos de auscultación vibratoria por ondas superficiales fueron realizados en los años 30 en Alemania y en los Estados Unidos. En la década siguiente aparecen publicados trabajos llevados a cabo en Suecia y Holanda. Posteriormente, en el Road Research Laboratory de Inglaterra se realizó el desarrollo teórico y la técnica que haría posible la obtención de las curvas de dispersión (Jones, 1962). En los años sesenta, el Laboratorio Central de Ponts et Chaussées de Francia inicia los estudios con esta técnica

continuando asimismo su desarrollo (Guillemin et al., 1971). Es en la década siguiente cuando el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo (antigua denominación del actual Laboratorio de Geotecnia del Cedex) introduce esta técnica en España (Santamaría et al., 1973).

En todos los autores mencionados, más en otros muchos trabajos, el ensayo consistía en aplicar en la superficie del terreno y en dirección vertical vibraciones senoidales permanentes dentro de una amplia gama de frecuencias y encontrar los puntos de la superficie del terreno que están en fase con el vibrador (figura IV.2). De esta forma, conociendo la longitud de onda ( $\lambda_r$ ) y la frecuencia ( $f$ ), se obtenía la velocidad ( $V_r$ ). Repitiendo este proceso para diferentes frecuencias de excitación, se podía obtener la velocidad  $-V_r-$  en función de la frecuencia ( $f$ ) o de la longitud de onda ( $\lambda_r$ ). Esta variación de la velocidad ( $V_r$ ) con cualquiera de las dos variables ( $\lambda_r$  o  $f$ ) es lo que se llama, como se ha comentado anteriormente, curva de dispersión. A partir de esta última curva se obtenía la variación de la velocidad de las ondas S  $-V_s-$  en función de la profundidad  $-h-$  teniendo en cuenta su relación con  $V_r$  y lo comentado anteriormente sobre la profundidad del bulbo de energía de las ondas R. En este sentido, se suponía que la velocidad  $V_r$  obtenida a una frecuencia  $-f-$  es representativa de las propiedades del terreno a una profundidad igual a:  $h = k_1 \lambda_r$ . Un valor de " $k_1$ " muy utilizado, sobre todo en las primeras fases del método, era el de  $1/2$ . Esta hipótesis era una aproximación "grosera" ya que las propiedades de los materiales por encima y por debajo de  $1/2$  de  $\lambda_r$  afectan a  $V_r$ ; no obstante, este supuesto parecía razonable para materiales cuyo módulo de rigidez transversal  $-G-$  variara ligera y suavemente con la profundidad.

Este ensayo tal como se ha descrito es fácil de entender y de realizar pero tenía dos graves inconvenientes: el tiempo de ejecución del ensayo era excesivo y el método de "inversión" era muy simple y con frecuencia erróneo. Estas razones pueden haber sido la causa por la que el ensayo, tal como se ha descrito, no continuó su difusión y desarrollo.



**FIGURA IV.2** – Deformación superficial del semiespacio elástico ante una carga vertical aplicada en superficie.

#### IV.5.2 Descripción de la técnica AEOS utilizada

En las dos últimas décadas, el ensayo ha sido significativamente mejorado. Las nuevas fuentes de vibración utilizadas han sido de tres tipos: impacto (Heisey et al., 1982; Cuéllar, 1988 y Cuéllar et al., 1993a), aleatorias (Drnevich et al., 1985) y barrido lineal en frecuencias (Valerio, 1990 y Cuéllar y otros, 1993b). Estas nuevas fuentes vibratorias pueden generar simultáneamente un amplio rango de frecuencias, por lo que esto unido al análisis digital en el dominio de la frecuencia de las vibraciones registradas y al avance en el desarrollo teórico (Kausel 1981, Kausel & Roesset, 1981, y Kausel & Peek, 1982) ha originado un nuevo y definitivo auge de esta técnica.

Para la realización del ensayo AEOS se puede utilizar, en principio, como fuente vibratoria cualquiera que origine vibraciones en el terreno en el rango de frecuencias deseado y cuya magnitud sea medible. En los trabajos efectuados en el Vertedero de Valdemingómez se han usado tres tipos de fuentes de energía: barrido lineal de frecuencias, un dispositivo de impacto análogo al de

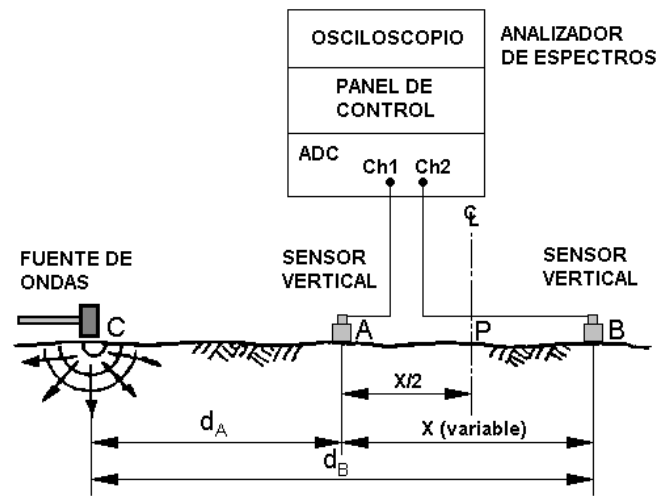


los FWD ( Falling Weight Deflectometer ) expresamente proyectado para este fin y una pala escavadora, (la utilización de esta última fuente se debió a que durante el ensayo se averió el sistema de impacto).

Para llevar a cabo el ensayo con el primer tipo de fuente, se utiliza un oscilador que genera una señal eléctrica de la forma  $F(t) = F_0 \sin(at^2 + bt)$  que, tras pasar por un amplificador de potencia, alimenta un vibrador electrodinámico modelo 812E/50LP de 500 Newtons. El objetivo de los otros tipos de excitación es generar energía de baja frecuencia (gran longitud de onda) para poder determinar las propiedades del terreno a la mayor profundidad posible.

La metodología utilizada en el ensayo con estos tipos de fuentes vibratorias se esquematiza en la Figura IV.3. Para conocer la velocidad de propagación de las ondas superficiales en la vertical de un punto determinado P se colocan dos transductores de aceleración o de velocidad -A y B- uno a cada lado de P y equidistantes del mismo. La fuente vibratoria aplicada en la superficie del terreno -C- genera en los puntos A y B dos señales temporales: A(t) y B(t). Con estas señales un PC calcula en tiempo real la función de coherencia -  $\gamma^2(f)$  - y la fase -  $\theta_{AB}(f)$ - de la función densidad espectral cruzada de energía  $G_{AB}(f)$  (Figura IV.4).

Las funciones  $\gamma^2(f)$  y  $\theta_{AB}(f)$  tienen las siguientes expresiones:  $\gamma^2(f) = |G_{AB}(f)|^2 / [G_A(f) \cdot G_B(f)]$ ;  $G_{AB}(f) = A(f) \cdot B^*(f)$ ;  $G_A(f) = A(f) \cdot A^*(f)$  y  $G_B(f) = B(f) \cdot B^*(f)$ . Siendo A(f) y B(f) las Transformadas de Fourier de A(t) y B(t), respectivamente. El asterisco (\*) indica el complejo conjugado y  $G_A(f)$  (o  $G_B(f)$ ) es la función densidad espectral de energía de A(t) (o B(t)). Al ser  $G_{AB}(f)$  una función de variable compleja tendrá módulo y argumento, siendo este último el que se ha llamado  $\theta_{AB}(f)$ .

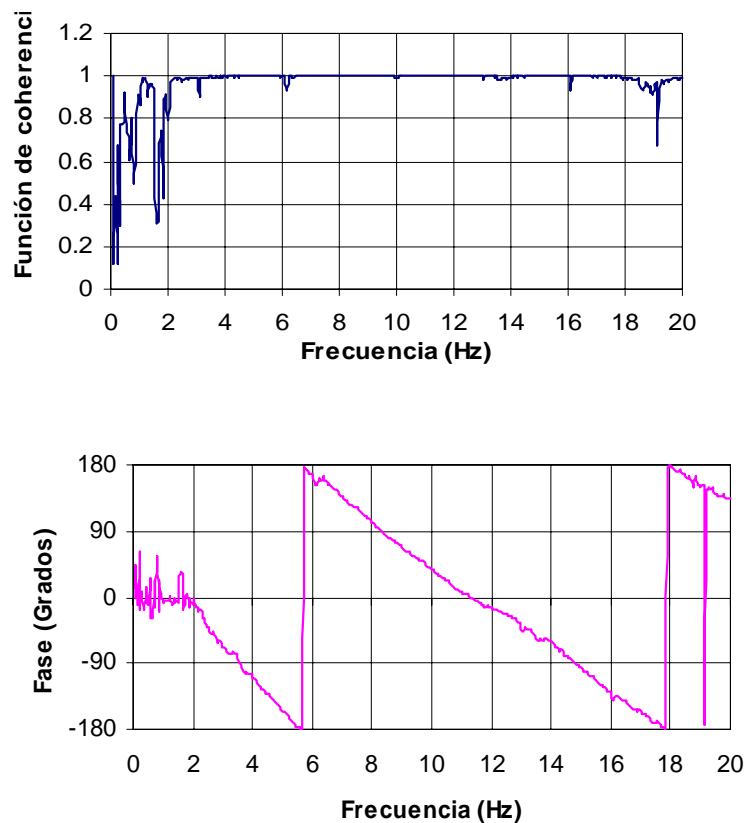


**FIGURA IV.3** – Disposición de los equipos en el método del Análisis Espectral de las Ondas Superficiales

Es interesante resaltar que aplicando el Método de la Transformada de FOURIER entre el "input" y el "output" en el sistema dinámico de la figura 4.4, se obtienen las siguientes relaciones:  $A(f) = H_{CA}(f) F(f)$  y  $B(f) = H_{CB}(f) F(f)$ . En donde:  $F(f)$  = Transformada de Fourier de la fuerza  $F(t)$  generada por la fuente vibratoria,  $H_{CA}(f)$  = Función de Transferencia de la fuerza aplicada en C y la aceleración (o velocidad) registrada en el punto A y  $H_{CB}(f)$  = Función de Transferencia de la fuerza aplicada en C y la aceleración (o velocidad) registrada en el punto B. Sustituyendo  $A(f)$  y  $B(f)$  en  $G_{AB}(f)$ , resulta:  $G_{AB}(f) = H_{CA}(f) H_{CB}^*(f) G_F(f)$ . Es decir, la fase  $\theta_{AB}(f)$  de  $G_{AB}(f)$  depende únicamente de las funciones de Transferencia del sistema dinámico pero no de la fuerza aplicada ya que  $G_F(f)$  es un valor real.

El significado de la función  $\theta_{AB}(f)$  es el siguiente: a cada "f" en Hz le corresponde un valor de  $\theta_{AB}(f)$ , estando relacionado este desfase con el tiempo de recorrido de una onda de frecuencia "f" entre ambos transductores -  $t_{AB}$  - mediante la conocida expresión:  $t_{AB} = \theta_{AB}(f)/(360.f)$ , en donde  $\theta_{AB}(f)$  viene expresado en grados y  $t_{AB}$  en segundos. Una vez conocido  $t_{AB}$  es inmediato determinar la velocidad de fase " $V_r$ " ya que:  $V_r = x/t_{AB}$ , siendo "x" la distancia entre

transductores (figura IV.3). La velocidad  $V_r$  así calculada corresponde a una longitud de onda  $\lambda$  de  $V_r/f$ . Repitiendo el proceso para diferentes frecuencias, se puede obtener la velocidad de fase " $V_r$ " en función de la frecuencia " $f$ " o en función de la longitud de onda " $\lambda$ ", es decir, la "Curva de dispersión experimental".



**FIGURA IV.4** – Función de coherencia -  $\gamma^2(f)$  – y de fase -  $\theta_{ab}(f)$  – calculadas por el ordenador (PC) para una separación de sensores de 8 m.

Por otra parte, es importante señalar que la función de coherencia  $\gamma^2(f)$  se utiliza para seleccionar el rango de frecuencias en las que se aplica el proceso de cálculo señalado en el párrafo anterior. Esto se debe a que  $\gamma^2(f)$  es una función, en el dominio de la frecuencia, análoga a la del cuadrado del coeficiente

de correlación de forma que:  $0 \leq \gamma^2 \leq 1$ . En esta expresión la función de coherencia

valdrá 0 cuando las señales A(t) y B(t) no estén relacionadas y será 1 cuando halla una dependencia lineal entre ellas. En general, se exige un valor igual o mayor de 0,90, en este caso se ha utilizado 0,95.

### **IV.5.3 Ensayos realizados**

Se han realizado dos ensayos (AEOS-1 y AEOS-2) en la zona elegida del vertedero. En las fotografías IV.2 y IV.3 se muestran los equipos utilizados.

Las vibraciones originadas en el terreno por las fuentes vibratorias empleadas han sido captadas mediante parejas de transductores con las siguientes características:

a) Transductores de aceleración:

- Acelerómetros piezoeléctricos PU-H: rango de frecuencias 5-10.000 Hz y sensibilidad de voltaje ( $S_V$ ) = 1 V/g.
- Acelerómetros piezoeléctricos PU-L: rango de frecuencias 1-250 Hz y  $S_V = 10$  V/g .

b) Transductores de velocidad:

- Geófonos de 1 Hz de frecuencia natural modelo Mark L-4C y con una  $S_V \approx 455$  V/m/seg.

La separación entre transductores -X- (ver figura IV.4) ha variado entre 0,50 m y 16 m y la distancia entre la fuente de ondas y el sensor más cercano a ella - $d_A$ - (ver figura IV.4) se ha tomado igual a la distancia entre transductores. En la

Tabla IV.2 se muestra la separación y dirección de cada uno de los ensayos ejecutados.



**FOTO IV.2** Equipo de Ensayo de ondas superficiales



FOTO IV.3 Interior del equipo móvil

TABLA IV.2

Dirección y separación de los ensayos

PUNTO	DIRECCIÓN	SEPARACIÓN DE SENSOR X (M)
AEOS 1	Longitudinal (L)	0,48 - 1,06 - 2,03 - 4,01 - 8 y 16
	Transversal (T)	0,51 - 1,03 - 2,07 y 4
AEOS 2	Longitudinal (L)	0,53 - 0,99 - 1,97 - 4 - 8 y 16
	Transversal (T)	0,51- 1,02 - 1,99 y 4

## **IV.6 TÉCNICAS ELECTROMAGNÉTICAS.**

### **IV.6.1 Descripción del equipo utilizado.**

Las técnicas electromagnéticas se basan en la respuesta del terreno inducida por un campo generado en su superficie. De las múltiples técnicas electromagnéticas disponibles, se escogió para este caso la de los Transitorios Electromagnéticos (TEM), que genera corrientes difusivas en el interior del terreno. Los equipos utilizados en esta técnica emplean dos antenas, una emisora (Foto IV.4) y otra receptora (Foto IV.5). La antena emisora (Tx) es en realidad un bucle formado por una o más vueltas de cable por el que se hace circular una corriente en forma de pulsos de signo alterno, y de una intensidad y frecuencia fijada por el usuario (Figura IV.5a). Lo ideal sería que estos pulsos fueran rectangulares, aunque en la realidad ni la subida ni la bajada de la corriente son inmediatas, pudiendo asimilarse ambas por una exponencial y rampa lineal, respectivamente.



**FOTO IV.4** - Bucle emisor (tx) empleado en los sondeos electromagnéticos transitorios



**FOTO IV.5** - Antena receptora (rx) y receptor empleado en los sondeos electromagnéticos transitorios

La circulación de esta corriente primaria - por el bucle emisor- variable con el tiempo, crea, según la Ley de Ampère, un campo magnético primario que, a su vez, genera por la Ley de Faraday unas corrientes difusivas (Figura IV.5c) en el terreno (Figura IV.6) que dan lugar a una fuerza electromotriz (f.e.m.) como se muestra en la figura IV.5b.

Esta f.e.m. es directamente proporcional a la velocidad de caída del campo magnético primario, por lo que interesa que el tiempo de desconexión ("turn off time" o  $\Delta t$  en la Figura IV.5a) sea lo más corto posible, aunque, como contrapartida, el terreno puede oponer resistencia a absorber la brusca reducción de la intensidad primaria. A continuación, la disminución de estas corrientes difusivas (variables con el tiempo) genera un campo magnético



secundario (Figura IV.5c) de pequeña amplitud y rápido decrecimiento que se puede captar con la antena receptora (Rx). La forma de disminución de este campo magnético secundario depende de las características conductivas del terreno siendo fundamental la información que proporciona el primer tramo de la curva ya que representa las propiedades eléctricas de las capas más superficiales del terreno.

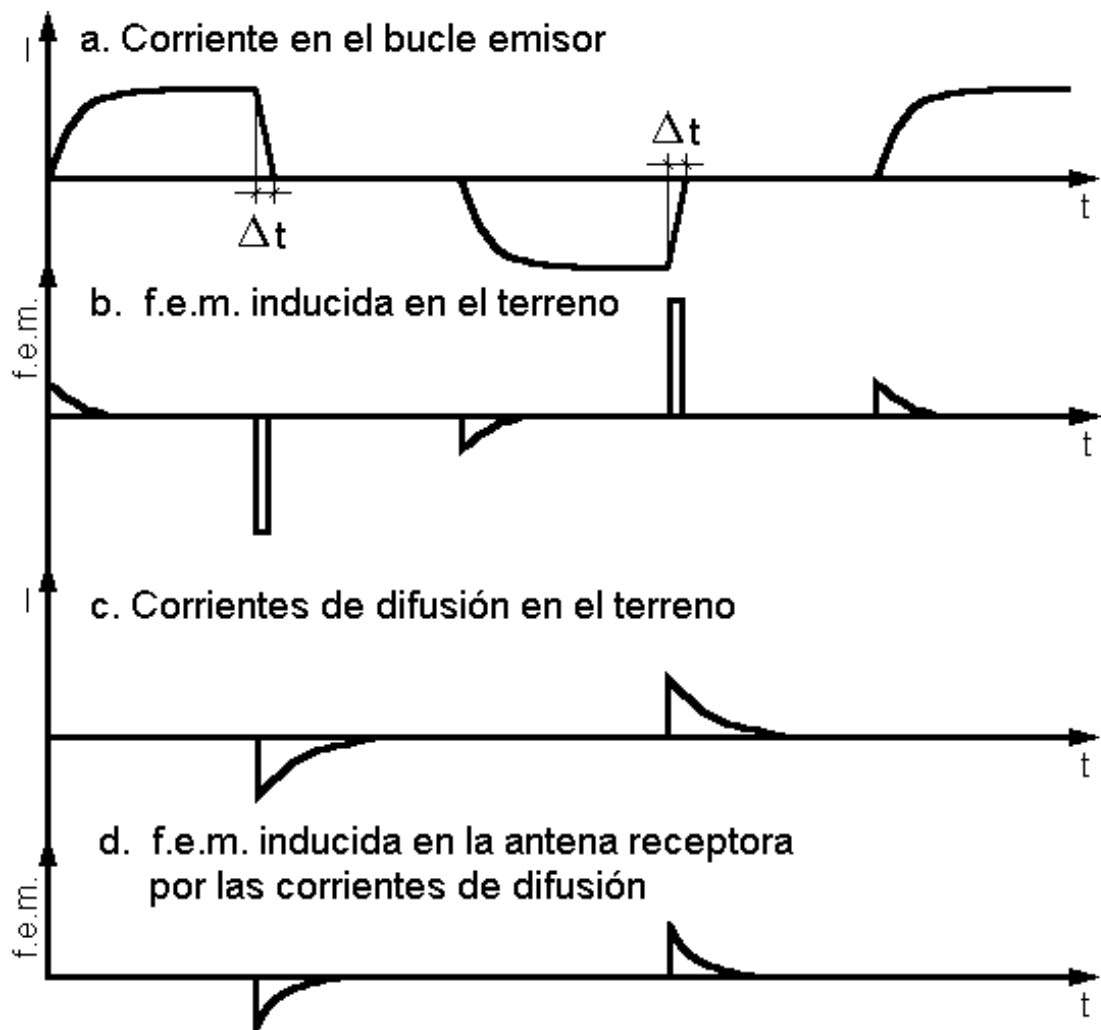
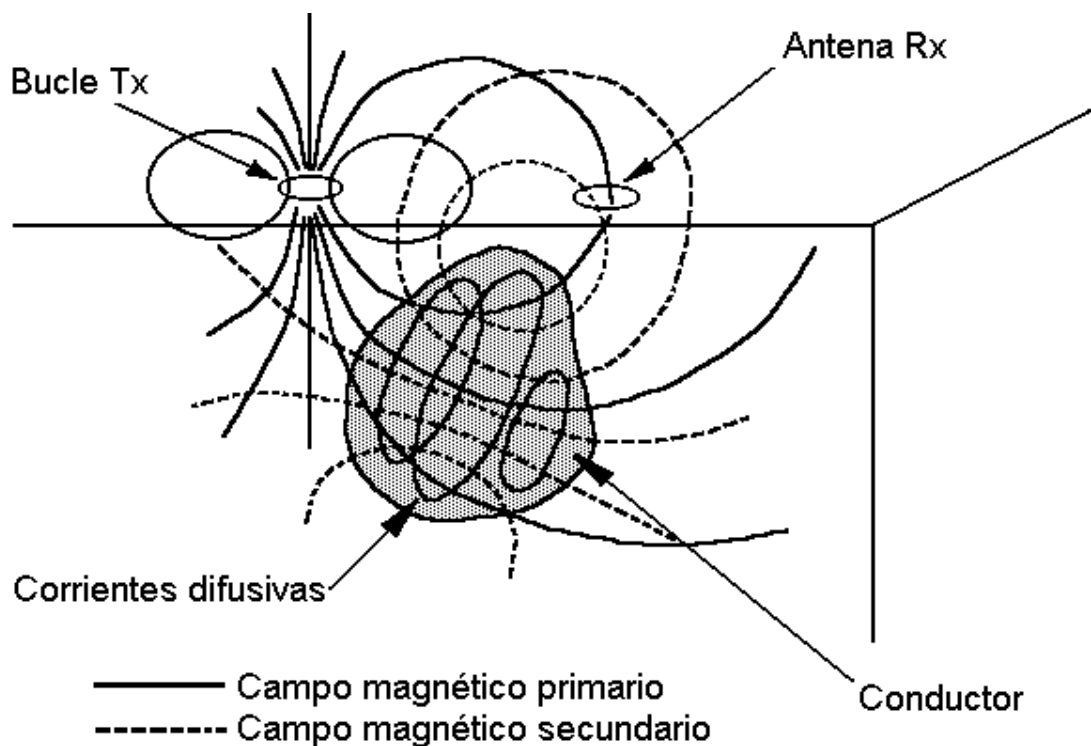


FIGURA IV.5 - Formas de las ondas del sistema

Para medir el campo magnético secundario, el receptor "digitaliza" dicha curva o transitorio en una serie de ventanas o canales, a partir del momento en el que se corta la corriente del bucle emisor (Figura IV.7). Como es imposible la medida

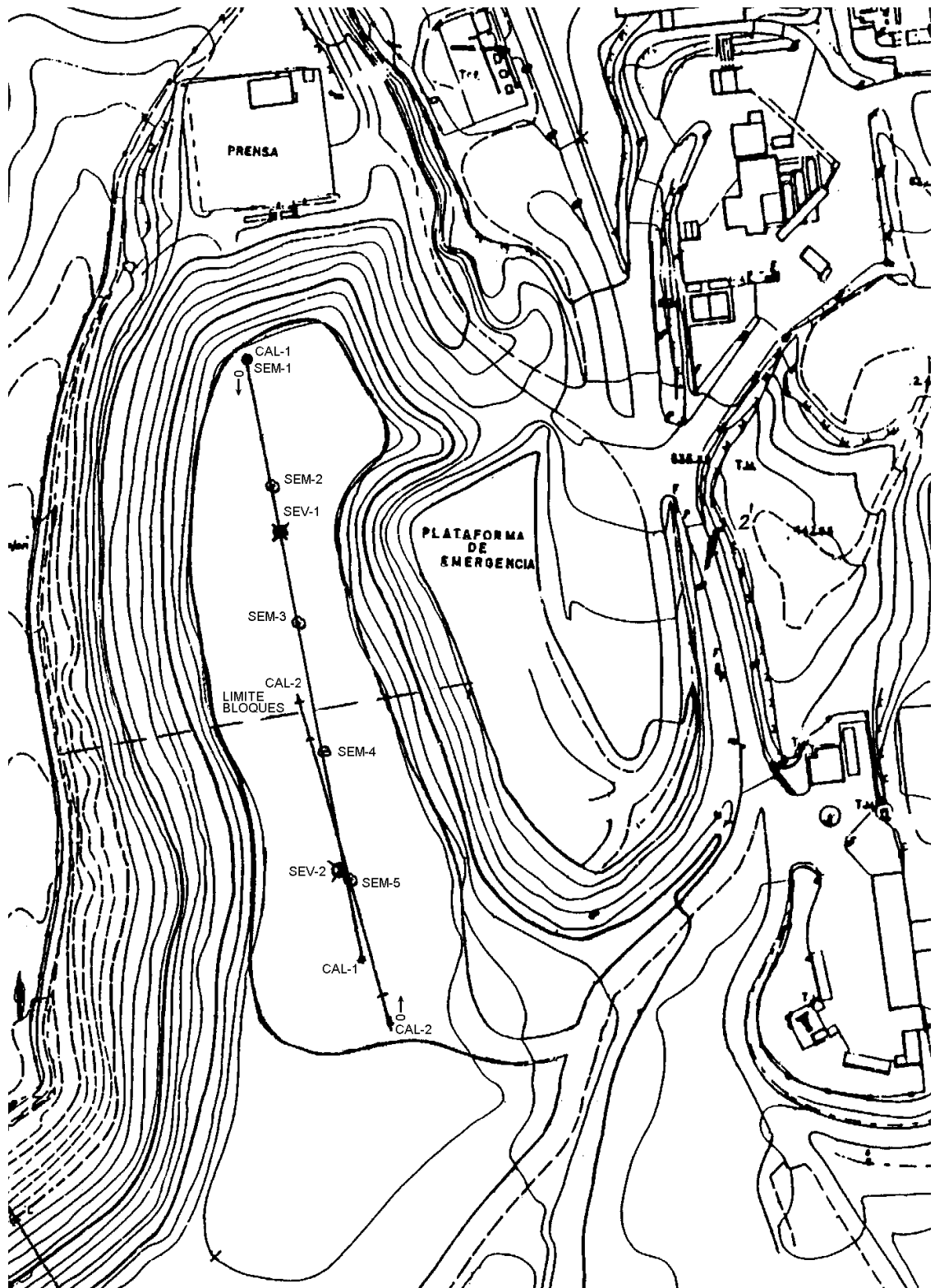
instantánea una vez se ha cortado la corriente, se produce un retardo en la adquisición de los datos que se traduce en una pérdida de información. Obviamente la calidad de un equipo de transitorios se mide por su capacidad de minimizar este retraso. La existencia de este retraso implica que el receptor sea "ciego" a las capas más superficiales.



**FIGURA IV.6** - Corrientes difusivas en un conductor

Este proceso se repite abriendo y cerrando el circuito emisor varios centenares de veces para cada frecuencia. Las lecturas realizadas en el mismo instante de cada ciclo se someten a un tratamiento estadístico con el fin de reducir el nivel de ruido (instrumental o ambiental) que pueda afectar a la medida. Para la interpretación de las curvas se recurre a aproximar en cada instante la corriente difusiva como un anillo ideal de corriente concéntrico con el bucle emisor a una profundidad y radio creciente e intensidad decreciente.





**FIGURA IV.8 -** Plano de situación de los ensayos geofísicos realizados

## IV.7 MÉTODOS ELÉCTRICOS

### IV.7.1 Descripción del equipo utilizado

Todas las técnicas de resistividad eléctrica (sondeo eléctrico vertical, calicata eléctrica, método de bloques, *miss à la masse*, etc.) se basan en que la distribución del potencial eléctrico alrededor de un electrodo de corriente hincado en el suelo depende de la resistividad eléctrica del terreno que se encuentre a su alrededor. Dicha propiedad, representada por el símbolo “ $\rho$ ” y expresada en ohmios-metro es una característica intrínseca al medio en que se determina, de la misma manera que lo es su densidad o permeabilidad al agua.

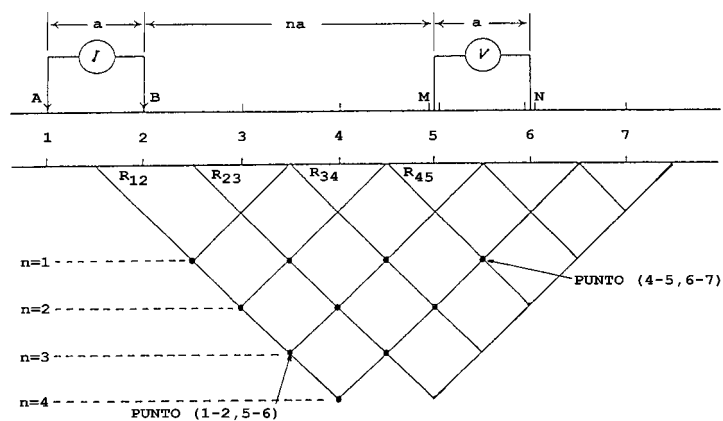
Cuando en un terreno homogéneo se hincan dos electrodos tales como el A y B se crea entre ellos una corriente continua de intensidad  $I$ , se puede medir la diferencia de potencial eléctrico  $V$  entre dos electrodos M y N, y determinar la resistividad  $\rho$  del terreno mediante la siguiente expresión:

$$\rho = \pi \cdot k \cdot \frac{V}{I} \quad (\text{IV.3})$$

donde  $K$  es un factor geométrico que depende de la manera en la que se dispongan los electrodos.

En la práctica, las medidas se realizan siempre en materiales heterogéneos, por lo que al emplear la fórmula antes descrita se calcula una “resistividad aparente”,  $\rho_a$  cuyas variaciones obtenidas a lo largo de un perfil determinado (modificando ó manteniendo el valor de  $K$ ) pueden utilizarse cualitativamente como indicadores de variaciones existentes en la composición del terreno, o cuantitativamente una vez invertidos los datos obtenidos in situ, para obtener la resistividad real y el espesor de las distintas capas.

En la Figura IV.9 se ilustra la disposición de electrodos en el método Dipolo-Dipolo utilizado frecuentemente por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX para llevar a cabo calicatas eléctricas manteniendo fija la separación entre electrodos pero moviendo todo el conjunto sobre el área de interés para detectar los cambios laterales de resistividad que puedan existir en un espesor determinado de terreno. De esta manera se obtienen datos suficientes para poder dibujar una seudosección de resistividades aparentes del terreno, uniendo mediante líneas que formen  $45^\circ$  con la horizontal los puntos medios de los dipolos de cada posición. Este método de representación, proporciona únicamente una idea orientativa o cualitativa de cómo varía la resistividad aparente a lo largo del perfil elegido. Es por ello necesario recurrir a otros procedimientos de cálculo tales como el de los Elementos Finitos o Diferencias Finitas, que resolviendo la ecuación de Poisson que rige el fenómeno físico, permiten modificando paso a paso las resistividades reales del terreno, minimizar las diferencias entre resistividades aparentes observadas y calculadas.



**FIGURA IV.9** - Disposición de electrodos para la configuración dipolo-dipolo. El equipo utilizado está compuesto de un resistivímetro de cinco canales desarrollado por la División de Técnicas Físicas del CEDEX, un conjunto de electrodos y las bobinas de cable (Fotos IV.6 y IV.7).

Básicamente, el resistivímetro del CEDEX es un equipo portátil alimentado por baterías recargables, que le proporcionan una autonomía mínima de ocho horas, constituido por una unidad central y una caja de conexiones eléctrica dipolo-dipolo.



**FOTO IV.6** – Disposición de los electrodos para la realización de la calicata eléctrica



**FOTO IV.7** - Resistivímetro desarrollado en el CEF para la realización de ensayos eléctricos

#### **IV.7.2 Ensayos eléctricos realizados**

Sobre la misma línea que unen los sondeos electromagnéticos se realizó una calicata eléctrica (dipolo-dipolo) de 230 m de longitud comenzando desde el extremo N-W. Dicha calicata, denominada CAL-1, se obtuvo mediante 17 desplazamientos de un extendimiento de 70 metros de longitud, compuesto por un dipolo de corriente y cinco dipolos de potencial ( $n=5$ ) con separación de electrodos de 10 metros, y, finalmente, para cubrir el perfil, cuatro extendimientos diferentes de 70, 60, 50 y 40 metros de longitud, con 4, 3, 2 y 1



dipolos de potencial ( $n = 4, 3, 2, 1$ ), respectivamente, y todos ellos con su correspondiente dipolo de corriente.

En la zona de vertidos sin compactar se realizó otra calicata de 100 m de longitud comenzando por el extremo S-E. Dicha calicata, denominada CAL-2, se obtuvo mediante 4 desplazamientos de un extendimiento de 70 m de longitud, compuesto por un dipolo de corriente y cinco dipolos de potencial ( $n=5$ ) con separación de electrodos de 10 metros, y, finalmente, para cubrir el perfil, cuatro extendimientos diferentes de 70, 60, 50 y 40 metros de longitud, con 4, 3, 2 y 1 dipolos de potencial ( $n = 4, 3, 2, 1$ ), respectivamente, y todos ellos con su correspondiente dipolo de corriente.

Complementando a estas dos calicatas eléctricas se llevaron a cabo dos sondeos eléctricos verticales también situados sobre la línea que une los sondeos electromagnéticos y en la que se trazó la calicata CAL-1; el primero, SEV-1, con 160 m de extensión de alas, se centró en la zona de vertidos sin compactar, mientras que el segundo, SEV-2, en la zona de bloques, se extendía 120 m. Estos dos sondeos eléctricos verticales, junto con las dos calicatas se representan en el plano de situación de la Figura IV.8.

# CAPÍTULO V

## CAPÍTULO V

EQUIPOS Y TÉCNICAS DE  
**EQUIPOS Y TÉCNICAS DE**  
INSTRUMENTACIÓN Y AUSCULTACIÓN  
INSTRUMENTACIÓN Y AUSCULTACIÓN

## **V.1 INTRODUCCIÓN**

La fase posterior a la campaña de ensayos de reconocimiento del terreno, llamada de "instrumentación", consistió de la instalación de los siguientes equipos:

- 18 referencias topográficas de nivelación,
- 1 punto fijo para poder dar cotas absolutas a las distintas referencias topográficas de nivelación,
- 2 líneas continuas de asientos,
- 1 inclinómetro,
- 2 micrómetros deslizantes,
- 1 línea de termistancia,

Tras la instalación de los equipos citados, se empezó la construcción del terraplén experimental que constituiría la tercera fase de la campaña de investigación prevista.

Las referencias topográficas tenían la finalidad de investigar los movimientos verticales provocados por el terraplén experimental. El objetivo del empleo de las líneas continuas de asiento era seguir el curso de los asientos en un número determinado de secciones y de puntos del terraplén. El uso del inclinómetro se dirige principalmente a la medida de desplazamientos horizontales, mientras que los micrómetros deslizantes tenían la función de medir los desplazamientos verticales de la masa de vertidos, metro a metro.

Por último, el objetivo de la instalación de la línea de termistancia era medir las variaciones de temperatura en profundidad a lo largo del tiempo, con la finalidad de observar su influencia en los procesos de deformación ocasionados por los cambios fisicoquímicos que son esperados en este tipo de material.

Con excepción de la línea de termistancia, todos los equipos tenían la finalidad de obtener información a cerca de los asientos y desplazamientos horizontales con relación al tiempo y la carga externa provocada por la construcción del terraplén experimental.

La Figura V.1 enseña en planta, el área de prueba del vertedero con el terraplén y la debida instrumentación. A continuación se describen los equipos utilizados.

## V.2 CONSTRUCCIÓN DEL TERRAPLÉN EXPERIMENTAL

El terraplén de carga se construyó en la zona elegida después de la realización del reconocimiento del terreno y la instalación de la instrumentación y obviamente de la toma de la lectura cero o de referencia de cada uno de los aparatos utilizados.

El terraplén se hizo en seis tongadas de tierras, tal como se indica en la Tabla V.1.

**TABLA V.1**

Procedimiento de construcción del terraplén experimental

TONGADA	ESPEJOR DE TONGADAS	ALTURA DEL TERRAPLÉN	NÚMEROS DE CAMIONES
1°	0,85	0,85	40
2°	0,75	1,60	30
3°	0,70	2,30	20
4°	0,80	3,10	12
5°	0,70	3,80	7
6°	0,20	4,0	7

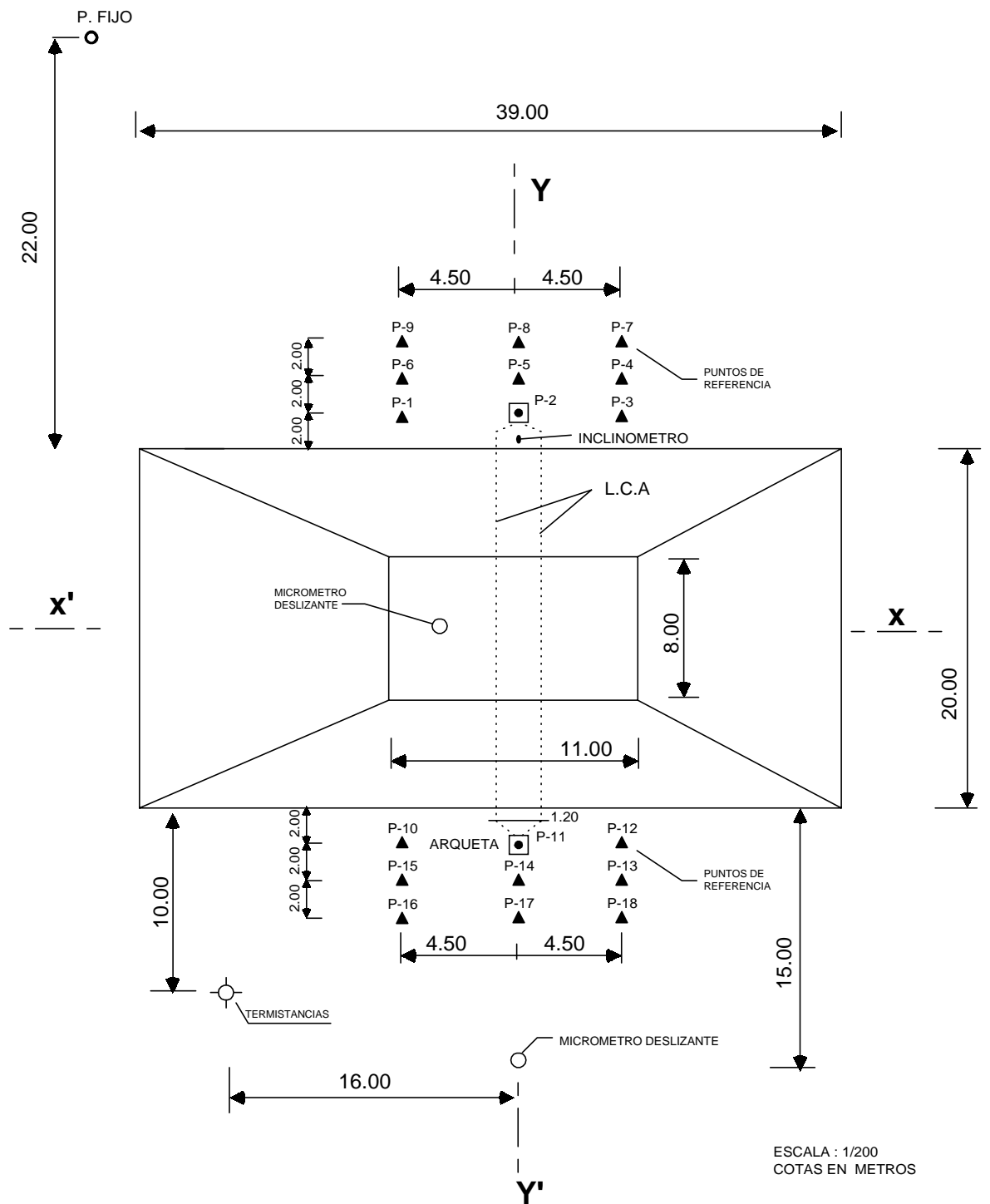


FIGURA V.1 – Planta de disposición de la instrumentación

Las tongadas de tierra eran vertidas por los camiones, extendidas con una pala y refinadas con una motoniveladora sin aplicar ninguna máquina compactadora. La Foto V.1 muestra la construcción del terraplén experimental.



**FOTO V.1** - Construcción del terraplén de carga

### **V.3 CAMPAÑA DE INSTRUMENTACIÓN Y AUSCULTACIÓN**

#### **V.3.1 Control Topográfico**

La realización de la auscultación de movimientos mediante control topográfico se llevó a cabo a través de medidas de nivelación (desplazamientos verticales) y de triangulación topográfica.

Con la finalidad de investigar los movimientos verticales provocados por el terraplén de carga, se dispusieron 18 de puntos de referencia situados a ambos lados del terraplén.

La determinación del asiento superficial se realizó por medio de nivelaciones topográficas empleando un nivel de precisión Zeiss Ni – 2 ( Foto V.2) con micrómetro de placa plana incorporado y una mira de invar con doble escala y longitud de dos metros.



**FOTO V.2** - Nivel de precisión Zeiss NI – 2

Este aparato, gracias al micrómetro de placa plana, permite ajustar exactamente el trazo horizontal sencillo del campo visual del anteojo en el centro de una división de 5 mm de la mira de invar utilizada. El tambor micrométrico que al girar acciona el movimiento de inclinación de la placa plana, está subdividido en once trazos numerados y, cada uno de los intervalos comprendidos entre estos trazos está a su vez dividido por un corto trazo central, de manera que fácilmente pueda apreciarse 1/100 del intervalo de la mira. La exactitud está en relación directa con la precisión del ajuste sobre el centro del campo de la mira.

