

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DETERMINACIÓN DE LA ALTURA CRÍTICA Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN MÁXIMO DE TALUDES DE BASURA (RELLENO SANITARIO LA BONANZA) CHARALLAVE, EDO. MIRANDA.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Ing. Miguel Castillejo

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar al Título
de Ingeniero de Minas
Por el Br. Contreras Carlos E.

Caracas, Mayo 2002

Contreras Carlos E.

**DETERMINACIÓN DE LA ALTURA CRÍTICA Y ÁNGULO DE
INCLINACIÓN MÁXIMO DE TALUDES DE BASURA
(RELLENO SANITARIO LA BONANZA)
CHARALLAVE, EDO. MIRANDA.**

**Tutor Académico: Prof. Ing. Miguel Castillejo. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad
de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2002, 168 p.**

Palabras Claves: Relleno Sanitario, Celda, Residuos Sólidos, Estabilidad de Taludes.

RESUMEN: La disminución de los costos operativos de la empresa COTECNICA LA BONANZA C.A. dependen principalmente de colocar la mayor cantidad (volumen) de basura compactada en una celda, para ello se requiere determinar la altura crítica y el ángulo de inclinación máximo de los taludes de basura.

Para la determinación de los parámetros geotécnicos necesarios para hacer el análisis de estabilidad de los taludes de basura, se construyó un talud de basura a escala real en el Relleno Sanitario La Bonanza, se estimó la sobrecarga para la cual el factor de seguridad era menor que uno (1), seguidamente se fue colocando la sobrecarga (tierra) extendiéndola en capas de 30 cm de espesor, compactándola con un rodillo liso vibratorio. A medida que se colocaba la sobrecarga, se hacían levantamientos topográficos los cuales se dividieron en tres (3) casos para posteriormente hacerle el “back-analysis” a cada uno ellos, y luego se aplicó el método gráfico propuesto por Howland y Landva, (1992) para estimar los parámetros geotécnicos más probables.

Se determinó que el ángulo de inclinación máximo para una altura crítica de 25 m es de 45°, éste se obtuvo para la condición más desfavorable.

Los taludes de basura del Relleno Sanitario La Bonanza están influenciados principalmente por la matriz reforzadora, constituida principalmente por plástico.

DEDICATORIA

- ✿ A DIOS, por permitirme vivir una experiencia tan maravillosa ser “Universitario”.
- ✿ A mis padres Gloria y Melecio, por creer en mí, y siempre apoyarme en todo.
- ✿ A mis hermanos Mele y Ronald, por tenerme paciencia todos estos años de estudios.
- ✿ A Rebeca que llegaste para quedarte en mi vida, por estar siempre allí apoyándome, diciéndome siempre “sí puedes”.
- ✿ A Luis Alberto mi gran amigo, gracias por tus sabios consejos.
- ✿ A Jorge Jiménez (el uruguayo) el pana luteísta y ucevísta, simplemente gracias.

AGRADECIMIENTOS

- ✎ A la universidad Central de Venezuela, a los profesores del Dpto. de Ingeniería de Minas de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, en especial a: Mónica Martíz, José Peña, Alba Castillo, Manuel García, Pietro De Marco y Eleazar Colina.
- ✎ Al Prof. Miguel Castillejo por su valiosa ayuda tanto académica como material.
- ✎ Al Prof. Gianfranco Perri, por su ayuda incondicional.
- ✎ A todo el personal de Cotecnica La Bonanza C.A, por la colaboración prestada durante la realización del proyecto.
- ✎ Al Ing. Severiano Gutiérrez (Cotecnica La Bonanza) por su colaboración en la realización del trabajo de campo.
- ✎ A los Ingenieros Pedro Marciano y Rebeca Sánchez por su valiosa ayuda.

ÍNDICE

RESUMEN.....	Pg ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
INTRODUCCIÓN.....	1
 CAPÍTULO I	
GENERALIDADES	
1. OBJETIVOS.....	2
1.1. General.....	2
1.2. Específicos.....	2
2. JUSTIFICACIÓN.....	2
3. ANTECEDENTES.....	3
4. LA EMPRESA.....	4
 CAPÍTULO II	
CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FÍSICO	
1. CLIMA Y VEGETACIÓN.....	9
2. RELIEVE.....	9
3. DRENAJE.....	10
4. HIDROGEOLOGÍA E HIDROLOGÍA	11
4.1. Generalidades.....	11
4.2. Características Hidrogeológicas e Hidrológicas.....	12
 CAPÍTULO III	
GEOLOGÍA	
1. GEOLOGÍA REGIONAL.....	16
1.1. Localidad Tipo.....	16
1.2. Descripción Litológica.....	16
1.3. Extensión Geográfica.....	20
1.4. Contactos.....	21
2. GEOLOGÍA LOCAL.....	21
2.1. Unidad de Esquisto Cuarzo Micáceo (Ecm).....	21
2.2. Unidad de Esquisto Grafitoso Calcáreo (Egc).....	22
 CAPÍTULO IV	
BASAMENTOS TEÓRICOS	
1. RELLENO SANITARIO.....	23
1.1. Vertido de Residuos Sólidos.....	23
1.1.1. Definición de términos.....	23

1.1.2. Exposición general de la planificación, diseño y explotación de rellenos sanitarios.....	25
1.1.3. Desarrollo de un relleno sanitario.....	26
1.1.4. Reacciones que se producen en los rellenos.....	30
1.1.5. Problemas ambientales en el vertido de residuos sólidos.....	32
1.2. Métodos de Vertido de Rellenos Sanitarios.....	33
1.2.1. Métodos de vertido.....	33
1.3. Composición y Características de los Gases.....	36
1.3.1. Constituyentes principales del gas.....	37
1.4. Formación y Control de Lixiviados.....	38
1.4.1. Recubrimientos.....	39
1.4.2. Parámetros de diseño para la impermeabilización de rellenos sanitarios.....	54
1.5. Características Estructurales y Asentamiento de Rellenos Sanitarios.....	63
1.5.1. Características estructurales.....	63
1.5.2. Asentamiento.....	63
2. COMPACTACIÓN.....	65
2.1. Compactación de Suelos.....	66
2.1.1. Definición.....	66
2.2. Compactación de Residuos Sólidos.....	69
2.2.1. Factores que determinan la compactación de residuos sólidos.....	69
3. ESTABILIDAD DE TALUDES DE RELLENOS SANITARIOS.....	73
3.1. Caracterización de los Residuos Sólidos.....	74
3.2. Propiedades Físicas de los Residuos Sólidos.....	76
3.2.1. Peso Unitario.....	76
3.2.2. Humedad.....	77
3.2.3. Composición porcentual.....	78
3.3. Propiedades Mecánicas de los Residuos Sólidos.....	79
3.3.1. Resistencia al corte.....	80
3.3.2. Asentamiento.....	87
3.4. Métodos para el Análisis de Estabilidad de Taludes.....	88
3.4.1. Método de equilibrio límite.....	92
4. EJECUCIÓN DEL PROGRAMA SLOPE/W.....	96
4.1. Cohesión y Fricción.....	104
4.2. Cargas Sísmicas.....	106
4.3. Presión de Poros.....	108
4.4. Líneas de Presión (sobrecarga).....	109

CAPÍTULO V

EL RELLENO SANITARIO LA BONANZA

1. EVALUACIÓN DEL RELLENO SANITARIO LA BONANZA.....	110
1.1. Generalidades.....	110
1.2. Descripción del Sitio de Ubicación.....	110
1.3. Funcionamiento y Proyectos de Desarrollo.....	114

1.3.1. Preparación de la celda.....	114
1.3.2. Colocación de los residuos sólidos.....	117
1.3.3. Proyectos de desarrollo.....	119
1.4. Influencia Sobre el Medio Ambiente.....	120
2. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS.....	123
2.1. Clasificación de los Residuos Sólidos.....	124
2.1.1. Residuos sólidos municipales (RSM).....	124
2.1.2. Residuos hospitalarios.....	124
2.1.3. Residuos peligrosos.....	125
2.2. Residuos Sólidos Municipales (RSM).....	125
2.2.1. Generación.....	125
2.2.2. Composición y características.....	125

CAPÍTULO VI

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. CONSTRUCCIÓN DEL TALUD DE BASURA.....	127
2. MODELO DEL TALUD DE BASURA A ENSAYAR.....	131
3. COLOCACIÓN DE LA SOBRECARGA.....	134

CAPÍTULO VII

RESULTADOS EXPERIMENTALES

1. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS.....	141
2. DISEÑO DE TALUDES DE BASURA.....	153
3. ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN BASURA.....	155
4. RESUMEN DE RESULTADOS.....	160
5. ANALISIS DE RESULTADOS.....	162

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. CONCLUSIONES.....	164
2. RECOMENDACIONES.....	165

BIBLIOGRAFÍA.....	166
--------------------------	------------

Anexo A: Plano Topográfico del Relleno Sanitario La Bonanza

Anexo B: Vista Aérea de una Falla Circular de un Talud de Basura en el Relleno Sanitario “Navaro” en Cali, Colombia

Anexo C: Vista de las Celdas 1, 2 y 3 del Relleno Sanitario La Bonanza

Anexo D: Ubicación del Talud de Basura Ensayado a Escala Real en el Relleno Sanitario La Bonanza

Anexo E: Factor de Seguridad para una Aceleración Horizontal de 0,10g, 0,15g, 0,20g y 0,25g

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

	Pg
Fig. 1. Plano de Situación del Relleno Sanitario La Bonanza	5
Fig. 2. Provincias Hidrogeológicas de Venezuela	11
Fig. 3. Perfil Longitudinal del Cauce de la Quebrada El Vegote	13
Fig. 4. Extensión Geográfica de la Formación Las Mercedes	20
Fig. 5. Sección Transversal de un Relleno Sanitario (Modificado de Tchobanoglous et al., 1993)	25
Fig. 6. Representación de las Operaciones en Rellenos Sanitarios (Modificado de Tchobanoglous et al., 1993)	26
Fig. 7. Desarrollo y Clausura de un Relleno Sanitario de Residuos Sólidos: a) excavación y colocación del recubrimiento, b) vertido de residuos sólidos y c) rellenos sanitario clausurado (Tchobanoglous et al., 1993)	27
Fig. 8. Método Celda/Zanja Excavada (Modificado de Tchobanoglous et al., 1993)	34
Fig. 9. Método de Zona (Modificado de Tchobanoglous et al., 1993)	35
Fig. 10. Método de Vaguada/Depresión (Modificado de Tchobanoglous et al., 1993)	36
Fig. 11. Configuración Típica del Recubrimiento del Fondo de un Relleno Sanitario	57
Fig. 12. Configuración Típica de la Cobertura Final de un Relleno Sanitario	62
Fig. 13. Asentamiento de Rellenos Sanitarios Compactados (Tchobanoglous et al., 1993)	65
Fig. 14. Curva de Compactación de Suelos	67
Fig. 15. Disminución de la Densidad con el Aumento del Espesor de la Capa de Basura (Manual de Rendimiento CATERPILLAR, 1998)	70

Fig. 16. Aumento de la Densidad con el Número de Pasadas (Manual de Rendimiento CATERPILLAR, 1998)	70
Fig. 17. Curva de Compactación de Residuos Sólidos (Manassero et al., 1996)	72
Fig. 18. Parámetros Geotécnicos de Residuos Sólidos (Basura) (Manassero et al., 1990)	82
Fig. 19. Método de Análisis de los Parámetros Geotécnicos (back-analysis) de Residuos Sólidos (Basura) (Howland y Landva, 1992)	83
Fig. 20. Aumento del Ángulo de Fricción (ϕ) con la Compactación y la Edad (Brandl, 1995)	85
Fig. 21. Aumento de la Cohesión (c) con la Edad (Kockel, 1995)	86
Fig. 22. Disminución de la Cohesión (c) para un Aumento del Contenido de Humedad (Garbr y Valero, 1995)	86
Fig. 23. Superficie de Falla Circular (Método de las Rebanadas)	93
Fig. 24. Sección de una Rebanada	94
Fig. 25. Ventana Principal	98
Fig. 26. Definición del Problema	102
Fig. 27. Solución del Problema	103
Fig. 28. Vista de la Solución del Problema	103
Fig. 29. Entrada de los Parámetros Básicos	105
Fig. 30. Variación del Factor de Seguridad con el Coeficiente Sísmico	107
Fig. 31. Definición de la Presión de Poros	108
Fig. 32. Magnitud y Dirección de la Presión (Sobrecarga)	109
Fig. 33. Vista de los Quemadores en la Terraza Norte	111
Fig. 34. Perfilado del Talud	115
Fig. 35. Colocación de la Geomembrana y Geotéxtil en el Talud	115

Fig. 36. Compactación de las Capas de Arcilla	115
Fig. 37. Colocación de la Geomembrana y Geotéxtil en el Fondo de la Celda	115
Fig. 38. Colocación de la Capa de Grava	116
Fig. 39. Colocación de Cauchos para la Protección de la Geomembrana	116
Fig. 40. Descarga de Residuos Sólidos Directamente en la Celda	118
Fig. 41. Reciclaje, Carga y Acarreo de Residuos Sólidos hacia la Celda	118
Fig. 42. Esparcimiento y Compactación de Residuos Sólidos	119
Fig. 43. Colocación de la Capa de Recubrimiento	119
Fig. 44. Topografía Original del Talud de Basura	128
Fig. 45. Perfilado del Talud de Basura con Sobrecarga Inicial	129
Fig. 46. Talud de Basura Perfilado con Sobrecarga Inicial	129
Fig. 47. Topografía Modificada del Talud de Basura con Sobrecarga Inicial (CASO I)	130
Fig. 48. Factor de Seguridad del Talud de Basura con Sobrecarga Inicial (CASO I)	132
Fig. 49. Factor de Seguridad del Talud de Basura con la Sobrecarga Adicional Estimada	133
Fig. 50. Descarga del Material de Préstamo	134
Fig. 51. Esparcimiento del Material de Préstamo	134
Fig. 52. Control del Espesor de la Capa de Tierra	135
Fig. 53. Compactación de la Sobrecarga Adicional	135
Fig. 54. Perfilado del Talud de Basura con Sobrecarga Adicional	136
Fig. 55. Talud de Basura con Sobrecarga Adicional	136

Fig. 56. Topografía del Talud de Basura con Sobrecarga Adicional (CASO II)	137
Fig. 57. Factor de Seguridad del Talud de Basura con Sobrecarga Adicional (CASO II)	138
Fig. 58. Topografía del Talud de Basura con Sobrecarga Adicional (CASO III)	139
Fig. 59. Factor de Seguridad del Talud de Basura con Sobrecarga Adicional (CASO III)	140
Fig. 60. Factor de Seguridad en Función de la Cohesión (CASO I)	143
Fig. 61. Factor de Seguridad en Función de la Cohesión (CASO II)	144
Fig. 62. Factor de Seguridad en Función de la Cohesión (CASO III)	145
Fig. 63. Resistencia al Corte en Función del Esfuerzo Normal (CASO I)	147
Fig. 64. Resistencia al Corte en Función del Esfuerzo Normal (CASO II)	148
Fig. 65. Resistencia al Corte en Función del Esfuerzo Normal (CASO III)	149
Fig. 66. Parámetros Geotécnicos en el Equilibrio Límite (Back-Analysis)	151
Fig. 67. Envolvente de Falla Obtenida (CASOS I, II y III)	152
Fig. 68. Parámetros Geotécnicos Recomendados para el Diseño de Taludes de Basura (Van Impe y Bouazza, 1996)	152
Fig. 69. Sección Transversal del Diseño del Talud de Basura	154
Fig. 70. Factor de Seguridad en el Equilibrio Límite	156
Fig. 71. Sección Transversal del Talud de Basura	157
Fig. 72. Factor de Seguridad con los Parámetros Geotécnicos Utilizados en el Ensayo a Escala Real	158
Fig. 73. Factor de Seguridad para la Aceleración Máxima (0,30g)	159
Fig. 74. Factor de Seguridad en Función del Coeficiente Sísmico Horizontal	161

Fig. 75. Alto Contenido de Plástico en el Talud de Basura Ensayado a Escala Real	162
Fig. 76. Efecto Reforzador del Plástico en el Talud de Basura Ensayado a Escala Real	162
Tabla 1. Constituyentes Típicos Encontrados en el Gas	37
Tabla 2. Color de Geomallas	46
Tabla 3. Composición de los Residuos Sólidos	78
Tabla 4. Parámetros Geotécnicos de Residuos Sólidos (Basura)	84
Tabla 5. Composición de los RSM en el Área Metropolitana de Caracas	126
Tabla 6. Factor de Seguridad en Función de los Parámetros Geotécnicos (CASOS I, II y III)	142
Tabla 7. Factor de Seguridad en Función de los Parámetros Geotécnicos (CASOS I, II y III)	142
Tabla 8. Parámetros Geotécnicos en el Equilibrio Límite (CASOS I, II y III)	146
Tabla 9. Esfuerzo Normal Promedio para cada Envolvente de Falla (CASOS I, II y III)	150
Tabla 10. Resistencia al Corte y Esfuerzo Normal (CASOS I, II y III)	150
Tabla 11. Ángulo de Inclinación Máximo (α) y Factor de Seguridad (F^*) de Cada Nivel	160
Tabla 12. Ángulo de Inclinación Máximo (α) y Factor de Seguridad (F^{**}) de Cada Nivel	160
Tabla 13. Factor de Seguridad para cada Coeficiente Sísmico Horizontal	161

INTRODUCCIÓN

El desarrollo y operación de un relleno sanitario tiene gran similitud con las operaciones que se desarrollan en el área minera, mientras en una mina se realizan labores de excavación con el fin de extraer el mineral, en un relleno sanitario se hacen excavaciones para construir celdas que van a albergar capas de residuos sólidos, intercalados con capas de tierra hasta el llenado total y cierre de la celda, similares a las escombreras de una mina.

En la explotación del Relleno Sanitario La Bonanza uno de los factores que condicionan la vida útil del mismo es el volumen disponible donde colocar la basura de una sola vez, para así, reducir los costos operativos y, en consecuencia, aumentar la rentabilidad de la empresa COTECNICA LA BONANZA C.A.

El objetivo del presente trabajo es determinar la altura crítica y ángulo de inclinación máximo de taludes de basura en el Relleno Sanitario La Bonanza, para obtener el mayor volumen de basura compactada y que sea estable desde el punto de vista geotécnico.

El trabajo está estructurado por los basamentos teóricos, tales como: relleno sanitario, compactación, estabilidad de taludes de rellenos sanitarios y la ejecución del programa utilizado para hacer los análisis de estabilidad de taludes. Además, se hace una evaluación del relleno sanitario y una caracterización de los residuos sólidos y, por último, se describe el procedimiento experimental, se analizan los resultados y se presentan las respectivas conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1. OBJETIVOS

1.1. General

- 1.1.1. Determinar la altura crítica y el ángulo de inclinación máximo de taludes de basura del Relleno Sanitario La Bonanza.

1.2. Específicos

- 1.2.1. Elaborar el talud y colocar sobrecarga.
- 1.2.2. Determinar los parámetros geotécnicos, haciendo el análisis en retroceso (back – analysis).
- 1.2.3. Comparar los parámetros geotécnicos con los reportados en la literatura.

2. JUSTIFICACIÓN

La determinación de la altura crítica y el ángulo de inclinación máximo de un talud de basura es un tema novedoso en el país, ya que las anteriores investigaciones sólo han tratado con suelos y rocas, donde hay metodologías para hallar los parámetros geotécnicos (cohesión y ángulo de fricción interno) necesarios para el diseño y análisis de estabilidad de taludes.

Con la determinación de la altura crítica y el ángulo de inclinación máximo se definirá la configuración geométrica del talud de basura, la cual resultará estable desde el punto de vista geotécnico, y así se obtendrá el máximo volumen de basura compactada para cada talud, y en consecuencia una reducción de los costos operativos de la empresa COTECNICA LA BONANZA C.A.

3. ANTECEDENTES

- PACHECO y GÓMEZ (2001), realizaron un análisis de estabilidad de taludes, tanto de suelo como de roca, para la posterior construcción de una celda específica final para residuos tóxicos en el Relleno Sanitario La Bonanza.

- RAMÍREZ y D'ESCRIVAN (2000), realizaron un levantamiento geológico en la zona de las instalaciones del Relleno Sanitario La Bonanza y sus inmediaciones, dividiendo el área en dos unidades litológicas, y analizaron la influencia de dicha geología en la permeabilidad de suelos y rocas con los lixiviados del Relleno Sanitario.

- MORALES (1993), hace un análisis de los factores que influyen en la selección del sitio de ubicación de un relleno sanitario, así como también, analiza los aspectos geológicos, hidrogeológicos y de interacción de lixiviado-roca para finalmente aplicar lo anteriormente descrito en la ubicación del Relleno Sanitario La Bonanza, fundamentalmente desde el punto de vista geológico.

- BRICEÑO (1992), efectuó una caracterización físico-química del lixiviado del Relleno Sanitario La Bonanza, y determinó su efecto en algunas propiedades químicas del suelo.

- RODRÍGUEZ (1990), realizó un estudio y comparó proyectos del sistema de canalización de las aguas superficiales y del lixiviado en el Relleno Sanitario La Bonanza.
- CONDE (1985), realizó un estudio sobre la contaminación de las aguas subterráneas en el Relleno Sanitario La Bonanza y describe, desde el punto de vista hidrogeológico, dos unidades litológicas.
- GENATIOS (1971), estudió los problemas de residuos sólidos en el área Metropolitana de Caracas y los pasos a seguir para una posible solución de Rellenos Sanitarios.

4. LA EMPRESA

El Relleno Sanitario La Bonanza esta situado a 27 Km. desde el peaje de Tazón, en la Carretera Nacional que conduce a los Valles del Tuy (ver Fig. 1), fue fundado en el año de 1975, pero es a partir del año 1980 cuando la dirección es asumida por el Instituto Metropolitano de Aseo Urbano (IMAU), Instituto Autónomo adscrito al Ministerio de Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR).



Fig. 1. Plano de Situación del Relleno Sanitario la Bonanza

Al crearse La Ley de Supresión del IMAU, el Relleno Sanitario La Bonanza pasó a depender de MANCOSER METROPOLITANA, mancomunidad creada el 28 de Enero de 1994, con el fin de prestar el servicio de disposición final de los residuos sólidos del área Metropolitana de Caracas y su zona de influencia.

En el año 1996 realizaban los trabajos de compactación y cobertura de los residuos sólidos, la Compañía Constructora GAL y MANCOSER (Mancomunidad de las Alcaldías del Área Metropolitana de Caracas), encargada de administrar la operaciones del relleno sanitario. En esa época el volumen de basura diario proveniente de la capital era de 4500 toneladas, lo cual arrojaba un promedio de aproximadamente 500 a 800 gramos de basura por persona.

Para el año 1997 se expandieron en tres empresas que laboraban en el relleno y que dependían de MANCOSER. Una de las empresas realizaban trabajos de acarreo,

compactación y cobertura de los residuos sólidos, otra empresa hacia el mantenimiento de los respiraderos o fumarolas, constituidos por tubos plásticos recubiertos con grava, para el desalojo del gas metano y evitar la acumulación de este en cada terraza y, por último, la empresa dedicada al mantenimiento de todas las áreas del relleno, la cual no fue utilizada por la administración, lo cual trajo como consecuencia tanquillas obstruidas por residuos y lodo producto de las lluvias.

Algunas áreas requirieron ser despejadas por medio de maquinaria pesada, pero la administración no las tenía a su disposición, motivo por el cual, las precipitaciones esparcieron los desperdicios por todas las terrazas.

A mediados de 1997 se genera una crisis, más de doscientas mil toneladas de basura, que no habían sido compactadas y se encontraban esparcidas por todas las terrazas, generándose un problema sanitario.

A finales de ese mismo año, se produce un incendio en el relleno sanitario, el cual se logro extinguir cubriéndose con tierra el volumen de basura incendiado.

A comienzos del año 1998 se procede a realizar una licitación, a la cual concurren cinco empresas, venezolanas y extranjeras, estas presentaron sus propuestas para obtener una concesión por veinte años para operar el área de La Bonanza.

Entre las empresas que participaron, se encuentran: Fospuca – Consorcio FDS (Venezuela – España), Caabsa Eagle (México), Consorcio Sabempe - Lirca

(Venezuela), Cotecnica - CGEA (Venezuela – Francia) y Rust Enviroment and Infrastructure (USA).

La empresa venezolana “Cotecnica” asociada a la francesa “CGEA” (Compagnie Générale d’Entreprises Automobiles), obtuvo la concesión para operar por veinte años la disposición final de los residuos sólidos en el Relleno Sanitario La Bonanza.

La empresa francesa CGEA tiene experiencia internacional y maneja unos 132 rellenos de basura a nivel mundial.

La CGEA se fundó en Francia en 1912, a partir de la empresa GRANDJOUAN, que funcionaba en la ciudad de Nantes desde 1867. Las actividades de GRANDJOUAN en residuos sólidos comprendían recolección, transporte y disposición final, incluyendo sistemas de compostificación. Estas experiencias traspasadas a CGEA permitieron al grupo expandir sus actividades en Francia, logrando alcanzar en 1921 los servicios de la ciudad de Paris.

A partir de 1922 las actividades se expandieron a los alrededores de Paris. En 1931 se incorpora a los servicios la transferencia vía ferrocarril y aparecen las primeras barredoras mecánicas del mercado. La empresa USA, incorporada al grupo de CGEA, opera desde 1931 una planta de incineración.

La recolección selectiva para sistemas de reciclaje comienza a ser operada por CGEA en 1934. A partir del término de la II Guerra Mundial, CGEA expande sus operaciones en Francia y comienza su proyección internacional, logrando

constituirse para esa fecha, como la mayor empresa europea en manejo de residuos sólidos.

En 1980 la Compagnie Generale des Eaux, adquiere CGEA, integrándose así a la mayor empresa mundial en manejo de aguas que, además, es la principal empresa privada de transporte y construcción de Europa, presente en el campo inmobiliario, telecomunicaciones y multimedia.

En el año 1999, bajo la nueva administración de Cotecnica – CGEA, se aplicaron técnicas en el tratamiento de lagunas de lixiviado, lo que trajo como consecuencia la disminución en forma considerable del olor a basura que era percibido en las inmediaciones del relleno y la disminución de zamuros en la zona, lo que significaba un peligro para los usuarios del Aeropuerto Caracas.

Actualmente el relleno tiene un buen funcionamiento, las empresas Cotecnica, Sabempe y Fospuca son las encargadas de la recolección de la basura en el área metropolitana, las cuales han implementado en los diferentes municipios a través de instituciones educativas campañas de recolección para el reciclaje de envases de aluminio, cajas de cartón, vidrio, hierro en forma de chatarras, papel, plástico y textiles.

CAPÍTULO II

CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FÍSICO

1. CLIMA Y VEGETACIÓN

El área de La Bonanza corresponde a una zona templada subtropical, caracterizada por vegetación tipo bosque húmedo montano bajo a pre-montano, abundante y bien desarrollada.

La provincia de humedad corresponde a subhúmeda – semiárido (Holdridge, 1999). La combinación de la cantidad de lluvia en la zona, combinadas con la elevación de las montañas son las responsables del clima presente en la zona y como resultado de estas condiciones, la meteorización es intensa y la vegetación es densa.

2. RELIEVE

Desde el punto de vista geomorfológico la zona corresponde a un valle de origen tectónico de rumbo general este-oeste y cuyo eje coincide aproximadamente con el eje actual de la quebrada denominada El Vegote, ubicada en el Relleno Sanitario La Bonanza.

La topografía de frente de montaña, al norte corresponde a montañas con filas asimétricas y cuevas abruptas y al sur montañas más bajas y redondeadas, las cuales presentan rumbo este-oeste aproximadamente y es característico en la zona un alto grado de meteorización y metamorfismo.

3. DRENAJE

El patrón de drenaje general es de tipo dendrítico, denso y condicionado por los espacios entre los planos de foliación, encajado a través de las diaclasas y microfallas de carácter local asociadas al control tectónico presente en la zona.

El cauce principal “El Vegote” que drena el valle es de tipo intermitente y nace aguas arriba al norte del Relleno Sanitario y su recorrido es hacia el sur, dirección aguas abajo para unirse a la quebrada Charallave la cual es afluente del Río Tuy.

Cabe destacar, que dicha quebrada en la actualidad y en la parte donde atraviesa las instalaciones del Relleno Sanitario fue interrumpida para la construcción de las celdas para la deposición de los residuos sólidos pero su afluencia se maneja a través de tuberías subterráneas denominadas subdrenes.

La combinación del clima y la fisiográfica de la zona origina esta red hidrográfica densa y cuyos cursos de agua generalmente son de poca trayectoria y caudal pero, en temporadas lluviosas, tiende a acumularse en el Relleno Sanitario originando lagunas.

Smith, (1952), señala que a nivel regional el sistema de drenaje está caracterizado por dos tipos distintos de planos de corriente. El más viejo de ellos fue desarrollado sobre la primera superficie de erosión y está caracterizado por un sistema de meandros semejante al que ahora existe en el valle del Río Tuy. Después del levantamiento el

curso fue superimpuesto sobre la roca subyacente en muchos casos, como meandros cortados. El otro aspecto importante asociado con el drenaje es un marcado carácter lineal en algunas partes.

4. HIDROGEOLOGÍA E HIDROLOGÍA

4.1. Generalidades

En este aparte, se describen las características hidrogeológicas e hidrológicas del Relleno Sanitario La Bonanza, realizada por Ramírez y D'Escrivan, (2000).

Las regiones de características geomorfológicas comunes, donde los acuíferos se han formado por iguales procesos geológicos, se llaman provincias hidrogeológicas. De Sola, (1967) delimita las provincias hidrogeológicas según el mapa siguiente:

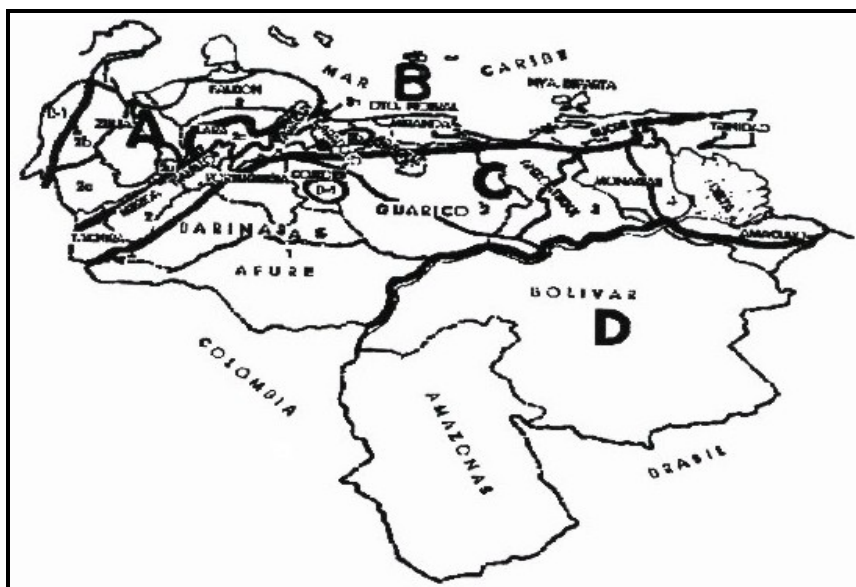


Fig. 2. Provincias Hidrogeológicas de Venezuela

Correspondiendo el Relleno Sanitario La Bonanza a las provincias de la Cordillera de la Costa, caracterizadas por acumulaciones de agua en grietas con bajos rendimientos y agua generalmente de buena calidad y acuíferos libres ricos, de pequeña extensión, en los valles longitudinales rellenos con sedimentos modernos.

4.2. Características Hidrogeológicas e Hidrológicas

El Relleno Sanitario La Bonanza está comprendido dentro del macizo de la Cordillera de la Costa, constituida por rocas metamórficas, donde las características litológicas, grado de metamorfismo y donde afloran unidades pertenecientes a la Formación Las Mercedes que, por su origen, procesos orogénicos, plegamientos y fracturamiento, típicos de las rocas metamórficas, presentan una permeabilidad muy baja. Los acuíferos posibles en esta zona son pobres, y la sedimentación aluvional muy escasa.

De perfiles geotécnicos suministrados por Cotecnica La Bonanza (ver Fig. 3), y en concordancia con estudios efectuados por Conde, (1985), se pueden considerar a los fines hidrológicos dos unidades litológicas.

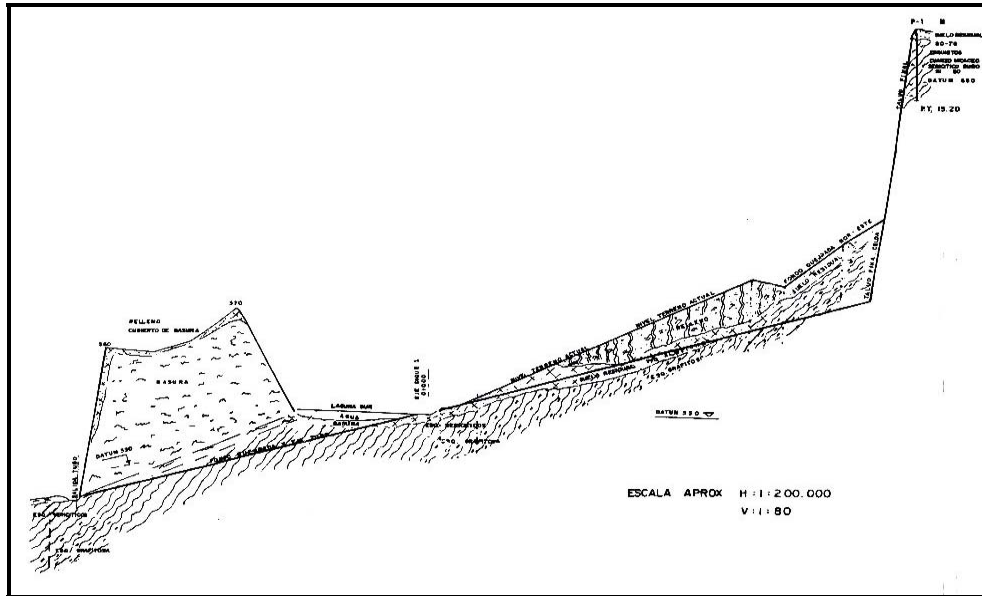


Fig. 3. Perfil Longitudinal del Cauce de la Quebrada El Vegote

La primera unidad está constituida por arenas limosas-arcillosas, arcillas y limos poco arenosos con fragmentos alargados de esquistos que en la zona de La Bonanza alcanza espesores pobres no mayores a 1 m, aunque a medida que el valle de la quebrada El Vegote se abre fuera de la zona del relleno y la pendiente es menor, aumenta el espesor de los aluviones, sin embargo, debido a la constitución de los mismos y lo irregular de su porosidad, la

permeabilidad es baja e intergranular. El agua en estos acuíferos viaja a través de los poros existentes entre los granos del suelo, hasta alcanzar un estrato impermeable donde se deposita, creando una mesa de agua.

La segunda unidad esta constituida por rocas metamórficas descompuestas a muy meteorizadas superficialmente, duras y resistentes a mayores profundidades, conformadas por las unidades típicas representativas de los afloramientos en el área de La Bonanza, de esquistos cuarzo micaceo y esquistos grafitoso calcáreo de espesores no determinados.

Sin embargo, por las características de los esquistos grafitoso calcáreo, con abundantes vetas de cuarzo, calcita, y su asociación con calizas, se pueden presentar permeabilidades, debidas al fracturamiento y disolución, y actúan como pequeños manantiales, las cuales se aprecian en la Autopista Regional del Centro en el tramo Hoyo de la Puerta-Cortada de Maturín, y en la zona de los taludes cortados por las celdas de los residuos sólidos en el Relleno Sanitario, han aflorado dichos manantiales, por lo que se tomaron las precauciones para drenarlos fuera de la zona de las celdas.

En las rocas el agua viaja a través de las grietas y zonas de disolución hasta llegar a una zona impermeable donde se obtienen y depositan, pudiendo seguir caminos subterráneos.

El ciclo hidrológico de lluvias, infiltraciones, evaporaciones, captación de las plantas, efectos climáticos y escorrentía, es lo que permite la recuperación o recarga de los acuíferos, cuya velocidad de recarga dependerá de la permeabilidad, y ésta, de las características de suelos y rocas.

Los niveles piezométricos en pozos de observación aguas abajo de la zona del Relleno Sanitario, siguen el curso de la quebrada El Vegote indicando que el pequeño flujo subterráneo, coincide con el eje del valle y curso de la quebrada, por lo cual el gradiente hidráulico se adapta a la condición de la pendiente topográfica.

La recarga del acuífero aluvional ocurre a lo largo del valle, fuera del Relleno Sanitario y en la zona de inundación de la quebrada, y descarga muy lejos de éste.

CAPÍTULO III

GEOLOGÍA

1. GEOLOGÍA REGIONAL

La zona en donde está ubicado el Relleno Sanitario La Bonanza pertenece a la Formación Las Mercedes, de Edad Mesozoico (Jurásico – Cretácico). En el siguiente aparte se hará una breve descripción de los tópicos más importantes de dicha formación.

1.1. Localidad Tipo

La Formación Las Mercedes ubicada en la antigua hacienda las Mercedes al este de Caracas, hoy Urb. Las Mercedes. Debido al crecimiento del urbanismo con la consecuente desaparición de los afloramientos de la localidad tipo, Wehrmann, (1972) propone trasladar la sección de referencia a la carretera Petare - Santa Lucía, donde se expone la sección completa de la formación hasta su transición con la Formación Chuspita. Igualmente hay una sección bien expuesta en la autopista Caracas - Valencia, en el tramo Hoyo de la Puerta - Charallave.

