

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**Profesor Patrocinante: Ricardo Riveros Velásquez**



**“METODOLOGÍA DE DISEÑO DE ESTABILIDAD  
DE TALUDES PARA RELLENOS SANITARIOS DE  
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS”**

**Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de  
Ingeniero Civil**

**LUIS ALFREDO MORENO PRADENA**

Concepción, Diciembre 2013

*Dedicatoria:*

*Con todo mi amor, para las personas que han hecho todo en la vida  
para que yo pueda lograr mis sueños.*

*Papá y Mamá.*

*Agradecimientos:*

*A mi papá Roberto Moreno M., mamá María Pradena P.  
y hermana Maritza Moreno P. por su constante  
apoyo y confianza durante toda mi vida.*

*A mi polola Gabriela Miranda Cárdenas, por apoyarme  
en este proyecto de título, por su paciencia, comprensión  
y por estar siempre a mí lado, por preferir sacrificar su  
tiempo para que yo pudiera cumplir con el mío.*

*A Dios por darme fuerza, sabiduría y perseverancia  
para cumplir mis objetivos*

*Además, a mi profesor guía Ricardo Riveros,  
por su dedicación en este proyecto de título.*

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	vi
RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
1. INTRODUCCIÓN .....	3
1.1 Objetivos de la Investigación .....	4
1.1.1 Objetivo general .....	4
1.1.2 Objetivos específicos .....	4
2. GENERALIDADES .....	5
2.1 Estabilidad de Taludes .....	5
2.2 Rellenos Sanitarios .....	6
2.2.1 Propiedades de los RSU .....	6
a) Composición Porcentual .....	7
b) Humedad .....	7
c) Densidad .....	8
3. CARACTERIZACIÓN DE TALUD EN RELLENOS SANITARIOS .....	9
3.1 Caracterización geométrica de talud .....	9
3.2 Estabilidad de Taludes en Rellenos Sanitarios .....	9
3.3 Propiedades Mecánicas de los RSU en los Rellenos Sanitarios .....	10
3.3.1 Análisis de Compresibilidad .....	11
3.3.2 Resistencia al corte .....	12
a) Determinación de Parámetros Resistentes .....	15
b) Criterios de rotura para RSU .....	18
4. PROPUESTA METODOLÓGICA DE DISEÑO .....	22
4.1 Factores Relevantes para el Diseño de Taludes .....	22

4.2	Supuestos Adoptados para el Análisis de Estabilidad .....	23
4.3	Criterios de Diseño .....	25
4.4	Deducción de Parámetros Geotécnicos.....	26
4.5	Diagrama: Propuesta Metodología de Diseño .....	27
5.	CONCLUSIONES.....	28
6.	RECOMENDACIONES .....	30
	BIBLIOGRAFÍA .....	31
	ANEXOS .....	35

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo esquemático de la composición de los RSU.....	12
Figura 2. Comportamiento de los residuos bajo ensayos de corte, modelo de interacción entre las fuerzas de fricción y tracción.....	13
Figura 3. Envolverte de rotura. ....	14
Figura 4 Diagrama cohesión-ángulo de fricción. Propuesta recomendada para proyectos.....	18
Figura 5. Parámetros resistentes recomendados. ....	19
Figura 6. Recopilación realizada por Kavazanjian et al. ....	20
Figura 7. Criterio de rotura para RSU por Manassero et al.....	21
Figura 8. Diagrama de propuesta de metodología de diseño.....	27

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros Resistentes al Corte, según distintos autores a nivel mundial.....	17
--	----

# **METODOLOGÍA DE DISEÑO DE ESTABILIDAD DE TALUDES PARA RELLENOS SANITARIOS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**

Autor: Luis Moreno Pradena

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío

[lumoreno@alumnos.ubiobio.cl](mailto:lumoreno@alumnos.ubiobio.cl)

Profesor Patrocinante: Ricardo Riveros Velásquez

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío

[riveros@ubiobio.cl](mailto:riveros@ubiobio.cl)

## **RESUMEN**

Actualmente la dificultad para encontrar emplazamiento de rellenos sanitarios de residuos sólidos urbanos se está superando con el diseño de rellenos de alturas importantes, cuya configuración típica es en base a terrazas y taludes, de manera de aumentar la capacidad y su vida útil. En este sentido el presente estudio persigue proponer una metodología de diseño de estabilidad de taludes para este tipo de obras, acorde a la realidad del país. Para ello se analiza la información disponible de investigaciones a nivel nacional e internacional en relación a este tema.

Como conclusión se obtiene que es posible definir una metodología de estabilidad basada en conceptos geotécnicos, a través de los criterios de rotura Mohr-Coulomb. Sin embargo, la mayor dificultad se encuentra en la determinación de los parámetros resistentes, para lo que se propone realizar ensayos que permitan evaluar la resistencia al corte de cada relleno a estudiar de manera puntual.

Palabras clave: Relleno Sanitario, Estabilidad de Talud, Residuos Sólidos Urbanos

7.797 Palabras Textos+8Figuras/Tablas\*250+1Figuras/Tablas\*500=9.961 Palabras Totales

## **DESIGN METHODOLOGY FOR SLOPE STABILITY OF SANITARY LANDFILLS OF MUNICIPAL SOLID WASTE**

Author: Luis Moreno Pradena

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio-Bio.

[lumoreno@alumnos.ubiobio.cl](mailto:lumoreno@alumnos.ubiobio.cl)

Teacher Guide: Ricardo Riveros Velásquez

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio-Bio.

[riveros@ubiobio.cl](mailto:riveros@ubiobio.cl)

### **ABSTRACT**

Currently the difficulty for finding a site of sanitary landfills is getting over with the design of significant heights fillers with typical configuration is based on terraces and slopes, in order to increase capacity and life .In this way the present study is trying to propose a design methodology of slope stability, for this type of work accord to the reality of this country. For that it has been analyze the able national and international information.

As a conclusion, it is obtained that is valid to define a methodology based on geotechnical stability concepts through Mohr-Coulomb failure criteria. A however, the biggest difficult have been the determination of the resistant parameters, for which is postulate trials to evaluate the shear strength of each landfill to study in a specific way to study.

Keywords: Sanitary landfills, Slope stability, Municipal solid waste.

## **1. INTRODUCCIÓN**

En muchos países, incluido Chile, la producción de residuos sólidos urbanos (RSU) ha ido aumentando rápidamente, y es un tema relevante hoy en día. En la búsqueda de solucionar el problema de disposición de estos residuos, el método de relleno sanitario (RS) es el más adecuado. En esta tecnología el vaso de vertido es prácticamente una celda aislada del entorno, las interacciones con el medio se minimizan, además de ofrecer mejores soluciones técnicas y económicas de acuerdo al nivel de desarrollo del país.

Hoy en día, la dificultad para encontrar emplazamientos de RS se está superando con la ejecución de rellenos de alturas importantes, y de diseños que aprovechen mejor el espacio disponible. La capacidad de estos rellenos aumenta en función de la altura y pendiente de sus taludes.

Con el objetivo de evitar problemas de estabilidad durante la fase de operación y cierre, se deben conocer los aspectos geotécnicos relacionados con la estabilidad de taludes, debido a que la causa de un número importante de accidentes ha sido el desconocimiento de las propiedades mecánicas y de su evolución en el tiempo.

Para este tipo de obras, se considerará a los RSU como un suelo con parámetros propios. Determinarlos es una tarea difícil debido a la heterogeneidad, ya que presentan características de anisotropía y las propiedades geotécnicas pueden cambiar con el tiempo como resultado de la descomposición bioquímica de estos materiales.

El presente proyecto de título se centra en proponer una metodología de diseño de estabilidad de taludes para Rellenos Sanitarios de RSU. En este caso el término estabilidad se considerará relacionándolo exclusivamente con los aspectos de estabilidad mecánica de la masa de residuos.

## **1.1 Objetivos de la Investigación**

### *1.1.1 Objetivo general*

- Proponer una metodología para el diseño de taludes en rellenos sanitarios, basados en investigaciones sobre el comportamiento mecánico de los Residuos Sólidos Urbanos.

### *1.1.2 Objetivos específicos*

- Caracterizar condición de taludes de rellenos sanitarios.
- Identificar factores relevantes para el diseño de taludes de rellenos de RSU.
- Analizar relaciones geomecánicas de parámetros de diseño para taludes en rellenos de RSU.
- Proponer un método de diseño pertinente a la condición de taludes de relleno de RSU.

## 2. GENERALIDADES

Para el desarrollo del tema resulta importante tener conceptos claros respecto a estabilidad de taludes y rellenos sanitarios, los cuales serán explicados en los siguientes puntos. Además, para efectos del presente proyecto de título en el Anexo A se presentan conceptos que resultan fundamentales para una mejor comprensión del tema a desarrollar.

### 2.1 Estabilidad de Taludes

Se entiende bajo el nombre genérico de taludes cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal que haya de adoptar permanentemente la estructura de tierra. Se clasifican en taludes naturales (laderas) y taludes artificiales (cortes y terraplenes).

El estudio de la estabilidad de una masa de suelo se refiere a su seguridad contra la falla o deslizamiento. 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, como consecuencia de la presencia de esfuerzos cortantes que supera la resistencia al corte del suelo.

Para el caso de taludes que involucran materiales blandos como suelos, 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.

Para evaluar la estabilidad de taludes, el método más utilizado es el de equilibrio límite que se basa exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable. No tienen en cuenta las deformaciones del terreno. Suponen que en el momento de la falla la resistencia al corte se moviliza simultáneamente a lo largo de la superficie de corte.

Al utilizar esta alternativa, la seguridad de un talud se expresa mediante el factor de seguridad (FS) que se define como:

$$FS = \frac{\textit{Resistencia al corte disponible}}{\textit{Esfuerzo de corte movilizado}} \quad \textit{Ec. (1)}$$

Así cuando el talud es estable el FS será mayor que uno y si es menor que uno indicará inestabilidad.

## **2.2 Rellenos Sanitarios**

El D.S. 189 (2005), Ministerio de salud, define relleno sanitario como: “instalación de eliminación de residuos sólidos en la cual se disponen residuos sólidos domiciliarios y asimilables, diseñada, construida y operada para minimizar molestias y riesgos para la salud y la seguridad de la población y daños para el medio ambiente, en la cual las basuras son compactadas en capas al mínimo volumen practicable y son cubiertas diariamente”.

La configuración típica de los rellenos obedecen a un esquema común, resultante de la disposición de los residuos sobre el terreno en capas que, tras una mayor o menor compactación, se cubren con suelo compactado. Las capas formadas se interrumpen a intervalos fijos mediante un recubrimiento lateral (diario) en pendiente, formando unidades menores denominadas celdas, que corresponden al volumen de material dispuesto durante un período de operación. La celda incluye el material de cobertura, que usualmente consiste en una capa de 15 a 30 cm de espesor de suelo. Se dispone al final de un período de operación con el propósito de impedir el arrastre por el viento de residuos livianos, evitar la proliferación de ratas, insectos y otros portadores de enfermedades, además de disminuir la entrada de agua al relleno durante la operación.

La superficie superior del relleno se corona con una cobertura de mayor espesor, que puede estar formada por varias capas de suelo y/o geomembranas, destinada a aislar los residuos del exterior y servir de base para el posterior uso de la superficie restaurada. En anexo B se presenta una sección referencial típica, con los distintos elementos de la instalación de un RS. Además, se muestran dos configuraciones: en altura y en pendiente o vaguada, que caen dentro de los rellenos sanitarios en altura, que pueden ser construidos en terrenos planos o sobre un relleno existente.

### *2.2.1 Propiedades de los RSU*

El conocimiento de las propiedades de los RSU, es muy relevante para el comportamiento de un relleno sanitario. Múltiples casos de accidentes se han producido debido al desconocimiento de estas propiedades y de su evolución con respecto al tiempo.

#### a) Composición Porcentual

La composición de los RSU es bastante heterogénea, pudiendo variar considerablemente de una región a otra. Tal diferencia está relacionada con el grado de desarrollo económico, tecnológico, cultural y sanitario de dichas regiones. En anexo C se puede observar una composición promedio de los RSU para distintas ciudades a nivel nacional e internacional.

El conocimiento de la composición física de los RSU es muy importante ya que condiciona el comportamiento global del RS. El porcentaje de materia orgánica está directamente vinculada con el contenido de humedad, permeabilidad y densidad. Plásticos, cuero y otros constituyen componentes fibrosos, y afectan directamente al comportamiento del material en lo referente a la resistencia al corte, debido a que aumentan los valores de la cohesión. En cambio, la presencia de materiales inertes y dimensionalmente estables, proporcionan a los RSU resistencia a la fricción.

#### b) Humedad

El contenido de humedad de los RSU varía según muchos factores, como las condiciones climáticas, composición inicial de los residuos, el proceso de operación del relleno, la tasa de descomposición biológica, la capacidad y funcionamiento de los sistemas de recolección de lixiviados y el sistema de recubrimiento (Palma, 1995; Carvalho, 1999). Landva & Clark (1990) afirman que cuanto mayor es el porcentaje de materia orgánica en el interior de la masa de residuos, mayores son los contenidos de humedad observados.

También pueden ocurrir acumulaciones de humedad en los rellenos, debido a la presencia de materiales como plásticos, papeles, cueros, maderas, etc., que retienen o bien absorben líquidos en su estructura.

Analizando los datos obtenidos en el vertedero de Bandeirantes, en Sao Paulo, Carvalho (1999) verificó que a medida que los puntos de muestreo eran más profundos, mayores eran los contenidos de humedad obtenidos. En cambio Coumolous et al. (1995), estudiando un vertedero de Atenas, comprobaron que la concentración de fluidos disminuía con la profundidad. En anexo C se presentan una serie de valores de humedad recogidos de la literatura técnica.

Existe gran divergencia de los valores del contenido de humedad de los RSU publicados en la literatura, debido a la variedad de factores que inciden en éste. Hecho que dificulta el establecimiento de tendencias o reglas que definan la variación de humedad en rellenos, por lo que no hay un patrón definido y va a depender de las condiciones de cada relleno.

### c) Densidad

Una de las características determinantes en el análisis de estabilidad de un relleno es el estado de tensiones debido al peso propio de los materiales que lo constituyen, por lo que se hace imprescindible el conocimiento de la densidad de los RSU.

Evaluar la densidad es bastante difícil, debido a; separación de los residuos por la capa de cobertura diaria, inexistencia de procedimientos de muestreo y ensayos generalmente aceptados y contrastados por la comunidad científica; dificultad para calcular los cambios de densidad con el tiempo y la profundidad (la mayoría de los valores publicados corresponden a residuos cercanos o en la superficie); determinación del contenido de humedad de los RSU.

El valor de la densidad tiene mayor confiabilidad si se precisan previamente algunas condiciones como: composición de los RSU, incluyendo caracterización del suelo de cobertura y contenido de humedad, método de construcción del relleno y grado de compactación de los residuos, profundidad a la que se registró la densidad y edad del relleno.

Landva y Clark (1990), Siegel et al. (1990), Singh y Murphy (1990), Fassett et al. (1994) y Kavazanjian et al. (1995) sitúan los valores de densidad de los residuos en un rango entre 0,30 a 1,5 t/m<sup>3</sup>. Se puede asumir que los valores bajos corresponden a rellenos con deficiente o nula compactación de los residuos, y los valores altos se pueden asignar a residuos antiguos bajo sobrecargas relativamente altas o rellenos modernos. Mayor detalle en anexo C.