Con el micrómetro de placa plana es posible alcanzar la elevada exactitud de  $\pm 0,05$  mm. Además, gracias a la gran rapidez de medición, las nivelaciones con este aparato están exentas en alto grado de los errores sistemáticos que pudieran producirse.

Todas las nivelaciones realizadas parten de un punto fijo instalado para este fin en el sondeo S-1. La instalación de este punto fijo, como también de las 18 referencias topográficas, se describen en los apartados siguientes:

#### **V.3.1.1 Punto Fijo**

El punto fijo fue instalado en el sondeo S-1 a una profundidad de 30 m de los cuales 2,5 m era el terreno natural. Para su ejecución se introdujo una tubería de P.V.C. con diámetro de 75 mm en cuyo interior se alojó una varilla metálica de 30 mm de diámetro. Una vez sacada la tubería de 75 mm, se cementó el espacio anular entre esta y la varilla.

En este sondeo, cuando se hacía la maniobra de recuperación de la tubería de revestimiento de  $\phi$  98 mm que llegaba hasta 27,5 m de profundidad, aparecieron emanaciones de gases, precisamente a 26 m de profundidad, que ha sido detallado en el apartado donde se describe los sondeos. Entre otras decisiones, se resolvió sacar la referida tubería con sumo cuidado y de dejar en



el interior del sondeo los 19 m de tubería de  $\phi$  113 mm como también 11 m de tubería de  $\phi$  128 mm. El espacio anular entre estas dos tuberías se rellenó con arena. El tiempo empleado en la ejecución de este sondeo fue de 10 días.

### **V.3.1.2 Puntos de Referencia**

Los puntos de referencia consistían en trozos de varilla de acero corrugados de 12 mm de diámetro, clavados cerca de 40 cm en la capa de sellado superior del vertedero y a su vez embutidos en un tubo de 100 mm de diámetro lleno de hormigón. La foto V.3 muestra en detalle un punto de referencia.



**FOTO V.3** - Detalle del punto de referencia

Como se ha comentado anteriormente, fueron instalados 18 puntos de referencia, 9 en el lado Norte del terraplén y 9 en el lado Sur.

La colocación de estos puntos, en cada uno de los lados, se ha realizado en tres filas cada una de tres puntos. La fila central se hacía coincidir con el eje transversal del terraplén de carga. La separación entre filas era de 4,5 m de distancia. En la Figura V.1 del apartado inicial y en la Foto V.4 se muestran la distribución de los puntos en el área de prueba.



**FOTO V.4** - Distribución de los puntos de referencia en el lado norte

### **V.3.2 Línea Continua de Asiento**

#### **V.3.2.1. Definición**

Corresponde al aparato diseñado para el control de asiento en áreas no accesibles normalmente mediante las técnicas usuales de control, con el nombre de Hidrostatic Profil Gauge C-1. Con este método es posible seguir el

curso de los asientos en un número determinado de secciones y de puntos del cimientado de un terraplén.

### **V.3.2.2 Descripción del aparato**

El sistema consiste en un transmisor de presión protegido por un tubo de acero inoxidable y un conjunto de tuberías almacenados en un carrete. Las tuberías se componen a su vez de un tubo exterior de nylon, relleno con la mezcla de agua-anticongelante, y un tubo también de nylon de menor diámetro, que sirve como referencia para la presión de la atmósfera y para contener en su interior un cable mediante el cual se transmite la lectura de las modificaciones del transmisor de presión.

El nivel de la superficie del líquido deberá antes de iniciar las lecturas ser igual a cero, considerándose como tal cuando coincide con la señal de referencia grabada en el aparato. Este cero de la columna corresponde al máximo nivel del punto de referencia.

El extremo libre de la manguera exterior termina en un recipiente, sonda, dentro del cual está la membrana del transmisor de presión rodeada de líquido. La presión en la sonda corresponderá en cada momento a la diferencia de altura entre ésta y la superficie libre del líquido en la columna. Esta presión es captada por el transmisor de presión y enviada su señal al instrumento de lectura.

El nivel de la sonda se obtiene de:

$$h_z = (h_0 + d) - h_1 \quad (V.1)$$

siendo:

$h_z$  = cota del nivel de la sonda

$h_0$  = cota del punto de referencia

$d$  = distancia entre el hito de referencia y nivel de la superficie del líquido  
(cero)

$h_1$  = lectura del aparato ( posición hidrostática)

Las medidas se repiten en tantos puntos como se desea dentro de la tubería situada bajo el terraplén, por ejemplo cada uno o dos metros. Los cambios de nivel de la tubería, o asientos, se calculan realizando las medidas de tiempo en tiempo.

La línea continua de asiento presenta las siguientes especificaciones:

- Carrete

Carrete en fibra con alojamiento para tubería, de nivel de referencia, instrumento de lectura digital y sistema de tubería con 100 mm de longitud:

Diámetro = 600 mm

Altura = 250 mm

Peso = 23 kg

Diámetro exterior de tubería = 14 mm

Diámetro de sonda de prueba = 25 mm

- Instrumento de lectura

La lectura se presenta en una pantalla LCD que indica valores comprendidos entre 0 y 10.000 mm, que es el rango de medida más frecuente (opcionalmente puede fijarse en rango entre 0 y 20.000 mm). También se incluyen en la unidad de lectura el interruptor de puesta en marcha, el potenciómetro de ajuste de cero, el ajuste de calibrado, doce baterías y un indicador del estado de las baterías.

Las baterías son de 1,5 V del modelo normalizado IECL14. Su duración permite varios meses de trabajo y pueden cambiarse fácilmente quitando los seis tornillos que mantienen la tapa inferior de la unidad.

Precisión de la unidad de lectura = 0,01%  $\pm$  2 unidades.

Coeficiente de temperatura = 50 ppm / °C.

- El transmisor de presión

Efecto combinado de no linealidad / histeresis =  $\pm$  0,06 % B.S.L.

Efecto de temperatura =  $\pm$  0,3 % error total entre  $-2$  ° C y  $+30$  ° C

Rango de medida = 0 – 1 bar ( 0 – 100 kPa)

Sobrepresión máxima tolerable = x 4

Alimentación = 9 – 30 V, c.c.

Salida = 4 – 20 mA., c.c.

### **V.3.2.3 Instalación**

El ensayo consiste en colocar una tubería de plástico resistente de 80/100 mm de diámetro sobre la superficie del terreno orientada convenientemente con respecto a los ejes del terraplén.

Para la instalación de las líneas continuas de asiento se siguieron los pasos siguientes:

- Excavación de una zanja de 1,50 m de ancho y 0,50 m de profundidad bajo el terraplén de carga. En el fondo de ésta se colocó un geotextil del mismo ancho y largo que la zanja donde se apoyaron con una separación de 1,20 m las dos tuberías de plástico reforzado con un diámetro interior de 100 mm

y 25 m de longitud, con el objeto de protegerlas de las irregularidades del terreno. También una vez colocadas las dos tuberías se protegió con una capa de arena con un espesor mínimo de 30 cm sobre la que se vertió el material procedente de la excavación de la zanja, para que de esta forma las tuberías no sufrieran daño al paso de la maquinaria durante la colocación de las capas de relleno del terraplén de carga.

- Realización de un hito de medida para las dos L.C.A, con una varilla de acero inoxidable, con las dimensiones adecuadas donde colocar el aparato durante la toma de lecturas
- Construcción de dos arquetas para las dos líneas. Una para proteger el hito de medida y otra de menor dimensión para proteger el final de la tubería y la cuerda de tiro de la sonda alojada en el interior de cada una de las tuberías.

#### **V.3.2.4 Lecturas**

Antes de empezar la lectura se hace el calibrado del aparato colocado en un trípode adecuado para este fin.

Según la práctica habitual, se empieza introduciendo la sonda hasta el punto más distante dentro de la tubería correspondiente al perfil a controlar, tirando de la cuerda atada a la sonda. Tras esto, se va posicionando la sonda en cada uno de los puntos de medida ( en cada metro), tirando de la tubería y enrollando otra vez en el carrete la parte que va quedando libre después de cada una de las medidas. Es conveniente tener en cada momento la mínima longitud expuesta para facilitar la estabilización de las lecturas. De todas las maneras, en cada punto es conveniente esperar unos segundos hasta conseguir la estabilización de la lectura.



**FOTO V.5** Esquema de instalación de la Línea Continua de Asientos

Durante la toma de lecturas se observa de vez en cuando el nivel de referencia, y que las referencias creadas por el cambio de temperatura entre la parte libre de la tubería y la enrollada en el carrete puedan provocar ligeros cambios en el nivel de referencia.

También, dada la proximidad de la base del hito de referencia al pie del terraplén, es necesario cuantificar esta influencia con el objeto de hacer la corrección necesaria y conseguir el asiento neto; para lo cual, antes de cada lectura se toma la cota del hito.

### **V.3.3 Inclinómetro**

#### **V.3.3.1 Definición**

El sistema de toma de datos inclinométricos constituye un conjunto inteligente alimentado por batería, portable y de almacenamiento/lectura de datos que utiliza la más reciente tecnología en microprocesadores de 16 bits y circuitería soporte. Su diseño incorpora modos de espera que minimizan el consumo eléctrico y un gran espacio de memoria direccionada que reduce las constricciones originadas por el almacenamiento del conjunto de programa y de datos. El uso del inclinómetro se focaliza principalmente en la medida de desplazamiento laterales del suelo, masas rocosas y estructuras de ingeniería civil.

#### **V.3.3.2 Descripción del Aparato**

El sensor Inclinométrico utilizado es del tipo biaxial, incorpora dos servo-acelerómetros que son sensibles a la inclinación con relación al plano vertical. Dos conjuntos de guías rodantes sobre el sensor, en unión con cuatro guías fijas dispuestas a intervalos de 90° sobre la tubificación de acceso, aseguran



una alineación constante del sensor relativa a la orientación lograda para el sistema de tuberías de acceso.

Esta tubería de acceso se ha diseñado de forma robusta pero mantiene unas características tales de flexibilidad que permiten su doblado sobre cualquier sentido lateral para absorber los movimientos que tengan lugar. Por ejemplo, si la tubería atraviesa una superficie de deslizamiento activa, tenderá a desarrollar una forma en perfil de tipo convexo-cóncava, con el punto de inflexión de la curva, aproximadamente al nivel de la superficie deslizante. El diseño del sensor y de la tubificación de acceso, permite que estos movimientos laterales se monitoricen con un alto grado de sensibilidad y precisión.

Siempre que sea posible, en el interior del taladro, la base del entubado de acceso se debe emplazar en estratos firmes más allá de las zonas previstas de movimientos, de tal forma que los movimientos laterales que puedan ocurrir sean fácilmente referibles a posiciones fijas absolutas. Los acoplamientos de tipo telescópico, deben usarse cuando se esperan situaciones de compresión-extensión en los elementos tubulares de acceso.

Las características principales del sistema empleado son:

- Sensor inclinométrico ( torpedo o sonda)

La sonda es de tipo biaxial, que permite lecturas simultaneas de dos direcciones, está formada por un cilindro de acero inoxidable de 70 cm de longitud y 5 cm de diámetro, completamente estanco para evitar la entrada de agua en su interior donde van alojados dos sensores de inclinación tipo servo-acelerómetro, que permiten la medida según dos componentes ortogonales de la inclinación, con rango de medida de  $\pm 30^\circ$ . La sonda está dotada en cada extremo de un juego de ruedas guía con resorte que hace posible su

deslizamiento en el interior de la tubería inclinométrica de acceso, con cuatro acanaladuras longitudinales, instalada en el interior de un sondeo.

La sensibilidad es de 0,01 mm y las variaciones por efecto de la temperatura inferior a 0,015 mm por grado centígrado. El peso de la sonda es de 3 Kg.

- Unidad de lectura digital

El lector digital es un instrumento portátil, alimentado por una batería de 12 V. c.c. recargable, incorpora el circuito de medida, y dos voltímetros digitales bipolares de 4 dígitos cada uno (tres para indicar las unidades y uno para decimales), con escala graduada en milímetros, además del indicador de signo. Se requiere que esta unidad pueda funcionar correctamente entre  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El rango de medida es de  $\pm 50\text{ mm}$  y la resolución de 0,1 mm.

Es de fácil manejo ya que las dimensionales son las siguientes:

Longitud	350 mm
Altura	150 mm
Anchura	250 mm
Peso	5 kg

Esta unidad está dotada de un cargador de batería (220 V. a.c.  $\pm 10\%$  y 50 – 60 hercios) para recargar la batería de la unidad de lectura cuando se verifique que no se encuentra entre 13,5 V y 11 V. A plena carga ha de ser capaz de funcionar de forma continua de 8 a 10 horas.

- Cable eléctrico y de arrastre

El cable es del tipo manguera, reforzado en su interior por un cable de acero para evitar que se puedan producir tracciones en los conductores al subir y bajar la sonda por la tubería inclinométrica. Garantiza la correcta transmisión

de la señal entre la sonda y la unidad de lectura. Es multiconductor, resistente a la humedad, con marcas a cada 0,5 m, un diámetro no superior a los 10 mm y un peso inferior a 180 gramos por metro.

El tambor donde se aloja el cable es capaz de almacenar 100 m del mismo y está construido de materiales rígidos. En un costado del tambor lleva solidario al mismo un trozo de tubería inclinométrica de unos 70 cm de longitud para alojar también la sonda inclinométrica durante los períodos de transporte. Las dimensiones máximas no deben de superar los siguientes valores:

Longitud	500 mm
Altura	600 mm
Anchura	275 mm

- Tubería inclinométrica

La entubación de acceso está construida de aluminio con cuatro guías interiores para alinear el conjunto en la dirección de la medida requerida. Las dimensiones son las siguientes:

- Longitud del tubo = 3 m  
Diámetro interior = 50 mm  
Diámetro exterior = 53 mm y con las guías = 57 mm  
Peso = 0,9/kg/m
- Elementos de acoplamiento ( manguitos)  
Longitud = 0,30 m  
Diámetro interior = 53 mm  
Diámetro exterior = 57 mm y con las guías 63 mm  
Peso = 325 g

- Tapones de cierre
  - De fondo: diámetro interior = 57 mm
  - De cabeza: diámetro interior 57 mm

### **V.3.3.3 Instalación**

El inclinómetro fue instalado en el interior del sondeo S-2 conforme a la Foto V.6. La zona anular entre la tubería inclinométrica y el terreno fue rellenada por una lechada de cemento.

Los tubos de 3 m de longitud se unían entre ellos por medio de acoplamientos o manguitos sujetos con remaches colocados en posiciones equidistantes entre las guías para asegurar la libre circulación de la sonda inclinométrica. Un elemento de terminación (tapón de fondo) se dispone al final de la entubación de acceso. Para evitar la introducción del relleno en la tubería de acceso, se aplicaba a las juntas y remaches un mastic de sellado y varias vueltas de cinta adhesiva.

Para impedir la entrada de elementos extraños se colocó un tapón de cabeza en el extremo superior de la tubería. Este tramo de la tubería que es libre se protege mediante una arqueta con tapadera metálica dotada de un adecuado elemento de cierre.

### **V.3.3.4 Lecturas**

Una vez instalado el instrumento se efectuó la primera medida o lectura origen. Las lecturas son realizadas de la forma siguiente:

Valiéndose de las posiciones relativas de las ruedas se establece una orientación del sector móvil, bajándolo por los carriles que definen la dirección A – B hasta llegar al fondo. En esta posición se debe de permanecer de 10 a

15 minutos para que los circuitos electrónicos se atemperen. Seguidamente asciende éste a intervalos de 50 cm, haciendo en cada caso las lecturas correspondientes.

Una vez alcanzada la boca del tubo, se extrae el torpedo, se gira 180 ° y se vuelve a introducir hasta el fondo de la tubería. Se repite el proceso, dejándolo de 10 a 15 minutos en el fondo y tomado lecturas a cada 50 cm. Determinando así la dirección C-D.

Como la finalidad del inclinómetro es controlar los cambios de inclinación de la tubería producidos por los movimientos del terreno, el método que se sigue es cuantificar, para cada profundidad, los cambios de inclinación que se producen con respecto a la primera lectura. Si estos movimientos se integran se obtienen los movimientos acumulados.



**FOTO V.6** - Montaje del sistema inclinométrico

### **V.3.4 Micrómetro Deslizante**

#### **V.3.4.1 Definición**

El sliding micrometer o micrómetro deslizante es un instrumento de alta precisión desarrollado por el Instituto Federal de Tecnología de Zurich, capaz de determinar el desplazamiento axial relativo a lo largo de un sondeo.

#### **V.3.4.2 Descripción del aparato**

El equipo (Figura V.2) consta de dos partes fundamentales, una parte fija de PVC y una parte móvil. La parte fija se hace solidaria al sondeo mediante una lechada y está compuesta por elementos de tubo de 60 mm de diámetro y 1 m de longitud, entre los que se colocan los puntos de referencia (anillo de medida). Estos puntos de referencia son elementos troncocónicos fabricados en acero inoxidable en los que se encastra la cabeza del micrómetro. El principio de operación es que los anillos despliegan uno del otro debido a la deformación de la lechada que esta a su alrededor.

La parte móvil del equipo está compuesta por una varilla de instalación al final de la cual está acoplado el micrómetro propiamente dicho. Este consta de una varilla de medición de acero de Invar con un transductor de desplazamiento del tipo LVDT y de dos cabezas extremas de forma esférica para su acoplamiento en los puntos de referencia en el momento de realizar la lectura. El encastramiento del micrómetro se realiza por medio de un giro de  $45^\circ$  respecto a la posición de deslizamiento del mismo.

Los elementos y las especificaciones de este aparato son los que describen a continuación:

- Sonda de alta precisión y base calibradora

Sonda de alta precisión con cabezales esféricos de medida y sensor de compensación y medición de temperatura, prevista para un rango de medida de  $\pm 50$  mm respecto a la base de medida nominal de 1 m, resolución de  $10^{-2}$  mm y precisión de 20 micras/metro.

El conjunto constituye una unidad hermética hasta una presión de 15 bares ( 150 m de columna de agua) e incluye caja de transporte y accesorios de servicio y mantenimiento.

Base de calibración realizada en acero Invar con referencias de calibración a 975 mm y 1025 mm que permiten ajustar el cero de referencia y desviaciones de  $\pm 50$  % del valor fondo de escala.

- Cabestrante

Cabestrante sobre carro de transporte, con 50 m de cable reforzado equipado con conectores herméticos hasta profundidad de 250 m.

- Módulo de control y adquisición de datos

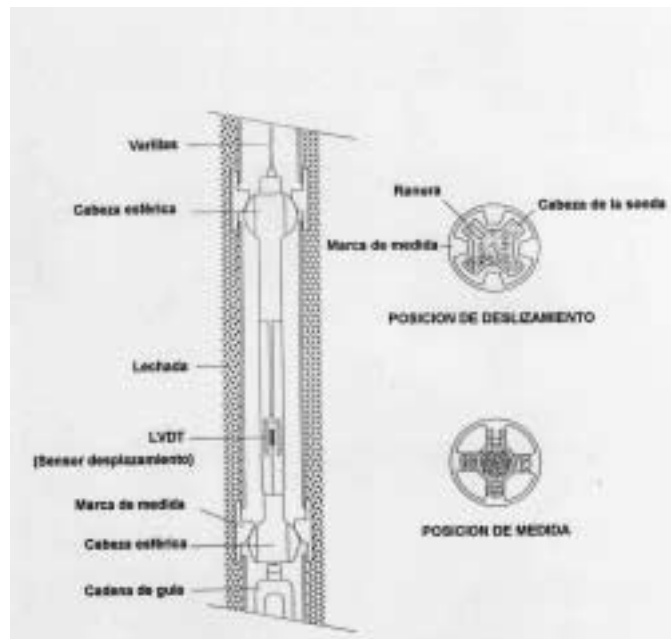
Módulo de control y adquisición de datos que permite la captación de las señales de deformación procedentes de la sonda, su presentación en la pantalla CCD incorporada, el almacenamiento en memoria y la transmisión mediante interfaces RS232 a ordenador central tipo PC o compatible, incluyendo asimismo la medición de temperatura necesaria para la corrección de los valores registrados.

- Accesorios

Barras de guía e introducción de la sonda, realizadas en redondo de aluminio con longitud de 2 m y acoples en acero inoxidable de alta resistencia a la torsión.

Tubo especial fabricado en PVC para el entubado del sondeo con marca cónica de alta precisión con separación de 1 m.

Cadena de orientación de material ligero de 1m de longitud.



**FIGURA V.2** - Esquema del funcionamiento del micrómetro deslizante

### V.3.4.3 Instalación

Se han instalado dos micrómetros, uno en el centro del cimiento del terraplén, S-3 y otro a 15 m del pie del terraplén, en el sondeo S-4. Su situación en planta está señalada en la Figura V.1.



La metodología durante el proceso de instalación es bastante sencilla. Generalmente consiste en la unión de tramos de la tubería especial de PVC de 1 m de longitud mediante manguitos en los que se colocan 4 tornillos. La unión de los manguitos con el tubo de PVC se protege mediante una cinta adhesiva especial que evita la entrada de lechada en la tubería añadiéndose después otra cinta de refuerzo. La Foto V.7 muestra el montaje del sliding micrometer.



**FOTO V.7** - Montaje del micrómetro deslizante

Es muy importante impedir la entrada de cualquier tipo de impureza dentro de la tubería, ya que terminaría por depositarse en las marcas que sobresalen en su interior alterando las medidas. Los 4 tornillos mencionados anteriormente tienen la particularidad de que no atraviesan completamente la unión tubo-manguito. Debido a esta circunstancia realizan la doble función de sujetar ambos elementos pero, a la vez, permiten un pequeño movimiento entre acortamiento-alargamiento que corresponde a las medidas del eje Z o medidas de asientos.

A medida que se van uniendo tramos de tubería, ésta se va bajando a lo largo del sondeo. En esta instalación se usó en la bajada del tubo, una cuerda unida al extremo del mismo para detener el descenso en cualquier momento. De esta

forma se podía dejar colgada la tubería mientras se procedía a la unión de los nuevos tramos. Durante el descenso de la tubería se introducía a la vez el macarrón unido con cinta adhesiva al tubo de PVC con la finalidad de hacer la posterior inyección de cemento.

Otro detalle muy importante a tener en cuenta en el proceso de montaje de la tubería es la orientación de la misma. Todos los tramos de 1 m tienen una marca de medida. Esta marca consiste básicamente en un anillo metálico con cuatro resaltes que tienen la función de servir de tope a la sonda en el momento de la lectura. También tiene cuatro acanaladuras por las que el torpedo desliza para subir o bajar la tubería.

Una vez convenientemente colocada la tubería se realiza una lectura de comprobación a lo largo de la misma verificando que los datos obtenidos se encuentran dentro del rango adecuado. A continuación se debe realizar la inyección de la lechada de cemento a través del macarrón colocado para esta misión.

Para la realización de la lechada se dispuso de una mezcladora eléctrica para un correcto batido con el fin de evitar la formación de grumos que pudieran taponar los macarrones de inyección. De aquí pasaba a una bomba que enviaba la lechada al sondeo inyectándose desde el fondo a través del macarrón.

La dosificación empleada para la elaboración de la lechada fue de 80 litros de agua, 50 Kg de cemento y 5 Kg de bentonita. Una vez inyectado el sondeo, se dejaba reposar la lechada hasta el día siguiente en que se rellenaba de nuevo en la cantidad que hubiese descendido. Cuando la lechada se estabilizaba se procedía a la ejecución de las arquetas. Esta consistía en una boquilla para recibir la parte superior de la tubería embutida en un pequeño macizo de mortero de cemento. La arqueta posee su tapadera para protección del interior de la tubería.

Sin embargo, en el micrómetro instalado en el centro del área de cimentación del terraplén de carga, el trozo de tubería de 60 cm que quedó libre, se fue prolongando en tramos de 1 m a medida que aumentaba la altura del relleno hasta conseguir los cuatro metros establecidos. Para evitar que esta tubería sufriera daño durante la construcción del terraplén, se protegió con un tubo de PVC de mayor diámetro.

Las longitudes alcanzadas en el interior del vertedero en las dos instalaciones fueron de 20 m.

#### **V.3.4.4 Lecturas**

Para efectuar las lecturas, se introduce la sonda con la cadena de orientación incorporada en el interior de la tubería con la ayuda del varillaje guía y se posiciona entre dos marcas ( una en un tramo y la otra en el contiguo) de tal manera que aplicando una fuerza sobre el varillaje se puedan desplazarse las dos cabezas de la sonda hasta hacer contacto con las marcas. La lectura que en este momento registra el módulo de control será la que se anotará como valor de la coordenada z. La Foto V.8 muestra la ejecución de medidas



**FOTO V.8** –Toma de medidas del micrómetro

Esta operación se realiza cada metro en el sentido de bajada hasta llegar al fondo de la tubería, repitiéndola de la misma manera en el sentido de subida hasta llegar de nuevo a la posición inicial.

La medida cero o de referencia se realizó una vez que la lechada había endurecido. Con medidas sucesivas se determinan los cambios relativos de  $z$ . La suma de estas diferencias da como resultado el desplazamiento acumulado de  $z$  a lo largo del sondeo.

### **V.3.5 Línea de Termistancia**

Con la finalidad de obtener los perfiles de temperatura en profundidad, se han instalado en el interior del sondeo (S-5) 20 sensores de temperatura. A través de estos sensores se pueden registrar las variaciones de temperatura a lo largo del tiempo, y así observar la influencia de estas en los procesos de descomposición química y biológica que ocurren en el interior de la masa de residuos.

#### **V.3.5.1 Descripción del equipo utilizado**

El modelo LM35 son sensores de temperatura precisos formados por circuitos integrados, en los cuales la salida de voltaje es linealmente proporcional a la temperatura. Este modelo lineal tiene ventaja sobre los sensores calibrados sobre grados Kelvin, cuando el usuario no necesita sustraer una gran cantidad de voltaje de su respuesta para obtenerla en grado Centígrados. El modelo LM35 no necesita calibración externa o ajuste para proporcionar una acuracia de  $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Este equipo está formado por dos componentes, que se detallan a continuación:

- Sondas múltiples cuyas características se resumen a continuación:

Números de sensores: 5  
Distancia entre sensores: 1m  
Tipo de sensor: PT 100  
Rango de medición: 0 a 100 °C  
Precisión: 0.1 %  
Diámetro de sonda según sondeo  
Longitud de sonda: 5m

- Medidor portátil para conexión de las sondas PT 100, con las siguientes especificaciones:

Sensor tipo	PT 100
Rango de escala	0 a 100° C
Display digital	3,5 d
Sensibilidad	1° C/0,1° C
Precisión	0,5%
Conexión para sensores	5
Alimentación	Baterías

### **V.3.5.2 Instalación**

La instalación de las termistancias (Foto V.9) en el interior del sondeo S-5, se hizo con el auxilio de una tubería de PVC de  $\phi$  50 mm sobre la que se colocaba, fijándolos con cinta adhesiva a medida que se introducía en el sondeo, los cables con las termistancias correspondiente a las profundidades, hasta un total de 20 unidades. Se emplearon cuatro cables con cinco termistancias cada uno, separadas cada metro (Foto V.10). Cada cable, en su

correspondiente conector, lleva un número identificativo que coincide con la posición primera de cada quinteto.

De esta forma la distribución era la siguiente:

Conector 1m: 1,2,3,4,5 m de profundidad

Conector 6 m: 6,7,8,9,10 m de profundidad

Conector 11m: 11, 12,13,14,15 m de profundidad

Conector 16 m: 16,17,18,19,20 m de profundidad

Después se recuperó la tubería de revestimiento, quedando las termistancia en contacto con las basuras por derrumbamiento de las paredes del sondeo.



**FOTO V-9** - Instalación de las líneas de termistancias

Terminada esta operación se procedió a la ejecución de una protección en la boca del sondeo. Esta consistía en una boquilla de PVC en cuyo interior se alojaban los cuatro cables con sus conectores identificados, rodeada de una arqueta de ladrillo con tapa metálica.

### **V.3.5.3 Lecturas**

La toma de medidas se hace conectando a la unidad de lectura el cable cuyo grupo de termistancias se desea medir. Accionando el conmutador se puede pasar de una célula a otra.



**FOTO V.10** - Cables de la línea de termistancia

# CAPÍTULO VI

## CAPÍTULO VI

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE  
**PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE**  
RESULTADOS OBTENIDOS EN EL  
**RESULTADOS OBTENIDOS EN EL**  
RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO  
**RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO**

**DEL MATERIAL**



## VI.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los resultados y análisis de los ensayos de la campaña de reconocimiento del material que fueron descritos en el capítulo IV. Los ensayos de esta campaña consisten de ensayos de densidad y humedad con la finalidad de caracterizar las propiedades físicas del material; ensayos de SPT para investigar el comportamiento resistente de los residuos; ensayos de análisis espectral de ondas superficiales para determinar la rigidez vertical de la masa de vertido y por fin el empleo de los métodos eléctricos y electromagnéticos con objeto de determinar la estratificación de los residuos y la localización del sustrato sobre el que se asienta el vertedero.

## VI.2 ENSAYO DE DENSIDAD

La densidad aparente de los residuos fue determinada mediante la expresión:

$$\rho = \frac{3,8kN}{0,75m^3} = 5,0kN/m^3$$

Este valor es coherente con las condiciones del relleno, ya que no ha sufrido ningún proceso de compactación. Además, los residuos están constituidos básicamente de papel y plástico que son considerados la fracción más ligera de las basuras, Gandola et al (1994).

## VI.3 ENSAYO DE HUMEDAD

Los resultados de los ensayos de humedad obtenidos a lo largo de la profundidad del sondeo destinado a instalación del nuevo micrómetro deslizante se encuentra en la Tabla VI.1:

**TABLA VI.1**

Valores de humedad

HUMEDAD W (%)	PROFUNDIDAD (M)
42,90	2,5
27,80	6,00
29,00	8,50
13,30	11,50
34,40	14,50
25,10	15,00
69,60	16,50
24,80	18,00
21,60	19,50
37,70	21,00

Los valores de humedad varían de 13 a 70%. Como se ha comentado en la revisión bibliográfica, el contenido de humedad varía según muchos factores, de forma que no se puede comparar los resultados obtenidos aquí con otros autores. Lo que se puede observar es que los valores encontrados no exhiben tendencia de aumento con la profundidad, como los valores encontrados por Gabr & Valero (1995); sin embargo la dispersión disminuye a partir de los 18m como es comentado por Coumoulous et al (1995).

## **VI.4 ENSAYOS DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT)**

### **VI.4.1. Introducción**

Fueron realizados cinco (5) sondeos en el área elegida para investigación de las características de resistencia y deformabilidad del vertedero. Estos sondeos tenían la finalidad de investigar la composición de los residuos sólidos y medir, a través del ensayo SPT, su capacidad resistente; además eran destinados a instalación de un punto fijo, dos micrómetros deslizantes, un inclinómetro y una línea de termistancia.

Los cinco sondeos mecánicos realizados se hicieron a rotación, con tubería de revestimiento para impedir el derrumbamiento de las paredes y recuperación de testigo continuo. Los ensayos de SPT fueron realizados en intervalos de 2 a 3 m. Las maniobras de revestimiento se hicieron con agua y la perforación en seco.

Las muestras obtenidas eran examinadas detalladamente conforme enseña la Foto VI.1. Una visión mas detallada de los testigos obtenidos con el sondeo S2 se encuentra en las Fotos VI.2 y VI.3. En todos los sondeos realizados se ha verificado que los residuos consistían básicamente en plástico, papel, cartón y suelo, (el suelo proviene de las capas diarias de cobertura). Aunque predominasen los materiales anteriormente citados, se encontró una gran variación, aunque en pequeñas cantidades, de otros materiales como alambre, cristal, hojalatas, algodón, espuma, neumático, raíces, goma y clavos. Los perfiles obtenidos a través de los sondeos son señalados a continuación en las Figuras VI.1 a VI.5.



**FOTO VI.1** – Observación de la composición de los residuos en las cajas-testigo de sondeo



**FOTO VI.2** Composición de los RSU en el sondeo S2 – profundidad 0 – 13 m



FOTO VI.3 Composición de los RSU en el sondeo S2 – profundidad 13 – 20 m

<b>SONDEO S-1</b>																	
<b>COLUMNA LITOLÓGICA</b>																	
HOJA: 1																	
PERFORACION	TIPO	PERF	PROFUNDIDAD (Metros)	ESPESOR CAPA (Metros)	CORTE LITOLÓGICO	NATURALEZA DEL TERRENO Descripción	MUESTRAS				% TESTIGO RECUPERADO				OBSERVACIONES		
							PROF	TIPO	Nº Golpes	N (SPT)	20	40	60	80			
			0,80			SUELO											
			1,0														
			2,0														
			2,60					SPT		33	43	20	12				PLASTICO, CARTON BASTANTE SUELO ESTA COMPACTO
			3,0														
			4,0														
			5,0														
			5,60	8,70		PLASTICO, PAPEL, ALAMBRE, ALGODON, HOJALATA, MADERA, CARTON, GOMA, ESPUMA Y SUELO		SPT		3	4	8	9				PLASTICO, GOMA ESPUMA HUMEDO POCAMUESTRA Y FLOJA
			6,0														
			7,0														
			8,0														
			8,60					SPT		10	20	35	10				PLASTICOS, CARTON
			9,0														
			10,0	0,50		SUELO COMPACTO											
			10,70	0,70		PLASTICO, PAPEL, ALAMBRE, ESPUMA											
			11,0	0,30		SUELO											
			11,30					SPT		5	9	6	7				CRISTAL PLASTICO Y PAPEL HUMEDO
			12,0	2,00		PLASTICO, PAPEL, ALAMBRE, HIERRO											
			13,0	0,30		SUELO COMPACTO											
			14,0														
			14,0	2,05		PLASTICO, PAPEL, HIERRO											
			15,0														
			15,0	0,15		SUELO											
			16,0														
			17,0	2,50		PLASTICO Y PAPEL											
			18,0	0,30		SUELO											
			19,0	1,70		PLASTICO, PAPEL, CARTON, HOJALATA, CRISTAL, NUEMATICO Y ALAMBRE											
			20,0														

FIGURA VI.1a - Perfil de SPT -Sondeo1

<h1 style="text-align: center;">SONDEO S-1</h1> <h2 style="text-align: center;">COLUMNA LITOLÓGICA</h2>											HOJA: 2						
PERFORACION		PROFUNDIDAD (Metros)	ESPESOR CAPA (Metros)	CORTE LITOLÓGICO	NATURALEZA DEL TERRENO Descripción	MUESTRAS				% TESTIGO RECUPERADO				OBSERVACIONES			
TIPO	PERF					PROF	TIPO	N Golpes	N (SPT)	20	40	60	80				
		21,0	3,25		PLASTICO, PAPEL, CARTON, HOJALATA, CRISTAL, NUEMATICO Y ALAMBRE												
		22,0															
		23,0				23,00											
		23,0	0,25		SUELO												
		23,60					SPT	7 14 12 13									CARTON, TROZOS DE MADERA DE COLOR OSCURO (LIXIVIADO)
		24,0															
		25,0	4,00		PLASTICO, PAPEL, CARTON, HOJALATA, CRISTAL, NUEMATICO Y ALAMBRE												
		26,0						26,05									
		26,65					SPT	6 7 5 8									
		27,0															
		28,0															
		29,0	2,50		TERRENO NATURAL												
		30,0															FIN DE SONDEO A 30,0 m
		31,0															
		32,0															
		33,0															
		34,0															
		35,0															
		36,0															
		37,0															
		38,0															
		39,0															
		40,0															

FIGURA VI.1b -Perfil de SPT - Sondeo 1 (continuación)

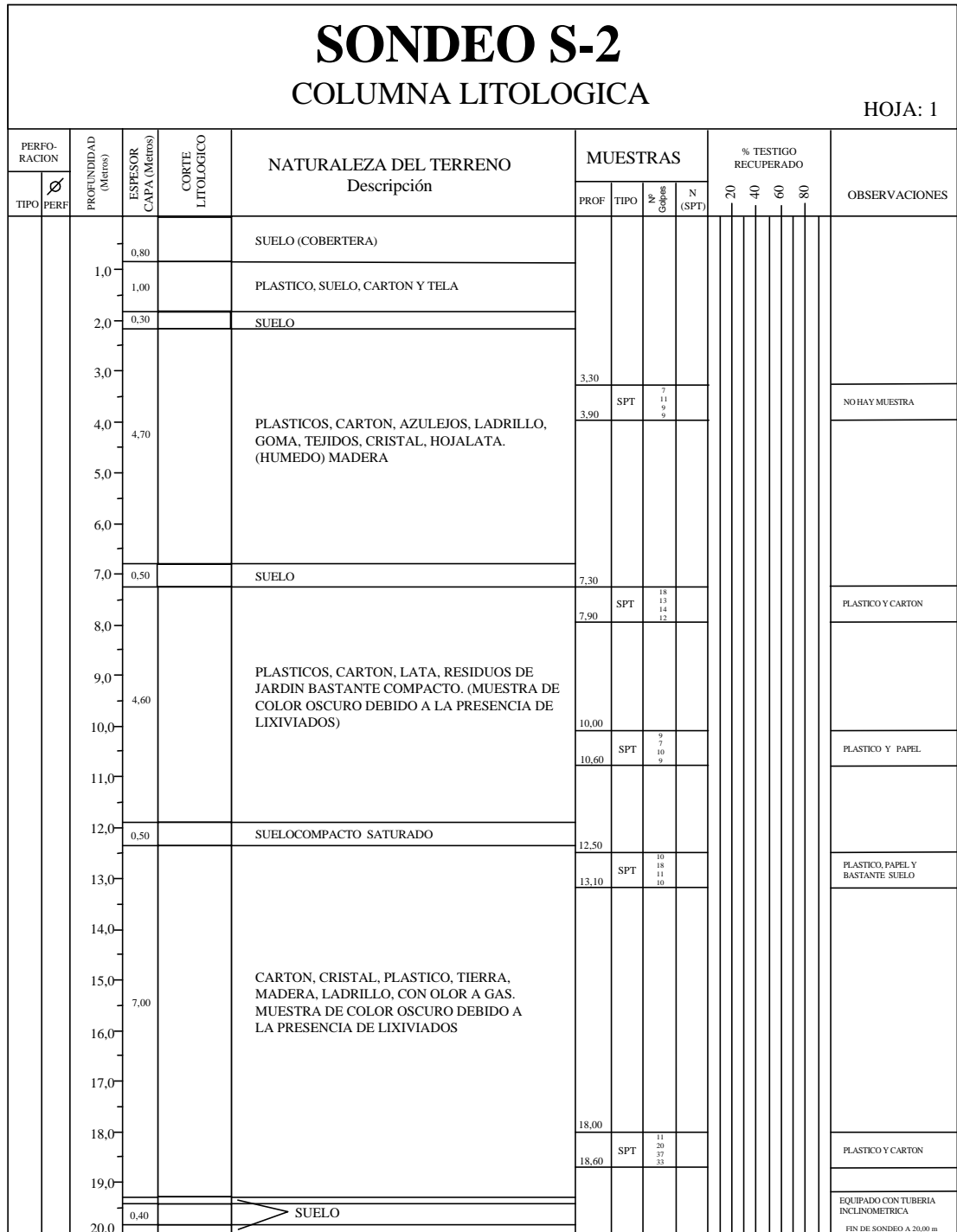


FIGURA VI.2 - Perfil de SPT -Sondeo2



<b>SONDEO S-3</b>																		
<b>COLUMNA LITOLÓGICA</b>																		
HOJA: 1																		
PERFORACION	TIPO	PERF	PROFUNDIDAD (Metros)	ESPESOR CAPA (Metros)	CORTE LITOLÓGICO	NATURALEZA DEL TERRENO Descripción	MUESTRAS				% TESTIGO RECUPERADO				OBSERVACIONES			
							PROF	TIPO	Nº Col/Seg	N (SPT)	20	40	60	80				
			0,80			SUELO CON ALGO DE HOJALATA PLASTICO Y CARTON (COBERTERA)												
			1,0															
			2,0															
			2,60					SPT		10	14	18	11					PLASTICO, GOMA, LADRILLO Y SUELO
			3,0															
			5,20			PLASTICO, SUELO, HOJALATA, CRISTAL, AZULEJOS, TEXTIL, RAICES, CLAVOS, ESPONJAS, MADERA, ALAMBRE Y CARTON												
			4,0															
			5,0															
			5,40							7	8	12	16					MADERA, SUELO, CRISTAL, CARTON, PLASTICO
			6,0					SPT		12	13	16						
			6,00			SUELO COMPACTO CON ALGO DE LADRILLO, PLASTICO, CARTON Y ALAMBRE												
			7,0															
			1,00															
			8,0															
			8,00															
			8,60					SPT		12	12	12						SUELO, PLASTICO Y CARTON
			9,0															
			10,0															
			11,0															
			8,50			PLASTICO, PAPEL, CARTON, ALGODON, TEXTIL, MADERA. GRAN CANTIDAD DE SUELO												
			12,0															
			13,0															
			13,25															
			13,85					SPT		16	20	30	11					PLASTICO, TEXTIL, SUELO, CARTON Y MADERA
			14,0															
			15,0															
			0,50			SUELO												
			16,0															
			17,0															
			18,0															
			5,00			PLASTICO, TEXTIL, GOMA, TUBERIA DE HIERRO, CARTON, MADERA, ALAMBRE. MUESTRA HUMEDA												
			19,0															
			20,0															
			21,0															
			21,00							8	12	17	16					
			21,60			EQUIPADO CON SLIDING MICROMETER		SPT		17	17	16						PLASTICO Y CARTON
			22,0															FIN DE SONDEO A 21,60 m

FIGURA VI.3 - Perfil de SPT - Sondeo 3

<h1 style="text-align: center;">SONDEO S-4</h1> <h2 style="text-align: center;">COLUMNA LITOLOGICA</h2>												HOJA: 1											
PERFORACION		PROFUNDIDAD (Metros)	ESPESOR CAPA (Metros)	CORTE LITOLOGICO	NATURALEZA DEL TERRENO Descripción	MUESTRAS				% TESTIGO RECUPERADO			OBSERVACIONES										
TIPO	Ø					PROF	TIPO	Nº Golpes	N (SPT)	20	40	60		80									
		0,80			SUELO(COBERTERA)																		
		1,0			PLASTICO, CARTON, PAPEL, MADERA, GOMA, ESPUMA, CRISTAL, HOJALATA, RAICES, CERAMICA. TODO CON BASTANTE SUELO																		
		2,00																					
		2,60				SPT	10	14	18	11													PLASTICO, GOMA, LADRILLO Y SUELO
		3,0																					
		4,0																					
		4,50																					
		5,00	8,70				SPT	10	14	18	11												TEXTIL, CARTON, TIERRA, PLASTICO
		6,0																					
		7,0																					
		8,0																					
		8,60				SPT	7	11	15	9												TEXTIL, CARTON, RAICES, PLASTICO	
		9,0																					
		10,0	0,30		SUELO																		
		11,0			PLASTICO, CARTON, LADRILLO, CRISTAL, RAICES Y TEXTIL (MUESTRA DE COLOR OSCURO Y COMPACTA)																		
		12,0																					
		12,60	5,80			SPT	12	28	19	19													GOMA, TEXTIL, SUELO COMPACTO, ALAMBRE, LADRILLO, CRISTAL Y RAICES
		13,0																					
		14,0																					
		15,0																					
		16,0	0,40		SUELO																		
		17,0			PLASTICO, CARTON, MADERA, CERAMICA, CRISTAL, TEXTIL, ALAMBRE, HOJALATA. (MUESTRA DE COLOR OSCURO Y COMPACTA)																		
		18,0																					
		18,60	5,00			SPT	5	6	8	12													AGLOMERADO CARTON, PLASTICOS
		19,0																					
		20,0																					
		21,0																				FIN DE SONDEO A 21,00 m	

FIGURA VI.4 - Perfil de SPT - Sondeo 4

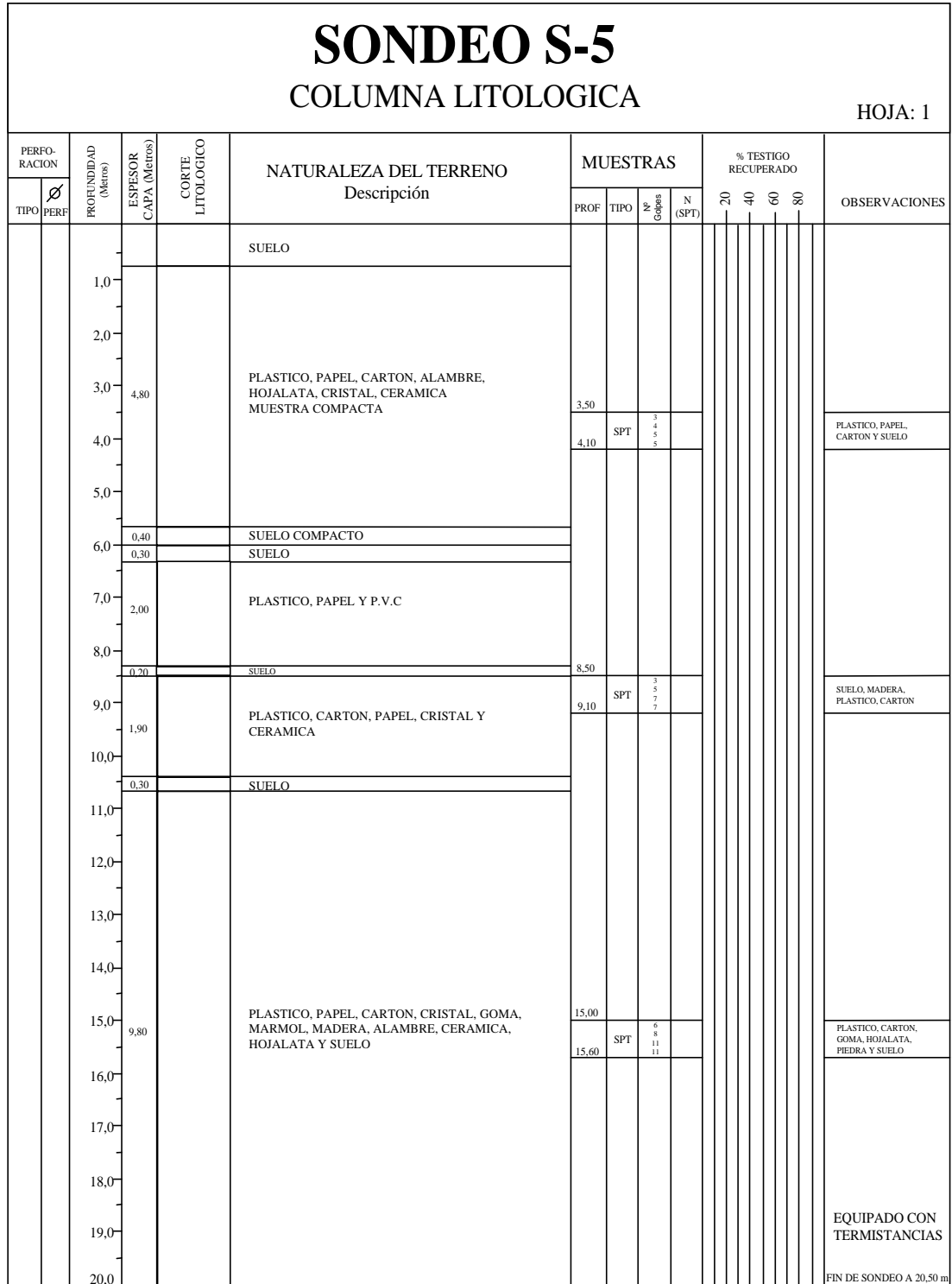


FIGURA VI.5 - Perfil de SPT - Sondeo 5

### VI.4.2 Presentación de los resultados

En el gráfico de la Figura VI.6 se muestran los valores de N obtenidos con la profundidad, para todos los sondeos realizados. Los valores de N adoptados corresponden a la suma de los valores medidos para penetrar los 30 cm centrales de la cuchara de 60 cm.

