

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID

E.T.S.I. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



Máster en Ingeniería de las Estructuras, Cimentaciones y Materiales

“Estabilidad de taludes en vertederos para residuos sólidos urbanos”

Sustentante:

Marcos Iván Duarte Letriñuk

Febrero de 2011

Madrid, España.

CONTENIDO	Págs.
1 GENERALIDADES	05
1.1 INTRODUCCIÓN.....	06
1.2 OBJETIVOS.....	07
1.3 CONCEPTOS GENERALES.....	07
1.4 MÉTODOS DE CÁLCULO.....	09
1.4.1 Método de dovelas.....	10
1.4.2 Planteamiento del problema.....	10
2 PROPIEDADES DE LOS RSU	13
2.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	14
2.1.1 Composición física de los RSU.....	14
2.1.2 Humedad.....	17
2.1.3 Peso específico.....	19
2.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	20
2.2.1 Compresibilidad.....	21
2.2.2 Resistencia al corte.....	23
2.2.3 Ensayos de corte directo en laboratorio.....	27
2.2.4 Ensayos triaxiales.....	30
2.2.5 Investigaciones de campo y retroanálisis.....	33
2.2.6 Criterios de rotura para RSU.....	34
3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	39
3.1 MÉTODOLÓGIA.....	40
3.1.1 Cálculo de estabilidad.....	40
3.1.2 Criterio de Sánchez-Alciturri et al (1993).....	41
3.1.3 Criterio de Kavazanjian et al (1995).....	43
3.1.4 Criterio de Manassero et al (1997).....	44
3.2 ANÁLISIS COMPARATIVO.....	46
3.3 CONCLUSIONES.....	48
BIBLIOGRAFÍA.....	50
ANEXO 1	52
ANEXO 2	60
ANEXO 3	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Págs.

Fig. 1.1: Sistema de fuerzas actuantes sobre una dovela.....	11
Fig. 2.1: Diagrama triangular del origen de RSU (Grisolia et al. 1999).....	16
Fig. 2.2 - Variación de humedad con relación a la profundidad (Henriques y Sopena, 2000).....	18
Fig. 2.3 – Peso específico para RSU compactados (Kavazanjian, 1995; Fasset, 1994).....	20
Fig. 2.4 –Modelo esquemático de la composición de los RSU (König & Jessberger 1997)....	24
Fig. 2.5: Envolvente de rotura (Kockel & Jessberger, 1995).....	24
Fig. 2.6: Comportamiento de los residuos bajo ensayos de corte, modelo de interacción entre las fuerzas de fricción y tracción (Kölsch, 1995).....	25
Fig. 2.7: Contribución de las componentes de fricción y cohesión equivalente en función de la variación de la tensión normal (Kölsch, 1993).....	26
Fig. 2.8: Parámetros de resistencia en función de las deformaciones (Grisolia et al. 1995).....	26
Fig. 2.9 Relación tensión-deformación para ensayos de corte directo (Manassero, 1988).....	28
Fig. 2.10 Movilización de los parámetros de resistencia de RSU de distintas edades a partir de ensayos triaxiales (König & Jessberger, 1997).....	30
Fig. 2.11 Propuesta de Walter (1992).....	31
Fig. 2.12 Curvas tensión-deformación obtenidas en ensayos triaxiales (Grisolia et al. 1995).....	31
Fig. 2.13 Resultados típicos de los ensayos triaxiales tipo CU en muestras del vertedero Doña Juana, Bogotá (Caicedo et al. 2002).....	32
Fig. 2.14 Parámetros de resistencia para ensayos de laboratorio (Singh & Murphy, 1990).....	34
Fig. 2.15 Diagrama cohesión-ángulo de rozamiento. Propuesta de franja recomendada para proyectos (Singh & Murphy, 1990).....	35
Fig. 2.16 Valores recomendados por Sánchez Alciturri et al. (1993).....	36
Fig. 2.17 Recopilación realizada por Kavazanjian et al (1995).....	37
Fig. 2.18 Envolvente de rotura del vertedero Doña Juana (Geosyntec, 1998).....	37
Fig. 2.19 Datos de resistencia recopilados por Manassero et al (1997).....	38
Fig. 2.20 Criterio de rotura para RSU propuesto por Manassero et al (1997).....	38
Fig. 3.1: Talud de referencia.....	40
Fig. 3.2: Parámetros para diseño.....	41
Fig. 3.3: Talud de referencia – Criterio de Sanchez Alciturri et al (1993).....	42
Fig. 3.4: Factor de seguridad vs. Ángulo del talud – Criterio de Sanchez Alciturri et al (1993).....	43
Fig. 3.5: Talud de referencia – Criterio de Kavazanjian (1995).....	43
Fig. 3.6: Factor de seguridad vs. Ángulo del talud.....	44
Fig. 3.7: Talud de referencia – Criterio de Manassero (1997).....	44
Fig. 3.8: Factor de seguridad vs. Ángulo del talud.....	45
Fig. 3.9: Cuadro comparativo F.S. vs. Ángulo del talud.....	46
Fig. 3.10: Cuadro comparativo de criterios de rotura para RSU.....	47

ÍNDICE DE TABLAS

Págs.

Tabla 2.1: Composición en porcentaje de peso para distintas ciudades (Carvalho, 1999)..	14
Tabla 2.2: Porcentajes típicos de componentes de los RSU (Sowers, 1973).....	17
Tabla 2.3 Parámetros de resistencia de RSU para distintas edades (Turczynski, 1988).....	28
Tabla 3.1: Parámetros mecánicos adoptados para los RSU.....	42

1 GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El método de vertedero controlado como sistema de disposición final de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) ha pasado por un largo proceso de evolución hasta los diseños actuales, en los que el vaso de vertido es prácticamente una celda aislada del entorno, donde las interacciones con el medio se minimizan mediante el uso de recursos tecnológicos.

Actualmente, la dificultad para encontrar emplazamientos se está superando con la ejecución de rellenos de alturas importantes, y diseños que aprovechan mejor el espacio disponible. La capacidad de estos rellenos aumenta en función a la altura y pendiente de sus taludes. Con el propósito de evitar problemas de estabilidad durante la fase de operación y cierre, se deben conocer los aspectos geotécnicos relacionados con la estabilidad de taludes.

En tales obras, se considera a los RSU como un suelo con parámetros propios, como peso específico, compresibilidad, capacidad portante, etc. La caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales depositados en vertederos es una tarea generalmente difícil debido a que los materiales no son homogéneos, presentan características de anisotropía y sus propiedades desde el punto de vista ingenieril son considerablemente variables de acuerdo con el estado de biodegradación de los residuos orgánicos.

El presente trabajo trata de desarrollar criterios para el diseño y cálculo de estabilidad de taludes en vertederos. El término estabilidad se considera relacionándolo exclusivamente con los aspectos de estabilidad mecánica de la masa de residuos.

1.2 OBJETIVOS

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar criterios básicos para el diseño de taludes en vertederos, basados en investigaciones sobre el comportamiento mecánico de los residuos sólidos urbanos.

Para optimizar la comprensión del tema abordado, se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una revisión bibliográfica de las publicaciones más recientes sobre el tema propuesto.
- Efectuar un análisis de estabilidad adecuando los modelos de la mecánica de suelos al comportamiento mecánico de los RSU.
- Establecer una comparación entre los distintos criterios de rotura para RSU disponibles en la literatura.

1.3 CONCEPTOS GENERALES

Según Jessberger & Kockel (1993) el comportamiento mecánico de los residuos sólidos urbanos puede ser de dos clases. En el primer caso se hablaría de residuos con comportamiento asimilable al de los suelos y en el segundo de residuos con comportamiento mecánico no asimilable al de los suelos. En este último caso la mecánica de suelos es solo aplicable de forma restringida. Consiguientemente, es necesario hacer un estudio detallado del comportamiento mecánico de los RSU antes de poder aplicar con fiabilidad los modelos y teorías de la Mecánica de Suelos.

En el primer caso, la estabilidad de los depósitos se estudia usando los mismos conceptos establecidos en la ingeniería geotécnica. Oweis (1993) lista los siguientes factores como aquellos que influyen principalmente en la estabilidad de los depósitos controlados:

- Propiedades de los suelos de cimentación.
- Propiedades de resistencia de los residuos sólidos.
- Inclinação de los taludes.
- Niveles de lixiviados y flujo dentro del relleno.
- Tipo de cobertura.
- Resistencia de la cobertura a la erosión.

Los accidentes en vertederos debidos a problemas geotécnicos pueden estar originados por multitud de causas, o bien, de interacciones entre ellas. Por ejemplo: acumulación de lixiviados, combinación de inclinación y altura excesivas en el talud, formación de bolsas de biogás, mala compactación de los residuos, pendiente excesiva en el terreno subyacente y otras muchas causas. Las consecuencias de dichos accidentes pueden ocasionar problemas sanitarios, considerables impactos ambientales e incluso daño a las propiedades o personas.

En muchos casos los accidentes son debidos a la mala gestión de los residuos. Sin embargo la causa de un número importante de ellos ha sido el desconocimiento de las propiedades mecánicas de los residuos y de su evolución en el tiempo. En la actualidad existe una cantidad creciente de investigaciones y estudios experimentales, que aportan datos sobre las propiedades físicas y geotécnicas de los RSU.

Los métodos de análisis de estabilidad son muy diversos, y la mayoría se basan en comparar las fuerzas que favorecen el movimiento de la masa de materiales a través de una hipotética superficie de falla y las fuerzas resistentes estabilizadoras. Los cálculos se simplifican considerando secciones transversales, sin tener en cuenta fuerzas resistentes que actúan en los extremos de la masa en movimiento. Es decir, que la mayoría de estos cálculos tienen en cuenta la deformación plana pero no la tensión tridimensional.

El factor de seguridad viene dado por:

$$FS = \frac{S}{T}$$

Donde:

- FS: factor de seguridad.
- S: Fuerza estabilizadora resistente sobre la superficie de falla. Está compuesta por las fuerzas de cohesión y rozamiento interno del material.
- T: Fuerzas desestabilizadoras. Se identifican con la componente tangencial de las cargas sobre la superficie de falla.

Estos estudios se suelen plantear como un problema de equilibrio límite, y en éstos resulta necesario seleccionar varias superficies de falla hasta llegar a la más crítica para el talud considerado, que será la que dé un menor coeficiente de seguridad. Los datos básicos para

un análisis de estabilidad son, además de la densidad del material dispuesto, la cohesión y el ángulo de fricción interna.

En las evaluaciones realizadas a rellenos sanitarios, las hipótesis de partida han sido: determinar la geometría del relleno sanitario, asumir una condición homogénea del material del relleno, comprobar la situación del nivel piezométrico al momento del análisis y una selección de diversos parámetros resistentes, obtenidos a través de experiencias internacionales, ensayos de penetración, de carga o back analysis, entre otros datos relevantes para la evaluación.

La adopción de parámetros resistentes compilados en la literatura constituye una práctica común en proyectos de construcción o ampliación de vertederos, si bien es un método cuestionable debido a la aplicación de parámetros importados de otras localidades, hecho que subestima la importancia de las distintas características de composición, humedad, densidad, entre otras, que ejercen gran influencia en el comportamiento mecánico de los materiales realmente utilizados en el emplazamiento de que se trate.

1.4 MÉTODOS DE CÁLCULO

Los métodos de cálculo para analizar la estabilidad de un talud se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Métodos de cálculo en tensión-deformación. Consideran en el cálculo las deformaciones del terreno que se producen como resultado de las tensiones aplicadas. En su aplicación práctica el problema debe estudiarse empleando el método de los elementos finitos u otros métodos numéricos.
- Métodos de equilibrio límite. Se basan 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 del fallo la resistencia al corte se moviliza simultáneamente a lo largo de la superficie de corte.

En lo referente al método de equilibrio límite, en la mayor parte de los casos la geometría de la superficie de rotura no permite obtener una solución exacta del problema mediante la única aplicación de las ecuaciones de la estática. El problema es hiperestático y ha de hacerse alguna simplificación o hipótesis previa que permita su resolución.

Se puede distinguir aquí entre los métodos que consideran el equilibrio global de la masa deslizando, hoy prácticamente en desuso, y los métodos de dovelas (fajas) que consideran a la masa deslizando dividida en una serie de fajas verticales. En el primer caso la hipótesis previa suele hacerse respecto a la distribución de tensiones normales en la superficie de deslizamiento. Tal es el caso del método de círculo de fricción o de rozamiento. En los métodos de dovelas dicha distribución no es un dato del problema sino un resultado de su resolución. Las hipótesis previas se refieren generalmente a las fuerzas laterales entre las dovelas y existe una gran variedad de métodos que consideran diferentes hipótesis, tal y como se desarrolla en la siguiente sección.

1.4.1 Método de dovelas

Los métodos de dovelas consideran el problema bidimensional por lo que la estabilidad del talud se analiza en una sección transversal del mismo. La zona de terreno potencialmente deslizando se divide en una serie de fajas verticales estudiándose el equilibrio de cada una de ellas.

La gran utilización que tienen actualmente los métodos de dovelas se debe a que se pueden aplicar a una gran generalidad de problemas con un grado razonable de exactitud en la gran mayoría de los casos. Permiten considerar la acción de presiones intersticiales, la existencia de cargas externas actuando sobre el talud, la existencia de materiales de diferentes características y, en muchos casos, son aplicables a superficies de rotura de cualquier forma. Los métodos de dovelas pueden clasificarse en dos grupos:

- Métodos aproximados. No cumplen todas las ecuaciones de la estática. Se pueden citar como ejemplos los métodos de Fellenius, Janbu y Bishop simplificado.
- Métodos precisos o completos. Cumplen todas las ecuaciones de la estática. Los más conocidos son los métodos de Morgenstern-Price, Spencer y Bishop riguroso.

1.4.2 Planteamiento del problema

En la figura 1.1 se puede ver una dovela con el sistema de fuerzas que sobre ella actúa. En el supuesto que existan n dovelas, el número de incógnitas que aparece es:

n : valores de las fuerzas N en las bases de las dovelas.

$n-1$: valores de las fuerzas tangenciales X en las caras laterales de las dovelas.

$n-1$: valores de las fuerzas normales E en las caras laterales de las dovelas.

$n-1$: valores de b que definen los puntos de aplicación de estas últimas.

l: valor del factor de seguridad FS.

En total para un problema determinado se tienen $4n-2$ incógnitas. Por otra parte, el número de ecuaciones de equilibrio de fuerzas y momentos es $3n$, así que el problema está estáticamente indeterminado pues hay $n-2$ incógnitas más que ecuaciones. Para llegar a su resolución se puede incrementar el número de ecuaciones posibles, o bien disminuir el número de incógnitas mediante la realización de diferentes hipótesis.

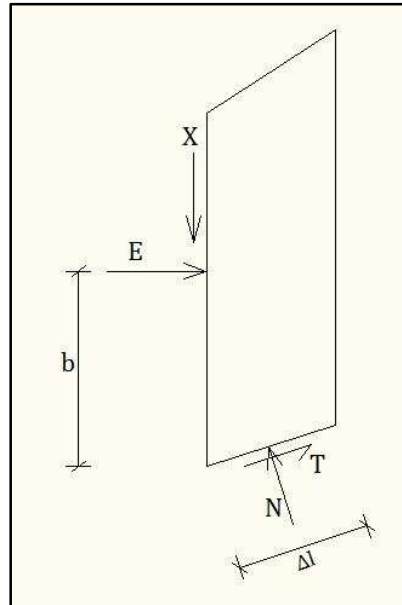


Figura 1.1: Sistema de fuerzas actuantes sobre una dovela.