### 3. CARACTERIZACIÓN DE TALUD EN RELLENOS SANITARIOS

En el presente capítulo se aborda los temas relacionados con caracterización geométrica de talud, estabilidad de taludes y las propiedades mecánicas de RSU en los rellenos sanitarios, mencionando como tema relevante la resistencia al corte de este tipo de material.

#### 3.1 Caracterización geométrica de talud

Estudiando la legislación sobre RS de diversos países, se puede observar que la mayoría de las normativas contemplan inclinación máxima de los taludes, que van desde:

- 1V:2,5H (21,8°, Banco Mundial); 1V:3H (18,4°, Australia, Sudáfrica, Chile, etc.), que bajo condiciones normales permanecen estables incluso a grandes alturas.
- 1V:4H (14°, Canadá), con esta inclinación se asegura un talud estable aun con alturas superiores a los 60 m, condiciones de saturación y coeficientes sísmicos superiores a 0,15.

En relación a lo anterior se mencionan dos accidentes atribuidos entre otros problemas, a una falta de estabilidad de talud por la altura excesiva y pendientes elevadas:

- Vertedero de Sarajevo (Bosnia-Herzegovina, 1997): El talud tenía una pendiente de 60° (1,7V:1H).
- Vertedero de Hiriya (Tel-Aviv, Israel, 1998): La parte superior del talud tenía una inclinación de 40° (1V:1,2H), pero en la parte inferior la pendiente era de 56° (1V:0,6H).

#### 3.2 Estabilidad de Taludes en Rellenos Sanitarios

Con el propósito de evitar problemas geotécnicos durante la fase de operación y cierre, se deben conocer los aspectos geotécnicos relacionados con la estabilidad de taludes. Los escenarios bajo los cuales ocurre normalmente la falla circular, es cuando las partículas de suelo 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 rellenos en altura cabrían dos mecanismos con este tipo de falla circular: roturas superficiales y de pie; rotura general del suelo de cimentación (anexo D).

A modo de ejemplo se menciona un deslizamiento en el cuerpo de un relleno, que presentan superficies de rotura aproximadamente circular, ocurrido en el antiguo botadero “Navarro” en Calí, Colombia, que alcanzaba una altura de 62 m (ver anexo D).

Según Palma (1995) en el interior de la masa de un relleno con altura considerable, se pueden originar planos de roturas activos que alcanzan desplazamientos progresivos, los que generan fisuras y agrietamientos externos que dejan los residuos descubiertos y facilitan la introducción de aguas superficiales que generan un incremento del desplazamiento, disminuyendo progresivamente la estabilidad.

La credibilidad de los análisis de estabilidad de un RS, dependen de la información obtenida relativa a parámetros resistentes, presión intersticial, densidad, geometría, tipo de residuos, método de disposición, sistema de drenaje de biogás y lixiviados, entre otros datos relevantes.

Para evaluar la estabilidad en los RS deben emplearse metodologías que consideren las particularidades del material.

### **3.3 Propiedades Mecánicas de los RSU en los Rellenos Sanitarios**

Uno de los grandes desafíos en ingeniería geotécnica es entender y cuantificar las propiedades geotécnicas de los RSU en los rellenos sanitarios, que al igual que los suelos, puede considerarse una composición trifásica: sólida, líquida y gaseosa. Aunque para los RSU existe una variación de los porcentajes de las fases en función de los procesos de degradación de la materia orgánica.

Los sólidos de los residuos son en un alto porcentaje biodegradables, lo cual hace que en un ambiente confinado como el de un relleno, se descompongan, dando lugar a gases y lixiviados.

En estos materiales, como en los suelos, tanto la resistencia como la rigidez, proviene de la componente sólida y de la tensión efectiva que actúa en ella. Por tanto, se presume que al ir reduciéndose la proporción de ésta con el tiempo, y transformándose bioquímicamente en líquido y gas, también se irán reduciendo la resistencia y rigidez.

Knochenmus et al. (1998) definen que las principales propiedades mecánicas a ser consideradas para el estudio de estabilidad de taludes en rellenos son la compresibilidad y la resistencia al corte. Estas propiedades han sido estudiadas por varios autores en pruebas de campo y ensayos de laboratorio, siendo difícil y costoso obtener parámetros representativos y a la vez confiables.

Para el estudio de la estabilidad de un relleno sanitario, en las etapas de diseño, operación y cierre, se requiere el conocimiento del comportamiento esfuerzo-deformación, y resistencia-tiempo del material, formado por capas intercaladas de basura y cobertura. Para lograr esto, se puede recurrir a técnicas tradicionalmente empleadas en geotecnia. Sin embargo, la obtención de los parámetros resistentes de la masa de residuos sólidos es el paso más difícil del análisis.

La interpretación de los resultados de ensayos mecánicos a residuos, está sujeta a incertidumbre por la carencia de un modelo conceptual de comportamiento de este material. Los RSU están compuestos por partículas individuales con una cierta trabazón. Al igual que en suelos, la resistencia de los RSU aparentemente aumenta con el incremento de la carga normal. Sin embargo, debido a su alto contenido de materia orgánica y su conformación fibrosa, los residuos sólidos se comportan más como un suelo orgánico fibroso que como suelo ordinario.

Entre los factores que afectan las propiedades resistentes de los residuos están:

- El contenido de materia orgánica y fibras.
- La edad y el grado de descomposición de los residuos sólidos.
- Tipo y cantidad de suelo de cobertura.
- Condiciones climáticas, tanto pluviométricas, como las temperaturas ambientales.
- La época en la que se construyó el relleno, que define entre otras cosas, el esfuerzo de compactación.

### *3.3.1 Análisis de Compresibilidad*

La compresibilidad de los RSU es un factor importante para la predicción de movimientos en un relleno sanitario. Los residuos sólidos depositados en un relleno sufren grandes asentamientos, con lo cual la capacidad del relleno aumenta. La importancia de cuantificar estos asentamientos y el tiempo que se extenderán se debe además a la necesidad de determinar la posible utilización posterior del relleno.

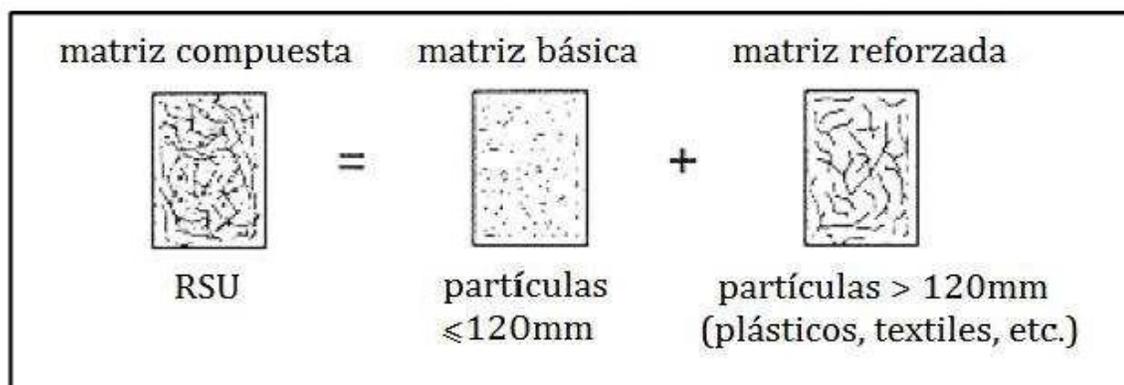
La producción de los asentamientos en un relleno es variable con la edad, presentando velocidades que disminuyen con el tiempo, pero que se mantienen perceptibles durante años. Se ha comprobado que en rellenos con alto contenido orgánico, los asentamientos son importantes durante los primeros 10 años. Algunos antecedentes de cálculo de la compresibilidad se transmiten en anexo E.

### 3.3.2 Resistencia al corte

De la literatura revisada se obtiene que los estudios de estabilidad de taludes en rellenos requieren del conocimiento de los diagramas tensión-deformación y de la resistencia de los RSU. En este sentido, se consideran aceptables los conceptos importados de la mecánica de suelos clásica en la interpretación de los ensayos con residuos.

Howland y Landva (1992), proponen que la resistencia de los RSU es de carácter primeramente friccional. Sin embargo, Mitchell y Mitchell (1992) señalan que, aunque la naturaleza cohesiva de los residuos aún no ha sido adecuadamente caracterizada, es razonable incluir un componente cohesivo en las evaluaciones de resistencia al corte. La suposición se basa en que, en RS se han observado cortes verticales de altura considerable, que permanecen estables por largos períodos de tiempo.

Kockel (1995) propone un modelo de composición matricial de los RSU. Donde la estructura física de los residuos está constituida por dos matrices: una matriz básica, compuesta de material fino y granular, de comportamiento friccional; y una matriz reforzada, caracterizada por la acción de componentes fibrosos (plásticos, cueros, textiles, etc.) resistentes a la tracción (figura 1). El comportamiento mecánico de los RSU es comparable al de los suelos reforzados con fibras, a medida que las deformaciones aumentan, el material tiende a presentarse más resistente.



**Figura 1. Modelo esquemático de la composición de los RSU.**

(Fuente: Köning & Jessberger, 1997)

Kolsch (1995) aporta conceptos análogos basados en los resultados otorgados por ensayos de corte y triaxial, llevados a cabo en residuos sólidos, determinando que el comportamiento de los RS sería similar a los rellenos de tierra armada. Esta teoría considera que los materiales fibrosos presentes en la composición de los residuos, serían capaces de crear fuerzas de tracción que dependerán del vínculo de las fibras con la masa de residuos en función de la tensión normal

actuante. De este modo, la resistencia al corte dependerá de dos etapas: la primera, referente a las fuerzas de fricción en el plano de corte y, la segunda, con respecto a las fuerzas de tracción de las fibras o cohesión de las fibras.

En la figura 2 se ilustra la interacción entre estas dos etapas, representada en una curva esfuerzo-deformación, mostrando que para pequeñas deformaciones existe apenas una movilización de las fuerzas de fricción (Fase I). A medida que la deformación va aumentando, las fibras comienzan a ser traccionadas (Fase II). Las fuerzas de tracción aumentan hasta alcanzar un valor máximo correspondiente a la resistencia a la tracción o vínculo de las fibras con la masa de residuos. A partir de este valor ( $Z_{max}$ ) comienza una reducción de las fuerzas de tracción donde las fibras son rasgadas y deslizadas (Fase III) hasta alcanzar el punto donde la resistencia al corte se limitará a las fuerzas de fricción (Fase IV). La contribución de cada una de estas fuerzas a la resistencia al corte variará de acuerdo con la tensión normal actuante.

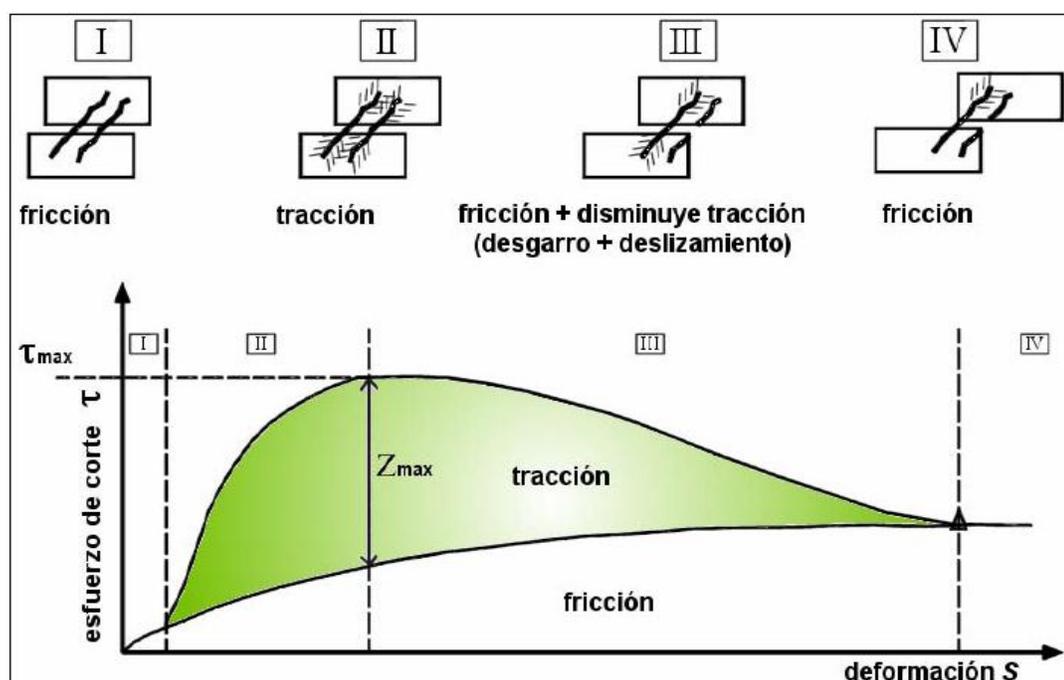


Figura 2. Comportamiento de los residuos bajo ensayos de corte, modelo de interacción entre las fuerzas de fricción y tracción.

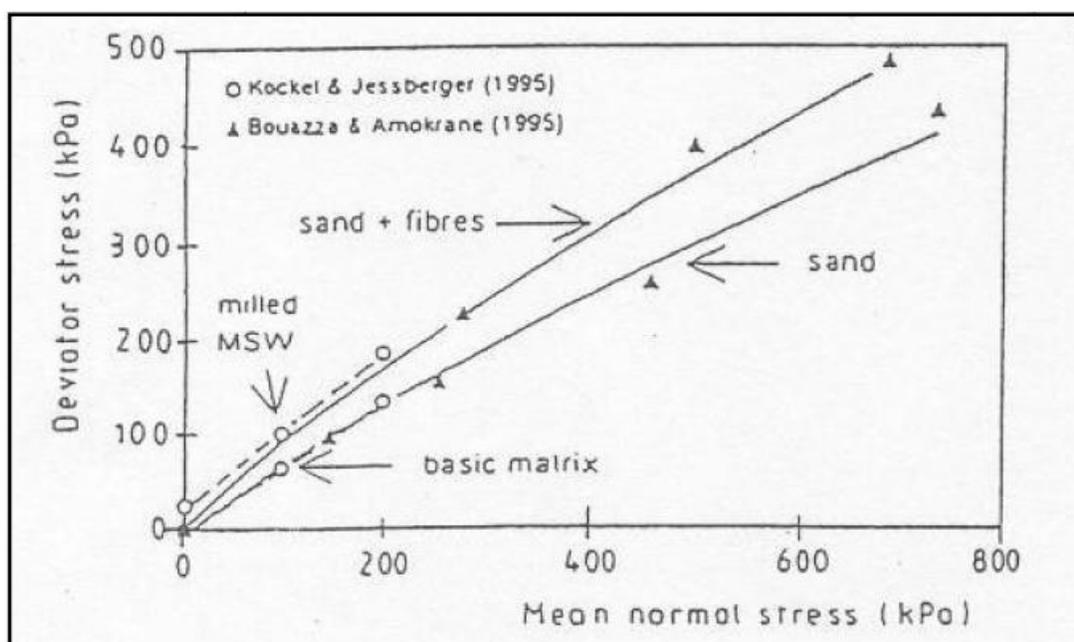
(Fuente: Kolsch, 1995)

Kockel & Jessberger (1997) mostraron que la resistencia al corte de la matriz básica sólo se moviliza a altas deformaciones. El valor de cohesión está particularmente relacionado con la matriz reforzada y se puede definir como una cohesión debido a la resistencia a la tracción de los materiales de refuerzo. Su movilización requiere también grandes deformaciones y comienza

significativamente cuando se han alcanzado deformaciones axiales por encima del 20%, momento en el cual la resistencia friccional está casi completamente movilizada.