1.2. Descripción Litológica

Aguerrevere y Zuloaga, (1937), la definen como esquistos, principalmente calcáreos, con zonas grafitosas y localmente zonas micáceas de un tinte rosado-gris con zonas blancas. Según Wehrmann, (1972) y la revisión de

González de Juana et al., (1980) la litología predominante consiste en esquisto cuarzo - muscovítico - calcítico - grafitoso con intercalaciones de mármol grafitoso en forma de lentes que, cuando alcanza gruesos espesores, se denomina "Caliza de Los Colorados". Las rocas presentan buena foliación y grano de fino a medio y el color característico es el gris pardusco.

La mineralogía promedio consiste en cuarzo (40%) en cristales dispuestos en bandas con la mica muscovita (20%) en bandas lepidoblásticas a veces con clivaje crenulado, calcita (23%) en cristales con maclas polisintéticas, grafito (5%), y cantidades menores de clorita, óxidos de hierro, epidoto y ocasionalmente plagioclasa sódica.

El mármol intercalado con esquisto se presenta en capas delgadas usualmente centimétricas a decimétricas y son de color gris azulado, cuya mineralogía es casi en su totalidad calcita, escasa dolomita y cantidades accesorias de cuarzo, muscovita, grafito, pirita y óxidos de hierro. Oxburgh, (1965), incluye el conglomerado de Charallave en la parte superior de Las Mercedes y discrimina una facies oriental de esquistos grafiticos, en su mayoría no calcáreos, granatíferos, con capas cuarcíticas de 20-70 cm de espesor y esquistos micáceos granatíferos, donde las capas cuarzosas están ausentes.

Además, una facies occidental más arenosa, menos grafitica y carente de capas calcáreas con abundante granate y filitas grafiticas de color variable, predominantemente negro en la parte superior de la sección.

Wehrmann, (1972), menciona la existencia de metaconglomerados en su base, esquistos cloríticos y una sección en el tope de filitas negras poco metamorfizadas con nódulos de mármol negro de grano muy fino, similares a los de las formaciones La Luna y Querecual, sin hallar fósiles en ellos. Este mismo autor indica que el tope de la formación se hace más cuarzosa y menos calcárea en su transición hacia la Formación Chuspita. Seiders, (1965), menciona, además, meta-areniscas puras, feldespáticas y cuarzosas, de estratificación de grano variable, a veces gradada.

Aguerrevere y Zuloaga, (1937), incluyen dentro de la formación una zona constituida por calizas oscuras y densas, en capas delgadas interestratificadas con capas de esquistos micáceos y arcillosos, todo intensamente plegado, que denominan la Fase Los Colorados que constituyen excelentes estratos guía. Dengo, (1949), Seiders, (1965), y Wehrmann, (1972), no coinciden con esta formación ya que, según ellos, tales calizas se encuentran en diferentes niveles en la sección.

Urbani et al., (1989), cartografían dos subunidades en la zona de Valencia - Mariara, Estado Carabobo. La primera subunidad esta compuesta principalmente de esquistos calcíticos - grafitosos y mármol, con una asociación mineralógica de cuarzo, calcita, muscovita, albita, grafito, clorita y epidoto. Una segunda subunidad compuesta de cuerpos de mármol masivo, contentivo de calcita, cuarzo, muscovita, grafito y albita. En la zona de La Sabana - Chirimena - Capaya, Distrito Capital y Estado Miranda, Urbani et al., (1989)

reconocen cuatro unidades cartografiables, la primera y mayoritaria de esquistos grafitoso y mármol de metaconglomerado de cuarzo - feldespático - calcáreo y metaarenisca de esquistos albitico - grafitoso. Todas estas rocas corresponden a un metamorfismo de bajo grado en la facies de los esquistos verdes, zona de la clorita.

Característico de la formación, es la presencia de pirita que, al meteorizarse, infunde una coloración rosada a rojo ladrillo a la roca. Smith, (1952), opina que la coloración rosada proviene de la meteorización de la sericita. Otra característica es la extraordinaria proporción de vetas de calcita recrystalizada en colores blanco, pardo y marrón que ha sido identificada erróneamente como ankerita o siderita. En sondeos profundos con muestras no meteorizadas esta coloración marrón de la calcita está ausente.

Muy poco se ha escrito sobre el ambiente en el cual se depositó la Formación las Mercedes. Oxburgh, (1965) sugiere dos fuentes principales de sedimento: una meridional, suplidora de cuarzo puro y una occidental (Complejo de El Tinaco), para el material cuarzo-feldespático más joven. Esta Formación presenta un esquema transgresivo hacia el sur sobre una plataforma somera, en la cual se depositaron lutitas negras, con una facies oriental más arenosa.

Talukdar y Loureiro, (1982), sugieren un ambiente euxínico en una cuenca externa a un arco volcánico. La estructura finamente laminada de las calizas

indica la sedimentación en un ambiente pelágico, mientras que los escasos restos de fósiles hallados indican lo contrario.

Urbani et al., (1997) estudian mineralógicamente los mármoles de esta Formación en la zona de Birongo, Estado Miranda, encontrando que la dolomita se encuentra en baja concentración predominando los mármoles calcíticos.

1.3. Extensión Geográfica

La Formación Las Mercedes aflora en toda la extensión y en los flancos del macizo central de la Cordillera de la Costa, entre Carenero, Estado Miranda, hasta el Estado Cojedes (ver Fig. 4).



Fig. 4. Extensión Geográfica de la Formación Las Mercedes

1.4. Contactos

La mayoría de los autores hasta los años 70 han considerado el contacto entre las formaciones Las Mercedes y Las Brisas como concordantes y de tipo sedimentario. Mientras que autores más recientes González de Juana et al., (1980) consideran que es de tipo tectónico conservando paralelismo en la foliación en ambas unidades. En la zona de la Colonia Tovar, Ostos, (1990) señala que el contacto entre el Augengneis de Peña de Mora y el Gneis de la Colonia Tovar, con la Formación Las Mercedes puede ser interpretado tanto como una falla normal de bajo ángulo, como un contacto sedimentario original, mientras que el contacto con la Formación Las Brisas lo interpreta como de corrimiento.

2. GEOLOGÍA LOCAL

El segmento de la Cordillera de la Costa, comprendida en la zona de las instalaciones del Relleno Sanitario La Bonanza y sus inmediaciones Ramírez y D'Escrivan, (2000) dividieron el área en dos unidades litológicas informales basadas en tipos litológicos predominantes, características texturales y situación geográfica.

2.1. Unidad de Esquisto Cuarzo Micáceo (Ecm)

La Unidad de Esquisto Cuarzo Micáceo está caracterizada por un buen desarrollo de la foliación, la presencia de numerosas vetas de cuarzo, microplegamiento local muy meteorizada, presencia abundante de oxidación

con patrones de buzamiento de la foliación muy variables e intercalaciones de lentes de mármoles de mayor competencia. Los minerales más abundantes que permiten definir la unidad son el cuarzo y las micas sericitica, muscovita y biotita haciéndose más cuarzosa hacia el tope.

2.2. Unidad de Esquisto Grafitoso Calcáreo (Egc)

La Unidad de Esquisto Grafitoso Calcáreo se caracteriza por presentar, al igual que la unidad anterior, buen desarrollo de la foliación, microplegamiento local, presencia de numerosas vetas de cuarzo y calcita, microfallamiento local, variaciones de los patrones de buzamiento de la foliación, intercalaciones de lentes de mármoles de mayor competencia, presencia abundante de oxidación. Los minerales más abundantes presentes y que permiten definir la unidad son el grafito y la calcita, siendo hacia el tope más calcáreo y hacia la base más grafitoso.

La foliación de esquistos de la zona presentan dirección preferencial N40°W con buzamiento preferencial de 30°S. Las diaclasas en promedio de 1:30 cm a verticales, predominantemente a sub-verticales.

CAPÍTULO IV

BASAMENTOS TEÓRICOS

1. RELLENO SANITARIO

1.1. Vertido de Residuos Sólidos

Históricamente los rellenos sanitarios han sido el método más económico y ambientalmente más aceptable para la evacuación de residuos sólidos en todo el mundo. La gestión de rellenos sanitarios implica la planificación, diseño, explotación, clausura y control postclausura de rellenos sanitarios.

En la siguiente sección se tratarán los procesos de vertido y se hará un repaso de las principales reacciones que se producen en los rellenos sanitarios.

1.1.1. Definición de términos

❑ Relleno Sanitario

Es una técnica para la disposición de residuos sólidos en el suelo sin causar perjuicio al medio ambiente y sin causar molestias o peligro para la salud y seguridad pública. Este método, utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en un área lo menor posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable, para cubrir los residuos depositados con una capa de tierra con la frecuencia necesaria, por lo menos al final de cada jornada. El diseño tiene como objetivo principal reducir al máximo la generación del

lixiviado, así como prevenir su ingreso sin tratamiento al ambiente, junto con el control y utilización de los gases producidos.

❑ **Vertido**

Es el proceso mediante el cual se depositan los residuos sólidos en un relleno sanitario. El vertido incluye la supervisión del flujo de residuos entrantes, la colocación y compactación de los residuos, y la construcción de instalaciones para el control y la supervisión ambiental.

❑ **Celda**

Se utiliza para describir el volumen de material depositado en un relleno sanitario durante un periodo, normalmente un día (ver Fig. 5). Incluye los residuos sólidos depositados y recubrimiento. Los objetivos del recubrimiento es evitar el vuelo de materiales residuales, y controlar durante la operación la entrada de agua al relleno.

❑ **Nivel**

Es una capa completa de celdas sobre una zona activa del relleno (ver Fig. 5). Normalmente, los rellenos sanitarios se conforman en una serie de niveles.

❑ **Berma**

Se utiliza para mantener la estabilidad del talud del relleno cuando la altura de éste excede de 1,25 a 2 m. Además, se requiere para la

ubicación de canales para el drenaje del agua superficial y, por último, la ubicación de tuberías destinadas a la recuperación del gas.

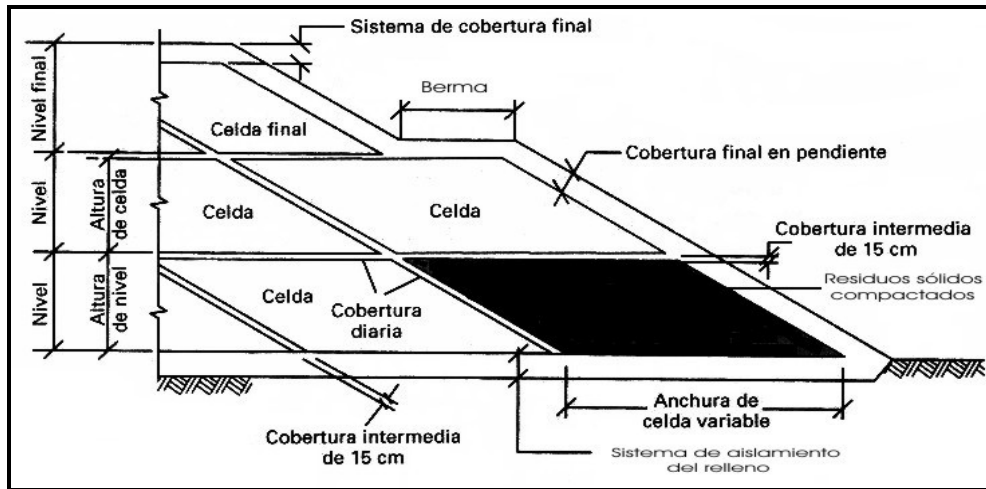


Fig. 5. Sección Transversal de un Relleno Sanitario
(Modificado de Tchobanoglous et al., 1993)

1.1.2. Exposición general de la planificación, diseño y explotación de rellenos sanitarios.

En la Figura 6 se identifican los elementos principales que se deben considerar en la planificación, diseño y explotación de rellenos sanitarios, éstos incluyen: 1) el diseño de rellenos sanitarios; 2) explotación y gestión de rellenos sanitarios; 3) reacciones que se producen en los rellenos sanitarios; 4) gestión de gases; 5) gestión del lixiviado; 6) control ambiental y 7) clausura del relleno y mantenimiento postclausura.

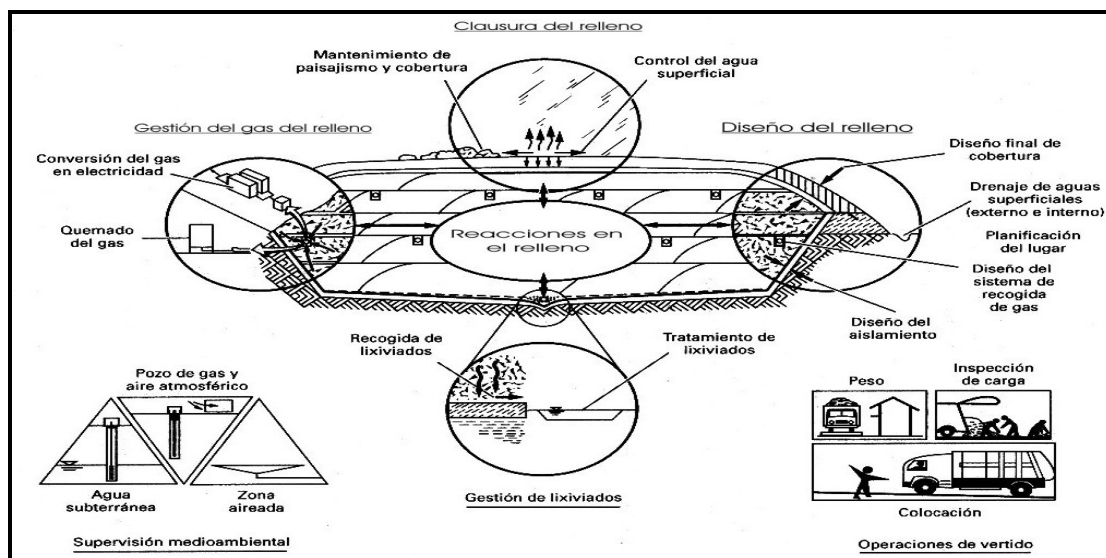


Fig. 6. Representación de las Operaciones en Rellenos Sanitarios
(Modificado de Tchobanoglous et al., 1993)

1.1.3. Desarrollo de un relleno sanitario

La siguiente descripción del desarrollo de un relleno sanitario moderno es genérica. Los detalles específicos de explotación variarán según el tipo de material que se vierte y según la configuración del relleno sanitario. En la Figura 7 se ilustra el desarrollo de un relleno sanitario moderno.

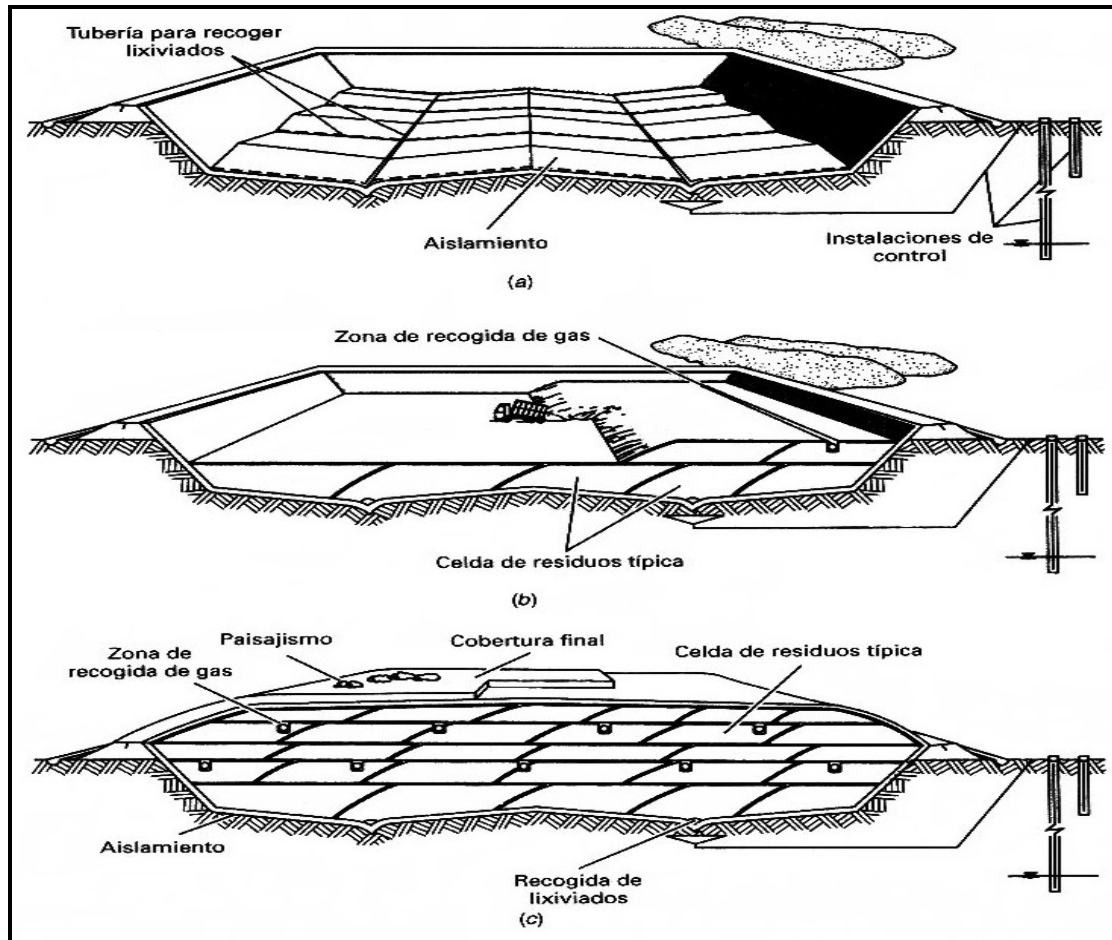


Fig. 7. Desarrollo y Clausura de un Relleno Sanitario de Residuos Sólidos: a) excavación y colocación del recubrimiento, b) vertido de residuos sólidos y c) relleno sanitario clausurado (Tchobanoglous et al., 1993)

❑ Preparación de la zona de vertido.

El primer paso implica la preparación de la zona para la construcción del relleno. Se debe modificar el drenaje existente para canalizar la esorrentía fuera de la zona elegida para el relleno sanitario. El drenaje natural debe modificarse para canalizar el agua fuera de la zona inicial de relleno. Otras tareas de preparación incluyen la

construcción de carreteras de acceso y de instalaciones de pesaje, además de la instalación de vallas.

El siguiente paso es la excavación y preparación del fondo del relleno sanitario y de las superficies laterales. Además, las excavaciones se llevan a cabo gradualmente no preparando todo el fondo del relleno sanitario de una sola vez. Se puede almacenar el material excavado sobre el suelo no excavado cerca de la zona activa, minimizándose así el problema de la precipitación que pueda acumularse en la excavación.

La zona de trabajo inicial del relleno sanitario se excava hasta la profundidad diseñada y se almacena el material excavado para su utilización posterior. El fondo del relleno se prepara para proveer drenaje para el lixiviado y se instala un recubrimiento de baja permeabilidad. Las instalaciones para la recogida y extracción del lixiviado se localizan dentro o encima del recubrimiento. Normalmente, el recubrimiento se extiende por las paredes excavadas en los laterales del relleno.

❑ Colocación de residuos sólidos

Una vez preparada la zona de vertido el siguiente paso en el proceso implica la colocación de los residuos sólidos, como se observa en la

Figura 7b. Los residuos se colocan en celdas empezando a lo largo de la cara de compactación y siguiendo hacia fuera y hacia arriba a partir de dicha cara. Los residuos depositados en cada período de operación, normalmente un día, forman una celda individual. Los residuos depositados por los vehículos de recolección y transferencia, se esparcen en capas de 45 a 60 cm y se compactan. Las alturas normales de las celdas varían de 2,40 a 3,60 m. El frente de trabajo es la zona del relleno donde se descargan, colocan y compactan los residuos sólidos. Se cubren todas las superficies externas de la celda con una delgada capa de tierra 15 a 30 cm al final de cada período de operación.

Después de colocar uno o más niveles se excavan zanjas horizontales para la recuperación de gas en las áreas ya completadas. Las zanjas excavadas se rellenan con grava y se instalan en ellas tubos de plástico perforados. Se extrae el gas de relleno a través de los tubos durante el periodo de tiempo que se esté produciendo el gas. Se colocan niveles sucesivos, uno encima de otro, hasta llegar al nivel final previsto en el proyecto.

Se coloca una capa de recubrimiento a cada sección completa del relleno. El recubrimiento final se diseña para minimizar la filtración de la lluvia y para llevar el drenaje fuera de la sección activa del

relleno. En este momento se pueden instalar tubos verticales para la extracción del gas, y éste puede quemarse.

Se construyen progresivamente y hacia afuera de las secciones ya completadas, secciones adicionales repitiendo los pasos de construcción anteriormente descritos. A medida que se descomponen los materiales orgánicos depositados en el relleno se asentarán las secciones llenas.

❑ **Gestión postclausura**

La supervisión y mantenimiento del relleno sanitario lleno debe continuar, según la ley, durante algún tiempo después de la clausura (20 años en el caso de Venezuela). Es de especial importancia que se mantenga y se arregle la superficie del relleno sanitario para aumentar el drenaje, que se mantengan y operen los sistemas para el control del lixiviado y del gas, y que se supervise el sistema para la detección de posibles contaminantes (Tchobanoglous et al., 1993).

1.1.4. Reacciones que se producen en los rellenos sanitarios

Los residuos sólidos colocados en un relleno sanitario sufren simultáneamente algunos cambios biológicos, químicos y físicos que están interrelacionados.

❑ Reacciones biológicas

Las reacciones biológicas más importantes que se producen en los rellenos sanitarios son aquellas que afectan a la materia orgánica de los residuos sólidos que evoluciona produciendo gas y, eventualmente, líquidos. El proceso de descomposición biológica normalmente sucede aeróbicamente durante un corto período de tiempo, inmediatamente después de la evacuación de los residuos, hasta que se agota el oxígeno inicialmente presente y durante la descomposición aeróbica el gas producido es CO_2 . Una vez consumido el oxígeno la descomposición pasa a ser anaeróbica y la materia orgánica se convierte en CO_2 , CH_4 , y cantidades traza de amoníaco y sulfuro de hidrógeno.

❑ Reacciones químicas

Las reacciones químicas más importantes que se producen dentro de un relleno sanitario son: 1) la disolución y arrastre en suspensión de los materiales de los residuos y de productos de conversión biológica en los líquidos que se filtran a través de los residuos; 2) la evaporación de compuestos químicos y de agua en el gas; 3) la absorción de compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles en el material vertido; 4) la deshalogenación y descomposición de

compuestos orgánicos y 5) reacciones de oxidación-reducción que afectan a metales y a la solubilidad de las sales metálicas.

❑ **Reacciones físicas**

Entre los cambios físicos más importantes que se producen en los rellenos sanitarios están: la difusión lateral de los gases en el relleno y la emisión de gases al ambiente circundante, el movimiento del lixiviado dentro y hacia abajo del relleno, a través del suelo, y el asentamiento causado por la consolidación y descomposición del material vertido. Como el gas suele tener un alto contenido de metano existe el peligro de combustión y/o explosión.

1.1.5. Problemas ambientales en el vertido de residuos sólidos

Los problemas están relacionados con: 1) el escape incontrolado de los gases que pueden migrar fuera del lugar y causar olores; 2) la salida incontrolada del lixiviado que puede migrar hacia aguas subterráneas o superficiales y 3) la reproducción de vectores sanitarios en rellenos incorrectamente gestionados. La finalidad del diseño y del funcionamiento de un relleno sanitario es eliminar o minimizar los impactos asociados a estos problemas.

1.2. Métodos de Vertido de Rellenos Sanitarios

1.2.1. Métodos de vertido

Los principales métodos utilizados para el vertido de residuos sólidos son:

1) celda/zanja excavada, 2) zona y 3) vaguada/depresión. Las principales características de estos tipos de vertido, se describen a continuación.

❑ Método celda/zanja excavada

El método de vertido celda/zanja excavada (ver Fig. 8) es idóneo para zonas donde se dispone de una profundidad adecuada de material de recubrimiento y donde el nivel freático no se encuentra cerca de la superficie. Normalmente, se colocan los residuos sólidos en celdas o zanjas excavadas en el suelo. La tierra excavada se utiliza como material de recubrimiento diario o final. Usualmente, las celdas o zanjas excavadas se revisten con geomembrana o con arcilla de baja permeabilidad, o con una combinación de los dos, para limitar el movimiento de los gases y lixiviados. Las celdas excavadas son normalmente cuadradas, de hasta 300 m de lado, con pendientes laterales de 1,5:1 a 2:1. Las zanjas varían desde 60 a 300 m de largo, de 1 a 3 m de profundidad y de 4,5 a 15 m de ancho.

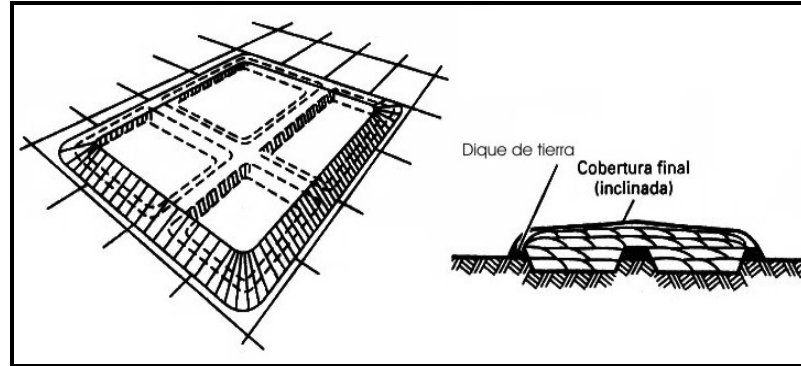


Fig. 8. Método Celda/Zanja Excavada
(Modificado de Tchobanoglous et al., 1993)

❑ **Método de zona**

El método en zona se utiliza cuando el terreno es inapropiado para la excavación de celdas o zanjas donde colocar los residuos sólidos (ver Fig. 9). La preparación del lugar implica la instalación de un revestimiento y de un sistema para el control del lixiviado. El material de recubrimiento tiene que llevarse en camiones desde terrenos adyacentes o desde zonas de fosas de rellenos suplementarios. Otras técnicas que se han utilizado incluyen el uso de materiales portátiles de recubrimiento temporal, tales como tierra y geomembranas. La tierra y las geomembranas colocadas temporalmente sobre una celda completa se pueden quitar antes de comenzar al siguiente nivel.

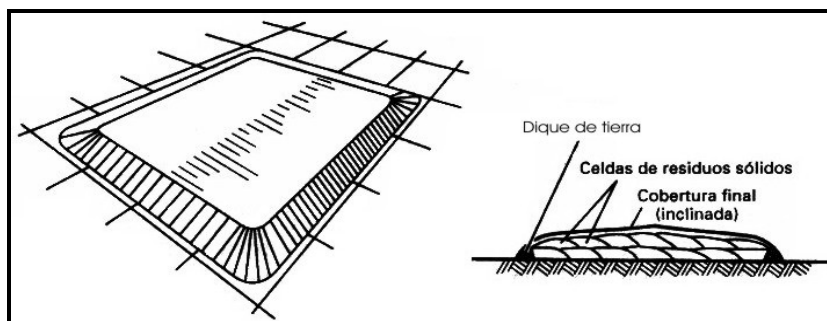


Fig. 9. Método de Zona (Modificado de Tchobanoglous et al., 1993)

❑ **Método vaguada/depresión.**

El método utiliza vaguadas, fosas de rellenos suplementario, y canteras como zonas de vertido (ver Fig. 10). Las técnicas para colocar y compactar residuos en rellenos sanitarios de vaguada/depresión varían según la geometría del lugar, las características del material de recubrimiento disponible, la hidrología y geología del lugar, los tipos de instalaciones para el control del gas y del lixiviado que van a utilizarse, y el acceso al lugar.

El control del drenaje superficial a menudo es un factor crítico en el desarrollo de las zonas de vaguada/depresión. Se rellenan los lugares vaguada/depresión en múltiples niveles. El método de explotación es esencialmente el mismo que para el método en zona anteriormente descrito. Si el suelo de la vaguada es aproximadamente plano, el vertido inicial puede realizarse utilizando el método celda/zanja.

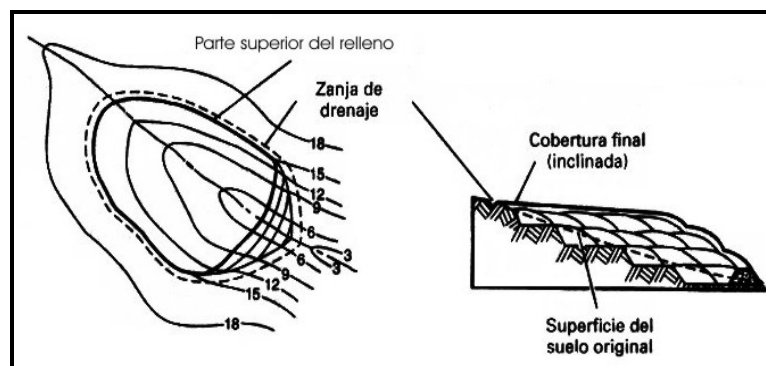


Fig. 10. Método de Vaguada/Depresión
(Modificado de Tchobanoglous et al., 1993)

1.3. Composición y Características de los Gases

Se puede considerar un relleno de residuos sólidos como un reactor bioquímico, con residuos y agua como entradas principales y con gases y lixiviado como principales salidas. El material almacenado en el relleno incluye: material orgánico parcialmente biodegradado y otros materiales inorgánicos de los residuos originalmente colocados en el relleno. Se emplean los sistemas de control de gases para prevenir el movimiento indeseable hacia la atmósfera de los gases del relleno, o el movimiento lateral o vertical a través del suelo circundante. Se puede utilizar el gas recuperado del relleno para producir energía, o se puede quemar, bajo condiciones controladas, para disminuir la emisión de constituyentes dañinos a la atmósfera.

El gas 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 residuos sólidos.

1.3.1. Constituyentes principales del gas

Los gases que se encuentran en los rellenos sanitarios incluyen amoníaco (NH_3), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), metano (CH_4), nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2). En la Tabla 1 se presentan las distribuciones porcentuales típicas de los gases que se encuentran en un relleno sanitario. El metano y el dióxido de carbono son los principales gases procedentes de la descomposición anaeróbica de los componentes biodegradables de los residuos orgánicos en los residuos sólidos.

Tabla 1. Constituyentes Típicos Encontrados en el Gas

Componente	Porcentaje (%)
Metano	45 – 60
Dióxido de carbono	40 – 60
Nitrógeno	2 – 5
Oxígeno	0,1 – 1
Sulfuros, disulfuros, mercaptanos, etc.	0 – 1
Amoníaco	0,1 – 1
Hidrógeno	0 – 0,2
Monóxido de carbono	0 – 0,2
Constituyentes en cantidades traza	0,01 – 0,6

1.4. Formación y Control de Lixiviados

Los residuos, especialmente orgánicos, al ser compactados por maquinaria pesada liberan agua y líquidos orgánicos, contenidos en su interior, el que escurre preferentemente hacia la base de la celda. La basura, que actúa en cierta medida como una esponja, recupera lentamente parte de estos líquidos al cesar la presión de la maquinaria, pero parte de él permanece en la base de la celda. Por otra parte, la descomposición anaeróbica rápidamente comienza actuar en el relleno sanitario, produciendo cambios en la materia orgánica, primero de sólidos a líquido y luego de líquido a gas, pero es la fase de licuefacción la que ayuda a incrementar el contenido de líquido en el relleno, y a la vez su potencial contaminante. En ese momento se puede considerar que las basuras están completamente saturadas y cualquier agua, ya sea subterránea o superficial, que se infiltre en el relleno, lixiviará a través de los residuos arrastrando consigo sólidos en suspensión, y compuestos orgánicos en solución. Esta mezcla heterogénea, de un elevado potencial contaminante, es lo que se denomina lixiviados.

No obstante, a lo anterior la principal fuente de agua para la producción de lixiviado la constituye la entrada de aguas externas, razón por la cual es fundamental su canalización.

Actualmente se utilizan, por lo general, materiales aislantes para limitar o eliminar el movimiento del lixiviado y de los gases fuera del relleno sanitario. El uso de la arcilla como material de aislamiento ha sido el método más

utilizado para reducir o eliminar la filtración del lixiviado fuera de los rellenos sanitarios. La arcilla es factible por su facilidad para absorber y retener muchos de los constituyentes químicos encontrados en el lixiviado, y por su resistencia al flujo del lixiviado. Sin embargo, se está generalizando el uso de aislantes formados por una combinación mixta de geomembranas y arcilla, especialmente por la resistencia proporcionada por las geomembranas al movimiento del lixiviado y de los gases.

1.4.1. Recubrimientos

Los recubrimientos son materiales (naturales o fabricados) que se utilizan para recubrir el fondo y las superficies laterales del relleno. Los recubrimientos suelen estar formados por capas de arcilla compactadas y/o geomembranas diseñados para prevenir la migración del lixiviado y del gas. Las instalaciones para el control del relleno incluyen recubrimientos, sistemas para la recolección y extracción del lixiviado, sistemas de captación y conducción del gas.

❑ Geosintéticos

La denominación de geosintéticos abarca toda la familia de materiales sintéticos que en contacto con la tierra van a facilitar y mejorar la vida útil de la obra. “GEO” por su aplicación directa sobre suelos y rocas y “SINTÉTICOS” por ser fabricados exclusivamente de productos no naturales y que por sus características físicas,

químicas y mecánicas han surgido como una excelente alternativa en el diseño de obras civiles.

Se clasifican en cuatro (4) grupos:

- a) Geomembranas
- b) Geomallas
- c) Geotextiles
- d) Geocompuestos

a) Geomembranas

Las geomembranas son películas impermeables hechas a partir de polietilenos de baja, media y alta densidad, cuya función es controlar la migración de líquidos o sólidos para así evitar el contacto con el suelo. Son delgadas, bidimensionales y flexibles siendo los únicos materiales de construcción que poseen al mismo tiempo las características de separación y refuerzo, lo que explica el éxito que han tenido a nivel mundial.

a.1) Propiedades

Resistencia

Se mencionan dos tipos:

Resistencia al rasgado: la resistencia al rasgado de muchas geomembranas no reforzadas es relativamente baja, ésta oscila entre 1,81 a 4,54 Kg/m dependiendo del grosor de la geomembrana utilizada.

Resistencia al impacto: el conocimiento de la resistencia al impacto es de suma utilidad, cualquier objeto en caída libre puede atravesar y penetrar la geomembrana causando grandes fallas en la permeabilidad o actuando como puntos de comienzo de ruptura o rasgado.

Permeabilidad: las geomembranas tienen como función principal retener sólidos o líquidos para así evitar el contacto directo de estos con el suelo. La impregnación de líquidos no significa que la geomembrana falle, pero la capacidad de impregnación tiene que estar preestablecida y cambios de ésta son un índice de deterioro de las geomembranas. Para drenar los líquidos y gases que están debajo debe conocerse el origen de los mismos que puede deberse a:

- Líquido proveniente desde cualquier reservorio que se encuentre a través del alineamiento del dique.
- El agua de los diques o el agua circundante (agua propia del terreno, condensación del vapor de agua y precipitaciones).

Porosidad: está directamente relacionada con el proceso de fabricación de las geomembranas ya que cualquier orificio que permita filtración hidráulica altera el comportamiento de la geomembrana y por ende los resultados obtenidos en su uso.

Rugosidad: es de importancia para el diseño de la geomembrana conocer la fricción entre la geomembrana y el suelo, especialmente cuando ésta se va a utilizar para forrar rellenos, reservorios, canales, etc,. Por lo tanto, mientras más rugosa sea la geomembrana, mayor será la adherencia de la misma con el suelo. La fricción suelo-geomembrana es siempre menor que la fricción suelo-suelo, siendo la mínima fricción la manufacturada de polietileno de alta densidad y la de máxima fricción aquellas manufacturadas con goma.

Durabilidad: un indicativo es la capacidad de impregnación de líquidos a lo largo de su vida útil. El envejecimiento o duración de las geomembranas viene dado por:

- La calidad de las mismas.
- Las condiciones climatológicas de la zona (variaciones de temperatura).
- La pigmentación de las películas.
- Los cuidados que se tengan con las mismas tanto en la fábrica como en la obra.
- El tipo de material empleado.

a.2) Características de las Geomembranas

Espesor: puede variar entre 0,25 a 3 mm.

Peso: el peso dependerá del espesor que ésta presente y se mide en gramos por metro cuadrado (gr/m^2).

Color: presentan distintos colores de acuerdo al requerimiento.

Color negro: debe ser instalada bajo condiciones de alta temperatura ya que con días muy soleados puede contraerse.

Color blanco: tiene dos funciones principales como son la de reflejar la radiación solar (lo que minimiza la temperatura de la lámina y por lo tanto sus dilataciones y contracciones) y la de permitir mejorar la inspección visual.

Forma: se presenta generalmente en forma laminar lisa, aunque algunas veces la superficie es rugosa para así tener mayor adherencia con la superficie en la cual va a ser instalada.

a.3) Aplicaciones en ingeniería

- Obras de vialidad para impermeabilizar la superficie.
- Impermeabilización de túneles y sobre concreto normal o proyectado (fijación directa).
- Detección de escapes en túneles.
- Impermeabilización en minería para la contención de escorrentías para evitar la contaminación del nivel freático.
- Para asegurar la protección contra corrosión de superficies de acero y de concreto.