Los llamados métodos aproximados realizan alguna hipótesis que elimina $n-1$ incógnitas del problema. Las hipótesis se hacen sobre la dirección o posición de los empujes laterales entre dovelas. El problema pasa a estar sobredeterminado y no se cumplirán todas las ecuaciones de equilibrio. Los principales métodos aproximados son:

- Método ordinario de Fellenius (1927). Se basa en la suposición de que la resultante de las fuerzas laterales en las caras de las rebanadas actúa paralelamente a la base de las mismas. Sólo satisface el equilibrio de momentos. Es de aplicación a superficies de rotura circulares.
- Método de Janbu (1954). Supone conocidos los $n-1$ valores de b , posiciones de los empujes normales a las caras de las dovelas. Es de aplicación a líneas de rotura cualesquiera. No cumple el equilibrio de momentos y sí el de fuerzas.
- Método simplificado de Bishop (1955). Supone que las fuerzas en las caras laterales son horizontales o, lo que es lo mismo, que los $n-1$ valores de X son nulos.

Sólo satisface el equilibrio de momentos y no el de fuerzas horizontales. Es un método de aplicación a líneas de rotura circulares.

Los llamados métodos precisos hacen la hipótesis de que los $n-1$ valores de las fuerzas tangenciales siguen una ley general que depende de un nuevo parámetro, introduciéndose así una nueva incógnita que completa el problema. La elección de la ley mencionada es la principal dificultad de los métodos precisos. Entre los principales métodos precisos tenemos por ejemplo:

- Método de Morgenstern-Price (1965). Es un método de aplicación a líneas de rotura cualesquiera. Se basa en la suposición de que la relación entre las fuerzas tangenciales y normales en las caras laterales de las dovelas se ajusta a una función, que es preciso definir previamente, multiplicada por un parámetro. Este parámetro es la incógnita que completa el problema. El método satisface todas las ecuaciones de equilibrio.

2 PROPIEDADES DE LOS RSU

2.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

En general, para la determinación de las propiedades de los RSU, se utilizan conceptos desarrollados para estudiar el comportamiento mecánico de los suelos. Tal consideración tiende a presentar una gran dispersión de los parámetros, y hasta inconsistencias, debido a que son varias las diferencias entre estos dos materiales.

Las principales propiedades físicas de los RSU incluyen el contenido de humedad, composición, peso específico, entre otros, y serán comentadas a continuación además de sus implicaciones en las propiedades mecánicas de los mismos.

2.1.1 Composición física de los RSU

Así como en los suelos, en los residuos sólidos como material conjunto, 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. El principal factor para la determinación del comportamiento de los rellenos de RSU es el conocimiento de las interacciones existentes entre las tres fases y las alteraciones de éstas con el tiempo (Carvalho, 1999).

La composición de los residuos sólidos urbanos 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. La tabla 2.1 presenta valores medios de la variación de composición para diferentes ciudades.

RSU	Bangkok Tailandia	Pekín China	New York USA	Estambul Turquía	Atenas Grecia	Cochabamba Bolivia	São Paulo Brasil
Metal	1	1	5	2	4	1	5
Papel	25	5	22	10	19	2	14
Plástico	-	1	-	3	7	3	14
Caucho, cuero y madera	7	1	3	6	4	1	7
Textiles	3	-	-	3	-	-	3
Materia orgánica	44	45	20	61	59	71	51
Vidrio	1	1	6	1	2	1	1
Otros	19	46	44	14	5	21	5

Tabla 2.1: Composición en porcentaje de peso para distintas ciudades (Carvalho, 1999)

Inicialmente, existe un mayor contenido de componentes sólidos. El proceso de degradación biológica transforma la materia orgánica sólida inicial en una cantidad considerable de gases y líquidos. Estas alteraciones dependen del contenido de humedad y de las condiciones climáticas locales, especialmente de la temperatura.

Según Grisolia & Napoleoni (1996) la fase sólida de los RSU puede clasificarse en tres tipos: los materiales orgánicos, los materiales inertes estables y los inertes deformables. La parte orgánica (restos de alimentos, papeles, podas) es susceptible a la biodegradación y es la mayor responsable de las transiciones de fases en un relleno. El material inerte estable (vidrios, metales, residuos de construcción e demoliciones, suelo, entre otros) tiene un comportamiento mecánico semejante a los suelos granulares y le confieren resistencia a la fricción entre partículas. Los plásticos, caucho y fibras textiles forman un grupo de materiales inertes que presentan alta deformabilidad cuando son sometidos a cargas; además, inciden en la humedad del material, debido a la capacidad que tienen de retener líquidos.

Las diferencias de naturaleza física y química de los RSU, así como los porcentajes en la composición gravimétrica de una región a otra, dificultan la elaboración de proyectos de vertederos controlados. En este sentido, Dixon & Langer (2006) proponen la creación de un sistema de clasificación específico para los RSU, de manera que se puedan agrupar materiales con similares propiedades mecánicas. Esta sistematización facilitará el intercambio de información e interpretaciones de las propiedades medidas.

Landva & Clark (1990) proponen una forma de clasificación de los elementos sólidos de los RSU para aplicaciones de ingeniería, dividiendo los mismos en cuatro grupos:

- OP (Orgánico Putrescible): incluye materiales que tienen tendencia a una rápida putrefacción, tales como alimentos, raíces, residuos de poda y jardinería, etc.
- ON (Orgánico No Putrescible): corresponde a los materiales de también origen orgánico, pero que necesitan un mayor tiempo para su completa degradación. Ejemplos: caucho, cuero, papeles, tintas, plásticos, etc.
- ID (Inorgánicos Degradables): está formado básicamente por los metales.
- IN (Inorgánicos No Degradables): Corresponde a los materiales inertes que poseen muy bajo potencial de descomposición. Ejemplos: cerámicas, vidrios, suelos no orgánicos, escombros de construcción, etc.

Diversos autores afirman que la composición gravimétrica de los RSU refleja el nivel de renta de la población, y es de esperar que regiones más ricas generen un menor porcentaje en masa de material orgánico. Por otro lado, la generación de residuos de vidrio y plásticos en estas regiones es mayor.

Grisolia et al. (1995) presenta un diagrama de valores de la composición gravimétrica para distintos países y regiones (Figura 2.1).

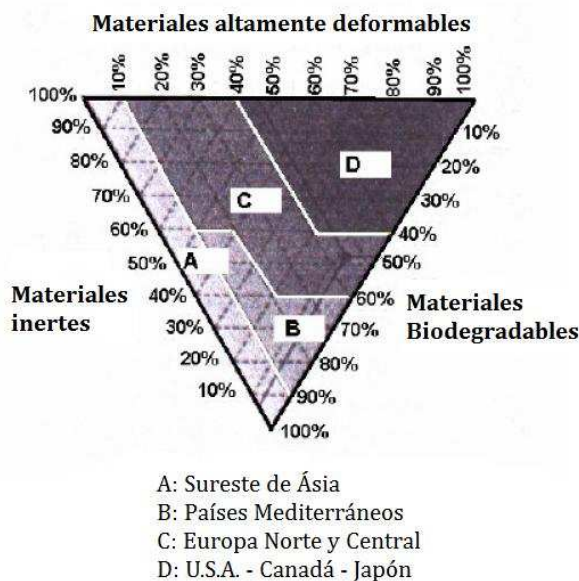


Figura 2.1: Diagrama triangular del origen de RSU (Grisolia et al. 1999)

El conocimiento de la composición física de los residuos es de fundamental importancia ya que condiciona el comportamiento global del vertedero. El porcentaje de materia orgánica está directamente vinculado al contenido de humedad, a la permeabilidad y al peso específico de los RSU (de Lamare Neto, 2004). Plásticos, textiles, cuero, caucho entre otros materiales 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 equivalente”. En cambio, la presencia de materiales inertes y dimensionalmente estables como escombros, proporcionan a los RSU resistencia a la fricción entre partículas.

La tabla 2.2 presenta los porcentajes típicos de constitución de los residuos sólidos según Sowers (1973).

Material	Porcentaje (en peso)
Residuos orgánicos	10 - 20
Papel, textiles	10 - 40
Residuos de poda	10 - 20
Plásticos	1 - 2
Instrumentos de metal	5 - 15
Metal macizo	1
Caucho	5 - 10
Vidrio	5 - 15
Madera	0 - 5
Escombros	0 - 10
Cenizas y escoria	0 - 5

Tabla 2.2: Porcentajes típicos de componentes de los RSU (Sowers, 1973)

2.1.2 Humedad

El contenido de humedad de los RSU depende de la composición inicial del material, las condiciones climáticas locales, el proceso de operación del vertedero, la tasa de descomposición biológica, la capacidad y funcionamiento de los sistemas de recolección de lixiviados, y el sistema de recubrimiento (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. Estudiando el vertedero Bandeirantes, en Sao Paulo, Carvalho (1999) constató que el contenido de humedad puede variar mucho entre dos puntos distintos del relleno, por lo que recomienda la confección de perfiles de humedad versus profundidad.

También pueden ocurrir acumulaciones de humedad en los rellenos, debido a la presencia de materiales como plásticos, caucho, papeles, cartones, cueros, madera, entre otros, que retienen o bien, absorben líquidos en su estructura. Por este motivo, se recomienda también obtener muestras representativas para la determinación de la humedad en la masa de residuos.

Diversos autores proponen distintas maneras de obtener el contenido de humedad de las muestras de RSU. Generalmente, el contenido de humedad se obtiene en base a la relación entre las masas de agua y masa seca, sometiendo las muestras a un secado en estufa a 70°C como máximo. Temperaturas mayores a 70°C pueden acarrear la quema de materia orgánica, y la alteración del material ensayado.

Analizando los datos obtenidos en el vertedero de Bandeirantes (São Paulo), Carvalho (1999) verificó que a medida que los puntos de muestreo eran más profundos, mayores eran los contenidos de humedad obtenidos en las muestras. En cambio Coumolous et al. (1995), estudiando el vertedero de Atenas, comprobó que la concentración de fluidos disminuía con la profundidad.

La figura 2.2 presenta valores obtenidos por Henriques Pereira (2000) para el vertedero de Valdemingómez (Madrid). Se puede observar que los valores de humedad presentan gran dispersión, varían entre 13% y 70%, y no exhiben tendencia de aumento con la profundidad.

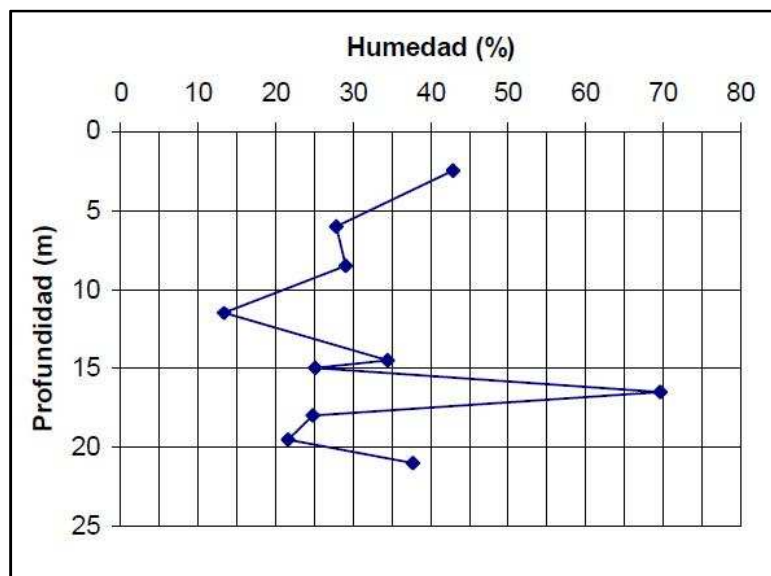


Figura 2.2 - Variación de humedad con relación a la profundidad (Henriques y Sopena, 2000).

La gran divergencia entre los distintos estudios se debe fundamentalmente a la variedad de factores que inciden en el contenido de humedad de los RSU. Este hecho dificulta el establecimiento de tendencias o reglas que definan la variación de humedad en vertederos. Si bien, existe una concordancia entre los distintos autores respecto a la importancia del contenido de humedad de los RSU en los procesos de descomposición de la fracción orgánica, y sus implicaciones en el comportamiento mecánico, principalmente en lo referente a asentamientos y resistencia al corte.

2.1.3 Peso específico

Una de las características determinantes en el análisis de estabilidad de un vertedero es el estado de tensiones debido al peso propio de los materiales que lo constituyen, por lo que se hace imprescindible el conocimiento del peso específico de los RSU. Este valor puede determinarse mediante la relación entre el peso y el volumen de la masa de residuos:

$$\gamma = \frac{P}{V}$$

Donde: P = Peso total de la muestra.

V = Volumen total de la muestra.

Así como en otras propiedades físicas, el peso específico de los RSU también varía en función de la composición, profundidad, grado de compactación y grado de descomposición de los mismos.

El grado de compactación del relleno tiene gran influencia sobre el valor del peso específico, debido a que los RSU están constituidos por materiales con un elevado índice de huecos y alta compresibilidad. Manassero et al. (1996) y König & Jessberger (1997) presentan valores de peso específico para diferentes grados de compactación que van desde 3 kN/m³ a 17 kN/m³.

Por otra parte, Fasset et al. (1994) verifican que las capas de residuos débilmente compactadas, cuando están situadas a profundidades entre 10 y 20 metros, adquieren un peso específico semejante a las capas inicialmente bien compactadas.

Weimer (1982), Kavazanjian et al. (1995) y König & Jessberger (1997), afirman que el peso específico de los RSU tiende a aumentar con la profundidad en los vertederos más antiguos como se observa en la figura 2.3, 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 debida a la sobrecarga impuesta por las capas superiores.

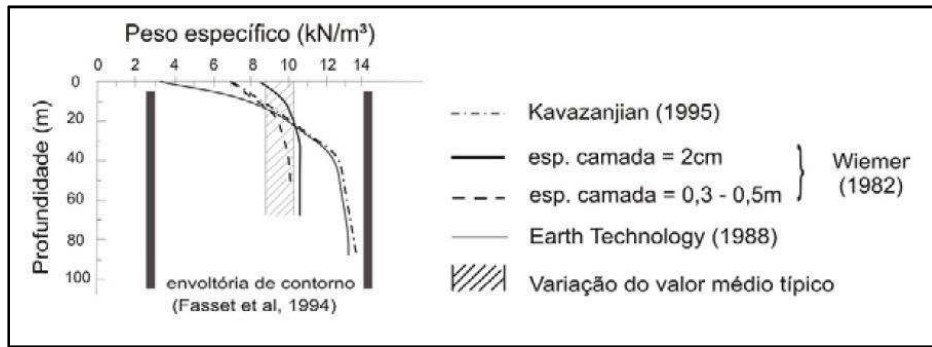


Figura 2.3 – Peso específico para RSU compactados (Kavazanjian, 1995; Fasset, 1994).