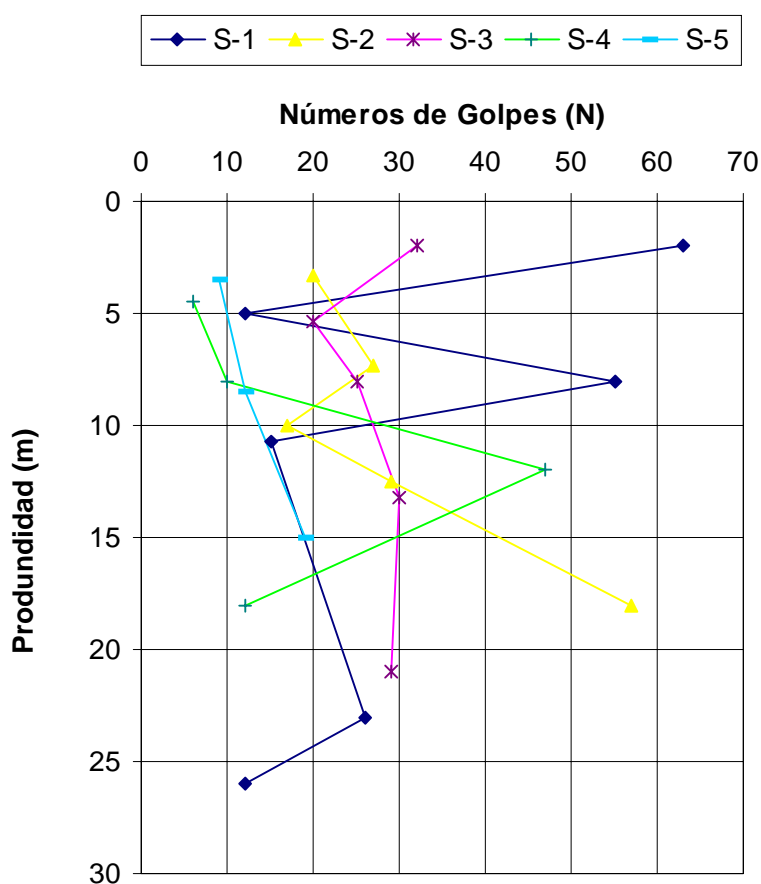


FIGURA VI.6 – Ensayos de SPT

El **sondeo (S1)** era destinado a instalación del punto fijo. En este sondeo, la tubería externa ( $\phi = 128$  mm) se quedó enganchada a 13,50 m de profundidad, no obstante el sondeo continuó siendo ejecutado con una tubería de menor

diámetro ( $\phi = 113$  mm). A 26 m de profundidad, cuando se intentaba sacar ésta tubería, aparecieron grandes emanaciones de gases, de forma que se prefirió no recuperar esta tubería debido al peligro de explosión en el vertedero.

El sondeo S1 alcanzó el terreno natural a 27,5 m de profundidad. El terreno natural está constituido por arcilla margosa con alguna intercalación de yesos.

A partir de 20 m de profundidad las muestras de residuos presentaban color oscuro y olor putrefacto. El cambio de color se debe a saturación por lixiviados, pues como se puede ver en la Foto VI.4 gran cantidad de lixiviados fue expelida a esta profundidad. La presencia de líquidos lixiviados y gases indica que, en esta profundidad, los residuos estaban en proceso de descomposición muy activo.

A través de este gráfico se puede observar que los resultados del sondeo S1 presentan gran dispersión. Los valores de N oscilan entre 12 y 63. Los números de golpes de 63 y 55 parecen deberse a algún obstáculo encontrado. En las profundidades de 5m, 11m y 26 m los valores de resistencia se encuentran entre 12 y 15, estos valores están de acuerdo con los valores de Dames & Moore (1988) citados por Sing & Murphy (1990). Sin embargo, son valores más altos de que los encontrados por Sowers (1968), Carvalho & Vilar (1998a). La diferencia tal vez se deba a que, en este caso, se tratan de residuos frescos, como comentado por Keisuke Shimizu (1996) los vertederos de residuos frescos presentan valores mas altos de que los vertederos de residuos antiguos.

En el **sondeo S2** se observa que hasta los 13 m de profundidad los números de golpes varían entre 17 y 29. Estos valores están de acuerdo con algunos valores encontrados por Coumoulos et al (1995), no obstante, son valores elevados cuando se comparan con la gran mayoría de los valores encontrados en la literatura técnica, que en general están alrededor de 5 a 15. A partir de

los 13 m ocurre una variación brusca del valor de N, este tramo presenta un valor de (N = 57). Este cambio, no parece ser causado por un aumento de resistencia con la profundidad sino por algún obstáculo encontrado. A partir de los 9 metros de profundidad, las muestras presentaban color oscuro indicando presencia de lixiviados.

El **sondeo S3** presenta una pequeña variación de resistencia, el número de golpes a lo largo del sondeo varía en intervalo de 20 a 30 con una media aproximadamente de 27 golpes.

La curva presenta una resistencia mas elevada en la capa superficial ( N = 32 ) que contiene bastante suelo de cobertura, un pequeño descenso cuando alcanza a capa de RSU ( N = 20 ) para después aumentar para N = 25 golpes a los 8 m de profundidad. Este valor aumenta hasta la profundidad de 21 m, cuando la resistencia es representada por un valor de N equivalente a 29 golpes. A esta profundidad las muestras estaban bastante húmedas, muy degradadas y bastante compactas. Este es el único sondeo que muestra una pequeña elevación de resistencia con la profundidad, los demás presentan gran dispersión en los resultados. A 16 m de profundidad las muestras presentaban color oscuro indicando que a esta profundidad había lixiviados.

El **sondeo S4** presenta a aproximadamente 5 m de profundidad una resistencia de 6 golpes, con excepción del valor encontrado a los 12 m que presenta una resistencia de 47 golpes, los demás valores oscilan entre 10 y 12 golpes. Como comentado anteriormente, este valor (N= 47) considerado alto para los RSU tal vez se deba a presencia de algún obstáculo o material más resistente. A esta profundidad las muestras contenían trozos de ladrillo que tal vez sea el causante de este aumento de resistencia. Los lixiviados se encontraban a 8 m de profundidad.

El **sondeo S5** presenta una tendencia clara de aumento de resistencia con la profundidad, el primer tramo presenta resistencia de N = 9, para después

alcanzar en el último tramo una resistencia de  $N = 19$  golpes. Los lixiviados se encuentran a 9 m de profundidad.



**FOTO VI.4** – Líquidos lixiviados expelidos del sondeo S1

Como se puede observar a través del gráfico de la Figura VI.6 los resultados de los sondeos presentan gran dispersión; por ejemplo los números de golpes del sondeo S1 aumentan y disminuyen sin ningún criterio aparentemente claro. Esto demuestra la gran dificultad de interpretar estos resultados e incluso de intentar asociar estos valores con parámetros de resistencia. Los sondeos S-2 y S-3 presentan valores elevados de resistencia; comparar estos valores con los datos de Coumoulos et al (1995) es también una dificultad, porque los resultados presentados por los autores son muy dispersos, por ejemplo, a 5 m de profundidad hay una variación de  $N$  entre, aproximadamente, 17 y 40. En la profundidad de 20 m, una variación de 20 y 80 golpes.

Como se ha dicho, se utiliza las mismas herramientas empleadas para los suelos, pero no se puede sacar grandes conclusiones de los resultados. Algunos autores comentan sobre el aumento de resistencia con la profundidad,

como se puede ver en algunos sondeos realizados en este trabajo. Sin embargo, como los ensayos no se prolongaron a mayores profundidades, esta tendencia no se evidencia del todo.

Los ensayos de SPT en RSU son poco eficientes debido a gran heterogeneidad del material que ocasiona la dispersión de los valores de N. No obstante, autores como Juca et al (2000) comentan que los ensayos de SPT constituyen una herramienta fácil y barata de conocer el relleno en profundidad, evaluar los cambios de propiedad de los residuos con relación al tiempo o también con el tipo de tratamiento empleado para el vertedero. Gifford et al (1992) señala que estos ensayos son bastante útiles para verificar los procesos de degradación en grandes profundidades. Tal vez un mayor número de sondeos y ensayos, en intervalos reducidos de profundidad, proporcionasen resultados más confiables.

Con la finalidad de entender mejor el comportamiento de los RSU se recogió de la literatura técnica algunas observaciones basadas en trabajos realizados por varios autores:

Sowers (1968) indica valores de SPT del orden de 5 a 10 golpes / 30 cm, obtenidos en tres depósitos diferentes de RSU. De acuerdo con el autor la resistencia de los RSU a la penetración varía de baja a muy baja; salvo singularidades, la resistencia raramente se encuentra por encima de 10 golpes.

Marbry (1977) obtiene valores de SPT del orden de 10 golpes / 30cm que son indicativos de material de densidad muy baja; sin embargo, según el autor ocasionalmente se puede encontrar valores de SPT más altos.

Manasero et al (1997) comentan sobre la gran incertidumbre en asociar los números de golpes obtenidos a través de ensayos SPT con valores de resistencia. Los autores señalan los resultados obtenidos por Coumolous et al



(1995) que muestran gran dispersión de resultados, aunque muestran un aumento de resistencia con la profundidad.

Sing & Murphy (1990) citan los resultados de ensayos de SPT realizados por Dames & Moore (1988) que encontraron una media de valores de  $N = 15$ , después de eliminar los valores mayores de 50 por creer que se debía al encuentro de algún obstáculo. Los autores observan que no existe en la literatura una correlación entre resistencia y números de golpes.

Sanchez Alciturri et al (1993b) realizaron ensayos de resistencia tipo Borros y observan que existe una tendencia de aumento de resistencia con la profundidad. Valores típicos encontrados por los autores son de 10 golpes / 20 cm.

Keisuke Shimizu (1996) realizó ensayos de SPT en vertederos con residuos de distintas edades y observaron que los residuos frescos donde la degradación de los residuos era aun reciente, mostraron valores mas altos de  $N$  que residuos antiguos. Sin embargo, esta observación es tomada apenas como referencia porque solo se podría generalizar si las condiciones de los vertederos fuesen las mismas como, la composición de los residuos, el tratamiento intermedio, método de deposición y etc.

Carvalho & Villar (1998a) realizaron 5 sondeos con ensayos de SPT a cada 1 o 2 m de profundidad en un vertedero de 15 años. Según los autores la resistencia aumentaba con la profundidad, los dos primeros tramos presentaban un valor medio de  $N = 7$  y los tramos con profundidad de 10 a 30 m presentaban un valor de  $N = 12$ .

Knochenmus, et al (1998) observa que hay poca atención por parte de los investigadores en determinar propiedades de resistencia de los RSU por medio de ensayos in situ. Según los autores esto se debe a la presencia de grandes obstáculos en la masa de residuos que dificulta la ejecución de los ensayos in

situ. Igualmente como Manasero et al (1997), los autores observan que los resultados de SPT de Sing & Murphy (1990), Gifoord et al (1992) y Coumolous et al (1995) muestran un alto grado de dispersión resultando difícil su interpretación y además, que normalmente no se hacen correlación entre los resultados de SPT y las propiedades de resistencia de los RSU. De acuerdo con los autores, el ideal sería confrontar datos obtenidos en ensayos in situ con datos de laboratorio.

Jucá et al (2000), realizaron ensayos de SPT en los vertederos de Aguazinha y Muribeca, situados en la región metropolitana de Recife y encontraron valores de N entre 5 y 15. De acuerdo con los autores había una tendencia de aumento de resistencia con la profundidad en las celdas que tenían sistema de drenaje.

Como conclusión por lo que respecta a los ensayos realizados en esta investigación, cabría señalar que la propia constitución del vertedero implica la alta probabilidad de que se obtengan índices de SPT altos, atribuibles a la presencia de obstáculos (elementos metálicos, etc) que hacen "tapón" con la cuchara estándar. Si se eliminan ese conjunto de resultados anómalos, el resto de los índices estaría mas o menos de acuerdo con los que constan habitualmente en la bibliografía, teniendo en cuenta tanto la edad joven del vertedero estudiado, como la propia constitución intrínseca.

## **VI.5 ANÁLISIS ESPECTRAL DE ONDAS SUPERFICIALES (AEOS)**

### **VI.5.1 Introducción**

Como se ha comentado anteriormente el objetivo de la aplicación de la técnica AEOS ha sido determinar la rigidez vertical de la masa de vertido. Para ello se han realizado los ensayos descritos en el apartado IV.5.

Para lograr el objetivo señalado lo primero que hay que determinar en esta técnica son las curvas de dispersión en los dos puntos ensayados, AEOS1 y AEOS2.

### VI.5.2 Análisis de los resultados obtenidos con el método AEOS

En la Figura VI.7 se muestran las curvas de dispersión experimentales obtenidas en los puntos AEOS-1 y AEOS-2, es decir, la velocidad de propagación de las Ondas Superficiales (VR) en función de la longitud de onda ( $\lambda$ ). Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, lo que interesa - en este método- es hallar la velocidad de las Ondas Tangenciales ( $V_s$ ) de una "Estructura de capas horizontales equivalente" cuya curva de dispersión teórica se ajuste lo más posible a la obtenida "in situ", o lo que es lo mismo, determinar  $V_s = f(h)$ , siendo  $h$  la profundidad. Esto último se denomina, en la literatura técnica, resolver el "Problema Inverso".

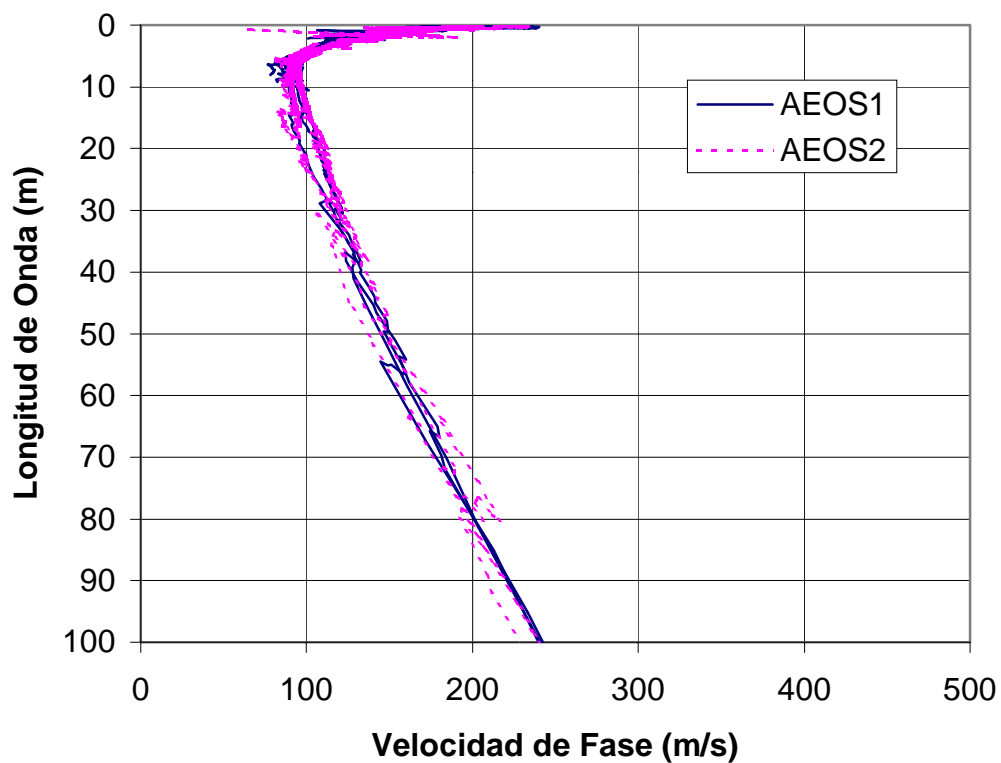
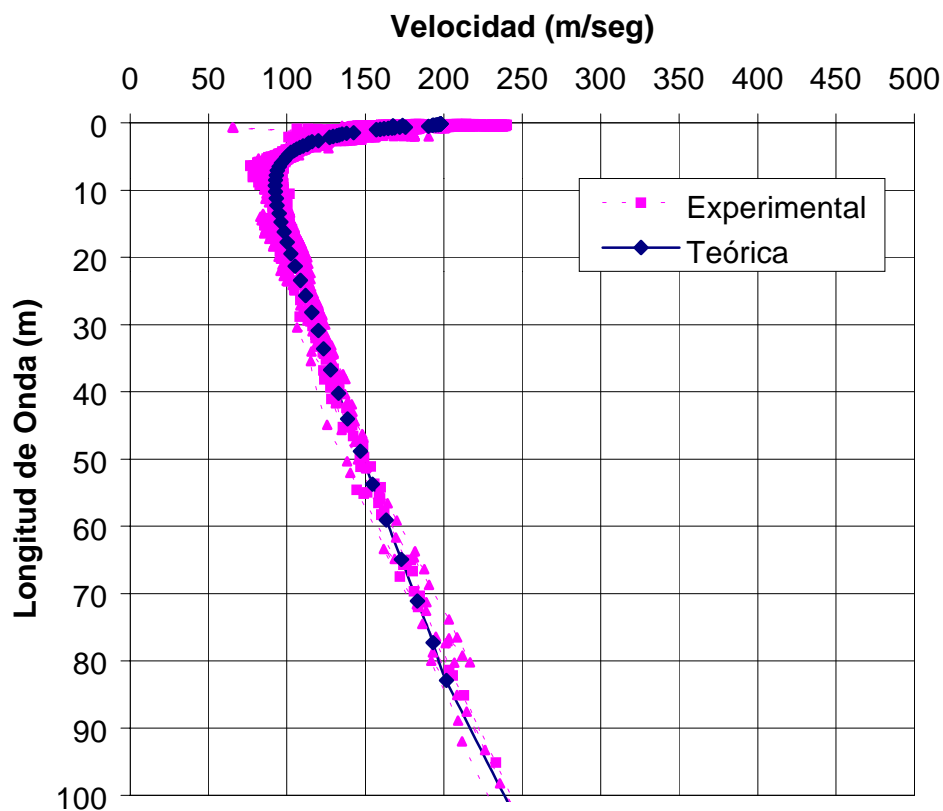


FIGURA VI.7 - Curvas de dispersión experimentales

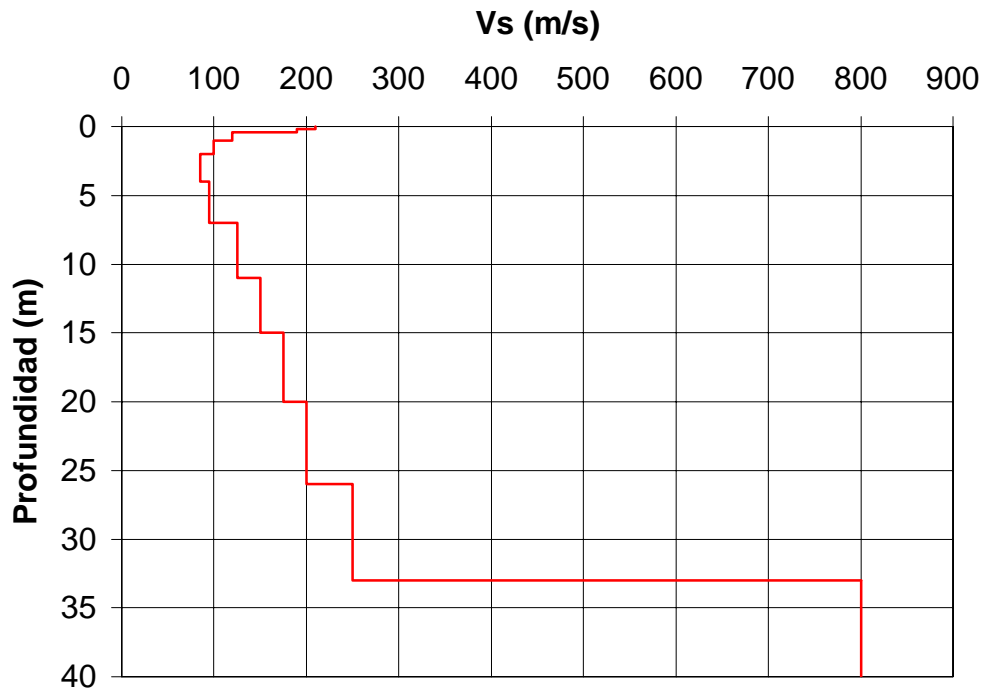
Debido a las dificultades que tiene la "Inversión", en realidad no se ha llevado a cabo ésta sino que se ha calculado la curva de dispersión teórica de una estructura de capas del terreno supuesta (Problema Directo) y, mediante aproximaciones sucesivas, se ha ajustado la curva teórica a la experimental, conforme enseña la Figura VI.8. El programa que se ha utilizado es el SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) desarrollado en la Universidad de Texas (Roesset et al., 1991). De las dos alternativas que ofrece se ha tomado, en este caso, la basada en la solución tridimensional, es decir, calculando los desplazamientos originados por una carga dinámica colocada en la superficie de una sistema multicapa mediante las funciones de GREEN desarrolladas por Kausel (1981).



**FIGURA VI.8** - Curvas de dispersión teórica y experimental

En la misma Figura VI.8 se ha representado la curva de dispersión teórica calculada con el programa SASW que ajusta razonablemente con la medida "in

situ" y que corresponde a la "Estructura de capas horizontales equivalentes" dada en la Figura VI.9.



**FIGURA VI.9** - Perfil de velocidades

A través del gráfico de la Figura VI.9 se observa que la velocidad de onda tangencial en la capa de 0 a 1m de profundidad varía de 210 m/s a 100m/s. A partir de 1m hasta 33m, la velocidad varía de 100m/s a 250m/s. Cuando alcanza el terreno natural la velocidad llega a 800m/s.

La rigidez es más grande en la capa superficial de 0 a 1m, por tratarse del suelo de cobertura. En esta capa, los primeros 20cm de espesor presentó velocidad de 210m/s esto puede ser por el paso de los camiones, o bien por desecación. Estos resultados están de acuerdo con los resultados obtenidos por Cuellar & Valerio (1999) que en estudios similares llevados a cabo en vertederos encontraron valores de velocidad de onda de 240m/s en capa más superficial de unos 25cm de espesor y una variación de 240 a 160m/seg en la profundidad de 0 a 1m.

Los valores encontrados entre las profundidades de 1m a 33m están dentro del rango de variación propuestos por Singh & Murphy, 1990; Sharma et al., 1990; Anderson et al., 1992 y Kavazanjian et al.,1994b, que indican un rango de variación de 50m/s a 350 m/s.

De acuerdo con los autores Kavazanjian & Matasovic,1995; Matasovic & Kavazanjian,1998 y Morochnich et al.,1998 el perfil de velocidad de onda tangencial varía con la profundidad y edad de los residuos sólidos. A su vez, Haker et al. (1997) añaden que la velocidad de onda tangencial depende del tipo de residuos, densidad, confinamiento, edad, técnica de vertido y contenido de suelos y que es difícil asegurar la influencia de estos factores individualmente. Estos autores han medido velocidades de onda tangencial en tres vertederos y encontraron un rango de variación para los mismos de 122m/s a 365 m/s. De acuerdo con los autores las propiedades dinámicas de los RSU para cada vertedero no pueden ser asumidas como constantes.

Van Impe & Bouazza (1997), comentan que la ventaja de este método es que los ensayos son realizados con nivel de tensión y deformación conocidos (<10<sup>-4</sup>%), no causan ninguna perturbación, ya que no necesitan sondeos y además son sumamente rápidos.

Tras obtener los valores de velocidades de ondas tangencial se ha calculado el módulo cortante (**G**) a través de la expresión:

$$G = \rho \cdot V_s^2$$

Donde:

G = Módulo de corte (MPa)

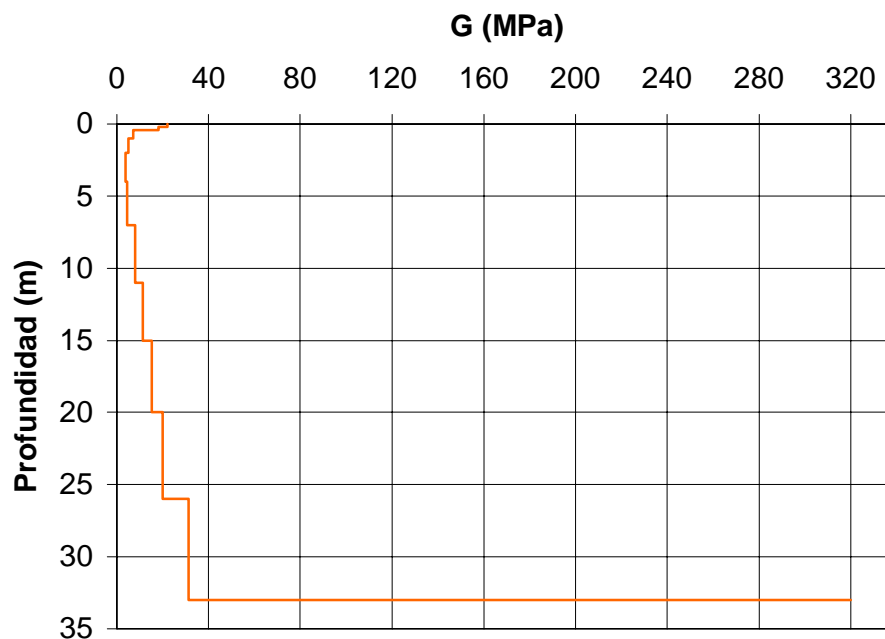
V<sub>s</sub> = Velocidad de onda tangencial (m/s)

ρ = Peso específico ( = 500 kg/m<sup>3</sup>)

Los valores de  $G$  dependen significativamente del peso específico del material; la determinación del peso específico es muy difícil debido a factores como la composición heterogénea de los residuos, la variedad de tamaño de los componentes, la presencia de capas de cobertura de tierra, etc.

Autores como Fasset et al., 1994; Kavazanjian et al., 1995 y Jessberger, 1996 consideran que el peso específico aumenta con la profundidad como resultado de la consolidación y compresión de la masa de residuos bajo cargas, peso propio, actividades de maquinaria y material de cobertura. Sin embargo, ninguno de los autores comentan sobre un criterio de cuanto aumentaría con la profundidad; por lo cual se consideró para el cálculo de " $G$ " el valor del peso específico constante con la profundidad.

El gráfico de la Figura VI.10 muestra el perfil de variación del módulo  $G$  a lo largo de la profundidad.



**FIGURA VI.10** - Módulo Cortante

Despreciando los primeros valores de G, por tratarse de la capa de cobertura de tierra, los valores de G muestran una variación de 7,2 MPa a 31Mpa para un valor de peso específico de  $5 \text{ kN/m}^3$  ( $500\text{kf/m}^3$ ).

Resultados del módulo G obtenidos a través de ensayos Cross-hole fueron indicados por Sharma et al. (1990) para el vertedero de Richmond - California que encontró un valor de 28,9 MPa considerando el valor del peso específico de  $7,37 \text{ kN/m}^3$ . Carvalho (1999) encontró un valor de 8 MPa para el vertedero municipal de la ciudad de Sao Paulo, considerando el peso específico de  $8 \text{ kN/m}^3$ .

Por tanto, puede decirse que los valores obtenidos del módulo tangencial, G, a partir de estos ensayos, están de acuerdo a los datos bibliográficos comunes, teniendo en cuenta las especificidades propias del vertedero estudiado.

## **VI.6 OTRAS TÉCNICAS GEOFÍSICAS**

### **VI.6.1 Introducción**

Dentro del marco general del estudio mecánico del vertedero controlado de Valdemingómez (Madrid), se analizó la conveniencia de utilizar diversas técnicas geofísicas que pudieran aportar datos complementarios al estudio de las propiedades mecánicas realizadas mediante otras técnicas y poder determinar la "homogeneidad" del depósito o una posible estructura de capas.

De todos los métodos geofísicos que dispone el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, se decidió emplear métodos eléctricos y electromagnéticos implantados en superficie con objeto de determinar la eventual estratificación de los residuos y la localización del sustrato sobre el que se asienta el vertedero.



Hubieran sido más indicados para la determinación de las propiedades mecánicas los métodos sísmicos entre sondeos (cross-hole, down-hole y tomografía) y el geo-radar de sondeo en la modalidad de tomografía. Sin embargo, el hecho de que los sondeos que se han realizado hayan sido instrumentados con otros equipos, la inestabilidad de sus paredes y la presencia de gases combustibles (metano, entre otros), han hecho imposible esta investigación.

Durante el mes de junio de 1998 se realizaron diversos ensayos eléctricos y electromagnéticos. Concretamente, se llevaron a cabo cinco sondeos electromagnéticos, dos calcatas eléctricas y dos sondeos eléctricos verticales.

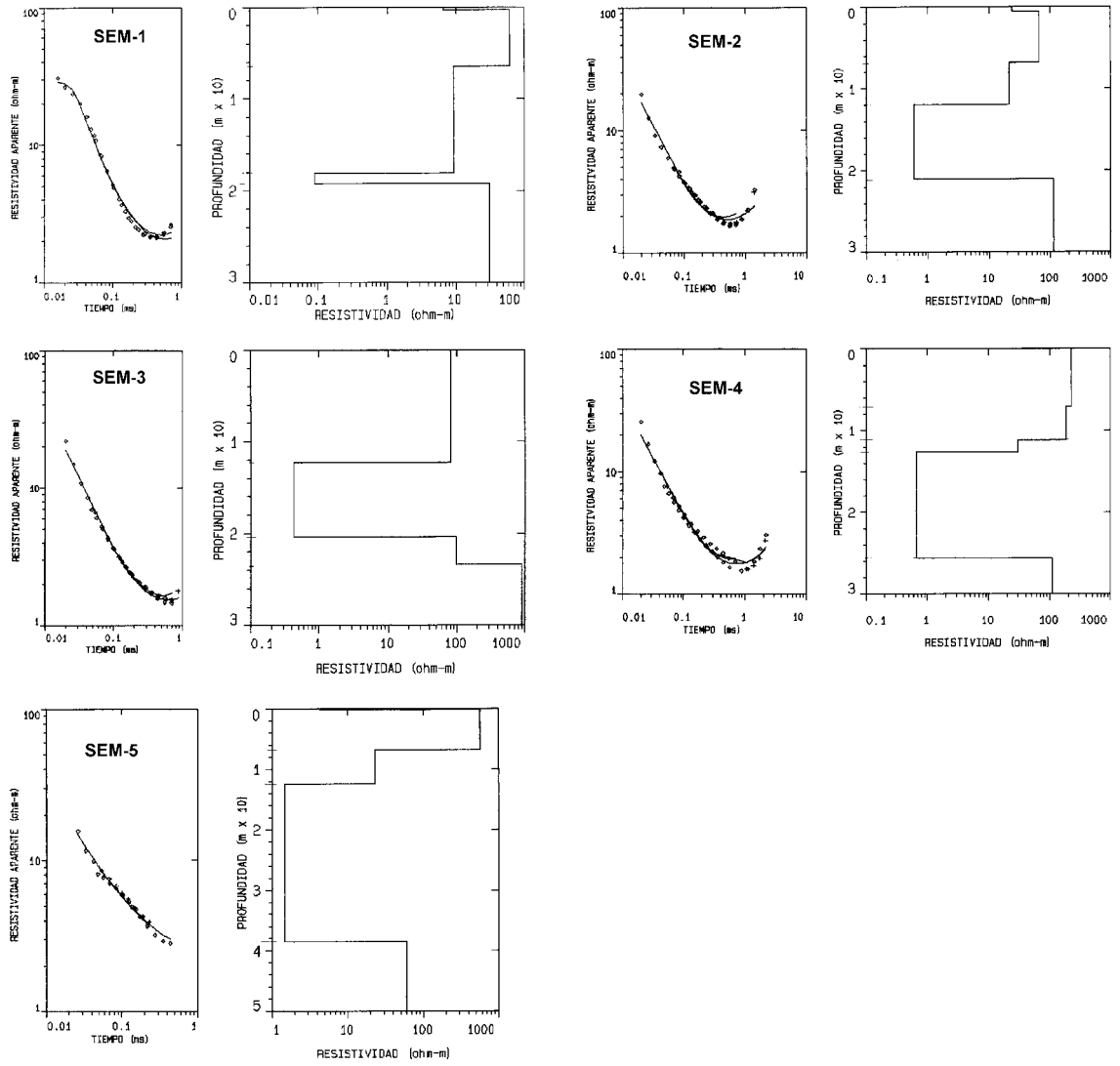
### **VI.6.2 Ensayos electromagnéticos**

Se realizaron cinco sondeos electromagnéticos sobre una línea longitudinal al vertedero en dirección N-W/S-E tomando como origen el punto 0 (Figura IV.8).

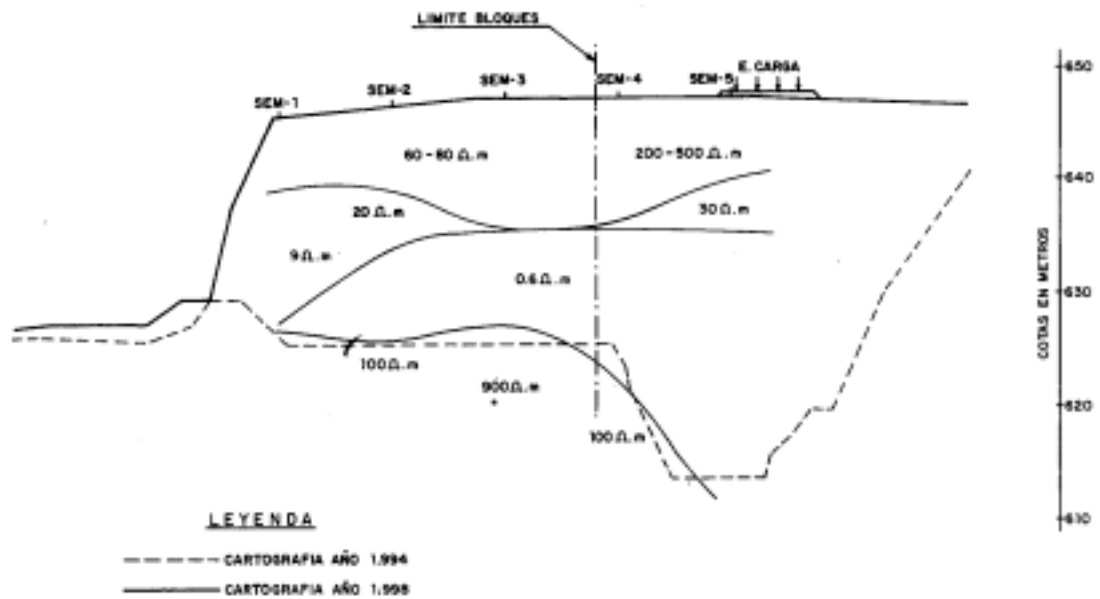
En este punto se situó la antena receptora (Rx) y, separada 15 metros de su centro, el bucle emisor (Tx) formado por una espira de cable en forma de cuadrado de 10 x 10 m. Este dispositivo se fue desplazando cada 50 m sobre la línea indicada hasta totalizar los cinco sondeos electromagnéticos (Figura IV.8).

En la Figura VI.11 se han representado, a la izquierda de cada sondeo electromagnético, los datos obtenidos en el campo (tiempo/resistividad aparente) y, a su derecha, el modelo correspondiente (profundidad/resistividad real) calculado.

La Figura VI.12 resume los resultados de los cinco sondeos electromagnéticos en un perfil del terreno bajo la línea longitudinal de investigación. Dicha figura incluye la geometría original de la zona sobre la que se asienta el vertedero.