En la figura 3 se presentan los resultados de los ensayos realizados por Kockel & Jessberger (1997) con residuos compuestos únicamente por “matriz básica” y “matriz reforzada”. De estos resultados los autores deducen las siguientes ideas:

- Los RSU muestran una envolvente de rotura lineal.
- La envolvente de rotura de la “matriz básica” y “reforzada” son paralelas, lo que sugiere que el refuerzo no afecta al comportamiento friccional de los RSU sino al valor de la cohesión.



**Figura 3. Envolvente de rotura.**  
(Fuente: Kockel & Jessberger 1997)

Por lo tanto, de acuerdo a lo planteado en el presente acápite en relación a la resistencia de los residuos sólidos, se puede concluir que es posible desarrollar una metodología de estabilidad de taludes en RS, interpretando la resistencia al corte de los RSU a través del criterio de rotura de Mohr-Coulomb, que se traduce en la ecuación 4. Aunque los RSU presentan un comportamiento mecánico distinto al de los suelos, autores como Kockel & Jessberger (1993) reconocen la utilidad del método en el estudio de la resistencia de estos materiales.

$$\tau = c' + \sigma'_n * \tan \varphi' \quad \text{Ec. (4)}$$

Dónde

$\tau$ : Resistencia al corte en el plano de falla.

$c'$ : Cohesión efectiva.

$\sigma'_n$ : Esfuerzo normal efectivo en el plano de falla.

$\varphi'$ : Ángulo de fricción efectivo.

La dificultad al igual que en el caso de los suelo se encuentra en la determinación de los parámetros resistentes. Dada la relevancia de estos en el siguiente punto se discuten tres formas para la obtención de dichos parámetros.

#### a) Determinación de Parámetros Resistentes

La determinación de los parámetros resistentes de los RSU es un tema complejo, debido a la gran variedad de factores que interfieren como: la gran heterogeneidad de la basura y su variación con respecto a las condiciones climáticas de cada región, la obtención de muestras representativas de las condiciones in situ, la inexistencia de procedimientos de muestreo y ensayos generalmente aceptados y contrastados por la comunidad científica, además, las propiedades geotécnicas de los residuos sólidos pueden cambiar con el tiempo como resultado de la descomposición, etc.

La determinación de estos parámetros puede ser a través de ensayos de laboratorio (corte directo, triaxiales), ensayos in situ, y back-analysis de datos de campo.

*Ensayos de laboratorio:*

- *Ensayos de corte directo*

Estos ensayos son realizados generalmente sobre muestras deformadas. La mayor dificultad es obtener muestras de calidad en lo referente a la distribución de los tamaños de las partículas y la representatividad, tanto de la composición del material como en las dimensiones de los equipos utilizados.

Manassero et al. (1996) consideran que los ensayos de corte directo en laboratorio no reproducen el comportamiento real del residuo en el cuerpo del relleno, sin embargo, aceptan el método como una aproximación inicial para la elaboración de procedimientos más exactos.

Las curvas de tensión-deformación obtenidas por varios autores en ensayos de corte directo, muestran un aumento en la resistencia con el incremento de las deformaciones y ninguno de ellos mostro peak de resistencia (anexo F).

- *Ensayos triaxiales*

Al igual que los ensayos de corte directo, los resultados obtenidos en ensayos triaxiales muestran que los RSU pueden sufrir grandes deformaciones, sin movilizar tensiones de rotura, por lo que los parámetros de resistencia se determinan para niveles admisibles de deformación, siendo valores entre 15% y 20% los más utilizados (anexo F).

#### *Ensayos in situ*

Otra opción de obtener parámetros resistentes consiste en realizar ensayos in situ, con lo cual se puede obtener datos más cercanos a la realidad del relleno y establecer correlaciones con la información obtenida en laboratorio. Entre las experiencias desarrolladas in situ, se encuentran los ensayos de penetración y de corte directo a gran escala.

Los ensayos de penetración más utilizados son los de penetración dinámica. Éstos permiten trazar una distribución estratigráfica y conocer el estado de compacidad del relleno en profundidad. Repitiendo su realización periódicamente y contrastando los resultados obtenidos, permiten analizar la variación de las características resistentes de un relleno en el tiempo. Entre los ensayos empleados, el  $CPT_{din}$  presenta ventajas como simplicidad de manejo, economía y rapidez, además, de ser muy utilizado en el país en este tipo de proyectos, en el Anexo F se explica sobre este ensayo.

En la mayoría de los casos, la dificultad de esta prueba se debe a la presencia de materiales resistentes como madera, piedra, metal, etc. que provocan grandes peak en la resistencia medida.

Ensayos de penetración dinámica realizados en grandes rellenos sanitarios de Chile como Loma los Colorados y Santa Marta, muestran curvas que indican que existe homogeneidad en la resistencia a la penetración con la profundidad, aumentando progresivamente y de forma lineal (ver anexo F).

Además, de ensayos de penetración, algunos autores han evaluado la resistencia de los residuos por medio de ensayos de corte directo in situ, en grandes bloques de RSU. A modo de ejemplo se menciona la experiencia de Withiam et al. (1995), citado por Carvalho (1999) en anexo F.

*Back- Analysis*

Los back analysis de roturas son otra alternativa para estimar parámetros resistentes de los RSU, que consiste en determinar el par ordenado “c” y “φ” a partir de un dato conocido que satisfaga la condición de estabilidad de la estructura, vale decir un factor de seguridad superior a la unidad.

El cuidado especial que se debe tener al usar estos parámetros obtenidos, es que hay un número infinito de combinaciones de “c” y “φ” que satisfacen el equilibrio, y son el resultado de tener una ecuación de equilibrio conocida (factor de seguridad igual o superior a uno con dos parámetros desconocidos).

Mencionado y explicado los distintos métodos para la determinación de parámetros resistentes de los RSU, en la tabla 1 se muestran 5 reportes de un total de 27 parámetros reportados de la literatura técnica por varios autores, los que se detallan en el anexo G.

**Tabla 1. Parámetros Resistentes al Corte, según distintos autores a nivel mundial**

Fuente	c (T/m <sup>2</sup> )	φ (°)	Ensayo	Observaciones	Lugar
Benvenuto & Cunha, 1991	1,35	22	Back analysis	Deslizamiento en vertedero de Bandeirantes, Sao Paulo. Ineficiente sistema de extracción de lixiviado y biogás	Vertedero Bandeirante, Sao Paulo, Brasil
Jessberger y Kockel, 1993	2,2	17	Ensayo Triaxial	Consolidado drenado, 300mmx600mm (diámetro x altura), 20% deformación	Alemania
Withiam et al., 1995	1,0	30	Corte directo in situ	Muestras ensayadas de 1,5x1,5x1,5 m	Vertedero de Dekorte Park, New Jersey, EEUU.
Caicedo et al., 2002	2,6	24	Corte directo	Muestras obtenidas deslizamiento vertedero Doña Juana, equipo de corte 300x300x200 mm	Vertedero Doña Juana, Bogotá, Colombia
SIGA, 2012	2,24	25,7	Análisis estadístico de datos en literatura técnica	Adecuada compactación, sistema de control de aguas lluvias, y una buena tasa de drenaje vertical.	Relleno, Valdivia, Chile

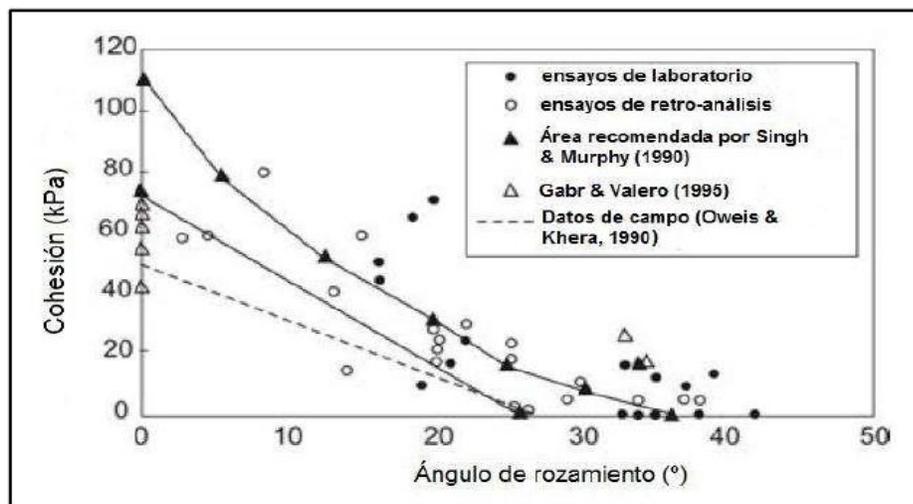
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la tabla 5 complementada en anexo G se observa una amplia variación de valores que se pueden obtener, para el caso del ángulo de fricción los valores oscilan entre  $17^\circ$  y  $61^\circ$ , mientras que la cohesión van entre 0 y 8 ton/m<sup>2</sup>, esta variedad se debe a un gran número de factores que influyen en los resultados de las pruebas, incluyendo la naturaleza inherente heterogénea de los residuos, la edad de las muestras, el grado de descomposición, composición, el tamaño de las muestras, la densidad, el procesamiento, método y condiciones de la prueba, etc.

#### b) Criterios de rotura para RSU

A partir de los estudios sobre el comportamiento mecánico de los RSU, muchos autores han publicado valores para los parámetros de resistencia al corte, obtenidos por ensayos de laboratorio, in situ y back-analysis. De esta manera, la resistencia al corte de los RSU es definida generalmente por el criterio de rotura de Mohr-Coulomb.

La representación de resultados en diagramas cohesión versus ángulo de fricción se hizo muy usual, siendo Singh & Murphy (1990) los primeros en utilizar esta representación. De ensayos de laboratorio, in situ y back-analysis disponibles hasta ese momento, estos autores compilaron en un mismo diagrama estos resultados y plantearon un rango recomendado para la elaboración de proyectos (figura 4), en la cual se puede observar, una gran dispersión en los datos presentados.



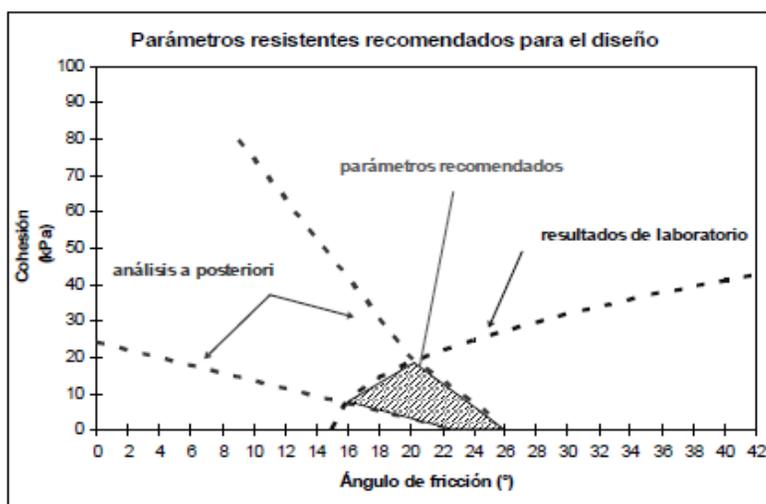
**Figura 4** Diagrama cohesión-ángulo de fricción. Propuesta recomendada para proyectos.  
(Fuente: Singh & Murphy, 1990)

### *Criterio de Palma (1995)*

De la figura 4 se puede observar una gran dispersión de los resultados, y en este sentido Palma (1995) menciona algunas tendencias, como:

- Los resultados de ensayos de laboratorio indican que se moviliza un rozamiento significativo, y debe recordarse que los valores de rozamiento pueden continuar creciendo si el nivel de deformación admisible lo hace también. La mayoría de los valores del ángulo de rozamiento están en el rango  $25^{\circ}$ - $35^{\circ}$ . No se han medido valores menores a  $17^{\circ}$  (en la recopilación original de Singh y Murphy (1990) se indica  $\phi=0^{\circ}$ , pero corresponde a un ensayo no consolidado-no drenado, en cuya interpretación se ha obligado esta condición). La cohesión interceptada es muy variable, pero usualmente bajo 30 kPa.
- Las líneas correspondientes a los datos de campo, divergen en la zona de ángulos de rozamiento bajos, dando valores de cohesión desde 20 kPa a valores superiores a 100 kPa. Sin embargo, todas las líneas convergen para valores de  $\phi$  mayores que  $15^{\circ}$ . En esta zona ( $\phi > 15^{\circ}$ ), las líneas de datos de campo caen en los límites bajos de los ensayos de laboratorio.

A partir de estas observaciones, Palma (1995) presenta un nuevo diagrama, donde ha marcado la zona recomendada para el diseño, figura 5. Esta zona corresponde a la intersección entre la banda de valores determinados a partir de back-analysis y el área donde se sitúan los correspondientes a ensayos de laboratorio. En base a estas observaciones este autor propone una envolvente de rotura lineal para los RSU con parámetros resistentes extraídos de esta área sombreada.



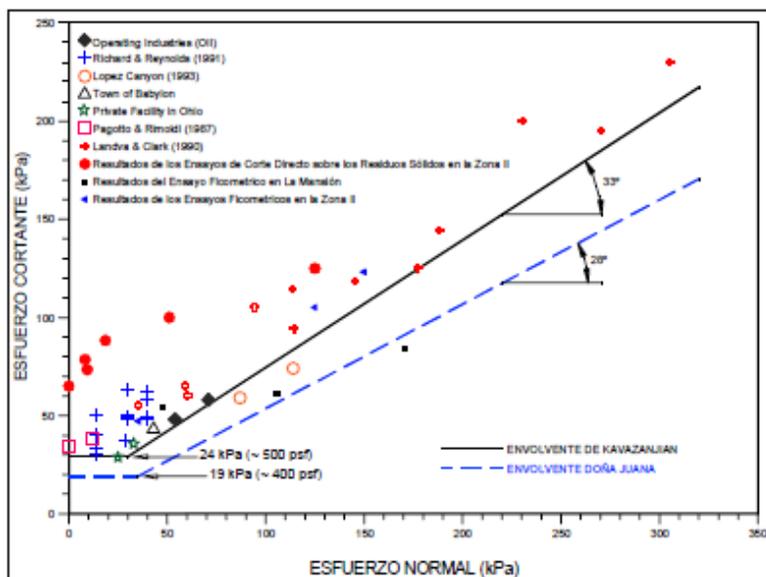
**Figura 5. Parámetros resistentes recomendados.**

(Fuente: Palma, 1995)

*Criterio de Kavazanjian et al. (1995)*

Basado en los datos disponibles de la resistencia al corte, incluyendo los resultados de ensayos de corte directo en laboratorio, in situ y datos de back-analysis Kavazanjian et al. (1995) propone una envolvente de rotura bi-lineal para los residuos, que es característico de los suelos reforzados (figura 6). El criterio de rotura se traduce en los siguientes valores:

- $\sigma_n < 30 \text{ kPa}$ :  $\phi=0^\circ$   $c=24 \text{ kPa}$ .
- $\sigma_n > 30 \text{ kPa}$ :  $\phi=33^\circ$   $c=0 \text{ kPa}$ .