Una técnica bastante común en geotecnia para la determinación del peso específico in situ, consiste en la apertura de pozos o trincheras en el suelo estudiado, a partir del cual se obtiene el peso del material extraído. Seguidamente, se mide el volumen del hueco con el que se determina el peso específico mediante la relación entre peso y volumen.

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 m³ para la determinación del peso específico in situ, de manera que eliminen la influencia de la heterogeneidad del material.

En lo referente a la influencia del peso específico de los RSU en la resistencia al corte, Carvalho (1999) y Fucale (2005) concluyen que estas propiedades están relacionadas de manera directamente proporcional, o sea, para residuos con mayor peso específico, se esperan valores más significativos de la resistencia al corte.

2.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Aunque los RSU tienen un comportamiento mecánico similar al de los suelos de origen mineral, difieren de éstos en algunos aspectos. Los sólidos de los residuos son en un alto porcentaje biodegradables, lo cual hace que en un ambiente confinado como el de un vertedero, 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 resistencia y rigidez.

Knochenmus et al. (1998) define que las principales propiedades mecánicas a ser consideradas para el estudio de estabilidad de taludes en vertederos son la compresibilidad y la resistencia al corte. Estas propiedades sufren influencias de las variaciones que ocurren en el relleno en función de la descomposición, edad del material, sistema de drenaje, entre otros.

Fucale (2005) afirma que la interpretación de los resultados de ensayos con RSU está sujeta a incertidumbres debido a la falta de un modelo conceptual de referencia del comportamiento mecánico de este material.

2.2.1 Compresibilidad

La compresibilidad de los RSU es un factor importante para la previsión de movimientos en un vertedero controlado. La cuantificación de la deformabilidad del relleno permite mejorar las estimaciones de la vida útil, mediante la posibilidad de calcular la capacidad volumétrica adicional que generan los asentamientos.

El residuo depositado se transforma debido a la acción integrada de procesos físico-químicos y biológicos. La materia orgánica sólida, sufre una acción microbiológica que provoca su transformación en una gran cantidad de gases. Gandolla et al. (1994) afirman que aproximadamente el 25% de la masa total del depósito se transforma en biogás.

Parte de la masa de gas generada queda retenida en el relleno formando una estructura meta-estable. Las cargas estáticas (peso de las capas superiores) o dinámicas (vibraciones), juntamente con la percolación de fluidos, ocasionan el colapso de la estructura porosa y consecuentemente la reducción del volumen total.

La fase líquida generada por la degradación biológica de materia orgánica, también contribuye a la reducción del volumen del relleno. La conversión de material sólido a líquido y su posterior infiltración en el interior de la masa de residuos, provoca un aumento en la porosidad de los RSU.

Grisolia & Napoleoni (1996) afirman que alrededor del 90 % del asentamiento total esperado ocurre en los diez primeros años luego de la clausura del vertedero. Gandolla et al. (1994), confirman tales afirmaciones con ensayos realizados en celdas experimentales de 3 metros de altura.

Sowers (1973) desarrolló estudios sobre la compresibilidad de los RSU y el modelo que la rige. De manera semejante a la teoría de la consolidación unidimensional de Terzaghi, utilizada en mecánica de suelos, los asentamientos en los RSU pueden dividirse en tres etapas:

- Compresión inicial: está relacionada con la sobrecarga inicial debido al reacomodamiento del material y los procesos de compactación. Ocurre inmediatamente después de la aplicación de la sobrecarga.
- Compresión primaria: esta etapa de compresión de los RSU está relacionada con la reducción de volumen del relleno debido al drenaje de los líquidos presentes en el material.
- Compresión secundaria: El mecanismo que rige esta etapa se basa en los procesos de degradación que se desarrollan en el interior del relleno.

La magnitud de los asentamientos en vertederos, en función a las sollicitaciones mecánicas (compresión inicial y primaria), puede determinarse con la expresión utilizada en la ingeniería geotécnica para suelos normalmente consolidados:

$$\Delta H_1 = \frac{H_0}{(1 + e_0)} \cdot C_c \cdot \text{Log} \frac{\sigma'_{v0} + \Delta \sigma_v}{\sigma'_{v0}}$$

Donde,

ΔH_1 = asiento de la capa de espesor H_0

e_0 = índice de poros inicial

C_c = índice de compresión

σ'_{v0} = presión efectiva inicial

$\Delta \sigma_v$ = sobrecarga efectiva

Sowers (1973) afirma que los asentamientos generados por sollicitaciones mecánicas ocurren en un breve periodo de tiempo (uno a dos meses después de la aplicación de la carga), pues la alta permeabilidad de los RSU no permite la aparición de valores elevados de presión de poros.

Se considera teóricamente que una vez concluida la primera fase de asentamientos, se inicia la compresión secundaria del material, que realmente se produce con la acción combinada de la compresión mecánica y las alteraciones físico-químicas y biológicas del residuo. Para determinar la magnitud de los asentamientos, este autor propone la siguiente expresión:

$$\Delta H_2 = \frac{H_o}{(1 + e_o)} \cdot C\alpha \cdot \text{Log} \frac{t + \Delta t}{t}$$

Donde,

ΔH_2 = asiento de la capa de espesor H_o

e_o = índice de poros inicial

$C\alpha$ = índice de compresión secundaria

t = tiempo necesario para producir la compresión primaria

$t+\Delta t$ = tiempo de estimación de asientos

El coeficiente $C\alpha$ está relacionado con el índice de poros inicial del proceso, así como con las condiciones de la biodegradación. 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_o , 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.

2.2.2 Resistencia al corte

Las evaluaciones de estabilidad de taludes en vertederos demandan el conocimiento de los diagramas de 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. Los parámetros como el ángulo de fricción y la cohesión son normalmente utilizados y determinados según el criterio de rotura de Mohr-Coulomb. 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.

Las principales propiedades mecánicas de los RSU están fuertemente influenciadas por la composición y el estado de alteración del mismo, así como por el comportamiento mecánico de cada componente (Knochenmus et al. 1998). Con relación a las propiedades de resistencia, los RSU presentan un comportamiento bastante peculiar que lo distingue de otros materiales geotécnicos, pues la curva tensión-deformación no presenta pico de rotura, incluso para grandes deformaciones (König & Jessberger, 1997).

Kockel (1995) propone un modelo de composición matricial de los RSU (figura 2.4). Este modelo considera que 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, papeles, textiles, etc.) resistentes a la tracción. 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.

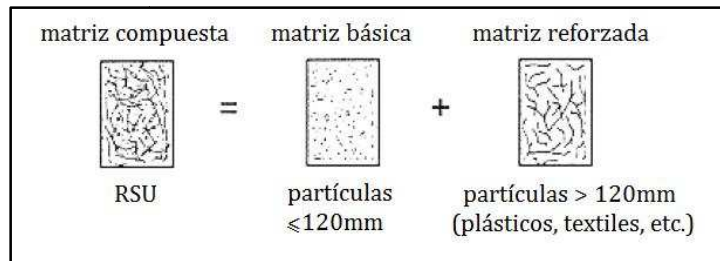


Figura 2.4 – Modelo esquemático de la composición de los RSU (König & Jessberger 1997)

Kockel & Jessberger (1997) mostraron que la resistencia al corte de la matriz básica sólo se moviliza a altas deformaciones. El valor de la cohesión está particularmente relacionado con la matriz reforzada y se puede definir como una cohesión debida 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.

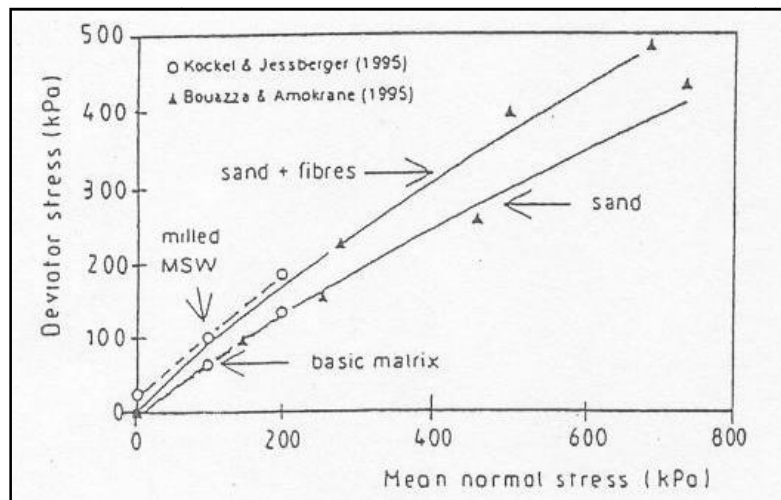


Figura 2.5: Envolvente de rotura (Kockel & Jessberger, 1995)

La figura 2.5 presenta resultados de ensayos realizados por estos autores con residuos compuestos por únicamente por “matriz básica” y por “matriz reforzada”. De estos resultados se pueden deducir las siguientes ideas:

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

Kölsch (1995) aporta conceptos análogos basados en los resultados obtenidos por ensayos de corte y triaxial, llevados a cabo con residuos sólidos. Este autor considera que los materiales fibrosos (plásticos, textiles, etc.) 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, en la resistencia al corte se pueden considerar dos componentes de magnitud variable: 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 equivalente.

La figura 2.6 ilustra la interacción entre estas dos componentes, representada en una curva esfuerzo-deformacional, mostrando que para pequeñas deformaciones (Fase I) existe apenas una movilización de las fuerzas de fricción. 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.

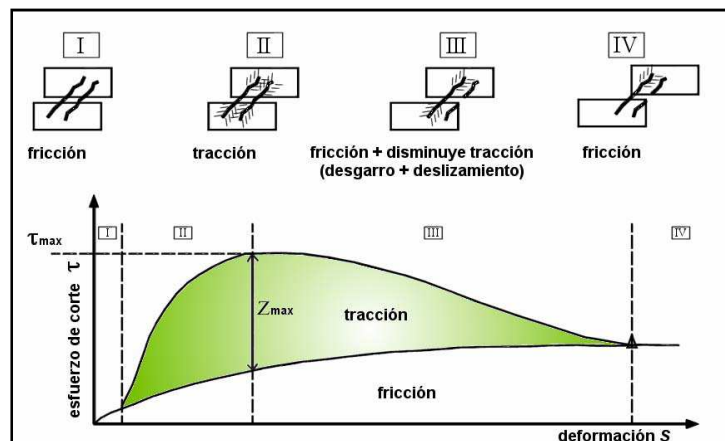


Figura 2.6: Comportamiento de los residuos bajo ensayos de corte, modelo de interacción entre las fuerzas de fricción y tracción (Kölsch, 1995)

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.

En la figura 2.7 podemos ver que existe un nivel de tensión normal (σ_1) a partir del cual hay una inflexión ascendente de la envolvente de resistencia. Tal alteración se debe a la movilización de la resistencia a la tracción impuesta por las fibras presentes en los RSU. Los valores de resistencia al corte aumentan hasta un nivel de tensión (σ_2), correspondiente a la resistencia a la tracción de las fibras y/o ruptura del “anclaje” de las mismas. A continuación, se verifica otra inflexión, ahora descendente en la curva, proveniente de la disminución de la influencia de las fibras en la resistencia al corte (σ_3) hasta que el comportamiento friccional pase a regular el mecanismo de rotura del material (σ_4).

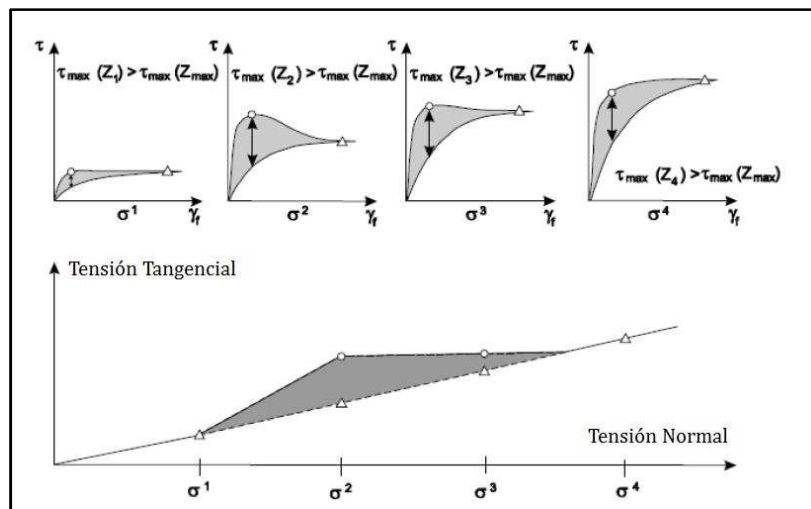


Figura 2.7: Contribución de las componentes de fricción y cohesión equivalente en función de la variación de la tensión normal (Kölsch, 1993)

Grisolia et al. (1995) presentan variaciones de los parámetros de resistencia de los RSU en función de los niveles de deformaciones axiales, como podemos observar en la figura 2.8. Inicialmente predomina el efecto friccional en el comportamiento resistente del material.

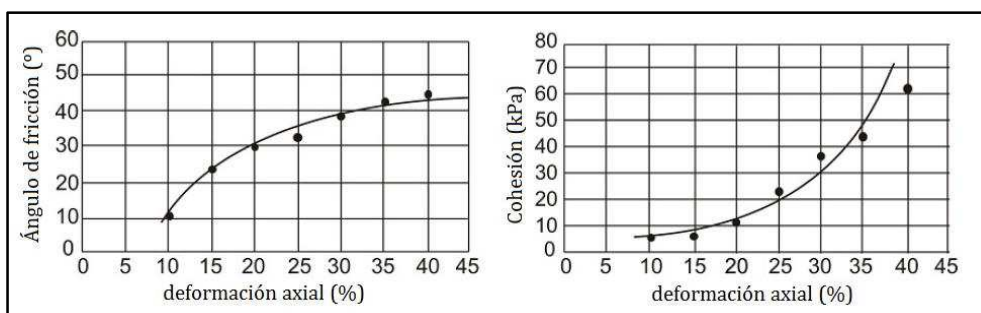


Figura 2.8: Parámetros de resistencia en función de las deformaciones (Grisolia et al. 1995)

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%.

2.2.3 Ensayos de corte directo en laboratorio

En el estudio de las propiedades mecánicas de los RSU, el ensayo de corte directo en laboratorio ha sido comúnmente utilizado por diversos investigadores. Estos ensayos son realizados generalmente sobre muestras deformadas obtenidas en vertederos. König & Jessberger (1997) afirman que la mayor limitación en la realización de estos ensayos consiste en la dificultad de 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 en los ensayos.

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.

Landva et al. (1984), Landva & Clarck, (1987), determinaron parámetros de resistencia para residuos de distintas edades y constataron que las muestras presentan resistencias más bajas después de un año de descomposición. Según los autores, las mayores variaciones fueron observadas en los ángulos de fricción, que para el residuo nuevo presentaban valores de 38° a 42° y luego de un año pasaron a 33°. Una menor alteración fue verificada en la cohesión, pasando de valores iniciales entre 16 y 19 kPa a 16 kPa. Una posible explicación para estos fenómenos es el hecho de que parte del componente friccional es aportado por componentes biodegradables. Luego de un año, éstos tienen sus características alteradas, lo que no ocurre de manera significativa en los componentes fibrosos para el periodo de tiempo adoptado.