**FIGURA VI.11** - Sondeos electromagnéticos transitorios SEM-1, SEM-2, SEM-3, SEM-4 y SEM-5.



**FIGURA VI.12** - Perfil correspondiente a los resultados analizados de los sondeos electromagnéticos realizados.

De esta figura se desprende la existencia de cuatro capas perfectamente diferenciadas:

- una primera capa superficial en la que, a su vez, se diferencian dos zonas: la de bloques con una resistividad de 60-80 ohm-m, y la de vertidos compactados con una resistividad de 200-500 ohm-m. Esta primera capa se extiende hasta los 7-12 m de profundidad, dependiendo de la zona.
- la segunda capa, muy variable en su distribución, presenta una resistividad más baja, entre 20 y 30 ohm-m, debido posiblemente a una contaminación parcial por lixiviados.
- la tercera capa se presenta muy homogénea, con resistividad de 0.6 ohm-m (muy conductora) comportándose como nivel piezométrico y se debe a

la saturación de los vertidos por lixiviados, presentando un descenso brusco en el extremo N-W de la zona de investigación por la depresión del nivel piezométrico en su cara libre.

- por último, por debajo de la zona saturada se identifica el perfil del sustrato rocoso en el que se asienta el vertedero. Esta zona presenta una resistividad característica de 100 ohm-m. En el sondeo SEM-3 se localiza un punto, a mayor profundidad, con un valor de 900 ohm-m, resultando lógico al tener en cuenta que la roca se encontrará más sana.

La heterogeneidad de los vertidos, así como la presencia de los lixiviados con una conductividad muy elevada, hacen imposible relacionar la resistividad con un comportamiento mecánico determinado, como se ha intentado comparando los perfiles electromagnéticos con los resultados de los índices SPT y de los micrómetros instalados en los sondeos.

### **VI.6.3 Ensayos eléctricos**

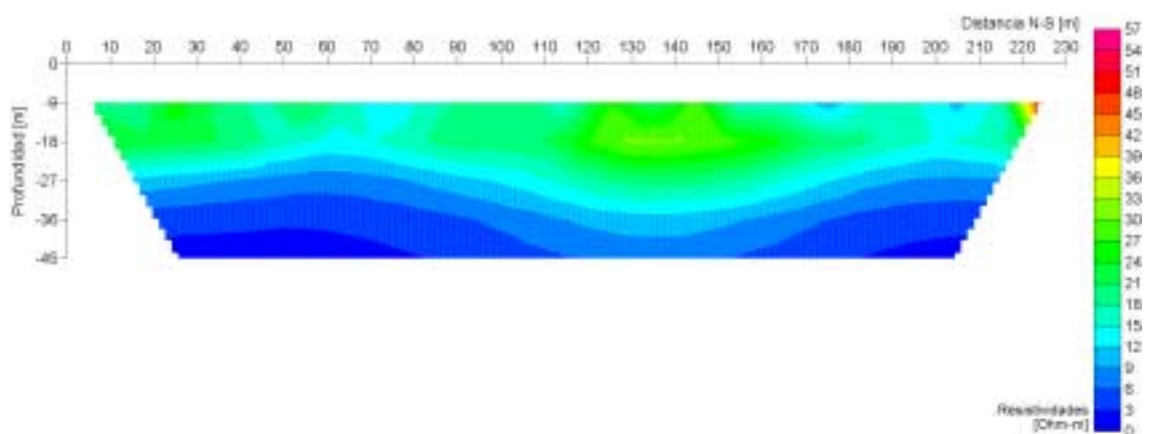
Sobre la misma línea que une los sondeos electromagnéticos se realizó una calicata eléctrica (dipolo-dipolo) de 230 m de longitud comenzando desde el extremo N-W. Dicha calicata, denominada CAL-1, se obtuvo mediante 17 desplazamientos de un extendimiento de 70 metros de longitud, compuesto por un dipolo de corriente y cinco dipolos de potencial ( $n = 5$ ) con separación de electrodos de 10 metros, y, finalmente, para cubrir el perfil, cuatro extendimientos diferentes de 70, 60, 50 y 40 metros de longitud, con 4, 3, 2 y 1 dipolos de potencial ( $n = 4, 3, 2, 1$ ), respectivamente, y todos ellos con su correspondiente dipolo de corriente.

En la zona de vertidos sin compactar se realizó otra calicata de 100 m de longitud comenzando por el extremo S-E. Dicha calicata, denominada CAL-2, se obtuvo

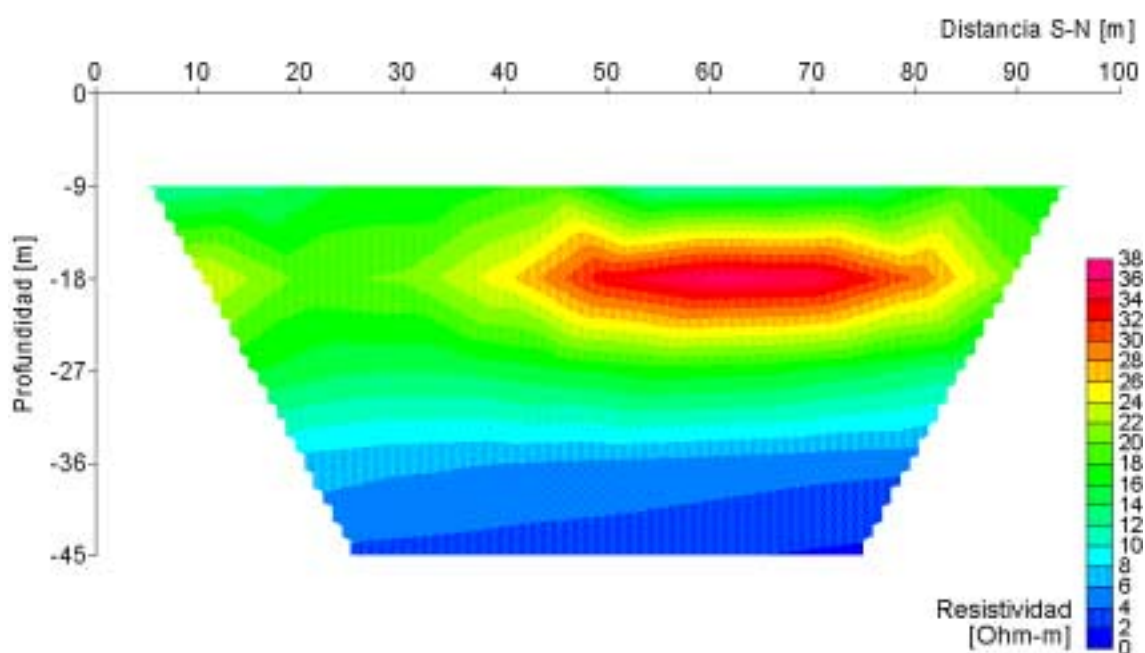
mediante 4 desplazamientos de un extendimiento de 70 m de longitud, compuesto por un dipolo de corriente y cinco dipolos de potencial ( $n = 5$ ) con separación de electrodos de 10 metros, y, finalmente, para cubrir el perfil, cuatro extendimientos diferentes de 70, 60, 50 y 40 metros de longitud, con 4, 3, 2 y 1 dipolos de potencial ( $n = 4, 3, 2, 1$ ), respectivamente, y todos ellos con su correspondiente dipolo de corriente.

Complementando a estas dos calicatas eléctricas se llevaron a cabo dos sondeos eléctricos verticales también situados sobre la línea que une los sondeos electromagnéticos y en la que se trazó la calicata CAL-1; el primero, SEV-1, con 160 m de extensión de alas, se centró en la zona de vertidos sin compactar, mientras que el segundo, SEV-2, en la zona de bloques, se extendía 120 m.

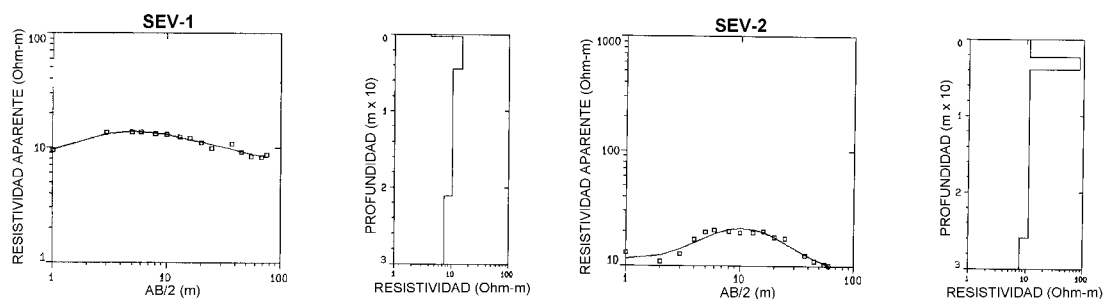
En las Figuras VI.13 y VI.14 se muestran los modelos de capas resultantes de las dos calicatas eléctricas, en ellas se puede observar una variación de resistividades decreciente con la profundidad entre 30 y 1 ohm-m, resultando, pues, contradictorio con los resultados obtenidos en los sondeos electromagnéticos. El mismo hecho se puede observar en los resultados obtenidos en los sondeos eléctricos verticales, Figura VI.15.



**FIGURA VI.13** - Modelo de capas resultante de la interpretación de la calicata eléctrica CAL-1 (error RMS 11,4%).



**FIGURA VI. 14** – Modelo de capas resultante de la interpretación de la calicata eléctrica CAL-2 (error RMS 10%)



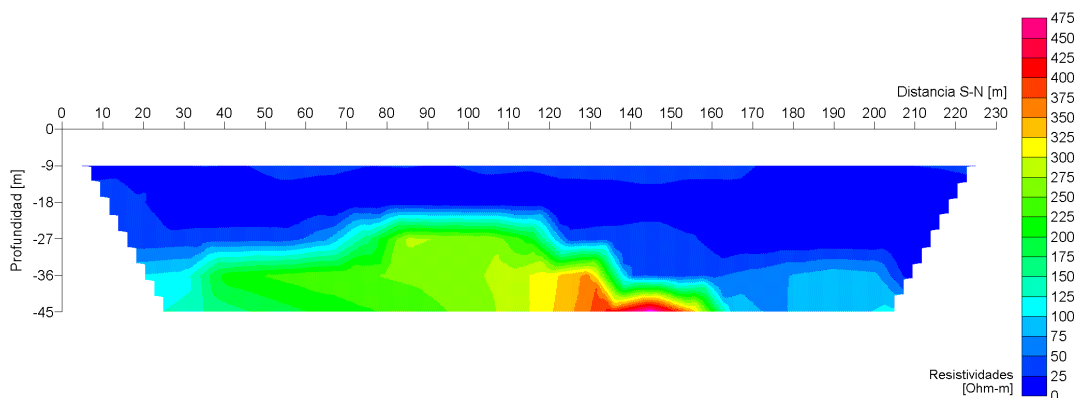
**FIGURA VI.15** - Sondeos eléctricos verticales SEV-1 y SEV-2.

La explicación de estos resultados radica en el hecho de que la conductividad extremadamente elevada del conjunto lixiviado-residuos (0,6 ohm-m) canaliza toda la corriente eléctrica a través de esta capa, impidiendo la detección de las capas inferiores más resistivas (sustrato rocoso sobre el que se asienta el vertedero). En este sentido, los métodos electromagnéticos no necesitan cerrar el

circuito eléctrico para medir la resistividad del terreno, ya que se basan en la inducción que producen anillos independientes de corrientes difusivas.

La interpretación de las dos calicatas eléctricas se ha conseguido mediante inversión automática hasta alcanzar un error mínimo en la diferencia entre las resistividades aparentes medidas y calculadas. Así, para la calicata CAL-1, se obtuvo un error RMS de 11,4% en la octava iteración, mientras que en la calicata CAL-2 se bajó hasta un 10% en la sexta iteración.

Como evaluación de la utilidad de estos métodos en este caso concreto, se forzó la inversión tomando como modelo de partida el resultado del perfil compuesto por los sondeos electromagnéticos representado en la Figura VI.16. Como resultado se obtuvo un error más elevado del 27,7% ya que los datos de resistividad aparente de la zona inferior no se corresponden con los obtenidos en el campo.



**FIGURA VI.16** – Distribución de resistividades obtenida introduciendo como modelo de partida el perfil obtenido de los sondeos electromagnéticos (error RMS 27,7%).

Como conclusión, cabría deducir que estos métodos eléctricos y electromagnéticos presentan incertidumbres en la interpretación, debido fundamentalmente entre otros motivos a la "distorsión" que introduce la

presencia del lixiviado, en su caso, así como la propia constitución de los vertidos, ocasionalmente (materiales metálicos, etc), además de las heterogeneidades intrínsecas a los mismos.



# CAPÍTULO VII

## CAPÍTULO VII

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE  
**PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE**  
RESULTADOS DE AUSCULTACIÓN  
**RESULTADOS DE AUSCULTACIÓN**

## **VII.I INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se presentan resultados obtenidos durante la campaña de auscultación del terraplén experimental, que comprenden líneas continuas de asiento, puntos de referencia, micrómetro deslizante e inclinómetro. También se presentan medidas de temperatura en profundidad obtenidas a través de una línea de termistancia.

La primera lectura fue efectuada el día 7 de julio de 1998 (esta lectura corresponde a lectura cero). Tras tomar la referida lectura, comenzó a construirse el terraplén experimental. El terraplén supone un incremento medio de presión de  $64 \text{ kN/m}^2$ . El tiempo de construcción del terraplén fue de 4 días.

Las lecturas significativas de los asientos de los equipos se iniciaron en el día 15 de julio de 1998, o sea, aproximadamente 6 días después del término de la construcción del terraplén experimental. En el primer mes, se efectuaron medidas cada 10 días; los demás meses, en intervalos de 30 y 60 días. El periodo total de observación ha sido de 19 meses.

En la zona elegida del vertedero, los residuos sólidos empezaron a ser vertidos en abril de 1994 y el término fue en abril de 1998. De forma que se trata de residuos frescos. Es natural pensar que durante y después de la operación de disposición de residuos hubo compresión, sin embargo como este terreno no había sido sometido a una carga tan alta se tomó como lectura cero (carga noval) la lectura efectuada después de la construcción del terraplén de carga.

De forma que en el caso de la línea continua de asiento y puntos de referencias que están situados próximos la carga se calcularon los asientos inmediatos y primarios. Ya para el micrómetro deslizante situado a 15 m de la carga, se consideró el tiempo cero correspondiente al término de los vertidos, o sea en abril de 1998. Para este caso se calcula únicamente los asientos secundarios,

debido a peso propio y descomposición de la materia orgánica, pues se considera que los asientos inmediatos y primario ya ocurrieron durante la etapa de operación del vertedero.

Durante el período de medidas ocurrieron algunas incidencias. En enero de 1999 se observó que el punto de referencia y la arqueta de protección del mismo habían sido destrozados, probablemente por una máquina de orugas que pasó por encima.

Para su reposición se limpió todo el escombros resultante de la rotura de la arqueta, para después cortar la varilla cuyo extremo superior constituye el punto de referencia y el tubo metálico de protección. Este corte se realizó por debajo de la superficie del terreno y posteriormente se prolongó mediante el empalme de un trozo de varilla del mismo tipo de material dotado en su extremo del elemento de apoyo de la mira. Posteriormente se protegió con ladrillos y mortero de cemento y se señaló con una cinta y tablas de madera.

En julio de 1999, el micrómetro deslizante se quedó fuera de rango, debido a los grandes asientos registrados en este periodo. En este caso se hizo un nuevo sondeo próximo al anterior y se instaló un nuevo micrómetro. Las nuevas medidas se interpretaron como una continuación de las medidas obtenidas con el primer micrómetro.

Otro problema que ocurrió durante el periodo de auscultación, fue que el inclinómetro, después de 2 meses, solo podía registrar las medidas hasta los 14 metros de profundidad. Este hecho fue consecuencia de las grandes deformaciones ocurridas por el efecto de la colocación de la carga.

La línea de termistancia también presentó problemas. Con este equipo se registraron medidas a lo largo de toda la profundidad solo hasta marzo de 1999, en los demás meses no fue posible registrar las medidas en toda la profundidad deseada, en algunos tramos las medidas efectuadas presentaban

valores muy altos de temperatura, lo que hace pensar que se trataba de un fallo en el equipo. Por este motivo, se eliminaron algunos valores obtenidos en los referidos tramos.

## **VII.2 LÍNEA CONTÍNUA DE ASIENTO**

### **VII.2.1 Introducción**

En la zona elegida del vertedero se instalaron 2 líneas continuas de asiento con la finalidad de medir los asientos provocados por el terraplén de carga. La descripción, instalación y toma de lecturas de las referidas líneas están detalladas en el capítulo V que trata de la descripción de las técnicas de ensayos de los equipos empleados.

En las Tablas A.1 y A.4 del Anejo se encuentran las medidas de asientos obtenidas a través de las líneas continuas de sección 1 y 2 respectivamente.

### **VII.2.2 Comportamiento a corto plazo**

Los gráficos de las Figuras VII.1 y VII.2 muestran los valores de asientos obtenidos a lo largo de los puntos de las líneas 1 y 2 en todo el período de medidas.

A través de los gráficos se observa que hay gran coherencia entre los resultados obtenidos con las dos líneas continuas de asiento.

El asiento inicial en el centro del terraplén ( punto 12) siete días después de su construcción, fué de aproximadamente 50 cm. En los extremos, el asiento fue considerablemente menor, alrededor de 15 cm.

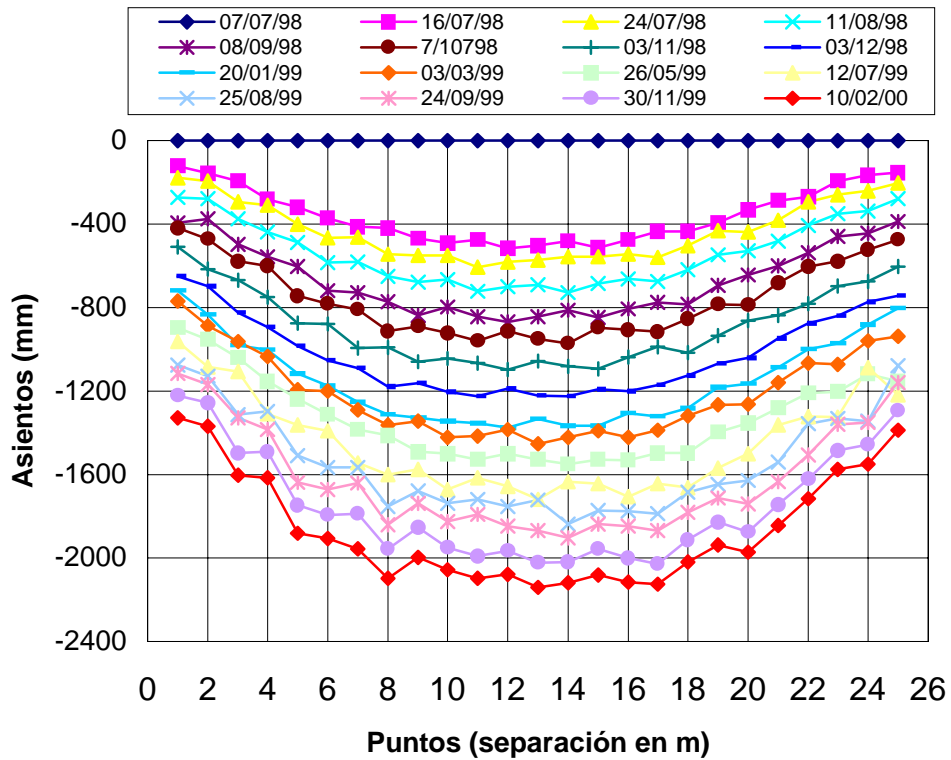


FIGURA VII.1 – Control de asiento del terraplén de carga, Sección 1

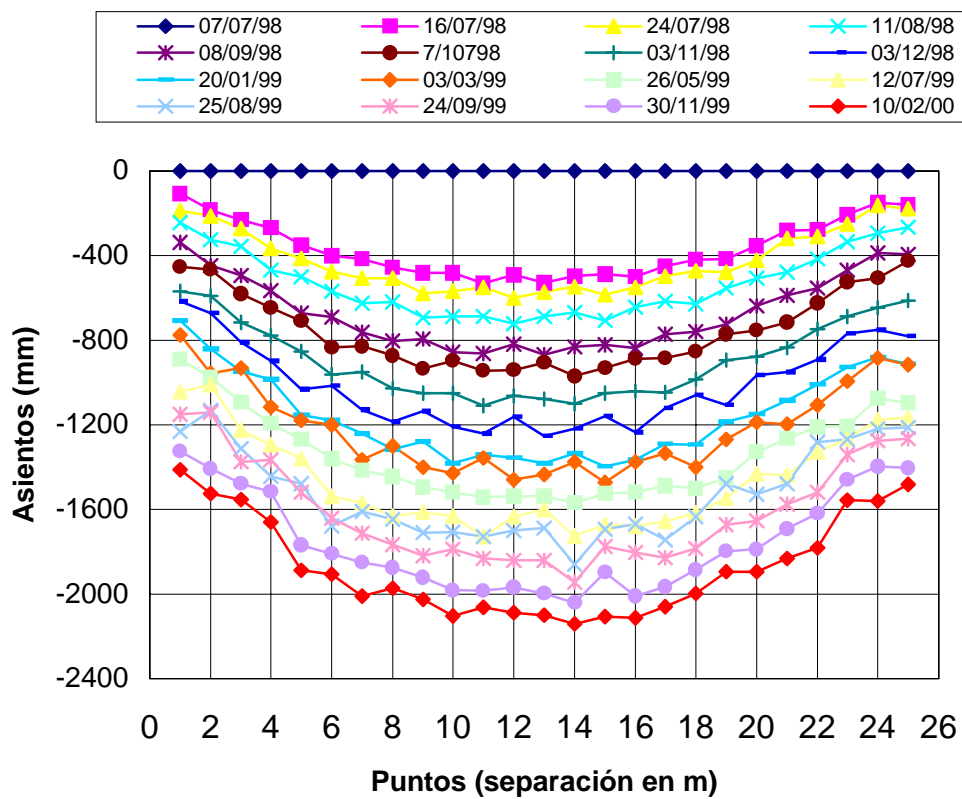


FIGURA VII.2 – Control de asiento del terraplén de carga, Sección 2

La gran magnitud del asiento inmediato es confirmada por varios autores, por ejemplo, König & Jessberger (1997) citan que ensayos realizados por Jessberger & Kockel (1993), con períodos de observación de un mes, en los que la mayor magnitud de asiento ocurrió 10 días después de la aplicación de la carga. Resultados de Boutwell & Fiori (1995) confirman esta tendencia, en este caso se produjo un asiento de gran magnitud después de 2 días de aplicación de la carga.

Casanovas (1989), comenta que una característica fundamental del proceso de precarga para este tipo de material es que los asientos que se producen como consecuencia de este proceso son muy rápidos, y que el terreno se comporta de forma lineal con el nivel de cargas impuestos.

Como consecuencia de la gran magnitud del asiento inicial, la superficie del terreno donde se apoyaba la caja de lectura del inclinómetro bajó inicialmente 10 cm conforme se muestra en la Foto VII.1. A medida que aumentaban los asientos con el tiempo esta separación se incrementó hasta alcanzar 50 cm en el período final de medidas, la Foto VII.2 enseña esta incidencia.



**FOTO VII.1** – Situación de la caja de lectura tras el asiento inmediato.



**FOTO VII.2** – Situación de la caja de lectura a medida que se incrementaban los asientos.

La gran magnitud del asiento inicial ocurrido puede ser explicada a través de la composición de los residuos, la forma como fueron vertidos y la magnitud de la carga aplicada. Como fue mencionado anteriormente, los residuos están constituidos básicamente por papel y plástico, estos materiales son clasificados por Grisolia & Napoleoni (1996) como altamente deformables. Con relación a la forma en que fueron vertidos los residuos se puede decir que en esta zona los residuos no sufrieron ningún proceso de compactación y además la carga aplicada era relativamente alta para este tipo de material,  $64 \text{ kN/m}^2$ .

De acuerdo con Wall & Zeiss (1995) el asiento inmediato es análogo a la compresión elástica que ocurre en los suelos, por lo que se puede calcular el módulo de elasticidad fácilmente. Con el valor de asiento inmediato se ha calculado el módulo de deformación en la hipótesis de placa flexible situada sobre un semi espacio de Bousinesq de acuerdo con la expresión:

$$E = \frac{K \cdot q \cdot b(1 - \nu^2)}{S} \quad \text{VII.1}$$

donde:

$E$  = módulo de deformación ( $\text{kN/m}^2$ )

$K$  = coeficiente de Schleicher ( $n = 40/20 = 2$ )

$q$  = variación de la carga ( $64\text{kN/m}^2$ )

$b$  = lado del rectángulo (20 m)

$\nu$  = coeficiente de poisson (0,3)

$S_i$  = asiento inicial (0,50 m)

El módulo de elasticidad así obtenido es de  $1864\text{kN/m}^2$ . Este valor es coherente con los valores apuntados por Charles (1984) que indica valores del módulo de deformación para residuos domésticos variando de  $1000\text{kN/m}^2$  a  $2000\text{ kN/m}^2$ .

De igual forma que los asientos inmediatos, los asientos por compresión primaria es dependiente del incremento tensional. Este proceso, según Sowers (1973), se produce en un tiempo relativamente mayor que el asiento inmediato, en un espacio de un o dos meses, después de la aplicación de la carga.

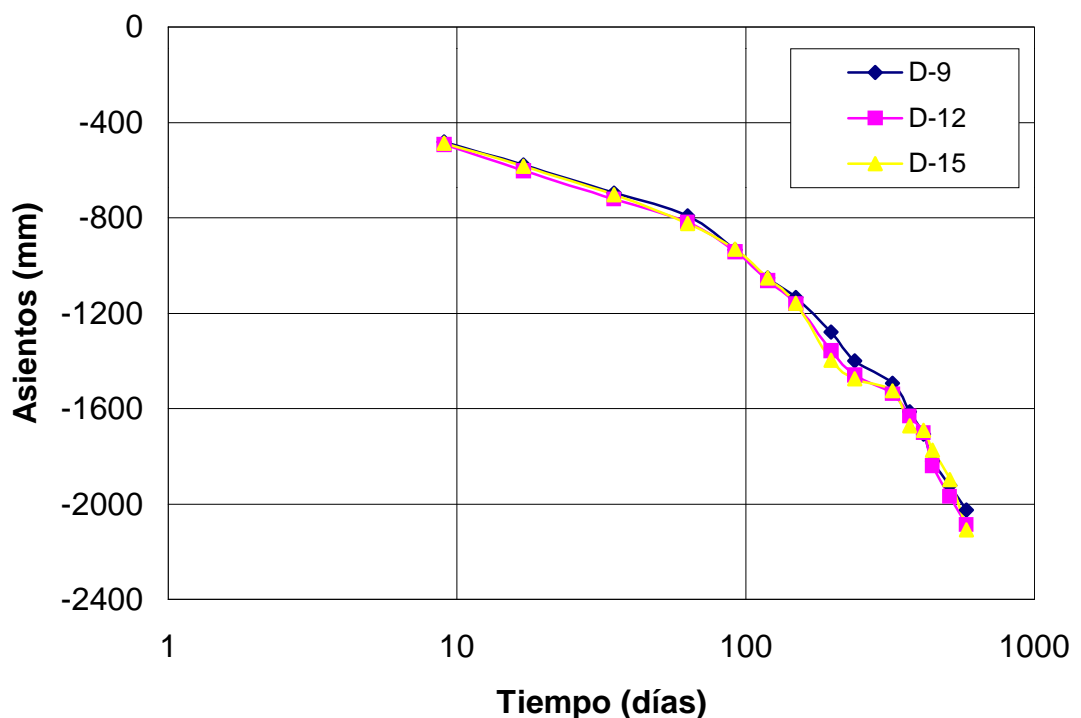
La transición de la compresión primaria para la compresión secundaria se observa en los gráficos de velocidad de asiento. A través de estas curvas se puede determinar el tiempo que ocurrió esta transición y, obviamente determinar el valor de la compresión primaria.

Los gráficos de las Figuras VII.3 y VII.4 muestran las medidas de asiento con relación al tiempo en los puntos 9, 12 y 15 referentes al centro del terraplén de carga de las líneas continuas de asiento 1 y 2 respectivamente. Como se puede observar, la transición de la compresión primaria para la compresión secundaria se produce en un espacio de 90 a 100 días y no entre 30 y 60 días como sugerido por Sowers (1973). Esa tendencia está confirmada por autores como, Stulgis et al (1995), Bjamgard & Edgers (1992) y Fasset et al (1994).

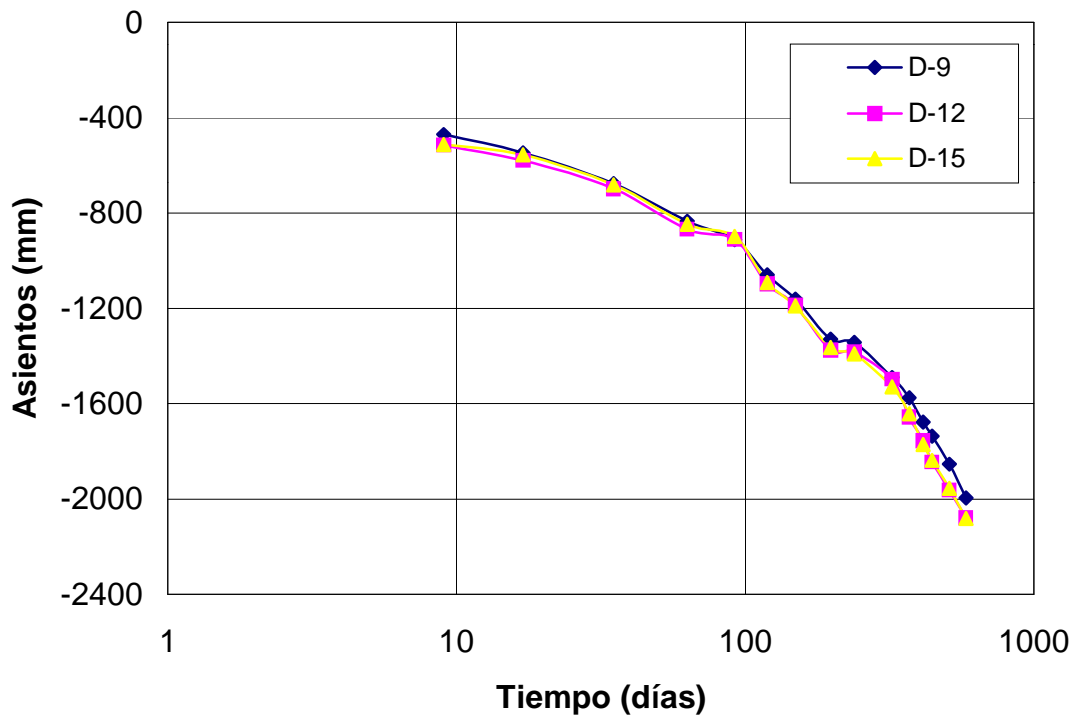


Wall & Zeiss (1995) comentan que los procesos de compresión primaria y secundaria ocurren simultáneamente. No obstante, la magnitud de la compresión primaria es mayor y enmascara el efecto de la compresión secundaria en este período de tiempo. Después de 30 días la compresión secundaria progresa y eventualmente alcanza la misma orden de magnitud de la compresión primaria. Por este motivo ellas son modeladas separadamente.

La lectura efectuada en el día 07 de octubre de 1998 corresponde a 92 días de construido el terraplén de prueba; el asiento acumulado hasta esa fecha en el centro del terraplén fue 93cm de media para las dos líneas continuas. El asiento inmediato y de compresión primaria en el centro del terraplén (punto 12) corresponde a aproximadamente al 45% del asiento total ocurrido en la zona.



**FIGURA VII.3** – Control de asiento con relación al tiempo -Sección 1

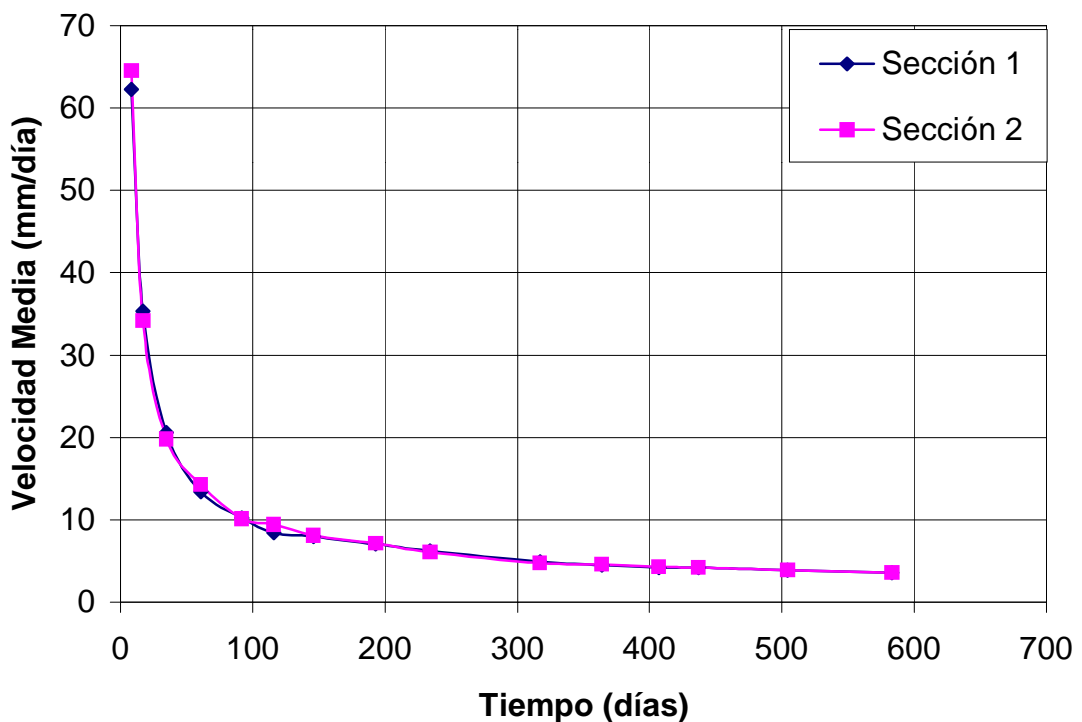


**FIGURA VII.4** – Control de asiento con relación al tiempo -Sección 2

La variación de velocidad se observa mejor en el gráfico de la Figura VII.5 donde representa la velocidad media de asiento con relación al tiempo correspondiente a medidas efectuadas en la porción central del terraplén, (punto 12). Como se puede observar la velocidad de asiento decrece progresivamente con el tiempo.

Las mayores velocidades registradas se refieren a los asientos inmediatos y primarios. La amplitud de variación es bastante considerable. En media, para las dos líneas continuas de asiento, la velocidad pasa de 63,5 mm/día a 3,62 mm/día en el período final de mediciones. Con relación a este aspecto la gran mayoría de los autores están de acuerdo, por ejemplo Sowers (1973) comenta que los asientos secundarios se prolongan por un largo periodo de tiempo, aunque con velocidades inferiores a las de los asientos inmediatos y primarios. Frantzis (1991) cita valores de velocidad variando en media de 46 mm/mes en

los primeros 5 meses de observación hasta alcanzar el valor de 4 mm/mes después de 25 meses. König & Jessberg (1997) comentan que la velocidad de asiento decrece con el tiempo y con la profundidad. Carvalho (1999) indica valores de velocidad de 14 mm/día en las primeras etapas de observación y 3 mm/día en las últimas etapas. Esta autora señala que la reducción de velocidad con el tiempo también fue observada en los resultados obtenidos de compresión confinada realizados en laboratorio.



**FIGURA VII.5** – Variación de velocidad con el tiempo

### VII.2.3 Comportamiento a largo plazo

Los asientos ocurridos debidos a los procesos de compresión secundaria en el centro del terraplén fueron de aproximadamente 115 cm y 117 cm para las líneas continuas de sección 1 y 2 respectivamente. En los extremos, los asientos fueron aproximadamente de 105 cm y 103 cm.

Los referidos valores de asiento se deben a los procesos de “creep”, degradación química y descomposición biológica. Como fue comentado anteriormente, no se puede separar las parcelas resultantes de estos dos procesos, sin embargo se puede hacer algunas consideraciones. Como es un proceso mecánico el asiento debido a los procesos de creep es consecuencia de la carga del peso propio y de la carga del terraplén. La suma de estas dos cargas, con el tiempo, acelera el proceso de acomodación del terreno. Particularmente, en este caso en que el terreno (vertedero) es profundo (altura 33m) y además fue sometido a una carga estática es natural que el asiento a largo plazo tenga un valor considerable. Otro factor que influyó en la magnitud del asiento físico a largo plazo fue la densidad de los residuos. En el relleno investigado la densidad encontrada fue de  $5 \text{ kN/m}^3$ , valor que corresponde a un material muy debilmente compactado (Fasset et al., 1993; Sanchez Alciturri et al., 1993c). Por lo tanto, si la densidad esta íntimamente relacionada con el potencial de asiento, es natural que los movimientos verticales ocurridos sean significativos.

Con relación a la cantidad de asiento resultante de la descomposición y degradación, se puede señalar que se trata de residuos frescos, más propensos a sufrir descomposición. Además, en el relleno no hay sistema de drenaje de los lixiviados, y consecuentemente hay un mayor contenido de humedad en la masa de residuos y se sabe que el agua promueve la aceleración de la descomposición y degradación de la materia orgánica.

Los asientos debidos a los procesos de creep y descomposición de la materia orgánica corresponden aproximadamente a 55% del asiento total ocurrido en la zona investigada. Este resultado confirma la observación de Watts & Charles (1990) de que los asientos a largo plazo representan la mayor proporción del asiento total ocurrido en un relleno. No obstante, Green & Jamnejad (1997), basándose en experimentos de laboratorio, observan que cuando se somete residuos domésticos a cargas estáticas, mas del 70% del asiento ocurre

inmediatamente mientras el 30% del asiento ocurre en un largo periodo de tiempo.

En referencia al porcentaje de asiento con relación a la altura del relleno, hay que hacer algunas consideraciones. La altura del vertedero desde el sustrato hasta la última capa de basuras y la capa de cobertura era aproximadamente de 33 m. Obviamente, esta altura ha sufrido alguna disminución con el tiempo desde que se dejó de verter basura hasta que el terreno fue sometido a la carga del terraplén experimental. Este hecho es una dificultad más en el cálculo del porcentaje de asiento. Como no es posible saber cuanto ha bajado el terreno hasta ser sometido a la carga del terraplén, se considera aquí la misma altura de 33 m. El porcentaje total de asiento encontrado llevando en consideración este valor es de 6,3%. Charles & Burland (1982) apud Charles (1984) clasificaron determinados materiales según el porcentaje de asiento sufrido bajo carga. De acuerdo con estos autores, movimientos que exceden 2% de la altura están relacionados con rellenos de residuos frescos con alto porcentaje de materia orgánica y sujetos a sufrir procesos de descomposición y degradación. Los autores también observan que este tipo de relleno es capaz de desarrollar grandes asientos y deben realizarse técnicas de mejora en el caso que sean utilizados para alguna obra.

### **VII.3 PUNTOS TOPOGRÁFICOS DE REFERENCIA**

#### **VII.3.1 Introducción**

Con la finalidad de investigar los movimientos verticales provocados por el terraplén de carga, se instalaron 18 de puntos de referencia situados a ambos lados del terraplén, siendo 9 en el lado Norte y 9 en el lado Sur del terraplén. Todas las nivelaciones realizadas parten de un punto fijo instalado para este fin en el sondeo S-1.

Los valores de los asientos obtenidos a través de los puntos de referencia durante el período de medición se encuentran en las Tablas A.5 y A.6 del Anejo. Los movimientos verticales en cada uno de los puntos, se han obtenido restando de los valores de las cotas tomadas en distintas fechas el valor de la lectura cero o inicial.

En el período de tiempo entre las lecturas del día 3/12/98 y 20/01/99 se puso fuera de servicio el punto fijo. Después de ser reparado, se desconocía el valor de la variación del movimiento que pudiera haberse originado en el mismo. Para determinar esta variación de movimiento, se ha considerado el movimiento registrado en las proximidades del punto P-2 (el punto P-2 es el hito de referencia para las lecturas de las líneas) a través de la línea continua de asiento. Este valor, sumado al movimiento registrado hasta el 03/12/98, se toma como el valor del movimiento del día 20/01/99 referido al origen.

En las lecturas sucesivas se tomó como referencia la cota nueva del punto fijo (20/01/99) para calcular la variación de movimiento. Este valor se suma al valor del movimiento total registrado hasta esa fecha.

### **VII.3.2 Comportamiento a corto plazo**

Los gráficos de las Figuras VII.6 a VII.7 muestran los valores de asientos con relación al tiempo observados a través de los puntos de referencia del lado norte y sur del terraplén experimental.

Un primer hecho interesante fue observar que en el lado sur los asientos son mayores de que los asientos medidos en el lado norte; esto puede estar relacionado con la gran heterogeneidad del material que en determinadas zonas, relativamente próximas, pueden presentar distintas deformaciones.