- Revestimiento de depósito contra contaminantes disueltos o sedimentos.
- Protección de taludes para estabilización de fallas producidas por erosión.
- Impermeabilización de lagunas para tratamiento y confinamiento de líquidos tóxicos, lagunas de riego y acuicultura, laguna para lodos de perforación y oxidación, tanques de almacenamiento en estaciones de servicio como contenedor secundario, celda de máxima seguridad para residuos sólidos de mercurio, estructuras de concreto, áreas verdes y celdas de rellenos sanitarios.

b) Geomallas

También llamadas georejillas, son redes generalmente fabricadas con polietileno de alta o baja densidad. Tienen color incorporado y aditivo contra las radiaciones ultravioletas. Su función primordial es reforzar el suelo, aumentar la capacidad portante y la cohesión, mediante el incremento de roce de los granos del suelo con la malla. A diferencia de los geotextiles, presentan una configuración de malla abierta, a menudo son reforzadas en una o dos direcciones para así mejorar sus condiciones mecánicas.

b.1) Propiedades

Resistencia: las geomallas poseen una buena resistencia a la tracción con aberturas desde $\frac{1}{2}$ " a 2" de diámetro. En la resistencia juega un papel muy importante los materiales empleados para su fabricación tales como polietilenos de alta densidad y polipropilenos.

Permeabilidad: está referida a una función secundaria como es la de transportar el agua lateralmente por medio de filamentos.

Durabilidad: la foto-oxidación, la oxidación térmica y el ataque químico son las tres formas prevalentes de degradación molecular de las geomallas lo cual incide directamente en la durabilidad de la misma. Las características de envejecimiento a largo plazo y durabilidad de la geomalla son de extrema importancia, especialmente para aplicaciones al aire donde la resistencia a la radiación ultravioleta es esencial.

b.2) Características de las Geomallas

Espesor: varía entre 3 a 6,3 mm, en donde la de mayor espesor es usada especialmente en aplicaciones de drenaje de los sistemas de impermeabilización mientras que la de menor espesor es usada para la estabilización y refuerzos de suelos.

Peso: es medido en gramos por metro cuadrado (gr/m^2) y oscila entre 450 a 810 gr/m^2 según sea el tipo de geomalla y el uso al cual va a ser destinada.

Color: colores usados según Normas Internacionales para señalar tuberías enterradas son presentados en la Tabla 2.

Tabla 2. Color de Geomallas

Color	Tipo de Tubería Enterrada
Amarillo	Gas
Azul	Agua
Rojo	Electricidad
Verde	Teléfono

Cabe destacar, que el color negro cumple con una función adicional respecto a los otros colores, éste actúa como colorante pero adicionalmente contribuye a preservar la vida útil del material.

Forma: presentan aberturas que van desde $\frac{1}{2}$ " hasta 2" de diámetro. Estos orificios son en forma de elipses alargadas o cuadrados con esquinas redondeadas o redondos.

b.3) Aplicaciones en ingeniería

- Refuerzo de bases de carreteras y de pavimentos asfálticos.
- Muros de gaviones y de tierra reforzada.
- Refuerzo de concreto.
- Tuberías enterradas.

- Reforestación y protección de taludes.
- Cercas de seguridad.
- Disminución del peso del relleno.
- Refuerzo de terraplenes y presas de tierra.
- Reparación de fallas por deslizamiento.
- Construcción de colchones para rellenos en suelos blandos.
- Aplicaciones de drenajes de los sistemas de impermeabilización simple o doble protección (máxima seguridad) de lagunas en rellenos sanitarios o de seguridad.

c) Geotextiles

Son telas industriales porosas y permeables, tejidas o no tejidas fabricadas a partir de filamentos de poliéster o de polipropileno altos en resistencia y excelente en durabilidad. En su fabricación no se utilizan fibras naturales ya que éstas son biodegradables. A su vez se clasifican en dos (2) grupos:

Geotextiles tejidos: están compuestos por dos grupos de filamentos paralelos sistemáticamente entrelazados para formar una estructura plana. La manera en la cual estos filamentos son entrelazados determina el tipo de tejido. Generalmente, los dos grupos de filamentos son perpendiculares pero existen telares especiales que permiten que los filamentos queden tramados en

forma oblicua. Este proceso constructivo proporciona poros de abertura uniforme a las membranas.

Geotextiles no tejidos: en este tipo el tramado está ausente del proceso constructivo. Constan de filamentos o fibras colocadas al azar y unidas entre si por medio de resinas, calor o métodos mecánicos tales como el punzonado con aguja. Las aberturas con estos procesos no son uniformes.

c.1) Propiedades

Resistencia: es una de las propiedades más importantes ya que el geotextil se encarga de absorber los esfuerzos originados desde el momento de la instalación hasta que el material comience a cumplir la función a la cual fue destinado. Es un factor primordial para la escogencia del tipo de geotextil, ya que se necesita garantizar la resistencia del elemento ante cualquier circunstancia. La resistencia es obtenida en el proceso de fabricación variando su magnitud en cada tipo de geotextil.

Permeabilidad: los geotextiles pueden tener la propiedad de transmitir y conducir un flujo a través y entre su plano por lo que pueden ocurrir dos tipos de flujo: normal y planar.

El flujo normal propiedad de todos los geotextiles, es el que se origina cuando la corriente atraviesa perpendicularmente la tela, es decir, el sintético actúa como filtro.

El flujo planar es aquel que se desliza entre el plano estructural, cumpliendo el geotextil en este caso una función de drenaje laminar.

Porosidad: se entenderá ésta propiedad como el tamaño y distribución de los espacios entre los filamentos que forman el geotextil. La porosidad no es una propiedad invariable entre el grupo de geotextiles, sino que depende del tipo de fibra y el proceso de fabricación de los mismos. Los tejidos tienen una distribución y tamaño de poro bastante regular, a diferencia de los no tejidos que presentan aberturas de varias formas y tamaños.

Rugosidad: es la aspereza que presenta el geotextil en su superficie. Los geotextiles rugosos son convenientemente utilizados para desempeñar funciones de adherencia, refuerzo y toda aplicación que necesite una buena fricción entre la tela y los materiales. Los más utilizados son los tejidos y los no tejidos por procesos mecánicos.

Durabilidad: esta propiedad está directamente relacionada con el tipo de material utilizado en la manufactura de la fibra. Los geotextiles, por estar compuestos de polímeros no se descomponen biológicamente y son indigeribles; la degradación físico-química por contacto directo con suelos y químicos, no representa un problema importante. Sin embargo, los geotextiles son afectados por los rayos ultravioletas, por lo que, deben protegerse de la excesiva incidencia de los rayos solares durante su almacenamiento y en algunas fases de la construcción. Una cubierta betún asfáltico o concreto podría representar una solución para aquellas zonas en que la materia estará permanentemente expuesto a la intemperie.

c.2) Características de los Geotextiles

Espesor: van a depender de la función ingenieril en la cual se vayan a aplicar y puede variar entre 1,00 a 5,40 mm.

Peso: viene dado según el espesor que éste posea. En cuanto a la relación peso/área, se tiene que los geotextiles no tejidos varían de 120 a 600 gr/m², mientras que en los geotextiles tejidos varían desde 105 a 455 gr/m².

Color: los predominantes son el blanco, negro, gris y la combinación de estos.

Forma: los geotextiles se presentan en forma de lámina tejida o no, en donde en ciertos casos se asemejan a una alfombra cuando el geotextil es no tejido. Cuando es tejido el geotextil, presenta una forma entrelazada asemejándose a una cuadrícula.

c.3) Aplicaciones en ingeniería

Separación: impide la contaminación de los agregados seleccionados con el suelo natural.

Refuerzo: todo suelo tiene baja resistencia a la tensión. El geotextil, adsorbe los esfuerzos de tensión que el suelo no posee.

Filtración: permite el paso del agua a través de poros, impidiendo que las partículas sólidas traspasen el geotextil.

Drenaje planar: drena el agua en el plano del geotextil, evitando el desarrollo de la presión de poros en la masa de suelo en consideración.

Usos: en carreteras no pavimentadas, en carreteras pavimentadas, como refuerzo y contención de suelos, estabilización de taludes y presas, para la fundación de represas, diques y otras obras hidráulicas, como refuerzo de estructuras de contención de tierras, estabilización de suelos, como refuerzo en terraplenes, para el control de erosión del suelo, ríos, taludes, costas, en

recubrimiento de tuberías, vías férreas, gaviones, muelles y puentes, tratamiento de muros, túneles y embalses.

En rellenos sanitarios actúan como detector de fugas o exfiltraciones de lixiviados. Evitan el punzonamiento de las geomembranas durante la construcción y trabajan como transmisor de fluidos o disipador de gases, evitando la explosión de las geomembranas.

d) Geocompuestos

Es una combinación de geotextil-geomalla, geomalla-geomembrana, geotextil-geomembrana y geotextil-geomalla-geomembrana; o cualquier combinación de estos tres materiales con otro material, como por ejemplo, tierra, láminas de plástico deformadas, cables de acero y otros. La principal razón de la existencia de los geocompuestos, es el alto rendimiento que a menudo puede ser alcanzado combinando los atributos de dos o más materiales. Las funciones básicas que desempeñan los geocompuestos son las de separación, drenaje, filtración y refuerzo.

d.1) Propiedades y características de los geocompuestos

Tanto las propiedades como las características de los geocompuestos abarcan todas las mencionadas anteriormente

para el resto de los geosintéticos como son la resistencia, permeabilidad, porosidad, rugosidad, durabilidad, grosor, peso, color y forma (Giroud, 1980 y Koerner, 1987).

❑ Aislamientos de arcillas

Para mejorar los sellos de geomembranas se utiliza arcillas compactadas. Los suelos presentan arcillas naturales, arcillas limosas, arcillas arenosas y limo arcilloso. La conductividad hidráulica de una capa de arcilla depende del tipo de arcilla, considerando la mineralogía de la arcilla, granulometría y límites de plasticidad.

Para garantizar que el apoyo del relleno sanitario estará sobre un suelo impermeable, se acostumbra y además es norma del MARNR, colocar una capa de arcilla que en las celdas para desechos normales deberá tener una permeabilidad no mayor a 10^{-7} m/s y en la celda para desechos específicos una permeabilidad menor o igual a 10^{-6} m/s. Sobre esta capa se apoyarán los geotextiles y geomembranas impermeables que garanticen la estanqueidad del relleno y donde se coloca la capa de grava que servirá de medio para llegar a los colectores de lixiviados.

También se puede añadir una mezcla de bentonita a los suelos naturales para reducir la conductividad hidráulica y aumentar la capacidad de absorción de los materiales autóctonos. La bentonita se añade a los suelos autóctonos utilizando de un 5 a 15% en peso seco. Esta arcilla añadida varía el suelo natural a un suelo arcilloso de alta plasticidad. La mezcla suelo-bentonita se compacta dando lugar a un sello de conductividad baja (Calvo, 1998).

1.4.2. Parámetros de diseño para la impermeabilización de rellenos sanitarios

El requisito más importante de un relleno sanitario es la capacidad de aislar los residuos sólidos con respecto al contexto natural en el cual se hallan acumulados, y que dicha capacidad se conserve indefinidamente. Por tal motivo la mayor parte de los estudios realizados sobre rellenos conciernen precisamente a los sistemas y materiales utilizados para prevenir la salida de elementos contaminantes de la cuenca de recolección de residuos sólidos, y limitar lo más posible la penetración de las aguas meteóricas en el, después de su llenado y cierre por la parte superior.

❑ Impermeabilización del fondo y las paredes del relleno

Respecto a este punto la condición ideal sería una cuenca realizada en una formación naturalmente impermeable, es decir, constituida por arcillas muy consolidadas. Puesto que una condición tan

favorable no suele ser frecuente, por lo general hay que recurrir a barreras artificiales y naturales. El sistema más difundido es el de una capa de terreno natural arcilloso al cual se sobrepone directamente materiales geosintéticos

El objetivo del sellado es proporcionar una barrera que minimice la migración de contaminantes. Un sellado con un 100% de eficacia evitará que los constituyentes químicos migren al ambiente aunque ningún sello presenta 100% de eficacia, razón por la cual debe realizarse un diseño adecuado para cada situación.

La recolección de lixiviado es necesaria, dado que inevitablemente se genera. Por lo tanto, la parte inferior del relleno consta de capas alternas de materiales que actúan como barreras para los contaminantes que intenten migrar fuera del relleno, y capas que permiten la recolección de estos contaminantes a través de un sistema diseñado para ello.

El lixiviado percola hacia la base del relleno debido a la fuerza de gravedad. Las fuerzas de filtración hacen que el lixiviado transporte materia en suspensión (sólidos en suspensión) junto con constituyentes disueltos. En la base de la instalación, el lixiviado primero atraviesa una zona de filtrado. Dicha zona puede ser un geotextil y/o grava y arena de buena granulometría a través de las

cuales se filtran las partículas. El filtro separa el residuo de la zona de drenaje relativamente libre que rodea las tuberías de recolección de lixiviados. En esta zona primaria, el lixiviado se encuentra libre para discurrir al sistema de tuberías de eliminación por tratamiento. Como el flujo que atraviesa el sello es proporcional a la carga hidráulica en el sello se minimiza mediante un diseño apropiado del sistema de recolección de lixiviados, teniendo en cuenta la separación entre tuberías, tamaño de las mismas, material de drenaje y pendiente.

La capa barrera primaria subyace cubriendo completamente la zona primaria. Esta barrera debe ser de material sintético geomembrana.

La zona secundaria de recolección de lixiviados funciona de una manera muy similar al sistema primario y se encuentra por debajo de la capa barrera. Dada la eficacia del sello primario, el sistema secundario maneja un volumen considerablemente reducido de lixiviados. Por debajo del sistema secundario existe todavía otra geomembrana, llamada capa barrera secundaria, sirviendo como barrera hidráulica que previene el flujo descendente de los contaminantes y permite al sistema secundario tomar lixiviado.

Por debajo del sistema completo primario y secundario de impermeabilización y recolección de lixiviados subyace una tercera

barrera normalmente constituida de material natural de arcilla compactada o arcilla mezclada con subsuelo natural (ver Figura 11), la misma se necesita para controlar aquellos contaminantes que pudieran haber atravesado los sistemas anteriores. (Calvo et al., 1998).

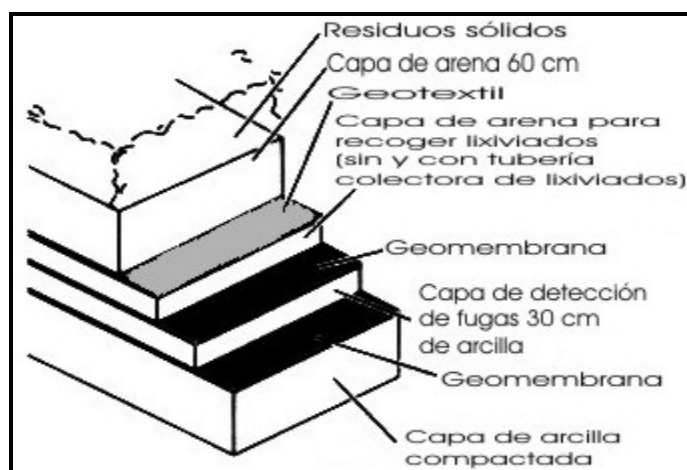


Fig. 11. Configuración Típica del Recubrimiento del Fondo de un Relleno Sanitario

Las especificaciones establecidas en la Legislación Venezolana para el diseño de un sellado de los rellenos de seguridad, contemplan un solo nivel de recolección de lixiviados y señala las siguientes características: la capa de terreno arcilloso natural debe tener un espesor mínimo de 1,5 m conformado por seis (6) capas de material previamente humedecido y compactado, de igual modo debe cumplir con los siguientes aspectos: un coeficiente de permeabilidad inferior o igual a 10^{-9} m/s, ser calificado bajo el sistema AASHO, el % de

paso al través de un tamiz N° 200 debe ser mayor al 30% (Test ASTM D-1140 o COVENIN equivalente), la plasticidad debe ser mayor o igual a 15 unidades (Test ASTM D-424 o COVENIN equivalente), el pH debe ser igual o mayor que siete (7).

❑ Cobertura del relleno

El diseño de la cobertura final debe considerar los siguientes aspectos: higiene, seguridad, estética y utilización de la zona tras la clausura junto con los requisitos ingenieriles como permeabilidad, compresibilidad y resistencia. Se consideran los siguientes aspectos después de la clausura:

- Control del movimiento del agua en el relleno para minimizar la generación de lixiviados.
- Control de animales y vectores que puedan introducir enfermedades en el ecosistema.
- Protección de la población de los peligros del contacto directo con el residuo.
- Control del movimiento de gases para evitar alteraciones significativas en la calidad del aire.
- Minimización del potencial inflamable para evitar emisiones a la atmósfera y daños en los componentes del relleno.

- Asegurar la estabilidad completa de la cobertura en las pendientes laterales del relleno, ya que la inestabilidad en éstas puede producir movimientos de masas de contaminantes al ambiente.
- Control de escorrentía de aguas superficiales.
- Resistencia a la erosión.
- Control de residuos sólidos transportados por el viento.
- Minimización de olores desagradables.

La cobertura final debe proporcionar un soporte estructural a la cubierta vegetal y soportar las cargas impuestas por el tráfico del lugar como lo son los vehículos de mantenimiento.

Generalmente la capa de soporte vegetal consiste de un material margoso-limoso orgánico (horizonte de suelo orgánico) utilizado como soporte de la vegetación. La vegetación realiza importantes funciones en la cobertura del relleno, tales como:

- Reduce la erosión.
- Reduce la infiltración de la precipitación.
- Favorece la evaporación, devolviendo la humedad absorbida del horizonte de suelo a la atmósfera, lo que reduce aun más la infiltración.

La capa de drenaje lateral se sitúa bajo la capa de soporte vegetativo, pudiendo emplearse grava de granulometría gruesa, georedes o geocompuestos. El objetivo de esta capa es favorecer el drenaje lateral de cualquier precipitación que se infiltre a través de la zona vegetativa. Con una adecuada nivelación de la capa de drenaje lateral también minimiza la carga hidráulica de la capa barrera subyacente. Como resultado, se reduce la infiltración de la precipitación. La capa de drenaje lateral y la capa de soporte vegetativo operan en conjunto para proteger a las capas subyacentes de las tensiones ambientales de humectación/desecación.

La capa de drenaje lateral puede contar también con tuberías y sistemas de recogida de agua. Se puede situar un filtro geotextil bajo el horizonte de suelo orgánico y sobre la capa de drenaje lateral subyacente. El geotextil sirve para mantener la separación entre las capas y actúa como un filtro minimizando la migración de materiales. Si los finos del horizonte de suelos migran hacia la grava, la capa del horizonte de suelo reduce su capacidad para mantener la vegetación y la grava reduce su capacidad de drenaje lateral. La presencia del geotextil entre estas capas reduce el riesgo de saturación de la capa de drenaje con los finos del horizonte del suelo.

Debajo de la capa de drenaje lateral hay una o más capas barrera. Las capas barrera se componen de cualquiera de las barreras vistas anteriormente como geomembranas, arcillas naturales o materiales mezclados. Estas capas barrera representan el impedimento final para la infiltración de la precipitación. Una consideración importante en el diseño es el mantenimiento de la integridad de la capa barrera durante y después del asentamiento del relleno. La velocidad de infiltración de la precipitación y la generación de lixiviados. Si esto ocurre, los niveles de lixiviados aumentan en el relleno de manera similar a como el agua llena una bañera. Bajo estas condiciones la mayor carga hidráulica induce una mayor migración fuera del relleno. La capacidad del sistema de recolección de lixiviados se diseña normalmente considerando las peores condiciones (una celda abierta sin residuo y elevada precipitación).

Por debajo de la capa barrera puede situarse una capa de recolección de gases utilizada para atrapar los gases generados que migran del relleno, para posteriormente, emitirlos a la atmósfera. Esta capa se compone de arena gruesa y grava y puede contar con tuberías perforadas para la evacuación de gases.

El sistema de cobertura puede llevar una capa de geomalla para mejorar la integridad estructural del mismo. La geomalla aumenta la

capacidad de tracción del sistema para redistribuir las tensiones y minimizar los asentamientos diferenciales (Calvo et al., 1998).

Las especificaciones establecidas en la Legislación Venezolana para el diseño del sistema de cobertura de los rellenos de seguridad, señalan las siguientes características: se debe colocar sobre los desechos depositados una capa de material granular de 20 cm de espesor, a objeto de facilitar el flujo de gases, posteriormente una capa de arcilla de 60 cm de espesor compactada y de permeabilidad menor o igual a 10^{-9} m/s, seguidamente una geomembrana de polietileno de alta densidad de 2,5 mm de espesor, a continuación una capa de material granular de 30 cm de espesor para el drenaje de las aguas de lluvia y por último una capa de suelo vegetal de 50 cm de espesor de una calidad tal que pueda sostener la vida vegetal, fundamentalmente gramíneas (ver Figura 12). La cobertura final del sitio debera tener una pendiente menor o igual al 30%.

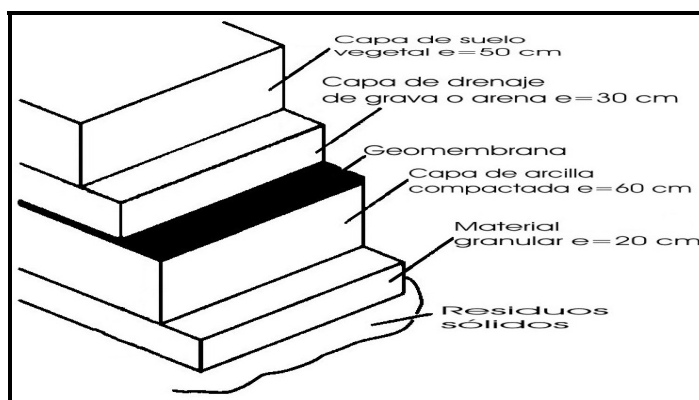


Fig. 12. Configuración Típica de la Cobertura Final de un Relleno Sanitario

1.5. Características Estructurales y Asentamiento de Rellenos Sanitarios

Se deben tener en cuenta las características estructurales y el asentamiento de los rellenos sanitarios en el diseño de instalaciones para la recolección del gas, durante las operaciones de relleno, y antes de llegar a una decisión sobre el uso final del relleno sanitario.

1.5.1. Características estructurales

Cuando inicialmente se colocan residuos sólidos en un relleno sanitario se comportan de una forma similar a otros materiales de relleno. El ángulo nominal de reposo para el material colocado en un relleno sanitario es aproximadamente de 33° . Como los residuos sólidos tienden a deslizarse cuando la pendiente es demasiado inclinada, se han construido bermas en muchos de los rellenos sanitarios donde la altura total del relleno excede de 15 m. Las bermas ayudan a mantener la estabilidad de los taludes de basura, y también se utilizan para colocar los conductos para el drenaje del agua superficial y para la colocación de tuberías para la recuperación del gas (Tchobanoglous et al., 1993).

1.5.2. Asentamiento

Mientras se descompone el material orgánico y se pierde peso en forma de componentes gaseosos y lixiviado, se produce el asentamiento del

relleno sanitario. También se produce el asentamiento como resultado de la sobrecarga producida por la adición de niveles, y por la entrada y salida de agua. El asentamiento produce roturas en la superficie y en la cobertura del relleno sanitario, y roturas y desplazamientos en las instalaciones para la recuperación del gas.

❑ Efecto de la descomposición de residuos

Una vez colocados en un relleno sanitario, los componentes orgánicos de los residuos sólidos se descompondrán, ocasionando la pérdida de hasta el 30 o el 40% del total de la masa original. La pérdida de masa provoca una pérdida de volumen, que puede ser rellenada con nuevos residuos. Normalmente el volumen perdido se rellena cuando se coloca el segundo nivel encima del primero.

❑ Efecto de la presión por sobrecarga

El peso específico del material colocado en el relleno sanitario se incrementará con el peso del material colocado encima; por lo tanto, el peso específico de un nivel dependerá de la profundidad del nivel. El peso específico máximo de los residuos sólidos en un relleno sanitario bajo presión por sobrecarga oscila entre 1100 a 1300 Kg/m³ (Tchobanoglous et al., 1993).

❑ Aumento del asentamiento

El aumento del asentamiento depende de la compactación inicial, de las características de los residuos sólidos, del grado de descomposición, de los efectos de la consolidación cuando el agua y el aire son expulsados fuera de los residuos compactados, y de la altura del relleno sanitario lleno. En la Figura 13 se muestran datos representativos sobre el grado de asentamiento que se puede esperar en un relleno sanitario en función de la compactación inicial.

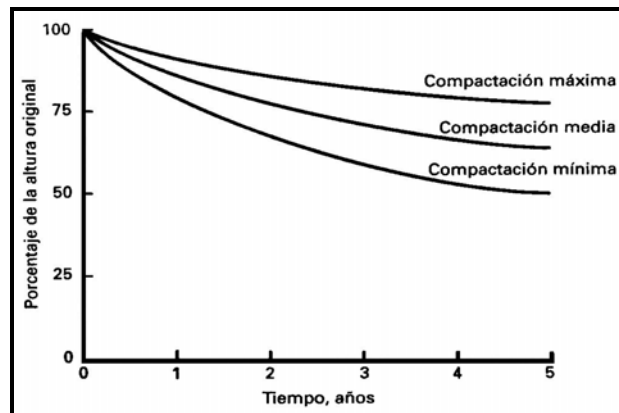


Fig. 13. Asentamiento de Rellenos Sanitarios Compactados (Tchobanoglous et al., 1993)

2. COMPACTACIÓN

Las especificaciones estándar de la mayoría de los organismos relacionados con carreteras y rellenos sanitarios requieren el uso de la compactación, en los cuales el relleno se distribuye en capas relativamente delgadas y se compactan mediante un equipo de compactación.

Algunas especificaciones indican el procedimiento detallado por medio del cual se va a efectuar la compactación, incluyendo control de humedad, espesores de las capas, tipo y tamaño del equipo de compactación, y el número de pases del equipo.

2.1. Compactación de Suelos

2.1.1. Definición

Compactación es la operación mecánica de elevar la densidad del suelo, es decir, el peso por unidad de volumen; esto es debido a la disminución del volumen bajo la aplicación de cargas suministradas por maquinaria de compactación.

Hay tres factores importantes que afectan la compactación:

❑ Distribución de tamaños

Es la distribución (% del peso) de las partículas de diversos tamaños en un suelo determinado. Se considera que una muestra está bien granulada si contiene una distribución buena y uniforme de tamaños de partículas. Si la mayor parte de las partículas es del mismo tamaño, se dice que su granulado es inadecuado. En términos de compactación, un suelo bien granulado se compactará más fácilmente que un suelo con granulado inadecuado. Cuando el material está bien granulado, las partículas pequeñas llenan los espacios vacíos entre las partículas más grandes y quedan menos espacios vacíos después de compactar.

❑ Contenido de humedad

Es la cantidad de agua que tiene una muestra de suelo expresada en (%), la misma tiene gran importancia en la compactación. El agua lubrica las partículas de suelo lo que facilita su deslizamiento a las posiciones de mayor densidad. Además, el agua mejora la unión entre las partículas de arcilla, que es lo que da mayor cohesión.

Se sabe por experiencia que es muy difícil y tal vez imposible obtener la debida compactación si los materiales están muy secos o muy húmedos. Se ha demostrado que para cualquier tipo de suelo corresponde un cierto contenido de agua, denominado grado óptimo de humedad, con el que es posible obtener la densidad máxima con una fuerza determinada de compactación. La Figura 14 se muestra la relación entre la densidad en estado seco y la que resulta cuando hay humedad. Se denomina curva de compactación, de densidad-humedad

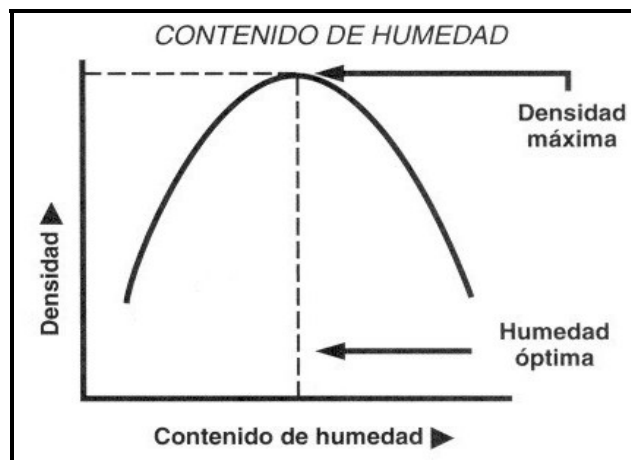


Fig. 14. Curva de Compactación de Suelos

❑ **Esfuerzo de compactación**

Se refiere al método que se utiliza con una máquina de compactación a fin de aplicar energía mecánica en el suelo, con el objeto de apisonarlo. Los compactadores se diseñan para utilizar uno o varios de los siguientes de esfuerzos de compactación:

▪ **Presión**

Es el producto de una fuerza hacia abajo transmitida al suelo por el peso del rodillo. Esta fuerza penetra en la capa en forma de cono que se disipa completamente a cierta profundidad.

▪ **Impacto**

La compactación por impacto es producida por una acción continua de golpes o martilleos al suelo. Rodillos con diseño de patas irregulares producen estos golpes alternando áreas de presión alta y baja. A medida que la velocidad de los golpes aumenta, la fuerza ejercida es aumentada al cuadrado de la velocidad.

▪ **Vibración**

Es la acción de golpes de impactos a gran velocidad o alta frecuencia. Todos los suelos tienen una frecuencia de resonancia que comienza cerca de las 1050 hacia 1400 vibraciones por minuto. Cuando se está operando en rangos de frecuencia sobre 1400 VPM estamos vibrando el suelo en vez de darle un

impacto. Esta vibración más alta quiebra las juntas de fricción entre las partículas del suelo permitiendo a las partículas que se acomoden en una masa más densa por gravedad y presión del rodillo.

- Manipulación

Es la acción de manipular y desplazar el suelo. Este método también es beneficioso en acomodar las partículas más cerca una de otra. Siendo que la manipulación es una de las fuerzas necesarias, si estuviera confinada sería mucho más beneficioso.

2.2. Compactación de Residuos Sólidos

2.2.1. Factores que determinan la compactación de residuos sólidos

- Espesor de la capa de residuos sólidos

La profundidad de cada capa compactada tal vez sea el factor controlable individual más importante que afecta la densidad. Para obtener la máxima densidad, los residuos se deben esparcir y compactar en capas de un espesor no mayor de 60 cm. Si las capas son más espesas reducirán la densidad que puede desarrollar una máquina en un número determinado de pasadas (ver Figura 15).

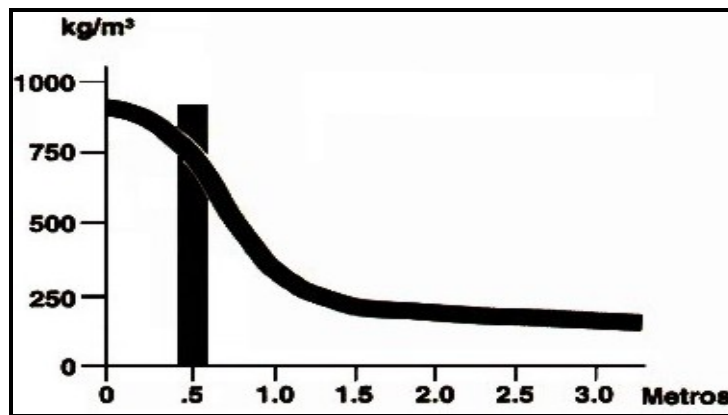


Fig. 15. Disminución de la Densidad con el Aumento del Espesor de la Capa de Basura (Manual de Rendimiento CATERPILLAR, 1998)

□ Número de pasadas

El número de pasadas sobre los residuos sólidos también afecta la densidad. Cualquiera que sea el tipo de máquina utilizada, la unidad debe efectuar 3 ó 4 pasadas para lograr densidad óptima. La Figura 16 ilustra el hecho de que más de cinco pasadas resultan en poco esfuerzo de compactación adicional.

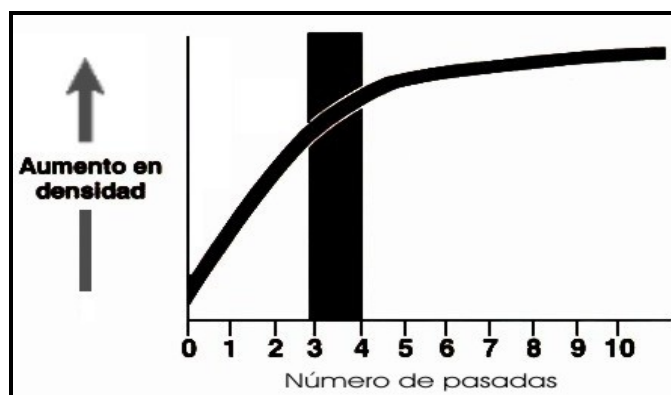


Fig. 16. Aumento de la Densidad con el Número de Pasadas (Manual de Rendimiento CATERPILLAR, 1998)

❑ Pendiente

Para obtener la máxima compactación, se debe operar el compactador en una pendiente lo más plana posible. Esto se debe al hecho de que el peso del compactador se concentra y utiliza más eficientemente cuando trabaja sobre una superficie plana. Los compactadores para rellenos nunca deben trabajar en una pendiente de más de 4:1.

❑ Contenido de humedad

Se ha demostrado que tiene un efecto significativo sobre la densidad compactada. Se cree que el agua tiende a debilitar las características de “puente” de los residuos, especialmente productos de papel tales como grandes trozos de cartón, etc., y por lo tanto permite una mayor consolidación. El agua también podría hacer de lubricante, como lo hace en los suelos. Una cantidad mínima de humedad puede aumentar la densidad de compactación de los residuos hasta en un 10%.

El contenido de humedad óptimo para alcanzar la máxima compactación de residuos parece ser alrededor de 50%. Las pruebas de campo indican contenidos de humedad reales que varían de 10 a 80% durante temporadas secas y húmedas. Si un contenido de humedad más elevado puede suministrar mayores densidades en el

sitio, también aumenta la posibilidad de formación de lixiviado.
(Manual de Rendimiento CATERPILLAR, 1998)

Basado en los resultados de pruebas de penetración normal (SPT) obtenidos por Manassero et al., (1996), el peso unitario seco de los residuos sólidos está en el orden de $9,3 \text{ KN/m}^3$ y el contenido de humedad óptimo es aproximadamente igual a 31% (ver Fig. 17). Como se puede observar la curva de compactación para la basura es similar a la de los suelos, en la misma se obtendría una saturación completa de la muestra de basura con un contenido de humedad de aproximadamente 70%, considerando al 100% la curva de saturación.

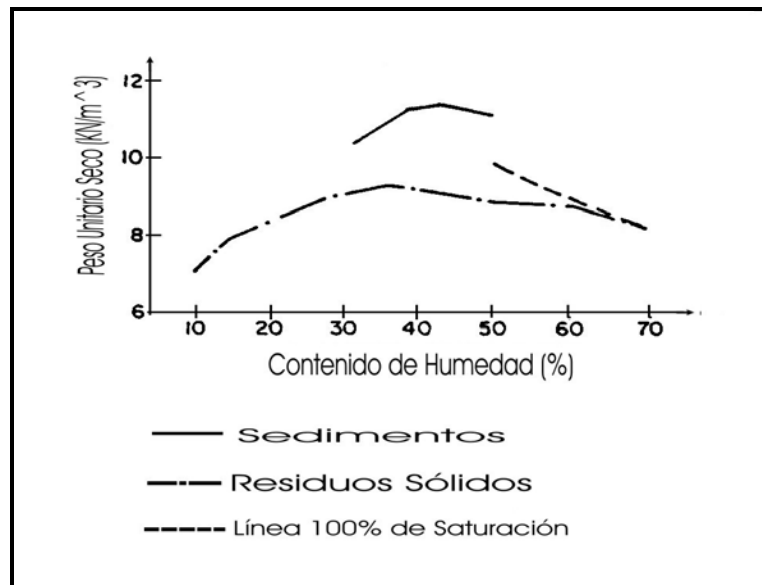


**Fig. 17. Curva de Compactación de Residuos Sólidos
(Manassero et al., 1996)**

3. ESTABILIDAD DE TALUDES DE RELLENOS SANITARIOS

Es necesario hacer el análisis de estabilidad de taludes como parte del proceso de diseño de rellenos de residuos sólidos, y evaluar el comportamiento del mismo para evitar la falla por las causas siguientes:

- Falla debido al deslizamiento.
- Colapso de la capacidad portante de las estructuras donde se construye el relleno.
- Asentamientos excesivos.

La estabilidad del relleno de residuos sólidos en condiciones estáticas es controlada por los factores siguientes:

- La resistencia al corte y la compresibilidad de los suelos de fundación.
- La densidad y la resistencia al corte de la basura.
- Altura de la celda de residuos y ángulo de inclinación del talud.
- El nivel de los lixiviados y el movimiento dentro de la celda de residuos.
- El tipo de cobertura del relleno y su resistencia a la erosión.

El análisis de estabilidad de taludes de rellenos sanitarios es menos confiable que para los terraplenes de suelos. El peso unitario y los parámetros geotécnicos de la basura son difíciles de determinar ya que varían en una gama amplia de valores. La estimación de estas variables es principalmente basado en historia de casos y las investigaciones de sitios específicos (Oweis y Khera, 1990).

Para hacer el análisis de estabilidad de taludes en basura se necesitan, la composición, el peso unitario y los parámetros geotécnicos. La finalidad de esta sección es presentar los procedimientos para hacer el análisis de estabilidad de taludes en basura.