Turczynski (1988) citado por Fucale (2005), estudiando los efectos del envejecimiento en la resistencia de los RSU en vertederos, verificó disminuciones significativas en los parámetros de ángulo de fricción y cohesión en muestras ensayadas. La tabla 2.3 presenta los valores obtenidos por estos autores.

Edad (años)	ϕ (°)	c (kN/m ²)
0 (residuo nuevo)	38 - 40	40 - 50
3	35	15
5	32	12
14	26	10

Tabla 2.3 Parámetros de resistencia de RSU para distintas edades (Turczynski, 1988)

Generalmente, los resultados de ensayos de corte directo en laboratorio no presentan picos de resistencia en los gráficos de tensión-deformación, independientemente de las variaciones de composición, edad y estado de alteración. Por lo general, los gráficos presentan un aumento de la resistencia con el incremento de las deformaciones, como puede observarse en la figura 2.9.

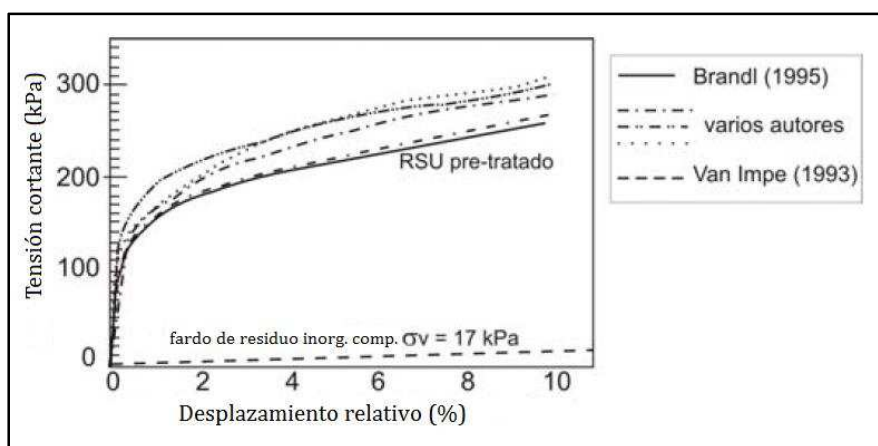


Figura 2.9 Relación tensión-deformación para ensayos de corte directo (Manassero, 1988)

Debido a la no observación de picos de resistencia y los registros de grandes deformaciones en los ensayos de RSU (corte directo y compresión triaxial), diversos autores han determinado parámetros resistentes en función de los niveles de deformación considerados admisibles. Fucale (2005) entiende que tales parámetros no sirven como indicadores absolutos de resistencia, sino que se refieren simplemente a una condición específica de deformación.

Generalmente, para la determinación de parámetros de resistencia de RSU, se han considerado niveles de deformación entre 10% y 15%; excepcionalmente existen datos referidos a deformaciones de 20%. Landva & Clark (1990) realizaron ensayos de corte directo en laboratorio, con muestras provenientes de vertederos de Canadá. Las dimensiones de la caja de corte eran de 287mm x 434mm, y la velocidad de deformación

era constante e igual a 1,5 mm/min. Los valores de ángulo de fricción encontrados varían entre 24° y 41°, y la cohesión entre 0 y 23 kPa.

Benson & Othman (1992) obtuvieron valores del ángulo de fricción y cohesión de 61° y 20 kPa respectivamente, para muestras de RSU compactadas con energía de compactación del tipo proctor modificado. Según los autores, la presencia de materiales como plástico, caucho y alambres influyeron en los resultados.

Edinçliler et al. (1996) realizaron ensayos de corte directo, utilizando muestras de un vertedero del estado de Wisconsin, Estados Unidos. Se utilizaron cajas cilíndricas de 300 mm de diámetro y muestras de distintas edades y de varios puntos del relleno. Los valores de c y ϕ medios encontrados fueron de 24 kPa y 41° respectivamente. Los autores resaltan el hecho de que incluso siendo utilizados muestras de diferentes edades y de distintos lugares del relleno, los parámetros de resistencia medidos no presentan diferencias significativas.

Caicedo et al. (2002), luego de un gran deslizamiento ocurrido en el vertedero Doña Juana en Bogotá, Colombia, desarrollaron una campaña de investigación para la determinación de las condiciones en que se dio el deslizamiento y sus causas. El estudio contemplaba ensayos de corte directo y ensayos de compresión triaxial. El equipo de corte utilizó muestras con dimensiones de 300mm x 300mm x 200mm, obtenidas del lugar exacto donde ocurrió el deslizamiento. Los valores presentados como resultado de la campaña de ensayos de corte directo son 24° para el ángulo de fricción y 26 kPa para la cohesión.

Van Impe & Bouazza (1998) realizaron una investigación de la resistencia al corte de RSU analizando la interacción entre el ángulo de fricción y la deformación, bajo tensión normal constante. Los autores confirmaron la dependencia que provocan los desplazamientos de corte en la resistencia de los RSU. Los valores obtenidos para el ángulo de fricción oscilan entre 19° y 38° para desplazamientos de 65mm y 130mm respectivamente.

Fucale (2005) estudió la influencia de los componentes de refuerzo en la resistencia al corte de los RSU, realizando ensayos de corte directo. Las muestras procedentes de los vertederos de Ihlenberg y de Buchen (Alemania), fueron preparadas de acuerdo al porcentaje de fibras en su composición. Los resultados obtenidos para deformaciones de 20% presentan para la matriz básica valores del ángulo de fricción de 42,5° y cohesión de 29,7 kN/m². Las muestras que recibieron una adición de 3% de fibras en su composición, mostraron valores de 46° y 30 kN/m² respectivamente.

2.2.4 Ensayos triaxiales

Así como en los ensayos de corte directo, los resultados obtenidos en ensayos triaxiales demuestran 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 adoptados.

König & Jessberger (1997) realizaron ensayos de compresión triaxial en residuos de edades entre 9 meses y 20 años, con la finalidad de evaluar la influencia del tiempo de disposición de los residuos en la resistencia. En la figura 2.10 puede notarse la variación de los parámetros con las deformaciones.

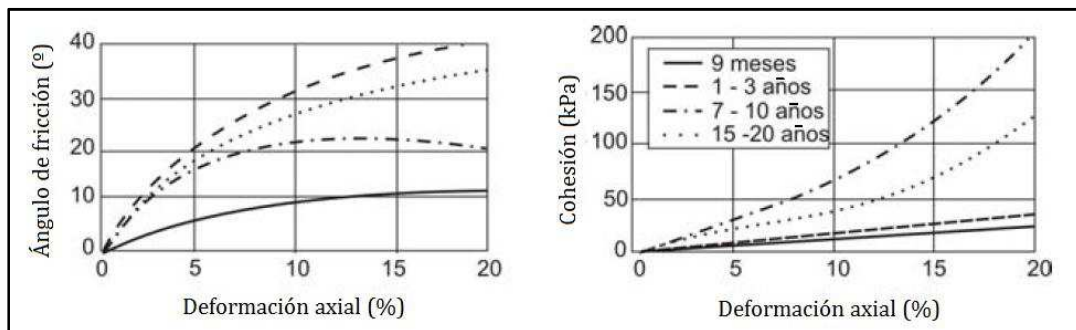


Figura 2.10 Movilización de los parámetros de resistencia de RSU de distintas edades a partir de ensayos triaxiales (König & Jessberger, 1997)

Según los autores, no hay evidencias claras de que la resistencia haya sido afectada por las edades de las muestras. Además, agregan que el valor límite para el ángulo de fricción se moviliza generalmente para deformaciones axiales menores que 20%, y no se observan valores límite para la cohesión.

Si bien no hay datos concluyentes con respecto a las variaciones de resistencia en función de la edad del residuo, Walter (1992) citado por Gonzalez (1995), presenta una evaluación cualitativa del comportamiento de resistencia y densidad en función del tiempo de vertido, como se muestra en la figura 2.11.

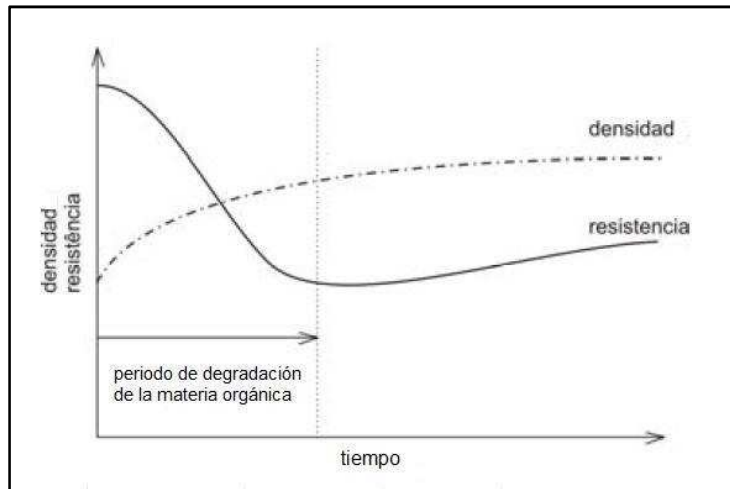


Figura 2.11 Propuesta de Walter (1992)

Grisolia et al. (1995) realizaron ensayos triaxiales en muestras de RSU fabricadas en laboratorio y compactadas manualmente. Los ensayos contemplaban tres tensiones de confinamiento (50, 100 y 300 kPa) y las curvas de tensión-deformación obtenidas se presentan en la figura 2.12. Para valores elevados de deformación, las curvas presentan inflexión ascendente, que según Manassero et al (1996) y Knochenmus et al (1998) sugiere una rigidización del material.

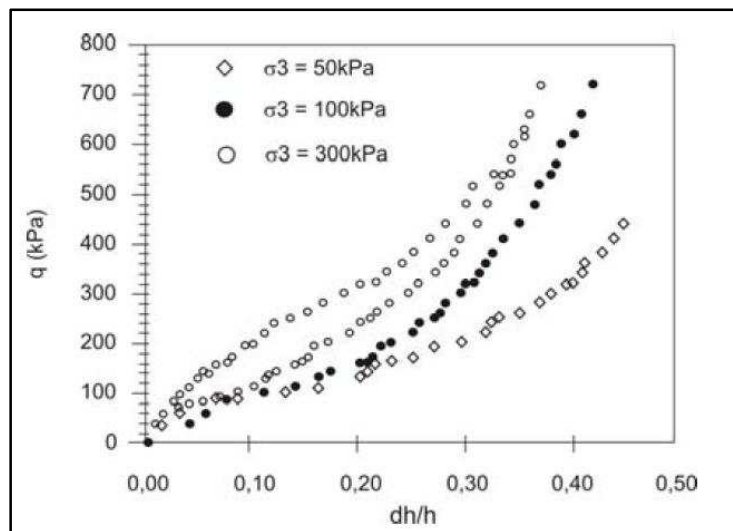


Figura 2.12 Curvas tensión-deformación obtenidas en ensayos triaxiales (Grisolia et al. 1995)

Carvalho (1999) realizó ensayos consolidados drenados (CD) y consolidados no drenados (CU) en muestras de dimensiones 150mm x 300mm y 200mm x 400mm (diámetro x altura) obtenidas del vertedero Bandeirantes (São Paulo).

Se constató que los RSU se rigidizan con el aumento de las deformaciones. En los ensayos tipo CD, los parámetros de resistencia obtenidos para las probetas de 150mm x 300mm y una deformación de 20%, son $\phi = 27^\circ$ y C entre 42 y 55 kPa. Para las probetas de 200mm x 400mm el ángulo de fricción encontrado fue de 21° y la cohesión entre 45 y 60 kPa (figura 2.14).

Carvalho (1999) agrega que las diferencias de dimensiones de los cuerpos de prueba pueden influir en los resultados, debido a que las muestras de menor dimensión presentaron resultados hasta 40% mayores que los encontrados en muestras de mayor dimensión. Los ensayos CU realizados revelaron que las tensiones siguen la misma tendencia presentada en los ensayos tipo CD, o sea, aumentan continuamente con el incremento de las deformaciones axiales.

Caicedo et al. (2002) realizaron ensayos CU con medición de presión de poros en muestras del vertedero Doña Juana, en Bogotá, Colombia. Los resultados típicos de los ensayos se presentan en la figura 2.13. Los niveles de deformación adoptados son menores que 15% y las muestras no presentan pico de ruptura.

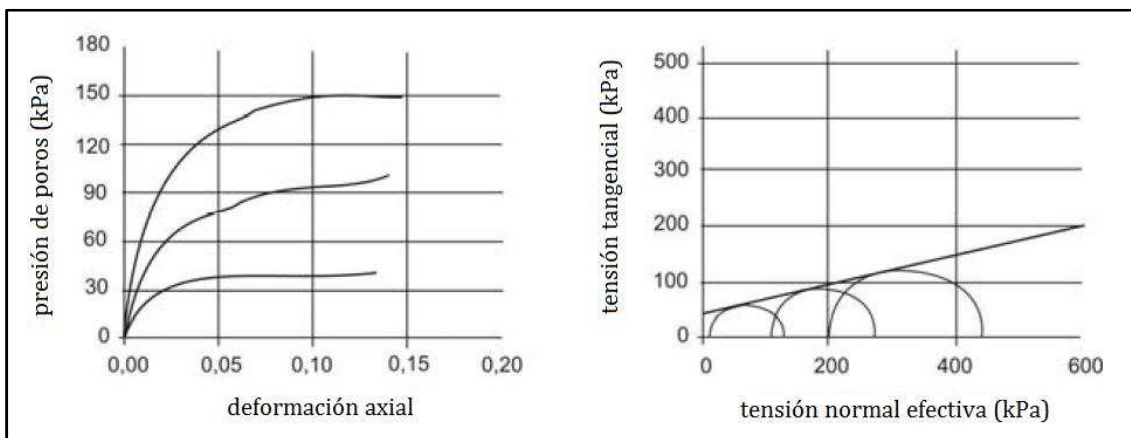


Figura 2.13 Resultados típicos de los ensayos triaxiales tipo CU en muestras del vertedero Doña Juana, Bogotá (Caicedo et al. 2002)

2.2.5 Investigaciones de campo y retro-análisis de datos

Ensayos de corte directo in situ de grandes dimensiones han sido desarrollados a fin de determinar parámetros de resistencia al corte de los RSU. Varios autores presentan resultados para estos ensayos. Generalmente, se observa una gran franja de variación debido a las diferentes características y composiciones de los RSU, al formato de las cajas de corte, las dimensiones adoptadas, las tensiones normales aplicadas, entre otras causas.

En la literatura técnica también podemos encontrar tentativas de estimar valores de los parámetros de resistencia, a través de correlaciones con resultados de ensayos de campo, tales como SPT, CPT y Vane Test.

La aplicabilidad de los ensayos tipo Vane Test es muy cuestionada, debido a que la composición y las condiciones de drenaje de los RSU comprometen la calidad de los resultados obtenidos por el equipo, que aporta mejores resultados para condición no drenada de materiales homogéneos.