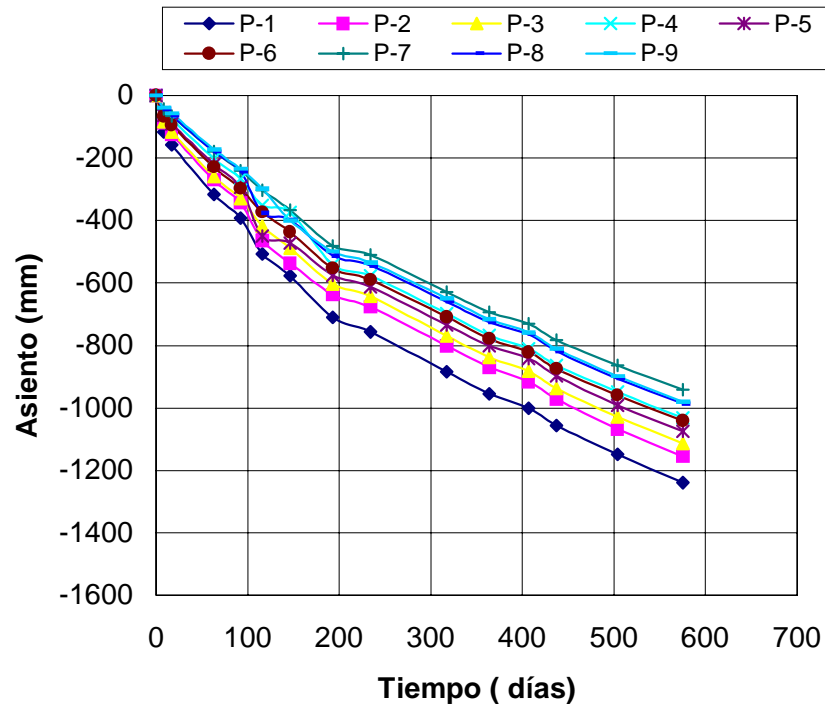


FIGURA VII.6 – Movimientos verticales – Lado Norte

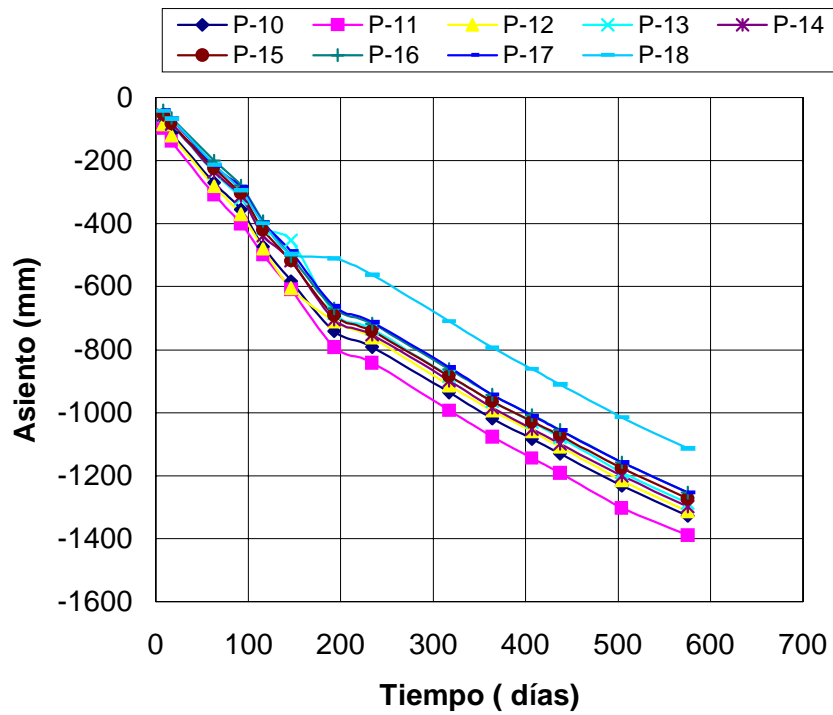


FIGURA VII.7 – Movimientos verticales – Lado Sur

Como se puede observar, los puntos 1,2 y 3 (lado Norte) y 10,11 y 12 (lado Sur) próximos al terraplén experimental, sufren mayores asientos que los puntos más lejanos, lo que evidencia la influencia de la carga en los referidos puntos, como es muy bien conocido.

El valor de asiento medido en el día 15 de julio de 1998, seis días tras la colocación de la carga en los puntos 1,2 y 3 (lado Norte) y 10,11 y 12 (lado Sur) fue de 9,20 cm en media. Mientras que en los puntos 7,8 y 9 (lado Norte) y 16, 17 y 18 (lado Sur), más lejanos a carga, fue de 4,12cm de media.

En el gráfico de la Figura VII.7 se observa que los puntos P-12 y P-18 sufren un levantamiento en la lectura tomada en el día 3/03/99. Con relación al punto P-12 parece ser un error de lectura ya que en las demás medidas los valores de asientos muestran una tendencia contraria. En el caso del punto P-18 el movimiento aparentemente no está justificado por un error humano ya que en las demás lecturas los movimientos tienden a bajar como ocurre con el P-12. Parece ser que el punto P-18 ha sufrido un golpe u otro tipo de incidencia que lo ha invalidado.

Como fue comentado anteriormente, el valor de la compresión primaria es determinado observándose los gráficos de velocidad de asiento que muestran el tiempo de transición de la compresión primaria para la secundaria.

Los gráficos de las Figuras VII.8 a VII.13 muestran el registro de asientos medidos con relación al tiempo de auscultación de la zona investigada. Cada gráfico presenta 3 puntos que corresponden a cada una de las tres filas de ambos los lados del terraplén, o sea lado Norte y Sur.

Igualmente como las líneas continuas de asiento, la transición de la compresión primaria para la secundaria se produce en un espacio de tiempo entre 90 y 100 días.



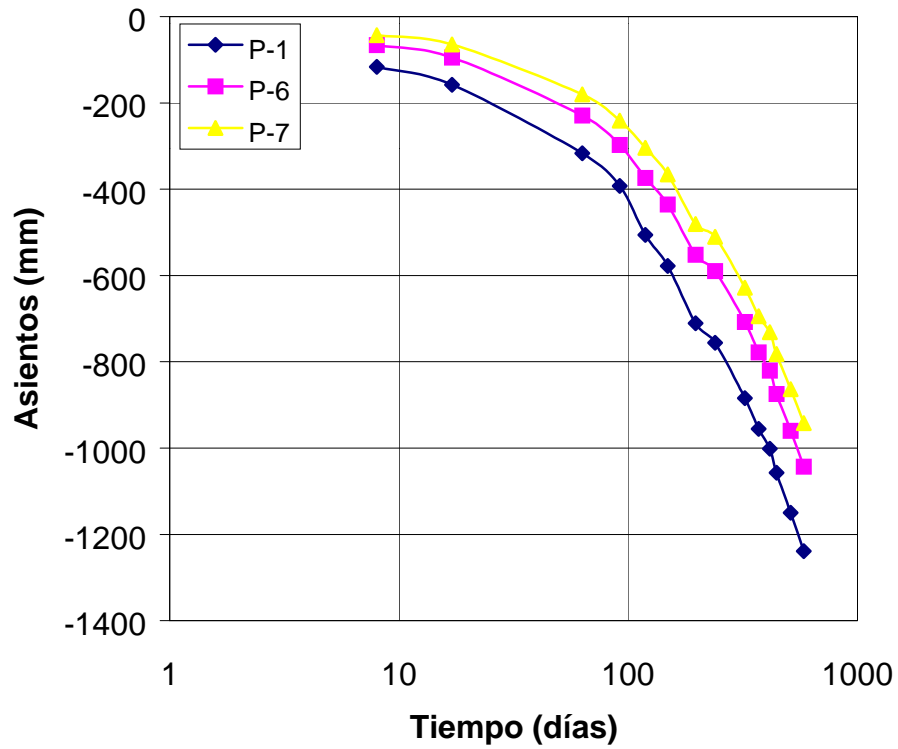


FIGURA VII.8 - Velocidades de asientos, Puntos 1,6 y 7

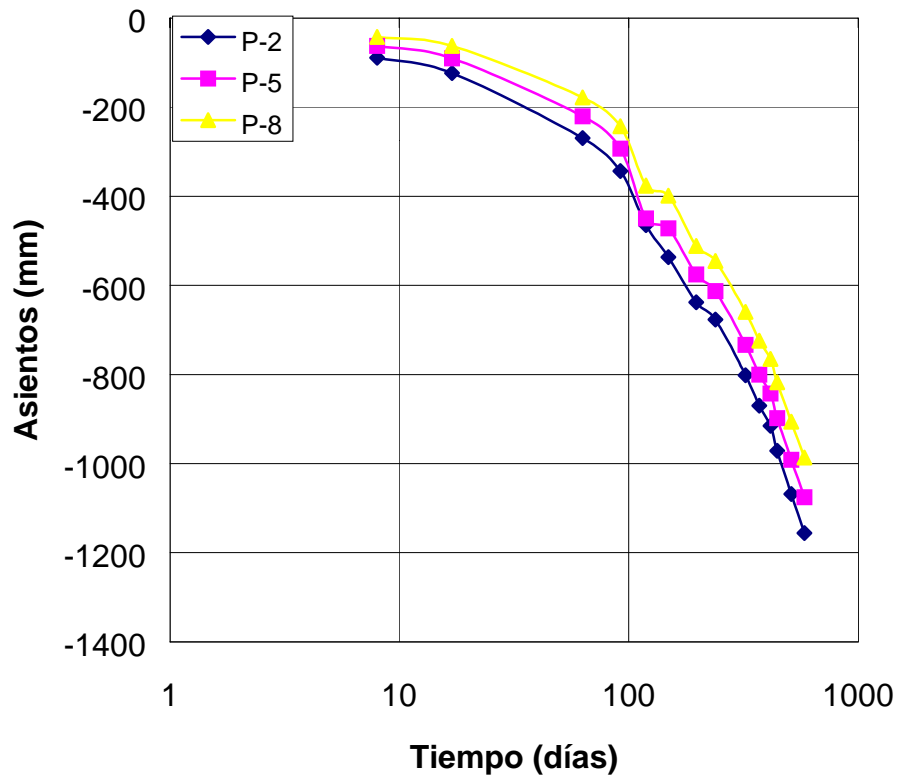


FIGURA VII.9 - Velocidades de asientos, Puntos 2,5 y 8

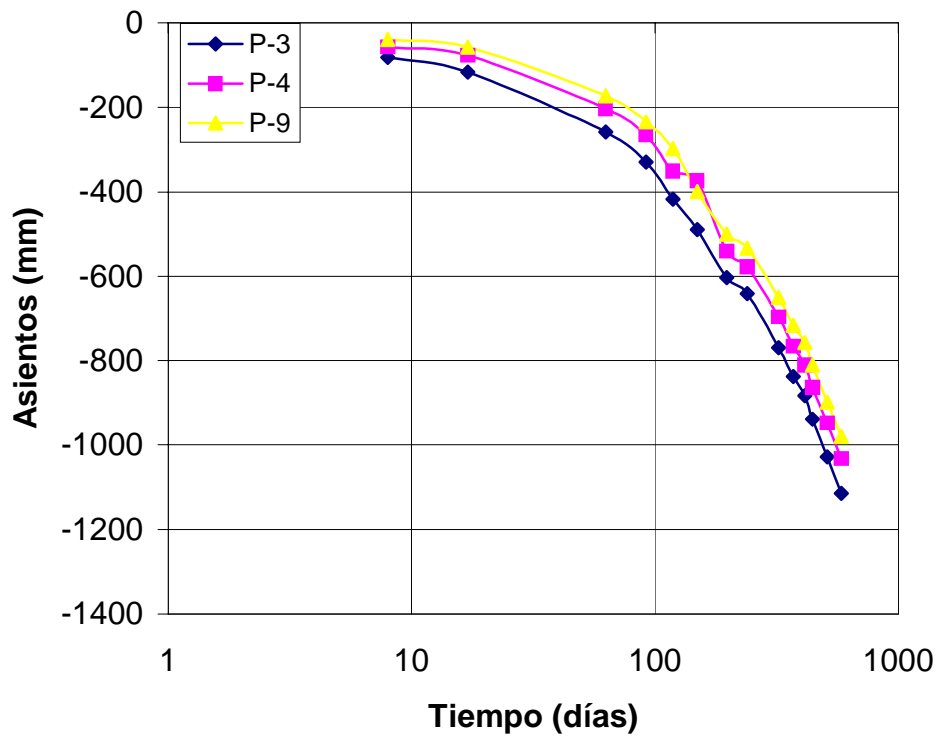


FIGURA VII.10 - Velocidades de Asiento, Puntos 3,4 y 5

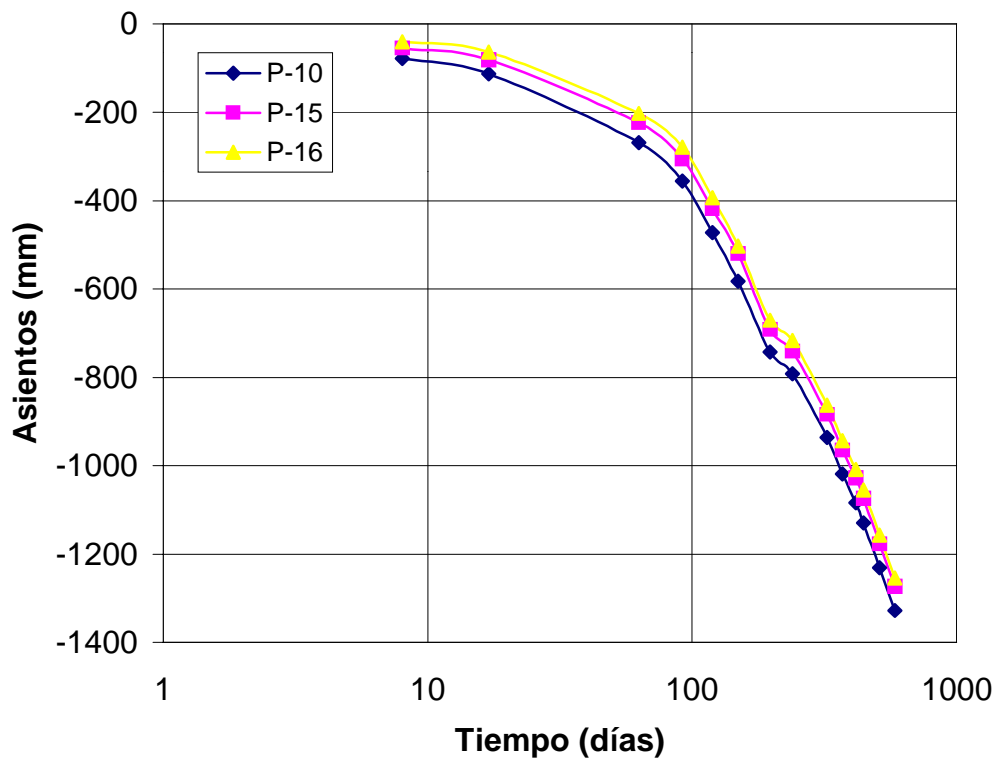
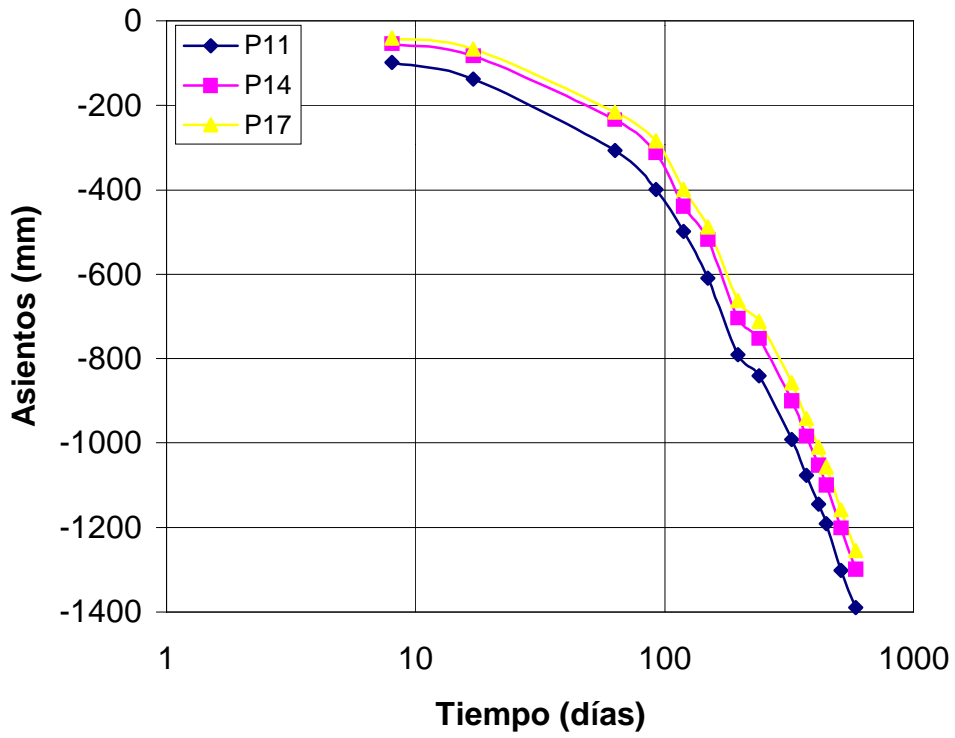
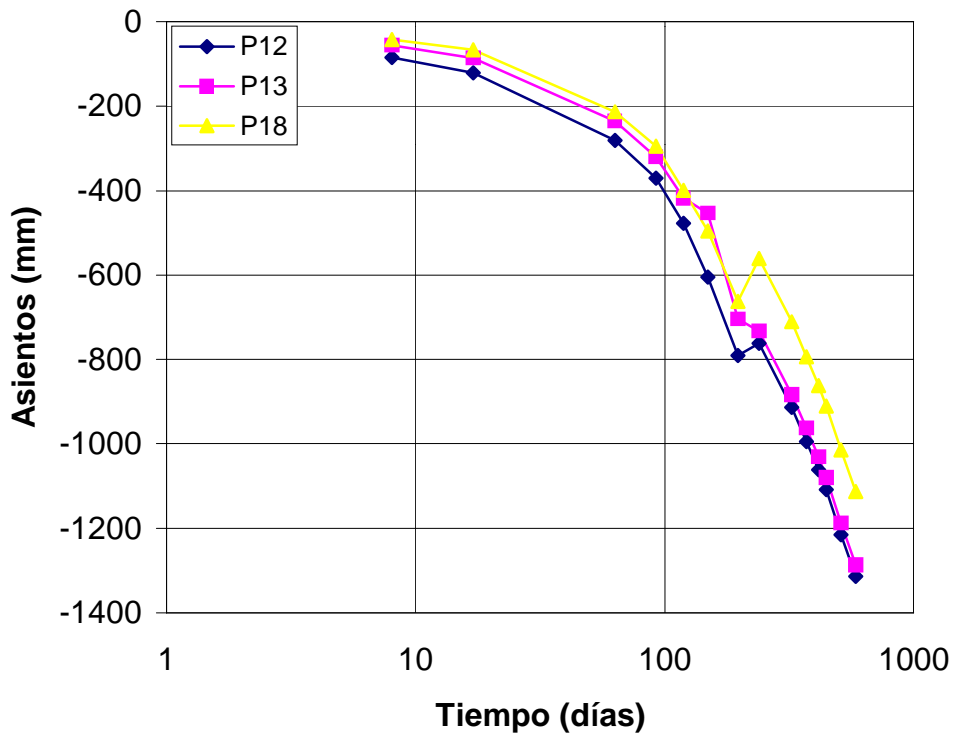


FIGURA VII.11 - Velocidades de Asientos, Puntos 10, 15 y 16



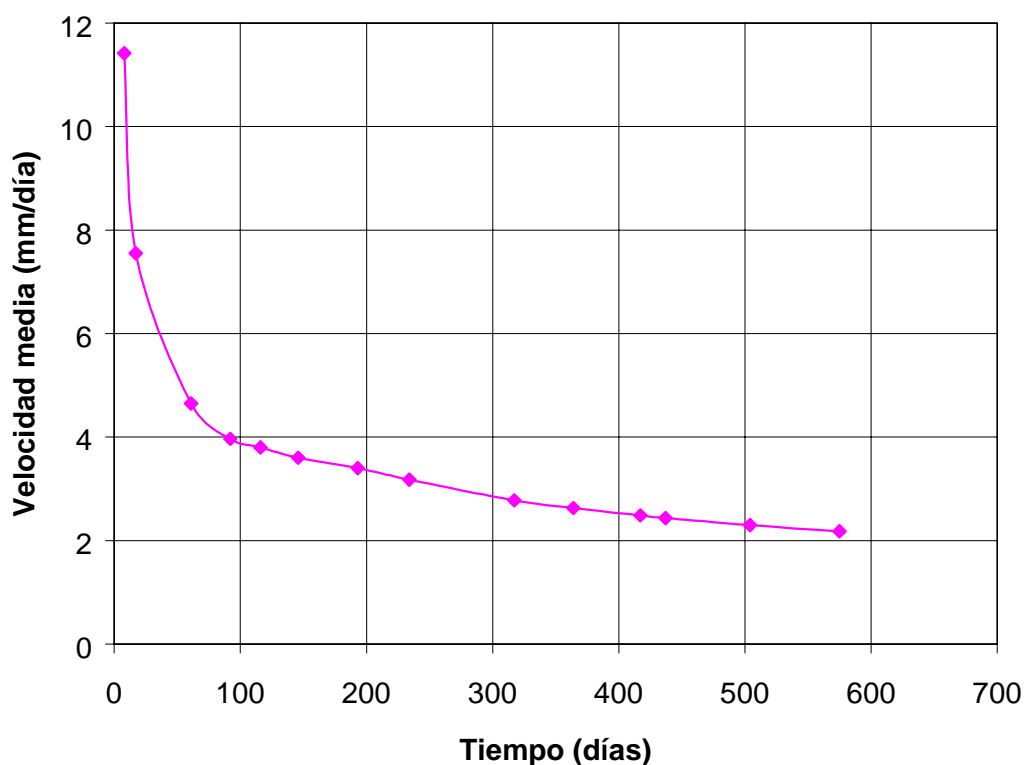
**FIGURA VII.12** - Velocidades de Asientos, Puntos 11, 14 y 17



**FIGURA VII.13** - Velocidades de Asientos, Puntos 12, 13 y 18

Considerando este tiempo (lectura 07/10/98), los asientos ocurridos por compresión primaria, en los puntos próximos a carga, fueron de 36,5 cm de media. En los puntos más lejanos, la media de los asientos fue de 26,3 cm. Considerando una altura media del relleno de 33m, estos valores corresponden respectivamente a una deformación de 1,10% y 0,80% de la altura del relleno.

En el gráfico de la Figura VII.14 se muestra la variación de velocidad media de asiento con relación al tiempo en los puntos donde se registraron los mayores movimientos verticales ( 1,2, 3, 10, 11 y 12). La velocidad media inicial fue en media de 11,42 mm/día, mientras que en la etapa final de medidas la velocidad de asiento fue de 2,18 mm/día. La disminución de la velocidad de asiento con relación al tiempo está comentada en la literatura técnica y la gran mayoría de los autores están de acuerdo con esta tendencia, (Sowers, 1973; Frantzis,1991; König & Jessberg, 1997 y Carvalho, 1999).



**FIGURA VII.14** – Variación de velocidad media con relación al tiempo

### **VII.3.3 Comportamiento a largo plazo**

Los movimientos verticales registrados durante el período de auscultación, indican que el asiento a largo plazo en los puntos de los lados Norte y Sur respectivamente 1, 2, y 3 y 10, 11 y 12 fue en media de 89,2 cm y en los puntos, 7, 8 y 9 (lado Norte) y 16, 17 y 18 (lado Sur), más lejanos a la carga fue en media de 82,6 cm. Estos valores corresponden a una deformación, con relación al espesor del relleno, del 2,70% y 2,50%.

## **VII.4 MICROMETRO DESLIZANTE**

### **VII.4.1 Introducción**

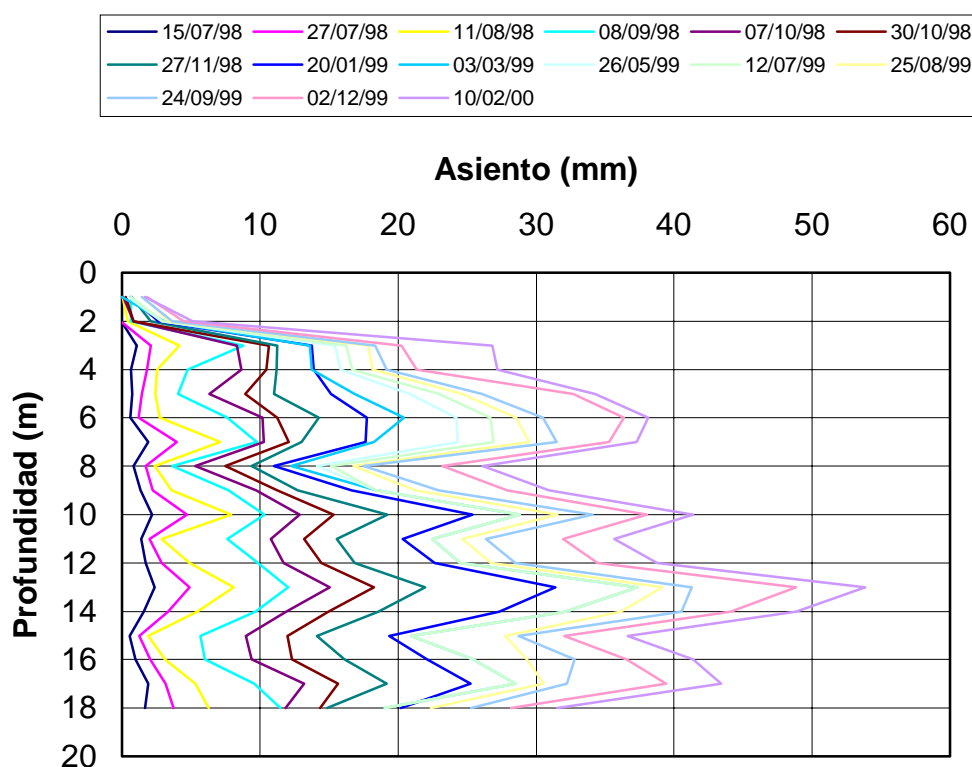
A partir de la fecha de 26 de mayo de 1999 solamente fue posible leer las medidas hasta 8m de profundidad, muy probablemente debido a un posible estrangulamiento de la tubería guía que impedía el deslizamiento de la sonda del micrómetro deslizante. Así, las medidas efectuadas en las fechas, 26 de mayo y 12 de julio de 1999 fueron registradas apenas hasta los 8 m de profundidad, las demás medidas son las mismas de la fecha anterior de la ocurrencia de este problema, 03 de mayo de 1999. Como la idea inicial era medir los asientos durante un período mas largo, se consideró necesario la instalación de un nuevo micrómetro deslizante próximo al anterior. Esta operación fue realizada durante los días 1 y 2 de julio del 1999.

La lectura inicial fue tomada el día 12 de julio del mismo año, fecha en que se suponía que la lechada de cemento–bentonita había fraguado. A partir de esta fecha se registraron cuatro lecturas más, que fueron sumadas a los valores medidos en la fecha 12 de julio de 1999. Así se consideró que las medidas registradas con el segundo micrómetro serían una continuación de las medidas obtenidas con el primero equipo.

En las Tablas A.7 y A.10 del anejo se encuentran las medidas correspondientes a las distintas profundidades tomadas con el micrómetro deslizante en todo el periodo de observación. La primera se refiere a los asientos diferenciales y la segunda a los asientos acumulados. Con los datos obtenidos se han confeccionados los gráficos de asientos diferencial y otro con asientos acumulados.

#### VII.4.2 Presentación y análisis de resultados

El gráfico de la Figura VII.15 presenta los valores de asientos diferencial con relación a la profundidad. Como se comentó anteriormente, en la introducción de este capítulo, estos asientos se refieren a asientos secundarios.



**FIGURA VII.15** – Asientos diferenciales obtenidos con el micrómetro

Un primer hecho a señalar es que los asientos sufridos en cada nivel de un metro son bastante variables; hay capas que sufren mayores asientos y otras menores asientos, o sea la compresión no es lineal con relación a la profundidad. No obstante, hay una cierta coherencia entre los resultados: las capas que presentan menores o mayores asientos en las distintas fechas son las mismas en todo el período de medidas.

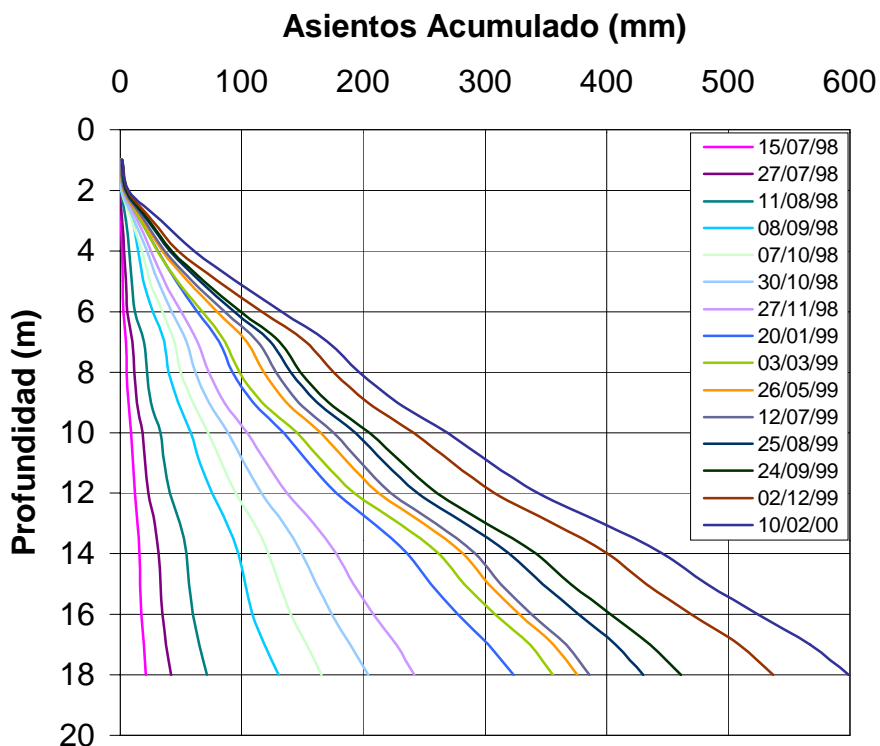
Con relación a este hecho se puede señalar que entre las capas de basuras hay capas de suelos que naturalmente se deforman menos que las basuras; otra observación es que los constituyentes de las basuras son bastante heterogéneos y entre ellos hay algunos que se deforman más que otros.

Otro aspecto que puede justificar la oscilación de valores de asiento en las distintas capas de basuras es la humedad. Aunque las medidas de humedad no hayan sido hechas cada metro, lo que se permitiría correlacionar las variaciones de deformación en las distintas capas con el porcentaje de humedad, se puede observar que de 2 a 3 m de profundidad hay un considerable aumento de asiento y en este intervalo (más precisamente a 2,50m) la humedad presenta un valor de 42,9%. El valor de humedad mas bajo registrado fue de 13,3% a 11,50m de profundidad. A través del gráfico se puede observar que hay una disminución de asiento en la profundidad de 10 a 12 m. Otro valor significativo de humedad fue registrado a 16,50m; en la referida profundidad el valor de humedad fue de 69,6%, y se puede observar que la deformación en la profundidad de 16m a 17m fue considerablemente mayor que en la profundidad de 15m, por ejemplo donde la humedad era significativamente mas baja, 25,1%. Estas relaciones son indicativas de que el valor de la humedad es un factor de gran influencia en los valores individuales de los asientos.

Los mayores asientos registrados están en las capas de profundidad 3m, 6m, 10m, 13m y 17m. En las referidas profundidades los asientos secundarios corresponden a los siguientes valores aproximadamente: 27mm, 38mm, 41mm,

54mm, 41mm. Los menores asientos se registraron en las siguientes profundidades, ( 2m = 5,14mm ) ( 4m = 26,19mm ) ( 8m = 26,12mm ) ( 11m = 35,67 mm ) y ( 15m = 36,67mm ).

El gráfico de la Figura VII.16 muestra los valores de asientos secundarios acumulados con relación a la profundidad, en todo el período de observación.



**FIGURA VII.16** – Asientos acumulados

Como se puede observar, el asiento secundario acumulado en el período final de medidas fue de 600mm. Este valor es bastante significativo, sin embargo teniendo en cuenta las condiciones en que se encuentran el vertedero y la propia composición de las basuras, es natural encontrar un valor de tal orden de magnitud.



Los asientos secundarios o a largo plazo se deben a dos procesos: creep, que ocurre en condiciones de humedad y tensión constante, y descomposición de la materia orgánica. En el primer proceso tiene influencia la profundidad del relleno y el grado de compactación, (Charles, 1984). En el segundo proceso tiene influencia las condiciones ambientales, como humedad, temperatura, pH, composición de las basuras, etc.

Con relación a los asientos debidos a procesos de creep se puede decir que el relleno es profundo, con una altura variable de 32 a 35m y además fue debilmente compactado. Con relación al segundo proceso, se puede mencionar los valores elevados de temperatura registrados que indican que los residuos están en proceso de descomposición muy activo, así como el hecho de no haber sistema de drenaje de los lixiviados, al tratarse de residuos frescos y además constituidos básicamente de papel y plástico, que según Grisolia & Napoleoni (1996) se tratan de material altamente deformables.

Se puede observar a través de los gráficos que no hay indicación de estabilización de los asientos a largo plazo, aunque las medidas se hayan extendido durante un periodo de 19 meses. De acuerdo con la literatura técnica, un relleno puede tardar hasta 20 años para que esto ocurra. Estos asientos son el gran problema para aprovechar estas áreas para posibles construcciones.

Los gráficos de las Figuras VII.17 y VII.18 muestran respectivamente las velocidades de asiento diferencial y acumulado de los puntos 2, 6, 10, 14 y 18 del micrómetro deslizante (según la profundidad).

El gráfico de la Figura VII.17 exhibe una tendencia de aumento de velocidad con la profundidad en los puntos 2m, 6m, 10m y 14m. No obstante, el punto 18 a partir de los 100 días, exhibe velocidad inferior a los puntos 10m y 14m. Esto es consecuencia de la heterogeneidad de las basuras que en determinadas capas presentan comportamiento más compresible que otras. Por otra parte, el

gráfico de la Figura VII.18, por tratarse de asientos acumulados, muestra aumento de velocidad con la profundidad.

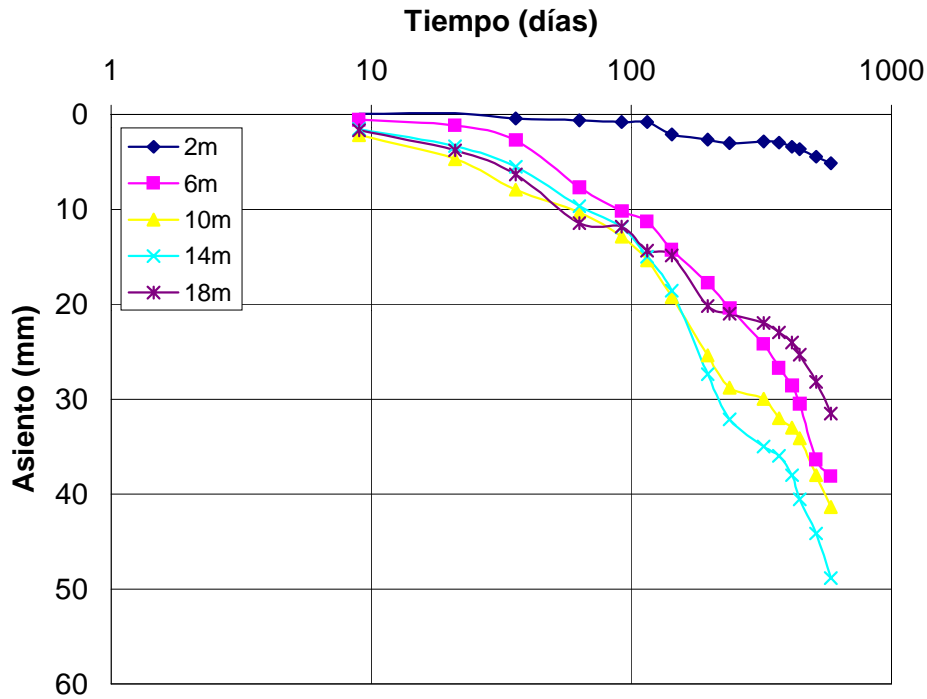


FIGURA VII.17 - Velocidades de asiento diferencial

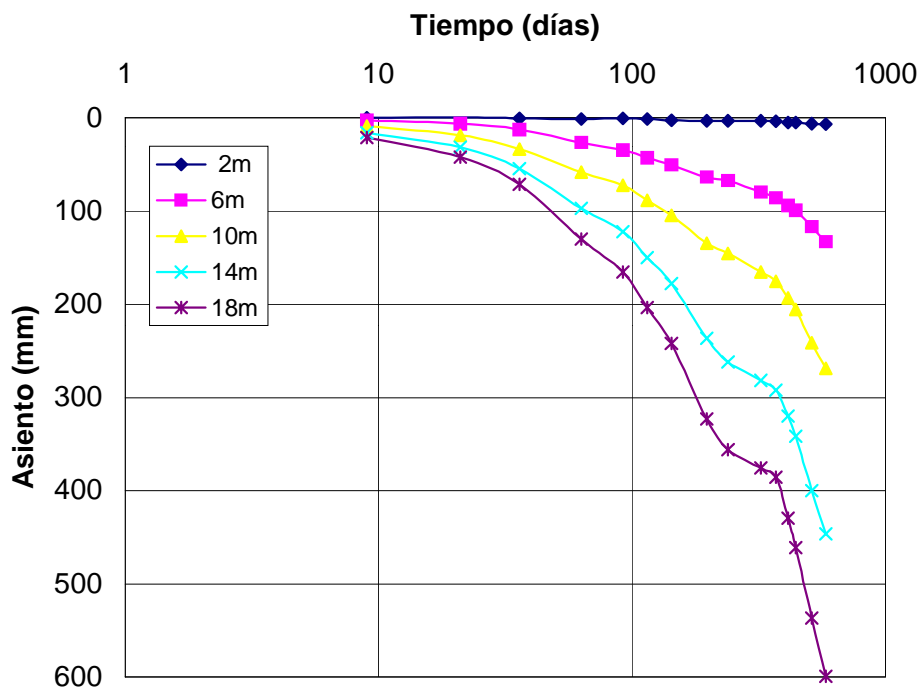


FIGURA VII.18 - Velocidades de asiento acumulado

## VII.5 ANÁLISIS GLOBAL DE LOS RESULTADOS: LINEA CONTINUA, PUNTOS DE REFERENCIA Y MICROMETRO DESLIZANTE

En la Tabla VII.1 se presentan los valores de asientos inmediatos, primarios y secundarios obtenidos con las líneas continuas, puntos de referencia y micrómetro deslizante.

**TABLA VII.1**  
Valores de asientos

Asientos	Línea Continua <sup>1</sup> (mm)	Punto de referencia <sup>2</sup> (mm)	Micrómetro <sup>3</sup> (mm)
Inmediato	500	90	-
Primario	720	170	-
Secundario	1370	1030	600

1 -media de los valores del punto 12 de las LCA de sección 1 y 2.

2 - media entre los puntos próximos y lejanos a carga

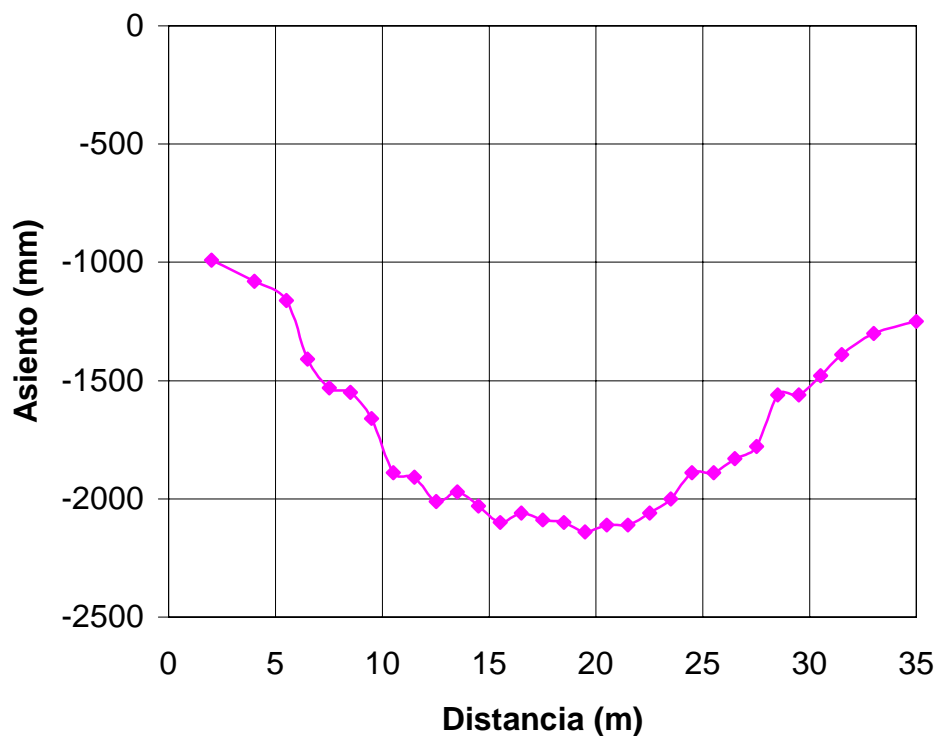
3 - asiento acumulado a 18 m de profundidad

Cuando se comparan los valores de asientos inmediatos y primarios obtenidos a través de los puntos de referencia y de las líneas continuas, se observa que la influencia de la carga es mucho menor en la zona donde se sitúan los puntos de referencia. A través de esta evidencia, se puede concluir que la influencia de carga es muy grande en los valores de asiento inmediato y primario en este tipo de material.

El asiento medido por el micrómetro fue bastante significativo, ya que se refiere al asiento provocado por procesos de degradación bioquímica de la materia orgánica y procesos de creep. Es interesante evidenciar que se midió aproximadamente hasta la mitad del espesor de la capa de basuras, y así

incluso el valor del asiento (600 mm) se aproxima bastante al 50% del asiento medido con los puntos de referencia (1030 mm).

En el gráfico de la Figura VII.19 se muestra los movimientos verticales registrados en determinados puntos de referencia y de la línea continua de sección 1. La finalidad fue hacer un perfil del terreno con los asientos sufridos durante el periodo de observación. Se tomó como base los datos de los puntos de referencia P-8, P-5 y P-2 del lado norte y P-11, P-14 y P-17 del lado sur por estar alineados con la línea continua, conforme se puede ver en planta de situación de los equipos, en el capítulo IV.



**FIGURA VII.19** -Asientos diferenciales

A través de esa figura, se puede observar los asientos diferenciales verticales, que sufrió la superficie del vertedero. Estos asientos reflejan la dificultad de construir sobre vertederos sanitarios.