3.1. Caracterización de los Residuos Sólidos

La finalidad de un estudio de caracterización de residuos sólidos es identificar las fuentes, características (humedad, peso unitario, porcentaje de materia orgánica) y cantidades de residuos generados. Los estudios de caracterización de residuos son difíciles de llevar a cabo por la gran cantidad de fuentes y el número limitado de muestras de residuos que se pueden analizar. Los pasos a seguir en un estudio de caracterización de residuos son los siguientes:

❑ Recolectar información

El uso de la información existente puede ahorrar tiempo, y servir como referencia. Como fuentes de información existentes se pueden incluir:

- Estudios y documentos anteriores de gestión y planificación de residuos sólidos.
- Archivos de compañías de recolección de residuos (públicas y privadas).
- Archivos de rellenos sanitarios e instalaciones de transferencia.
- Estudios anteriores sobre evacuación de residuos.

- Empresas de servicio público.
- ❑ Identificar fuentes de generación y las características de los residuos
 - Fuentes.
 - Domésticas
 - Comerciales
 - Institucionales
 - Construcción y demolición
 - Servicios municipales
 - Plantas de tratamiento de agua y aguas residuales
 - Industriales
 - Agrícolas
 - Desarrollar categorías de residuos

La necesidad de un análisis detallado de los componentes individuales de los residuos dentro de cada categoría de residuos dependerá de los usos que se van a hacer de los datos recolectados.
- ❑ Desarrollar metodologías de muestreo
 - Identificación y caracterización de muestras incluyendo
 - Fuentes
 - Tamaño de muestra
 - Número de muestras necesarias para relevancia estadística

- Duración del período de muestreo
 - Época del año
- Realizar estudios de campo

3.2. Propiedades Físicas de los Residuos Sólidos

Las propiedades físicas más importantes de los residuos sólidos para el análisis de estabilidad de taludes son: peso unitario, contenido de humedad y la composición porcentual.

3.2.1. Peso Unitario

El peso unitario se define como el peso por unidad de volumen de los residuos sólidos, incluyendo los vacíos, el peso unitario real es el que poseen los residuos tal como se generaron, y el aparente es el obtenido luego de ser sometidos a compactación.

Los principales factores que influyen en el peso unitario inicial de los residuos sólidos son: la composición, el volumen diario colocado sobre los residuos que tiende a aumentar el peso unitario, y el grado de compactación que se obtuvo durante la colocación de los residuos.

Numerosos autores tales como Landva y Clark, (1990), Sing y Murphy, (1990), Van Impe, (1993), Fassett et al, (1994) y Whitiam et al, (1995) han propuesto pesos unitarios para los residuos sólidos. Los valores propuestos van de 3 KN/m^3 sin compactar o pobremente compactado a

14 KN/m³ para basura que tiene una buena compactación, con un valor medio en el orden de 9 a 12 KN/m³.

3.2.2. Humedad

Es el contenido de agua expresado en términos de porcentaje, esta agua se presenta como agua libre y se determina su cantidad por gravimetría (diferencia de pesos). La humedad es función del grado de compactación de los residuos sólidos.

El contenido de humedad de los residuos sólidos depende de la composición inicial, condiciones climáticas locales, procedimientos de operación de los residuos, la proporción de descomposición biológica, y la capacidad y actuación de los lixiviados y sistemas de colección del gas con respecto a la cantidad de humedad que entra, y que se generó dentro del relleno. Además, la cantidad de humedad dentro de un relleno puede variar significativamente entre zonas que tienen las composiciones sustancialmente diferentes.

Estudios realizados por Huitric et al., (1979) y Tchobanouglos et al., (1993), demostraron que el contenido de humedad normalmente varía de 15 a 40%, con una humedad típica de aproximadamente 25% cuando la evapotranspiración excede la precipitación.

Los contenidos de humedad observados en los residuos sólidos son debidos principalmente al alto contenido orgánico (restos de alimentos y de jardin, etc) que representa un alto porcentaje en los residuos sólidos. Los componentes inorgánicos de los residuos sólidos como plásticos y productos de papel generalmente tienen un contenido de humedad que tiende a aumentar con el contenido orgánico de la basura (Landva y Clark, 1990).

3.2.3. Composición Porcentual

Se refiere a los componentes que aparecen con más frecuencia y en cantidades medibles y a la proporción de estos dentro de una mezcla de residuos sólidos.

La composición de los residuos sólidos (basura) es muy heterogénea y puede variar de la basura orgánica pequeña a la basura inorgánica muy grande. Kockel, (1995) ha propuesto que los residuos sólidos pueden representarse por dos componentes principales; una “matriz básica” que comprende partículas de granos medios y finos, más semejante a un suelo y cuyo comportamiento es friccional, y una “matriz reforzadora” con la presencia de constituyentes de tamaños grandes como plástico, papel y madera pueden tener un efecto reforzador y cuyo comportamiento es cohesional.

En la Tabla 3 se observa el rango de composición porcentual de residuos sólidos reportados por Landva y Clark, (1990).

Tabla 3. Composición de Los Residuos Sólidos

Componente (%)							
Papel y Cartón	Plástico	Vidrio	Metales	Textil	Cauchos y Cueros	Restos de Alimentos	Otros
20 - 55	2 - 15	2 - 5	6 - 15	0 - 4	0,4 - 15	9 - 62	-

Fuente: Comité Técnico TC 5 “Geotecnia Ambiental” de la ISSMGE “Stability of Municipal Solid Waste” por (Knochenmus et al., 1998).

3.3. Propiedades Mecánicas de los Residuos Sólidos

Las propiedades mecánicas a ser consideradas en el análisis de estabilidad de residuos sólidos (basura) son la resistencia al corte y la compresibilidad, las mismas son influidas por la composición de los residuos sólidos, así como el comportamiento mecánico de los componentes individuales que pueden ser significativamente diferentes que aquellos que normalmente constituyen los suelos. Por consiguiente, debe tenerse cuidado al aplicar teorías clásicas de mecánica de suelos a los residuos sólidos.

Un problema práctico, importante, es la dificultad para obtener muestras representativas de los materiales para los estudios, y la falta de métodos de ensayos universalmente aceptados y contrastados por la comunidad científica. Por lo tanto, los métodos que se emplean habitualmente se deben interpretar

con cautela y evaluando la aplicabilidad de las correlaciones utilizadas en el estudio de suelos a los residuos.

3.3.1. Resistencia al corte

La ecuación de Coulomb revisada por Terzaghi y Peck, (1967) que se usa para describir las condiciones de falla en suelos, puede usarse para obtener la resistencia al corte de la basura. El criterio puede expresarse como sigue:

$$\tau = c + \sigma_n \tan(\phi) \quad (1)$$

donde:

τ : resistencia al corte a lo largo de la superficie de falla

c : cohesión

σ_n : esfuerzo normal al plano de falla

ϕ : ángulo de fricción

Los parámetros geotécnicos “ c ” y “ ϕ ” de los residuos sólidos son normalmente determinados en ensayos de laboratorio como: corte directo, triaxial, edómetros de gran diámetro, y pruebas in situ tales como: ensayos de placa de carga, ensayos a escala real, prospecciones geofísicas o ensayos de penetración normal SPT.

La mayor limitación de los ensayos geotécnicos convencionales de laboratorio, se observa en que generalmente no son aplicables para los residuos sólidos, principalmente por el tamaño y heterogeneidad de los materiales.

Otra vía para la obtención de los parámetros geotécnicos, es realizar análisis en retroceso (back - analysis) a partir de campos de prueba y registros operacionales.

Por otro lado, el cuidado especial que debe tenerse al usar los parámetros geotécnicos obtenidos de análisis en retroceso (back-analysis), donde hay un número infinito de combinaciones de pares de " c " y " ϕ " que satisfacen el equilibrio, y son el resultado de tener una ecuación de equilibrio conocida (factor de seguridad igual a uno (1), condición de falla o carga última) con dos parámetros desconocidos " c " y " ϕ ". En la Figura 18, se puede observar lo disperso de los diferentes valores de " c " y " ϕ " obtenidos de back-analysis, esto hace difícil dibujar una envolvente representativa de los residuos sólidos.

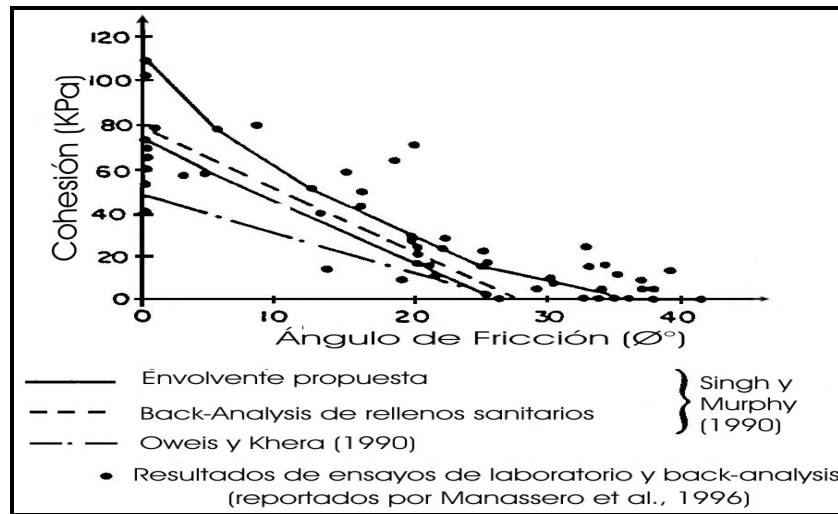


Fig. 18. Parámetros Geotécnicos de Residuos Sólidos (Basura) (Manassero et al., 1990)

Para superar esta limitación Howland y Landva, (1992) han propuesto una aproximación gráfica para analizar los resultados obtenidos de “back-analysis” para determinar la combinación de “c” y “ ϕ ” más probable. Esta consiste en trazar los pares “c” y “ ϕ ” calculados mediante “back-analysis” que satisfacen el equilibrio en una gráfica resistencia al corte contra el esfuerzo normal (ver Fig. 19). El valor de “c” calculado para $\phi = 0$ es en promedio la resistencia al corte movilizada a lo largo de la superficie de falla (punto A, ver Fig. 19). Para un material con una envolvente de resistencia lineal, el punto del par “c” - “ ϕ ” que satisfacen el equilibrio (punto B, Fig. 19) indica una medida del promedio de esfuerzo normal a lo largo de la superficie de falla (punto C, Fig. 19). El punto de cruce (punto B, Fig. 19) es considerado que es un datum consistente derivado de un caso individual de estudio. El punto de cruce

de cada caso de estudio mediante “back-analysis” se transfiere para en resumen trazar la resistencia al corte contra el esfuerzo normal para así obtener una envolvente de resistencia al corte de los residuos sólidos. El esfuerzo normal promedio basado en el punto de cruce es verificado estimando la localización de la superficie de falla y calculando del esfuerzo normal promedio basado en la densidad de la basura y cualquier carga aplicada.

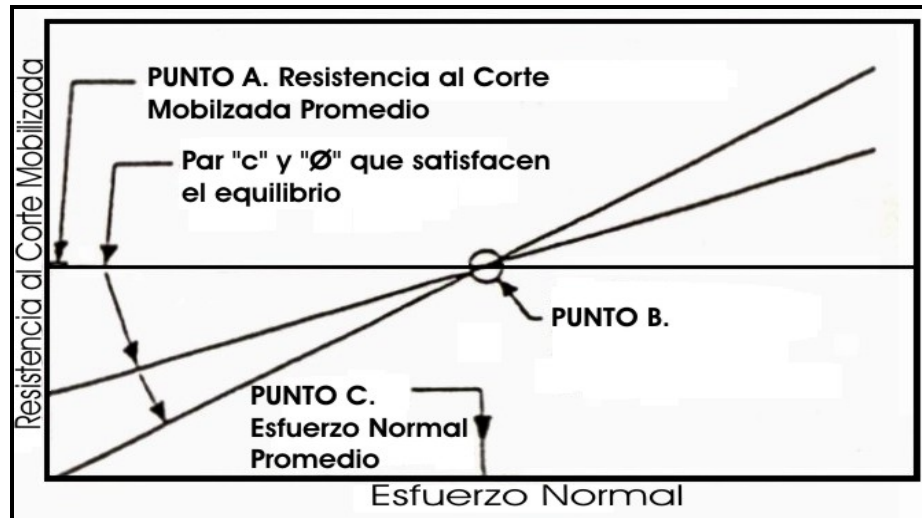


Fig. 19. Método de Análisis de los Parámetros Geotécnicos (back-analysis) de Residuos Sólidos (Basura) por (Howland y Landva, 1992)

El comportamiento mecánico de los residuos sólidos ha sido comparado al de la “tierra armada”, debido al efecto de los elementos fibrosos que se entrecruzan, actuando como refuerzos del material. En este sentido, se puede asumir que el ángulo de fricción interno “ ϕ ” es principalmente el resultado de la fricción generada entre los granos del componente de la

“matriz básica”, y sólo es influenciado ligeramente por la presencia de los componentes reforzadores (papel, plástico, etc). Por otro lado, la “matriz reforzadora” tiene un efecto significativo en la cohesión “c”.

Los parámetros geotécnicos de residuos sólidos (basura) reportados en la literatura, por varios autores se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros Geotécnicos de Residuos Sólidos (Basura)

Autor	c (Kpa)	ϕ (°)	Ensayo	Observaciones
Gay et al., 1981	7 28	42 26,5	Compresión simple	9 meses Basura fresca
Del Greco y Oggen, 1994	15,7 24	21 22	Corte directo	Baja densidad Alta densidad
Landva y Clark, 1986	16 – 19 16 23	38 – 42 33 24	Corte directo	Basura vieja + de 1 año Basura fresca
Landva y Clark, 1990	19 – 22	24 – 39	Corte directo	$\sigma = 480$ Kpa
Golder Associates, 1993	0	41	Corte directo	-
Richardson y Reynolds, 1991	10	18 – 43	In-situ, Corte directo	14 Kpa < σ < 38 Kpa
Cowland et al., 1993	10	25	Back-analysis	Trinchera profunda
Kavazanjian et al., 1995	-	25 - 34	Back-analysis	45 Kpa < σ < 180 Kpa

Fuente: Comité Técnico TC 5 “Geotecnia Ambiental” de la ISSMGE “Stability of Municipal Solid Waste” por (Knochenmus et al., 1998).

Ensayos de laboratorio de residuos sólidos (basura), realizados por varios autores han demostrado que los parámetros geotécnicos son afectados por la edad de la basura, composición, contenido de humedad, contenido orgánico, y factores físicos como la compactación y tamaño de las partículas.

Como resultado del entramamiento de las partículas, la resistencia al corte de la basura aumenta generalmente con el esfuerzo normal. Además, un aumento de la densidad con el tiempo puede mejorar los parámetros geotécnicos de la basura. Este último efecto puede compensarse, sin embargo, por la biodegradación de la basura que puede reducir los parámetros geotécnicos. El trabajo realizado por Brandl, (1995) ha demostrado que el ángulo de fricción para la basura compactada es significativamente más alto para la basura sin compactar, sobre todo para esfuerzos axiales bajos (ver Fig. 20). Mientras que ensayos triaxiales realizadas por Kockel, (1995) han demostrado un aumento de la cohesión con la edad de la basura, excepto la muy vieja (ver Fig. 21).

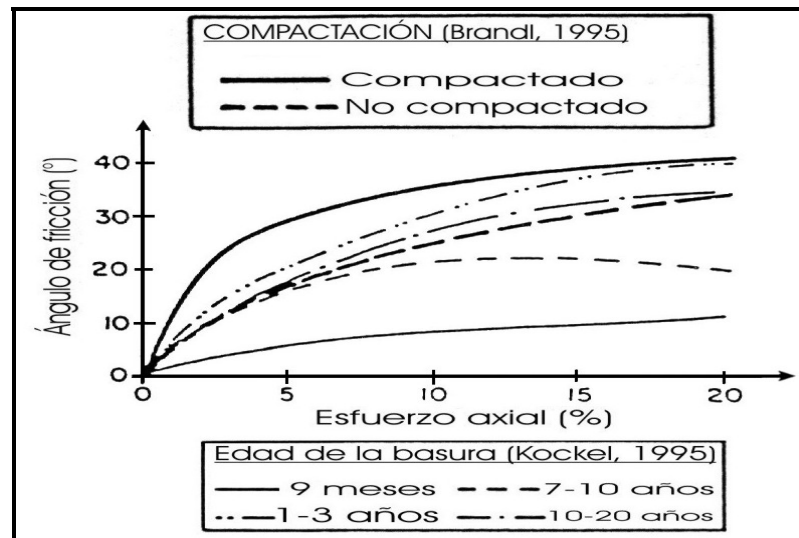


Fig. 20. Aumento del Ángulo de Fricción (ϕ) con la Compactación y la Edad (Brandl, 1995)

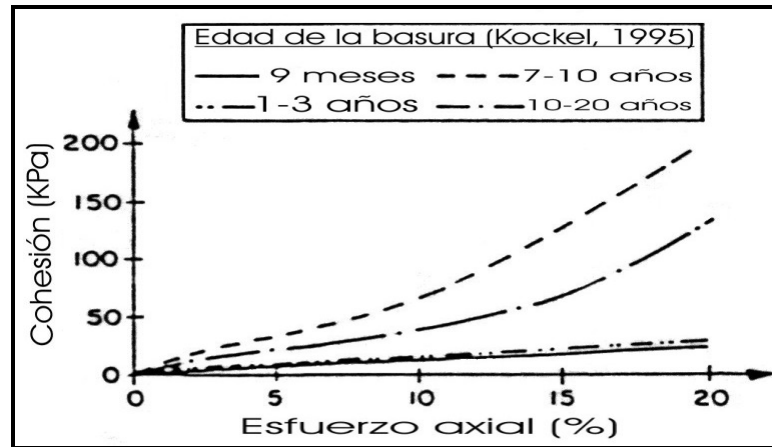


Fig. 21. Aumento de la Cohesión (c) con la Edad (Kockel, 1995)

Los ensayos triaxiales realizados por Gabr y Valero, (1995) reportaron una disminución de la cohesión para un aumento en el contenido de humedad (ver Fig. 22).

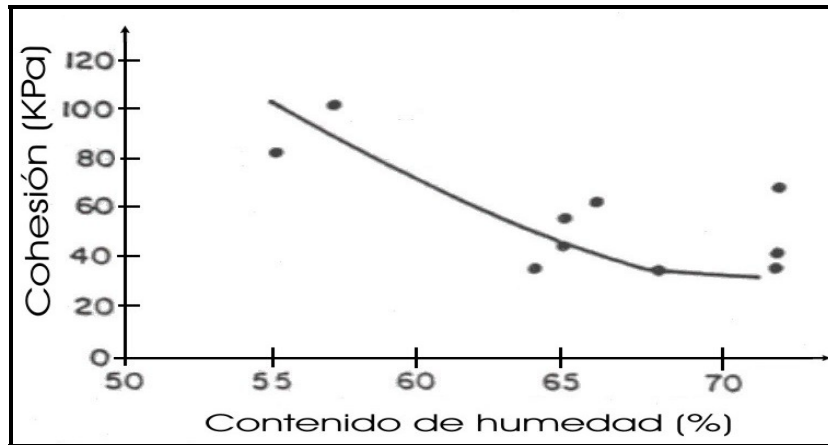


Fig. 22. Disminución de la Cohesión para un Aumento del Contenido de Humedad (Gabr y Valero, 1995)

3.3.2. Asentamiento

Los factores principales de asentamientos de rellenos sanitario son numerosos y pueden interrelacionarse (Edil et al., 1990). Ellos incluyen:

- Densidad y relación de vacíos
- La altura del relleno y la sobrecarga adicional
- Nivel de lixiviados y fluctuación del mismo
- Factores medioambientales como el contenido de humedad, temperatura y producción de biogás

Los mecanismos de asentamientos que gobiernan los residuos sólidos son complejos y numerosos, como resultado de la naturaleza heterogénea de la basura. Basado en varios mecanismos de asentamientos Manassero et al., (1996) han propuesto que el comportamiento del asentamiento de los residuos sólidos puede ser representada por las fases siguientes:

- La disminución de la relación de vacíos y compresión elástica que es el resultado de la distorsión mecánica, mientras se están doblando y aplastando las partículas bajo el mismo peso de la basura y materiales de cobertura.
- Cambios de volumen causados por la migración de partículas pequeñas hacia grandes vacíos.
- La conducta viscosa y fenómenos de consolidación que involucran el esqueleto sólido y los demás componentes.

- Asentamientos causados por la biodegradación de materiales orgánicos.
- Colapso causados por los cambios físico-químicos como la corrosión, oxidación y degradación de componentes inorgánicos.

El asentamiento total que ocurre en los rellenos de residuos sólidos está en el orden de 10 a 40% de la altura inicial de la celda que depende del tipo de residuo y el grado inicial de compactación (Edil et al., 1990; Leach y Goodger, 1990; Frantzis, 1991).

Los datos experimentales publicados han mostrado una similitud entre el comportamiento del asentamiento de los residuos sólidos y de los suelos. Sower, (1973) sugirió que el comportamiento del asentamiento de residuos sólidos es parecido a la turba.

3.4. Métodos para el Análisis de Estabilidad de Taludes

El estudio de la estabilidad de una masa de suelo se refiere a su seguridad contra la falla o deslizamiento. Los taludes de los terraplenes, diques y presas de tierra son algunos de los ejemplos donde la seguridad depende fundamentalmente de la estabilidad del terreno. Cuando la masa del suelo presenta una superficie inclinada, siempre existe el peligro que se produzcan movimientos y que el suelo del nivel superior descienda. Este deslizamiento es la consecuencia de la presencia de esfuerzos cortantes de considerable magnitud, que supera la resistencia al corte del suelo.

En el caso de taludes que involucran materiales blandos como suelos y residuos sólidos, la falla ocurre a lo largo de una superficie que se aproxima a una forma circular, no existe un patrón estructural definido y la superficie de falla es libre de encontrar la línea de menor resistencia a través del talud.

Las condiciones bajo las cuales, ocurre normalmente la falla circular, son cuando las partículas de suelo, roca o basura son muy pequeñas comparadas con el tamaño del talud y cuando además estas partículas no están bloqueadas en cuanto a su forma. En el caso de los rellenos sanitarios, los residuos sólidos tienden a comportarse como un suelo generando grandes fallas circulares (ver Anexo B).

La seguridad de un talud se expresa mediante el factor de seguridad (F) que es la razón entre la resistencia al corte disponible al esfuerzo de corte movilizado, y se define como:

$$F = \frac{\text{Resistencia al corte disponible}}{\text{Esfuerzo de corte movilizado}} \quad (2)$$

El resultado del análisis de estabilidad de taludes se expresa normalmente a través de éste concepto, así que cuando un talud es estable (las fuerzas resistentes son mayores a las fuerzas deslizantes) el factor de seguridad será mayor que uno (1) y si es un valor menor que uno (1) indica inestabilidad del talud.

En la práctica también se establecen los valores mínimos aceptables para el factor de seguridad de un talud, que se fijan entre 1,1 a 1,5; dependiendo del tipo de obra y considerando la menor o mayor incertidumbre asociada al conjunto de factores y parámetros, cuyos valores numéricos son introducidos en los cálculos de tal factor de seguridad.

Reagrupando la ecuación de Coulomb en función del factor de seguridad se tiene:

$$\tau = \frac{c}{F} + \frac{\sigma_n \tan(\phi)}{F} \quad (3)$$

La resistencia al corte disponible, resistente al deslizamiento es dependiente de la distribución de los esfuerzos normales (σ_n) a lo largo de la superficie de falla.

Los esfuerzos normales y sus diferentes distribuciones, que influyen sobre el factor de seguridad de taludes en suelos, han sido estudiados por Frohlich, quien encontró un límite inferior para todos los factores de seguridad, los cuales satisfacen la estática dada por la suposición que los esfuerzos normales están concentrados en un solo punto en la superficie de la falla.

Igualmente el límite superior es obtenido por la suposición que la carga normal es concentrada en dos extremos del arco de falla.

La naturaleza irreal de estas distribuciones de esfuerzos no es de mayor consecuencia, ya que el objeto del ejercicio en este caso, es simplemente determinar los extremos entre los cuales el factor de seguridad actual de un talud debe encontrarse.

En un ejemplo considerado por Lambe y Whitman, (1972), los límites superior e inferior para el factor de seguridad de un talud en particular corresponden a 1,62 y 1,27 respectivamente. El análisis del mismo problema por el método de Bishop simplificado de las rebanadas da un factor de seguridad de 1,30, el cual sugiere que el factor de seguridad obtenido puede ser razonablemente cercano a la solución del límite inferior.

Taylor, (1948), comparó los resultados de un gran número de análisis de espirales logarítmicas con resultados cercanos al límite inferior y encontró que la diferencia es despreciable. En base a esta comparación, Taylor concluyó que la solución del límite inferior da un valor del factor de seguridad, el cual es suficientemente exacto para la mayoría de los problemas prácticos que involucran una falla circular simple de taludes.

Castillejo, (1993), indica que otros autores han realizado verificaciones similares a las realizadas por Taylor y obtuvieron las mismas conclusiones.

3.4.1. Método de equilibrio límite

El análisis de estabilidad de taludes en rellenos sanitarios es evaluado por procedimientos geotécnicos convencionales, es decir, basado en los conceptos de equilibrio límite utilizados para los suelos. La suposición básica del método de equilibrio límite es satisfacer el criterio de falla de Coulomb a lo largo de la superficie de falla impuesta la cual puede ser una línea recta, un arco circular, una espiral logarítmica, o cualquier otra superficie irregular. Además, se asume que la masa sobre la superficie de deslizamiento se mueve como un cuerpo rígido.

En los sitios de disposición de residuos sólidos, la fuerza que tiende a causar el desarrollo de una superficie de deslizamiento son el peso de la basura y del lixiviado, mientras que la fuerza resistente es la resistencia al corte. Las fuerzas sísmicas podrían afectar la estabilidad ya que tienden a disminuir la resistencia al corte.

❑ Superficie de deslizamiento circular (Método de las rebanadas)

Este es un método gráfico, desarrollado por Fellenius en el año 1936, que permite calcular la estabilidad de taludes en suelos cuya resistencia depende del esfuerzo normal. Para ello se debe calcular el esfuerzo normal efectivo a lo largo de la superficie de falla, dividiendo el área en secciones o rebanadas verticales (ver Fig. 23). Estas rebanadas pueden tener anchos iguales o diferentes, y el área

de cada una queda limitada por el perímetro del talud en su parte superior, y por la curva de falla asumida en su extremo inferior.

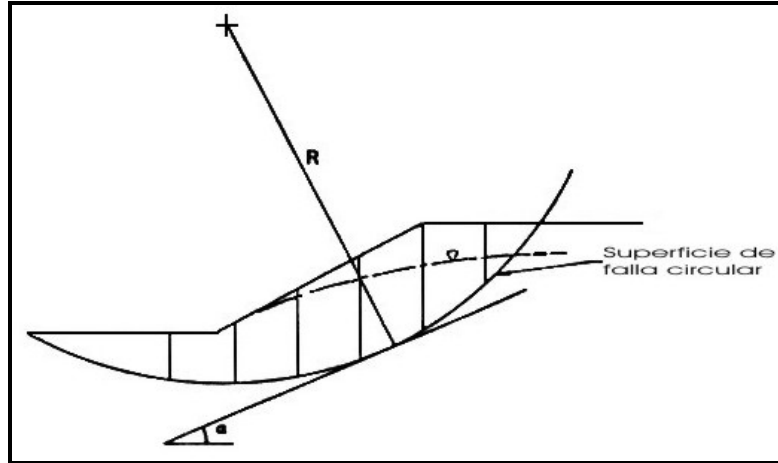


Fig. 23. Superficie de Falla Circular (Método de las Rebanadas)

Para aplicar el método, se debe dibujar a escala el perfil del talud, y luego adoptar una curva de falla, que por lo general es un arco de circunferencia.

Se asume que cada rebanada es independiente de las restantes y no existen esfuerzos cortantes entre si. Además, las presiones que ejercen las secciones adyacentes a cada lado de las rebanadas, son iguales.

El peso correspondiente a cada rebanada se obtiene de multiplicar el peso específico del suelo por el volumen de la misma, tomando un ancho unitario normal al plano del dibujo. Se analiza así un problema

tridimensional como plano. Cada sección se analiza separándola del conjunto, como se puede observar en la Figura 24.

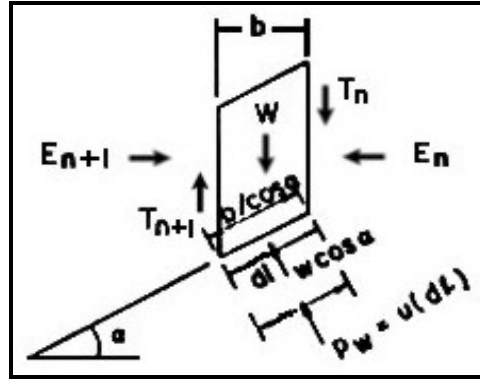


Fig. 24. Sección de una Rebanada

El peso propio de la rebanada da por resultante la carga “W”, que se descompone en dos fuerzas: $W \cos(\alpha)$, perpendicular a la base y $W \sin(\alpha)$, paralela a ella.

Cuando las secciones se adoptan un ancho reducido, la curva de la superficie de falla puede sustituirse por una recta quebrada, que varía de inclinación para cada rebanada. La componente $W \sin(\alpha)$ y la presión de poros “u”, es la que tiende a hacer deslizar la masa del talud, mientras que la cohesión “c” y la fricción interna “ ϕ ” del suelo lo mantienen en su posición. Se cumple que el factor de seguridad es:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \{c.b_i \sec(\alpha_i) + [W_i \cos(\alpha_i) - u_i.b_i \sec(\alpha_i)] \tan(\phi)\}}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin(\alpha_i)} \quad (4)$$

A cada curva asumida corresponde un factor de seguridad. El método consiste en tantear con diferentes curvas, que serán los arcos de circunferencia de falla. La superficie crítica de falla es aquella que obtenga un menor factor de seguridad, para la cual existe la mayor probabilidad de deslizamiento de la masa.

□ Método de Bishop (versión simplificada)

En este método más moderno se supone que las fuerzas que actúan sobre las caras laterales de una rebanada cualquiera tienen una resultante nula en dirección vertical. Resultando el factor de seguridad:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \{[c.b_i + (W_i - u_i.b_i) \tan(\phi)] \sec(\alpha_i) / m_a\}}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin(\alpha_i)} \quad (5)$$

$$m_a = \left[1 + \frac{\tan(\alpha_i) \tan(\phi)}{F} \right] \quad (6)$$

Debe utilizarse un valor del factor de seguridad para expresar las fuerzas tangenciales, y se supone que este factor de seguridad es igual al “F” definido por la ecuación (4), se realizan varios tanteos ya que “F” interviene en ambos miembros de la ecuación (5), sin embargo, la convergencia de los tanteos es muy rápida.

4. MANEJO DEL PROGRAMA SLOPE/W

El tener al alcance las herramientas de simulación necesarias para el análisis y diseño de la estabilidad de taludes, ha hecho que los programas de computación en esta área sean cada día más sofisticados siendo capaces de resolver los problemas de estabilidad de taludes por medio de análisis determinísticos y análisis probabilísticos.

En este orden de ideas, se presentaran en los capítulos VI y VII, los resultados del diseño determinístico de los taludes analizados; obtenidos con el programa de computación “SLOPE/W” versión 4.0, que es un programa integrado de estabilidad de taludes.

En este aparte, se resumen solamente las principales peculiaridades del uso del programa “SLOPE/W”, pero no se pretende describir detalladamente como debe utilizarse, ya que para más información sobre su capacidad para realizar actividades relacionadas con el análisis de la estabilidad de taludes debe utilizarse el Manual del Usuario, de manera de ir adquiriendo la destreza en la utilización de las herramientas que ofrece dicho programa.

El programa “SLOPE/W”, como se ha expresado anteriormente, es un importante software que se utiliza para analizar la estabilidad de taludes; la validez de los resultados obtenidos usando en este programa han sido verificados por diferentes empresas dedicadas a los problemas relativos de estabilidad de taludes. Entre las principales características del programa “SLOPE/W” se tienen:

- Una rápida velocidad de respuesta en las funciones que conforman el paquete.
- Una alta precisión numérica, obteniéndose convergencia aún en situaciones de condiciones críticas.
- Una completa representación de los diferentes elementos que conforman la estabilidad de un talud (presión de poros, cohesión, ángulo de fricción, coeficiente sísmico, etc).
- Flexibilidad para modificar las variables en la simulación probabilística.
- Factibilidad de realizar, a partir de la información de las características que conforman un análisis de estabilidad de taludes, diseños de estabilidad determinísticos (factor de seguridad) y diseño de estabilidad probabilística (probabilidad de falla) manteniendo una completa correlación con el programa.

En particular, las características más importantes acerca del uso del análisis determinístico de estabilidad de taludes efectuado con el software SLOPE/W versión 4.0 son las siguientes:

El SLOPE/W calcula el factor de seguridad de todas las superficies de falla analizados y determina la superficie crítica de la falla siguiendo el análisis

determinístico. La operación de este complejo software, es facilitada por la orientación hacia el uso de ventanas.

El inicio del programa “SLOPE/W” versión 4.0 es presentado por la ventana que se indica en la Figura 25.

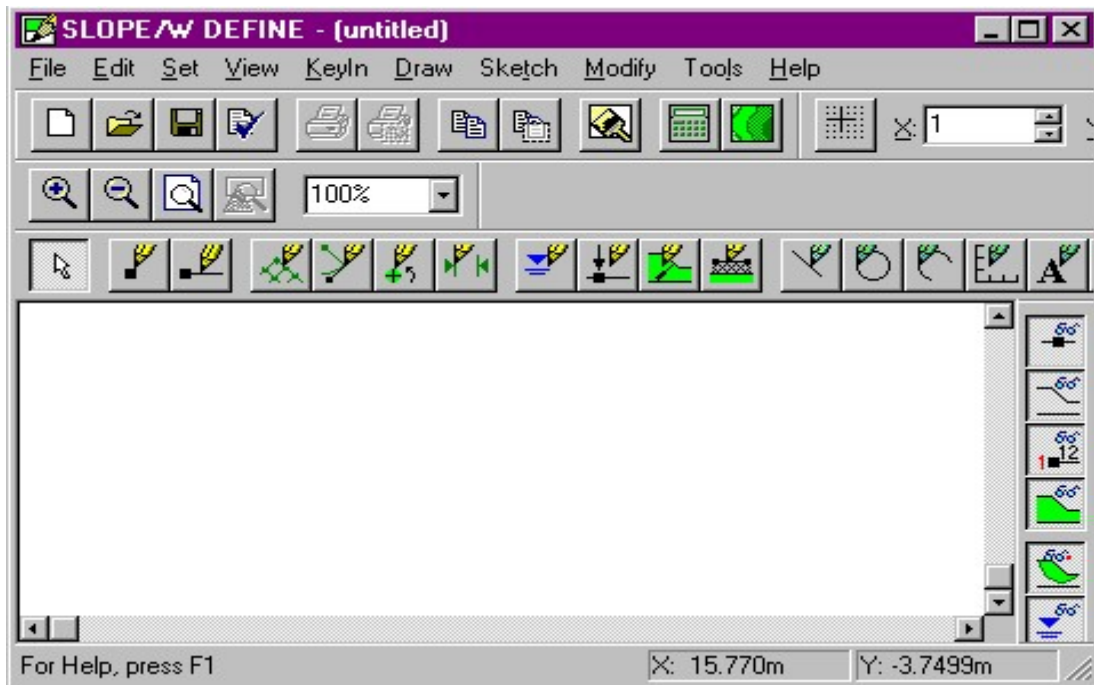


Fig. 25. Ventana Principal

En la figura anterior se observa :

La hoja de trabajo, donde se puede analizar la estabilidad del talud bajo estudio, y la barra de herramientas, donde se encuentran las funciones y los íconos que permiten acceder a las diferentes operaciones que el modelo requiera. Por ejemplo:



SET: en el menú *SET* se despliega información a cerca del tamaño de las páginas de trabajo para definir un problema, también se selecciona el tipo de escala (pies, metros, milímetros y pulgadas).

Se crea los puntos de la malla para la realización de los dibujos, se incrementa o se reduce el tamaño de los mismos y se define el tamaño de la escala de los ejes con su incremento.



VIEW: en el comando *VIEW* se identifica el método usado para la estabilidad del talud, los valores de factor de seguridad y las fuerzas de las rebanadas. Se da información sobre el punto seleccionado, sobre las propiedades del suelo seleccionado o la línea del suelo. Identifica que elementos se desplegarán en el dibujo y vuelve a dibujar el problema cuando no puedan dibujarse objetos completamente en la ventana.

PREFERENCES: esta opción se encuentra dentro del comando *VIEW* y cumple con la función de identificar que geometría del suelo, números de puntos y líneas, malla de elementos finitos, color de los suelos, superficie de deslizamiento, cargas de anclaje,

etc. También con este comando colocamos el tamaño de letra y número de información que aparece en el dibujo.



KEYIN: la función *KeyIn* identifica el problema y da información sobre las opciones seleccionadas (títulos, comentarios, etc). Aquí, se selecciona el método de análisis, especificando la probabilidad, convergencia, superficie de deslizamiento, presión de poros, etc; se definen las propiedades del suelo y la relación entre las fuerza del suelo y el ángulo de inclinación de la rebanada; se coloca las coordenadas de cada punto del talud, los límites para cada suelo, se establecen los coeficientes horizontales y verticales que representan una fuerza sísmica, y las líneas presión.



DRAW: la función *DRAW*, es un comando de dibujo despliega una superficie de deslizamiento y los factores de seguridad asociados, dibuja y etiqueta los contornos para crear un cuerpo libre, hace el diagrama de polígonos de fuerza, y traza los gráficos del parámetro calculado a lo largo de la superficie.



SOLVE: se pulsa el botón de *SOLVE* para empezar a procesar la salvación determinística. Cuando el proceso se termina, aparece en la ventana principal el factor de seguridad mínimo para cada método (Ordinario, Bishop y Janbu).