La investigación tipo SPT es una técnica bastante criticada por el empirismo del tratamiento de los datos. La especificación de parámetros obtenidos a través de correlaciones entre el número de golpes y la resistencia al corte de los RSU tiene poco crédito, además, no existen publicaciones que comprueben la eficacia de tales relaciones. Tanto en los ensayos tipo SPT como en los ensayos CPT, los picos de resistencia a la penetración están referidos a la presencia de objetos rígidos, y los valores tienden a aumentar con la profundidad de la perforación.

Generalmente, la definición de parámetros de resistencia por retro análisis de datos de campo, se basa en ensayos de placas de carga o similares. Benvenuto & Cunha (1991) presentan resultados obtenidos en un deslizamiento ocurrido en el vertedero Bandeirantes, São Paulo. Los valores de ángulo de fricción se sitúan en torno a 22° y los valores de cohesión en 13,5 kPa.

Manassero et al. (1996) afirman que los resultados obtenidos por retro análisis no pueden ser obtenidos de manera precisa, debido a que la ecuación de la resistencia al corte, que es función de dos variables, puede resolverse por infinitos pares de combinaciones que satisfacen las condiciones de equilibrio. Los resultados obtenidos por retro análisis, según algunos autores, representan el contorno inferior de la resistencia de campo, siendo por lo tanto un método conservador de obtención de valores de resistencia.

2.2.6 Criterios de rotura para RSU

Desde que se iniciaron 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, de campo y por retro análisis. De esta manera, la resistencia al corte de los RSU es definida generalmente por el criterio de rotura de Mohr-Coulomb. Han sido encontrados valores para el ángulo de fricción entre 10° y 53°, y en lo referente a valores de la cohesión, oscilan entre 0 y 67 kPa (König & Jessberger, 1997).

La representación de resultados en diagramas cohesión versus ángulo de rozamiento se hizo muy usual, siendo Singh & Murphy (1990) los primeros en utilizar esta representación. La figura 2.14 presenta resultados de ensayos de laboratorio obtenidos por diversos autores.

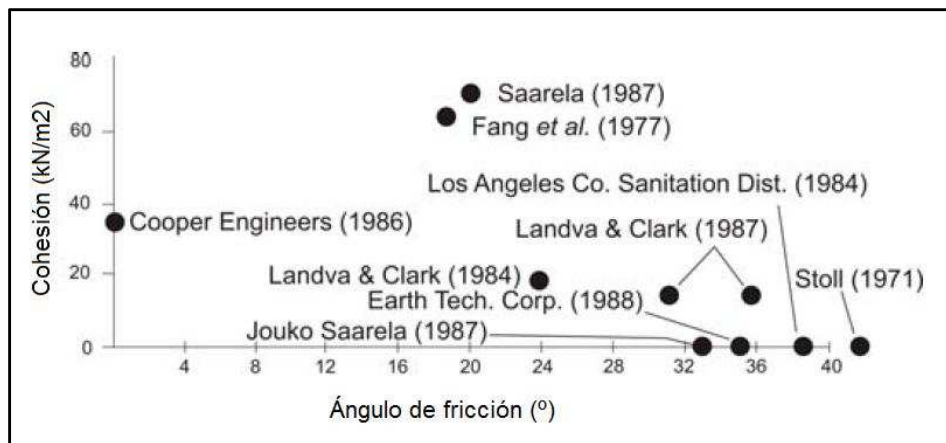


Figura 2.14 Parámetros de resistencia para ensayos de laboratorio (Singh & Murphy, 1990)

Basándose en datos de ensayos de laboratorio, campo y retro análisis disponibles hasta el momento, los referidos autores compilaron en un mismo diagrama estos resultados y plantearon un rango recomendado para la elaboración de proyectos (figura 2.15). Como puede observarse, hay una gran dispersión en los datos presentados.

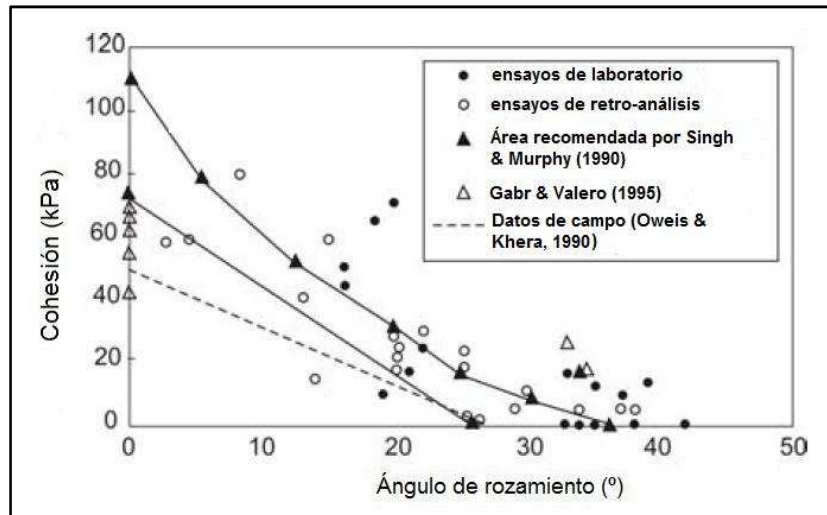


Figura 2.15 Diagrama cohesión-ángulo de rozamiento. Propuesta de franja recomendada para proyectos (Singh & Murphy, 1990)

Análogamente, Sanchez-Alciturri et al. (1993) construyeron un gráfico en el que han incluido datos de los siguientes autores: Singh & Murphy (1990), Jessberger (1990), Oweis & Khera (1990). Además incluyeron las líneas obtenidas por ellos mismos en el vertedero de Meruelo. Aunque hay una gran dispersión entre todos los valores recogidos, estos investigadores señalan unas ciertas tendencias:

- Los resultados de laboratorio indican en general que se moviliza una resistencia friccional importante estando la mayoría de los valores en el rango de $\phi = 25-35^\circ$. Por su parte, los valores de cohesión son muy variables aunque usualmente son menores de 30 kPa.
- Las líneas correspondientes a estudios de campo convergen para valores de ϕ mayores de 15° .
- En esta zona ($\phi > 15^\circ$) las líneas correspondientes a los estudios de campo coinciden con el límite inferior de los resultados de los ensayos de laboratorio.

Estas tendencias las han recogido en la figura 2.16. La obtención de parámetros para proyectos debe hacerse escogiendo un par de puntos dentro del área sombreada del gráfico. Sanchez-Alciturri et al. (1993), Manassero et al. (1996), König & Jessberger (1997), Knochenmus et al. (1998) advierten de los cuidados que deben tenerse en cuenta en la toma de datos de estos diagramas para su aplicación en proyectos.

Como se ha mencionado anteriormente, en éstos gráficos están compilados datos de ensayos diferentes, realizados con metodologías distintas, y muchas veces asumiendo condiciones que no reflejan las características reales de los residuos.

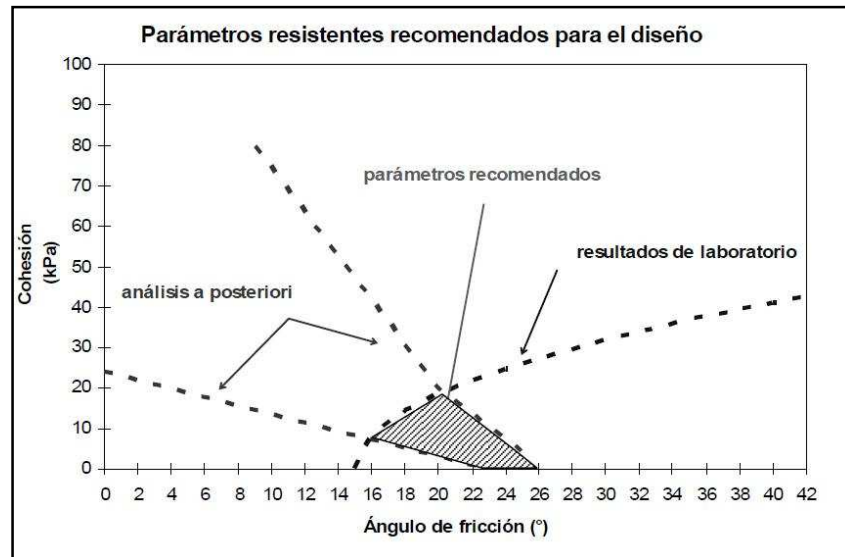


Figura 2.16: Valores recomendados por Sánchez Alciturri et al. (1993)

Por otra parte, el modelo de rotura bi-lineal que es característico de los suelos reforzados, también ha sido aplicado por diversos autores en el estudio de la resistencia de los residuos. De Lamare Neto (2004) defiende que este modelo encuentra gran aceptación debido a que permite determinar y describir las dos zonas de resistencia de los RSU por separado: para niveles bajos de deformación y para altos niveles de deformación.

El modelo bi-lineal ha sido adoptado por Kavazanjian et al (1995) para establecer un criterio de rotura basado en una recopilación de datos obtenidos por diversos autores y medios sobre un grupo de vertederos, especialmente de Estados Unidos. Los valores de partida varían entre 10° y 53° para el ángulo de rozamiento y entre 0 a 67 kPa para la cohesión. En el gráfico de la figura 2.17 se muestran los datos utilizados por estos autores y el criterio de rotura propuesto, que se traduce en los siguientes valores:

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

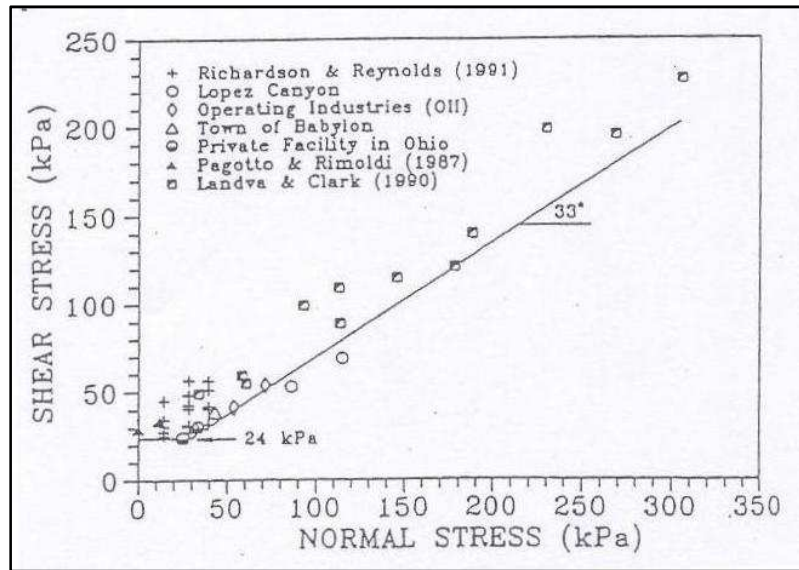


Figura 2.17: Recopilación realizada por Kavazanjian et al (1995)

Por su parte Geosyntec (1998), adoptó una envolvente similar para el análisis de estabilidad del vertedero Doña Juana en Bogotá (Colombia), pero con $c' = 19$ kPa; $\phi' = 28^\circ$ (Figura 2.18).

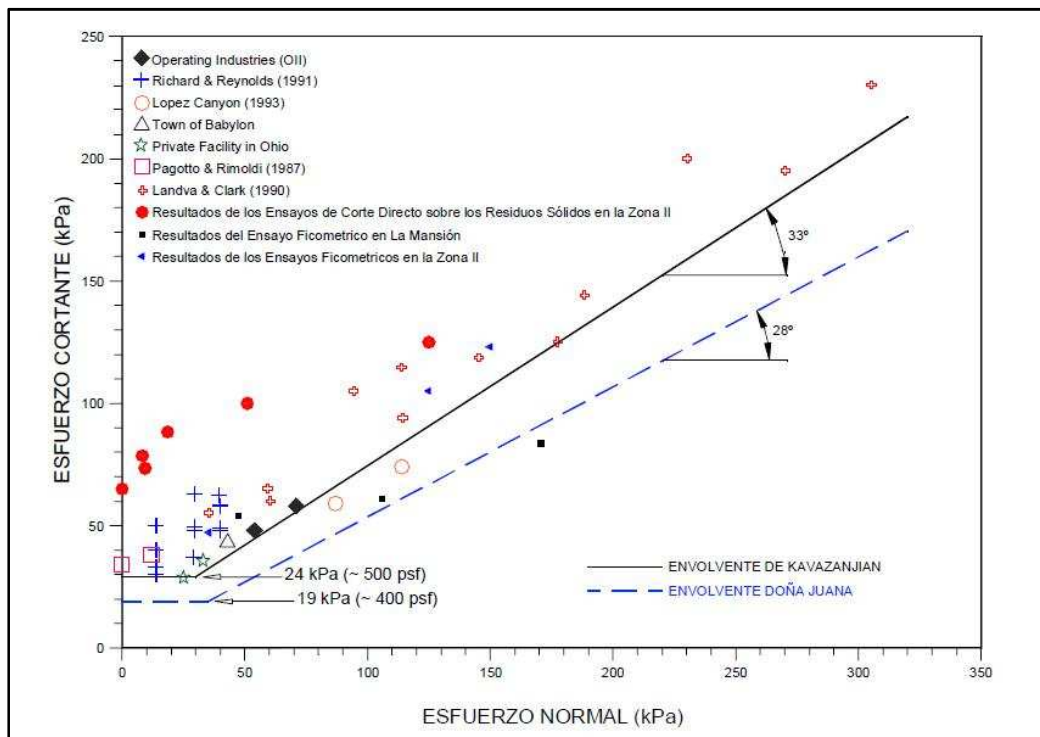


Figura 2.18: Envolvente de rotura del vertedero Doña Juana (Geosyntec, 1998)

Basándose en la proposición de Kavazanjian et al (1995) y en datos de varios autores recopilados en la figura 2.19, Manassero et al (1997) afirma que la propuesta admite una envolvente de rotura tri-lineal para los RSU, presentado en la figura 2.20, donde puede diferenciarse tres zonas en función de la tensión normal actuante:

- Zona A: correspondiente a las 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 las tensiones normales entre bajas y moderadas (20-60 kPa). En este caso se considera que la cohesión tiene un valor nulo y el ángulo de rozamiento es igual a 38°.
- Zona C: corresponde a las 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 rozamiento en torno a 30°.