Dunn (1995) observa que los asientos diferenciales que ocurren en un vertedero son muy variables. Estos asientos son consecuencia de la heterogeneidad de las basuras y de los diferentes espesores que existen en un mismo vertedero.

Grenn & Jamnejad (1997) resaltan que los asientos diferenciales excesivos pueden conducir a fracturas en los sistemas de drenaje de lixiviados y además pueden causar áreas de depresión en la superficie del terreno que a su vez pueden causar acumulación permanente de agua, resultando en carga adicional para los residuos y consecuentemente aumento de los asientos diferenciales.

Manasero et al (1997) comentan que, mas que los asientos totales, el impacto causado por los asientos diferenciales tal vez sea el mayor problema para un proyectista.

No se ha apreciado en los gráficos de las Figuras VII.1 Y VII.2 (LCA), VII.6 y VII.7 (Puntos de Referencia) y VII.16 (Micrómetro Deslizante) la influencia de los cambios climáticos en los valores de asiento, según relatan por Rao et al (1977) y Gandola et al (1992). Esto tal vez se deba al hecho de que en Madrid la precipitación es baja y la evapotranspiración bastante elevada.

## **VII.6 INCLINÓMETRO**

### **VII.6.1 Introducción**

En las Tablas A.11 y A.14 del Anejo se encuentran los movimientos horizontales derivados, en milímetros, en dos direcciones que forman entre sí 90 grados, la AB perpendicular al eje del terraplén y la CD paralela al eje del terraplén. En el inclinómetro se ha considerado el extremo mas profundo como punto de referencia con movimiento horizontal nulo.

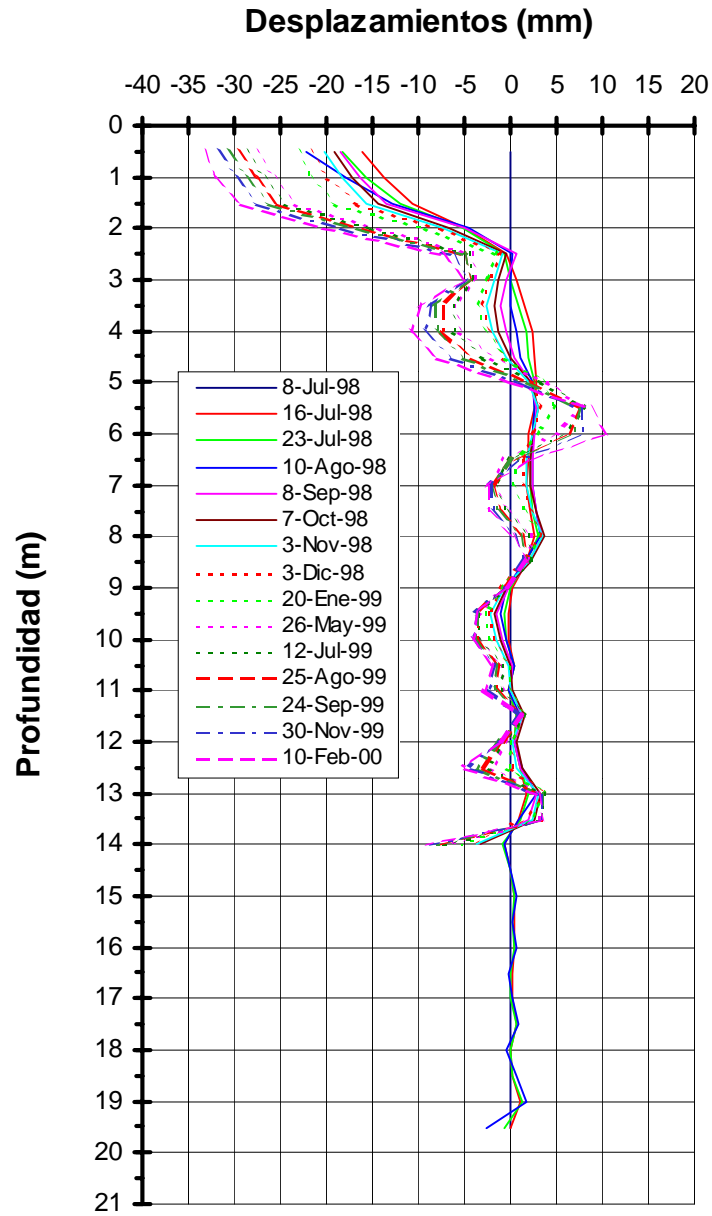
Con estos datos, se han confeccionado dos gráficos (Figuras VII.20 y VII.21), para cada dirección AB y CD. En estos gráficos se representan los desplazamientos en milímetros y en las ordenadas las profundidades en metros.

### **VII.6.2 Presentación y análisis de los resultados**

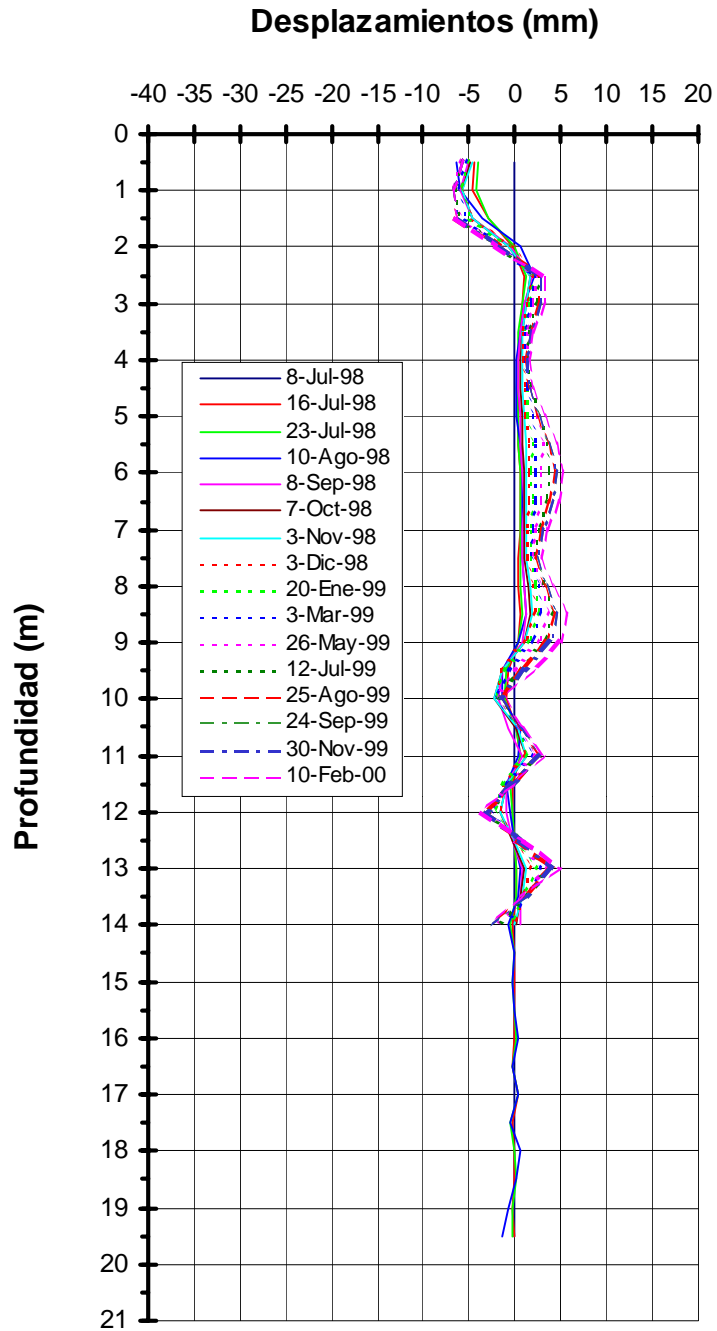
Como fue comentado anteriormente, sólo ha sido posible medir los desplazamientos horizontales en toda la profundidad del sondeo en el primer mes de medidas. Los demás meses los movimientos fueron medidos hasta los 14 m de profundidad. Por esto no fue posible hacer los gráficos con los movimientos horizontales acumulados. Este problema parece ser más consecuencia de la acomodación del terreno y la tubería a las grandes deformaciones verticales, que al ataque químico u otros factores.

Tras observarse los gráficos de las Figuras VII.20 a VII.21 se verifica que los desplazamientos horizontales ocurridos son muy pequeños. La influencia de la carga provocada por el terraplén experimental es mucho más significativa en los desplazamientos verticales que en los desplazamientos horizontales. Estos dos movimientos presentan velocidades independientes.

A través de la Figura VII.20 se observa que la influencia del "empuje horizontal" ocurre superficialmente, a 2,5 m de profundidad, y a partir de este punto la influencia es considerablemente menor. A esta profundidad, se obtuvo un desplazamiento máximo de 30 mm en la dirección perpendicular al eje del terraplén. A 4m de profundidad se produce un desplazamiento máximo de 9 mm, y a partir de allí los desplazamientos son poco significativos y tienden a aproximarse a cero a medida que aumenta la profundidad. Las oscilaciones de los movimientos positivos y negativos a partir de los 4m de profundidad pueden ser consecuencia de las capas de suelo de cobertura intercaladas en la masa de residuos.



**FIGURA VII.20** - Medidas inclinométricas relativas: movimiento positivo AB hacia el Norte



**FIGURA VII.20** - Medidas inclinométricas relativas: movimiento positivo CD hacia el Este.



En la dirección paralela al eje del terraplén, presentado en la Figura VII.20, el desplazamiento máximo es de 5mm a 2m de profundidad. En esta dirección el desplazamiento es bastante menos pronunciado que en la dirección perpendicular.

Estos resultados son coherentes con los datos de Coducto & Huitric (1990) y Siegel et al (1990) que observaron en sus medidas mayores desplazamientos en la parte más superficial del relleno, mientras que los demás desplazamientos tendían a cero con el aumento de la profundidad. Los primeros autores señalan que los desplazamientos ocurren principalmente en la dirección perpendicular al eje del terraplén, no registrando ningún movimiento significativo en la dirección paralela al terraplén, lo que coincide con los resultados presentados aquí.

Otra observación hecha por Coducto & Huitric (1990), que vale la pena resaltar, es que la velocidad de los movimientos horizontales observados durante un período de 2 años parecen no estar correlacionados con períodos de lluvias. Lo mismo se puede observar en los gráficos presentados en este trabajo, pues las estaciones cambiaron durante el periodo de medidas y no ocurren variaciones en la velocidad de los movimientos.

Así pues, la relación obtenida entre los desplazamientos horizontales y los asientos debidos a la carga del terraplén es una proporción muy baja (inferior en general al 1-2%), y representa una "transmisión" lateral muy escasa del efecto de la carga. Lo que sería atribuible a la baja capacidad portante de las basuras, en relación a la sobrecarga aquí soportada, que ha llevado consigo a una "identación" del terraplén en las basuras en las que se asienta, con efectos laterales muy moderados (bajo coeficiente de poisson equivalente) en relación a las grandes deformaciones verticales sufridas.

## **VII.7 LINEA DE TERMISTANCIA**

### **VII.7.1 Introducción**

Los valores registrados de temperatura con la profundidad se encuentran en la Tabla A.15 del Anejo.

Como fue comentado en la introducción de este capítulo, solo fue posible registrar valores de temperatura de julio de 1998 a marzo de 1999 (los demás meses los registros son incoherentes).

En la Figura VII.22 Indica los valores de temperatura con la profundidad así obtenidos.

### **VII.7.2 Análisis de los resultados**

Los resultados de temperatura obtenidos (Figura VII.22) fueron bastante significativos, los registros indican una variación de temperatura de 30° a 55° C en la capa más superficial (0 a 5 m), para después aumentar progresivamente con la profundidad, alcanzando una variación de 63° a 70° C en la capa más profunda a 20 m de profundidad. Es interesante observar que la mayor fluctuación de temperatura ocurre en la capa más superficial y que en todo el periodo de medidas, la temperatura aumenta gradualmente con la profundidad.

Los valores altos de temperatura indican que los residuos están sufriendo un proceso de descomposición muy activo. Este proceso es natural ya que se trata de residuos frescos. Además, la gran magnitud de los asientos secundarios registrados, refleja que en este periodo de medidas hubo un acelerado proceso de descomposición de la materia orgánica.

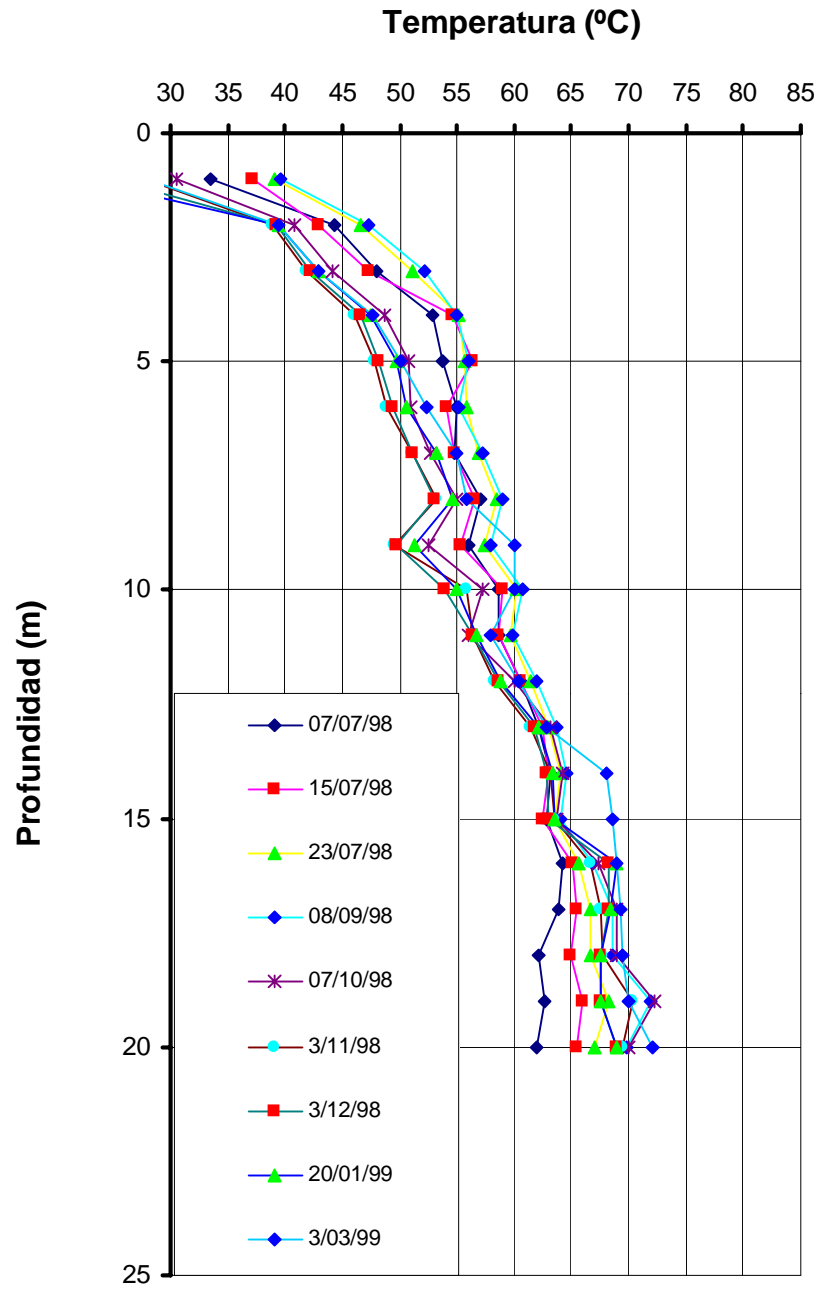


FIGURA VII.22 – Control de temperatura en profundidad

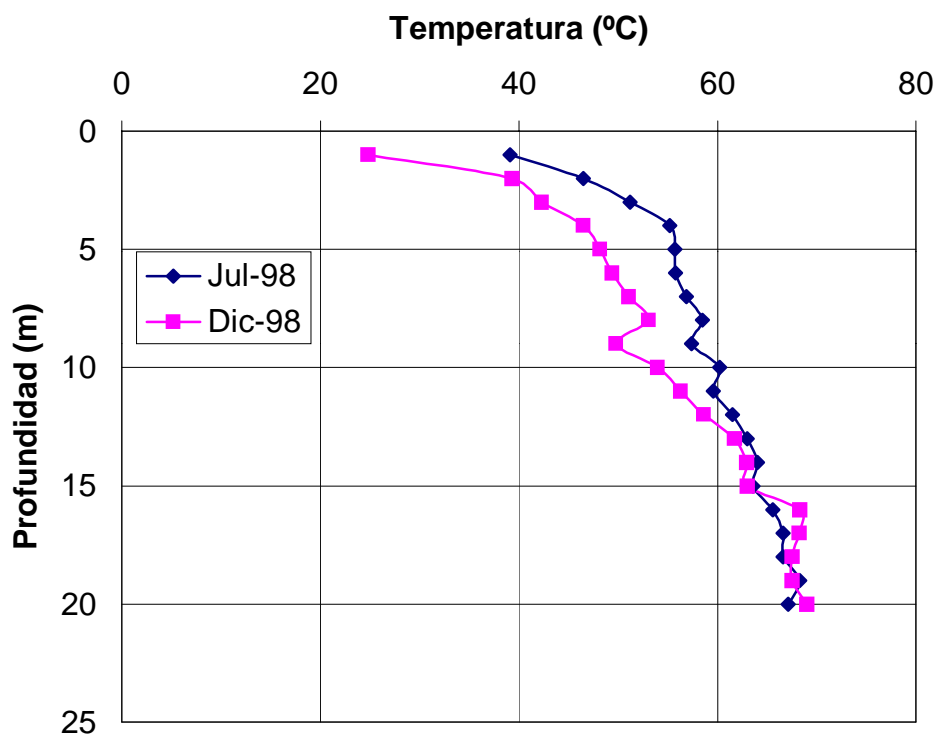
Valores elevados de temperatura también fueron registrados en el vertedero de la Muribeca, Recife – Brasil por Aragao et al (1999). Las medidas fueron efectuadas por medio de la instalación de termopares en el interior de sondeos cuya profundidad alcanzaba el suelo de cimentación del vertedero. Los residuos eran de origen urbano e industrial, y en sus constituyentes predominaba la materia orgánica (60%). Las medidas obtenidas variaban de 27°C a 44°C en la capa más superficial, hasta alcanzar 56° C a mayores profundidades. Durante el período de medidas no hubo variaciones significativas de la temperatura ambiente. Yoshida et al (1996) apud Carvalho (1999) observan que la temperatura en un vertedero sanitario puede alcanzar el máximo de 70°C a 80°C; por encima de este valor las bacterias responsables por la descomposición de la materia orgánica no sobreviven.

Registros más bajos de temperatura fueron observados por Spokas & Bogner (1996) apud Aragao et al (1999) que midieron valores de temperatura en el vertedero de Olinda (California-EUA). Estos autores han encontrado un valor máximo de temperatura de 40°C a seis metros de profundidad.

Otros registros más bajos de temperatura fueron medidos, aunque en laboratorio, por autores como: Hartz et al (1982) que investigaron el impacto de la variación de temperatura en la velocidad de generación de metano. Los autores observaron que el valor de temperatura óptimo para la formación de metano era 41°C. Entre 48°C y 55°C se producía ocurría inhibición en la génesis de metano. Craik & Goldie (1992) investigaron el efecto de la temperatura y pH en la velocidad de formación de metano. Los experimentos fueron realizados con valores de temperatura variando entre 10°C a 50°C. Los autores encontraron que la mayor velocidad de liberación de metano fue registrada con temperatura de 35°C. Ninguna velocidad significativa fue registrada con temperatura por debajo de 20°C.

Con relación a la influencia de las variaciones estacionales en los cambios de temperatura medidos hay algunas divergencias, autores como Ham & Bookter

(1982) tras auscultar 4 celdas de un vertedero sanitario en la ciudad de Madison( EUA), durante un periodo de 7 años, observaron que la temperatura variaba con las estaciones, alcanzado mayores picos en verano. Por su parte Coumoulous et al (1995) y Junqueira & Palmeira (1999) comentan que no hay influencia de la temperatura exterior en sus registros. A su vez, Rees (1980) señala que los cambios estacionales influyen solamente en niveles próximos a superficie; a mayores profundidades esta influencia es minimizada. Esta observación es coherente con los datos obtenidos en este trabajo, pues se observa en la Figura VII.23 que en medidas registradas en julio de 98 y diciembre del mismo año, por tanto en las estaciones de verano e invierno respectivamente, la fluctuación de temperatura se refleja apenas hasta los 10 m de profundidad; a más profundidad la temperatura medida en invierno llega a igualarse para después sobrepasar la temperatura medida en verano, aunque con variación muy pequeña.



**FIGURA VII.23** - Comparación entre los valores de temperatura medidos en invierno y verano.

Otra observación interesante fue hecha por Ham & Bookter (1982). Estos autores medieron valores de temperatura durante un período de siete años, y pudieron observar que la temperatura disminuía a medida que pasaba el tiempo. Este proceso es esperable, ya que los procesos de descomposición tienden a estabilizarse con el tiempo, aunque éste sea prolongado.

# CAPÍTULO VIII

## CAPÍTULO VIII

ANÁLISIS MEDIANTE LOS MODELOS

**ANÁLISIS MEDIANTE LOS MODELOS**  
COMPRESIBILIDAD  
**COMPRESIBILIDAD**

## **VIII.1 INTRODUCCIÓN**

Los vertederos sanitarios sufren compresión durante su construcción y después de su clausura. Esta compresión puede durar un largo período de tiempo y depende de un gran número de variables. Cuantificar esta compresión a través de relaciones matemáticas, con exactitud es, actualmente, un gran desafío para los proyectistas.

Este cálculo permitiría a los proyectistas construir vertederos con taludes mas inclinados asegurando su estabilidad, tener un mayor control sobre el sellado del relleno, sobre los sistemas de drenaje, y aumentar su vida útil por permitir la entrada de un mayor volumen de basuras en el depósito, que en general tiene su capacidad subestimada.

Los modelos matemáticos existentes se basan, en la gran mayoría, en los conceptos antes formulados para la Mecánica de Suelos. Algunos autores cuestionan la validez de utilizar modelos basados en esos principios, ya que las basuras presentan un comportamiento bastante peculiar, como por ejemplo la degradación química y descomposición biológica de la materia orgánica que a su vez depende de factores ambientales que son característicos de cada lugar. Por otro lado, se piensa también que estas ecuaciones empíricas basadas en los referidos principios pueden representar una razonable estimación de los asientos en un relleno, si son aplicados junto con resultados experimentales.

Con base en los resultados de los ensayos realizados y presentados en el capítulo anterior, se hace, en este capítulo, un análisis de la compresibilidad del vertedero según los modelos de Sowers (1973), Gandola et al (1994) y Meruelo (1995). Con la finalidad de conocer los asientos que sufrirán la masa de residuos a largo plazo, se hace una predicción de los asientos en 10 años, empleando los referidos modelos.



## VIII.2 MODELO DE SOWERS

Este modelo se basa en la clásica teoría de la consolidación unidimensional de los suelos propuesta por Terzaghi, y permite la obtención de los parámetros de compresión primaria y secundaria. La expresión para el cálculo de  $C_c$  es la siguiente:

$$C_c = \frac{\Delta S}{H \log \frac{\sigma_0' + \Delta \sigma'}{\Delta \sigma'}} \quad \text{VIII.1}$$

donde:

$\Delta S$  = asiento al final de la consolidación primaria

$H_0$  = altura inicial del relleno

$C_c$  = coeficiente de compresibilidad

$\sigma_0'$  = presión efectiva previa en el relleno

$\Delta \sigma'$  = sobrecarga efectiva

La compresión secundaria esta asociada a los procesos de "creep" y de biodegradación de la materia orgánica y es dependiente del tiempo; puede ser expresa en términos del índice de compresión secundaria  $C_\alpha$  a través de la siguiente expresión:

$$C_\alpha = \frac{\Delta S}{H \log \frac{t_2}{t_1}} \quad \text{VIII.2}$$

donde:

$C_\alpha$  = índice de compresión secundaria

$\Delta S$  = variación de asiento

H = altura del relleno al inicio de las mediciones

$t_1$  = tiempo de inicio de la compresión secundaria

$t_2$  = tiempo de estimación de asientos o tiempo al cual se extendieron las mediciones

El análisis se hará para los datos correspondientes a la Línea Continua de Asiento (LCA) de Sección 1 y Micrómetro Deslizante. Para la LCA fue posible calcular los coeficientes de compresión primaria, ya que este equipo estaba situado en la zona que fue sometida a carga por el terraplén. Para el Micrómetro se calculan solamente los coeficientes de compresión secundaria.

### VIII.2.1 Línea Continua de Asiento

Para llevar a cabo el cálculo del coeficiente de compresión de la línea continua de asiento se utilizó la información de los asientos en las Tablas A1 y A2 correspondientes a la lectura efectuada en el día 07/10/98, que a su vez corresponde a 92 días de la aplicación del cargamento. De acuerdo con los gráficos ( $S \times \log(t)$ ) de los puntos de referencia y línea continua de asiento presentados en el capítulo VII, la transición de la compresión primaria para la compresión secundaria ocurre entre 90 y 100 días.

La altura inicial de la masa de residuos en la zona donde se situaban las líneas continuas de asientos era de 33 m. La densidad de la basura es de  $5 \text{ kN/m}^3$ , como fue comentado en el apartado VI.2. El terraplén ha sido considerado como una carga rectangular de 4 m de altura, y la densidad del suelo del terraplén ha sido en  $16 \text{ kN/m}^3$ .

En la Tabla VIII.1 se presentan los valores de  $C_c$  obtenidos a través de la ecuación VIII.1.

TABLA VIII.1

Coeficientes de Compresibilidad obtenidos a través de LCA

PUNTOS Nº	$\Delta S$ (M)	H (M)	$\rho$ (kN/M <sup>3</sup> )	$\sigma_0$ (kN/M <sup>2</sup> )	$\Delta\sigma$ (kN/M <sup>2</sup> )	$C_c$
1	0,4524	33	5	82,5	64	0,055
2	0,4644	33	5	82,5	64	0,056
3	0,5804	33	5	82,5	64	0,071
4	0,6454	33	5	82,5	64	0,078
5	0,7084	33	5	82,5	64	0,086
6	0,8344	33	5	82,5	64	0,101
7	0,8284	33	5	82,5	64	0,100
8	0,8724	33	5	82,5	64	0,106
9	0,9334	33	5	82,5	64	0,113
10	0,8974	33	5	82,5	64	0,109
11	0,9424	33	5	82,5	64	0,115
12	0,9414	33	5	82,5	64	0,114
13	0,9064	33	5	82,5	64	0,110
14	0,9684	33	5	82,5	64	0,118
15	0,9324	33	5	82,5	64	0,113
16	0,8884	33	5	825	64	0,108
17	0,8844	33	5	82,5	64	0,107
18	0,8544	33	5	825	64	0,104
19	0,7714	33	5	82,5	64	0,093
20	0,7544	33	5	82,5	64	0,092
21	0,7154	33	5	82,5	64	0,087
22	0,6254	33	5	82,5	64	0,076
23	0,5254	33	5	82,5	64	0,064
24	0,5054	33	5	82,5	64	0,061
25	0,4254	33	5	82,5	64	0,052

Los valores de los coeficientes de compresibilidad varían aproximadamente entre, 0,052 y 0,12. Los valores menores corresponden a las extremidades de los puntos de la LCA y los valores mayores corresponden a los puntos centrales. Este rango de valores está coherente con el rango de valores apuntados por Burlingame (1985), Oliden (1987), Gordon (1995) y Gabr & Valero (1995).

Los valores del índice de compresión secundaria fueron obtenidos a través de la expresión VIII.2. Los valores de asiento fueron recogidos de las Tablas A1 y A2 correspondientes a la última lectura, 10/02/00. El tiempo  $t_1$  corresponde al término de la compresión primaria. El tiempo  $t_2$  corresponde al término de las mediciones. En la Tabla VIII.2 se presentan los valores de los índices de compresión secundaria a partir de los datos auscultados con la LCA.

El rango de valores encontrados varía de 0,053 - 0,081. Los valores menores corresponden a los puntos extremos y los mayores a los puntos centrales. Estos valores fueron comparados con los valores de otros autores y se verificó que están coherentes con los valores presentados por Sowers (1973), Yen & Scalon (1975), Oliden (1987) y por Edil et al. (1990).

### **VIII.2.2 Micrómetro Deslizante**

Este equipo fue instalado fuera de la acción de la sobrecarga, y por esto se considera que los asientos inmediatos y primarios ya ocurrieron durante la etapa de operación del vertedero. Consiguientemente, los asientos medidos por el micrómetro son consecuencia exclusivamente de la descomposición de la materia orgánica y procesos de creep, o sea, asientos secundarios. El tiempo inicial ( $t_1$ ) se consideró el tiempo transcurrido desde el término de los vertidos ( abril de 1998) hasta el inicio de las mediciones ( 07 de julio de 1998). El tiempo  $t_2$  se considera la suma del tiempo  $t_1$  mas el tiempo correspondiente la toma de cada lectura.

TABLA VIII.2

Indices de Compresión Secundaria obtenidos con LCA

PUNTOS Nº	$\Delta S$ (MM)	H (MM)	$t_0$ (DÍAS)	T (DÍAS)	$C\alpha$
1	1413,3	33000	92	583	0,053
2	1525,3	33000	92	583	0,057
3	1552,8	33000	92	583	0,058
4	1659,3	33000	92	583	0,062
5	1886,3	33000	92	583	0,071
6	1906,3	33000	92	583	0,072
7	2009,3	33000	92	583	0,076
8	1973,3	33000	92	583	0,075
9	2026,3	33000	92	583	0,076
10	2102,3	33000	92	583	0,079
11	2062,3	33000	92	583	0,078
12	2088,3	33000	92	583	0,079
13	2100,3	33000	92	583	0,079
14	2140,3	33000	92	583	0,081
15	2107,3	33000	92	583	0,080
16	2113,3	33000	92	583	0,080
17	2059,3	33000	92	583	0,078
18	1996,3	33000	92	583	0,075
19	1893,3	33000	92	583	0,072
20	1894,3	33000	92	583	0,072
21	1831,3	33000	92	583	0,069
22	1780,3	33000	92	583	0,067
23	1556,3	33000	92	583	0,059
24	1560,3	33000	92	583	0,059
25	1480,3	33000	92	583	0,056

En la Tabla VIII.3 se presentan los valores de los índices de compresión secundaria con relación a la profundidad. Los valores de asientos corresponden a los valores de asientos acumulados medidos en la última fecha, 10 de febrero de 2000. Estos valores fueron recogidos de la Tabla A9 y A10.

**TABLA VIII.3**

Valores de  $C_\alpha$  obtenidos con el micrómetro deslizante

PROF. (m)	$\Delta S$ (mm)	H (mm)	$t_1$ (días)	$t_2$ (días)	$C_\alpha$
1	1,67	1000	68	651	0,0017
2	6,80	2000	68	651	0,0035
3	33,63	3000	68	651	0,011
4	60,83	4000	68	651	0,0155
5	95,12	5000	68	651	0,0193
6	133,25	6000	68	651	0,023
7	170,53	7000	68	651	0,025
8	196,65	8000	68	651	0,025
9	227,61	9000	68	651	0,026
10	269,00	10000	68	651	0,027
11	304,69	11000	68	651	0,028
12	343,48	12000	68	651	0,029
13	397,31	13000	68	651	0,031
14	446,17	14000	68	651	0,032
15	482,84	15000	68	651	0,033
16	524,21	16000	68	651	0.033
17	567,64	17000	68	651	0.034
18	599,18	18000	68	651	0.034

Los valores de  $C_\alpha$  varían de 0,0017 hasta 0,034. Estos valores aumentan con la profundidad, ya que los valores son de asientos acumulados.

Con los valores de los índices de compresión secundaria reflejados en la Tabla VIII.3 y aplicando la ecuación VIII.2 es posible estimar los asientos que sufrirá la masa de residuos en 10 años (3650 días). En la tabla VIII.4 se presentan los valores de asientos estimados en milímetros y en porcentaje.

**TABLA VIII.4**

Predicción de los asientos del micrómetro deslizante

PROF. (m)	H (mm)	T <sub>2</sub> (días)	S (mm)	S (%)	C <sub>α</sub>
1	18000	3650	2,9	0.017	0,0017
2	18000	3650	11,99	0.067	0,0035
3	18000	3650	59,30	0.33	0,011
4	18000	3650	107,25	0.60	0,0155
5	18000	3650	167,70	0.93	0,0193
6	18000	3650	234,94	1.31	0,023
7	18000	3650	300,67	1.67	0,025
8	18000	3650	346,72	1.93	0,025
9	18000	3650	401,32	2.23	0,026
10	18000	3650	474,29	2.63	0,027
11	18000	3650	537,21	2.98	0,028
12	18000	3650	605,60	3.36	0,029
13	18000	3650	700,52	3.89	0,031
14	18000	3650	786,66	4.37	0,032
15	18000	3650	851,31	4.73	0,033
16	18000	3650	924,27	5.13	0.033
17	18000	3650	1000,83	5.56	0.034
18	18000	3650	1056,44	5.87	0.034

El asiento estimado para 10 años hasta la profundidad de 18 m fue de 1056,44mm, correspondiente al 5,87%. Mariano (1999), auscultó a través de nivelación topográfica dos celdas del vertedero de la Muribeca - Recife. Los asientos previstos para 6 años a través del modelo de Sowers en la celda 1 fueron de 0,45% a 1,85% y en la celda 2 fueron de 1,78% a 13,23%. Según la autora, los valores bajos previstos para la celda 1 se justifican por el hecho de esta celda estar constituida por residuos antiguos y estar en fase final de estabilización. El rango de asientos previstos para la celda 2 fue bastante amplio y mayores que la celda 1. Esto se justifica, según la autora, por la heterogeneidad de las basuras y por esta celda estar constituida por residuos frescos.

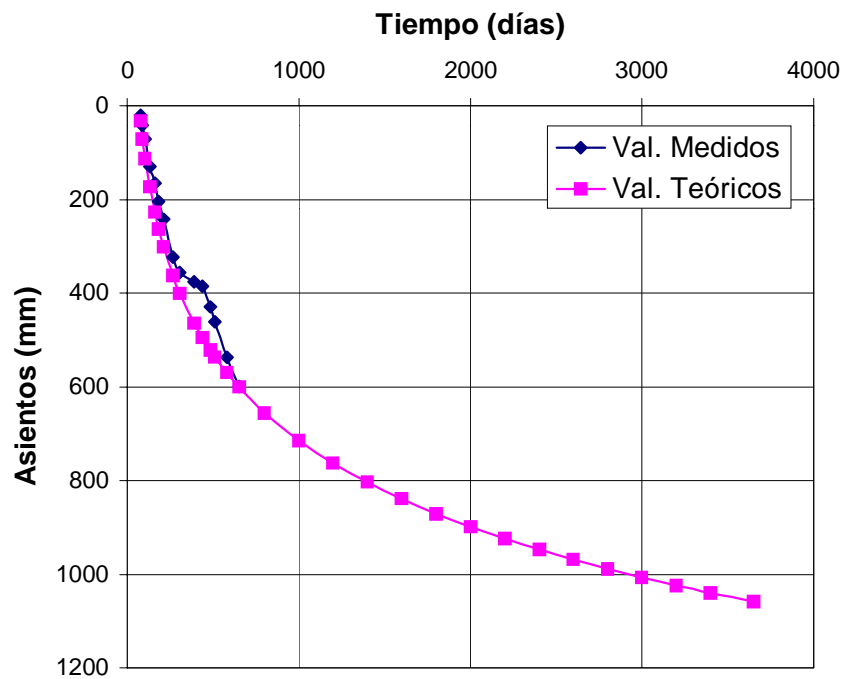
Un rango bastante amplio de deformación específica fue encontrado por Palma (1995) en el vertedero de Meruelo. Los valores varían entre 4% y 19%. El autor plantea la posibilidad de que los variados espesores y edades de los 4 retranqueos analizados tengan parte de responsabilidad en la dispersión encontrada. Valores elevados fueron previstos por Abreu (2000) en el vertedero Bandeirantes situado en Sao Paulo: el rango de variación para el "Sub-aterro 2" fue de 13 y 47% cuyos residuos tenían edad máxima de 2 años. Ya para el "Sub-aterro 5" constituido de residuos con edades variando de 9 a 16,5 años el rango fue de 23% y 66%. Como se puede observar, los residuos antiguos presentaron un rango de variación mayor que los residuos frescos. En general, no obstante, se espera lo contrario, pues residuos frescos sufrirán mayores asientos relativos por estar más propensos a sufrir degradación de la materia orgánica.

A través de lo expuesto anteriormente se verifica que es difícil extrapolar datos de un vertedero a otro. La dispersión es muy grande dentro de un mismo relleno. La heterogeneidad de los constituyentes de las basuras, el espesor y la edad son factores determinantes en la predicción de asientos. En el caso del relleno investigado aquí, se puede decir que los asientos relativos son



pequeños pues están estimados para aproximadamente mitad del espesor del vertedero (18m).

El gráfico de la Figura VIII.1 presenta los valores de asientos medidos y los valores estimados para 10 años (3650 días). Para estimar estos valores se utilizó el  $C_\alpha = 0,034$  que corresponde al valor de  $C_\alpha$  a la profundidad de 18 m.



**FIGURA VIII.1** - Valores medidos y estimados por el modelo de Sowers

Como se puede observar, los valores de asientos relativos obtenidos con el método de Sowers tienden a un valor infinito cuando el tiempo tiende a infinito.

### VIII.3 MODELO DE GANDOLA

El modelo de Gandola et al (1994) es utilizado para prever asientos no provocados por variación de carga. Por ello, se han utilizado los datos obtenidos con el micrómetro deslizante, ya que las líneas continuas estaban situadas en la zona cargada.

Los autores proponen una ecuación de ajuste entre los valores medidos y teóricos que permite calcular los parámetros "a" y "k" mediante ajuste por mínimos cuadrados. La referida expresión tiene la siguiente forma:

$$S_s = aH(1 - e^{-kt}) \quad \text{VIII.3}$$

donde:

$S_s$  = asientos

H = espesor inicial del relleno

a = constante

k = constante

t = tiempo de estimación de los asientos

Los valores de los parámetros "a" y "k" que mejor se ajustan a la curva experimental son:

a = 0,055

k = 0,0126

Valores de "a" y "k" recogidos de literatura técnica son presentados en la Tabla VII.5.

**TABLA VIII.5**

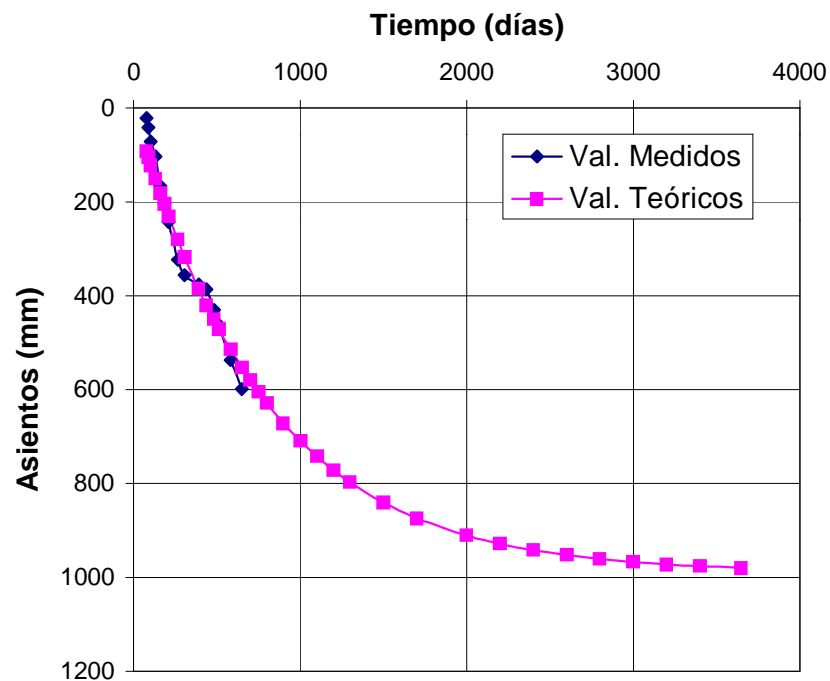
Valores de "a" y "k" recogidos de la literatura técnica

AUTORES / PARÁMETROS	PALMA (1995)	MARIANO (1999)	OBSERVACIONES
a	0,031 a 0,23	0,02 a 0,61	Ensayos de Campo
K	0,0001 a 0,0003	0,0002 a 0,0004	Ensayos de Campo

El valor de "a" encontrado en el presente estudio, está dentro del rango de variación descrito por Palma (1995) y Mariano (1999). No obstante, el valor de "k" es más grande que los valores encontrados por los mismos autores.

A partir de los valores de los parámetros "a" y "k" se ha hecho una predicción de los asientos que sufriría la masa de residuos en un período de 10 años. El asiento estimado para 10 años es de aproximadamente 980 mm correspondiente a 5,44% del espesor del vertedero (considerando la profundidad de 18 m). Palma (1995) encontró valores variando entre 5% y 14%. Mariano (1999) encontró un asiento relativo máximo de 3,02% para la celda 1 y una variación de 1,81% y 13,11% para la celda 2.