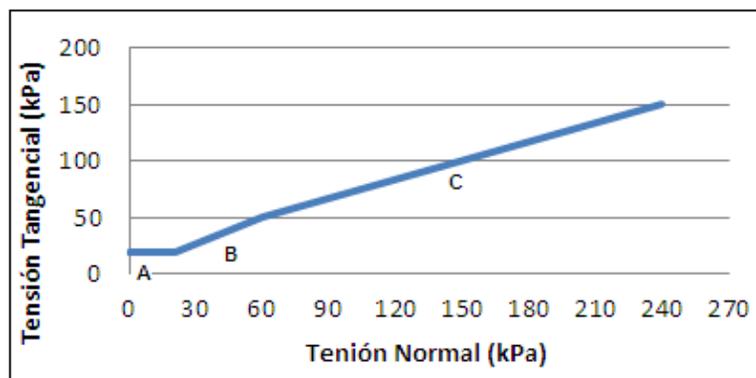
**Figura 6. Recopilación realizada por Kavazanjian et al.**  
(Fuente: Kavazanjian et al. 1995)

*Criterio de Manassero et al. (1996)*

Este autor afirma que la propuesta de Kavazanjian et al. (1995) admite una envolvente de rotura tri-lineal para los RSU, donde puede diferenciarse tres zonas en función de la tensión normal actuante, esta propuesta se muestra en la figura 7 y se describe en los siguientes valores:

- Zona A: correspondientes a tensiones normales muy bajas, entre 0 y 20 kPa, a las que el comportamiento de los RSU puede considerarse sólo cohesivo, con un valor de la cohesión igual a 20 kPa.
- Zona B: correspondiente a tensiones normales entre bajas y moderadas, entre 20 y 60 kPa. En este caso se considera que la cohesión tiene un valor nulo y el ángulo de fricción igual a 38°.

- Zona C: corresponde a tensiones normales elevadas, por encima de 60 kPa. El valor de la cohesión propuesto en estas condiciones es de 20 kPa y el del ángulo de fricción en torno a 30°.



**Figura 7. Criterio de rotura para RSU por Manassero et al.**

(Fuente: Manassero et al. 1996)

Se debe tener mucho cuidado con la toma de parámetros de estos diagramas, ya que estos representan en conjunto los resultados de ensayos de laboratorio, in situ y back-analysis. Los resultados de ensayo de laboratorio, entregan una envolvente en el plano de Mohr, por lo tanto se pueden determinar  $c$  y  $\phi$ , sin embargo, cuando se analizan ensayos in situ y back-analysis, hay un número infinito de pares de  $c$  y  $\phi$  que satisfacen la condición de equilibrio.

## **4. PROPUESTA METODOLÓGICA DE DISEÑO**

En este capítulo se desarrolla la propuesta de la metodología de diseño de estabilidad de taludes para rellenos sanitarios de RSU. Se abordan temas como: factores relevantes para el diseño, supuestos adoptados para el análisis, criterios de diseño y la deducción de parámetros resistentes.

### **4.1 Factores Relevantes para el Diseño de Taludes**

Del estudio realizado, se concluye que los factores relevantes que afectan la estabilidad de taludes son los mencionados por Qian et al. (2002) y Shafer et al. (2003) citados por Espinace (2005), los cuales son pertinentes a la condición de estudio y que corresponden a: geometría de talud, asentamiento del material, resistencia al corte del material, presiones intersticiales, operaciones en el relleno y condición de carga, los cuales se detallan a continuación.

**Geometría de talud:** Este factor modificable tiene directa relación con la altura y ángulo del talud, junto con la resistencia al corte del relleno y la condición de carga, y tiene una especial importancia en el diseño geométrico estable del relleno sanitario. Teniendo presente que la tendencia es al diseño de rellenos de alturas importantes que aprovechen de mejor manera el espacio disponible la regla es, que a mayor altura del relleno, menor debe ser su ángulo de talud global.

**Asentamiento del material:** Estos pueden estabilizar, o agregar factores desestabilizantes en el RS. Los asentamientos localizados y los puntos bajos facilitan la infiltración del agua superficial en el relleno, lo cual incrementa la presión intersticial y el nivel piezométrico en la masa de residuos.

**Resistencia al corte del material:** Una alta resistencia al corte del relleno, con una baja presión intersticial, disminuye la generación de superficies de deslizamiento en sus taludes.

Existen factores en los cuales se puede intervenir pero no modificar, como es el caso de las presiones intersticiales, operaciones en el relleno y condición de carga.

**Presiones intersticiales:** Una excesiva presión intersticial del agua dentro del relleno puede tener un efecto muy negativo en la estabilidad de taludes al reducir la resistencia al corte.

Operaciones en el relleno: Se debe considerar el monitoreo del nivel de saturación del relleno, los sistemas de inyección de líquidos, de aire y de extracción de gas, el nivel de los lixiviados y la presión intersticial, permeabilidad de cobertura, ya que poseen un alto impacto en la estabilidad del relleno.

Condición de carga: El peso propio del relleno y cualquier carga externa aplicada, son factores que afectan la condición de carga en los rellenos sanitarios, y por ende, afecta su estabilidad. El aumento de la altura de un relleno incrementa la carga normal sobre el residuo existente, los sellos y los materiales de base.

#### **4.2 Supuestos Adoptados para el Análisis de Estabilidad**

De la investigación realizada, se tiene que los planos de rotura activos que se pueden originar al interior de la masa de residuos del relleno, alcanzan un deslizamiento progresivo. Estos deslizamientos generan fisuras y agrietamiento externos que pueden dejar los residuos descubiertos y facilitar la introducción de aguas superficiales que generan un incremento del desplazamiento, disminuyendo progresivamente la estabilidad. En muchos casos, se pueden producir deslizamientos causados por el peso propio, debido a que aunque el material es liviano en sí mismo. Dicho peso se incrementa con el suelo de cobertura y saturación.

Los taludes conformados por RSU exhiben un modo de falla muy similar al de un suelo, caracterizado por el deslizamiento a través de una superficie de falla de tipo circular o curvilínea, y una mecánica de falla de tipo rotacional.

En este sentido es necesario destacar que, aunque los RSU no son materiales que presenten las características de comportamiento de un típico material geotécnico, la evaluación de su estabilidad normalmente se desarrolla en el ámbito nacional e internacional en base a los procedimientos y principios que son propios de la geotecnia convencional, lo cual, no le resta validez técnica a los resultados obtenidos mediante la aplicación de dichos procedimientos y principios.

El análisis de estabilidad se sugiere realizar a los perfiles considerados como representativos de las condiciones más desfavorables desde el punto de vista mecánico, según el criterio del profesional a cargo del estudio. Estos perfiles serán obtenidos sobre la base de un levantamiento topográfico o geometría proyectada.

Para la ejecución del estudio se recomienda adoptar criterios de diseño bastante conservadores, debido al tipo de obra a analizar. Los escenarios de cálculos a adoptar representan situaciones con ocurrencia de muy baja probabilidad, tanto en lo que se refiere a parámetros, presencia de presiones al interior del relleno, geometría y criterios sísmicos.

Por lo tanto, para el análisis se propone realizar como es convencional, la búsqueda sistemática de las superficies de falla circular que exhiben el menor factor de seguridad para la más crítica combinación de superficies de deslizamiento, parámetros resistentes, geometría de talud, nivel freático y sismicidad.

El análisis se propone mediante la técnica de equilibrio límite bidimensional (mediante perfiles), utilizando el método de análisis de Bishop modificado (explicado en anexo H), aplicando programas computacionales especializados. Los supuestos adoptados para el análisis serán:

- El material que conforma el talud es homogéneo, es decir, las propiedades mecánicas no varían con la dirección de la carga aplicada, puesto que experiencias desarrolladas en diversos rellenos del país por el Grupo de Geotecnia de la PUCV, han mostrado que aun cuando un relleno prospectado puede ser muy heterogéneo, los resultados de los ensayos de penetración alcanzados en distintos puntos de un relleno, arrojan resultados coherentes entre sí, lo que permite deducir que la masa, aun cuando a pequeña escala puede ser heterogénea, se comporta a gran escala como un todo homogéneo.
- La resistencia al corte del material dependerá de la cohesión, y ángulo de fricción del material y estos parámetros estarán relacionados mediante el criterio de falla lineal de Mohr-Coulomb, y se mantienen constantes con la profundidad.
- Las presiones intersticiales provocadas por la presencia de lixiviados y biogás, serán simuladas mediante un nivel piezométrico, bajo el cual la masa de los residuos se encuentra totalmente saturada. Situación que es conservadora, puesto que se supone que un relleno sanitario cuenta con un adecuado sistema de extracción y circulación de lixiviado y biogás.

### 4.3 Criterios de Diseño

Para la verificación de la estabilidad de los taludes, se sugiere como criterio de aceptabilidad un factor de seguridad estático mínimo de 1,5 ( $FS_{\text{Estático}} \geq 1,5$ ), y un factor de seguridad sísmico mínimo de 1,3 ( $FS_{\text{Sísmico}} \geq 1,3$ ), sobre la base que una eventual falla del talud no provocará daño a las personas, equipos y propiedad privada, o un severo daño ambiental, según lo dispuesto en el artículo 15 del D.S. 189 (2005), Ministerio de salud.

Un evento sísmico es un complejo fenómeno vibratorio que genera fuerzas inerciales de corta duración y variada naturaleza, por lo que la evaluación de sus reales efectos en la estabilidad de los taludes debería considerar un análisis dinámico, pero la alta complejidad teórica y analítica, en muchos casos limita su aplicación, o no la justifica plenamente. Es por esto que para el análisis sísmico, se propone usar un método de análisis pseudo-estático, donde se asume que el efecto dinámico de un evento sísmico real se puede asimilar a una fuerza inercial estática que actúa en contra de la estabilidad del talud.

Criterios actuales ampliamente compartidos, utilizan coeficientes sísmicos (C.S.) con valores de 1/2 o 2/3 de la aceleración máxima efectiva exigida por la NCh 433 of. 96 Modificada el 2009 para los análisis pseudo-estático. Sin embargo, se recomienda para el análisis de estabilidad sísmico un C.S. de 0,2 sugerida por la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE), superior a la exigida por la NCh 433 para las zonas 1 y 2.

Como criterio, se propone efectuar más de un escenario de cálculo, debido a que una gran cantidad de experiencias publicadas en la literatura, demuestran que el principal factor de inestabilidad de un relleno sanitario es la posición del nivel freático al interior del relleno, el que debe mantenerse a un cierto nivel a objeto de asegurar la estabilidad del relleno para la más probable condición sísmica. En este sentido para el estudio de estabilidad se recomienda evaluar los siguientes dos escenarios de cálculo:

- Análisis de estabilidad de taludes en condición estática y pseudo-estática, considerando los perfiles más desfavorable definido a partir de la topografía o geometría proyectada, las visitas realizadas a la zona de estudio y utilizando los parámetros resistentes deducidos, para una condición drenada.

- Un segundo escenario sería lo planteado en el párrafo anterior, pero esta vez considerando fluctuaciones del nivel piezométrico, producto de los lixiviados y biogás generado debido a un deficiente sistema de extracción.

#### **4.4 Deducción de Parámetros Geotécnicos**

Una vez analizados los puntos anteriores resulta relevante mencionar acerca de la deducción de los parámetros geotécnicos en el análisis de estabilidad.

En relación a los ensayos in situ, se propone realizar una campaña experimental para conocer las características geotécnicas del relleno de manera cualitativa, para ayudar en la estimación de los parámetros resistentes a utilizar. La campaña consistirá en la realización de ensayos de penetración dinámica tipo CPT<sub>din</sub>. Este ensayo permite trazar una distribución estratigráfica y conocer el estado de compacidad del relleno en profundidad.

Junto con los ensayos de penetración dinámica y con el propósito de determinar niveles piezométricos para estimar las presiones intersticiales en el interior del relleno, se propone instalar en los puntos donde se efectuarán los ensayos de CPT<sub>din</sub> “piezómetros”, los que estarán constituidos por cañerías de PVC de 32 mm de diámetro, cubiertas por un geotextil y ranurados a una cierta longitud en la parte inferior. La profundidad que alcancen los piezómetros quedará definida por los ensayos de penetración.

En base a lo planteado anteriormente, con los datos que se obtengan de la campaña experimental, antecedentes existentes que se tengan del relleno a estudiar e información proporcionada por el presente proyecto de título se realizará un análisis de sensibilidad basado en los valores recopilados por Palma (1995) (figura 5), y de esta manera determinar los parámetros geotécnicos de diseño adoptados para el análisis de estabilidad de la masa de residuos.

### 4.5 Propuesta Metodología de Diseño

A manera de visualizar de mejor forma la propuesta de la metodología de diseño de estabilidad de taludes para rellenos sanitarios de RSU se muestra la figura 8.