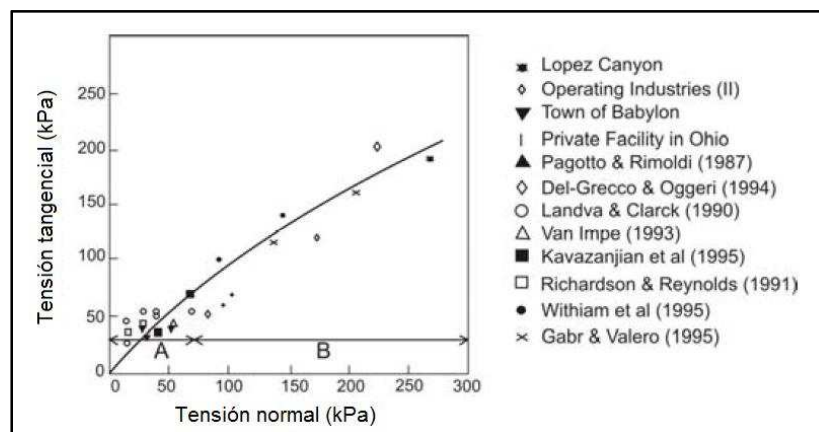


Figura 2.19: Datos de resistencia recopilados por Manassero et al (1997)

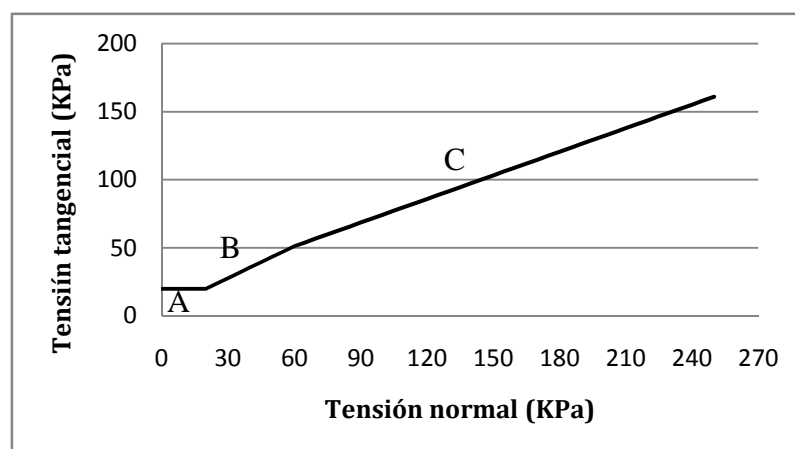


Figura 2.20: Criterio de rotura para RSU propuesto por Manassero et al (1997).

3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

3.1 METODOLOGÍA

El principal problema que se plantea al proyectar el talud de un vertedero, es hallar la máxima inclinación posible sin comprometer la estabilidad del relleno, de manera a aprovechar mejor el espacio disponible para la disposición de los RSU. Como se ha visto, las propiedades mecánicas de los residuos están fuertemente influenciadas por la composición, densidad, estado de alteración, entre otros, lo que dificulta la adopción de valores de diseño para la cohesión y ángulo de rozamiento efectivo en los estudios de estabilidad.

En el presente capítulo se plantea un análisis comparativo de los distintos criterios de rotura para RSU encontrados en la literatura, teniendo como referencia un talud de 20 metros de altura (figura 3.1).

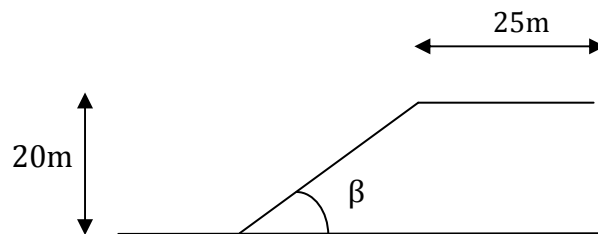


Figura 3.1: Talud de referencia

El estudio comprende la determinación de los factores de seguridad para cada envolvente de rotura, conservando las demás variables involucradas en el cálculo, como el peso específico, y las propiedades del material de la base. El único parámetro que distingue cada modelo es el criterio de rotura adoptado para los RSU.

El análisis abarca las propuestas de Kavazanjian (1995), Manassero (1997) y Sánchez-Alciturri (1993) y compara los factores de seguridad encontrados en cada caso. El método se empleó para distintos ángulos del talud, variando β entre 15° y 35° .

3.1.1 Cálculo de estabilidad

El análisis de estabilidad se realizó mediante el software GEO/SLOPEW. Este programa emplea el planteamiento de dovelas, y permite determinar el factor de seguridad con distintos métodos como el Bishop, Janbu, Fellenius y Morgenstern-Price.

Si bien la densidad de los RSU varía con la composición, grado de compactación, profundidad y grado de descomposición de los mismos, adoptamos un valor medio igual a $0,8 \text{ Tn/m}^3$ para el talud de referencia, a fin de simplificar los cálculos.

Para el suelo que soporta la masa de residuos se han elegido los siguientes valores:

- Cohesión: 30 kN/m^2
- Ángulo de rozamiento: 35°
- Densidad: 20 kN/m^3 .
- Espesor del estrato: 14 m .

3.1.2 Criterio de Sánchez-Alciturri et al (1993)

Estos autores proponen una envolvente de rotura lineal para los RSU. El gráfico de la figura 2.16 presenta una zona sombreada correspondiente a los valores de cohesión y ángulo de fricción recomendados. La obtención de parámetros para diseños debe hacerse escogiendo un punto dentro del área sombreada del gráfico.

Con el objeto de elegir valores en los límites del área recomendada, representamos la misma en el cuadrilátero formado por los puntos A, B, C y D de la figura 3.2. Dichos puntos corresponden a los parámetros mecánicos adoptados para el talud de referencia, además se tomaron puntos a lo largo del contorno del cuadrilátero (tabla 3.1).

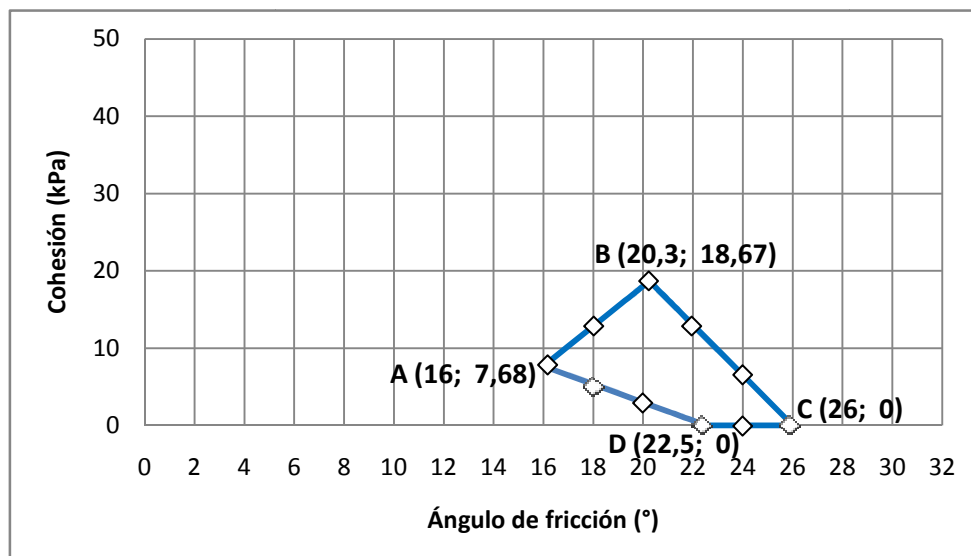


Figura 3.2: Parámetros para diseño

ϕ (°)	C (kPa)
16	7,68
18	5,33
20	2,98
22,5	0
24	0
26	0
18	12,85
20,3	18,67
22	12,99
24	6,49

Tabla 3.1: Parámetros mecánicos adoptados para los RSU

La figura 3.3 presenta el modelo empleado, en el cual se asume una condición homogénea del material del relleno. La zona de color amarillo corresponde a los RSU y la zona gris al material de la base. Las líneas rojas en el pie y en la zona superior del talud limitan la zona de entrada y salida de la superficie de falla.

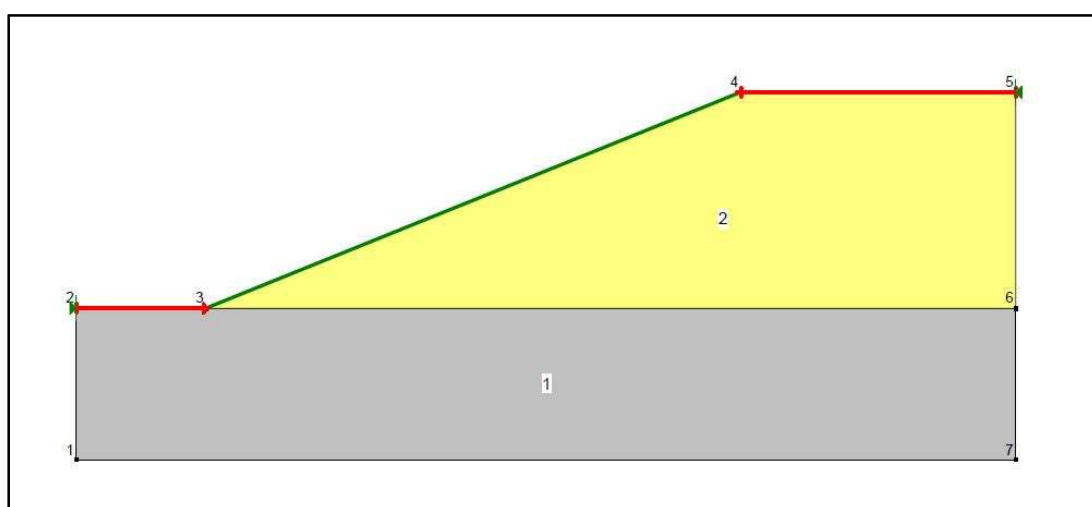


Figura 3.3: Talud de referencia – Criterio de Sanchez Alciturri et al (1993)

Los resultados obtenidos para cada par de valores ϕ y c se presentan en el anexo 1. Los factores de seguridad hallados muestran una gran variación entre los distintos parámetros mecánicos adoptados, como se aprecia en el gráfico de la figura 3.4.

Se observa en todos los casos que los valores máximos del factor de seguridad se obtienen con los parámetros $\phi = 20,3^\circ$ y $c = 18,67$ kPa, correspondientes al punto B de la figura 3.2, y los valores más bajos se obtienen con los parámetros $\phi = 22,5^\circ$ y $c = 0$ kPa, que corresponden al punto D del mismo.

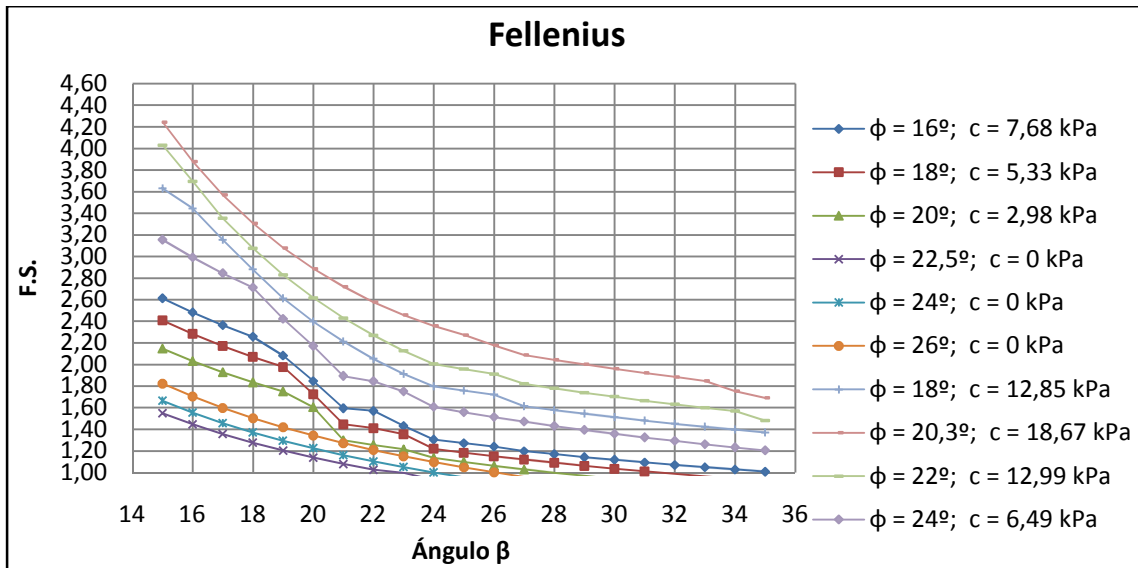


Figura 3.4: Factor de seguridad vs. Ángulo del talud – Criterio de Sanchez Alcuturri et al (1993)

3.1.3 Criterio de Kavazanjian (1995)

El modelo de envolvente bi-lineal, característico de los suelos reforzados con fibras, ha sido propuesto por Kavazanjian et al. (1995), y encuentra gran aceptación debido a que permite determinar y describir dos zonas de resistencia de los RSU: para tensiones normales bajas y tensiones normales altas.

Para aplicar el criterio de rotura al talud de referencia, se han definido dos estratos de igual densidad ($\gamma = 0,8 \text{ Tn/m}^3$), como se observa en la figura 3.5. El primero corresponde a las tensiones bajas y se encuentra en la zona superior del talud hasta una profundidad de 3,82 metros (amarillo), donde la presión de confinamiento alcanza los 30 kPa. En esta franja, se considera al material puramente cohesivo ($\phi = 0$; $c = 24 \text{ kPa}$).

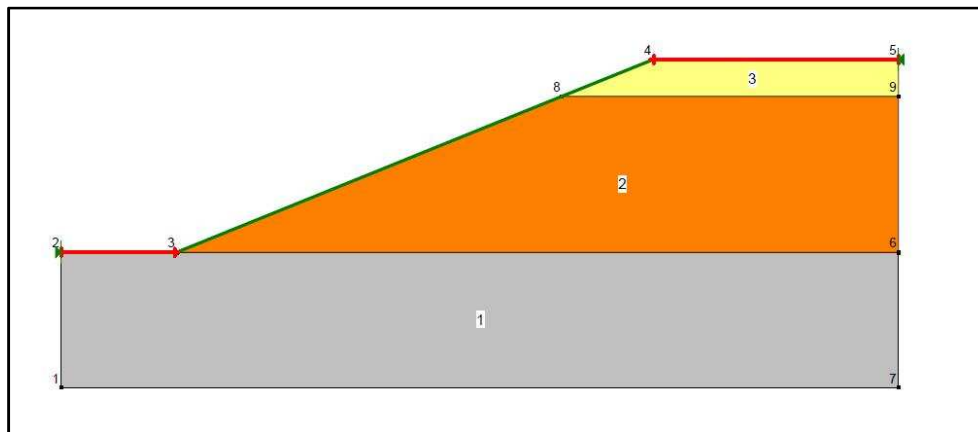


Figura 3.5: Talud de referencia – Criterio de Kavazanjian (1995)

El segundo estrato corresponde a las tensiones altas ($\sigma_n > 30$ kPa), y abarca profundidades mayores a 3,82 metros (naranja). En esta zona, los RSU pasan a ser considerados no cohesivos ($\phi = 38^\circ$; $c = 0$ kPa). El anexo 2 presenta los factores de seguridad hallados en función al método de cálculo y ángulo del talud. Estos valores se muestran en el gráfico de la figura 3.6.