La Figura VIII.2 muestran los valores experimentales obtenidos con el micrómetro deslizante y los valores teóricos obtenidos mediante el modelo de Gandola et al (1994). Observase a través del gráfico que la curva teórica se ajusta muy bien a los valores medidos



**FIGURA VIII.2** - Valores medidos y estimados por el modelo de Gandola

#### VIII.4 MODELO MERUELO

Para los análisis de compresibilidad según el modelo Meruelo, se utiliza la siguiente expresión:

$$\Delta S = \frac{\alpha H COD}{k_h T_c} \left( 1 - e^{-k_h T_c} \right) \left( e^{-k_h t} - e^{-k_h t_0} \right) \quad \text{VIII.4}$$

donde:

$\Delta S$  = asientos medidos (mm)

$\alpha$  = coeficiente de pérdida de masa transformada en asientos

$k_h$  = constante de hidrólisis (días<sup>-1</sup>)

COD = contenido de materia orgánica biodegradable de los residuos

$T_c$  = tiempo de construcción del relleno (días)

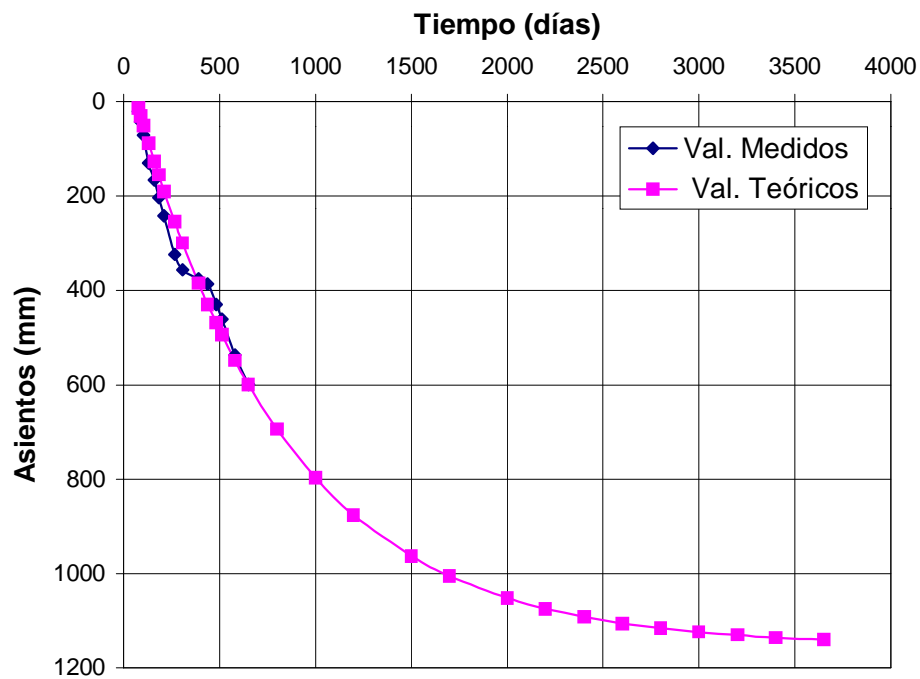
H = espesor del relleno

t = edad del relleno al término de las medidas (días)

$t_0$  = edad del relleno al inicio de las mediciones (días)

El parámetro COD, contenido orgánico degradable, fue considerado como COD = 0,25. De acuerdo con Palma (1995) la composición de los residuos sólidos en Cantabria es muy semejante a la típica en España, de forma que este valor también puede ser aplicable a otros vertederos, como el de la Comunidad de Madrid aquí analizado. El tiempo de construcción  $T_c$  fue considerado de 4 años (1460 días). El valor del coeficiente de hidrólisis ( $k_h$ ) fue considerado el mismo encontrado para el modelo de Gandola et al (1994), en este caso  $k_h = 0,0126$ . El coeficiente de pérdida de masa fue determinado por ajuste de curvas según el método de los mínimos cuadrados. El valor que mejor se ajustó a la curva fue  $\alpha = 0,097$ .

De la misma forma que el modelo de Gandola, a partir del valor de " $\alpha$ " se hizo una predicción de los asientos que sufriría la masa de residuos en el plazo máximo de 10 años. La Figura VIII. 3 presenta los valores medidos con el micrómetro deslizante y los valores teóricos obtenidos con el modelo Meruelo.



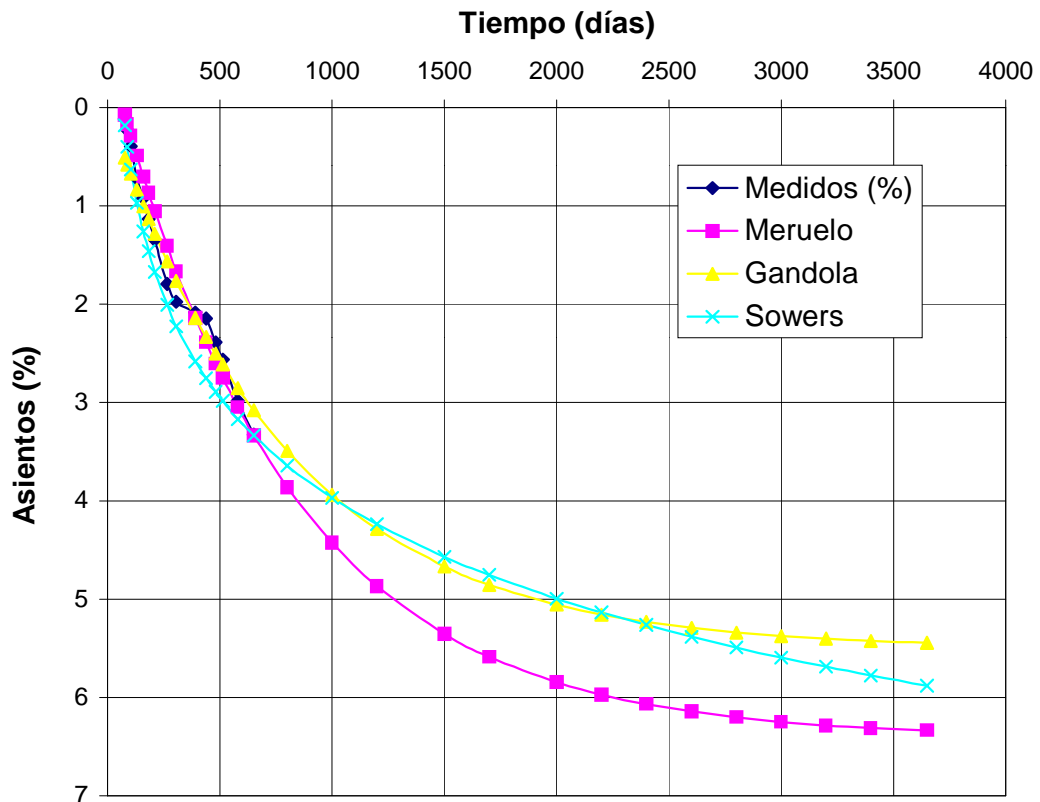
**FIGURA VIII.3** - Valores medidos y teóricos obtenidos con el modelo Meruelo

Los valores de asientos previstos a través del modelo Meruelo serían de 1140,37mm, que corresponde a un asiento relativo de 6,33%. Palma (1995) obtuvo un rango de valores para los 4 retranqueos analizados entre 3% y 10%. Abreu (2000) encontró un rango de valores variando entre 19,3% y 56% para el primero retranqueo y de 9% y 37,2% para el segundo retranqueo.

A través de la figura anterior, se puede observar que la curva teórica se ajusta perfectamente a la curva de valores medidos.

### VIII.5 ANÁLISIS GLOBAL

La Figura VIII.4 presenta los valores medidos y previstos a través de los modelos de Sowers (1973), Gandola et al (1994) y Meruelo (1995).



**FIGURA VIII.4** - Valores medidos y previstos a través de los modelos de Sowers, Gandola y Meruelo

Observase a través que las curvas teóricas se ajustan muy bien a los resultados experimentales. Los asientos previstos a través de los modelos Meruelo y Gandola tienden a un valor finito para un tiempo infinito, esa tendencia está coherente con los procesos reales que se desarrollan en el seno de un vertedero, pues aunque los asientos secundarios se producen en un largo periodo de tiempo, hay una tendencia a su estabilización. Sin embargo, el modelo de Sowers, para un tiempo infinito, prevé asientos infinitos, lo que es, obviamente bastante incoherente. Uno de los grandes problemas que suele

ocurrir con este modelo es que en la predicción de asientos a largo plazo, los asientos previstos pueden exceder el propio espesor del relleno.

La Tabla VIII.6 presenta un resumen de los valores de asiento relativos previstos a través de los 3 modelos para el vertedero investigado y los valores previstos por los autores antes mencionados.

**TABLA VIII.6**

Valores de asientos relativos previstos y recogidos de la literatura técnica

MODELOS/ AUTORES	SOWERS	GANDOLA	MERUELO	TIPO DE ENSAYO
Vert. Investig.	5,87%	5,44%	6,33%	micrómetro
Palma (1995)	4% - 19%	5% - 14%	3% - 10%	Nivel. Topog.
Mariano(199)	0,45%-13,23%	1,81%-13,1%	X	Nivel. Topog.
Abreu (2000)	13% - 47%	X	10% - 30%	Nivel. Topog.

El asiento final obtenido a través del modelo de Gandola es inferior a los asientos obtenidos con los modelos Sowers y Meruelo. Con relación a los valores del asiento final obtenidos por los autores citados anteriormente se puede observar que el margen de variación es muy amplio dentro de un mismo vertedero, lo que hace difícil la comparación.

De cualquier forma, los valores obtenidos en el vertedero investigado y Meruelo, ambos situados en España, son bastante próximos. Se supone que ambos vertederos están constituidos de residuos con composición de cierta forma similares, aunque, no obstante, las características climáticas de las dos regiones sean distintas.

El vertedero, Muribeca, analizado por Mariano (1999) y el vertedero Bandeirantes analizado por Abreu (2000), están ambos en Brasil, cuya composición de los residuos presentan las mismas características, aunque las características climáticas sean distintas. Hay gran diferencia entre los valores de asentamientos relativos encontrados por los autores.

Dentro de este contexto, el comentario de Edil et al (1990) es muy oportuno, pues observan que los modelos, y principalmente los parámetros involucrados, son muy sensibles a las condiciones particulares de cada vertedero. De igual forma, las experiencias han demostrado la necesidad de profundizar las investigaciones en rellenos sanitarios que respondan a diferentes realidades con el propósito de obtener modelos de comportamiento propios a cada uno de ellos y así alcanzar tendencias de carácter universal.

Esta claro para la gran mayoría de los autores que las basuras son más compresibles que cualquier suelo, tanto en términos de elasticidad y plasticidad, cuanto por su notable heterogeneidad, que las hace propensas a subsidencia diferencial. Gandola et al (1994) comentan que por estas razones, y debido a falta de experiencia disponible y observaciones específicas sobre el comportamiento estático de la masa de residuos, que es sumamente diferente de los suelos, resulta muy difícil calcular anticipadamente el grado de subsidencia que es esperado.

Grisolia & Napoleoni (1996) comentan que aunque se utilicen los principios y aparatos empleados para el estudio del comportamiento de los suelos, los residuos presentan características propias que impiden la aplicación directa de los métodos geotécnicos. De acuerdo con los autores, los modelos pueden ser usados para interpretar y extrapolar las medidas directas de los asentamientos.

Simoes & Campos (1998) comentan que los modelos geotécnicos mas elaborados tropiezan con la dificultad de la obtención de los parámetros



necesarios en laboratorio, debido a la falta de representatividad de las muestras y la inclusión compleja del factor tiempo.

Sagasetta (1995) observa que las leyes de asiento-tiempo propuestas deben presentar ciertas características para que sean conceptuadas como buenas: ser dimensionalmente correctas, definidas a partir de un pequeño número de parámetros y que éstos presenten un significado físico o por lo menos que estén relacionados con alguna propiedad conocida. Ser capaz de separar la influencia de muchos factores relevantes en los análisis y principalmente dar previsiones realistas y precisas.

En general, hay muchas críticas sobre el modelo de Sowers basado en los principios de la Mecánica de los Suelos. Estas cuestiones fueron discutidas anteriormente en la revisión bibliográfica. Sin embargo, es importante resaltar que el modelo hace un análisis cualitativo de los procesos que se consideran responsables de la producción de asientos, y a través de este modelo éstos procesos se quedan más claros; no obstante, la predicción de las magnitudes y velocidades de compresión de forma cuantitativa resultan incoherentes para tiempos muy largos.

El modelo de Gandola et al (1994) no presenta la fundamentación teórica en que se basa el modelo, Palma (1995). Simoes & Campos (1998) observan que el modelo de Gandola, por involucrar formulaciones empíricas, los parámetros deben ser obtenidos a partir de registros históricos y que esto dificulta la extrapolación para condiciones que no sean aquella para las que los parámetros fueron obtenidos.

El modelo Meruelo es muy bien fundamentado conceptualmente; sin embargo, no involucra todos los factores relevantes en la compresibilidad de los residuos. Como es comentado por Abreu (2000) el modelo Meruelo separa únicamente el mecanismo de la biodegradación.

Los autores, en su gran mayoría, están de acuerdo en que los complicados procesos de asiento dificultan el tratamiento teórico del problema y solo se han llegado a establecer modelos poco aproximados. La dificultad del tratamiento teórico obliga en general a partir de resultados experimentales, escasos y difíciles de extrapolar de un vertedero a otro. Sin embargo, no se puede dejar de mencionar que en los últimos 10 años hubo un considerable avance en el estudio del comportamiento de las basuras. Hasta hace poco tiempo, no se consideraba la inclusión de la compresión como una ganancia de la capacidad volumétrica del vertedero en los proyectos, y hoy en día es inadmisibles un proyecto de vertederos sin esta consideración.

# CAPÍTULO IX

## CAPÍTULO IX

CONCLUSIONES  
CONCLUSIONES

## IX.1 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha llevado a cabo un estudio de reconocimiento y de compresibilidad de los materiales existentes en un vertedero de RSU. Los trabajos de reconocimiento consistieron fundamentalmente en la realización de sondeos mecánicos con recuperación continua de testigo en los que se realizaron ensayos SPT a distintas profundidades. Además se efectuaron determinaciones de densidad de los residuos y de humedad en función de la profundidad. Asimismo, se emplearon diversas técnicas geofísicas para el reconocimiento de los residuos, tales como análisis espectral de ondas superficiales, métodos de prospección eléctricos y electromagnéticos.

Los resultados de la campaña de reconocimiento aportaron datos acerca de la composición del vertedero y de su estado. Así, se ha comprobado que se trata de un material muy ligero y deformable formado básicamente por papel y plástico. La realización de los sondeos ha permitido conocer también cual era el espesor de residuos saturado por lixiviados. Este dato además ha sido comparado satisfactoriamente con los resultados de la campaña de ensayos electromagnéticos, de la que se obtuvieron valores de resistividad indicativos de la presencia de líquidos a una profundidad semejante a la obtenida mediante la realización de sondeos mecánicos.

En cuanto a la determinación de propiedades mecánicas de estos materiales, los resultados de los ensayos SPT no han resultado muy útiles, ya que ha habido gran dispersión en los datos, con valores de  $N_{30}$  entre 6 y 63, debido a la heterogeneidad de los materiales que constituyen el vertedero y al valor puntual que tienen estos ensayos.

En cambio, el análisis espectral de ondas superficiales sí se ha manifestado como una técnica útil, ya que permite obtener valores globales de la rigidez del terreno estudiado. Los resultados obtenidos muestran como, a pesar de que

siempre se obtienen valores pequeños la rigidez de los residuos aumenta con la profundidad, variando entre 7 y 31 Mpa, resultado del proceso de compresión debido a la carga de los propios residuos que está teniendo lugar. Es de esperar, por tanto, que si se realizaran sucesivas campañas de ensayos también se observaría una mejora de las condiciones resistentes de los residuos en todo el perfil del vertedero a medida que aumenta el tiempo de compresión.

La segunda parte del trabajo ha consistido en la auscultación de los asientos que estaban teniendo lugar en el vertedero debidos tanto a la descomposición de los residuos como los debidos a un incremento de carga sobre los mismos, consecuencia de la construcción de un terraplén experimental. Este terraplén, de 4m de altura, 20 m de anchura y 40 m de longitud y el terreno adyacente, se instrumentaron con los siguientes equipos: bajo el terraplén se colocaron dos líneas continuas de medida de asientos (LCA), a su alrededor hitos de referencia topográfica y, al pie del mismo, un inclinómetro. Además, a una distancia de 15m se instaló un micrómetro deslizante con el que se pudo observar la evolución de los asientos en profundidad.

Los resultados obtenidos tanto con la LCA como con los hitos de control topográfico, muestran como la curva de asientos-tiempo tiene dos ramas: la primera en la que la velocidad de asientos es muy alta y la segunda que tiende a alcanzar un valor constante. Estas dos ramas son características de los procesos de compresión primaria, relacionados con incrementos de carga, y de compresión secundaria, relacionados con la degradación y descomposición de los residuos. Se puede decir que los primeros son independientes del tiempo, mientras que los segundos varían temporalmente a medida que se produce la descomposición de los RSU y están, por tanto, relacionados con la génesis de gases y lixiviados que escapan o son extraídos del vertedero favoreciendo su consolidación y reducción del volumen.

Los resultados de la instrumentación muestran la gran magnitud de los asientos producidos durante el tiempo que han durado los trabajos, tanto los debidos a la sobrecarga como a procesos de descomposición, y por tanto caracterizan a estos materiales como altamente deformables. Asimismo, estas curvas ponen de manifiesto la elevada proporción de asientos que se producen por compresión secundaria que llegan a ser el 55% de los producidos bajo el terraplén, según los datos obtenidos de los registros de la LCA. Esta proporción irá aumentando con el tiempo, ya que los asientos inducidos por la sobrecarga se generan casi totalmente en un período de tiempo muy corto, mientras que los asientos secundarios se producen diferidos a lo largo de bastantes años.

En este sentido, el análisis de las curvas de asientos-tiempo obtenidas con la LCA muestra como en el caso estudiado se completa la génesis de asientos primarios en un período de unos 100 días. Este valor es más alto que el propuesto en los trabajos de Sowers, pero está de acuerdo con las investigaciones realizadas por diversos autores más recientemente (Stulgis et al, 1995; Bjarngard & Edgers, 1992 y Fasset et al, 1994).

Los asientos secundarios, en el tiempo durante el cual se han efectuado las mediciones recogidas en este trabajo, no se han estabilizado y siguen aumentando sin llegar a alcanzar un valor asintótico hasta este momento. En este período se han generado asientos que suponen un 3% del espesor de residuos sólidos existentes.

En este sentido, se puede relacionar la gran magnitud de los asientos secundarios que se están produciendo con las elevadas temperaturas medidas en el interior del vertedero –hasta 70°C a 20 m de profundidad- que indican la existencia de una gran actividad bioquímica causante de la descomposición de los residuos. Además, estas elevadas temperaturas son aproximadamente constantes en todo el registro y no están influidas por los cambios estacionales que, en superficie, han llegado a ser de unos 40°C.

De los registros del micrómetro cabe deducir la existencia de capas de distinta deformabilidad en el perfil del vertedero. Las oscilaciones de deformabilidad registradas en distintas capas se han mantenido a la misma profundidad durante todo el período de medidas y, además, se han podido relacionar con variaciones en el perfil de humedad debido a la existencia de diferentes capas de residuos o capas de suelo de cobertera intercaladas entre los mismos.

Otro rasgo del comportamiento mecánico de estos materiales se obtiene a partir de la distribución en planta de los asientos primarios obtenida a partir de los datos de la línea continua de asientos y de la topografía. La influencia de la carga es muy local y, a pesar de que el terraplén tiene 20 m de anchura, a 10 m de distancia de su pie casi no genera efectos de consolidación del terreno a esta distancia. Este dato se confirma con la observación de los registros del inclinómetro en los que se muestra como, al contrario que ocurre con la deformación vertical, la deformación horizontal generada por la sobrecarga es muy pequeña, lo que indica que este material tendría un valor del coeficiente de Poisson muy pequeño.

Resumiendo lo dicho hasta ahora, los residuos sólidos urbanos estudiados son materiales muy ligeros y deformables. Esta deformabilidad se puede generar por una sobrecarga o por procesos de descomposición – degradación de los residuos que va a generar gases y lixiviados que al ser evacuados del vertedero hacen que el volumen disminuya. La magnitud de estos asientos, una vez completados, puede ser mayor que la de los debidos a la sobrecarga. En cuanto a ésta, produce asientos muy localizados geoméricamente a su alrededor y se completan casi totalmente en un período de tiempo de unos 100 días.

La evolución de los asientos registrada mediante los distintos equipos empleados en la campaña de auscultación ha sido también analizada mediante el empleo de tres modelos teóricos de consolidación de residuos sólidos urbanos: el modelo de Sowers (1973), el modelo de Gandola (1994) y el

modelo de Meruelo. En los tres casos se ajustaron los asientos medidos a las leyes de consolidación que cada modelo propone y se obtuvieron los parámetros característicos de cada modelo necesarios para la cuantificación de asientos.

Para la realización de este análisis se han utilizado los datos de la línea continua de asientos en el caso del modelo de Sowers y los datos del micrómetro deslizante con los tres modelos citados. La razón es que los datos de la línea continua de asientos son los únicos que recogen de forma directa la influencia del incremento de carga debida a la construcción del terraplén y el modelo de Sowers es el único capaz de predecir asientos debidos a incrementos de tensiones.

Los datos del micrómetro deslizante se han empleado para el análisis de la consolidación secundaria mediante el modelo de Sowers, así como con los modelos de Gandola y Meruelo. Estos últimos son únicamente válidos para reproducir asientos que se generan una vez colmatado el vertedero debidos básicamente a la degradación bioquímica y sin otros incrementos de carga que los debidos a su propio peso.

Los ajustes efectuados con los tres modelos han sido satisfactorios y los valores de los distintos parámetros necesarios para dicho ajuste entran dentro de los rangos publicados en la literatura sobre el tema.

A partir de dichos parámetros se ha calculado la magnitud de los asientos que se van a producir al cabo de 10 años. Así, el modelo de Gandola y el de Meruelo predicen que los asientos se estabilizarán en este período de tiempo tendiendo a un valor constante correspondiente al 5,5-6,5 % del espesor del vertedero. Por su parte, el modelo de Sowers predice asientos secundarios para un período de 10 años próximos al 6% y, por tanto, dentro del mismo orden de magnitud. Sin embargo, los asientos que reproduce este modelo no son asintóticos y siguen aumentando a medida que transcurre el tiempo, por lo



que no es válido para calcular el valor máximo de los asientos que se van a generar en un vertedero.

## **IX.2 SUGERENCIAS PARA FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

Dentro de los varios enfoques que pueden dar origen a nuevas investigaciones y continuidad a este trabajo, cabe hacer mención a las siguientes sugerencias:

- i. Investigar los posibles materiales térreos o geosintéticos a utilizar en los sistemas de sellado, desde la perspectiva de su comportamiento geomecánico, impermeabilidad, fisurabilidad, etc, teniendo en cuenta su evolución con el tiempo y los factores climáticos (cambios de volumen, cambios de humedad, retracciones-expansiones) y que estos deben ser capaces de adaptarse a las grandes deformaciones que sufren los residuos.
- ii. Investigar la Influencia de la temperatura generada en el interior del vertedero sobre algunos factores clave del revestimiento de sellado, tales como la evolución de los materiales arcillosos compactados, y en concreto, a la vista del interés que podría suponer la implantación de especies vegetales sobre la superficie última de dicho revestimiento, como tratamiento ambiental y paisajístico de la clausura, el estudio de determinadas disposiciones ante un eventual “efecto barrera térmica” (capas de materiales granulares flojos, geocompuestos, etc).
- iii. Estudiar los posibles métodos de tratamiento de mejora del terreno, como puede ser la compactación dinámica por impacto, y el comportamiento de las basuras durante y posteriormente a su aplicación. Así como otros procesos de tratamiento de los RSU capaces de acelerar los procesos de biodegradación de los constituyentes orgánicos de los mismos con el fin

de conseguir la mejora de sus propiedades mecánicas en períodos de tiempo más cortos.

- iv. Investigar la influencia de la recirculación de lixiviados en los procesos de descomposición de los constituyentes orgánicos de los residuos y en la estabilidad del relleno.
- v. Investigar en profundidad las diversas técnicas de ensayos de caracterización de los residuos a fin de normalizar estos ensayos para conseguir datos comparables entre distintos vertederos que permitan correlacionar resultados.

CAPÍTULO X  
**CAPÍTULO X**

BIBLIOGRAFÍA  
**BIBLIOGRAFÍA**

- ABREU, R. (2000). "**Compressibilidade de maciços sanitarios**". Tese de Mestrado, USP.
- AEONOR (1992). "Ensayo de penetración estandar (SPT): UNE 103-800-92".
- ANDERSON, D.G.; HUSHMAND, B. & MARTIN, G.R. (1992). "**Seismic response od landfill slopes**". Stability and Perfomance of Slopes and Embankments-II, ASCE Geotechnical Special Publication, N° 31, Eds. R.B. Seed and R. W. Boulanger.
- ARAGAO, J.M.S. , JUCÁ, J. F. & MARIANO, M. O. (1999). "**Temperatura como um dos parâmetros no monitoramento ambiental do aterro da Muribeca em Recife -PE**". 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e Ambiental, ABES. Rio de Janeiro.
- BARBOSA, M.C. (1994). "**Investigação geoambiental do depósito de argila sob o aterro de gramacho, RJ.**" Tesis Doctoral, COPPE-UFRJ.
- BARLAZ, M.A. & HAN, R.K. (1993). "**Leachate and gas generation**". Geotechnical practice for waste disposal. Eds. David E. Daniel, Chapman & Hall, London.
- BJARNGARD, A. & EDGERS, L. (1990). "**Settlement of municipal solid waste landfills**". Proc. 13<sup>th</sup> Annual Madison Waste Conference, Madison, USA.
- BOUTWELL, G.P. & FIORI, V.A. (1995). "**Settlement of clay cover pn saturated garbage**". Geoenvironmental 2000. Geotechnical Special Publication n° 46, ASCE, Ed. Yalcin Acar and David, New Orleans.
- BURLINGAME, M.J. (1985). "**Construction of a highway on a sanitary landfill and its long-term perfomance**". Transportation Research Records 1031, TRB, Washington, DC.

- CARRERAS,N.; DORRONSORO, J.L.; SANCHEZ, D. QUEJIDO,A. FERNANDEZ, M.E. & HERRAEZ, I.(1997). "**Características químicas de aguas, suelos,sedimentos y vegetación en las proximidades del vertedero de Valdemingómez (Madrid).**" Revista Profissional de Tecnología y Equipamientos de Ingenieria Ambiental, nº 77, noviembre.
- CARTIER, G. & BALDIT, R. (1983). "**Comportement geotechnique des decharges de residus urbains**". Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées, N° 128, Paris- France.
- CARVALHO, M.F. & VILAR, O. M. (1998a). "**In-situ tests in urban waste sanitary landfill**". International Congress on Environmetal Geotechnique, Lisboa, ed. Seco y Pinto, Balkema.
- CARVALHO, M.F. & VILAR, O. M. (1998b). "**Comportamento de residuos sólidos urbanos em compressao confinada**". XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Vol.3, Brasilia.
- CARVALHO, M.F. (1999). "**Comportamento geotécnico de residuos sólidos urbanos**". Tesis Doctoral. Escola de Engenharia de Sao Carlos - USP- SAO PAULO..
- CASANOVAS, J.S. (1989). "**Mejora de un relleno de vertidos de residuos urbanos**". Revista de Obras Públicas, Diciembre.
- CHARLES, J.A. (1984). "**Settlement of fill**". From: Ground Movements and their Effects on Structures. Ed. P.B. Attewell and R.K. Taylor, Surrey Univ. Press, New York.

- CHARLES, J. A. ; BURFORD, D. & WATTS, K.S. (1981). “ **Field studies of the effectiveness of dynamic consolidation**”. X ICSMFE, Vol.3, 15-19 junio- Stockholm.
- CHEYNEY, A.C.(1983). "**Settlement of landfill**". Proceedings Landfill Completion Symposium, Harwell.
- CHRISTENSEN, T.H.; KJELDEN, P. & LINDHART, B. (1992a). "**Landfilling of Waste: Biogas**". Ed. E & FN Spon, London.
- CHRISTENSEN, T.H. & COSSU, R. (1992b). "**Landfilling of waste: leachate**". Ed. E & FN Spon, London.
- COUMOULOS, D. G. ; KORYALOS, T. P.; METAXAS, I.L. & GIOKA, D. A. (1995). "**Geotechnical investigation at main landfill of Athens**". Proc. Sardinia 95. 5<sup>o</sup> International Symposium, Italy.
- CODUTO, D.P. & HUITRIC, R. (1990) "**Monitoring landfill movements using precise instruments**". Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice. Ed. Landva & Knowlea, ASTM STP-1070.
- CUADRA, A. ; FERNÁNDEZ, I. NICOLÁS, F.; FUENTICIELLA, J.M.R & VALERIO, J. (1998). "**Técnicas geofísicas de reconocimiento**". XVI Curso Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, CEDEX.
- CUÉLLAR, V. (1988). "**Análisis Espectral de Ondas Superficiales**". Laboratorio de Geotecnia, CEDEX, MOPU, Madrid.
- CUÉLLAR, V.; MONTE, J.L.; VALERIO, J.; KAUSEL, E. and ROESSET, J.M. (1993a). "**Selection of drop masses to generate long period waves for SASW tests**". Proceedings of 2nd European Conference on Structural Dynamics: Eurodyn'93. Trondheim, Noruega. Vol.I, pp 315-322.

- CUÉLLAR, V.; MONTE, J.L.; KAUSEL, E. & ROESSET, J.M. (1993b). **"Determination of the elastic properties of a miocene marl by the spectral analysis of surface waves"**. Geotechnical Engineering of Hard Soils-Soft Rocks. Anagnostopoulos et al. (eds), 1993 Balkema, Rotterdam. pp. 1401-1407.
- CUÉLLAR, V. & VALERIO, J. (2000). **"Aplicaciones geotécnicas del análisis espectral de ondas superficiales"**. Libro Homenaje a J. A. Jimenez Salas, Geotecnia en el año 2000, CEDEX.
- DAMES & MOORE (1988). **"Landfill slope stability analysis, Sunnyvale sanitary landfill, Sunnyvale, California"**. Report to City of Sunnyvale, California, 94086, February.
- DRNEVICH, V.P.; KIM, S-I.; ALEXANDER, D.R. & KOHN, S.D. (1985). **"Spectral analysis of surface waves in pavement systems with random noise excitation"**. 55th Annual International Society of Exploration Geophysicists Meeting, Washington, D.C. October 6 -10.
- DRUSCHEL, S. J. & WARDWELL, R. E. (1991). **"Impact of long term landfill deformation"**. Geotechnical Engineering Congress, ASCE, Boulder-Colorado, junio, Vol. II.
- DUNN, R.J. (1995) **"Design and construction of foundations compatible with solid wastes"**. Landfill Closures Environmental Protection and Land Recovery, ASCE, Geotechnical Special Publication nº 53.
- EDIL, T. B. et al. (1990). **"Settlement of municipal refuse"**. Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice. Landva & Knowles, editors, ASTM-STP-1070, Philadelphia.

- EWING, W.M.; JARDETZKY, W.S. and PRESS, F. (1957). "**Elastic waves in layered media**". McGraw-Hill, New York.
- ESPINACE, R. et al. (1990). "**Problemas geotécnicos de los rellenos sanitarios**". Ingeniería Civil, CEDEX, N<sup>o</sup> 77, Diciembre, p. 77 - 83.
- FASSET, J.B., LEONARDS, G.A. & REPETTO, P.C. (1994). "**Geotechnical properties of municipal solid wastes and their use in landfill design**". Proc., Waste Technical Conference, Charleston, SC, USA.
- FERREIRA, J. A. (1999). "**Resíduos sólidos urbanos, industriais, hospitalares e radioativos - perspectivas atuais**". Curso de Atualização em Resíduos Sólidos, Ambiente e Saúde: Uma Visão Multidisciplinar-Fundação Nacional de Saúde Pública (FIOCRUZ). Rio de Janeiro.
- FRANTZIS, I. (1991). "**Settlement in the landfill site of schisto**". Proc., 3<sup>rd</sup> International Landfill Symposium, Sardinia 91, S. Margherita di Pula, CISA, Cagliari.
- GABR, M.A. & VALERO, S. N. (1995). "**Geotechnical properties of municipal solid waste**". Geotechnical Testing Journal, 18 (2).
- GANDOLA, M.; DUGNANI, L. , BRESSI, G. & ACAIA, C. (1994). "**A determinação dos efeitos do recalque sobre os depósitos de lixo sólido municipal**". Simposio Internacional de Destinação do Lixo, novembro, Salvador.
- GIBSON, R. E. & LO, K.Y. (1961). "**A theory of consolidation for soils exhibiting secondary compression**". ACTA Poytechnic Scandianavica, Ci 10, 296.



- GIFFORD, G. P., LANDVA, A. O. & HOFFMAN, V. C. (1990). "**Geotechnical considerations when planning construction on a landfill**". Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice. Landva & Knowlea, editors, ASTM STP-1070.
- GORDON, P.B.Jr. (1995). "**Settlement of clay cover on saturated garbage**". Proc. Geoenvironmental 2000, ASCE Special Geotechnical Publication 46, vol.2
- GREEN, D. C. & JAMNEJAD, G. (1997). "**Settlement characteristics of domestic waste**". Geoenvironmental Engineering. Ed. Thomas Telford, London.
- GRIMBERG, E. & BLAUTH, P. (1998). " Coleta seletiva: Reciclando materiais, reciclando valores". Revista Polis, Nº 31.
- GRISOLIA, M. & NAPOLEONI, Q. (1996). "**Getechnical characterization of municipal solid waste: choice of disign parameters**". Proc. of the Second International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, Ed.Kamon, Balkema, Vol II.
- GUILLEMIN, R. & GRAMSAMMER, J.C. (1971). "**Auscultation dynamique des chaussées a l'aide du vibreur léger**". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Note d'information technique.
- HAKER, C.D.; RIX, G.J. & LAI, C.G. (1997). "**Dynamic properties of municipal solid waste landfills from surface wave tests**". Proc. Of the Symposim on the Aplication of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. SAGEEP, Vol. 1.
- HAM, K. R. & BOOKTER, J. T. (1982). "**Decomposition of solid waste in test lysimeters**". Journal of the environmental engineering division- ASCE, vol. 108, Nº. EEE, December.

- HARRIS, M.R.R.(1979). "**Geotechnical characteristics of landfilled domestic refuse**". Proc. Midland Geotechnical Society Symposin on Engineering Behavior of Industrial and Urban Fill, University de Birminhghan.
- HARTZ, K.E.; KLINK, R.E. & HAM, R.K. (1982). "**Temperature effects-methane generation from landfill samples**". Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, 108: (4).
- HEISEY, J.S.; STOKOE II, K.H.; HUDSON, W.R. and MEYER, A.H. (1982). "**Determiration of in situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves**". Research Report 256-2, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Noviembre 1982.
- HEUKELOM, W. and FOSTER, C.R. (1960). "**Dynamic testing of pavements**". Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 86, SM1,February, pp. 1-28.
- HOGLAND (1999). "**Waste management in a historical perspectiva.**" Notas de Clas, Curso de Gestao de Residuos Sólidos, UERJ.
- HUITRIC, R. (1981). "**Sanitary landfill settlement rates**". Los Angeles County Sanitation District, Paper presenteded at Technische Universitat, Berlin.
- IPT/CEMPRE (1996). "**Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**". Publicação IPT Nº 2163. Ed. Págimas e Letras, Gráfica, Ltda. Sao Paulo.
- JESSBERGER, H. L. & KOCKEL, R. (1993). "**Determiration and assesment of the mechanical properties of waste landfill**". Green 93. Waste Disposal by Landfill. Ed. R.W.Sarby, Balkema.

- JESSBERGER, H.L. (1996). “ **TC5 activities**” – Proc. 2<sup>nd</sup>. Int. Conf. Env. Geot. Ed. Kamon, Balkema , Rotterdam, pp. 1227-1254.
- JONES, R. (1962). “**Surface wave technique for measuring the elastic properties and thicknesses of roads: theoretical development**”. British Journal of Applied Physics, Vol. 13, pp. 21-29.
- JUCA, J.F.T. ; MARIANO, M.O.H. & MELO, V.L.A. (1999a), “**Recalques e decomposição da materia orgânica em aterros de residuos sólidos na regio metropolitana do Recife**”. 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e Ambiental, Rio de Janeiro.
- JUCÁ, J.F.T.; MONTEIRO, V.E.D.; OLIVEIRA, F.J. S. & MACIEL, F. J. (1999b). “**Monitoramento ambiental de aterros de residuos sólidos da Muribeca**”. 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO`99. Sao José dos Campos.
- JUCÁ, J.F T. ; MELO, V.L.A & MONTEIRO, V.E.D. (2000). “ **Ensaio de penetração dinâmica em aterros de residuos sólidos**”. IX SILUBESA, Porto Seguro.
- JUNQUEIRA, F.F. & PALMEIRA, E. (1999). “**Monitoramento do comportamento de lixo em células geotecnicamente preparadas**”. 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO`99. Sao José dos Campos.
- KAMON, M. (1997). “**Geotechnical properties of waste landfill**”. Geoenvironment Engineering. London, Ed. Thomas Telford.
- KAUSEL, E. (1981). “**An explicit solution for the Green functions for dynamic loads in layered media**”. Research Report R81-13, Departement of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

KAUSEL, E. & ROESSET, J.M. (1981). "**Stiffness matrices for layered soils**".  
Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 54, N° 1.

KAUSEL, E. & PEEK, R. (1982). "**Dynamic loads in the interior of a layered stratum: an explicit solution**". Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 72, N° 5.

KAVAZANJIAN, E., SNOW, M.S., MATASOVIC, N. P. & SATOB, T. (1994). "**Non-intrusive Rayleigh wave investigations at solid waste landfill**".  
Proc. First Int. Conference on Environmental Geotechnics.

KAVAZANJIAN, E. & MATASOVIC, N. (1995). "**Seismic analysis of solid waste landfills**". Geoenvironmental 2000. Geotechnical Special Publication N° 46, ASCE, Vol.2, Ed. Yalcin B. Acar and David E. Daniel, New Orleans.

KAVAZANJIAN, E.; MATASOVIC, N.; BONAPARTE, R. & SCHMERTMAN, G. R. (1995b). "**Evaluation os MSW properties for seismic analysis**".  
Geoenvironmental 2000. Geotechnical Special Publication N° 46, ASCE, Vol.2, Ed. Yalcin B. Acar and David E. Daniel, New Orleans.

KEISUKE SHIMIZU, (1996). "**Geotechnics of waste landfill**". Proc. 2<sup>nd</sup>. Int. Conf. Env. Geot. Osaka, ed. Kamon.

KNOCHENMUS, G. & WOJNAROWICZ, & VAN IMPE (1998). "**Stability of municipal solid wastes**". Proc. 3<sup>rd</sup>. Int. congress on environmental geotechnics. Ed. Seco e Pinto, Lisboa.

KOCKEL, R., KONIG, D. & SYLWASSCHY, O. () "**Three basic topics on waste mechanics**".

KONIG, D. & JESSBERGER, H.L. (1997). "**Waste mechanics**". ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics.

- LAMB, H. (1904). "**On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid**". Philos. Trans. Soc. London. Ser. A, 203, pp. 1-42.
- LANDVA, A.O.; CLARK, J. I.; WEISNER, W.R. & BURWASH, W.J. (1984). "**Geotechnical engineering and refuse landfills**". Proc. 6<sup>th</sup> National Conference on Waste Management, Vancouver, Canada.
- LANDVA, A.O. & CLARK, J.I. (1990). "**Geotechnics of waste fills**". Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice. Ed. Landva & Knowlea, ASTM STP-1070, p. 86-103.
- LIMA, L.M.Q. (1995). "Tratamento e biorremediação". Ed. Hemus limitada. 3<sup>o</sup> edición.
- MABRY, E. R. (1977). "**Building development on a municipal refuse fill**". Proc. Conf. on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Material. Univ. of Michigan, ASCE.
- MANASSERO, M., VAN IMPE, W.F. & BOUAZA, A. (1997). "**Waste disposal and containment**". Proc. 2<sup>nd</sup> International Congress on Environmental Geotechnics. Osaka, Japon. Ed. Balkema, p.1425-1474.
- MARIANO, M.O.H.(1999). "Recalques no aterro de residuos sólidos da Muribeca - PE". Tesis de Mestrado, UFPE. Recife.
- MATASOVIC, N. & KAVAZANJAN, E. (1998). "**Cyclic characterization of Oil landfill solid waste**". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol.124, nº 3, Marzo, ASCE.
- MILLER, G.F. and PURSEY, H. (1955). "**On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid**". Proc. Roy. Soc., 233.

- MITCHELL, J.K., BRAY, J.D. & MITCHELL, R.A. (1995). "**Material interactions in solid waste landfills**". Geoenvironment 2000. Geotechnical Special Publication. ASCE , N° 46.
- MITCHELL, J.K. (1996), "**Environmental geotechnics**". Proc. 2<sup>nd</sup> International Congress on Environmental Geotechnics. Osaka, Japon. Ed. Balkema,
- MORRIS, D.V. & WOODS, C.E. (1990). "**Settlement and engineering considerations in landfill and final cover design**". Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice. Ed. Landva & Knowlea, ASTM STP-1070.
- OLALLA, C. (1993). "**Comportamiento geotécnico de rellenos artificiales**". Curso Cimentar en Madrid. Cedex.
- OLIDEN, J. (1987). "**Vertederos de basuras y escombros, problemas y tratamiento**". Curso sobre Obras de Materiales Suelos no Convencionales. Cedex.
- OWEISS, I.S. & KHERA, K. (1990). "**Geotechnology of waste management**". London. Ed. Butterworths.
- PALMA, J. H. (1995). "**Comportamiento geotécnico de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos**". Tesis Doctoral. ETSCCP, Universidad de Cantabria.
- PEREIRA NETO, J. T. & LELIS, M. P .N. (1999). "**Variação da composição gravimétrica e potencial de reintegração ambiental dos resíduos sólidos urbanos por região fisiográfica do estado de Minas Gerais**". 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e Ambiental. Rio de Janeiro.
- PLAN AUTONÓMICO DE GESTION DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE LA COMUNIDAD DE MADRID (1997-2005).