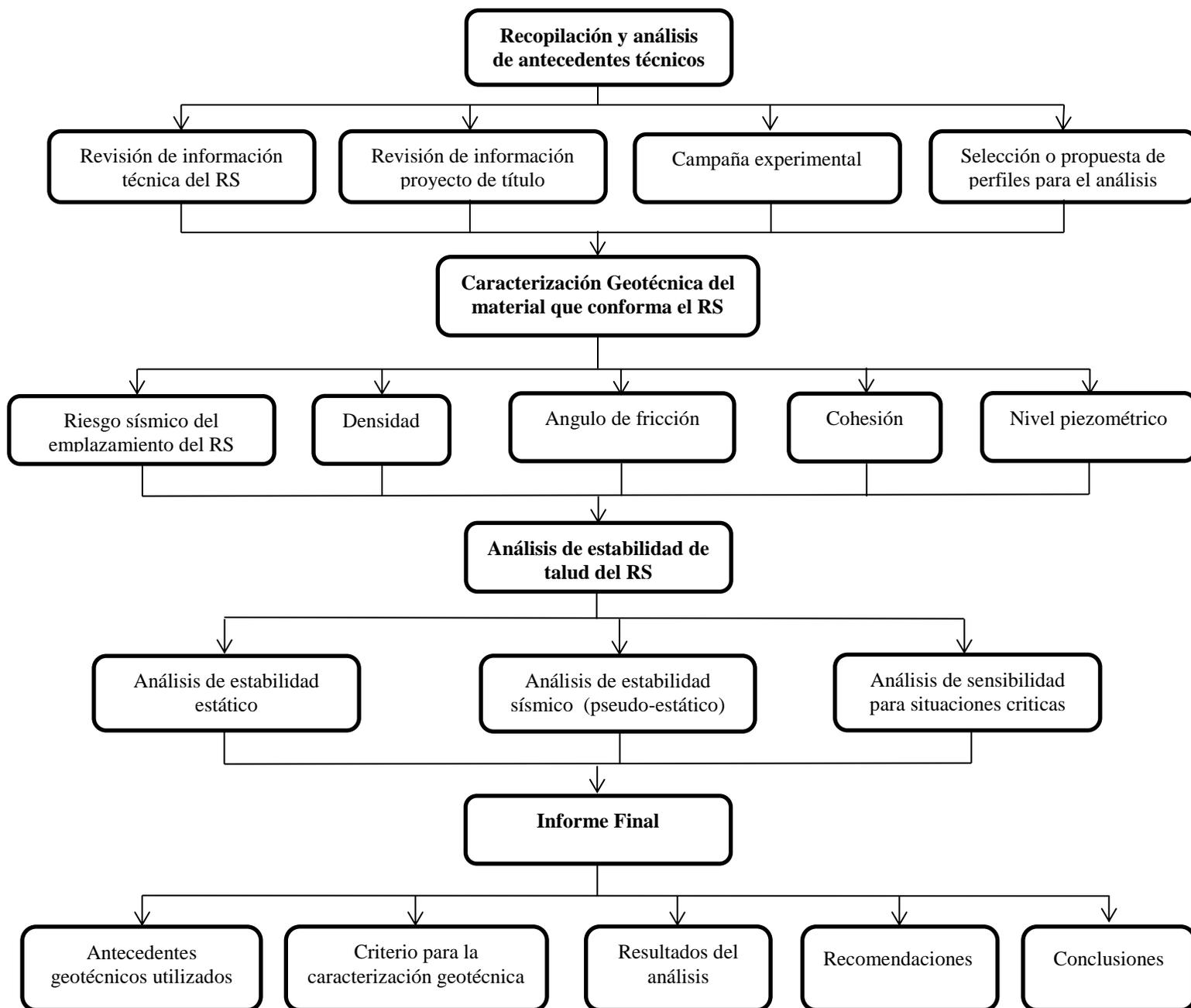


Figura 8. Diagrama de propuesta metodología de diseño. (Fuente: Propia)

## 5. CONCLUSIONES

En base a la investigación realizada en este proyecto de título se puede concluir, que de los factores relevantes que afectan la estabilidad de taludes de los rellenos sanitarios, las presiones intersticiales son las que más atenta contra la estabilidad del relleno, por lo que todo proyecto debe considerar que los líquidos lixiviados generados sean drenados de manera correcta y permanente, para evitar su acumulación. Esta condición, sumada a las presiones del biogás, elevarían las presiones intersticiales provocando una disminución de los parámetros mecánicos, disminuyendo las fuerzas resistentes sobre las superficies del deslizamiento.

Del análisis de los parámetros de caracterización geométrica de los taludes, se puede concluir que la condición geométrica que se propone en la normativa chilena está dentro de los rangos asumidos apropiados a nivel mundial.

La resistencia al corte de los RSU está mejor definida como cohesivo-friccional ( $c-\phi$ ), en donde el material fino y granular aportan a la fricción, y la acción de materiales fibrosos resistentes a la tracción estarán asociados a la cohesión.

La mayor dificultad para el estudio de estabilidad de un relleno sanitario se encuentra en la determinación de los parámetros resistentes, debido a la gran variedad de factores que interfieren como; tipo de residuo (heterogéneo) y su variación con respecto a las condiciones climáticas de cada región, la obtención de muestras representativas de las condiciones in situ, grado de compactación, la inexistencia de procedimientos de muestreo y ensayos generalmente aceptados y contrastados por la comunidad científica, material de cobertura diaria, gestión de los lixiviados y biogás. Además, las propiedades geotécnicas de los residuos sólidos pueden cambiar en el tiempo como resultado de la descomposición.

Si bien existen distintos métodos para la determinación de los parámetros resistentes de los residuos como, ensayos de laboratorio, ensayos in situ o back-analysis, la gran dispersión de los resultados obtenidos de los parámetros resistentes en la mayoría de los rellenos sanitarios mencionados en esta investigación, no permite asumir parámetros únicos de cálculo para el diseño, por lo que se hace necesario realizar ensayos que permitan evaluar los parámetros de resistencia al corte de cada relleno a estudiar de manera puntual.

Ensayos de laboratorio presentados por varios autores muestran curvas tensión-deformación donde se observa un aumento de la resistencia con el incremento de las deformaciones, sin llegar la mayoría de las veces a una tensión de rotura o tensión constante, sino que se agota la capacidad de deformación de los equipos utilizados para los ensayos. Por todo esto se concluye apropiado asumir un comportamiento muy dúctil de los RSU compactados.

Aunque los RSU no son materiales que presenten las características de comportamiento de un típico material geotécnico, la evaluación de su estabilidad normalmente se desarrolla en el ámbito nacional e internacional en base a los procedimientos y principios que son propios de la geotecnia convencional, lo cual, no le resta validez técnica a los resultados obtenidos mediante la aplicación de dichos procedimientos y principios.

Experiencias desarrolladas en diversos rellenos del país, han mostrado que aun cuando un relleno prospectado puede ser muy heterogéneo, los resultados de los ensayos de penetración alcanzados en un mismo sector arrojan resultados coherentes entre sí, lo que permite concluir que la masa de residuos se comporta como un todo homogéneo.

Es posible definir una metodología de estabilidad de taludes en rellenos sanitarios basados en conceptos geotécnicos, como la interpretación de la resistencia al corte de los RSU a través del criterio de rotura de Mohr-Coulomb.

La metodología de diseño propuesta considera la interpretación de antecedentes, ensayos en terreno y criterios de cálculo basados en Mohr-Coulomb, para el estudio y diseño de estabilidad de taludes en rellenos sanitarios de RSU. Si bien se puede recoger antecedentes, la propuesta incorpora como punto relevante el levantamiento de información in situ, independiente de la metodología empleada, pero específico de cada sector, que consiste en corroborar información a través de ensayos de terreno para cada relleno de forma puntual.

## **6. RECOMENDACIONES**

Se propone estudiar métodos de medición de densidad de los RSU, con el fin de desarrollar procedimientos que permitan calcular con seguridad su valor a distintos niveles de profundidad en un relleno sanitario y la evolución que pueda experimentar con el paso del tiempo.

Realizar ensayos de corte que permiten someter las muestras de RSU a niveles aún más altos de desplazamientos relativos, de modo que las fibras presentes en las muestras puedan ser totalmente movilizadas.

La sugerencia es a profundizar en este tema con trabajos realizados sobre la base de experiencias de terreno y laboratorio, con el propósito de obtener parámetros representativos para este país bajo diferentes escenarios tales como: características de composición, densidad, métodos de compactación, edad de los residuos, etc.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Carvalho, M. F. (1999). Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos. Tese de Doutorado, Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Colomer, F.J., Gallardo, A., Bovea, M.D., Carlos M. (2009). Evaluación del riesgo geotécnico en vertederos de residuos sólidos: Identificación de los principales peligros. II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, Barranquilla, Colombia, Septiembre.

Colomer, F.J., Altabella, J.E., García, F., Gallardo, A. (2013). Influence of the desing on slope stability in solid waste landfills, Earth Science. Vol.2, No. 2, 31-39.

Contreras, C.E. (2002). Determinación de la altura crítica y ángulo de inclinación máximo de taludes de basura (relleno sanitario La Bonanza). Tesis para optar al título de Ingeniero de Minas. Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

Dias, R. (2008). Estudio de la resistencia de los residuos sólidos urbanos mediante ensayo de corte directo de grandes dimensiones. Tesis de magister en Geotecnia, Facultad de Tecnología, Departamento de ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Brasilia, Brasil.

Dixon, N., Jones, D. (2005). Engineering of municipal solid waste. Elsevier. Geotextiles and Geomembranes., 23:205-233.

Conama (2006). Estudio caracterización de residuos sólidos domiciliarios en la región Metropolitana. Consultor: Grupo de Residuos Sólidos, PUCV.

Espinace R., Valenzuela P. (20005). Aspectos geotécnicos de la co disposición de lodos y residuos sólidos urbanos.

Espinace, R., Valenzuela, P., Bernstein, G., Rivas, P. (2007). Aspectos geotécnicos asociados al diseño del relleno sanitario Santa Marta. VI Congreso Chileno de Geotecnia. Valparaíso, Chile, Noviembre.

Fasett, J., Leonard, G., and Reppeto, P. (1994). Geotechnical properties of municipal solid waste and their use in landfill design. Proceedings, Waste Tech '94, Solid Waste Association of North America, Silver Springs, Maryland, 31p

González, A. y Espinoza, A. (2001). La acumulación de basuras como material geotécnico II: Comportamiento de las basuras. Revista de Ingeniería N°14, 56-70, Universidad de los Andes, Colombia, Noviembre.

Henriques, A.G. (2000). Compresibilidad de los residuos sólidos urbanos. Tesis Doctoral, Departamento de Explotación y Prospección de Minas, Universidad de Oviedo, Oviedo, España.

Henriques, A. G., Sopena, L. (2000). Propiedades físicas de los residuos sólidos urbanos del vertedero de Valdemingómez. XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Puerto Alegre, Brazil, Diciembre.

Instituto Nacional de Normalización (Chile). Diseño sísmico de edificios: NCh433 of. 96 Mod. 2009, Santiago, Chile. 2009. 56 p

Jaramillo, J. (2002). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Universidad de Antioquia, Colombia.

Jessberger, H.L., and Kockel, R.(1993). Determination and Assessment of the Mechanical Properties of Waste Material. Proc. Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium, 1383-1392. Sardinia, Italia.

Kavazanjian, E.J., Matasovic, N., Bonaparte, R., and Schmertmann, G.R. (1995). Evaluation of MSW properties for seismic analysis. Geoenvironment 2000, ASCE Geotechnical Publication No. 46 2.

Kolsch, F. (1995). Material Values for Some Mechanical Properties of Domestic Waste. Sardinia, Italy, October.

Lambe, T. W. and Whitman R.V. (1972). Mecánica de Suelos, Limusa, México. 371-393

Landva, A.O. y Clark, J.I. (1990). Geotechnics of Waste Fill. Geotechnics of Waste fills- Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, editors, ASTM, Philadelphia. 86-103.

Palma, J.H. (1995). Comportamiento geotécnico de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos. Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, Santander, España.

Reglamento Sobre Condiciones Sanitarias y de Seguridad Básicas en los Rellenos Sanitarios. Ministerio de Salud, República de Chile, N°189, Agosto del 2005.

Siegel, R.A., Robertson, R.J., Anderson, D.G (1990). Slope Stability Investigations at a Landfill in Southern California. Geotechnics of Waste Fills-Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, editors, ASTM, Philadelphia, 259-284.

Singh, S., and Murphy B.(1990). Evaluation of the stability of sanitary Landfills. . Geotechnics of Waste Fills-Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, editors, ASTM, Philadelphia, 240-258.

Sowers, G.F., (1973). Settlement of waste disposal fills. 8a Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineerings, vol.2. 207-210, Moscú, Rusia.

Stark, T.D., Huvaj, N., Li, G. (2009). Shear strength of municipal solid waste for stability analyses. Environ Geol., 57:1911-1923.

Turcumán, M., Fiore, J., Vázquez, G. (2009). Estudio de un vertedero controlado. Análisis de su estabilidad a través de la compresibilidad. II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, Barranquilla, Colombia, Septiembre.

Villavicencio, G., Espinace, R., Bacconnet, C. y Breul P. (2007). Uso de penetrómetros ligeros en proyectos de operación y cierre de tranques de relaves chilenos. VI Congreso Chileno de Geotecnia. Valparaíso, Chile, Noviembre.

**ANEXOS**

## ÍNDICE ANEXOS

Anexo A: Glosario.....	37
Anexo B: Rellenos Sanitarios.....	39
Anexo C: Propiedades de los RSU.....	40
Anexo D: Estabilidad de taludes en rellenos sanitarios.....	44
Anexo E: Compresibilidad de Rellenos Sanitarios.....	45
Anexo F: Determinación de Parámetros Resistentes.....	48
Anexo G: Parámetros Resistentes al Corte.....	54
Anexo H: Método de Bishop Modificado .....	57

## **Anexo A: Glosario**

Para efectos del presente proyecto de título, las expresiones que aquí se indican tienen el siguiente significado:

**Biogás:** Mezcla de gases generada por la descomposición anaeróbica de la materia orgánica putrescible de los residuos que se depositan en un RS y que consiste mayoritariamente en metano, dióxido de carbono, vapor de agua y, en mucho menor medida, de gases tales como sulfuro de hidrógeno e hidrógeno.

**Celda:** Unidad básica de un Relleno Sanitario que consiste en la basura descargada diariamente en el frente de trabajo, debidamente compactada y sobre cuya superficie, al final de la jornada de trabajo o de ser necesario con una mayor frecuencia, se coloca cobertura diaria.

**Cierre o Clausura:** Etapa que se inicia luego del término de la vida útil de un Relleno Sanitario, en la cual se construye o completa la cobertura final y se mantienen, operan y/o monitorean los distintos componentes o sistemas de éste hasta que se garantiza que su abandono definitivo no importa riesgo para la salud ni la seguridad de la población.

**Cobertura diaria:** Capa de tierra compactada de al menos 15 cm de espesor con que se cubre la totalidad de los residuos dispuestos durante un día de operación en un Relleno Sanitario y que tiene como objetivos evitar el contacto de los residuos con el medio ambiente, alcanzar y mantener condiciones anaeróbicas en las celdas sanitarias, controlar la proliferación de vectores sanitarios, el biogás, la emanación de olores ofensivos, los riesgos de incendio y el ingreso de aguas lluvias.

**Compactación:** Reducción del volumen de los residuos sólidos, con el consecuente aumento de su densidad, que se logra a través del tránsito repetido de maquinaria pesada sobre éstos.

**Impermeabilización:** Técnica o método de aislamiento empleado para evitar el tránsito de lixiviado y de gases hacia el exterior de un Relleno Sanitario, constituido por uno o más revestimientos de materiales de baja permeabilidad.

**Lixiviado:** Líquido que ha percolado o drenado desde y a través de los residuos sólidos y que contiene componentes solubles y material en suspensión provenientes de éstos.

Material de cobertura: Suelo utilizado para cubrir diariamente los residuos sólidos depositados en un Relleno Sanitario.

Relleno sanitario: Instalación de eliminación de residuos sólidos en la cual se disponen residuos sólidos domiciliarios y asimilables, diseñada, construida y operada para minimizar molestias y riesgos para la salud y la seguridad de la población y daños para el medio ambiente, en la cual las basuras son compactadas en capas al mínimo volumen practicable y son cubiertas diariamente.

Residuo sólido, basura, desecho o desperdicio: Sustancias, elementos u objetos cuyo generador elimina, se propone eliminar o está obligado a eliminar.

Residuos Sólidos Urbanos (RSU): son generados cuando los materiales utilizados por el hombre cumplen con su vida útil. Estos residuos provienen de las diferentes actividades realizadas en hogares, comercio, industrias y actividades institucionales (oficinas públicas, escuelas, colegios y universidades).

El D.S. 189 (2005) del Ministerio de Salud define Residuos sólidos asimilables y Residuos sólidos domiciliarios, los cuales forman parte de la composición de los RSU.