CONTOUR: se pulsa el botón *CONTOUR* para ver el resultado de la solución determinística y para analizar el problema gráficamente.

DRAW CONTOURS: esta opción se encuentra dentro del menú *DRAW* y es muy importante ya que es aquí donde puede colocarse el número de niveles de los factores de seguridad a cada punto del centro de la malla de la superficie de deslizamiento para luego dibujarlos. El número de contornos especifica el número de niveles el cual debe ser un número positivo o cero. Si es cero, no se generan líneas. El Draw Contours también despliega los datos del mínimo y el máximo factor de seguridad para el método seleccionado. Otra forma de llegar a este comando es a través del siguientes icono:



MODIFY: mueve, reacomoda o anula cualquier grupo de objetos seleccionados como puntos, líneas de suelo, etc; o para cambiar artículos de texto o en el dibujo, cambios en la clasificación, nombre del archivo, etc.

La siguiente secuencia de figuras muestra la forma como el SLOPE/W va realizando el análisis de estabilidad de un talud cualquiera.

La Figura 26 muestra una representación gráfica del diseño de un talud por medio del SLOPE/W.

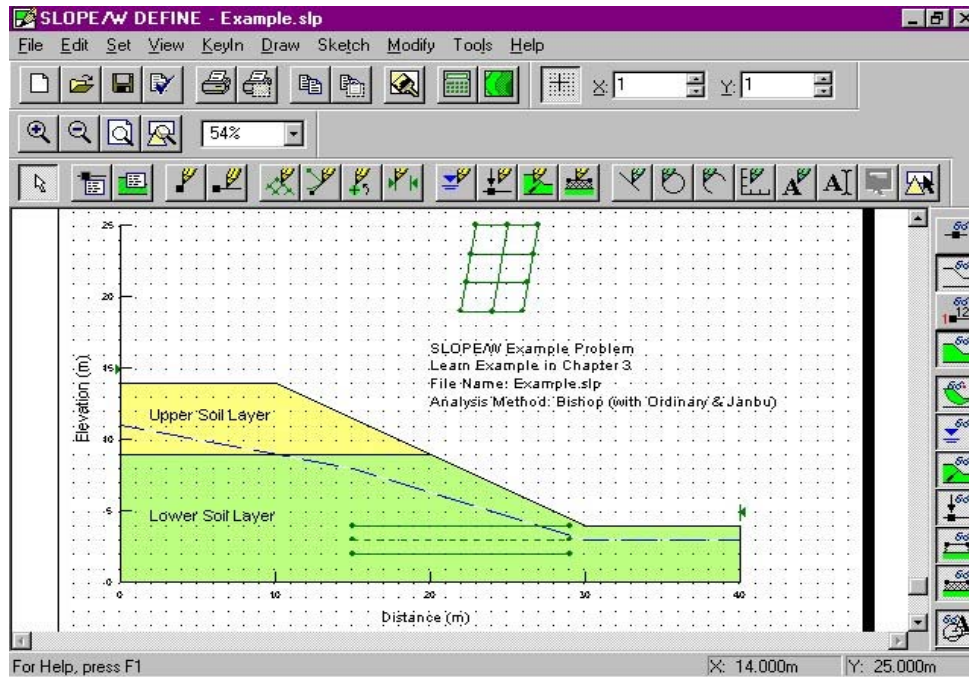


Fig. 26. Definición del Problema

La Figura 27 muestra el despliegue de la ventana principal de *SOLVE* con un ejemplo de los resultados del factor de seguridad para un talud dado.

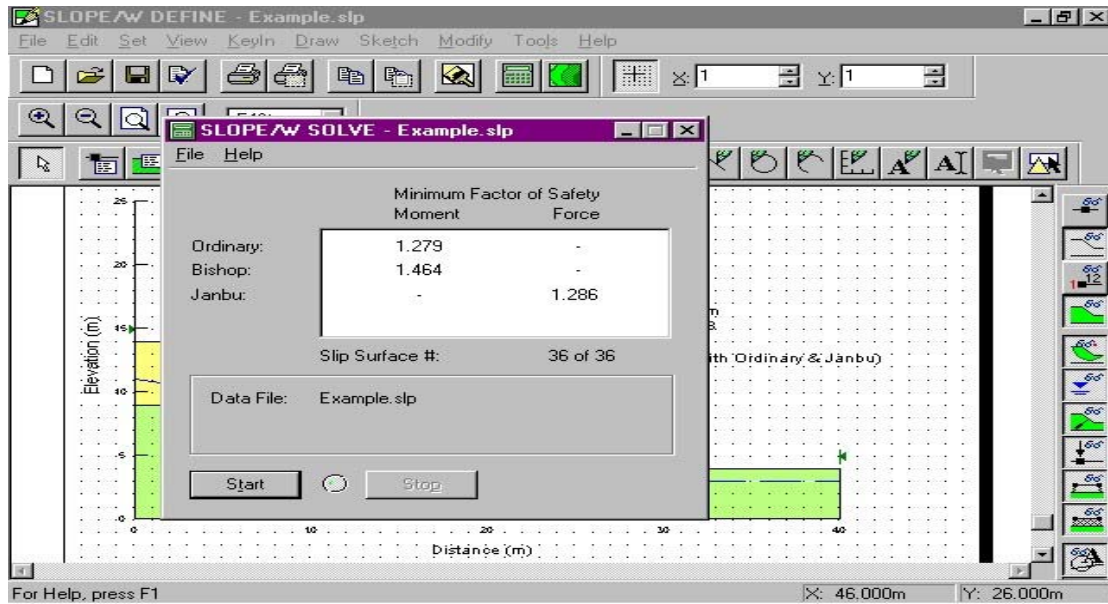


Fig. 27. Solución del Problema

Luego, la Figura 28 representa en la malla de la superficie de deslizamiento el resultado del factor de seguridad mínimo por el método de Bishop para un ejemplo dado.

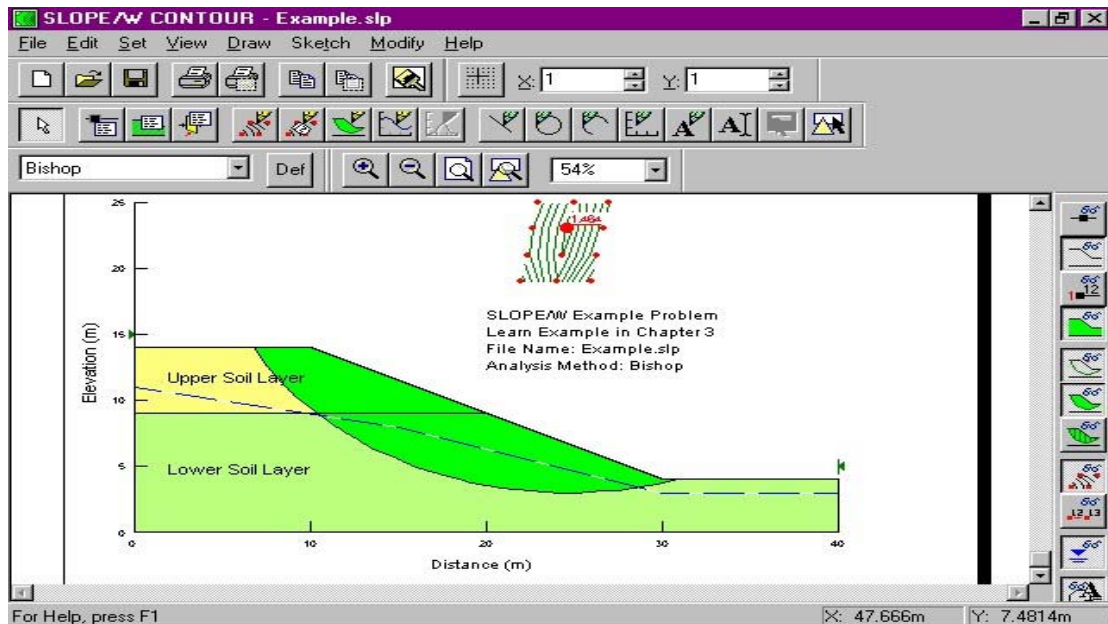


Fig. 28. Vista de la Solución del Problema

En el programa SLOPE/W la variabilidad de los parámetros de entrada se asumen normalmente distribuidos y entre los más importantes que pueden considerarse con variabilidad tenemos:

- Cohesión y ángulo de fricción
- Coeficientes sísmicos horizontales y verticales
- Presión de poros

4.1. Cohesión y Fricción

SLOPE/W prevé un total de trece criterios de resistencia del terreno y el que se utiliza en los capítulos VI y VII para los diseños determinísticos es el de Mohr-Coulomb, basado en el uso de cohesión y fricción. Las propiedades de los suelos requeridos para este tipo de modelo de fuerza se dividen en dos parámetros: parámetros básicos y parámetros avanzados. Los parámetros básicos son las propiedades requeridas para que el modelo del suelo sea válido. Los parámetros avanzados son las propiedades adicionales que modifican el modelo del suelo.

Los parámetros básicos se deben definir para que el modelo del suelo sea válido. Estos parámetros son: peso unitario total de la unidad de suelo, el componente de cohesión de la fuerza de resistencia, el ángulo de fricción del suelo.

Los parámetros avanzados de las propiedades del suelo no necesariamente deben ser especificados. Estos parámetros son: peso unitario sumergido del suelo, función anisotrópica de resistencia, etc.

En los diseños determinísticos que se realizan en los capítulos VI y VII, los parámetros básicos definidos para que el modelo de suelo sea válido son cohesión y fricción. Dichos parámetros se introducen en el comando KeyIn: KeIn Soil Properties el cual despliega la siguiente ventana:

Soil	Strength Model	Description	Color
1	Mohr-Coulomb	Upper Soil Layer	Yellow
2	Mohr-Coulomb	Lower Soil Layer	Green
3	Bedrock	Bedrock	Green

2 | Mohr-Coulomb | Lower Soil Layer | Set...

Basic Parameters

Unit Weight: 18 | Phi: 25 | Cohesion: 10

☐ **Advanced Parameters**

Unit Wt. above WT: 0 | Phi B: 0 | Anisotropic Fr.: 0

Copy | Insert | Delete | OK | Cancel

Fig. 29. Entrada de los Parámetros Básicos

KEYIN SOIL PROPERTIES: esta opción se encuentra dentro del comando *KeyIn* y permite especificar las propiedades del suelo para cada línea del mismo. En esta ventana también se especifica el número, el modelo de fuerza, la descripción y el color que le corresponde a cada suelo. Sin embargo, dentro de la simulación con el programa SLOPE/W podemos observar que en el cálculo del factor de seguridad no es incluida la carga sísmica, presión de

poros ni líneas de presión (sobrecarga), por lo que debe especificarse si se desea incluir tales variables.

4.2. Cargas Sísmicas

El SLOPE/W, a través del comando *KeyIn*, simula con fuerzas pseudo-estáticas los efectos de cargas sísmicas debidas a sismos o aceleraciones de un terremoto. Estas cargas sísmicas se establecen a través de los coeficientes sísmicos verticales y coeficientes sísmicos horizontales.

El coeficiente sísmico vertical puede especificarse como cero (0), valores positivos o negativos. Un coeficiente positivo significa que la fuerza vertical se aplica en la misma dirección que el peso de la rebanada, mientras que un coeficiente negativo significa que la fuerza vertical se aplica en la dirección opuesta al peso. Dependiendo de las propiedades de fuerza de la rebanada y la geometría del talud, un aumento de peso de las rebanadas no siempre puede disminuir el factor de seguridad. Por consiguiente, se debe probar el análisis con coeficientes sísmicos verticales positivos y negativos determinando el factor crítico de seguridad.

El coeficiente sísmico horizontal sólo puede especificarse como cero (0) o un valor positivo. Un coeficiente horizontal positivo significa que la fuerza sísmica adicional está actuando horizontalmente en la misma dirección del movimiento del talud.

Cuando se aplica una fuerza sísmica, es práctico probar con una rango de coeficientes sísmicos (horizontal y vertical) y graficar el factor de seguridad versus los coeficientes sísmicos, como el ejemplo mostrado en la Figura 30.

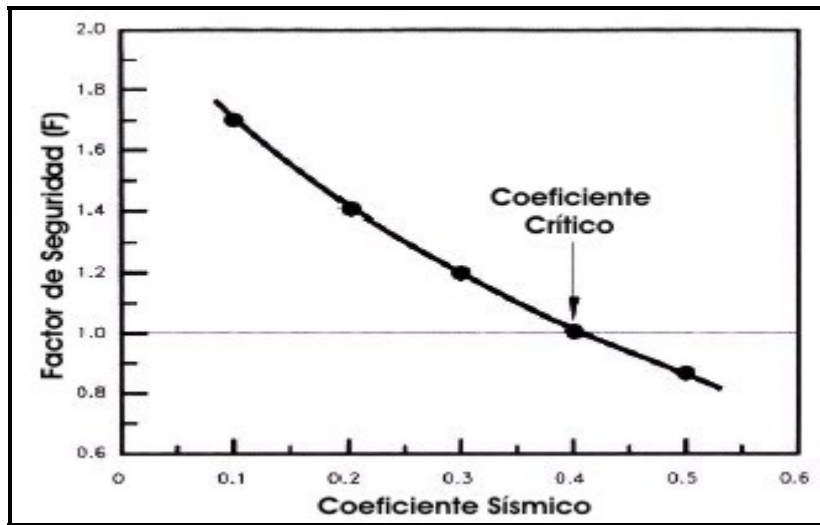


Fig. 30. Variación del Factor de Seguridad con el Coeficiente Sísmico

De aquí se puede concluir que los resultados son razonables cuando la relacion resultante muestra que a medida que el coeficiente sísmico va aumentando se produce una disminución gradual del factor de seguridad.

Para definir una carga sísmica dentro del SLOPE/W se debe escoger el comando *KeyIn Load*: esta función se encuentra dentro del comando *KeyIn* y aquí es donde se coloca el valor del coeficiente horizontal y vertical de la carga sísmica.

4.3. Presión de Poros

La presión de poros se especifica usando el comando KeyIn / KeyIn Análisis Control, donde se define la presión de poros según el método seleccionado; cuando se escoge este comando la siguiente ventana aparece:

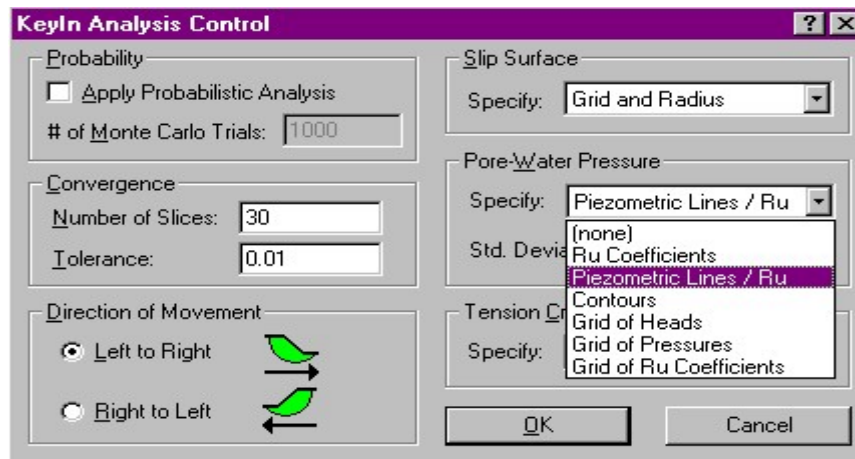


Fig. 31. Definición de la Presión de Poros

KEYIN ANÁLISIS CONTROL: Esta función se encuentra dentro del comando *KeyIn* y es aquí donde se coloca la opción a escoger para realizar el análisis de la presión poros.

En la ventana anterior, como se puede observar, se escoge el tipo de análisis de presión de poros que se desea utilizar entre una gama de posibilidades: R_u coefficients, piezometric lines/ R_u , pore-water pressure contours, grid of heads, grid of pressures, grid of R_u coefficients.

En los diseños determinísticos que se realizan en los capítulos VI y VII se usa la opción piezometric lines/ R_u .

Piezometric lines/ R_u : cuando se especifica una línea piezometrica, SLOPE/W calcula la presión de poros como la distancia vertical del centroide de la base de la rebanada hasta la línea piezometrica multiplicada por el peso unitario del agua

4.4. Líneas de Presión (Sobrecarga)

Las líneas de presión se especifica usando el comando KeyIn / Pressure Lines, donde se define si la presión se va a aplicar en un punto o en un área; cuando se escoge este comando la siguiente ventana aparece:

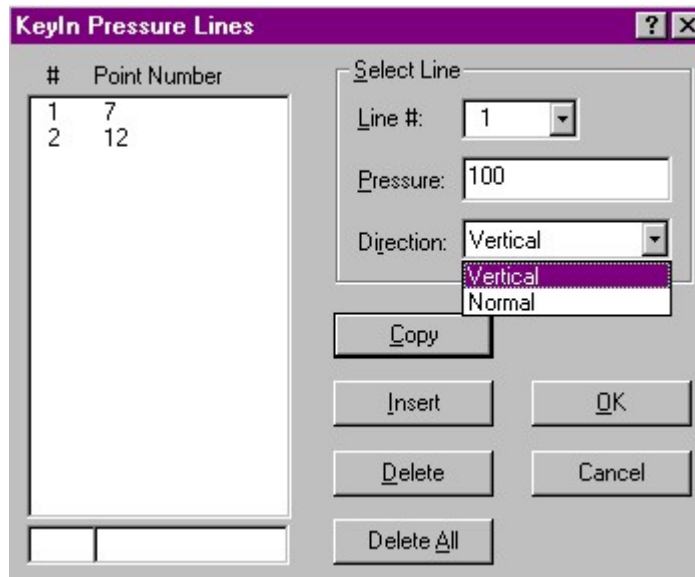


Fig. 32. Magnitud y Dirección de la Presión (Sobrecarga)

KEYIN PRESSURE LINES: Esta función se encuentra dentro del comando KeyIn y es aquí donde se coloca la magnitud de la presión y la dirección vertical o normal a la superficie de suelo.

CAPITULO V

EL RELLENO SANITARIO LA BONANZA

1. EVALUACIÓN DEL RELLENO SANITARIO LA BONANZA

1.1. Generalidades

En la siguiente sección se hará un análisis descriptivo del funcionamiento del Relleno Sanitario La Bonanza, considerando no sólo los aspectos relacionados al manejo de residuos sólidos y operatividad, sino también como en todo proyecto de ingeniería, los posibles impactos sobre el ambiente.

1.2. Descripción del Sitio de Ubicación

El Relleno Sanitario La Bonanza utiliza como método de vertido de residuos el de Vaguada/Depresión, el cual se va perfilando y modelando hasta convertirlo en celdas.

La Bonanza posee un área de 180 hectáreas, en las cuales se han diseñado celdas para la colocación de los residuos sólidos, las cuales son divididas por medio de diques; actualmente se encuentra en fase de relleno las celdas 2 y 3 (ver Anexo C).

El proyecto de desarrollo del Relleno Sanitario La Bonanza pretende extender la construcción de celdas para residuos adicionales hacia el este, debido a que en la actualidad las terrazas norte, sur-oeste y centro-este, se encuentran rellenas de residuos pero de manera directa sobre el terreno y pertenecen al método de deposición de residuos utilizada anteriormente, antes de la entrega en concesión del manejo del Relleno Sanitario La Bonanza a la Empresa

Cotecnica La Bonanza C.A en 1998 y la cual contiene cantidades muy altas de residuos para ser removidos de la zona.

La condición metanogénica estable en la cual se encuentra la terraza norte produce grandes cantidades de metano y dióxido de carbono a partir de los ácidos orgánicos procedentes de la descomposición de la materia orgánica. El gas producido por esta terraza es transportado por medio de tuberías hacia los quemadores, donde su combustión es oportunamente controlada (ver Fig. 33).



Fig. 33. Vista de los Quemadores en la Terraza Norte

Los lixiviados se colectan en lagunas para estimular el crecimiento de microorganismos y acelerar el proceso de digestión. Actualmente el relleno cuenta con dos lagunas para los lixiviados, la laguna vaguada este (ver Anexo A, sectores H10, I10, J10) y la laguna oeste (ver Anexo A, sectores C10, C11, D10, D11).

La laguna norte es utilizada como reservorio de agua, para cualquier uso requerido en las instalaciones, como regar las gramíneas sembrada en la terraza norte; en caso de un incendio, llenado de camiones cisternas para el regadío de las vías de acceso que no están asfaltadas (ver Anexo A, sectores K4, L5).

En el centro se encuentra ubicado el taller mecánico, para el mantenimiento y reparación de la maquinaria pesada utilizada, como camiones, palas mecánicas, tractores, compactadoras, motoniveladoras, entre otras, y un trailer para los empleados que trabajan por turnos (ver Anexo A, sectores J7, K7).

Al este de la celda 1 se encuentran la plataforma de reciclaje que es el único lugar permitido para la permanencia de las personas que trabajan como recicladores, dentro de las instalaciones del relleno sanitario y las cuales se encuentran debidamente identificados (ver Anexo A, sectores Ñ7, O7).

Más hacia el este se encuentra una zona para el reciclaje de chatarra tales como calentadores de agua, metales, neveras, lavadoras, entre otros. Muy cercano a la zona de reciclaje de chatarra se encuentra el área de recicladores, destinada para el aseo personal de los recicladores (ver Anexo A, sectores T7, U7).

En la vía principal de acceso a las instalaciones del relleno, se encuentra una romana donde se pesan los camiones a la entrada y salida para establecer controles de la cantidad de desechos que ingresan y salen del relleno y el lugar de procedencia (ver Anexo A, sector Q6).

Adicionalmente, una vez descargado los desechos, y en la misma vía principal de acceso a la salida se encuentra el lava chasis, que consiste en una ducha rápida por debajo del camión para ser librado de la mayor cantidad posible de desecho y polvo (ver Anexo A, sector R6).

La empresa habilitó el Aula Ambiental o Mirador ubicada en el límite norte de las instalaciones del relleno sanitario, y cuyo objetivo principal es poseer un lugar en el cual se puedan dictar charlas o visitas guiadas a escuelas, empresas y grupos que deseen conocer acerca del manejo y funcionamiento del Relleno Sanitario La Bonanza (ver Anexo A, sectores O5, O6).

La oficina principal ubicada al nor-este de la zona cuenta con un equipo interdisciplinario conformado por ingenieros de distintas áreas y un personal técnico capacitado para el desarrollo del proyecto, además, la Guardia Nacional y el personal de vigilancia de la empresa ejercen un estricto control para el acceso a las instalaciones y cuya norma de seguridad principal, además de identificarse y contar con la compañía de personal autorizado es la utilización de casco y chaleco industriales (ver Anexo A, sectores Q6, R6).

1.3. Funcionamiento y Proyectos de Desarrollo

En la actualidad el relleno recibe aproximadamente 4.000 toneladas por día de residuos sólidos recolectados en el Área Metropolitana de Caracas y en ciudades cercanas al mismo. Los residuos provienen de los municipios de Caracas (Libertador, Chacao, Sucre, Baruta y Hatillo) y de los Valles de Tuy (Cristóbal Rojas, Simón Bolívar, Tomás Lander, Urdaneta y Paz Castillo), cuyo manejo está cedido en concesión a la compañía Cotecnica. Los residuos provenientes de los Municipios Libertador y Baruta son compactados en la estación de transferencia Las Mayas, y los demás provenientes de los municipios restantes llegan directamente al relleno sanitario.

1.3.1. Preparación de la celda

Previo a la colocación de los residuos sólidos en el relleno se excava y se prepara el fondo y las superficies laterales del relleno, una vez preparado el fondo para proporcionar drenaje al lixiviado, se perfilan los taludes laterales de la celda con una pendiente 2:1, y se coloca la geomembrana y seguidamente el geotextil para su protección (ver Figs. 34 y 35).



Fig. 34. Perfilado del Talud



Fig. 35. Colocación de la Geomembrana y Geotéxtil en el Talud

La impermeabilización del fondo de la celda consiste en colocar seis (6) capas de arcilla de 25 cm de espesor cada una, y son compactadas con un rodillo pata de cabra, seguidamente se colocan la geomembrana y el geotéxtil (ver Figs. 36 y 37).



Fig. 36. Compactación de las Capas de Arcilla

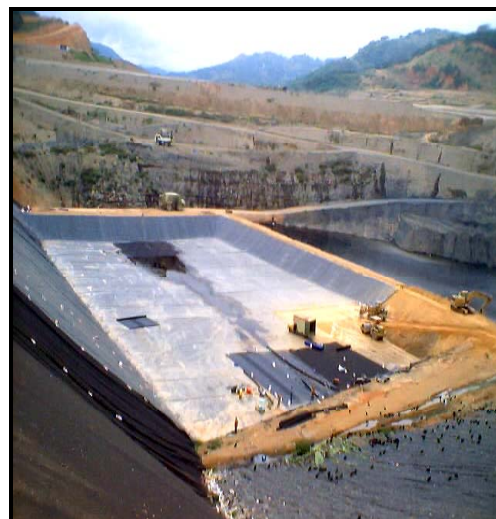


Fig. 37. Colocación de la Geomembrana y Geotéxtil en el Fondo de la Celda

La siguiente capa está compuesta por gravas de un espesor de 50 cm que actúan como filtro de los lixiviados en el fondo de la celda, deben ser silíceas y redondeadas de manera que no punzonen los geosintéticos, ni sean atacados por el lixiviado (ver Fig. 38), en el centro de la celda se coloca una tubería de 8” de diámetro para la recolección de los lixiviados.

El caucho proveniente de los vehículos y que no es reciclable, se utilizan como protección adicional de la geomembrana de los taludes laterales de la celda, porque genera zonas de baja presión en las cuales se acumula el gas y que acelera el proceso de descomposición de los desechos (ver Fig. 39).



Fig. 38. Colocación de Capa de Grava



Fig. 39. Colocación de Cauchos para la Protección de la Geomembrana

1.3.2. Colocación de los residuos sólidos

Las operaciones pueden dividirse principalmente en:

- Control de peso.
- Reciclaje.
- Disposición final.

Los camiones se pesan antes de entrar al relleno, los residuos que transportan pueden ser descargados directamente en las celdas donde las maquinarias lo remueven para su disposición final (ver Fig. 40), o en la plataforma de reciclaje, esta labor es realizada por personas ajenas al personal de las instalaciones y que se denominan recicladores las cuales se encuentran debidamente identificadas tanto en su vestimenta como con un carnet que le permite acceder a dicha actividad, y que permite mantener el control respecto a la cantidad de personas que acceden al lugar después de la revisión por parte de los recicladores, los residuos son transportados en camiones marca EUCLID cuya capacidad es de 23 m³ a las celdas para su disposición final (ver Fig. 41).



Fig. 40. Descarga de Residuos Sólidos Directamente en la Celda

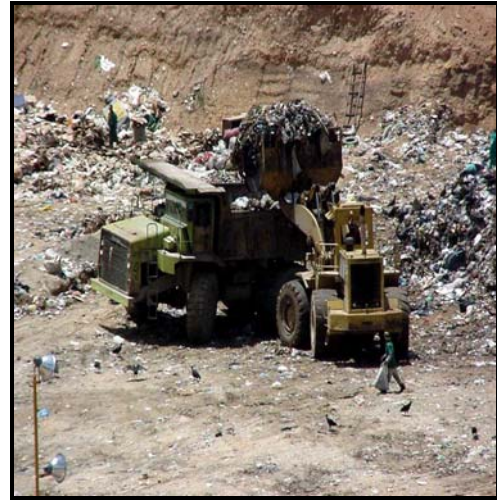


Fig. 41. Reciclaje, Carga y Acarreo de Residuos Sólidos hacia la Celda

La primera capa de 2 m de residuos sólidos, que se coloca directamente encima de la capa de grava no se compacta, luego se va rellenando la celda esparciendo capas de residuos de 30 cm de espesor aproximadamente y se compacta con un compactador de rellenos sanitarios Caterpillar Modelo 826G, el número de pasadas es cuatro (4), este procedimiento se realiza hasta llegar a una altura de 5 m (ver Fig. 42), luego se alterna con una capa de recubrimiento “suelo” de 15 cm de espesor la cual es esparcida con un tractor de la Caterpillar modelo D6N, y luego es compactada con un rodillo liso vibratorio entre 2 y 3 pases (ver Fig. 43). La compactación tanto de los residuos sólidos como del suelo es siempre realizada en dirección a la pendiente del talud de la celda.



Fig. 42. Esparcimiento y Compactación de Residuos Sólidos



Fig. 43. Colocación de la Capa de Recubrimiento

1.3.3. Proyectos de desarrollo

Anteriormente y donde en la actualidad se ubican las celdas, correspondía al cauce natural de la quebrada, razón por la cual las aguas por escorrentía natural buscan acumularse allí y la presencia de dicha celda incrementa dicha situación, por lo cual se pretende crear un sistema de canales tipo cuneta para desviar dichas aguas hacia la laguna norte y aumentar la cantidad de agua como reserva.

Se encuentra en proyecto a futuro la conexión de la terraza sur al sistema de conexión de gas de la terraza norte e igualmente la creación del sistema de recolección de gases para las terrazas oeste y central-este.

También existe un proyecto de gran importancia a desarrollar, es la re-inyección de los lixiviados para generar mayor cantidad de gas que permita de una manera más rápida la descomposición de los residuos.

Otro proyecto que se encuentra en ejecución en la actualidad es la construcción de la celda específica para desechos tóxicos y peligrosos, la cual será ubicada al norte de la laguna oeste de lixiviados (ver Anexo A, sectores D7, D8, E7 y E8).

Hasta el momento el diseño y operación del relleno se efectúa de acuerdo a la normativa legal vigente, y debe considerarse que es la primera vez en Venezuela que un relleno sanitario se trabaja con la tecnología de punta utilizada a nivel mundial, y que cuenta con un equipo de trabajo interdisciplinario que permite evidenciar la buena respuesta obtenida en el manejo de los residuos sólidos.

1.4. Influencia Sobre el Medio Ambiente

El proyecto propuesto en la licitación para la construcción y operación del relleno sanitario a desarrollar en etapas se ha cumplido a cabalidad, cuyo funcionamiento es satisfactorio, pero no escapa de presentar situaciones que de alguna manera puedan mejorarse para afectar lo menos posible al medio ambiente.

La presencia de lixiviados en las terrazas norte, sur-oeste y centro-norte en la actualidad no pueden ser controlados debido a que dichas terrazas simplemente están rellenas con desechos de años anteriores al desarrollo del proyecto actual, y a través de canales alrededor de las terrazas se tratan de canalizar para que alcancen por medio de menores pendientes del relleno el nivel de piscina de tratamiento.

Según información obtenida por personal de Cotecnica La Bonanza, se realizan monitoreos de calidad de agua, lixiviado y aire.

Actualmente los problemas presentes para el estudio de calidad del aire son la presencia de partículas en suspensión de polvo levantadas por el paso de maquinaria pesada, como camiones y vehículos en general, y el cual es mitigado con el riego constante de las vías del relleno sanitario con camiones cisternas de agua, y el otro factor que se encuentra en estudio es la corriente de aire caliente que genera el quemador de los gases originados por la descomposición de la basura que podría afectar las condiciones de vuelo de los aviones que se dirigen al Aeropuerto Caracas ubicado en la ciudad de Charallave.

Otro factor que si cumple con las normas es el control de olores, considerado uno de los principales problemas dentro del relleno y el cual ha sido mitigado lo máximo posible.

En cuanto a las pruebas de control de lixiviados cabe destacar que además de ser aireados en la piscina para disminuir el DBO (demanda biológica de oxígeno), se está utilizando una nueva tecnología que consiste en un polvo compuesto primordialmente por una variedad de bacterias que permite fijar vectores altamente contaminantes y oxidar el material metálico en suspensión, sedimentándolo para posteriormente ser extraídos y poder enviar los lixiviados tratados finalmente al cauce natural de la quebrada El Vegote, previo estudio y análisis de calidad de aguas.

Con respecto a la presencia de animales en el relleno sanitario, cabe destacar que la fauna más abundante son los zamuros y cuyo control es tarea compleja debido a que, por recomendaciones de la parte francesa aliada con Cotecnica el tratamiento para ahuyentarlos es la utilización de cohetes pirotécnicos de diferentes intensidades, cuando se requiera alejarlos por cuestiones de construcción de las celdas debido a que punzonan e ingieren los geosintéticos ocasionando que se deba reparar la parte expuesta o en el caso de que se encuentre grupos de personas en calidad de visita o inspección en las instalaciones. En situaciones extremas de desbordamiento de la tasa de natalidad, la recomendación es eliminarlos por ultrasonido, actividad que hasta la fecha no se ha realizado por parte del personal del relleno sanitario y no tiene como prospecto realizarlo por razones de control de fauna y ecología.

Adicionalmente, la presencia de halcones en el área eliminaron por completo la presencia de roedores en las instalaciones y la presencia de animales

domésticos como acompañantes de los recicladores no se permite. De acuerdo a información suministrada por personal técnico de La Bonanza es común encontrar fauna tales como culebras, iguanas, aves de diversos tipos, zorros, entre otros y los cuales son sacados de la zona de relleno sin ser maltratados.

La operación del Relleno Sanitario La Bonanza es satisfactoria en cuanto a los controles ambientales a excepción de los referente al monitoreo de las aguas subterráneas.

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

En esta sección se recoge la información disponible sobre la composición y características (humedad y densidad) de los Residuos Sólidos Municipales (RSM) del Área Metropolitana de Caracas, que son los desechos que en mayor volumen llegan al Relleno Sanitario La Bonanza; dicha información será tomada en cuenta en la interpretación de los resultados obtenidos tanto en el ensayo a escala real como en el análisis en retroceso (back-analysis).

Es importante resaltar la carencia de registros sistemáticos de información técnica, es por ello que la información cuantitativa presentada corresponde a estimaciones y proyecciones existentes en los documentos disponibles o estudios realizados por personal adscrito a las diferentes instituciones relacionadas con el sector.

2.1. Clasificación de los Residuos Sólidos

Existen diversos criterios para definir y clasificar los residuos sólidos, sin embargo, se consideró conveniente agruparlos en categorías utilizando la misma terminología aplicada por el común de los sectores involucrados.

2.1.1. Residuos sólidos municipales (RSM)

Incluyen todos aquellos materiales provenientes de la actividad residencial, comercial, institucional, industrial (pequeña industria y artesanía), así como barrido y limpieza de calles y áreas libres, ubicadas en el conglomerado urbano y cuya gestión es responsabilidad de las autoridades municipales.

Los RSM, tal y como se han definido, pueden incluir además de los constituyentes típicos (materia orgánica, vidrio, plásticos, metales, papel cartón, textiles, entre otros) y materiales que presentan riesgo para la salud y el ambiente, entre los cuales cabe mencionar: sustancias químicas, bacterias, fármacos vencidos, jeringas y agujas usadas, etc (Sánchez, 1998).

2.1.2. Residuos hospitalarios

Definidos como aquellos generados en instituciones de salud que revisten peligrosidad para la salud de las personas y el ambiente.

2.1.3. Residuos peligrosos

Aquí se incluyen aquellos desechos que poseen alguna de las características de peligrosidad establecidas en la normativa vigente al respecto. Son de origen industrial y su gestión aún cuando es responsabilidad del generador, no se puede ignorar el ámbito municipal en donde se producen.

2.2. Residuos Sólidos Municipales (RSM)

2.2.1. Generación

En Venezuela, la generación de RSM tal y como está definido en el informe "Diagnóstico preliminar sobre la situación actual del sector residuos sólidos en Venezuela" realizado por Sánchez, (1998) varía entre 0,3 a 1,2 Kg/hab.día. De la información recopilada en dicho informe se desprende que en los municipios con poblaciones mayores a 500.000 habitantes (Área Metropolitana de Caracas), la tasa de generación alcanza hasta 1,2 Kg/hab.día.

2.2.2. Composición y características

Son relativamente pocos los estudios realizados en el país, dirigidos a conocer la composición y características de los residuos sólidos municipales.

En la Tabla 5 se agrupan los resultados reportados en el informe "Diagnóstico preliminar sobre la situación actual del sector residuos sólidos en Venezuela" realizado por Sánchez, (1998) sobre la composición de RSM en el Área Metropolitana de Caracas.

Tabla. 5. Composición de los RSM en el Área Metropolitana de Caracas

Componente (%)									
Papel y Cartón	Plástico	Vidrio	Metales		Textil	Cauchos Y Cueros	Restos de Alimentos	Restos de Jardín	Otros
			Fe	No Fe					
22,3	11,7	4,5	2,0	2,9	4,1	-	37,0	4,3	11,2

En cuanto a otras características como el contenido de humedad y densidad de los RSM, sólo se puede indicar que el contenido de humedad de los residuos, tal y como son generados, varía entre 25 y 40% relativamente mayor a los valores normalmente reportados en la bibliografía especializada. En cuanto a las mediciones en campo de la densidad real de los RSM, tal y como son generados, los valores reportados varían entre 150 y 250 Kg/m³ (Sánchez, 1998).

CAPÍTULO VI

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1. CONSTRUCCIÓN DEL TALUD DE BASURA

En este aparte se describe el procedimiento empleado para la construcción del talud de basura a escala real, el mismo se construyó con la basura que llegó al Relleno Sanitario La Bonanza entre los meses de Septiembre y Octubre del año 2001.

El talud de basura a ensayar pertenece al nivel de la cota 570 de la celda 2 (ver Anexo D), el mismo se elaboró esparciendo la basura con un tractor de la Caterpillar modelo D6R y posteriormente compactando la basura en capas de 30 cm de espesor con un compactador de rellenos sanitarios de la Caterpillar modelo 826G, donde el número de pases fue de cuatro (4), esta operación se realizó hasta llegar a una altura de 5 m aproximadamente. Cabe destacar, que el talud de basura en la celda 2 ya tenía una sobrecarga de 1 m de espesor aproximadamente.