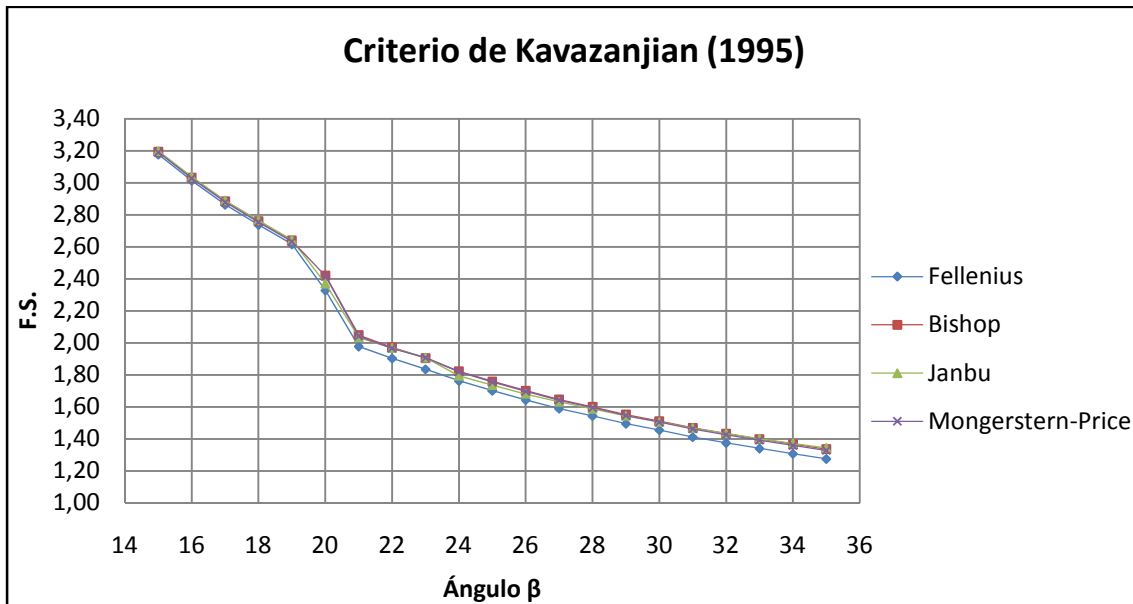


Figura 3.6: Factor de seguridad vs. Ángulo del talud

3.1.4 Criterio de Manassero (1997)

Basándose en la propuesta de Kavazanjian, Manassero et al (1997) afirma que ésta admite una envolvente tri-lineal (figura 2.20). Para aplicar este criterio al modelo de referencia, dividimos el talud en tres estratos como puede observarse en la figura 3.7.

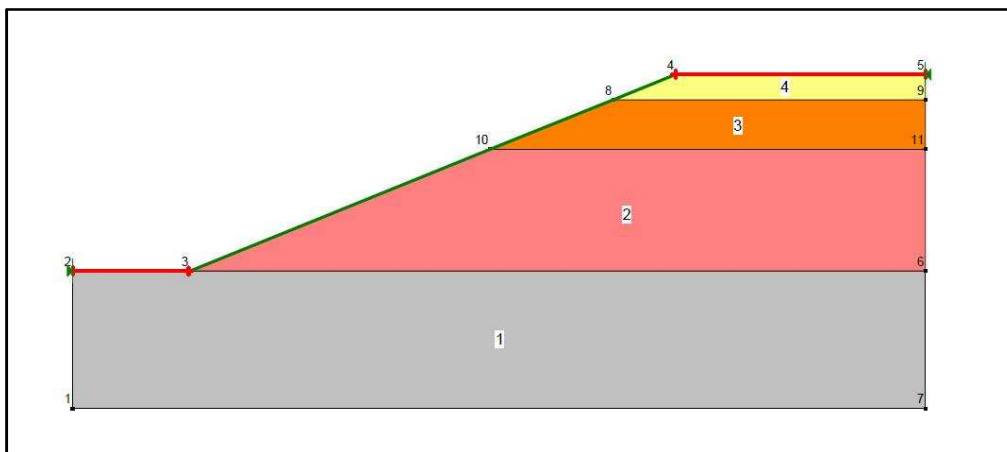


Figura 3.7: Talud de referencia – Criterio de Manassero (1997)

El primero corresponde a las tensiones bajas (inferiores a 20 kPa), y llega a una profundidad de 2,55 metros (color amarillo), donde el comportamiento de los RSU se considera puramente cohesivo ($\phi = 0$; $c = 20$ kPa).

El segundo estrato se define desde 2,55m hasta 7,65m de profundidad (color naranja) y corresponde a las tensiones medias (entre 20 y 60 kPa). En este caso se considera que la cohesión tiene un valor nulo y el ángulo de rozamiento es igual a 38° .

Para las tensiones normales elevadas (color magenta), por encima de 60 kPa, el valor de la cohesión es de 20 kPa y el del ángulo de rozamiento de 30° . Como en el caso anterior, adoptamos una densidad de $0,8 \text{ Tn/m}^3$ en todos los estratos. El anexo 2 presenta los factores de seguridad hallados en función al método de cálculo y al ángulo del talud, valores que se reflejan en el gráfico de la figura 3.8.

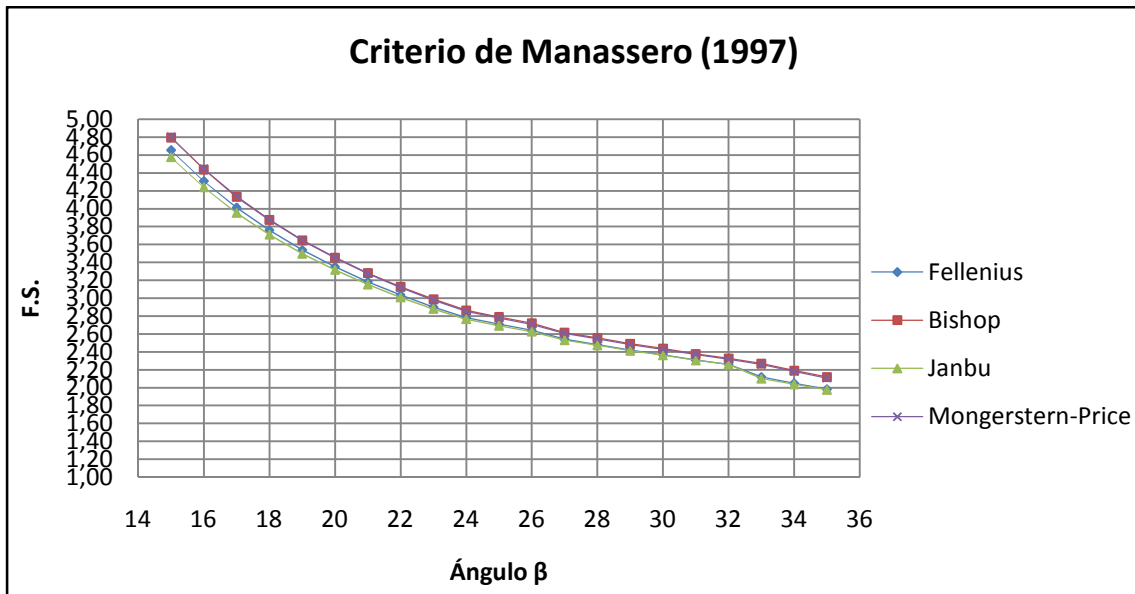


Figura 3.8: Factor de seguridad vs. Ángulo del talud

3.2 ANÁLISIS COMPARATIVO

La figura 3.9 presenta un gráfico comparativo de los factores de seguridad obtenidos con los criterios de Kavazanjian (1995) y Manassero (1997). Se observa que los valores más conservadores se obtienen con la envolvente bi-lineal, y los valores más altos con la envolvente tri-lineal. Los factores de seguridad correspondientes al criterio de Kavazanjian son entre 26% y 38% menores que los valores calculados con el criterio de Manassero.

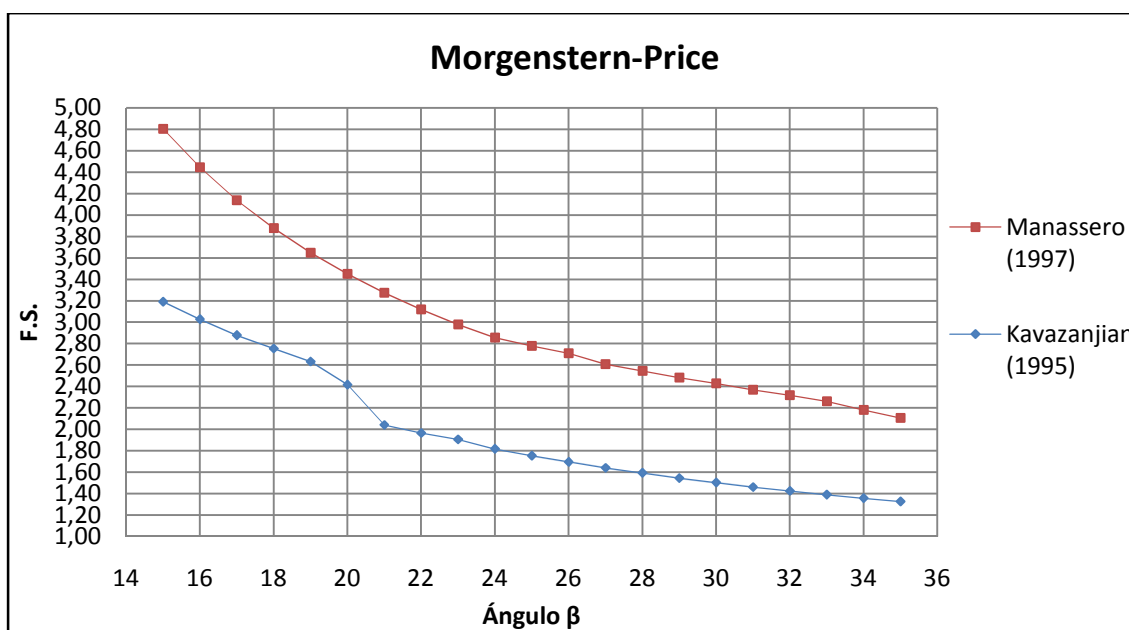


Figura 3.9: Cuadro comparativo F.S. vs. Ángulo del talud

Esta variación sugiere que el modelo tri-lineal aprovecha mejor las propiedades mecánicas de los RSU mediante la descripción de tres zonas de resistencia, en comparación con la envolvente bi-lineal que distingue dos zonas.

El criterio de Sanchez-Alciturri et al (1993) ofrece una envolvente de rotura lineal para los RSU. Si bien los valores recomendados están limitados en una zona del diagrama cohesión versus ángulo de fricción, los resultados muestran una gran variación del factor de seguridad para las distintas combinaciones de posibles de ϕ y c , alcanzando en algunos casos valores inferiores a uno.

En el modelo estudiado se verifica que los valores máximos del coeficiente de seguridad se alcanzan con los parámetros $\phi = 20,3^\circ$ y $c = 18,67$ kPa, y los valores mínimos se obtienen

con los parámetros $\phi = 22,5^\circ$ y $c = 0$ kPa. Los factores de seguridad mínimos son entre 60% y 65% menores que los valores máximos, dependiendo del ángulo del talud.

El gráfico de la figura 3.10 presenta los resultados de los tres criterios adoptados, donde se aprecian los valores máximos y mínimos correspondiente al criterio de Sánchez-Alciturri.

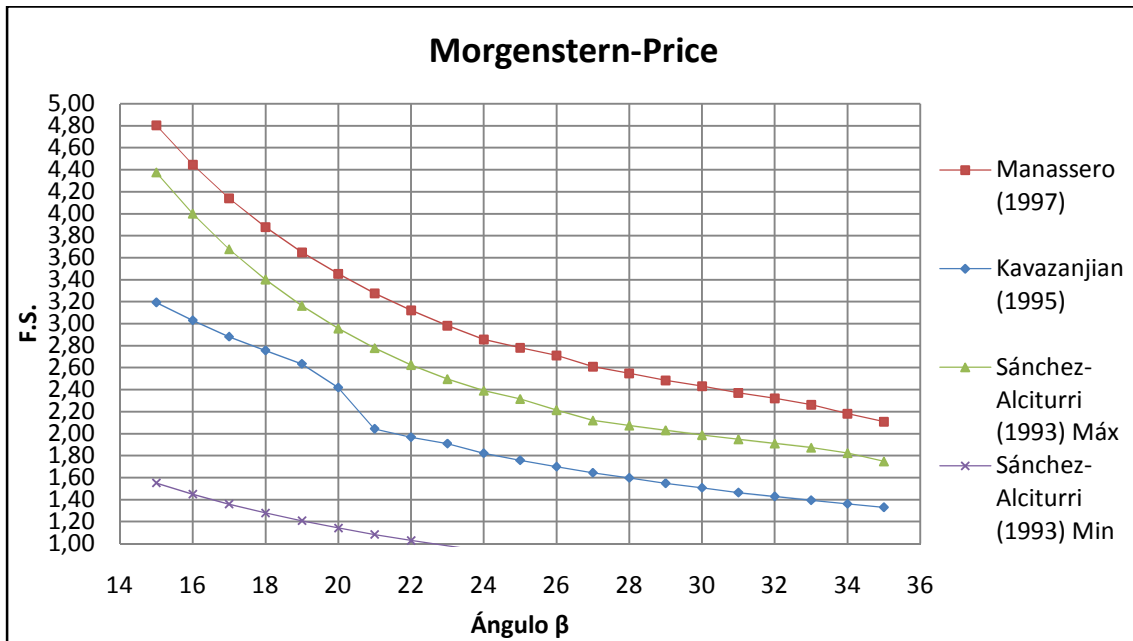


Figura 3.10: Cuadro comparativo de criterios de rotura para RSU

El anexo 3 presenta los gráficos comparativos correspondientes a cada método de cálculo. En todos los casos observamos que los coeficientes de seguridad obtenidos con el criterio de Kavazanjian (1995) se encuentran dentro del rango de valores hallados con el criterio de Sánchez-Alciturri (1993). Por otro lado, el criterio de Manassero (1997) brinda en todos los casos, valores superiores a esta franja.

3.3 CONCLUSIONES

Las evaluaciones de estabilidad de taludes en vertederos demandan el conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de los residuos sólidos urbanos. Si bien los RSU presentan un comportamiento mecánico distinto al de los suelos, se consideran aceptables los conceptos importados de la mecánica de suelos clásica en la interpretación de los ensayos con residuos.

Las principales propiedades mecánicas de los RSU están fuertemente influenciadas por la composición, humedad, densidad y el estado de alteración del mismo, así como por el comportamiento mecánico de cada componente. Con relación a las propiedades de resistencia, los RSU presentan un comportamiento bastante particular, pues la curva tensión-deformación no presenta pico de rotura, incluso para grandes deformaciones. Por este motivo, los parámetros resistentes se determinan en función a los niveles de deformación considerados admisibles. Estos valores, no son indicadores de la resistencia en sí, sino que se refieren simplemente a una condición específica de deformación.

En la literatura técnica podemos encontrar recopilaciones de estos parámetros determinados en ensayos de laboratorio, ensayos de campo y retro análisis, en base a los cuales diversos autores proponen envolventes de rotura para los RSU. Además del modelo lineal (Mohr-Coulomb) utilizado comúnmente en mecánica de suelos, existen propuestas bi-lineales y tri-lineales que sugieren una mejor aproximación al comportamiento mecánico de los RSU. Para aplicar estos criterios al análisis de estabilidad, es posible adecuar los modelos utilizando valores de cohesión y ángulo de rozamiento variables en la profundidad.

Los criterios de Sanchez-Alciturri et al (1993), Kavazanjian et al (1995) y Manassero et al (1997) aplicados a un talud de referencia de 20 metros de altura, presentan distintos factores de seguridad. Independientemente al ángulo adoptado entre 15° y 35°, se observan las siguientes tendencias:

- Los parámetros de diseño recomendados por Sanchez-Alciturri et al (1993) muestran una gran variación del factor de seguridad para las distintas combinaciones posibles de ϕ y c , si bien, se limitan en una franja, en el que los valores máximos se alcanzan con los parámetros $\phi = 20,3^\circ$ y $c = 18,67$ kPa, y los valores mínimos se obtienen con los parámetros $\phi = 22,5^\circ$ y $c = 0$ kPa.