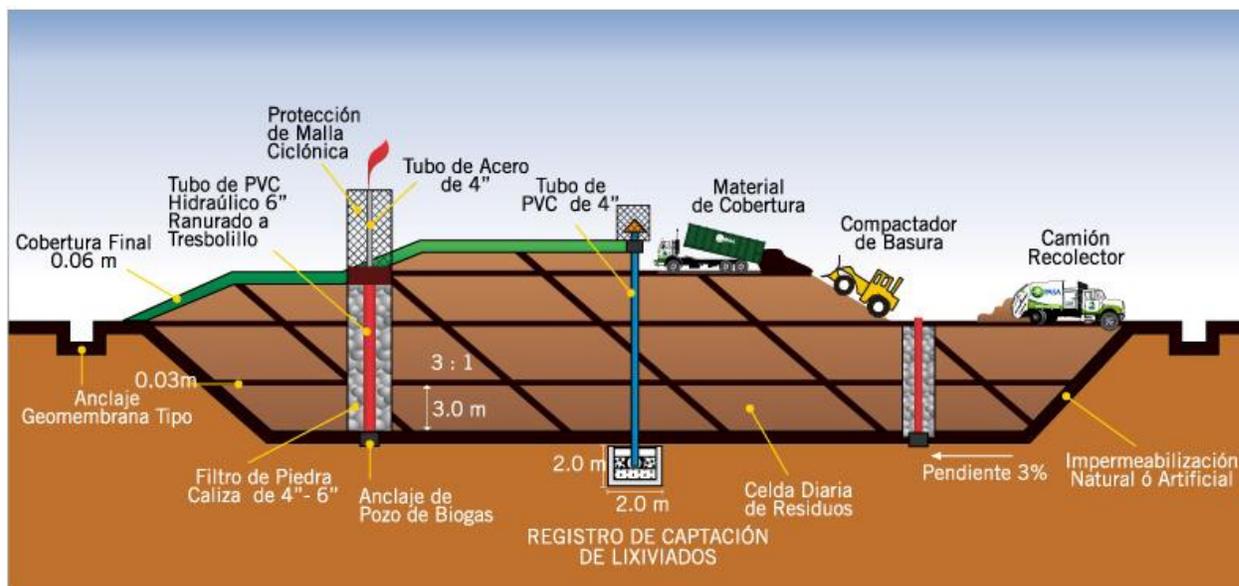
Residuos sólidos asimilables: Residuos sólidos, basuras o desperdicios generados en procesos industriales u otras actividades, que no son considerados residuos peligrosos de acuerdo a la reglamentación sanitaria vigente y que, además, por su cantidad composición y características físicas, químicas y bacteriológicas, pueden ser dispuestos en un Relleno Sanitario sin interferir con su normal operación.

Residuos sólidos domiciliarios: Residuos sólidos, basuras, desechos o desperdicios generados en viviendas y en establecimientos tales como edificios habitacionales, locales comerciales, locales de expendio de alimentos, hoteles, establecimientos educacionales y cárceles.

Sitio: Terreno en el cual se emplaza o pretende emplazar un Relleno Sanitario.

## Anexo B: Rellenos Sanitarios

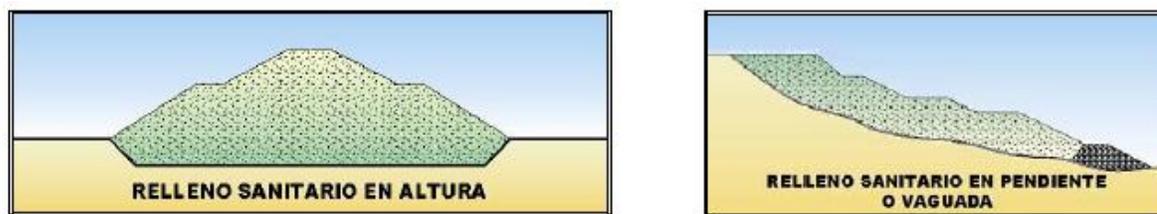
### ➤ Perfil referencial de un relleno sanitario



**Figura B1. Perfil referencial típico de un relleno sanitario.**

(Fuente: <http://www.ingenierosinc.com/2008/07/31/mas-sobre-los-rellenos-sanitarios/>)

### ➤ Rellenos sanitarios en altura



**Figura B2. Rellenos sanitarios en altura.**

(Fuente: Palma. 1995)

**Anexo C: Propiedades de los RSU**

➤ Composición porcentual

**Tabla C1. Composición de los Residuos Sólidos para distintas ciudades de Chile**

Ciudades	Materia orgánica	Papeles y cartones	Plásticos	Vidrios	Metales	Otros
<b>Chile</b>	58,00	12,30	8,10	3,30	3,51	13,80
<b>Santiago</b>	55,36	13,77	9,64	3,48	1,27	16,49
<b>Concepción</b>	62,39	10,52	5,85	1,78	2,68	6,65
<b>Talcahuano</b>	68,18	8,75	11,96	0,88	1,96	8,25
<b>Chillán</b>	64,45	9,64	8,26	4,85	0,92	11,84

Fuentes: MIDEPLAN (1997-1999); Dirección medio ambiente de Talcahuano (2000); CONAMA RM (2006); Córdova (2008)

**Tabla C2. Composición de los Residuos Sólidos**

RSU/País	Santiago Chile	New York USA	Pekín China	Cochabamba Bolivia	Sao Paulo Brasil	Buenos Aires Argentina
<b>Metal</b>	1,3	5	1	1	5	2
<b>Papel y Cartón</b>	13,7	22	5	2	14	9
<b>Plástico</b>	10	-	1	3	14	10
<b>Caucho Cuero y Madera</b>	-	3	1	1	7	-
<b>Textiles</b>	-	-	-	-	3	-
<b>Materia Orgánica</b>	55	20	45	71	51	58
<b>Vidrio</b>	3,5	6	1	1	1	6
<b>Otros</b>	16,5	44	19	21	5	15

Fuentes: Chile. (2006); Carvalho (1999); Argentina, (2000).

➤ Humedad

**Tabla C3. Rango de valores de humedad**

Fuente	Humedad (%)	Característica del Relleno
Rao et al., 1977	65-72	Con materiales vegetales
Cartier & Baldit, 1983	20-35	Constante con la profundidad
Siegel et al., 1990	10-45	Vertederos de Monterey Park, California
Sánchez Alciturri et al., 1993	48	Vertedero Controlado Meruelo, Santander , España
Tchobanoglous et al., 1994	15-40	Según composición, estación del año, condiciones meteorológicas. Mayor parte de los vertederos de EEUU
Gabr & Valero, 1995	30-130	Cerca de la superficie y aumenta hasta 130% con la profundidad (Pennsylvania, EEUU)
Coumouls et al., 1995	60 40	Primeros 15 m (Vertedero Ano Liossia, Grecia) Profundidad mayor a 15m
Henriques Pereira, 2000	13-70	No exhiben tendencia de aumento con la profundidad (Velademingómes, España)

Fuente: Elaboración propia

➤ Densidad

En un intento por aclarar los factores que afectan a la densidad, Fasset et al. (1994) han ordenado la información de acuerdo con la energía de compactación, contenido de humedad, edad y profundidad del relleno. La tabla C4 presenta las densidades para cada uno de los grados de compactación.

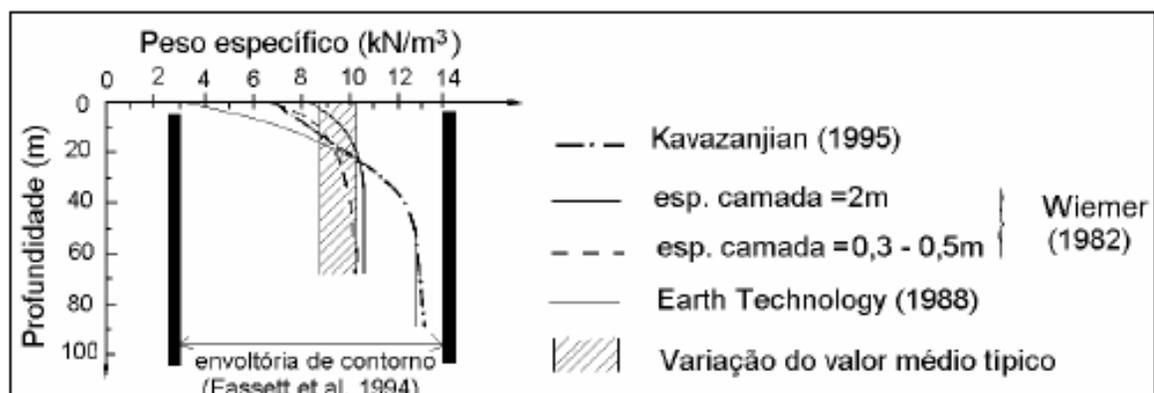
**Tabla C4. Densidades en función del grado de compactación.**

	Mala Compactación	Compactación Moderada	Buena Compactación
Rango de densidad total (t/m <sup>3</sup> )	0,30-0,94	0,52-0,78	0,89-1,07
Promedio de densidad total (t/m <sup>3</sup> )	0,54	0,70	0,97
Rango de densidad seca (t/m <sup>3</sup> )	0,19-0,35	0,35-0,54	s/d
Promedio de densidad seca (t/m <sup>3</sup> )	0,27	0,46	s/d

Fuente: Fassett et al. (1994). s/d: sin dato

También Fassett et al. (1994) verificaron que las capas de residuos débilmente compactadas, cuando están situadas a profundidades entre 10 y 20 m, adquieren una densidad semejante a las capas inicialmente bien compactadas.

Weimer (1982), Fasset et al. (1994), Kavazanjian et al. (1995) y König & Jessberger (1997), afirman que la densidad de los RSU tiende a aumentar con la profundidad en los rellenos más antiguos (figura C5), aunque los incrementos dejan de ser significativos a una determinada profundidad. Esta afirmación se basa en la bioconsolidación de los RSU y en la compresión debido a la sobrecarga impuesta por las capas superiores.



**Figura C5. Peso específico para RSU compactados.**

(Fuente: Kavazanjian, 1995; Fasset, 1994).

En lo referente a la influencia de la densidad de los RSU en la resistencia al corte, Carvalho (1999) concluye que están relacionadas de manera directamente proporcional, o sea, para residuos con mayor densidad, se esperan valores más significativos de la resistencia al corte.

La estimación de la densidad se puede determinar mediante ensayos de campo como celdas de control a escala real, pozos y calicatas de prueba, muestras obtenidas de sondeos, y determinación de la densidad in situ. También se puede estimar la densidad a partir de mediciones topográficas del volumen del relleno y contando con el registro del peso de los residuos y el material de cobertura que conforman el volumen medido. Otra vía consiste en determinar la densidad de cada uno de los componentes de los residuos y estimar la densidad total empleando el porcentaje en peso de cada componente.

Landva & Clark (1990) advierten de las dificultades en la obtención de parámetros representativos, debido a la naturaleza heterogénea de los materiales que componen los RSU. Estos autores recomiendan cavidades de 10 m<sup>3</sup> para la determinación de la densidad in situ, de manera que eliminen la influencia de la heterogeneidad del material.

Los datos existentes en la literatura técnica muestran un rango bastante amplio de variación de la densidad de los RSU, como se puede observar en la tabla C6.

**Tabla C6. Rango de valores de densidad**

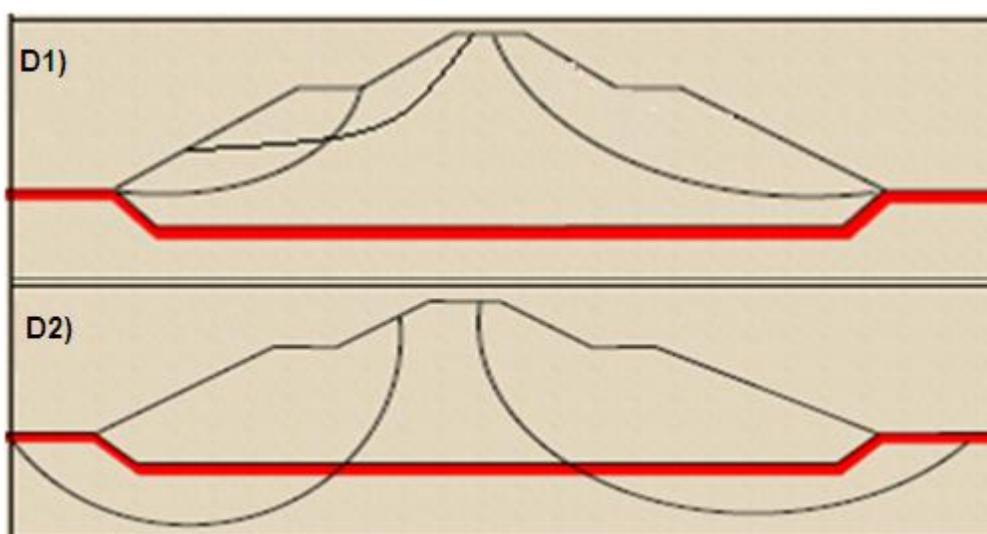
Fuente	Densidad (ton/m <sup>3</sup> )	Observaciones
Sowers, 1971	0,12-0,3 0,6	Sin compactar Compactados
Bruner y Keller, 1971	0,3-1,0	Según grado compactación
Rao, 1974	0,15-0,2 0,35-0,6	Sin compactación Compactación débil
Bratley et al., 1976	0,16 0,7-1,31	Sin compactación Según equipo de compactación
Watts & Charles, 1990	0,59-0,63 0,8	Compactados en capas de 2 m, sin y con material de cobertura respectivamente. Compactados en capas de 0,6 m, incluyendo material de cobertura (Reino Unido).
Arroyo et al., 1990	1,0	Compactados
Oweiss y Khera, 1990	0,28-0,31 0,47-0,63 0,86-0,93	Sin compactar Moderadamente compactado Buena compactación
Manassero et al., 1990	0,5-1,0	Compactación común (Bélgica)
Sánchez - Alciturri et al., 1993	0,2 0,8-1	Sin compactar Compactados
Kavazanjian et al., 1995	0,86-1,02	Aunque mencionan que en la práctica los valores más utilizados están entre 0,29-0,75
Palma J.H., 1995	1,2 1	Cuerpo del Vertedero (RSU+ Cobertura) RSU. Vertedero Controlado Meruelo, España
Kavazanjian et al., 2001	0,6-0,7 1,4-2,0	RSU frescos, después de la colocación inicial RSU degradados con un alto % de suelo como material de cobertura (USA)
Gourc et al., 2001	0,7	Capa superiores RSU frescos (no degradado) (Francia)
Grupo Geotecnia PUCV ,2002-2006	1,2	Compactados. Relleno Sanitario Loma Los Colorados, Chile
Grupo Geotecnia PUCV, 2008	0,55	Sin compactación, ni sistema de manejo de lixiviados y biogás. Vertedero Viñales, Constitución, Chile
Geotecnia Ambiental LTDA., 2010	1,2	Compactados. Relleno Sanitario Santa Marta, Chile
SIGA, 2012	1,2	Compactados. Relleno Sanitario, Valdivia, Chile

Fuente: Elaboración propia

## Anexo D: Estabilidad de taludes en rellenos sanitarios

### ➤ Mecanismos de falla circular

Cuando el relleno de residuos sólidos es inestable, el deslizamiento ocurre en el talud del relleno sanitario, con círculos de rotura que pueden ser superficiales de pie o de talud, como se muestra en la figura D1. Cuando el relleno presenta una altura excesiva y está cimentada sobre arcillas blandas, se puede producir una rotura general del suelo blando de cimentación causando una superficie de rotura de círculo profundo como se aprecia en la figura D2.