Seguidamente se realizó el levantamiento topográfico con un teodolito digital, en la Figura 44 se puede observar la topografía original del talud de basura, y dos cortes transversales separados una distancia de 10 m. En ambos cortes se observa que el ángulo de inclinación es 49° .

Para el perfilado del talud de basura se dejaron unos espaldones de soporte para prevenir el deslizamiento del talud durante la colocación y posterior compactación de la sobrecarga adicional.

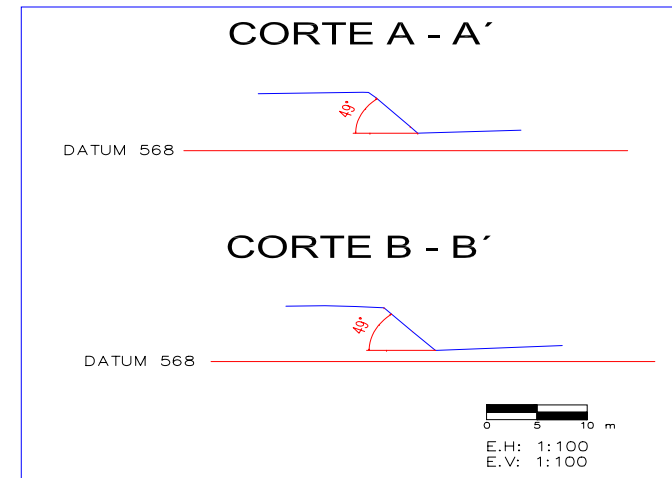
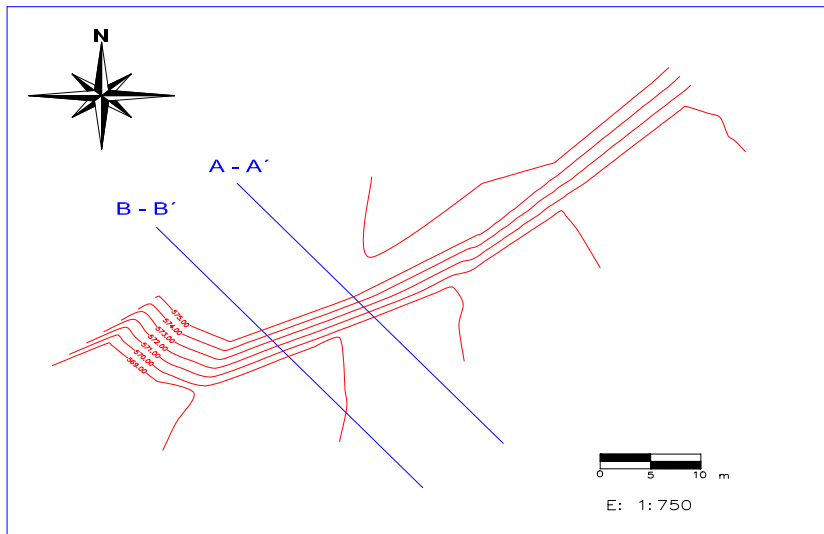


Fig. 44. Topografía Original del Talud de Basura

Para aumentar la inclinación del talud a ensayar se procedió a perfilar con una retroexcavadora de la Caterpillar modelo 225B como se puede observar en la Figura 45, y finalmente obtener el talud perfilado con una sobrecarga de 1 m de espesor aproximadamente (ver Fig. 46).



Fig. 45. Perfilado del Talud de Basura con Sobrecarga Inicial



Fig. 46. Talud de Basura Perfilado con Sobrecarga Inicial

Para obtener la configuración geométrica del talud de basura, es decir, altura y ángulo de inclinación se procedió a hacer el levantamiento topográfico, esto se hizo levantando tanto el pie como la cresta y la parte posterior del talud de basura, con dicho levantamiento se obtuvo la superficie topográfica mostrada en la Figura 47, a la cual se le realizaron tres secciones transversales cada 5 m; como se puede observar el ángulo de inclinación aumentó 26° , lo cual hace que la altura de la sobrecarga adicional para inducir la falla disminuya considerablemente.

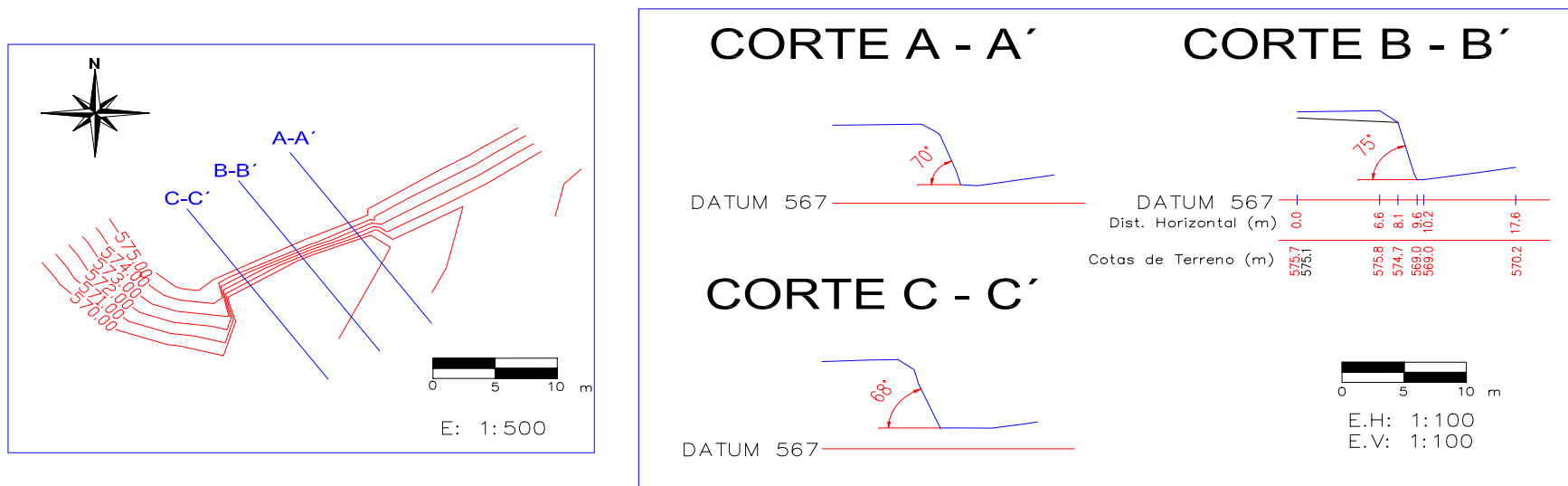


Fig. 47. Topografía Modificada del Talud de Basura con Sobrecarga Inicial (CASO I)

2. MODELO DEL TALUD DE BASURA A ENSAYAR

Una vez obtenida la geometría del talud de basura perfilado se procede a determinar la sobrecarga adicional para la cual el factor de seguridad sea menor que uno (1). Esto se hace incrementando la sobrecarga que se asumió uniformemente distribuida y vertical sobre el talud.

En el corte B – B' de la Figura 47 se observa que hay una sobrecarga de tierra (préstamo) de 1 m de espesor aproximadamente, las propiedades tanto físicas como mecánicas del mismo fueron reportadas en los informes 944 “Estudio Geotécnico para la Verificación de Suelos en El Relleno Sanitario La Bonanza”, y el 946 “Verificación de Suelos y Ensayos de Permeabilidad in situ y Laboratorio”, realizados por D'Escrivan, (2000).

Estos valores son:

$$\gamma = 20 \text{ KN/m}^3$$

$$c = 10 \text{ KPa}$$

$$\phi = 25^\circ$$

El peso unitario de la basura fue suministrado por el personal técnico del Relleno Sanitario La Bonanza, es importante destacar que dicho peso unitario es el obtenido una vez compactada la basura ($\gamma = 11 \text{ KN/m}^3$).

En cuanto a los parámetros geotécnicos de la basura para el ensayo a escala real se tomarán los reportados en la Tabla 4 por Del Greco y Oggen, (1994) obtenidos de ensayos de corte directo en basura de alta densidad.

$$c = 24 \text{ KPa}$$

$$\phi = 22^\circ$$

En la Figura 48 se observa que el factor de seguridad es mayor que uno (1), por lo cual hay que aplicarle una sobrecarga adicional para inducir la falla hasta que el factor de seguridad sea menor que uno (1) como se observa en la Figura 49.

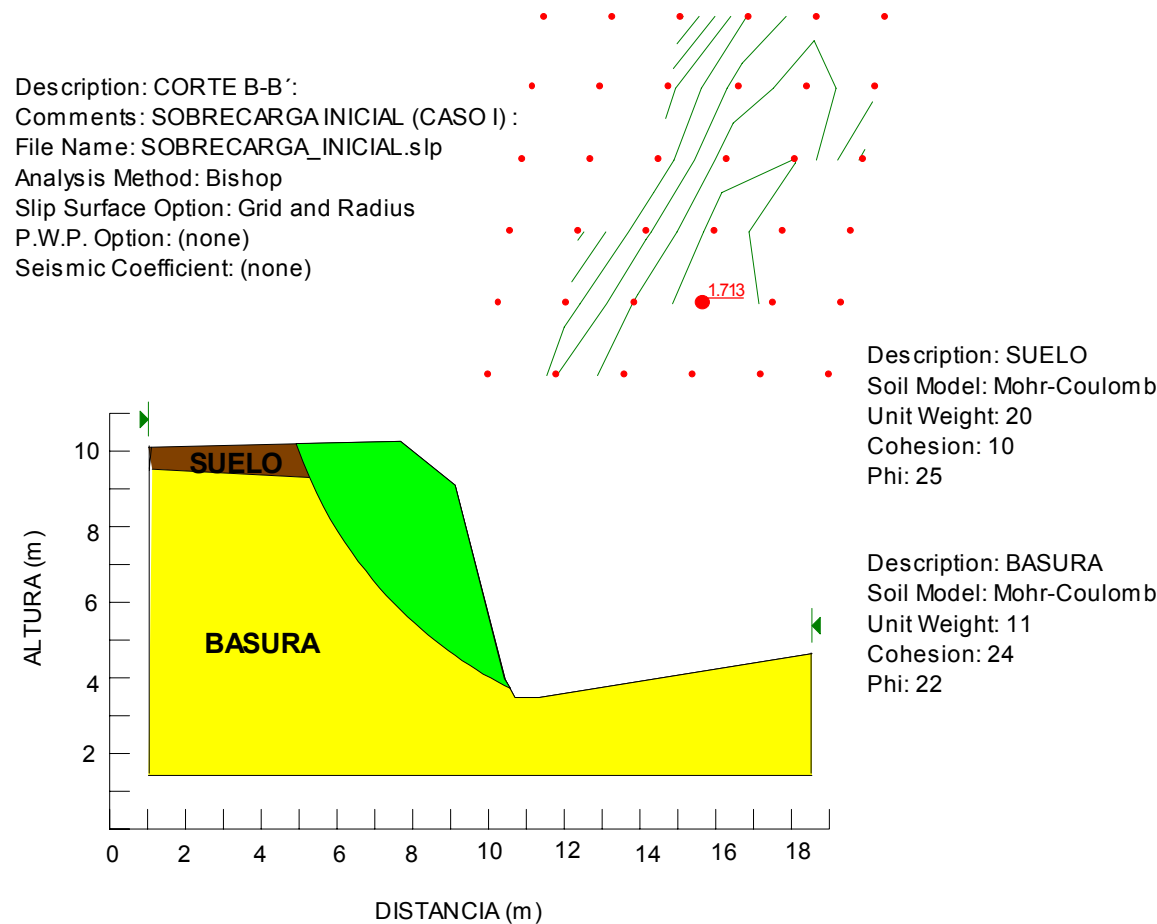


Fig. 48. Factor de Seguridad del Talud de Basura con Sobrecarga Inicial (CASO I)

Description: CORTE B - B' :
 Comments: Estimación de la Sobrecarga :
 File Name : CON_SOBRECARGA.slp
 Analysis Method : Bishop
 Slip Surface Option : Grid and Radius
 P.W.P. Option : (none)
 Seismic Coefficient : (none)

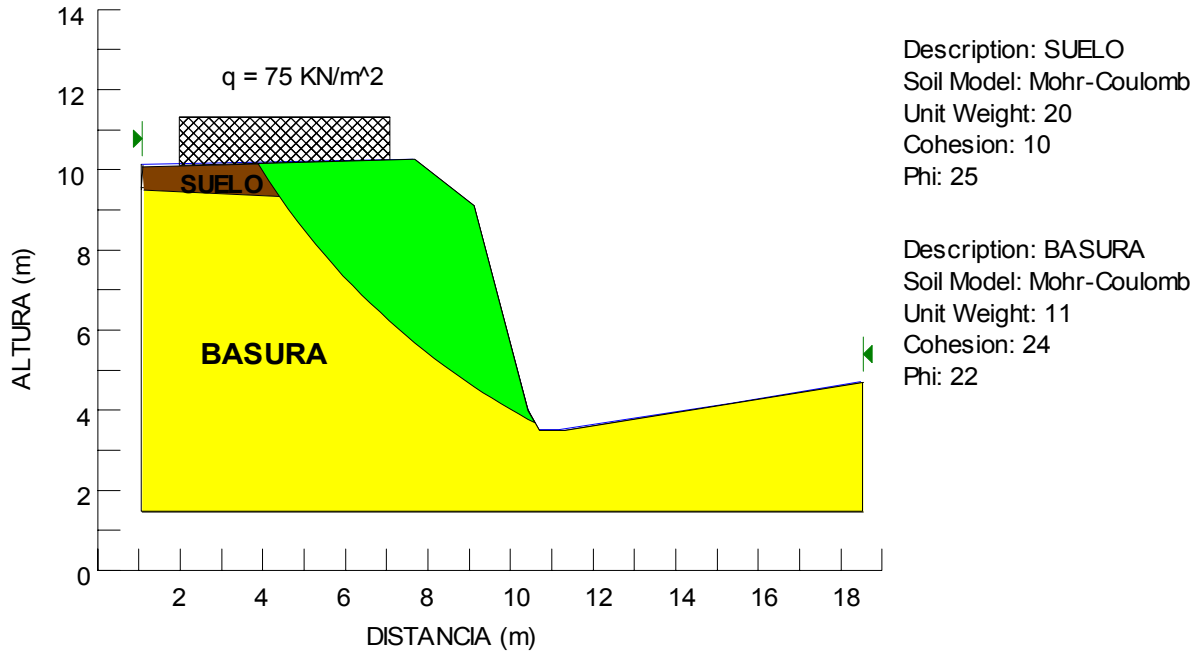
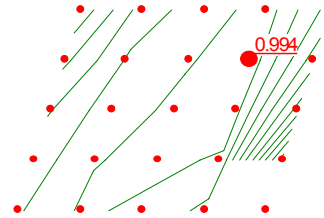


Fig. 49. Factor de Seguridad del Talud de Basura con la Sobrecarga Adicional Estimada

Para la estimación de la altura de la sobrecarga adicional se utilizó la relación siguiente:

$$H = \frac{\sigma}{\gamma} = \frac{75 \text{ KN/m}^2}{20 \text{ KN/m}^3} = 3,8 \text{ m}$$

3. COLOCACIÓN DE LA SOBRECARGA

La tierra utilizada como sobrecarga adicional proviene del mismo lugar del material de la sobrecarga inicial, este fue acarreado por camiones de la Fiat modelo ASTRA cuya capacidad es de 14 m³, una vez que llegaban los camiones descargaban el material sobre el talud de basura (ver Fig. 50), seguidamente se esparcía con un tractor de la Caterpillar modelo D6N, como se observa en la Figura 51.



Fig. 50. Descarga del Material de Préstamo



Fig. 51. Esparcimiento del Material de Préstamo

Una vez extendida la capa de tierra se hacía el control del espesor que debe ser de 30 cm aproximadamente (ver Fig. 52) y seguidamente se procedió a hacer la compactación con un rodillo liso vibratorio de la Ingersoll-Rand modelo SP-60/106-001, el número de pasadas fue de seis (6) (ver Fig. 53).



Fig. 52. Control del Espesor de la Capa de Tierra



Fig. 53. Compactación de la Sobrecarga Adicional

El procedimiento de colocación de capas de tierra y posterior compactación se realizó hasta que la altura de la sobrecarga adicional fuera mayor de 3,8 m.

El perfilado del talud basura se volvió a realizar para aumentar la inclinación del material de sobrecarga, así como también eliminar, los espaldones que hacían la función de confinamiento del talud de basura (ver Figs. 54 y 55).



Fig. 54. Perfilado del Talud de Basura con Sobrecarga Adicional



Fig. 55. Talud de Basura con Sobrecarga Adicional

El levantamiento del talud de basura con sobrecarga adicional se realizó con el teodolito digital, tanto del pie como de la cresta del talud de basura y el tope de la sobrecarga (ver Fig. 56), para el corte B-B' el factor de seguridad es mayor que uno (1) como se observa en la Figura 57; por lo cual se fue incrementando la sobrecarga adicional y haciendo el levantamiento diariamente hasta obtener la geometría de la sobrecarga final para la cual el factor de seguridad fuera menor que uno (1) (ver Figs. 58 y 59).

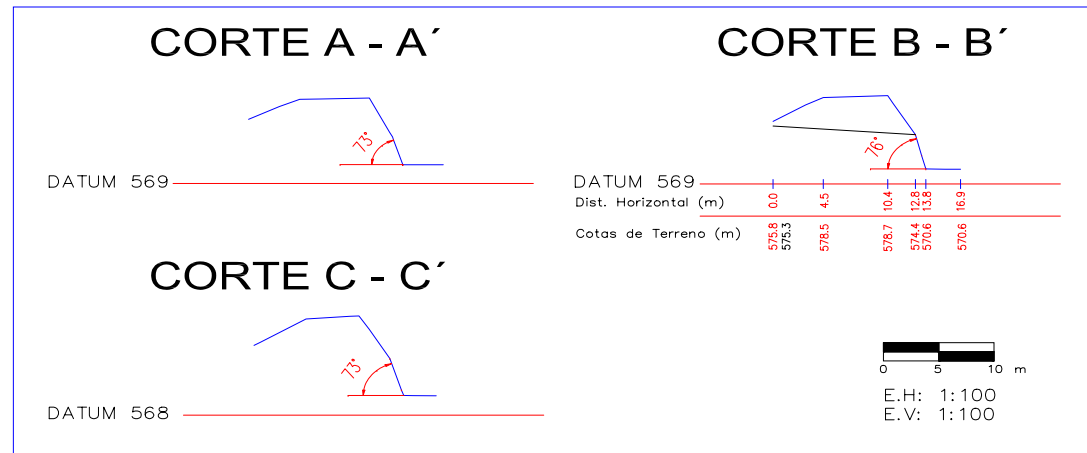
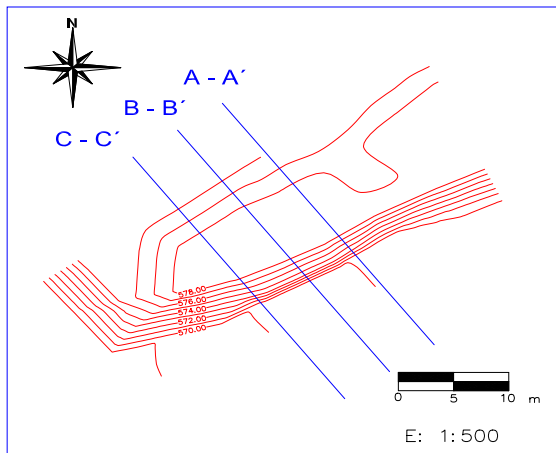
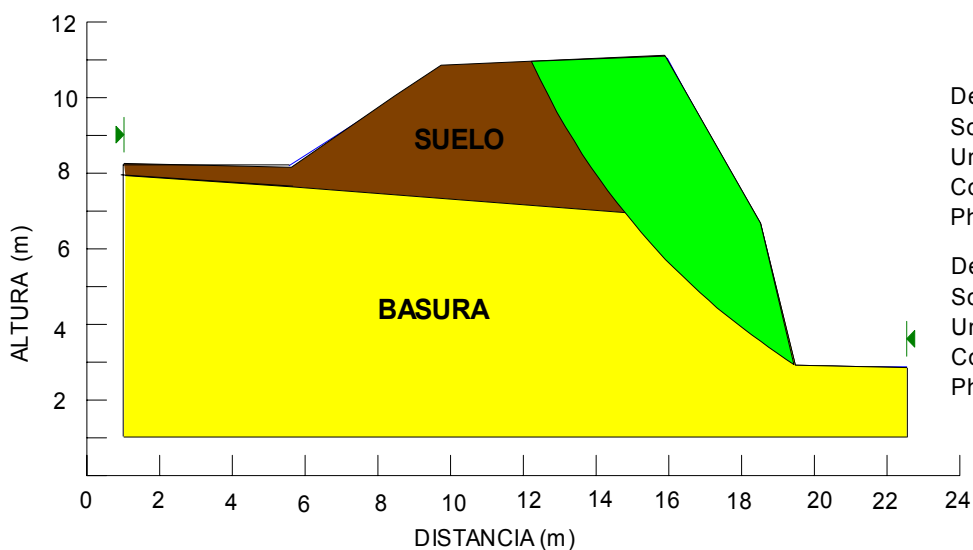
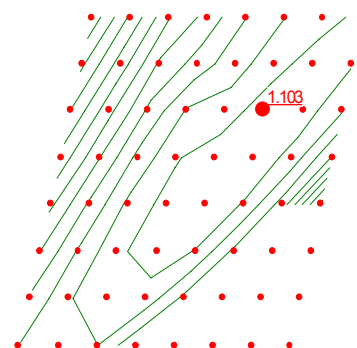


Fig. 56. Topografía del Talud de Basura con Sobrecarga Adicional (CASO II)

Description: CORTE B-B':
 Comments: SOBRECARGA_INTERMEDIA (CASO II):
 File Name: SOBRECARGA_INTERMEDIA.slp
 Analysis Method: Bishop
 Slip Surface Option: Grid and Radius
 P.W.P. Option: (none)
 Seismic Coefficient: (none)



Description: SUELO
 Soil Model: Mohr-Coulomb
 Unit Weight: 20
 Cohesion: 10
 Phi: 25

Description: BASURA
 Soil Model: Mohr-Coulomb
 Unit Weight: 11
 Cohesion: 24
 Phi: 22

Fig. 57. Factor de Seguridad del Talud de Basura con Sobrecarga Adicional (CASO II)

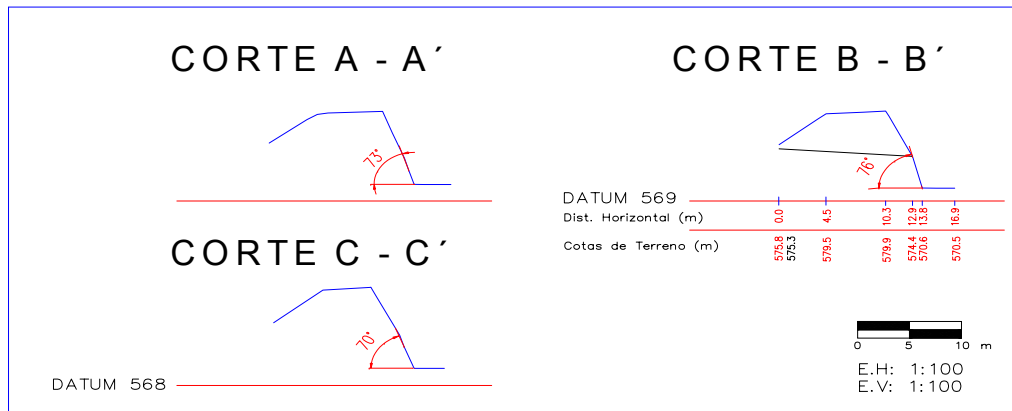
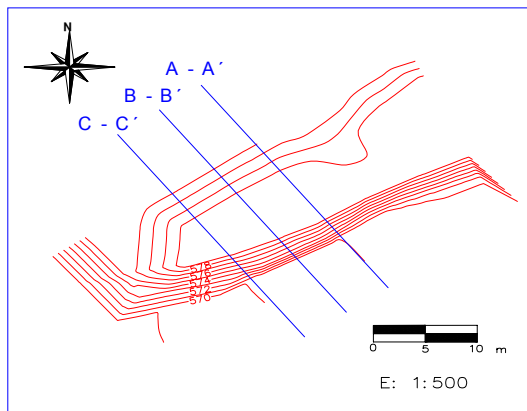


Fig. 58. Topografía del Talud de Basura con Sobrecarga Adicional (CASO III)

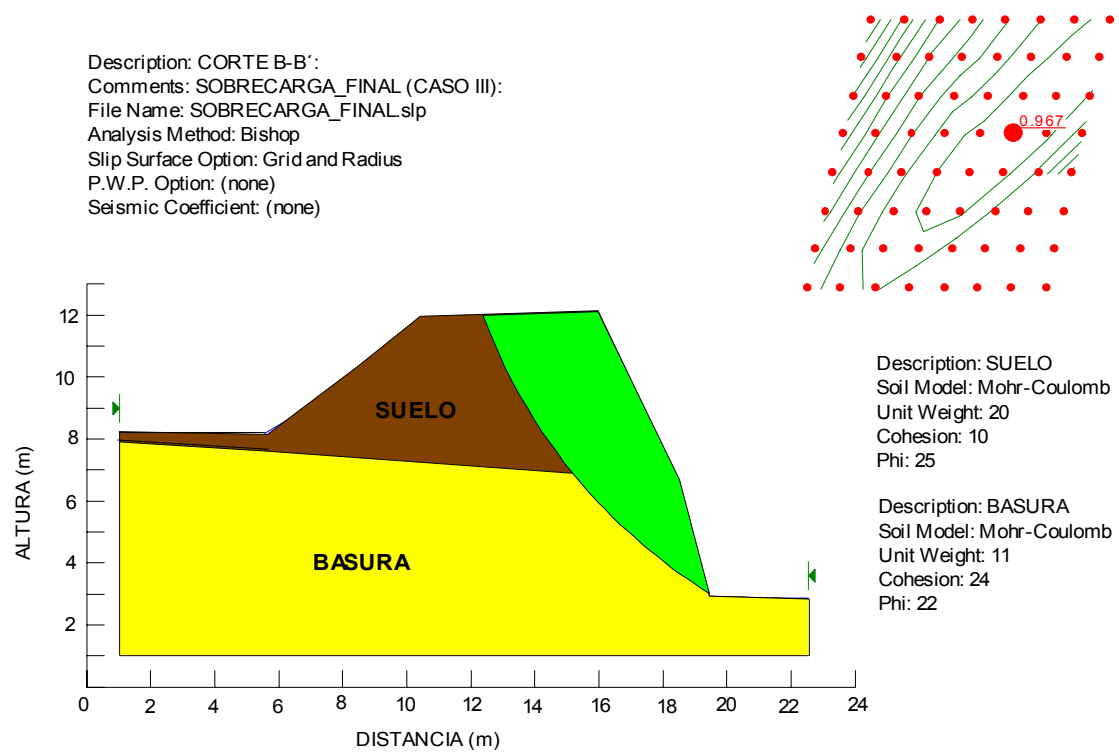


Fig. 59. Factor de Seguridad del Talud de Basura con Sobrecarga Adicional (CASO III)

CAPÍTULO VII

RESULTADOS EXPERIMENTALES

1. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

La determinación de los parámetros geotécnicos, mediante el “back-analysis”, para cada uno de los casos analizados en el Capítulo VI se realizó de igual forma para cada uno.

Para cada uno de los CASOS I, II y III como se muestran en las Figuras 48, 57 y 59, respectivamente, que conforman la geometría del talud para cada estado de sollicitación de sobrecarga, se halla el Factor de Seguridad (F) para distintos valores de cohesión “c” y de ángulo de fricción interno “ ϕ ” (ver Tablas 6 y 7). A continuación se procede a graficar el Factor de Seguridad en función de la cohesión para cada ángulo de fricción interno (ver Figs. 60, 61 y 62). De cada gráfica, para cada curva de ángulo de fricción interno, se obtiene la cohesión en el equilibrio límite ($F = 1$), los cuales son reportados en la Tabla 8. El esfuerzo normal máximo a la superficie de falla (σ^*), reportado en dicha tabla, es el obtenido para el par “c” y “ ϕ ” en el equilibrio límite, el cual será posteriormente comparado con el esfuerzo normal promedio (σ^{**}) obtenido por el método gráfico de Howland y Landva, (1992).

Para cada caso se halló la resistencia al corte y el esfuerzo normal promedio aplicando la metodología propuesta por Howland y Landva, (1992), la cual consiste en graficar las envolventes de resistencia al corte contra el esfuerzo normal, con los parámetros geotécnicos encontrados en el equilibrio límite (ver Figs. 63, 64 y 65). De cada gráfica se obtiene el esfuerzo normal promedio para cada resistencia al corte, los cuales son reportados en la Tabla 9.

Tabla 6. Factor de Seguridad en Función de los Parámetros Geotécnicos (CASOS I, II y III)

	c = 0 KPa			c = 5 KPa			c = 10 KPa			c = 15 KPa			c = 20 KPa		
	F (I)	F (II)	F (III)	F (I)	F (II)	F (III)	F (I)	F (II)	F (III)	F (I)	F (II)	F (III)	F (I)	F (II)	F (III)
$\emptyset = 0^\circ$	0,124	0,101	0,100	0,263	0,175	0,149	0,524	0,326	0,276	0,784	0,468	0,395	1,040	0,602	0,509
$\emptyset = 5^\circ$	0,104	0,156	0,153	0,374	0,306	0,278	0,637	0,446	0,395	0,894	0,580	0,506	1,150	0,711	0,614
$\emptyset = 10^\circ$	0,162	0,265	0,256	0,468	0,424	0,390	0,738	0,558	0,503	1,000	0,687	0,609	1,255	0,814	0,714
$\emptyset = 15^\circ$	0,238	0,347	0,321	0,554	0,512	0,474	0,836	0,655	0,587	1,099	0,783	0,697	1,362	0,903	0,797
$\emptyset = 20^\circ$	0,315	0,419	0,391	0,643	0,595	0,550	0,928	0,734	0,663	1,201	0,861	0,770	1,462	0,982	0,866
$\emptyset = 25^\circ$	0,396	0,491	0,458	0,733	0,666	0,610	1,020	0,809	0,725	1,304	0,936	0,834	1,569	1,054	0,930
$\emptyset = 30^\circ$	0,482	0,563	0,522	0,817	0,731	0,667	1,119	0,870	0,779	1,402	1,006	0,889	1,684	1,126	0,984
$\emptyset = 35^\circ$	0,576	0,637	0,586	0,910	0,798	0,725	1,229	0,932	0,834	1,510	1,067	0,937	1,791	1,188	1,027
$\emptyset = 40^\circ$	0,677	0,720	0,660	1,015	0,869	0,781	1,353	0,998	0,888	1,632	1,127	0,974	1,912	1,246	1,035

Tabla 7. Factor de Seguridad en Función de los Parámetros Geotécnicos (CASOS I, II y III)

	c = 25 KPa			c = 30 KPa			c = 35 KPa			c = 40 KPa		
	F (I)	F (II)	F (III)	F (I)	F (II)	F (III)	F (I)	F (II)	F (III)	F (I)	F (II)	F (III)
$\emptyset = 0^\circ$	1,294	0,730	0,616	1,547	0,855	0,719	1,799	0,976	0,819	2,051	1,096	0,917
$\emptyset = 5^\circ$	1,405	0,838	0,720	1,659	0,960	0,821	1,911	1,080	0,920	2,163	1,194	1,011
$\emptyset = 10^\circ$	1,509	0,938	0,817	1,762	1,054	0,909	2,016	1,167	1,001	2,269	1,279	1,091
$\emptyset = 15^\circ$	1,616	1,020	0,891	1,869	1,136	0,983	2,122	1,250	1,075	2,374	1,362	1,165
$\emptyset = 20^\circ$	1,724	1,096	0,959	1,981	1,209	1,049	2,233	1,322	1,138	2,485	1,434	1,173
$\emptyset = 25^\circ$	1,830	1,170	1,021	2,091	1,282	1,111	2,351	1,393	1,146	2,604	1,503	1,165
$\emptyset = 30^\circ$	1,945	1,239	1,075	2,205	1,352	1,109	2,465	1,463	1,139	2,725	1,533	1,157
$\emptyset = 35^\circ$	2,072	1,303	1,072	2,331	1,407	1,103	2,591	1,470	1,133	2,850	1,521	1,150
$\emptyset = 40^\circ$	2,192	1,337	1,067	2,473	1,412	1,097	2,733	1,460	1,126	2,992	1,508	1,142

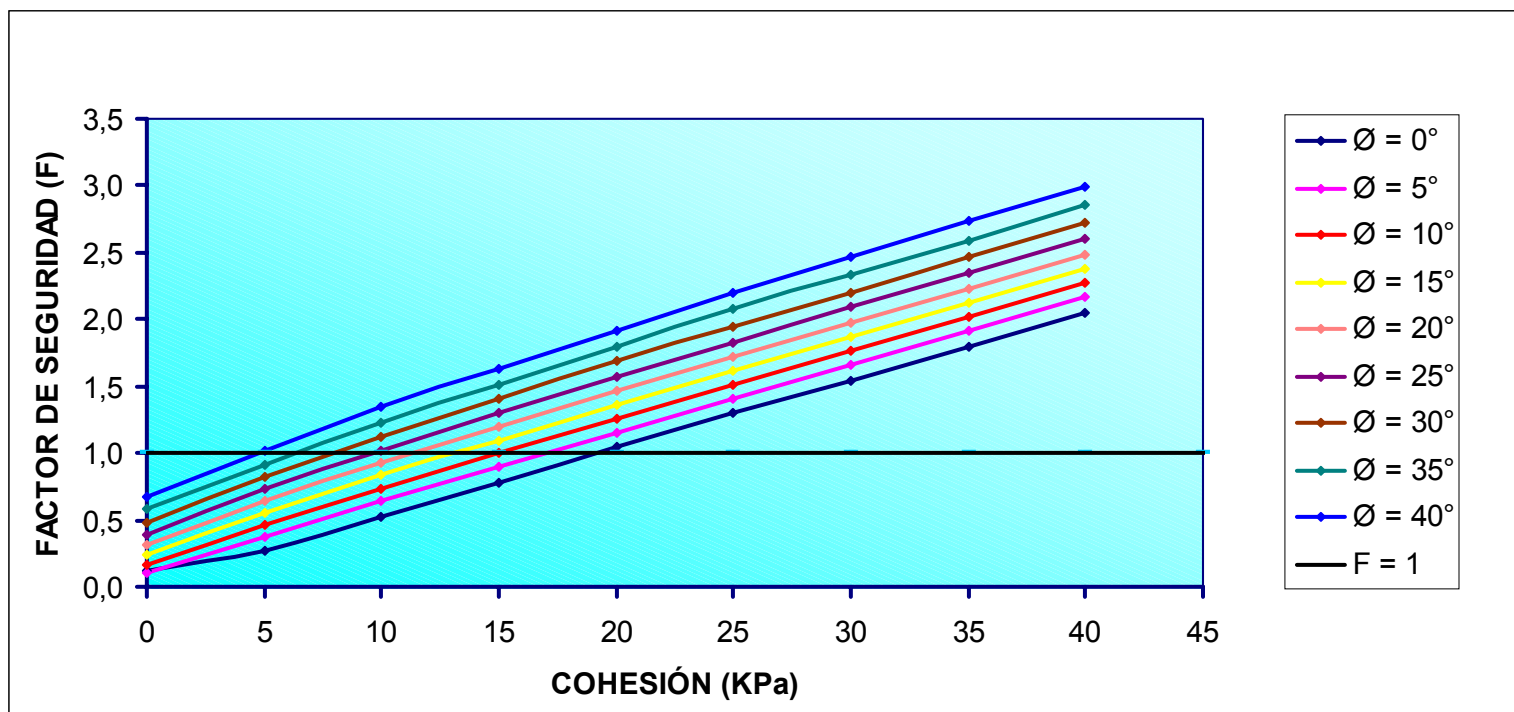


Fig. 60. Factor de Seguridad en Función de la Cohesión (CASO I)