- POWRIE, W.; RICHARDS, D.J. & BEAVEN, R.P. (1998). “ **Compression of waste and implication for practice**”. Geotechnical engineering of landfills. Ed. Thomas telford, London.
- PROSSER, R. & JANECHER, A. (1995). “**Landfill gas and groundwater contamination**”. Landfill Closures Environmental Protection and Land, ASCE, Geotechnical Special Publication, nº 53.
- RAO, S.K. , MOULTON, L.K. , SEALS, R. K. (1977). “**Settlement of refuse landfills**”. Proc. Conf. on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Material. Univ. of Michigan, ASCE.
- RAYLEIGH, L. (1885). “**On waves propagated along the plane surface of an elastic solid**”. Proc. London Mth. Soc. 17.
- REES, J. F. (1980). “**The fate of carbon compounds in the landfill disposal of organic matter**”. J. Chem. Biotechnical, Nº 30.
- REES, J.F. & GRAINGER, J.M. (1982). “**Rubbish dump or fermentation? Prospects for the control of refuse fermentation to methane in landfills**”. Process Biochemistry 17: (6).
- RICHARD, F.E.; WOODS, R.D. & HALL, J.R. (1970). “**Vibrations of soils and foundations**”. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- RODRIGUEZ ORTIZ, J.M. (1982), “**Construcciones sobre rellenos**”. Curso de Estructuras de Tierra. E.T.S.I.C.C.P., Universidad Politécnica de Madrid.
- ROESSET, J.M.; CHANG, D.W. & STOKOE, K.H. (1991). “**Comparison of 2D and 3D models for analysis of surfaces waves tests**”. Proc. 5<sup>th</sup>.

International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Karlsruhe.

SAGASETA, C. (1993). **“Rellenos sanitarios: construcción y capacidad portante a largo plazo”**. Curso sobre Geotecnia Ambiental. CEDEX .

SAGASETA, C. (1995). **"General report"**. Waste Disposal by Landfill -Gree 93, Ed. Sarsby, Balkema, Rotterdam, ISBN 90.

SÁNCHEZ ALCITURRI, J.M., PALMA, J.H. , SAGASETA, C. & CAÑIZAL, J. (1993a), **“Mechanical properties of wastes in a sanitary landfill”**. Proc. Green 93. Waste Disposal by Landfill. Bolton, U. K , 28 june - 1 july.

SÁNCHEZ ALCITURRI, J.M. , PALMA, J.H. , SAGASETA, C. & CAÑIZAL, J. (1993b). **“Geotecnia en vertederos sanitarios controlados”**. Residuos: Revista Técnica de Geotecnología Ambiental. Año III, Nº 02, marzo-abril.

SÁNCHEZ ALCITURRI, J.M. ; PALMA, J.H ; SAGASETA, C. & CAÑIZAL, J. (1993c). **“Three years of deformation monitoring at Meruelo landfill”**. Proc. Green 93. Waste Disposal by Landfill. Bolton, U. K. , 28 june - 1 july.

SANTAMARIA, L. & HERNANDEZ-TORRES, M. (1973). **"Auscultación vibratoria de firmes de carretera. Método de ondas superficiales"**. Boletín LT nº 96, pp. 57-68.

SANTOS, S. M. (1997). **"Propriedades geotécnicas de um aterro de resíduos sólidos"**. Tesis de Mestrado, UFPE.

SHARMA, H.,D.; MECHAEL,T.D. & OLSEN, D.M. (1990). **“Field measurements of dynamic moduli and Poisson’s ratios of refuse and underlying soils at a landfill site”**. Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice. Ed. Landva & Knowlea, ASTM STP-1070.



- SIEGEL, R.A ; ROBERTSON, R. J. & ANDERSON, D. G. (1990). “**Slope stability investigation at a landfill in southern California**”. Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice. Ed. Landva & Knowlea, ASTM STP-1070.
- SIMÕES, G.F. & CAMPOS, T.M.P. (1998). “**Modelos de previsão de recalques em aterros sanitários**”. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Vol. 3, Brasília.
- SINGH, S. & MURPHY, B. (1990). “**Evaluation of the stability of sanitary landfills**”. Geotechnics of waste fills - Theory and Practice. Ed. Landva & Knowels, ASTM STP-1070.
- SISINO, C. (1999). “**Impacto ambiental de depósitos de resíduos de sólidos urbanos e industriais**”. Curso de Atualização em Resíduos Sólidos, Ambiente e Saúde: Uma Visão Multidisciplinar. Fundação Nacional de Saúde Pública (FIOCRUZ). Rio de Janeiro.
- SOWERS, G.F. (1968). “**Foundation problems in sanitary land fills**”. Journal of the Sanitary Engineering Division. ASCE, Vol. 94, Nº SA1, February.
- SOWERS, G.F. (1973). “**Settlement of waste disposal fills**”. Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moscow, Vol 2/2.
- SPOKAS, A.K. & BOGNER, J.E. (1996). “**Field system for continuous measurement of landfill gas pressures and temperatures**”. Waste management & Research, nº 14..
- STULGIS, R.P.et. al., (1995). “**Prediction landfill settlement**”. Proc. Geoenvironmental 2000, ASCE, Special Publication 46, vol 1.

- TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H. & VIGIL, S.A. (1994). “ **Gestión integral de residuos sólidos**”. Ed. Mc Graw - Hill, 1107p.
- TERZAGHI, K. (1943) "**Theoretical soil mechanics**". John Wiley and Sons, New York.
- VALERIO, J. (1990). "**Estudio de sistemas multicapa mediante la propagación de ondas superficiales (2ª Fase)**". Laboratorio de Geotecnia, CEDEX, MOPU, Mayo 1990.
- VAN IMPE, W.F. & BOUAZZA, A. (1996). "Densification of domestic waste fills by dynamic compactation. Canadian Geotechnical Journal, vol.33.
- WALL, D. K. & ZEISS, C. (1995). "**Municipal landfill biodegradation and settlement**". Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 121, Nº 3, March.
- WARDWELL, R.E. & NELSON, J.D. (1981). "**Settlement of sludge landfills with fiber decomposition**". Proc., 10<sup>th</sup> ICSMFE, Stockholm, Sweden, vol.2.
- WATTS, K.S. & CHARLES, J.A. (1990). "**Settlement of recently placed domestics refuse landfill**". Proc. Instn. Civil Engineering. Part 1, Vol. 88, Diciembre.
- YEN, B.C. & SCANLON, B. (1975). "**Sanitary landfill settlement rates**". Journal of the Geotechnical Engineering Division. ASCE, Vol. 101, Nº GT5, May.
- YORK, D. ; LESSER, N. ; BELLATTY, T. ; IRSAL, E. & PATEL, A. (1977). "**Terminal development on a refuse fill site**". Proc. Conf. on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Material. Univ. of Michigan, ASCE, 810-830.

ZIMMERMAN, E., CHEN, W. H. & FRANKLIN, A.G. (1977). “**Mathematical model for solid waste settlement**”. Proc. Conf. on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Material. ASCE, Univ. of Michigan, p. 210-226.

ANEJO  
ANEJO

**Tabla A1** - Medidas de asiento obtenidas a través de la Línea Continua de Asiento - Sección 1

Fechas	MEDIDAS DE ASIENTOS EN (MM) SECCIÓN 1												
	Distancia de los Puntos en (m)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
07/07/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16/07/98	-106	-184	-231	-269	-351	-390	-416	-457	-482	-482	-531	-492	-527
24/07/98	-189	-211	-271	-366	-412	-476	-507	-507	-578	-568	-550	-601	-573
11/08/98	-244.9	-323.9	-356.9	-469.9	-499.9	-568.9	-625.9	-618.9	-694.9	-687.9	-686.9	-722.9	-687.9
08/09/98	-338	-448	-493	-567	-672	-690	-763	-804	-793	-856	-862	-818	-868
07/10/98	-452.4	-464.4	-580.4	-645.4	-708.4	-834.4	-828.4	-872.4	-933.4	-897.4	-942.4	-941.4	-906.4
03/11/98	-568.4	-590.4	-716.4	-778.4	-853.4	-961.4	950.4	-1028.4	-1051.4	-1050.4	-1109.4	-1063.4	-1078.4
03/12/98	-614.4	-673.4	-808.4	-895.4	-1031.4	-1016.4	-1129.4	-1184.4	-1134.4	-1208.4	-1239.4	-1161.4	-1254.4
20/01/99	-705.7	-841.7	-947.7	-985.7	-1152.7	-1177.7	-1241.7	-1315.7	-1277.7	-1381.7	-1339.7	-1355.7	-1381.7
03/03/99	-774.3	-955.3	-932.3	-1115.3	-1177.3	-1200.3	-1364.3	-1299.3	-1399.3	-1428.3	-1356.3	-1458.3	-1433.3
26/05/99	-889.6	-975.6	-1094.6	-1194.6	-1269.6	-1358.6	-1414.6	-1444.6	-1492.6	-1519.6	-1539.6	-1538.6	-1536.6
12/07/99	-1044.2	-1009.2	-1225.2	-1293.2	-1360.2	-1538.2	-1567.2	-1630.2	-1613.2	-1631.2	-1729.2	-1633.2	-1701.2
25/08/99	-1230.2	-1131.2	-1312.2	-1442.2	-1477.2	-1678.2	-1608.2	-1647.2	-1708.2	-1707.2	-1707.2	-1701.2	-1687.2
24/09/99	-1149.1	-1142.1	-1374.1	-1366.1	-1520.1	-1639.1	-1712.1	-1765.1	-1820.1	-1788.1	-1830.1	-1839.1	-1841.1
30/11/99	-1325.2	-1405.2	-1477.2	-1515.2	-1767.2	-1808.2	-1850.2	-1874.2	-1921.2	-1980.2	-1984.2	-1970.2	-1997.2
10/02/00	-1413.3	-1525.3	-1552.8	-1659.3	-1886.3	-1906.3	-2009.3	-1973.3	-2026.3	-2102.3	-2062.3	-2088.3	-2100.3

**Tabla A 2** - Medidas de asiento obtenidas a través de la Línea Continua de Asiento - Sección 1

Fechas	MEDIDAS DE ASIENTO EN (MM) SECCIÓN 1											
	Distancia de los Puntos en (m)											
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
07/07/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16/07/98	-497	-488	-501	-449	-418	-417	-352	-282	-277	-206	-150	-160
24/07/98	-547	-583	-551	-497	-471	-478	-423	-318	-310	-251	-162	-178
11/08/98	-667.9	-704.9	-644.9	-615.9	-627.9	-553.9	-506.9	-477.9	-414.9	-332.9	-294.9	-264.9
08/09/98	-830	-823	-839	-771	-758	-724	-639	-589	-552	-470	-389	-395
07/10/98	-968.4	-932.4	-888.4	-884.4	-854.4	-771.4	-754.4	-715.4	-625.4	-525.4	-505.4	-425.4
03/11/98	-1101.4	-1050.4	-1039.4	-1046.4	-984.4	-894.4	-879.4	-834.4	-747.4	-686.4	-648.4	-612.4
03/12/98	-1217.4	-1159.4	-1235.4	-1122.4	-1058.4	-1107.4	-966.4	-950.4	-889.4	-768.4	-750.4	-781.4
20/01/99	-1334.7	-1396.7	-1366.7	-1290.7	-1293.7	-1185.7	-1149.7	-1084.7	-1009.7	-927.7	-880.7	-913.7
03/03/99	-1375.3	-1473.3	-1376.3	-1333.3	-1399.3	-1269.3	-1186.3	-1195.3	-1105.3	992.3	-885.3	-914.3
26/05/99	-1569.6	-1524.6	-1517.6	-1488.6	-1498.6	-1448.6	-1329.6	-1265.6	-1210.6	-1207.6	-1075.6	-1097.6
12/07/99	-1724.2	1671.2	-1679.2	-1655.2	-1614.2	-1548.2	-1432.2	-1437.2	-1329.2	-1265.2	-1175.2	-1166.2
25/08/99	-1858.2	-1692.2	-1670.2	-1742.2	-1633.2	-1477.2	-1529.2	-1478.2	-1281.2	-1268.2	-1220.2	-1211.2
24/09/99	-1945.1	-1775.1	-1802.1	-1827.1	-1784.1	-1673.1	-1653.1	-1574.1	-1519.1	-1341.1	-1276.1	-1267.1
30/11/99	-2009.2	-1896.2	-2009.2	-1964.2	-1884.2	-1797.2	-1788.2	-1690.2	-1618.2	-1458.2	-1396.2	-1403.2
10/02/00	-2140.3	-2107.3	-2113.3	-2059.3	-1996.3	-1893.3	-1894.3	-1831.3	-1780.3	-1556.3	-1560.3	-1480.3

**Tabla A3** - Medidas de asiento obtenidas a través de la Línea Continua de Asiento - Sección 2

Fechas	MEDIDAS DE ASIENTOS EN (MM) SECCIÓN 2												
	Distancia de los Puntos en (m)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
07/07/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16/07/98	-122	-157	-195	-282	-318	-372	-413	-419	-470	-490	-474	-516	-504
24/07/98	-177	-193	-293	-309	-399	-465	-464	-544	-549	-549	-606	-581	-571
11/08/98	-270.8	-278.8	-373.8	-437.8	-488.8	-584.8	-581.8	-650.8	-677.8	-664.8	-722.8	-698.8	-691.8
08/09/98	-393	-375	-498	-556	-604	-718	-728	-772	-836	-797	-843	-870	-845
07/10/98	-419.4	-471.4	-578.4	-601.4	-744.4	-780.4	-808.4	-913.4	-890.4	-921.4	-960.4	-911.4	-950.4
03/11/98	-510.4	-615.4	-669.4	-750.4	-876.4	-877.4	-993.4	-989.4	-1058.4	-1044.4	-1064.4	-1096.4	-1055.4
03/12/98	-649.4	-698.4	-826.4	-894.4	-985.4	-1053.4	-1091.4	-1177.4	-1162.4	-1202.4	-1224.4	-1187.4	-1222.4
20/01/99	-719.7	-835.7	-982.7	-1002.7	-1115.7	-1174.7	-1252.7	-1313.7	-1328.7	-1344.7	-1353.7	-1374.7	-1335.7
03/03/99	-769.3	-888.3	-963.3	-1034.3	-1194.3	-1199.3	-1289.3	-1363.3	-1342.3	-1420.3	-1416.3	-1384.3	-1384.3
26/05/99	-896.6	-954.6	-1041.6	-1154.6	-1236.6	-1313.6	-1385.6	-1413.6	-1491.6	-1499.6	-1528.6	-1499.6	-1529.6
12/07/99	-963.2	-1085.2	-1106.2	-1310.2	-1362.2	-1389.2	-1543.2	-1600.2	-1576.2	-1671.2	-1614.2	-1655.2	-1719.2
25/08/99	-1076.2	-1128.2	-1311.2	-1298.2	-1510.2	-1564.2	-1566.2	-1753.2	-1677.2	-1703.2	-1819.2	-1754.2	-1723.2
24/09/99	-1114.1	-1170.1	-1328.1	-1385.1	-1638.1	-1671.1	-1641.1	-1839.1	-1736.1	-1824.1	-1792.1	-1847.1	-1870.1
30/11/99	-1221.2	-1257.2	-1497.2	-1491.2	-1747.2	-1794.2	-1788.2	-1955.2	-1853.2	-1950.2	-1991.2	-1984.2	-2022.2
10/02/00	-1329.3	-1369.3	-1603.3	-1614.3	-1880.3	-1907.3	-1956.3	-2097.3	-1996.3	-2057.3	-2096.3	-2079.3	-2141.3

**Tabla A4 - Medidas de asiento obtenidas a través de la Línea Continua de Asiento - Sección 2**

Fechas	MEDIDAS DE ASIENTOS EN (MM) - SECCIÓN 2											
	Distancia de los Puntos en (m)											
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
07/07/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16/07/98	-480	-513	-475	-434	-434	-394	-330	-287	-269	-193	-167	-153
24/07/98	-555	-557	-543	-559	-502	-430	-437	-381	-293	-260	-240	-203
11/08/98	-726.8	-682.8	-663.8	-674.8	-619.8	-546.8	-526.8	-480.8	-404.8	-348.8	-336.8	-277.8
08/09/98	-813	-848	-806	-775	-784	-693	-644	-600	-539	-458	-444	-388
07/10/98	-972.4	-898.4	-907.4	-916.4	-853.4	-784.4	-788.4	-680.4	-603.4	-579.4	-522.4	-476.4
03/11/98	-1082.4	-1092.4	-1037.4	-987.4	-1015.4	934.4	-862.4	-836.4	-780.4	-698.4	-676.4	-604.4
03/12/98	-1225.4	-1189.4	-1200.4	-1172.4	-1126.4	-1067.4	-1039.4	-946.4	-876.4	-841.4	-772.4	-743.4
20/01/99	-1366.7	-1364.7	-1304.7	-1320.7	-1282.7	-1180.7	-1165.7	-1086.7	-998.7	-971.7	-882.7	-803.7
03/03/99	-1423.3	-1391.3	-1422.3	-1386.3	-1318.3	-1265.3	-1262.3	-1160.3	-1066.3	-1073.3	-960.3	-936.3
26/05/99	-1549.6	-1529.6	-1530.6	-1495.6	-1497.6	-1397.6	-1353.6	-1281.6	-1210.6	-1204.6	-1118.6	-1152.6
12/07/99	-1634.2	-1642.2	-1707.2	-1645.2	-1662.2	-1568.2	-1501.2	-1363.2	-1323.2	-1324.2	-1088.2	-1220.2
25/08/99	-1836.2	-1771.2	-1706.2	-1788.2	-1683.2	-1546.2	-1627.2	-1540.2	-1356.2	-1330.2	-1342.2	-1077.2
24/09/99	-1903.1	-1838.1	-1846.1	-1869.1	-1782.1	-1711.1	-1740.1	-1633.1	-1506.1	-1359.1	-1350.1	-1160.1
30/11/99	-2020.2	-1955.2	-2001.2	-2027.2	-1911.2	-1828.2	-1875.2	-1743.2	-1621.2	-1485.2	-1457.2	-1294.2
10/02/00	-2118.3	-2082.3	-2114.3	-2124.3	-2018.3	-1936.3	-1972.3	-1845.3	-1715.3	-1575.3	-1551.3	-1386.3



**Tabla A5** - Medidas de asiento obtenidas a través de los puntos de referencia - Lado Sur

Fechas	MOVIMIENTOS VERTICALES EN (MM)								
	Puntos de Referencia - Lado Sur								
	P-10	P-11	P-12	P-13	P-14	P-15	P-16	P-17	P-18
07/07/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15/07/98	-78.05	-97.95	-84.8	-56.5	-55.05	-54.75	-40.4	-41.05	-42.05
24/07/98	-113.3	-138.15	-121	-85.5	-83.9	-80.95	-64	-65.8	-67.25
08/09/98	-269.35	-307.6	-281.45	236.45	234.6	-224.4	200.2	-215.9	-212.6
07/10/98	-355.35	-399.8	-369.85	-320.3	-312.6	-304.3	-278.55	-284.1	-294.1
03/11/98	-472.65	-498.7	-478.25	-416.9	-438.05	-419.45	-392.35	-398.6	-399.6
03/12/98	-582.65	-608.7	-604.25	-452.9	-518.05	-519.45	-502.35	-488.6	-495.6
20/01/99	-742.31	-791.1	-710.7	-684.11	-704.12	-692.51	-669.88	-662.66	-511.04
03/03/99	-791.7	-841.05	-761.71	-733.51	-752.92	-740.91	-716.83	-711.86	-561.49
26/05/99	-935.91	-992.4	-912.91	-883.46	-899.22	-884.46	-862.33	-856.91	-710.69
12/07/99	-1018.96	-1076.8	-994.21	-963.66	-983.62	-964.51	-943.98	-942.61	-793.14
25/08/99	-1084.31	-1144.05	-1060.71	-1030.71	-1052.12	-1027.66	-1008.38	-1010.36	-861.54
24/09/99	-1130.31	-1191.15	-1107.91	-1079.11	-1099.32	-1072.81	-1054.18	-1056.56	-910.79
30/11/99	-1231.28	-1301.8	-1215.31	-1188.51	-1201.27	-1176.98	-1157.63	-1157.61	-1015.14
10/02/00	-1327.76	-1390	-1313.35	-1286.96	-1298.62	-1272.56	-1253.43	-1254.41	-1113.39

**Tabla A6** - Medidas de asiento obtenidas a través de los puntos de referencia - Lado Norte

Fechas	MOVIMIENTOS VERTICALES (MM)								
	Puntos de Referencia - Lado Norte								
	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	P-9
07/07/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15/07/98	-116	-89	-82.35	-52.75	-62.7	-66	-43.25	-42.35	-39
24/07/98	-158.1	-124	-115.9	-76.5	-90.8	-95.15	-64.7	-62.8	-58.1
08/09/98	-316.15	-269.95	-258.85	-201.9	-220.85	-229.15	-179.9	-178.65	-171.7
07/10/98	-393.05	-343.35	-329.2	-266.45	-293.6	-297.25	-240.7	-243	-235.05
03/11/98	-505.9	-464.4	-417.2	-351.35	-449.7	-374.15	-304.1	-376	-297.55
03/12/98	-577.9	-536.4	-489.2	-373.35	-471.7	-436.15	-366.1	-398	-399.55
20/01/99	-710.41	-637.74	-603.41	-541.77	-575.24	-552.44	-481.11	-511.52	-500.03
03/03/99	-756.06	-676.34	-641.16	-577.12	-612.99	-590.09	-510.61	-544.72	-533.88
26/05/99	-883.91	-801.64	-769.61	-696.87	-733.44	-707.94	-628.81	-659.57	-649.53
12/07/99	-955.21	-870.24	-837.56	-766.77	-800.59	-778.54	-694.41	-724.42	-716.38
25/08/99	-1001.11	-915.24	-882.91	-809.72	-842.39	-820.44	-731.41	-764.77	-757.53
24/09/99	-1056.91	-971.14	-938.61	-863.97	-897.89	-874.14	-782.16	-817.72	-811.08
30/11/99	-1149.46	-1068.19	-1028.21	-948.57	-991.24	-959.99	-863.06	-905.77	-898.28
10/02/00	-1238.71	-1156.29	-1114.41	-1031.97	-1075.49	-1042.09	-941.71	-986.77	-980.28

**Tabla A.7 - Medidas de asientos relativos obtenidas a través del micrómetro deslizante**

Fechas/ Profund.	MEDIDAS DE ASIENTOS RELATIVOS (MM)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
15/07/98	-0.252	-0.039	1.044	0.631	0.722	0.583	1.884	0.827	1.344
27/07/98	-0.496	-0.113	2.102	1.788	1.436	1.188	4.007	1.71	2.215
11/08/98	0.044	0.418	4.19	2.528	2.424	2.741	7.131	2.35	3.611
08/09/98	0.666	0.666	8.806	4.773	4.081	7.666	9.772	3.659	7.727
07/10/98	0.087	0.818	8.354	8.685	6.326	10.207	10.29	5.343	9.724
30/10/98	0.3	0.827	10.643	10.469	8.95	11.256	12.113	7.497	11.269
27/11/98	0.701	2.075	11.252	11.195	11.025	14.258	13.023	9.394	12.727
20/01/99	0.622	2.637	13.754	13.914	15.137	17.756	17.665	11.047	16.656
03/03/99	-0.004	3.041	13.619	13.758	16.886	20.428	18.252	12.292	18.422
26/05/99	0.474	2.867	15.411	15.868	20.863	24.213	24.313	14.11	18.422
12/07/99	0.644	2.972	16.26	16.699	22.973	26.685	26.941	15.133	18.422
25/08/99	1.519	3.416	17.848	18.17	24.661	28.56	29.525	16.752	21.268
24/09/99	1.44	3.642	18.335	19.192	26.088	30.492	31.518	17.513	22.956
02/12/99	1.793	4.482	20.259	21.342	32.719	36.349	35.317	23.195	27.877
10/02/00	1.666	5.139	26.829	27.194	34.29	38.132	37.279	26.119	30.966

**Tabla A.8 - Medidas de asientos relativos obtenidas a través del micrómetro deslizante**

Fechas/ Profund.	MEDIDAS DE ASIENTOS RELATIVOS (MM)								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
15/07/98	2.158	1.379	1.706	2.341	1.575	0.54	0.992	1.884	1.662
27/07/98	4.708	1.971	2.876	4.93	3.346	1.238	2.049	3.163	3.764
11/08/98	7.91	2.85	4.899	8.128	5.487	1.914	3.085	5.313	6.309
08/09/98	10.338	7.64	9.872	12.039	9.677	5.7	6.035	9.611	11.478
07/10/98	12.888	10.773	11.726	15.054	11.913	8.989	9.424	13.188	11.843
30/10/98	15.355	13.218	14.458	18.235	14.972	12.013	12.322	15.672	14.38
27/11/98	19.227	15.55	16.864	21.977	18.561	14.119	16.116	19.197	14.88
20/01/99	25.388	20.358	22.643	31.427	27.342	19.358	22.116	25.231	20.197
03/03/99	28.808	22.49	24.487	37.332	32.136	20.933	25.445	28.516	19.053
26/05/99	28.808	22.49	24.487	37.332	32.136	20.933	25.445	28.516	19.053
12/07/99	28.808	22.49	24.487	37.332	32.136	20.933	25.445	28.516	19.053
25/08/99	31.549	24.67	26.723	39.159	36.157	27.775	29.313	30.535	22.36
24/09/99	34.121	26.358	28.503	41.303	40.56	28.721	32.816	32.258	25.318
02/12/99	38.045	31.966	34.49	48.847	44.119	32.045	36.557	39.415	28.168
10/02/00	41.387	35.687	38.789	53.835	48.857	36.666	41.378	43.423	31.539

**Tabla A.9** - Medidas de asientos acumulados obtenidas a través del micrómetro deslizante

Fechas/ Profund.	MEDIDAS DE ASIENTOS ACUMULADOS (MM)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
15/07/98	-0.252	-0.291	0.753	1.384	2.106	2.689	4.573	5.4	6.744
27/07/98	-0.496	-0.609	1.493	3.281	4.717	5.905	9.912	11.622	13.837
11/08/98	0.044	0.462	4.653	7.18	9.604	12.345	19.476	21.826	25.437
08/09/98	0.666	1.306	10.112	14.885	18.966	26.632	36.404	40.063	47.79
07/10/98	0.087	0.905	9.259	17.944	24.27	34.477	44.767	50.11	59.834
30/10/98	0.3	1.127	11.77	22.239	31.189	42.445	54.558	62.055	73.324
27/11/98	0.701	2.776	14.028	25.223	36.248	50.506	63.529	72.923	85.65
20/01/99	0.622	3.259	17.013	30.927	46.064	63.82	81.485	92.532	109.188
03/03/99	-0.004	3.037	16.656	30.414	47.3	67.728	85.98	98.272	116.694
26/05/99	0.474	3.341	18.752	34.62	55.483	79.696	104.009	118.119	136.541
12/07/99	0.644	3.616	19.876	36.575	59.548	86.233	113.174	128.307	146.729
25/08/99	1.519	4.935	22.783	40.953	65.614	94.174	123.699	140.451	161.719
24/09/99	1.44	5.082	23.417	42.609	68.697	99.189	130.707	148.22	171.176
02/12/99	1.793	6.275	26.534	47.876	80.595	116.944	152.261	175.456	203.333
10/02/00	1.666	6.805	33.634	60.828	95.118	133.25	170.529	196.648	227.614

**Tabla A.10** - Medidas de asientos acumulados obtenidas a través del micrómetro deslizando

Fechas Profund.	MEDIDAS DE ASIENTOS ACUMULADOS (MM)								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
15/07/98	8.902	10.281	11.987	14.328	15.903	16.443	17.435	19.319	20.981
27/07/98	18.545	20.516	23.392	28.322	31.668	32.904	34.953	38.116	41.88
11/08/98	33.347	36.197	41.098	49.224	54.711	56.625	59.71	65.023	71.332
08/09/98	58.128	65.768	75.64	87.679	97.356	103.056	109.091	118.702	130.18
07/10/98	72.722	83.495	95.221	110.275	122.188	131.177	140.601	153.789	165.632
30/10/98	88.679	101.897	116.355	134.59	149.562	161.575	173.897	189.569	203.949
27/11/98	104.877	120.427	137.291	159.268	177.829	191.948	208.064	227.261	242.141
20/01/99	134.576	154.934	177.577	209.004	236.346	255.704	277.82	303.051	323.248
03/03/99	145.502	167.992	192.479	229.811	261.947	282.88	308.325	336.841	355.894
26/05/99	165.349	187.839	212.326	249.658	281.794	302.727	328.172	356.688	375.741
12/07/99	175.537	198.027	222.514	259.846	291.978	312.911	338.356	366.872	385.925
25/08/99	193.268	217.938	244.661	283.82	319.977	347.752	377.065	407.6	429.96
24/09/99	205.297	231.655	260.158	301.461	342.021	370.742	403.558	435.816	461.134
02/12/99	241.378	273.344	307.834	356.681	400.8	432.845	469.402	508.817	536.985
10/02/00	269.001	304.688	343.477	397.312	446.169	482.835	524.213	567.636	599.175

**Tabla A11 - Resultados obtenidos con el inclinómetro**

Fechas/ Profund.	MOVIMIENTOS HORIZONTALES MEDIANTE INCLINOMETRÍA																		
	Movimiento Horizontal AB : Hacia las Instalaci (mm)																		
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5
08/07/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16/07/98	-16.1	-13.8	-10.6	-4.9	-0.5	0.6	1.6	2.5	2.6	2.8	2.6	2	1.9	1.8	2.2	2.7	1.8	0.3	-0.3
23/07/98	-18.2	-15.6	-11.9	-5.3	-0.6	0.1	0.8	1.7	2	2.6	2.7	2.3	2.2	2.2	2.5	3	1.8	0.1	-0.6
10/08/98	-22.1	-17.8	-12.8	-4.5	0.2	-0.1	0	0.6	1	2.5	2.7	2.4	2.3	2.4	2.9	3.3	1.6	-0.4	-1
08/09/98	-18.5	-16.4	-13.4	-5.1	0.7	-0.4	-1	-0.5	0.4	2.2	2.9	2.6	2.3	2.3	2.8	3.4	1.9	-0.3	-1.5
07/10/98	-19.1	-17.1	-14.4	-6.7	-0.5	-1.3	-1.8	-1.2	0	2.1	3	2.5	2.2	2.2	2.9	3.8	2.2	-0.4	-1.8
03/11/98	-20.2	-18.3	-15.6	-7.4	-0.8	-1.8	-2.6	-1.9	-0.5	2	3	2.4	1.7	1.7	2.5	3.5	1.9	-0.7	-2.1
03/12/98	-21.8	-19.8	-16.8	-7.6	-1	-2.3	-3.2	-2.4	-0.7	2.3	3.3	2.4	1.4	1.2	2.1	3.2	1.6	-1	-2.5
20/01/99	-23.1	-21.7	-19.1	-9.4	-1.5	-2.7	-3.8	-2.9	-0.5	3.5	4.8	3	0.7	0.3	1.6	3.1	1.9	-0.8	-2.8
03/03/99	-25.4	-23.5	-20.9	-11.6	-2.4	-3	-4.5	-3.6	-0.9	3.8	6.1	3.8	0.2	-0.5	0.9	2.8	2.1	-0.5	-3
26/05/99	-27.7	-25.7	-23.4	-14.3	-4.1	-3.9	-6	-5.4	-2.1	4.1	7.8	4.9	-0.8	-1.9	-0.2	2.2	2	-0.7	-3.4
12/07/99	-28.8	-26.7	-24.6	-15.2	-4.5	-4.1	-6.3	-6.1	-3.1	3.5	8.1	5.8	-0.2	-1.8	-0.4	2	2.1	-0.5	-3.4
25/08/99	-29.5	-27.6	-25.4	-16.1	-4.9	-4.3	-7.3	-7.3	-4.4	2.4	7.7	6.3	0.2	-2	-1	1.4	1.8	-0.7	-3.7
24/09/99	-30.7	-28.6	-26.4	-16.7	-5.1	-4.4	-8.2	-8.1	-5.3	1.7	7.6	6.7	0.3	-2.2	-1.4	1.1	1.7	-0.7	-3.8
30/11/99	-31.7	-29.7	-27.7	-18.4	-6.3	-4.7	-8.6	-9.3	-6.6	0.8	7.7	7.8	0.9	-2.2	-1.9	0.5	1.5	-0.7	-3.8
10/02/00	-33.3	-32.2	-29.4	-20.4	-7.5	-5.1	-9.7	-10.9	-8.1	-0.1	8.8	10.5	1.9	-2.4	-2.4	0.2	1.7	-0.4	-3.7

**Tabla A12 - Resultados obtenidos con el inclinómetro**

Fechas/ Profund.	MOVIMIENTOS HORIZONTALES MEDIANTE INCLINOMETRÍA																			
	Movimiento Horizontal AB : Hacia las Instalaci (mm)																			
	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	13.5	14	14.5	15	15.5	16	16.5	17	17.5	18	18.5	19	19.5
08/07/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16/07/98	-0.2	0.4	-0.2	0.6	0.5	1	1.7	0.9	-0.6	0.1	0.5	0.4	0.5	0.2	0.2	0.7	0.1	0.3	1.1	-0.1
23/07/98	-0.4	0.4	-0.2	0.7	0.5	1.1	2	1.1	-0.8	-0.1	0.5	0.3	0.5	0	0.1	0.7	-0.1	0.2	1.3	-0.7
10/08/98	-0.5	0.5	-0.2	1.1	0.4	1.2	2.8	0.9	-0.7	-0.1	0.6	0.2	0.6	-0.2	0.2	0.9	-0.5	0.6	1.7	-2.6
08/09/98	-0.9	0.2	0.1	1.2	0.5	1.1	2.9	2	-3.2											
07/10/98	-1.1	0.1	0.2	1.5	0.7	1.2	3.2	2.6	-3.2											
03/11/98	-1.6	-0.2	0	1.4	0.3	0.7	3.1	2.3	-3.8											
03/12/98	-1.9	-0.3	-0.2	1.5	0.1	0.3	3.6	1.5	-4.4											
20/01/99	-2.3	-0.3	-0.2	1.5	0.1	-0.2	3.8	2.1	-5.4											
03/03/99	-2.8	-0.7	-0.2	1.4	0.1	-0.7	3.3	3	-6.1											
26/05/99	-3.4	-1	-0.8	1.3	-0.5	-1.9	3.5	3	-7.1											
12/07/99	-3.4	-0.9	-1	1.5	-0.6	-2.4	3.8	3.3	-7.3											
25/08/99	-3.7	-1.3	-1.5	1.2	-0.8	-3.1	3.5	3.3	-7.7											
24/09/99	-3.9	-1.5	-1.8	1.1	-1.1	-3.6	3.4	3.3	-8.1											
30/11/99	-4.1	-1.8	-2.3	1.1	-1.2	-4.4	3.3	3.3	-8.8											
10/02/00	-4.1	-2.0	-2.8	1.2	-1.1	-5.1	3.1	3.5	-9.1											



**Tabla A13 - Resultados obtenidos con el inclinómetro**

Fechas/ Profund.	MOVIMIENTOS HORIZONTALES MEDIANTE INCLINOMETRÍA																		
	Movimiento Horizontal CD: Hacia el Terraplén (mm)																		
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5
08/07/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16/07/98	-4.5	-4.6	-3	-0.2	1.1	0.7	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.3	0.4	0.6	0.3	-0.8
23/07/98	-3.9	-4.3	-3	-0.1	1.3	0.7	0.4	0.3	0.2	0.3	0.4	0.6	0.6	0.5	0.5	0.6	0.9	0.4	-1
10/08/98	-6.4	-6	-3.5	0.6	2	1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.6	0.8	0.8	0.8	0.7	1	1.3	0.4	-1.4
08/09/98	-5.1	-6	-4.6	-0.5	1.8	1.1	0.6	0.4	0.3	0.5	0.6	0.8	1	0.9	0.9	1.1	1.3	0.7	-1.3
07/10/98	-4.8	-5.8	-4.6	-0.8	1.7	1.2	0.7	0.6	0.6	0.7	0.9	1.1	1.1	1.1	1.1	1.4	1.6	1	-1.4
03/11/98	-4.7	-5.7	-4.6	-0.8	1.7	1.2	0.8	0.7	0.8	1	1.2	1.3	1.3	1.2	1.2	1.6	1.9	1.1	-1.4
03/12/98	-5.1	-5.9	-4.6	-0.4	1.8	1.2	0.9	0.8	1	1	1.4	1.4	1.4	1.2	1.2	1.9	2.2	1	-1.5
20/01/99	-5	-6	-4.9	-0.7	2	1.4	1	1	1.2	1.3	1.8	1.7	1.9	1.7	1.6	2.2	2.5	1.4	-1.2
03/03/99	-5.2	-6.3	-5.4	-1.3	2	1.6	1.1	1	1.3	1.9	2.1	2.1	2.1	1.8	1.7	2.5	2.8	1.9	-0.7
26/05/99	-5.9	-6.9	-6	-1.6	2.3	1.9	1.3	1.2	1.6	2.4	2.9	2.8	2.7	2.2	1.9	2.8	3.6	2.6	-0.1
12/07/99	-5.7	-6.7	-6.1	-1.6	2.5	2.4	1.5	1.3	1.7	2.6	3.4	3.7	3.4	2.6	2.1	3.2	4.1	3.3	0.5
25/08/99	-5.7	-6.9	-6.3	-1.7	2.7	2.6	1.6	1.1	1.4	2.4	3.6	4.2	3.7	2.8	2.2	3.3	4.3	3.5	0.8
24/09/99	-5.7	-6.8	-6.1	-1.6	2.8	2.8	1.6	1.2	1.5	2.5	3.7	4.5	4.1	3	2.4	3.5	4.6	3.8	1
30/11/99	-5.7	-6.8	-6.1	-1.6	2.8	2.8	1.6	1.2	1.5	2.5	3.7	4.5	4.1	3.0	2.4	3.5	4.6	3.8	1.0
10/02/00	-5.7	-6.8	-6.3	-2.0	3.1	3.1	1.8	1.4	1.8	3.3	4.5	5.2	4.7	3.4	2.7	4.1	5.7	5.0	2.0

**Tabla A 14 - Resultados obtenidos con el inclinómetro**

Fechas/ Profund.	MOVIMIENTOS HORIZONTALES MEDIANTE INCLINOMETRÍA Movimiento Horizontal CD: Hacia el Terraplén (mm)																			
	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	13.5	14	14.5	15	15.5	16	16.5	17	17.5	18	18.5	19	19.5
08/07/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16/07/98	-0.9	0.1	0.5	-0.4	-0.2	-0.1	0.1	0.2	-0.3	0	-0.1	0	0	-0.2	0.3	-0.4	-0.1	0	-0.3	0
23/07/98	-1.2	0.2	0.6	-0.6	-0.4	-0.1	0.1	0.2	-0.5	0	-0.2	-0.1	0.2	-0.3	0.3	-0.5	-0.1	0.1	-0.3	-0.4
10/08/98	-1.4	0.5	0.3	-0.9	-0.5	-0.1	0.5	0.3	-0.7	0	-0.3	-0.1	0.3	-0.3	0.3	-0.6	0.6	0.1	-0.7	-1.3
08/09/98	-1.9	-0.8	0.9	-1	-1	-0.2	0.8	0.5	0.5											
07/10/98	-2.2	0.2	1.2	-0.9	-1.5	-0.2	1.1	0.6	0.2											
03/11/98	-2.2	0.3	1.3	-1	-1.6	-0.1	1.3	0.8	0											
03/12/98	-2.1	0.5	1	-1.4	-1.7	0	1.7	0.7	-0.1											
20/01/99	-2.3	0.4	1.3	-1.3	-2.2	0	2.3	0.8	-0.6											
03/03/99	-2.3	0.1	1.9	-0.9	-2.7	-0.1	2.7	1.2	-1											
26/05/99	-2	0.3	2.2	-0.6	-3	0.1	3.4	1.1	-2											
12/07/99	-1.8	0.6	2.6	-0.3	-2.9	0.5	3.9	1.2	-1.8											
25/08/99	-1.7	0.5	2.7	-0.3	-3.2	0.3	4	1.1	-2.2											
24/09/99	-1.6	0.6	2.8	-0.2	-3.2	0.5	4.1	1.2	-2.3											
30/11/99	-1.6	0.6	2.8	-0.2	-3.2	0.5	4.1	1.2	-2.3											
10/02/00	-1.1	0.8	3.1	-0.1	-3.6	1.0	5.0	0.9	-2.4											

**Tabla A.15** - Medidas de temperaturas obtenidas a través de la Línea de Terminancia

Fechas	MEDIDAS DE TEMPERATURA (°C)																		
	Profundidad (m)																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	16	17	18	19	20
07/07/98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15/07/98	37.2	43	47.2	54.7	56.3	54.1	54.8	56.5	55.3	59	58.6	60.5	62.4	62.4	65.1	65.4	64.9	66	65.4
23/07/98	39.1	46.5	51.2	55.2	55.7	55.8	56.9	58.5	57.4	60.2	59.6	61.5	63	63.6	65.6	66.6	66.6	68.3	67.1
08/09/98	39.6	47.3	52.1	55	56.1	55.2	57.3	58.9	58	60.7	59.8	62	63.7	64	66.8	68.6	68.5	71.9	69.8
07/10/98	30.6	40.9	44.1	48.7	50.7	51	52.7	55	52.5	57.3	52	60.1	63.1	63.7	67.3	69	68.9	72.2	70
03/11/98	27.7	38.9	41.8	46.1	47.8	48.8	51.1	53.2	49.6	55.8	56.3	58.3	61.4	63.5	66.7	67.6	67.7	70.3	69.5
03/12/98	24.8	39.3	42.3	46.5	48.2	49.4	51.1	53.1	49.8	54	56.3	58.6	61.7	63	68.3	68.2	67.5	67.5	69
20/01/99	22.2	39.5	43	47.4	49.8	50.6	53.3	54.7	51.3	55	56.7	58.8	62.2	63.5	69	68.4	67.5	67.5	69
03/03/99	27.9	39.5	43	47.7	50	52.3	55	55.9	60	60	58	60.3	62.9	68.5	69	69.3	69.5	70	72