**Figura D1) Círculos de rotura superficiales y de pie; D2) Rotura general suelo de cimentación.**  
(Fuente: Palma, 1995)

### ➤ Falla circular en botadero de Navarro

En la fotografía se muestra el deslizamiento del antiguo botadero de Navarro, en Cali, Colombia el 2001, el cual alcanzaba una altura de 62 m. Las lluvias persistentes provocaron una acumulación de lixiviados, lo que unido a la acumulación de gases incrementó de forma espectacular la presión de poros, saturó los residuos y ocasionó el derrumbe.



**Figura D3. Falla circular relleno sanitario “Navarro” en Cali, Colombia.**  
Fotografía tomada 13 de Septiembre del 2001

#### **Anexo E: Compresibilidad de Rellenos Sanitarios.**

En 1973 Sowers, fue el primero en plantear un modelo de compresibilidad para los RSU basándose en la clásica teoría de la consolidación unidimensional de los suelos propuesta por Terzaghi (1943). Según este autor la compresibilidad de los residuos sólidos puede ser dividida en compresibilidad inicial, primaria y compresibilidad secundaria.

El asiento inicial ocurre inmediatamente después de la colocación de las cargas, debido a reacomodamiento del material y los procesos de compactación. Este tipo de asiento es análogo a la compresión elástica que ocurre en los suelos y es virtualmente instantáneo.

El asiento primario ocurre debido a la dispersión de presión intersticial y gas de los espacios vacíos de la masa de residuos. Este asiento se produce en un tiempo relativamente mayor que el asiento inicial, del orden de treinta días después de la aplicación de la carga, Sowers (1973). Morris & Woods (1990) y Edil et al., (1990).

La magnitud de la compresión primaria se expresa por la siguiente relación:

$$S_p = \frac{C_c}{1 + e_0} H_0 * \log \frac{\sigma_{v0} + \Delta\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \quad Ec. (E1)$$

Dónde:

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

$H_0$  = altura inicial del relleno.

$C_c$  = coeficiente de compresibilidad.

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

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

$e_0$  = índice de poros.

La obtención del índice de compresión primaria,  $C_c$  es función del índice de vacíos (figura E1), aunque hay una gran dispersión en función de la composición de los residuos:

$C_c = 0.15 e_0$  Bajo contenido en materia orgánica.

$C_c = 0.55 e_0$  Alto contenido en materia orgánica.

En el asiento secundario, el mecanismo que rige esta etapa se basa en los procesos de degradación que se desarrollan al interior del relleno. La compresión secundaria no depende del proceso de carga, pues en este caso, la variable dependiente es el tiempo.

Terminado la primera fase aproximadamente, se inicia la compresión secundaria que se expresa por la siguiente relación:

$$S_s = \frac{C_\alpha}{1 + e_0} H * \log \frac{t_2}{t_1} \quad Ec. (E2)$$

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

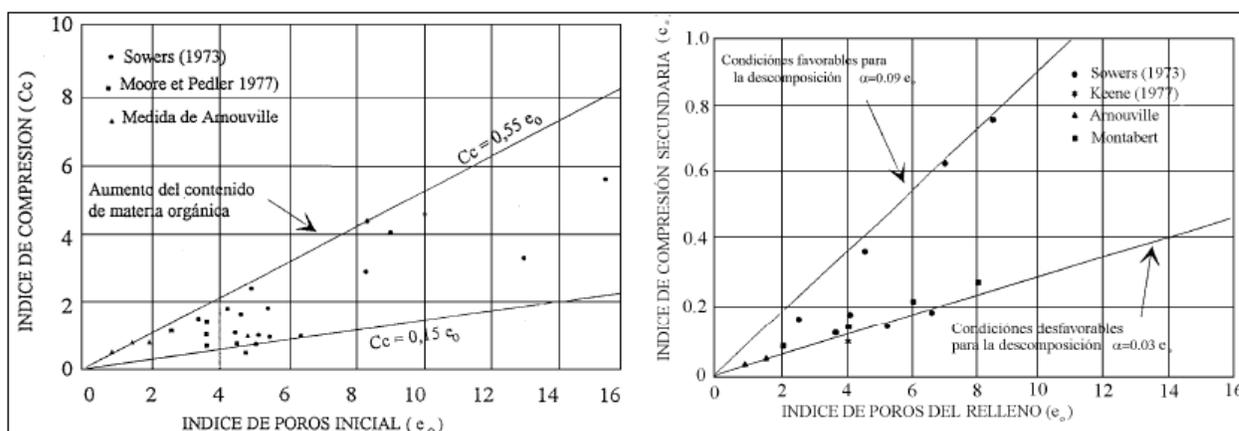
$H$  = altura del relleno al tiempo  $t_1$ .

$C_\alpha$  = índice de compresión secundaria.

Al igual como en el caso anterior, el coeficiente de compresión secundaria  $C_{\alpha}$  es función del índice de poros (figura E1). Sin embargo, este coeficiente varía mucho según sean las condiciones favorables o desfavorables a la descomposición. Siendo su valor mayor en condiciones cálidas, húmedas y cuando el nivel freático sufre variaciones que aportan aire fresco al relleno:

$$C_{\alpha} = 0.03 e_0 \text{ Condiciones desfavorables;}$$

$$C_{\alpha} = 0.09 e_0 \text{ Condiciones favorables.}$$



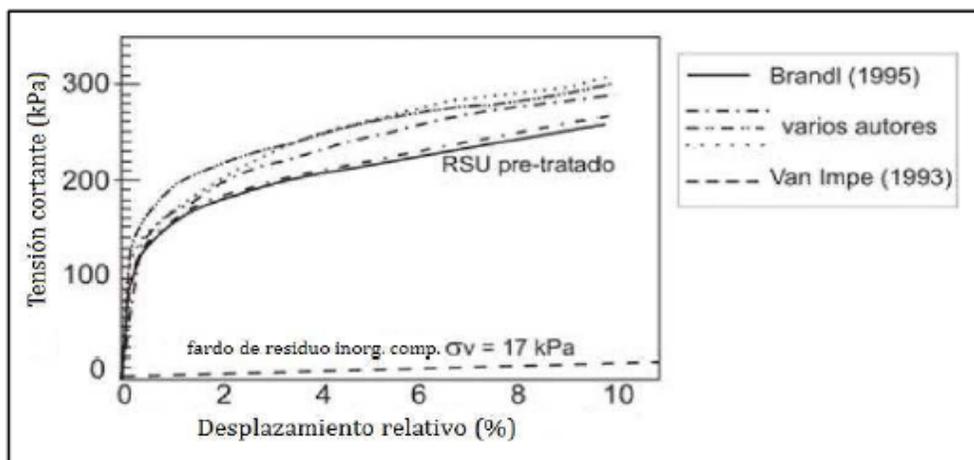
**Figura E1. Índice  $C_c$ ,  $C_{\alpha}$  en función del índice de poros.**  
(Fuente: Sowers, 1973).

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

Carvalho (1999) afirma que la dificultad de utilizar la propuesta de Sowers (1973) está relacionada con la obtención de  $C_c$ ,  $C_{\alpha}$  y  $e_0$ , debido a la heterogeneidad de los RSU, por lo que recomienda la aplicación de ensayos y equipos de grandes dimensiones para la determinación de parámetros representativos.

## Anexo F: Determinación de Parámetros Resistentes

### ➤ Ensayos de corte directo

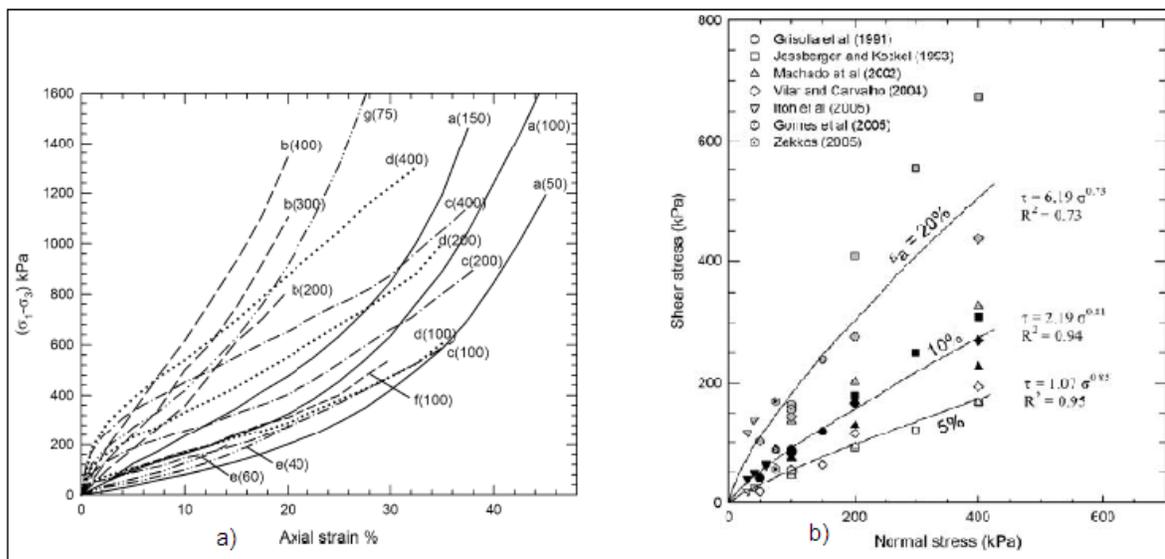


**Figura F1. Relación tensión-deformación para RSU a partir de ensayos de corte directo.**  
(Fuente: Manassero et al., 1996)

### ➤ Ensayos triaxiales

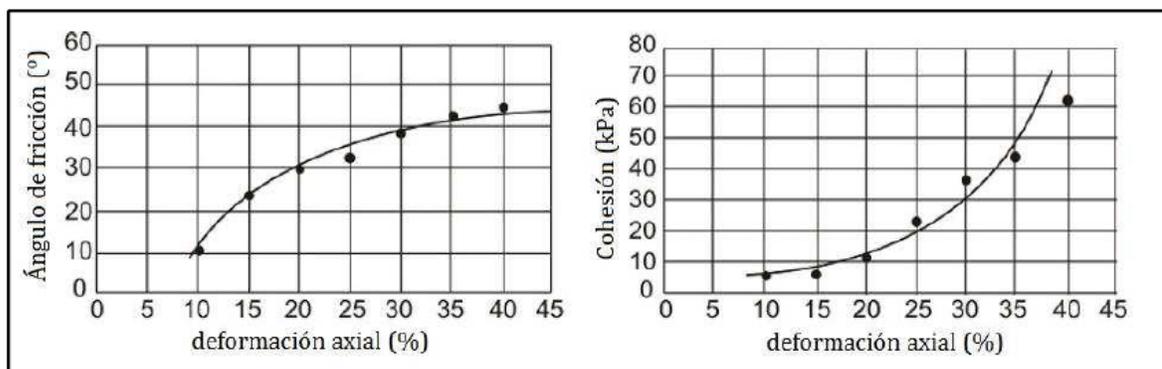
En la figura F2a se muestra el esfuerzo desviador típico ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) versus la deformación axial de ensayos de compresión triaxial en RSU. Las muestras ensayadas oscilan entre 15 y 30 cm de diámetro y de 30 a 60 cm de largo. Las pruebas se llevaron a cabo a una deformación axial máxima de 46%, lo que corresponde a un desplazamiento vertical de 21 cm de altura sobre la base de una muestra inicial de 45 cm. Como se puede ver en la figura F2a, los datos de compresión triaxial sobre RSU muestran el aumento del esfuerzo desviador a medida que aumenta la deformación axial, sin alcanzar un valor peak.

En la figura F2b se presenta las envolventes de resistencia de las pruebas de compresión triaxial de los RSU, obtenidos de los estudios presentados en la figura F2a para distintos niveles de deformación axial. La envolvente de resistencia, más baja corresponde a una deformación axial de 5% y la más alta a un 20%. Esto reafirma el aumento de la resistencia al corte con el aumento de la deformación axial en los ensayos de compresión triaxial.



**Figura F2. a): Relaciones tensión-deformación de los RSU ensayos compresión triaxial. b): Envoltentes de resistencia de los RSU, correspondientes a 5, 10 y 20% la deformación axial en ensayos de compresión triaxial.**  
(Fuente: Stark, T. et al. 2009)

Grisolia et al. (1995) realizaron ensayos de compresión triaxial de RSU y encontraron que incluso a deformaciones axiales superiores a 20-30%, la resistencia al corte peak no se moviliza. Además, presentan variaciones de los parámetros de resistencia de los RSU en función de los niveles de deformaciones axiales, (figura F3). Inicialmente predomina el efecto friccional en el comportamiento resistente del material. A medida que se incrementa el desplazamiento relativo, los valores del ángulo de fricción tienden a estabilizarse. Entonces, la cohesión asume importancia en la resistencia al corte del material, sobre todo para valores de deformación axial superiores a 20%.



**Figura F3. Parámetros de resistencia en función de las deformaciones.**  
(Fuente: Grisolia et al.1995).

- Ensayos in situ
  - Ensayo de penetración Dinámica CPT<sub>din</sub>

Los ensayos CPT<sub>din</sub> permiten conocer la resistencia a la penetración (N) e indirectamente órdenes de magnitud del estado de compacidad en que se encuentran los materiales que conforman el relleno sanitario, información de vital importancia para llevar a cabo estudios de estabilidad.

El ensayo consiste en conocer la resistencia a la penetración dinámica (N) de la masa de residuos que componen el relleno sanitario de RSU, para ello se contabiliza el número de golpes que es necesario aplicar para que un tren de barras de 5 cm de diámetro provisto en su extremo de una punta cónica maciza metálica penetren una profundidad de 30 cm (1 pie), debido a la acción de una masa (63,5 kg) que se deja caer desde una altura de 75 cm sobre la cabeza de golpeo o yunque, en la figura F4 se muestra este tipo de ensayo.



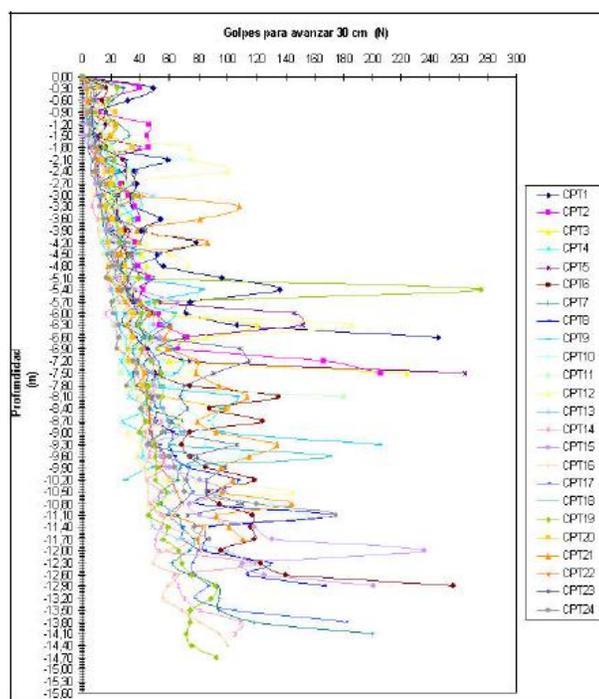
**Figura F4. Ensayo de penetración dinámica CPT<sub>din</sub>**

Este tipo de ensayo no permite extraer muestras como el ensayo SPT y no se registra la profundidad del nivel freático. En la tabla F5 se muestra una comparación entre los componentes y características del ensayo SPT y CPT<sub>din</sub>.