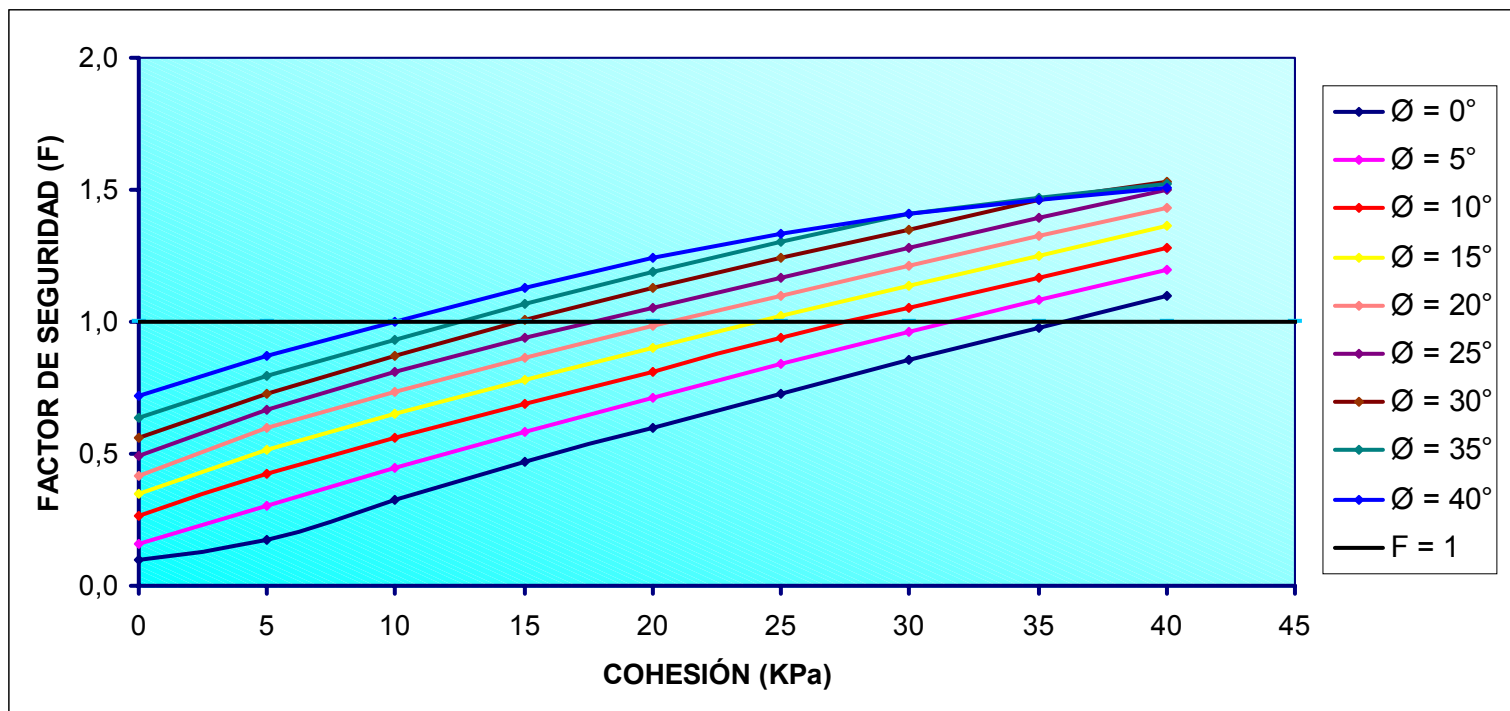


Fig. 61. Factor de Seguridad en Función de la Cohesión (CASO II)

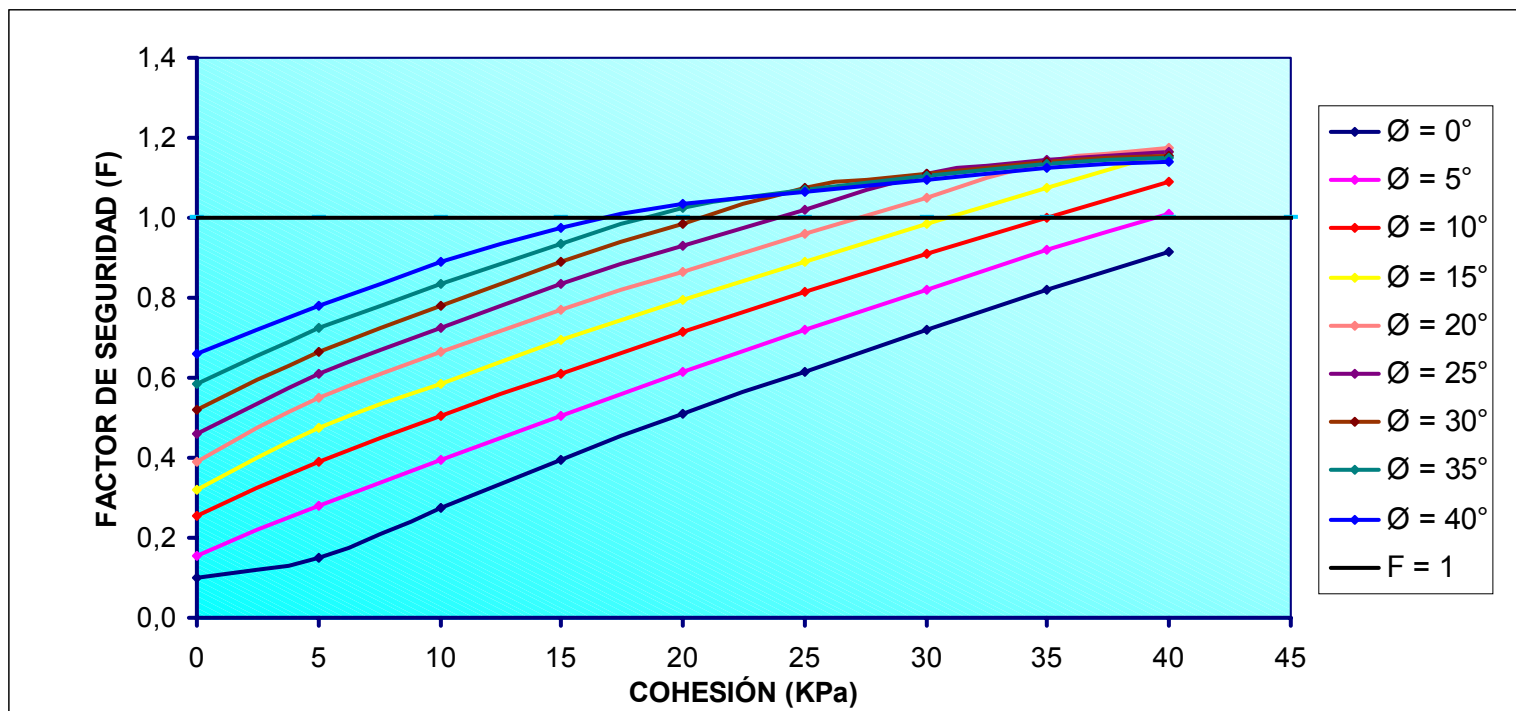


Fig. 62. Factor de Seguridad en Función de la Cohesión (CASO III)

Tabla 8. Parámetros Geotécnicos en el Equilibrio Límite (CASOS I, II y III)

F = 1							
Envolvente	Ø (°)	CASO I		CASO II		CASO III	
		c (KPa)	σ_n (KPa)*	c (KPa)	σ_n (KPa)*	c (KPa)	σ_n (KPa)*
1	0	19,19	52	33,43	82	43,46	100
2	5	16,99	46	30,43	77	38,61	85
3	10	14,90	45	26,95	65	34,66	78
4	15	13,10	37	24,58	58	30,79	68
5	20	11,27	28	21,04	55	29,51	66
6	25	9,55	27	17,74	48	23,41	56
7	30	7,98	26	14,56	41	20,62	55
8	35	6,42	18	12,45	38	18,98	53
9	40	4,70	17	9,98	37	16,58	44

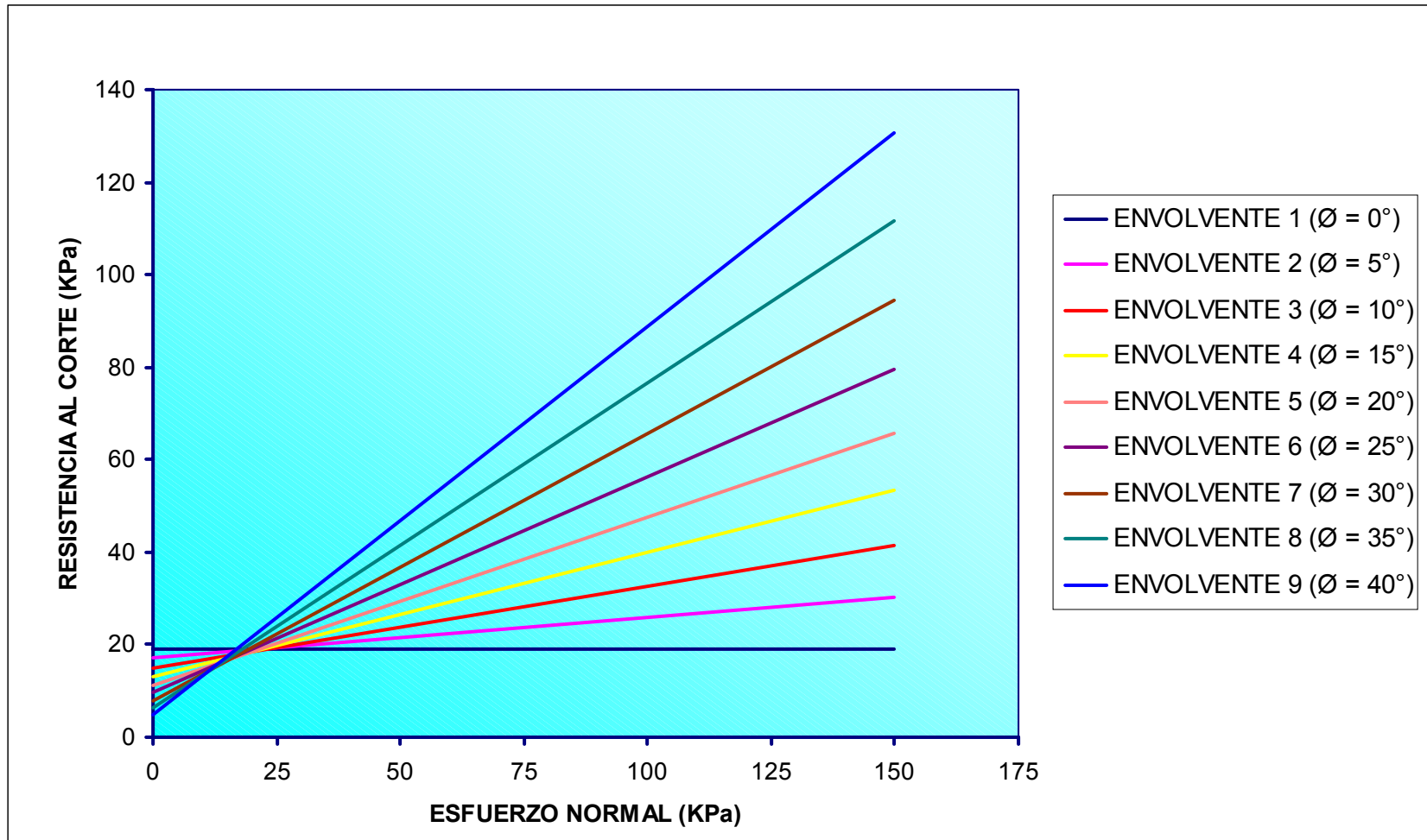


Fig. 63. Resistencia al Corte en Función del Esfuerzo Normal (CASO I)

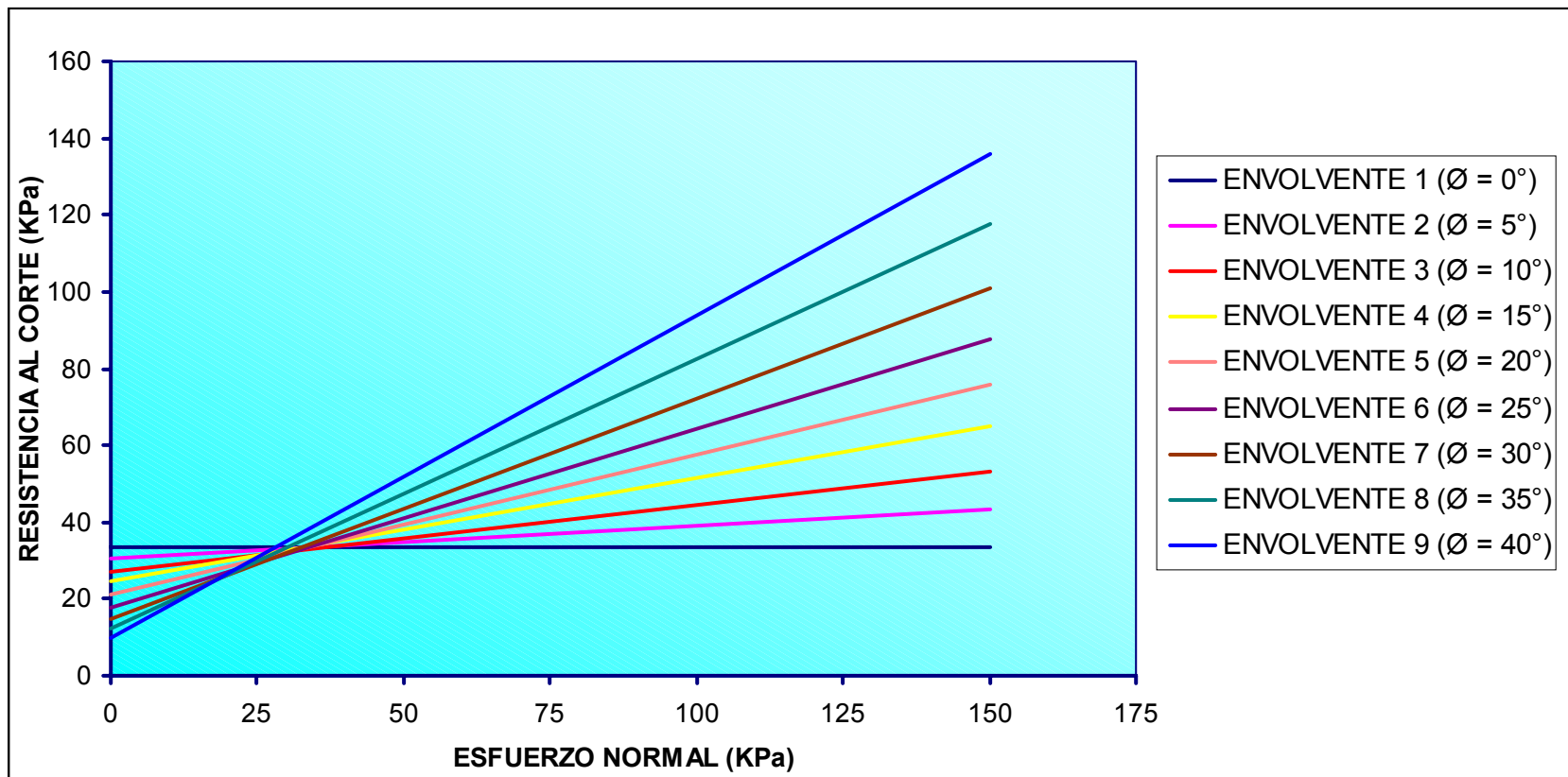


Fig. 64. Resistencia al Corte en Función del Esfuerzo Normal (CASO II)

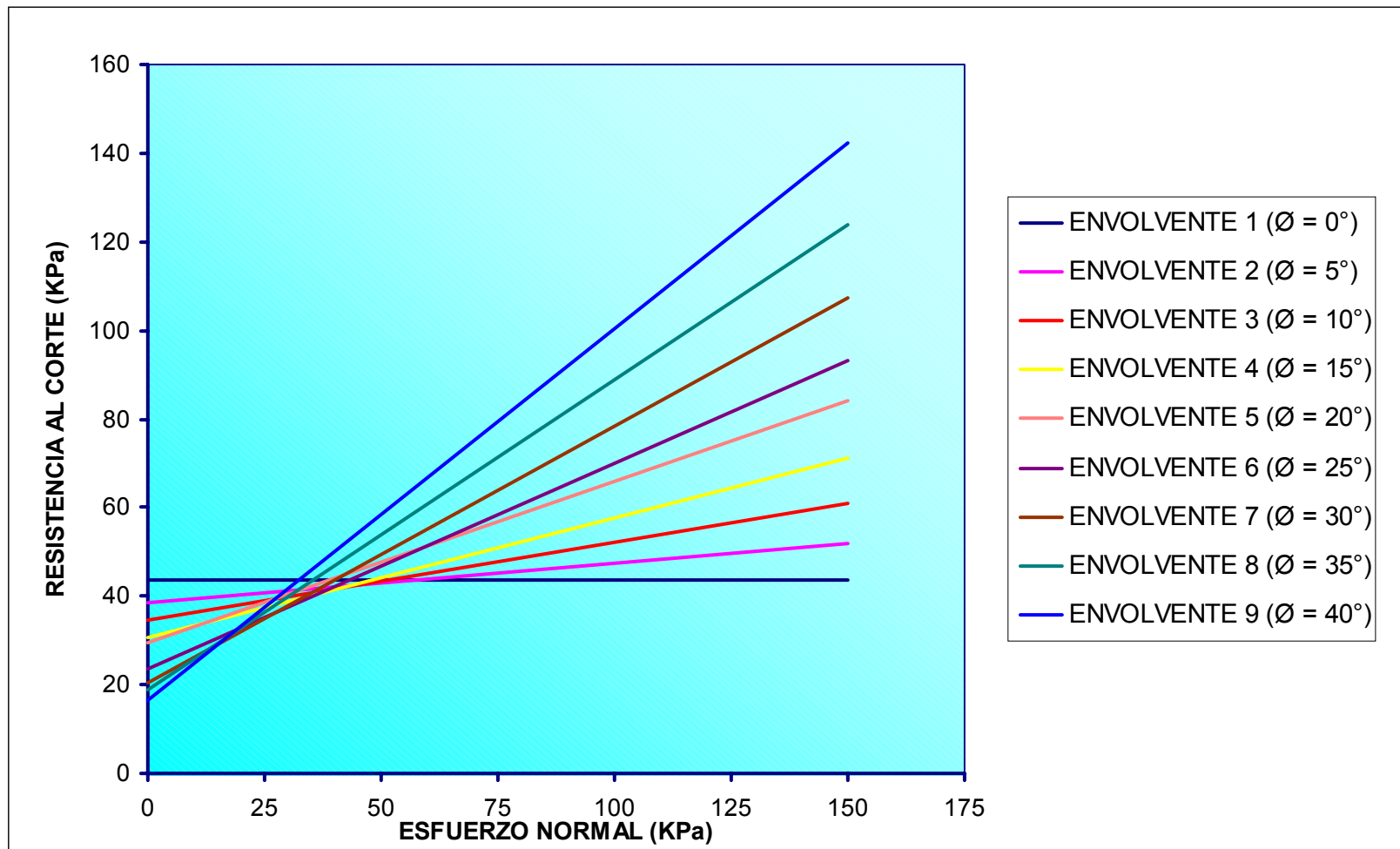


Fig. 65. Resistencia al Corte en Función del Esfuerzo Normal (CASO III)

**Tabla 9. Esfuerzo Normal Promedio para Cada Envolvente de Falla
(CASOS I, II y III)**

F = 1							
Envolvente	Ø (°)	CASO I		CASO II		CASO III	
		c (KPa)	σ_n (KPa)**	c (KPa)	σ_n (KPa)**	c (KPa)	σ_n (KPa)**
1	0	19,19		33,43		43,46	
2	5	16,99	25,14	30,43	34,29	38,61	55,43
3	10	14,90	24,33	26,95	36,76	34,66	49,91
4	15	13,10	22,73	24,58	33,03	30,79	47,29
5	20	11,27	21,76	21,04	34,04	29,51	38,32
6	25	9,55	20,67	17,74	33,65	23,41	43,00
7	30	7,98	19,41	14,56	32,68	20,62	39,56
8	35	6,42	18,24	12,45	29,96	18,98	34,96
9	40	4,70	17,27	9,98	27,95	16,58	32,03

En la Tabla 10 son reportados el par de resistencia al corte y esfuerzo normal máximo para los tres (3) casos.

Tabla 10. Resistencia al Corte y Esfuerzo Normal (CASOS I, II y III)

CASO	σ_n (KPa)**	τ_n (KPa)
I	25,14	19,19
II	36,76	33,43
III	55,43	43,46

Los parámetros geotécnicos obtenidos del “back-analysis” para los CASOS I, II y III son graficados en la Figura 66, en la misma se puede observar lo difícil de obtener una envolvente definitiva para el talud en estudio.

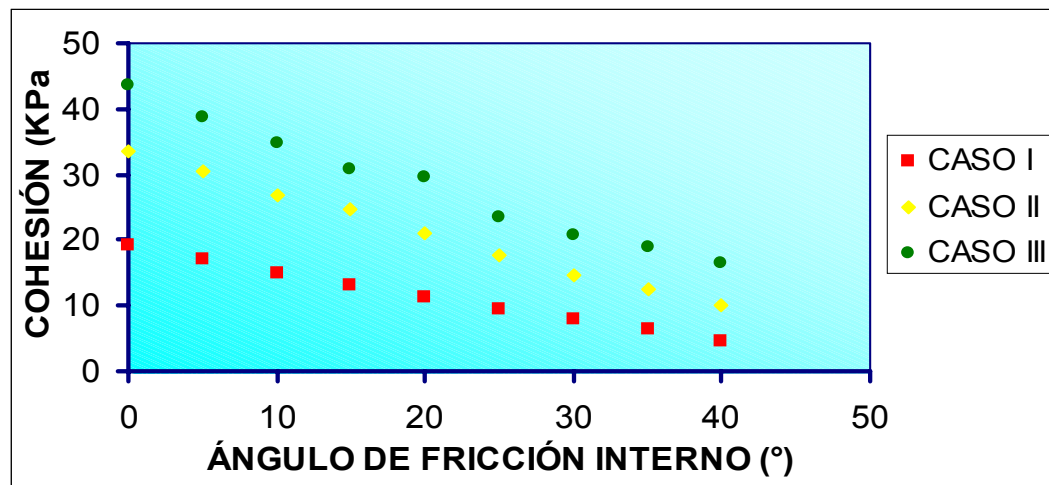


Fig. 66. Parámetros Geotécnicos en el Equilibrio Límite (Back-Analysis)

Los puntos de la Tabla 10 son llevados a una gráfica de resistencia al corte contra esfuerzo normal para así obtener una envolvente de Coulomb para el talud de basura ensayado, y así obtener el par “c” y “ ϕ ” más probable para el diseño del talud de basura final (ver Fig. 67).

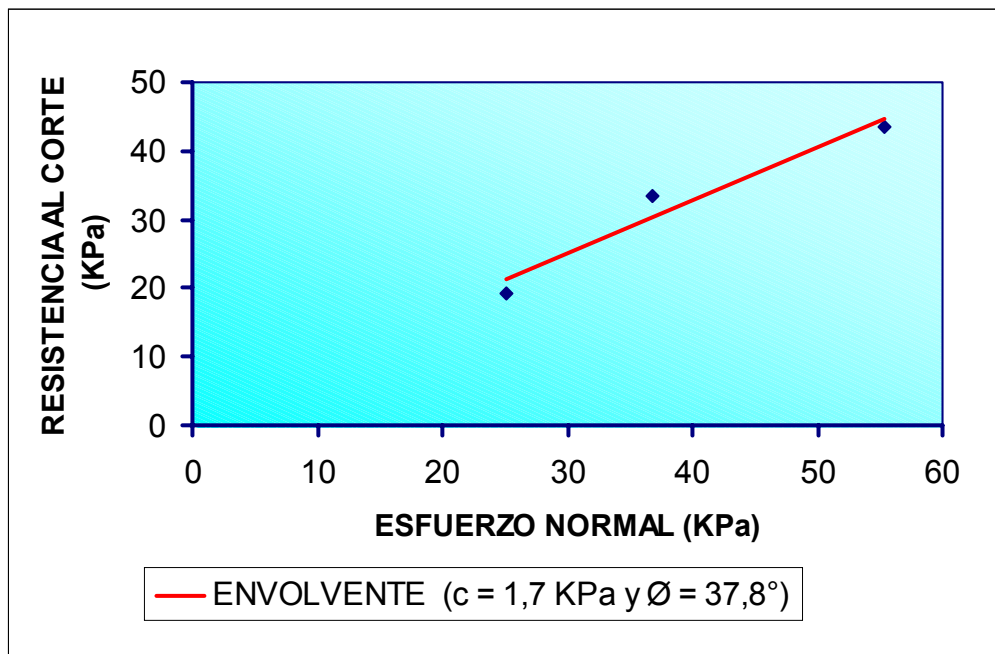


Fig. 67. Envolvente de Falla Obtenida (CASOS I, II y III)

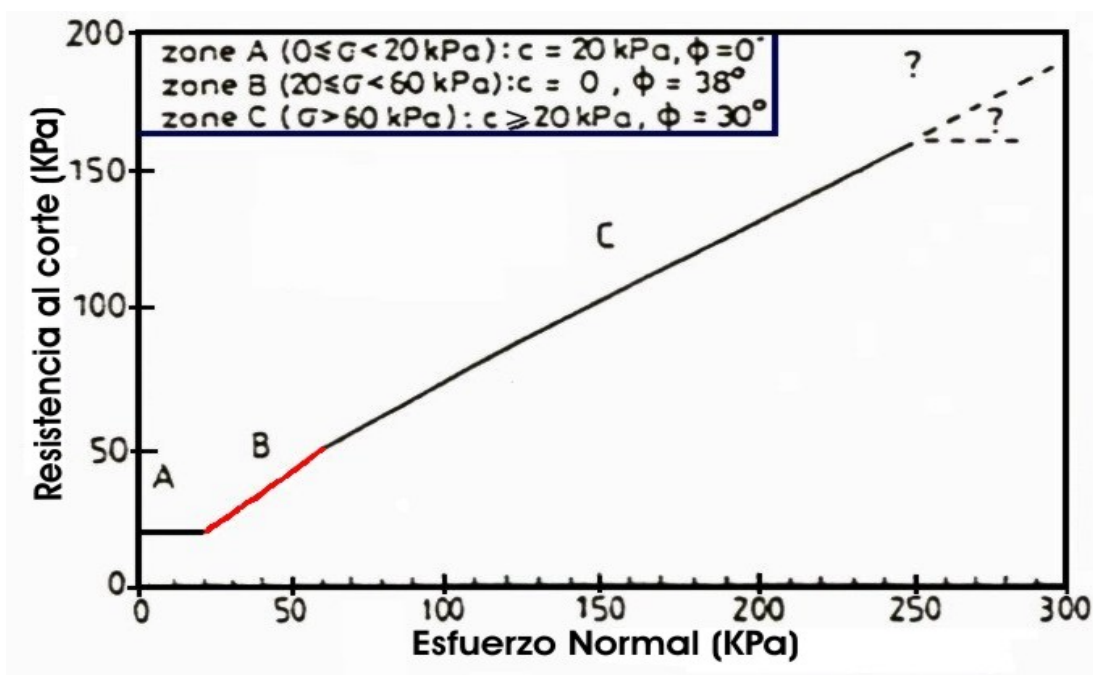


Fig. 68. Parámetros Geotécnicos Recomendados para el Diseño de Taludes de Basura (Van Impe y Bouazza, 1996)

La envolvente obtenida para el talud ensayado mediante el método gráfico propuesto por Howland y Landva, (1992) para un nivel de esfuerzo normal entre 25 y 55 KPa (ver Fig. 67), tiene un comportamiento similar a la “Zona B” de la envolvente propuesta por Van Impe y Bouazza, (1996), para dicha zona los autores recomiendan los siguientes parámetros geotécnicos ($c = 0$ KPa y $\phi = 38^\circ$), que son casi iguales a los obtenidos.

2. DISEÑO DE TALUDES DE BASURA

En el diseño del talud de basura deben tenerse presente principalmente la geometría del talud (altura y ángulo de inclinación) y el nivel de lixiviado en la celda. La altura de la celda es de 30 m, conformada por seis (6) niveles de 5 m cada uno. Debido a que el nivel del fondo se extiende totalmente a lo ancho de la celda y, por lo tanto, la altura del talud de basura es 25 m; cada nivel tendrá una berma de 2 m de ancho. En cuanto al factor hidrológico se asumió un nivel freático de lixiviados de aproximadamente de 5 m y drenado en el pie del talud de basura (ver Fig. 69).

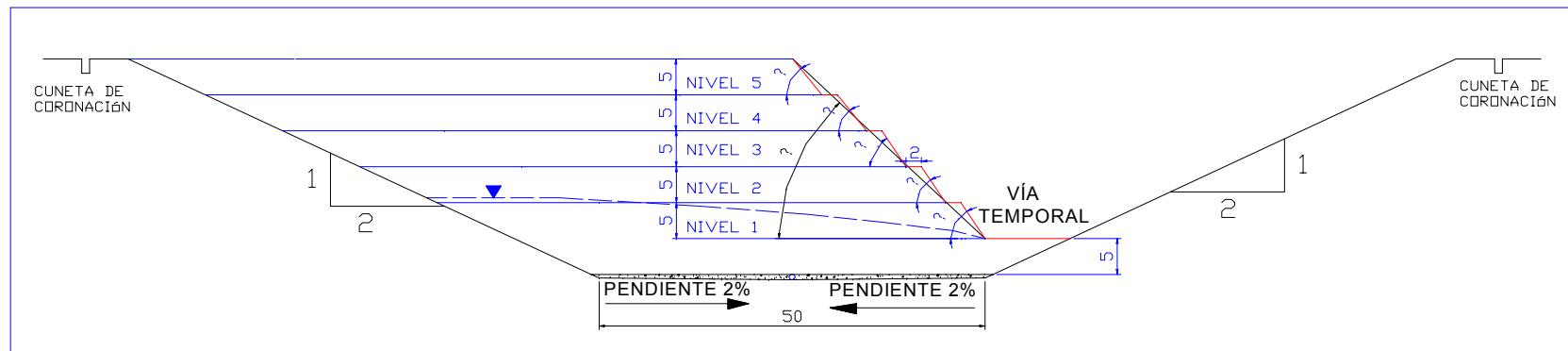


Fig. 69. Sección Transversal del Diseño del Talud de Basura

4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN BASURA

Los parámetros geotécnicos obtenidos mediante el método gráfico propuesto por Howland y Landva, (1992) se utilizaron para hacer el análisis del talud en basura, que es la condición más desfavorable (equilibrio límite) (ver Fig. 70), y para dicha condición se obtuvo tanto el ángulo global de inclinación máximo del talud como de cada uno de los niveles (ver Fig. 71).

En cuanto a los parámetros geotécnicos asumidos para el ensayo del talud de basura a escala real se utilizaron tanto en el análisis estático como en el pseudo-estático (análisis sísmico), ya que el talud ensayado a escala real no falló para la solicitación de sobrecarga donde el factor de seguridad era menor que uno (1) (ver Fig. 72).

El Relleno Sanitario La Bonanza, según la zonificación sísmica de Venezuela, pertenece a la “Zona 5”, donde la aceleración horizontal máxima es de 0,30g, por lo cual en el análisis sísmico la aceleración se incrementará desde 0,10g hasta 0,30g para hallar la aceleración horizontal crítica (ver Fig. 73 y Anexo E).

Description:
 Comments : DISEÑO PARA F =1:
 File Name: NIVEL_05 (CRITICO).slp
 Analysis Method: Bishop
 Slip Surface Option: Grid and Radius
 P.W.P. Option: Piezometric Lines / Ru
 Seismic Coefficient: (none)

Description: BASURA
 Soil Model: Mohr-Coulomb
 Unit Weight: 11
 Cohesion: 1.7
 Phi: 37.8
 Piezometric Line #: 1

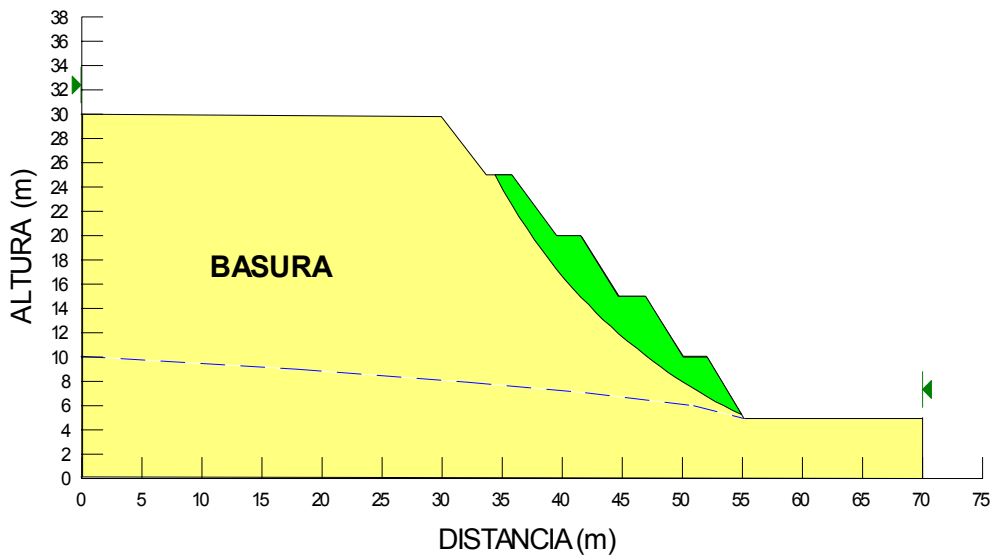
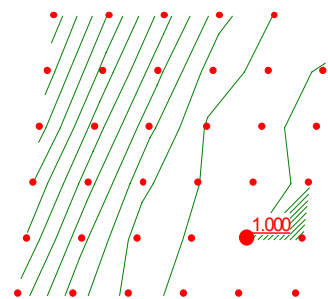


Fig. 70. Factor de Seguridad (F^*) en el Equilibrio Límite

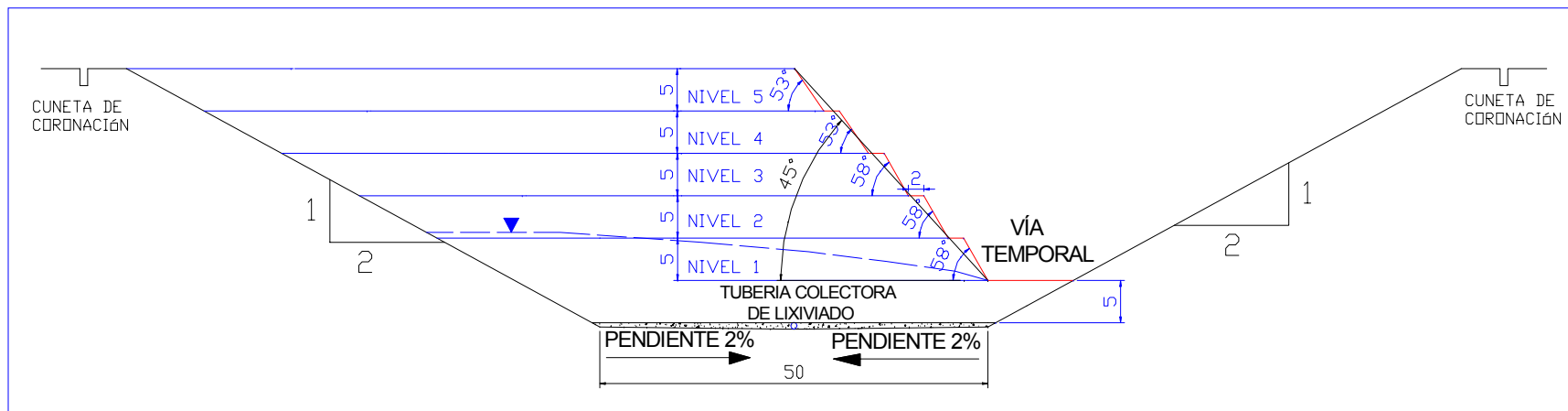


Fig. 71. Sección Transversal del Talud de Basura

Description:
 Comments: ESTIMACIÓN DEL (F) DEL NIVEL 5:
 File Name: NIVEL_05 (CONSERVADOR).slp
 Analysis Method: Bishop
 Slip Surface Option: Grid and Radius
 P.W.P. Option: Piezometric Lines / Ru
 Seismic Coefficient: (none)

Description: BASURA
 Soil Model: Mohr-Coulomb
 Unit Weight: 11
 Cohesion: 24
 Phi: 22
 Piezometric Line #: 1

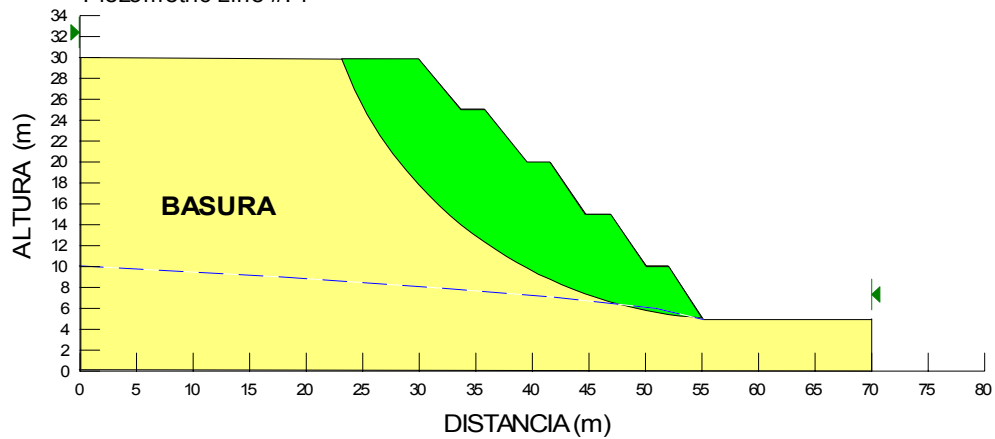
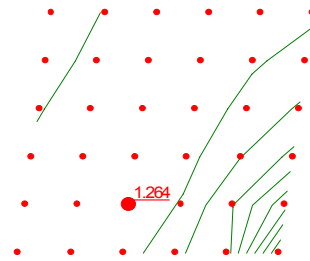


Fig. 72. Factor de Seguridad (F^{**}) con los Parámetros Geotécnicos Utilizados en el Ensayo a Escala Real

Description:
 Comments: ANÁLISIS SISMICO:
 File Name: NIVEL_05_SISMO_(CONSERVADOR).slp
 Analysis Method: Bishop
 Slip Surface Option: Grid and Radius
 P.W.P. Option: Piezometric Lines / Ru
 Seismic Coefficient (0.30): Horizontal

Description: BASURA
 Soil Model: Mohr-Coulomb
 Unit Weight: 11
 Cohesion: 24
 Phi: 22
 Piezometric Line #: 1