**Tabla F5. Comparación entre componentes y características SPT-CPTdin**

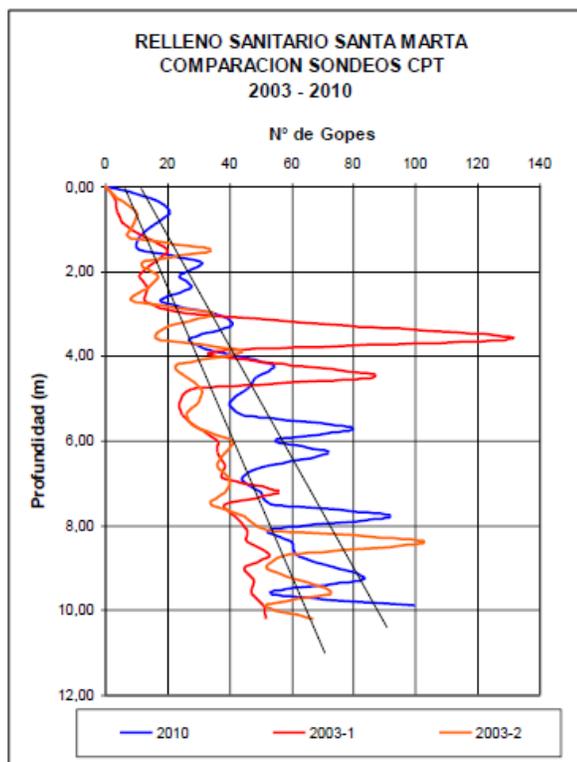
Componentes	Características	SPT	CPTdin
Martillo	Masa (kg)	63.5	63.5
	Altura de caída (mm)	76.0	75.2
Yunque	Masa	15-20	25
Cono	Área (cm <sup>2</sup> )	-	20.27
	Angulo (°)	-	60
	Diámetro (mm)	-	50.5
	Longitud (mm)	-	50.2
Barras	Masa (kg)	< 10kg/m	< 10kg/m
	Longitud (m)	1	1.50
	Diámetro (mm)	35	44.4

- Ensayo CPTdin relleno sanitario Loma los Colorados y Santa Marta



**Figura F6. Ensayos de penetración dinámica. (Relleno Loma los Colorados).**

(Fuente: Aguilera, Galeas, 2005)



**Figura F7. Comparación sondeos CPT (Relleno Sanitario Santa Marta).**  
(Fuente: Geotecnia Ambiental LTDA. (2010))

De las figuras F6 y F7 se puede visualizar la profundidad donde se produce el cambio desde una celda a otra, esto gracias al incremento que se genera en los valores de índice de penetración (N) al alcanzar ciertas profundidades.

En la figura F7, las rectas negras representan la tendencia del índice de penetración en profundidad para cada una de las campañas de ensayos llevadas a cabo durante distintos periodos en el RS Santa Marta, la cual permite visualizar el incremento de este parámetro en el tiempo (N). Esto se asocia a una mayor resistencia y capacidad de la masa de residuos con el paso del tiempo.

- Experiencia de Withiam et al. 1995 de corte directo a gran escala

Withiam et al. (1995), citado por Carvalho (1999), en un vertedero de Dekorte Park (New Jersey), realizaron este tipo de ensayo, en bloques inalterados de RSU (1,5x1,5x1,5 m), empleando un equipo de grandes dimensiones, donde la sección inferior de la caja estaba anclada en una arcilla compactada del vertedero y la parte superior fue anclada por un sistema de cables a una retroexcavadora, para aplicar la fuerza horizontal. La fuerza normal se obtuvo mediante el uso de bloques de madera y de hormigón. Fueron ejecutados 5 ensayos de corte directo en múltiples escenarios y variando la tensiones normales de 0-21 kPa. La técnica de múltiples escenarios permitió eliminar el efecto de la variabilidad de los resultados asociados con el uso de diferentes muestras para cada prueba. La envolvente de rotura definió una cohesión cerca de 10 kPa y ángulo de fricción de 30°.

**Anexo G: Parámetros Resistentes al Corte**

**Tabla G1. Parámetros Resistentes al Corte, según distintos autores a nivel mundial**

Fuente	$c$ (T/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	Ensayo	Observaciones	Lugar
Landva y Clark, 1986	1,6-1,9 1,6 2,3	38-42 33 24	Corte directo	Basura vieja. Más de 1 año. Basura fresca.	No se detalla
Saarela, 1987	6,7	20	Ensayo Triaxial	Citado por Botero (1999)	Relleno ciudad de Helsinki, Finlandia
Turczynki, 1988	4,0-5,0 1,5 1,2 1,0	38-40 35 32 26	Corte directo	RSU Frescos 3 años 5 años 14 años	No se detalla
Landva y Clark, 1990	1,6-2,3	24-39	Corte directo	$\sigma_n = 480$ kPa, caja de sección 434*287mm, tensión normal y corte mediante gatos hidráulicos	Vertedero de Edmonton, Calgary, Mississauga, Waterloo. Canadá
Siegel et al., 1990	0,0	39-53	Corte directo	Caja de sección circular (d=130 mm, h= 76 a 102 mm), 10% de desplazamiento de corte	Vertedero de Monterey Par, California
Benvenuto & Cunha, 1991	1,35	22	Back analysis	Deslizamiento en vertedero de Bandeirantes, Sao Paulo. Ineficiente sistema de extracción de lixiviado y biogás	Vertedero Bandeirante, Sao Paulo, Brasil
Grisolia et al., 1991	1,0	17	Ensayo Triaxial	20% deformación	No se detalla
Grisolia et al., 1991	2,2	42	Ensayo Triaxial	35% deformación	No se detalla
Richardson y Reynolds, 1991	1,0	18-42	Corte directo, in situ	Caja de sección 1,5x1,5m, carga normal 14 y 38 kPa	Maine, USA
Benson & Othman, 1992	2,0	61	Corte directo	Presencia de plástico, caucho y alambres influyeron en los resultados	No se detalla
Jessberger y Kockel, 1993	2,2	17	Ensayo Triaxial	Consolidado drenado, 300mmx600mm (diámetro x altura), 20% deformación	Alemania
Del Greco y Oggen, 1994	1,57 2,4	21 22	Corte directo	Fardo de residuo de 400x500x600 mm de baja y alta densidad respectivamente	No se detalla
Gabr y Valero, 1995	0-2,75	20,5-39	Corte directo y compresión Triaxial	Residuos con un alto grado de degradación (15-30 años de deposición)	Vertedero de Pioneer Crossing, Pensilvania
Withiam et al., 1995	1,0	30	Corte directo in situ	Muestras ensayadas de 1,5x1,5x1,5 m	Vertedero de Dekorte Park, New Jersey, EEUU.

(Tabla G1 cont.)

Autor/Año	c (T/m <sup>2</sup> )	φ (°)	Ensayo	Observaciones	Lugar
Gotteland et al., 1995	1,0	25	Corte directo, in situ	Sección de corte (1x1 m), muestras inalteradas, desplazamiento máximo 35%	No se detalla
Kolsch, 1995	1,5-1,8	15-22	Corte directo	Para residuos de menor y mayor edad respectivamente, caja sección 2x1 m	No se detalla
Edinçliler et al., 1996	2,4	41	Corte directo	Muestras de distintas edades y lugares del relleno	Wisconsin, EEUU
Carvalho, 1999	4,2-5,5	27	Ensayo Triaxial	Consolidado drenado, 150mmx300mm (diámetro x altura), 20% deformación	Vertedero Bandeirante, Sao Paulo, Brasil
Carvalho, 1999	4,5-6,0	21	Ensayo Triaxial	Consolidado drenado, 200mmx400mm (diámetro x altura), 20% deformación	Vertedero Bandeirante, Sao Paulo, Brasil
Mazzucato et al., 1999	2,2-2,4	17-18	Corte directo, in situ	Caja de corte cilíndrica (d=810mm, h=440mm), densidad del material aprox de 0,7 t/m <sup>3</sup>	No se detalla
Kavasanjian, 1999	4,3	31	Corte directo	Caja de corte cilíndrica (d=46 cm), 1,9 % deformación de corte	Relleno en California
Caicedo et al., 2002	2,6	24	Corte directo	Muestras obtenidas deslizamiento vertedero Doña Juana, equipo de corte 300x300x200 mm	Vertedero Doña Juana, Bogotá, Colombia
Fucale, 2005	2,97 3,0	42.5 46	Corte directo	Matriz básica, 20% de deformación 3% adición de fibras a matriz básica	Vertederos de Ihlenberg y Buchen, Alemania
Grupo Geotecnia PUCV (2002-2006)	5,0	18	No hay detalle	RS Cumple con todas las medidas exigidas por DS N°189	RS Loma los Colorados, Chile
Nascimento, 2007	0,46-2,58	27-35	Ensayo Triaxial	Consolidado drenado, residuos de diferentes edades, equipo de grandes dimensiones (d=50 cm y h=100 cm), deformación axial 20%	Vertedero Metropolitano Centro en Salvador
Reddy et al., 2008	3,1-6,4	26-30	Corte directo	Corte directo drenado, con diferentes contenidos de humedad	RS de Orchard e Illinois, EEUU.
Grupo Geotecnia PUCV (2008)	0,5	17	Experiencia del grupo de Geotecnia en proyectos de características similares y condiciones de operación del vertedero	Sin compactación, ni sistema de manejo de lixiviados y biogás	Vertedero Viñales, Constitución, Chile

(Tabla G1 cont.)

Autor/Año	c (T/m2)	$\phi$ (°)	Ensayo	Observaciones	Lugar
Geotecnia Ambiental Ltda. (antes del 2010)	2,0	22	Análisis de sensibilidad en base a experiencia de consultora, ensayos in situ y literatura técnica especializada	Ampliación Relleno Santa marta, escenario 1. Parámetros mal escogidos, cumplen condición estática pero no dinámica, y con el terremoto no fallaron	RS Santa Marta, Chile
Geotecnia Ambiental Ltda. (antes del 2010)	2,5	20	Análisis de sensibilidad en base a experiencia de consultora, ensayos in situ y literatura técnica especializada	Ampliación Relleno Santa marta, escenario 2, Parametros mal escogidos, cumplen condición estática pero no dinámica, y con el terremoto no fallaron	RS Santa Marta, Chile
Geotecnia Ambiental Ltda. 2010	8,0	19	Back analysis	Back analysis luego terremoto 2010	RS Santa Marta, Chile
SIGA, 2012	2,24	25,7	Análisis estadístico de los datos recopilados en la literatura técnica	Adecuada compactación, sistema de control de aguas lluvias, buena conductividad hidráulica vertical, y una buena tasa de drenaje vertical.	Relleno, Valdivia, Chile
Anexo de EIA, 2012	0	20	Estudios realizados en proyectos similares en el país. (RSSM)	Adecuada compactación, sistema adecuado de drenaje de biogás y lixiviados.	RS, Cartagena, Chile
Anexo de EIA, 2012	1,5	35	Condición de basura fresca, Kolsch 1995	Adecuada compactación, sistema adecuado de drenaje de biogás y lixiviados.	RS, Cartagena, Chile
Anexo de EIA, 2012	1,8	22	Condición de basura descompuesta, Kolsch 1995	Adecuada compactación, sistema adecuado de drenaje de biogás y lixiviados.	RS, Cartagena, Chile

Fuente: Elaboración propia

## Anexo H: Método de Bishop Modificado

El método modificado de Bishop es uno de los más utilizados actualmente para el cálculo de factores de seguridad de los taludes, además, no descuida ninguna contribución de fuerzas operantes en los bloques. Aunque éste sólo satisface el equilibrio de momentos, se considera que los resultados son muy precisos en comparación con métodos más exactos. Los cálculos mediante éste, se pueden realizar manualmente, aunque la mayoría de los softwares de especialidad en el área lo traen incorporado.

El cálculo de estabilidad por el método de Bishop modificado, supone una superficie de deslizamientos circular que se ajusta bastante bien en la mayor parte de deslizamientos en suelos. El factor de seguridad (FS) correspondiente a un determinado círculo se estima mediante la división de la masa de terreno potencialmente deslizante en fajas verticales (dovelas), como se muestra en la figura H1, lo que permite el estudio de la estabilidad de taludes en suelos heterogéneos. El valor de este coeficiente obedece a la siguiente ecuación (Ec. (H1)):

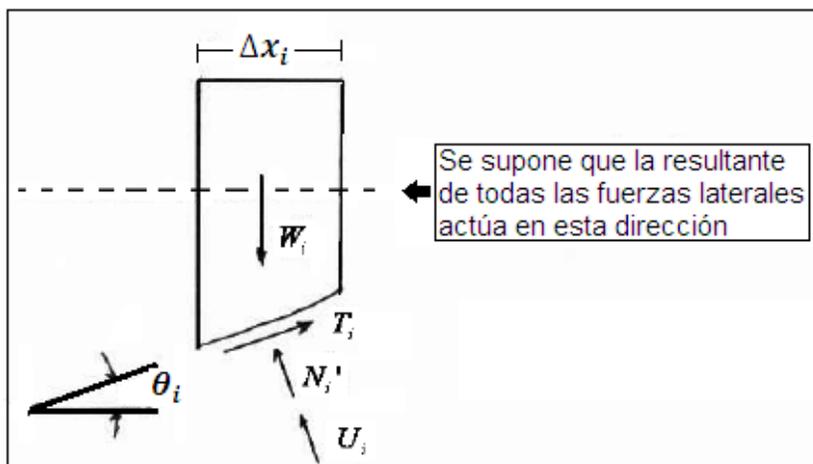


Figura H1: Fuerzas consideradas en el método de Bishop modificado

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c_i * \Delta x_i + (W_i - u_i * \Delta x_i) * \tan \phi_i] [1/M_i(\theta)]}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i * \sin \theta_i} \quad \text{Ec. (H1)}$$

Dónde:

$$M_i(\theta) = \cos \theta_i \left( 1 + \frac{\tan \theta_i * \tan \phi}{FS} \right) \quad \text{Ec. (H2)}$$

Dónde:

$FS$  = *Factor de seguridad*

$W_i$  = *Peso de una dovela*

$\theta_i$  = *ángulo entre la vertical y la dirección de la tensión normal en la base de la dovela*

$c_i$  = *cohesión efectiva*

$\phi_i$  = *ángulo de fricción*

$u_i$  = *presión intersticial*

$\Delta x_i$  = *ancho de la dovela*

Para este método se hace necesario iterar, ya que el  $FS$  interviene en ambos miembros de la ecuación. Sin embargo la convergencia es bastante rápida.

El método de Bishop modificado hace  $n-1$  hipótesis respecto a las fuerzas desconocidas y por lo tanto sobredetermina el problema, de forma que, en general, los valores de  $FS$  y  $N_i$  no son exactos.