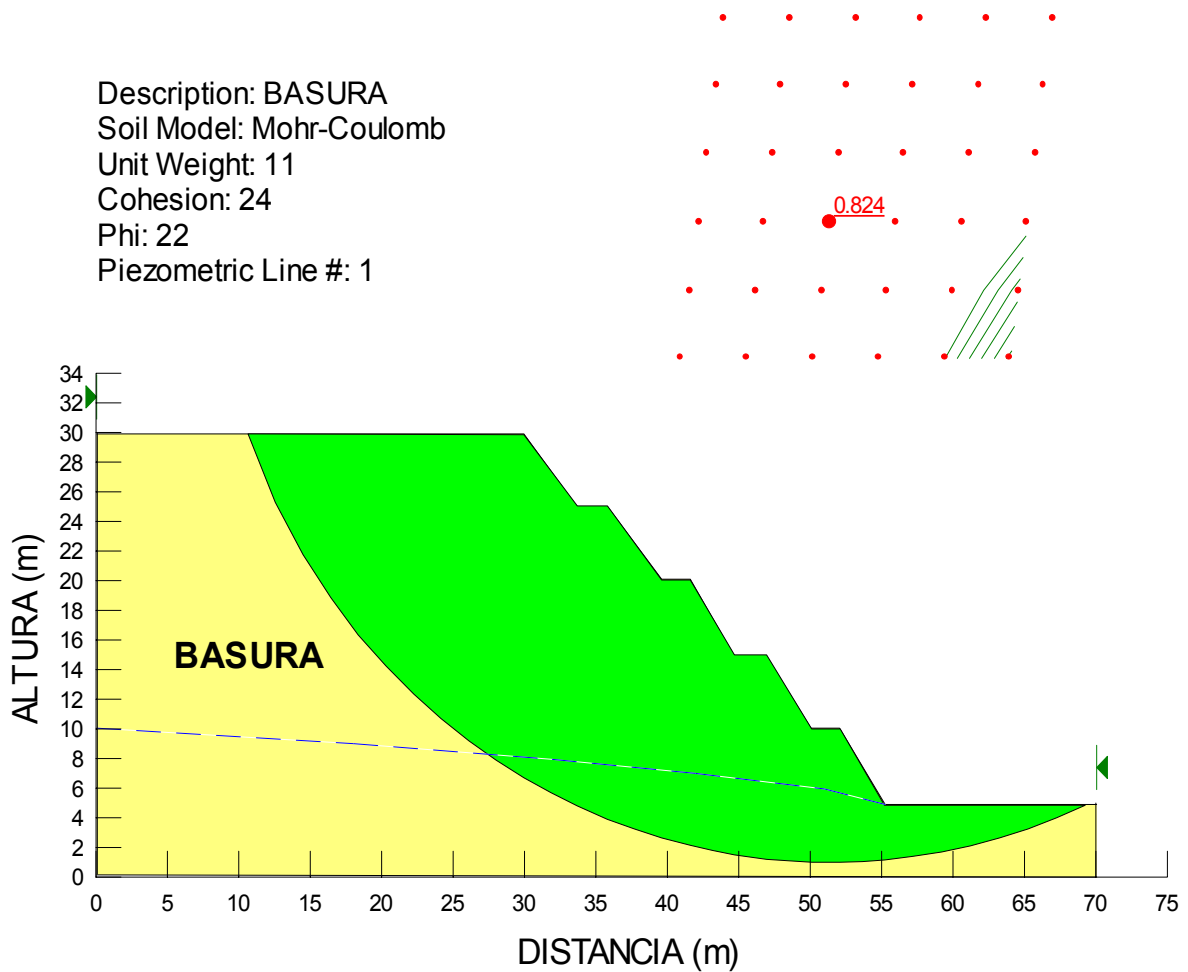


Fig. 73. Factor de Seguridad (F^{**}) para la Aceleración Máxima (0,30g)

4. RESUMEN DE RESULTADOS

Tabla 11. Ángulo de Inclinación Máximo (α) y Factor de Seguridad (F^*) de Cada Nivel

NIVEL	ALTURA (m)	α (°)	F^*		
			$c = 1,7 \text{ KPa}$	$\phi = 37,8^\circ$	σ_n (KPa)
I	5	58	1,027		9,8
I - II	10	58	1,037		13,5
I - II - III	15	58	1,023		25,5
I - II - III - IV	20	53	1,020		34,0
I - II - III - IV - V	25	53	1,000		31,0
I - V	25	45	1,000		31,0

Tabla 12. Ángulo de Inclinación Máximo (α) y Factor de Seguridad (F^{**}) de Cada Nivel

NIVEL	ALTURA (m)	α (°)	F^{**}		
			$c = 24 \text{ KPa}$	$\phi = 22^\circ$	σ_n (KPa)
I	5	58	3,408		28
I - II	10	58	2,031		57
I - II - III	15	58	1,590		70
I - II - III - IV	20	53	1,381		92
I - II - III - IV - V	25	53	1,264		100
I - V	25	45	1,264		100

Tabla 13. Factor de Seguridad para cada Coeficiente de Sísmico Horizontal (A_0)

NIVEL	ALTURA (m)	A_0	F^*	F^{**}
I - V	25	0,10	0,854	1,088
		0,15	0,783	1,013
		0,20	0,718	0,947
		0,25	0,659	0,883
		0,30	0,599	0,824

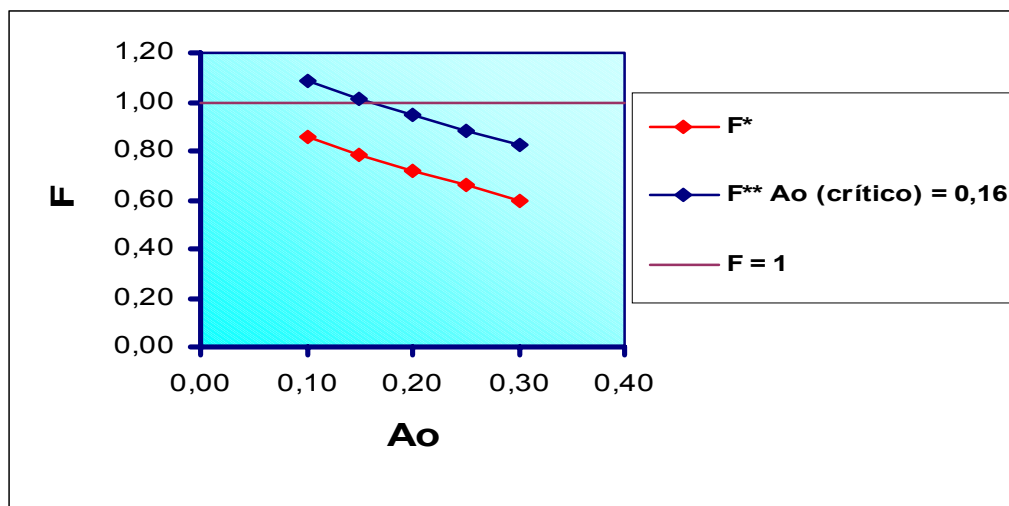


Fig. 74. Factor de Seguridad en Función del Coeficiente Sísmico Horizontal

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El talud de basura ensayado a escala real con los parámetros geotécnicos asumidos ($c = 24 \text{ KPa}$ y $\phi = 22^\circ$) no falló, debido principalmente al efecto reforzador del plástico el cual constituye el (11,7%) de la basura, esto representa un valor alto de acuerdo a la literatura especializada (ver Fig. 75).



Fig. 75. Alto Contenido de Plástico en el Talud de Basura Ensayado a Escala Real



Fig. 76. Efecto Reforzador del Plástico en el Talud de Basura Ensayado a Escala Real

En la Figura 76 se observa que la matriz reforzadora tiene un efecto cohesivo que disminuye a medida que el plástico falla por fluencia y, por ende, aumenta la matriz básica que tiene un efecto friccional. Por otro lado, la humedad hace que disminuya la cohesión y, a medida que aumenta la biodegradación de la materia orgánica, la matriz básica aumenta, ocasionando un aumento del ángulo de fricción interno.

Los parámetros geotécnicos obtenidos del “back-analysis” aumentan a medida que se incrementa la sobrecarga, lo cual indica la importancia de una buena compactación de la basura.

La determinación del ángulo de inclinación máximo ($\alpha = 45^\circ$) para una altura de 25 m se realizó con los parámetros obtenidos del “back-analysis” ($c = 1,7$ KPa y $\phi = 37,8^\circ$), ya que los mismos son valores conservadores, la cohesión es baja y el ángulo de fricción es alto, lo cual ocurre en la basura a medida que transcurre el tiempo.

En el análisis realizado al talud de basura con los parámetros geotécnicos asumidos en el ensayo a escala real ($c = 24$ KPa y $\phi = 22^\circ$) el factor de seguridad fue de 1,264, el cual es aceptable, pues, para taludes temporales el factor de seguridad recomendado oscila entre 1,1 y 1,2.

El esfuerzo normal máximo ($\sigma_n = 100$ KPa) a la superficie de falla obtenido con los parámetros geotécnicos asumidos en el ensayo a escala real ($c = 24$ KPa y $\phi = 22^\circ$) es igual al obtenido en el CASO III (σ_n^*) en el equilibrio límite; esto indica que la sobrecarga aplicada produce el mismo esfuerzo normal que para un talud de 45° de inclinación y 25 m de altura, sin sobrecarga.

En el análisis sísmico se puede observar que a medida que aumenta el coeficiente sísmico horizontal disminuye el factor de seguridad, así como la superficie de falla se hace más profunda. Se encontró que el coeficiente sísmico horizontal crítico es 0,16, siendo este un valor aceptable ya que los taludes son de carácter temporal.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. CONCLUSIONES

- ❑ Para la condición más desfavorable se determinó un ángulo de inclinación máximo de 45° correspondiente a una altura crítica de 25 m.
- ❑ El factor de seguridad ($F^{**} = 1,264$) obtenido con los parámetros geotécnicos ($c = 24$ KPa y $\phi = 22^\circ$) se considera aceptable, ya que es mayor de 1,2.
- ❑ Los taludes de basura del Relleno Sanitario La Bonanza están influenciados principalmente por la matriz reforzadora, constituida en su mayor parte de material plástico, que tiene un efecto cohesivo, como se pudo verificar en el talud de basura ensayado a escala real.
- ❑ La sobrecarga aplicada tiene un efecto multiplicador en los parámetros geotécnicos lo cual se evidenció en el “back-analysis”. Esto resalta la importancia que tiene la buena ejecución de la compactación de la basura.
- ❑ Para un nivel de esfuerzo normal máximo de 100 KPa los parámetros geotécnicos asumidos ($c = 24$ KPa y $\phi = 22^\circ$) se consideran conservadores.
- ❑ Un coeficiente sísmico horizontal crítico (0,16) se considera aceptable, pues los taludes de basura son temporales, no existiendo riesgos considerables.

2. RECOMENDACIONES

- ❑ Para evitar posibles fallas, donde el principal motivo es el aumento de la presión intersticial, es indispensable que se cuente con sistemas de drenaje interno de los lixiviados y, secundariamente, de los gases. Se recomienda, entre otros, la ejecución de trincheras, galerías de drenaje y drenes horizontales de alivio.

- ❑ Realizar un análisis de estabilidad en el fondo de la celda, a lo largo de la interfase entre la geomembrana y los materiales granulares (grava) de la zona de recolección de lixiviados, a fin de verificar que el ángulo de fricción interno en la superficie de deslizamiento para un ($F = 1$) sea mayor o igual que el ángulo de fricción interno entre la geomembrana y el material granular.

- ❑ Se recomienda aplicar un programa de seguridad geotécnica, a fin de contar con medidas preventivas y de control durante la operación del relleno, como por ejemplo: instrumentar los taludes con piezómetros, inclinómetros y redes topográficas, para controlar los movimientos de grandes masas; instalar un sistema de control entre los lixiviados producidos y recolectados que permitan determinar la acumulación de líquido en el relleno y la factibilidad de recirculación de estos; colocar elementos de medición de presiones internas dentro del relleno en áreas críticas que permita establecer las modificaciones necesarias en el sistema de alivio.

BIBLIOGRAFÍA

ALVARADO, J. (1989). **Regiones y Características Hidrogeológicas de Venezuela**. MEM. VII Congreso Geológico Venezolano. Barquisimeto, Venezuela.

AZÓCAR, G. (1983). **Relleno Sanitario**. C.V.G. Siderúrgica del Orinoco, C.A. División de Control de Riesgos. Venezuela. 34 p.

BADILLO, J y RODRÍGUEZ, R. (1977). **Mecánica de Suelos**. Tomo I. Limusa. 3^{era} Edición. México. 638 p.

BAGCHI, A. (1994). **Design, Construction and Monitoring of Landfills**. Wiley & Sons. 2nd Edition. John. U.S.A. 361p.

BRICEÑO, G. (1992). **Caracterización físico-química del lixiviado del Relleno Sanitario La Bonanza y determinación de su efecto en algunas propiedades químicas del suelo**. Universidad Central de Venezuela. Trabajo Especial de grado. Inédito. Caracas.

CALVO, V y FIGUEREDO, R. (1998). **Ingeniería Conceptual de Rellenos de Seguridad y su Aplicación en Venezuela**. Universidad José Maria Vargas. Trabajo Especial de Grado. Caracas, Venezuela.

CASTILLEJO, M. (1993). **Análisis Comparativo de los Métodos de Estabilidad de Taludes y su Control**. Dpto. de Ingeniería de Minas. Universidad Central de Venezuela. Trabajo de Ascenso. Caracas.

CASTILLEJO, M. (1996). **Movimientos de Masa y su Mitigación**. Dpto. de Ingeniería de Minas. Universidad Central de Venezuela. Trabajo de Ascenso. Caracas.

CATERPILLAR (1998). **Manual de Rendimiento**. Edición 29. Illinois. USA. 600 p.

CONDE, A. (1985). **Estudio sobre la contaminación de las aguas subterráneas en El Relleno La Bonanza**. MARNR. Caracas, Venezuela.

COVENIN 1756-98 (1998). **Edificaciones Sismorresistentes**. Fondonorma. Caracas, Venezuela. 73 p.

DANIEL, D. (1993). **Geotechnical Practice for Waste Disposal**. Chapman & Hall. 1st Edition. U.S.A. 683 p.

D'ESCRIVAN, G. (2000). **Estudio Geotécnico para Verificación de Suelos en El Relleno Sanitario La Bonanza**. Informe N° 944. Caracas, Venezuela.

D'ESCRIVAN, G. (2000). **Verificación de Suelos y Ensayos de Permeabilidad in situ y en Laboratorio**. Informe N° 946. Caracas, Venezuela.

DEL GRECCO, O y OGGERI, C. (1993). **Geotechnical Parameters of Sanitary Waste**. IV Congreso Internacional de Rellenos Sanitarios. Sardinia, Italia.

DE SOLA, O. (1967). **Desarrollo de Aguas Subterráneas**. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Metalurgia. 702 p.

DIMITRI, P. y JUDD, W. (1980). **Principios de Geología y Geotecnia para Ingenieros**. Editorial Omega. Madrid, España.

GALAVIZ, A. (1994). **Algunas Técnicas para el Tratamiento Preventivo y Correctivo de Problemas Relacionados con la Contaminación y Preservación del Medio Ambiente, así como en la Disposición de Desechos Tóxicos**. XIII Congreso Venezolano de Geotecnia. Caracas.

GENATIOS, E. (1971). **Problemas de los Desechos Sólidos en la Zona Metropolitana de Caracas y los Pasos a Seguir para una Posible Solución: Relleno Sanitario**. Universidad Central de Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Caracas.

GIROUD, P. (1980). **Introduction to Geotextiles and Their Applications**. 1st. Canadian Symposium on Geotextiles. Canada. 235 p.

GONZÁLEZ DE JUANA, C. et al., (1980). **Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas**. Tomo I. FONINVES. Caracas, Venezuela. 405 p.

HERRERA, A. (1985). **Análisis de las Aplicaciones de Geotéxiles Efectuados en Venezuela**. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Central de Venezuela. Trabajo Especial de Grado.

HOEK, E. & BRAY, J. (1981). **Rock Slope Engineering**. Institute of Mining and Metallurgy. 3rd Edition. London. 358 p.

INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA. (1987). **Manual del Ingeniero de Taludes**. 1^{era} Edición. Madrid, España. 456 p.

KÉZDI, A. (1975). **Manual de la Mecánica de Suelos**. Tomo I. Ediciones de la Biblioteca de la U.C.V. Caracas. 264 p.

KNOCHENMUS et al., (1998). **Stability of Municipal Solid Waste**. Comité Técnico TC 5 Geotecnia Ambiental de la ISSMGE.

KOERNER, R. (1981). **Designing with Geosynthetics Slope Engineering**. Prentice Hall. New Jersey. USA.

KOERNER, R. (1987). **Construction and Geotechnical Engineering**. Jhon Wiley & Sons. Using Synthetic Fabrics. New York. USA. 527 p.

LAMBE, W y WHITMAN, R. (1972). **Mecánica de Suelos**. Limusa-Wiley. México. 575 p.

MANASSERO, M. et al., (1998). **Controlled Landfill Design (Geotechnical Aspects)**. Comité Técnico TC 5 Geotecnia Ambiental de la ISSMGE.

MANASSERO, M. et al., (1997). **Waste Disposal and Containment**. Comité Técnico TC 5 Geotecnia Ambiental de la ISSMGE.

MARNR. (1998). **Normas para el Control de la Recuperación de Materiales Peligrosos y el Manejo de los Desechos Peligrosos**. Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 5.212 . Extraordinario.

McBEAN, E. et al., (1995). **Solid Waste Landfill Engineering and Design**. Prentice Hall. U.S.A. 512 p.

PACHECO, B. y GÓMEZ, R. (2001). **Diseño y Estabilidad de Taludes de la Celda Específica Final para Desechos Tóxicos en el Relleno Sanitario La Bonanza. Charallave, Edo. Miranda**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.

PETROLEOS DE VENEZUELA-INTEVEP (1997). **Léxico Estratigráfico**. (Libro en línea). Disponible: <http://www.pdv.com/léxico>. (Consulta: 2001, octubre).

RAMÍREZ, N. y D'ESCRIVAN, E. (2000). **Influencia de la Geología de la Zona de La Bonanza Formación Las Mercedes en la Permeabilidad de Suelos y Rocas con los Lixiviados del Relleno Sanitario**. Universidad Central de Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Caracas, Venezuela.

RODRIGUEZ, A. (1990). **Estudio y Comparación de Proyectos del Sistema de Canalización de las Aguas Superficiales y del Lixiviado en el Relleno Sanitario La Bonanza**. Universidad Central de Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Caracas.

SÁNCHEZ, R. (1999). **Diagnostico Preliminar sobre la Situación Actual del Sector Residuos Sólidos en Venezuela**. Dpto. de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Central de Venezuela. Trabajo de Ascenso. Caracas.

TCHOBANOGLIOUS, G. et al., (1993). **Gestión Integral de Residuos Sólidos**. Volumen I y II. MCGRAW HILL.

USER'S GUIDE SLOPE/W 4.0 (2000). **Slope Stability Analysis**. Licencia N° 95.849

ANEXOS

ANEXO A



ANEXO B - 1. Vista Aérea de una Falla Circular de un Talud de Basura en el Relleno Sanitario “Navaro” en Cali, Colombia



ANEXO B - 2. Vista Aérea de una Falla Circular de un Talud de Basura en el Relleno Sanitario “Navaro” en Cali, Colombia



ANEXO C. Vista de las Celdas 1, 2 y 3 del Relleno Sanitario La Bonanza

Description:

Comments: ANÁLISIS SISMICO:

File Name: NIVEL_05_SISMO_(CONSERVADOR).slp

Analysis Method: Bishop

Slip Surface Option: Grid and Radius

P.W.P. Option: Piezometric Lines / Ru

Seismic Coefficient (0.10): Horizontal

Description: BASURA

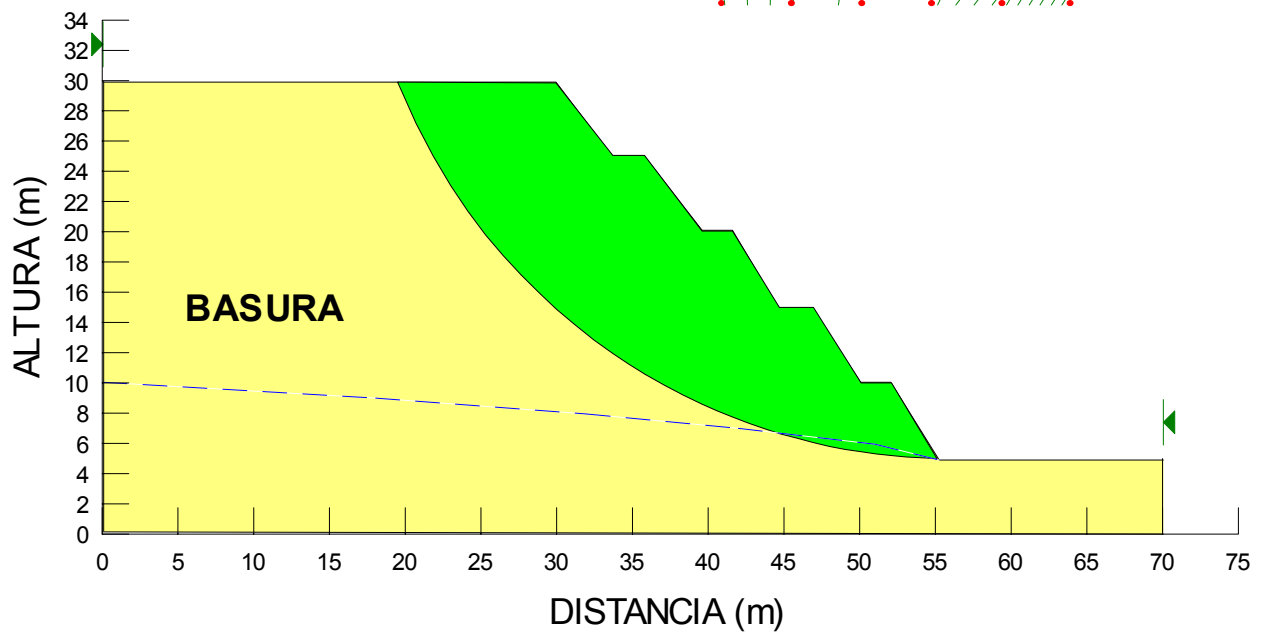
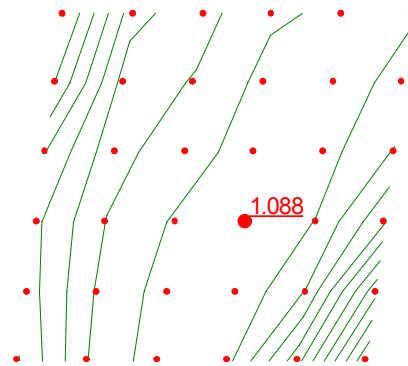
Soil Model: Mohr-Coulomb

Unit Weight: 11

Cohesion: 24

Phi: 22

Piezometric Line #: 1



ANEXO E – 1. Factor de Seguridad (F) para una Aceleración Horizontal de (0,10g)**

Description:

Comments: ANÁLISIS SISMICO:

File Name: NIVEL_05_SISMO_(CONSERVADOR).slp

Analysis Method: Bishop

Slip Surface Option: Grid and Radius

P.W.P. Option: Piezometric Lines / Ru

Seismic Coefficient (0.15): Horizontal

Description: BASURA

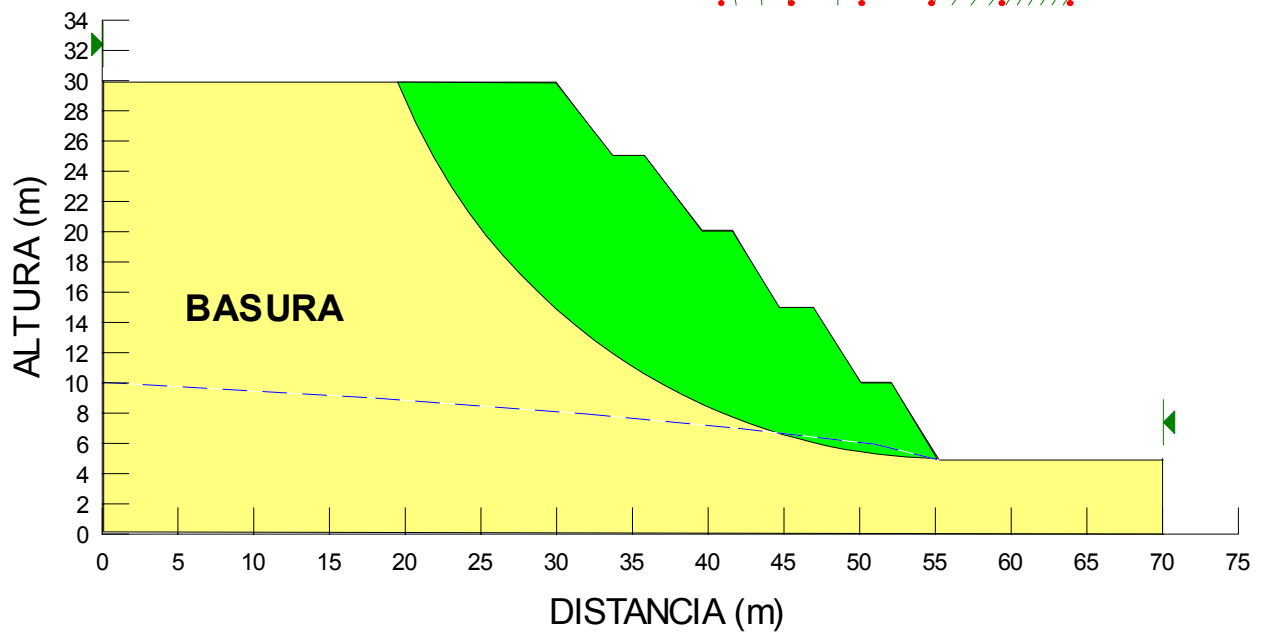
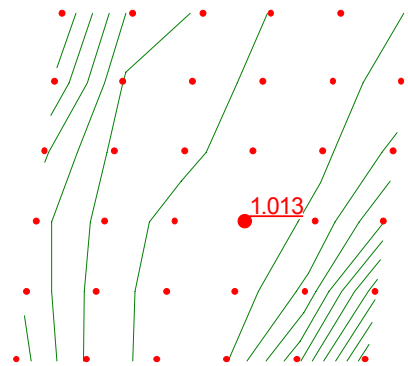
Soil Model: Mohr-Coulomb

Unit Weight: 11

Cohesion: 24

Phi: 22

Piezometric Line #: 1



ANEXO E – 2. Factor de Seguridad (F^{**}) para una Aceleración Horizontal de (0,15g)

Description:

Comments: ANÁLISIS SISMICO:

File Name: NIVEL_05_SISMO_(CONSERVADOR).slp

Analysis Method: Bishop

Slip Surface Option: Grid and Radius

P.W.P. Option: Piezometric Lines / Ru

Seismic Coefficient (0.20): Horizontal

Description: BASURA

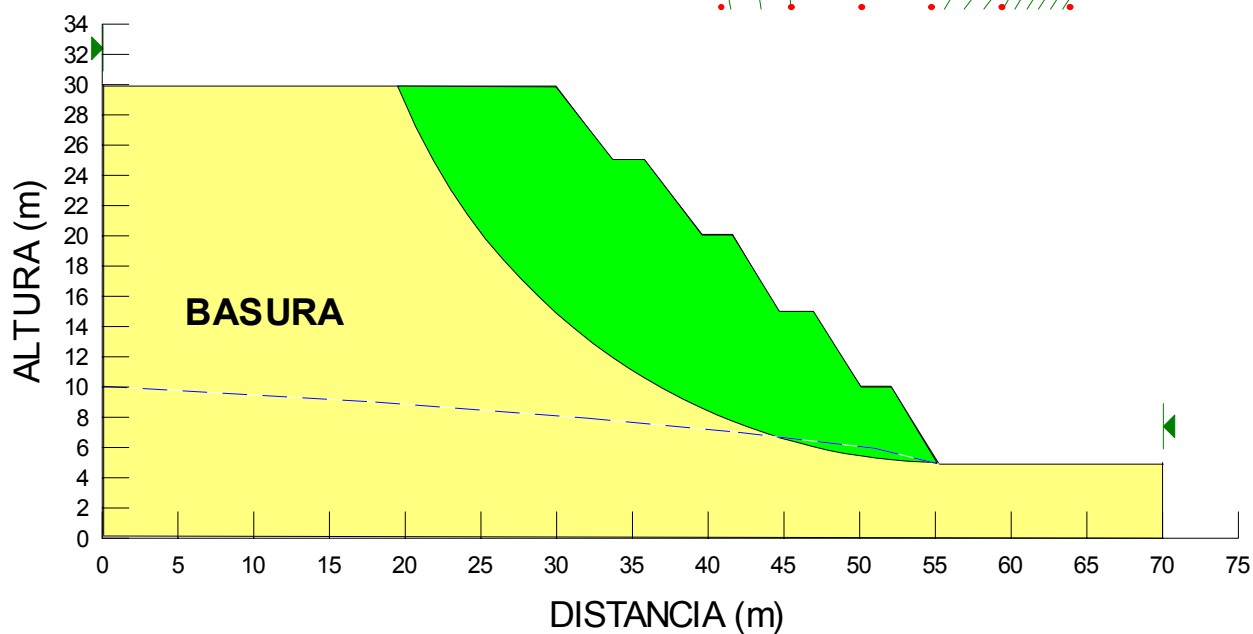
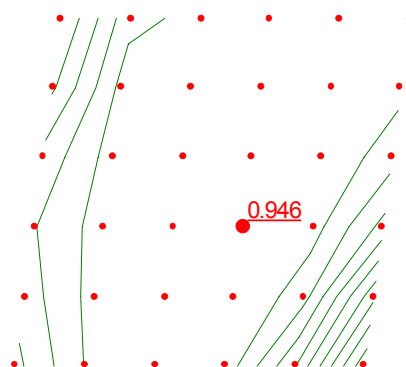
Soil Model: Mohr-Coulomb

Unit Weight: 11

Cohesion: 24

Phi: 22

Piezometric Line #: 1



ANEXO E – 3. Factor de Seguridad (F^{**}) para una Aceleración Horizontal de (0,20g)

Description:

Comments: ANÁLISIS SISMICO:

File Name: NIVEL_05_SISMO_(CONSERVADOR).slp

Analysis Method: Bishop

Slip Surface Option: Grid and Radius

P.W.P. Option: Piezometric Lines / Ru

Seismic Coefficient (0.25): Horizontal

Description: BASURA

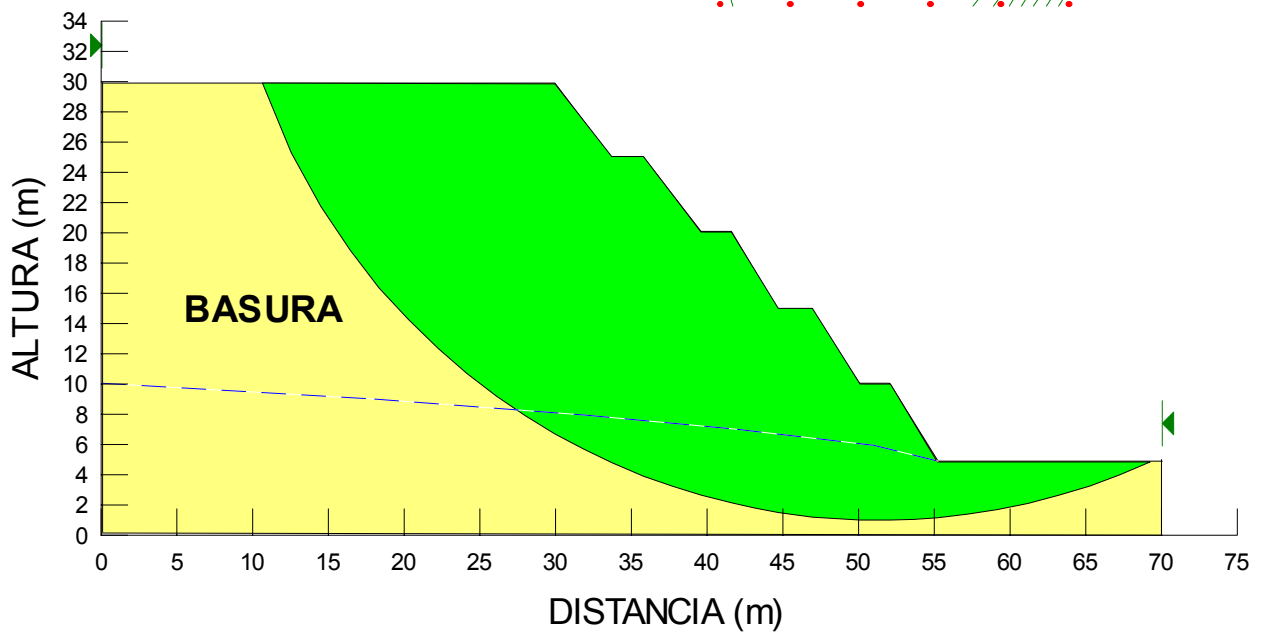
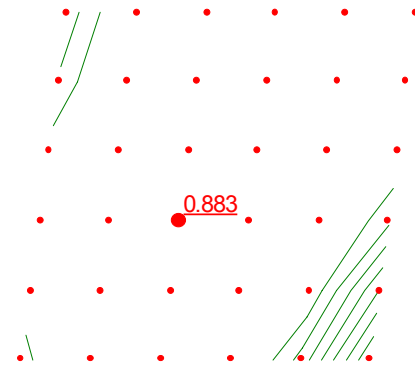
Soil Model: Mohr-Coulomb

Unit Weight: 11

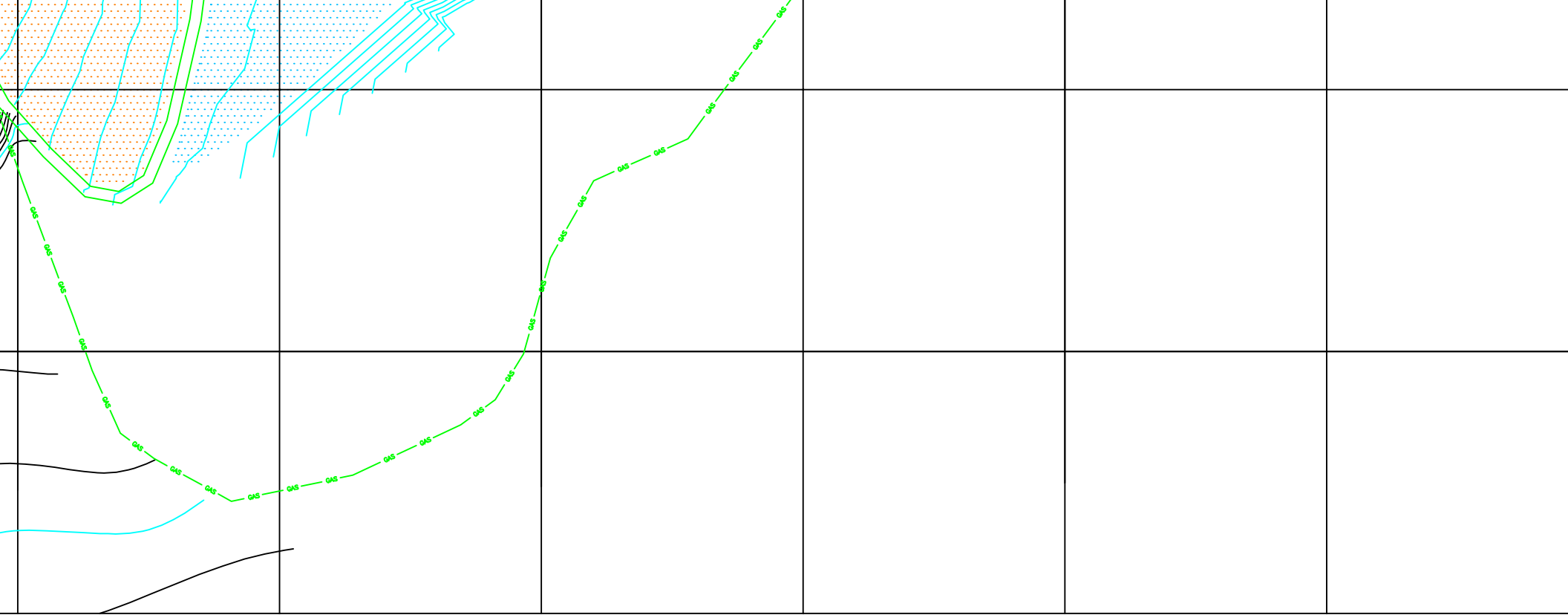
Cohesion: 24

Phi: 22

Piezometric Line #: 1



ANEXO E – 4. Factor de Seguridad (F^{**}) para una Aceleración Horizontal de (0,25g)



SECTOR	AREA (m2)	COLOR	DESCRIPCION	SECTOR
C10 C11 D10 D11	17.250		TERRAZA SUR	E8 E9 F8 F9
D10 D11	3.250		TERRAZA CENTRAL ESTE	G9 G10 H8 H9
D9 D10 D11 E9 E10 E11 E12	43.400		TERRAZA OESTE	E9 E10 E11 E12
E8 E9	9.500		LAGUNAS VAGUADA ESTE LIXIVIADOS	H10 I10
D7 D8 E7 E8	27.300		TALUD TERRAZA NORTE	I3 J3 J4
E7 F3 F4 F5 F6 F7 G3 G4 G5 G6 G7 H3 H4 H5 H6 I3 I4 I5 I6 J4 J5	232.950		LAGUNA NORTE	J3 J4 K3
G3	735		TERRAZA PANORAMICA	J6 J7 K6

--	--	--