- Los coeficientes de seguridad obtenidos con el criterio de Kavazanjian (1995) se encuentran dentro del rango de valores hallados con el criterio de Sánchez-Alciturri (1993). Por otro lado, el criterio de Manassero (1997) brinda en todos los casos, valores superiores a esta franja.
- El modelo que adopta la envolvente bi-lineal (Kavazanjian, 1995) arroja valores entre 26% y 38% menores que los obtenidos con la envolvente tri-lineal (Manassero, 1997).

Si bien la adopción de parámetros de diseño recomendados por el criterio de Sánchez-Alciturri et al (1995) constituye una práctica común en proyectos de construcción o ampliación de vertederos, la toma de datos de estos estudios debe realizarse con mucha precaución, considerando la variabilidad de resultados que arrojan las distintas combinaciones posibles de ϕ y c .

Las envolventes bi-lineal y tri-lineal ofrecen parámetros mecánicos variables en función de la tensión normal actuante. En el modelo estudiado, se observa que el primero arroja valores más conservadores del coeficiente de seguridad, lo que indica que el modelo tri-lineal aprovecha mejor las propiedades mecánicas de los RSU mediante la descripción de tres zonas de resistencia, en comparación con la envolvente bi-lineal que distingue dos zonas.

REFERENCIAS

- [1] AYALA CARCEDO, FRANCISCO J.; ANDREU POSSE, FRANCISCO J.; FE MARQUES, MIGUEL; FERRER GIJON, MERCEDES; DE SIMON GIL, ANTONIO; FERNANDEZ LLANA, IGNACIO; OLALLA MARAÑON, CLAUDIO; GOMEZ PUYUELO, JAVIER; SAMPEDRO QUIJANO, JOSÉ. "Manual de Taludes". Instituto geológico minero de España, EPTISA. Madrid 1986.
- [2] BISHOP, A. "The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes". Londres, 1955.
- [3] CARVALHO, MIRIAM DE FÁTIMA. "Comportamiento mecánico de residuos sólidos urbanos". Escuela de ingeniería de San Carlos. Universidad de Sao Paulo, 1999.
- [4] CEDEX. "Máster en mecánica del suelo e ingeniería de cimentaciones". Modulo XVI. Geotecnia medioambiental. Madrid 2008.
- [5] COLOMER, F.J.; GALLARDO, A., BOVEA M. D.; CARLOS, M. "Evaluación del riesgo geotécnico en vertederos de residuos sólidos: identificación de los principales peligros". Red de ingeniería en saneamiento ambiental. Castellón, 2009.
- [6] DE LAMARE NETO, A. "Resistencia ao cisalhamento de residuos sólidos urbanos e de materiais granulares com fibras". Tesis de doctorado, Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Federal de Rio de Janeiro, 2004.
- [7] DIAS CARDIM, ROBERTO. "Estudo da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões". Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília, 2008.
- [8] FELLENIUS, WOLMAR. "Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion (Adhäsion) und unter Annahme kreiszylindrischer Gleitflächen". Berlin, 1927.
- [9] FICHTNER; CONTECSA. "Plan maestro de gestión de residuos comunales en la región oriental de Paraguay". Secretaría Técnica de Planificación (STP). Asunción, 2003.
- [10] GRISOLIA, M., NAPOLEONI, Q., TANGREDI, G. "The use of triaxial tests for the mechanical characterization of municipal solid waste". Caligari, 1995.
- [11] HENRIQUES PEREIRA, ANA GISHLANE; SOPEÑA MAÑAS, LUIS. "Movimientos verticales y horizontales provocados por ensayos de carga en un relleno de residuos sólidos urbanos". XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, 2000.
- [12] HENRIQUES PEREIRA, ANA GISHLANE; SOPEÑA MAÑAS, LUIS. "Propiedades físicas de los residuos sólidos urbanos del vertedero Valdemingómez". XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre, 2000.
- [13] JANBU, N. "Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis". European Conference on Stability Analysis. Estocolmo, 1954.

- [14] JESSBERGER, H.L. & KOCKEL, R. "Determination and assessment of the mechanical properties of waste". Rotterdam- Balkema, (1993).
- [15] JIMENEZ SALAS, JOSE A.; DE JUSTO ALPAÑES, JOSE L.; SERRANO GONZALEZ, ALCIBIADES A. "Geotecnia y Cimientos II". 2º Edición, Editorial Rueda. Madrid.
- [16] KAVAZANJIAN, EDWARD. "Performance of Landfills Under Seismic Loading". 3rd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. Saint Louis, 1995.
- [17] KÖLSH, F.; ZIEHMANN, G. "Landfill stability, risks and challenges Waste" Management World ISWA. 2004.
- [18] LANDVA, A. O., CLARK, J. I. "Geotechnics of fill – Theory and Practice". ASTM. Philadelphia, 1990.
- [19] LEMOS MACHADO, SANDRO; CARVALHO, MIRIAM DE FÁTIMA; FIALHO DO NASCIMENTO, JULIO CESAR; AZEVEDO DOURADO, KLEBER. "Estudo do comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos sob a influência da biodegradabilidade". 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitaria y Ambiental. Campo Grande, 2005.
- [20] MANASSERO, M., VAN IMPE, W.F., BOUAZZA, A. "Waste disposal and containment". Proceedings of the Second International Congress on Environmental Geotechnics. Osaka, 1997.
- [21] MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. "The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces". London, 1965.
- [22] SANCHEZ-ALCITURRI, J.M.; PALMA, J.; SAGASETA, C. "Mechanical properties of wastes in a sanitary landfill". Proc. International Conference Green. Rotterdam, (1993).
- [23] SOWERS, G. F. Settlement of waste disposal fills. Moscú, 1973.
- [24] TCHOBANOGLOUS, G.; THEYSEN, H.; VIGIL, S. "Gestión Integral de Residuos Sólidos". Ed. McGraw-Hill/Interamericana de España. Madrid 1994.
- [25] VAQUERO DÍAZ, IVÁN. "Manual de diseño y construcción de vertederos de Residuos Sólidos Urbanos". U.D Proyectos. E.T.S.I. Minas – UPM. Madrid 2004.

ANEXO 1

Parámetros: $\Phi = 16^\circ$ C = 7,68 kPa				
Ángulo β	Factor de seguridad			
	Ordinary	Bishop	Janbu	Mongersterm - Price
15	2,613	2,616	2,611	2,616
16	2,482	2,485	2,480	2,485
17	2,364	2,367	2,363	2,367
18	2,258	2,261	2,257	2,261
19	2,082	2,128	2,046	2,145
20	1,846	1,883	1,822	1,889
21	1,595	1,617	1,581	1,616
22	1,570	1,590	1,557	1,589
23	1,431	1,464	1,414	1,465
24	1,305	1,330	1,293	1,329
25	1,271	1,295	1,259	1,294
26	1,240	1,263	1,229	1,262
27	1,197	1,221	1,188	1,220
28	1,170	1,193	1,162	1,192
29	1,142	1,164	1,134	1,163
30	1,118	1,139	1,111	1,138
31	1,092	1,111	1,085	1,110
32	1,069	1,088	1,063	1,087
33	1,048	1,066	1,042	1,065
34	1,027	1,044	1,021	1,043
35	1,007	1,024	1,002	1,023

Parámetros: $\Phi = 18^\circ$ C = 5,33 kPa				
Ángulo β	Factor de seguridad			
	Ordinary	Bishop	Janbu	Mongersterm - Price
15	2,408	2,412	2,407	2,412
16	2,283	2,287	2,282	2,286
17	2,172	2,175	2,171	2,175
18	2,070	2,073	2,069	2,072
19	1,977	1,980	1,976	1,980
20	1,725	1,770	1,706	1,775
21	1,446	1,472	1,436	1,471
22	1,411	1,435	1,401	1,434
23	1,355	1,394	1,344	1,395
24	1,219	1,247	1,211	1,246
25	1,183	1,210	1,175	1,209
26	1,150	1,175	1,142	1,174
27	1,119	1,143	1,111	1,142
28	1,089	1,112	1,081	1,110
29	1,061	1,083	1,054	1,082
30	1,035	1,056	1,028	1,054
31	1,010	1,030	1,004	1,029
32	0,986	1,005	0,980	1,004
33	0,963	0,982	0,957	0,980
34	0,941	0,959	0,935	0,958
35	0,921	0,938	0,915	0,936

Parámetros: $\Phi = 22,5^\circ$ $C = 0$ kPa				
Ángulo β	Factor de seguridad			
	Ordinary	Bishop	Janbu	Mongerstern - Price
15	1,548	1,550	1,548	1,550
16	1,446	1,448	1,446	1,448
17	1,356	1,358	1,356	1,358
18	1,276	1,278	1,276	1,278
19	1,204	1,206	1,204	1,206
20	1,139	1,141	1,139	1,141
21	1,080	1,082	1,080	1,081
22	1,026	1,028	1,026	1,027
23	0,997	0,978	0,977	0,978
24	0,931	0,933	0,931	0,932
25	0,889	0,891	0,889	0,890
26	0,850	0,852	0,850	0,851
27	0,814	0,815	0,814	0,815
28	0,780	0,782	0,780	0,781
29	0,748	0,750	0,748	0,749
30	0,718	0,720	0,718	0,719
31	0,690	0,692	0,690	0,691
32	0,663	0,666	0,663	0,664
33	0,638	0,641	0,638	0,639
34	0,615	0,618	0,615	0,615
35	0,592	0,595	0,592	0,593

Parámetros: $\Phi = 24^\circ$ $C = 0$ kPa				
Ángulo β	Factor de seguridad			
	Ordinary	Bishop	Janbu	Mongerstern - Price
15	1,664	1,666	1,664	1,666
16	1,555	1,557	1,555	1,557
17	1,458	1,460	1,458	1,460
18	1,372	1,374	1,372	1,373
19	1,295	1,296	1,294	1,296
20	1,225	1,226	1,225	1,226
21	1,161	1,163	1,161	1,162
22	1,103	1,105	1,103	1,104
23	1,050	1,052	1,050	1,051
24	1,001	1,003	1,001	1,002
25	0,956	0,957	0,956	0,957
26	0,914	0,915	0,914	0,915
27	0,875	0,876	0,875	0,875
28	0,838	0,840	0,838	0,839
29	0,804	0,806	0,804	0,805
30	0,772	0,774	0,772	0,773
31	0,742	0,744	0,742	0,742
32	0,713	0,716	0,713	0,714
33	0,686	0,689	0,686	0,687
34	0,661	0,664	0,661	0,661
35	0,636	0,640	0,636	0,637

Parámetros: $\Phi = 26^\circ$ C = 0 kPa				
Ángulo β	Factor de seguridad			
	Ordinary	Bishop	Janbu	Mongersterm - Price
15	1,823	1,825	1,823	1,825
16	1,703	1,705	1,703	1,705
17	1,597	1,599	1,597	1,599
18	1,503	1,505	1,503	1,505
19	1,418	1,420	1,418	1,420
20	1,342	1,343	1,342	1,343
21	1,272	1,274	1,272	1,273
22	1,208	1,210	1,208	1,210
23	1,150	1,152	1,150	1,151
24	1,097	1,098	1,097	1,098
25	1,047	1,049	1,047	1,048
26	1,001	1,003	1,001	1,002
27	0,958	0,960	0,958	0,959
28	0,918	0,920	0,918	0,919
29	0,881	0,883	0,881	0,882
30	0,846	0,848	0,846	0,846
31	0,812	0,815	0,812	0,813
32	0,781	0,784	0,781	0,782
33	0,752	0,755	0,752	0,753
34	0,724	0,727	0,724	0,725
35	0,697	0,701	0,697	0,698

Parámetros: $\Phi = 18^\circ$ C = 12,85 kPa				
Ángulo β	Factor de seguridad			
	Ordinary	Bishop	Janbu	Mongersterm - Price
15	3,629	3,633	3,626	3,633
16	3,445	3,449	3,442	3,448
17	3,154	3,213	3,085	3,245
18	2,880	2,932	2,825	2,953
19	2,611	2,670	2,554	2,701
20	2,397	2,451	2,350	2,472
21	2,211	2,258	2,173	2,270
22	2,052	2,094	2,021	2,099
23	1,912	1,946	1,887	1,946
24	1,798	1,827	1,777	1,825
25	1,757	1,785	1,737	1,783
26	1,720	1,746	1,700	1,744
27	1,614	1,641	1,600	1,640
28	1,579	1,605	1,565	1,603
29	1,544	1,569	1,531	1,568
30	1,512	1,536	1,500	1,534
31	1,481	1,503	1,469	1,502
32	1,451	1,472	1,440	1,471
33	1,423	1,443	1,412	1,442
34	1,396	1,415	1,386	1,414
35	1,370	1,388	1,360	1,387

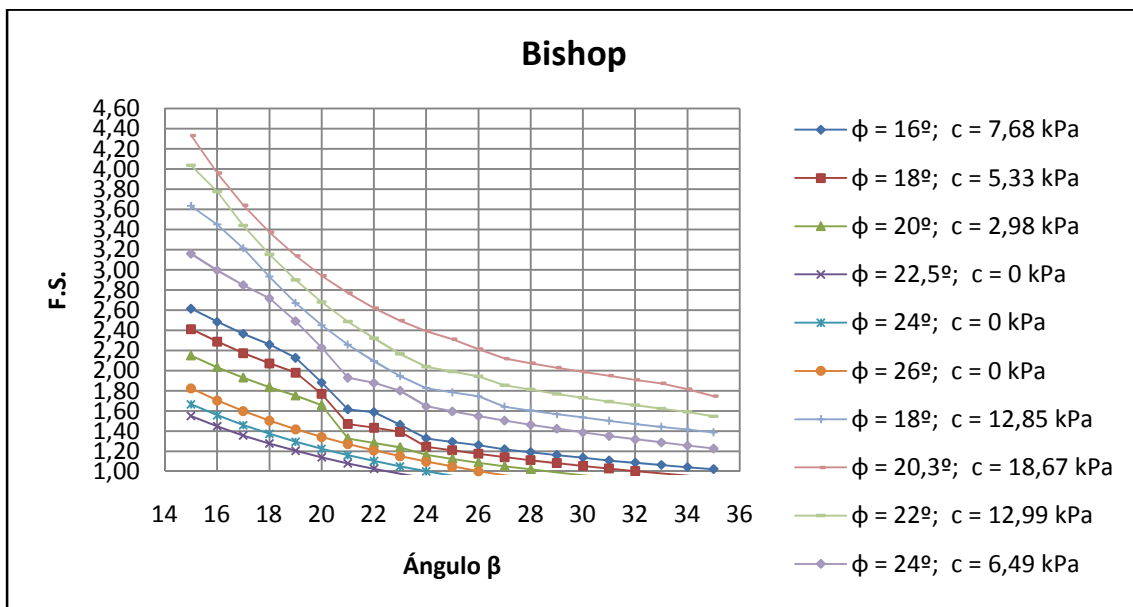
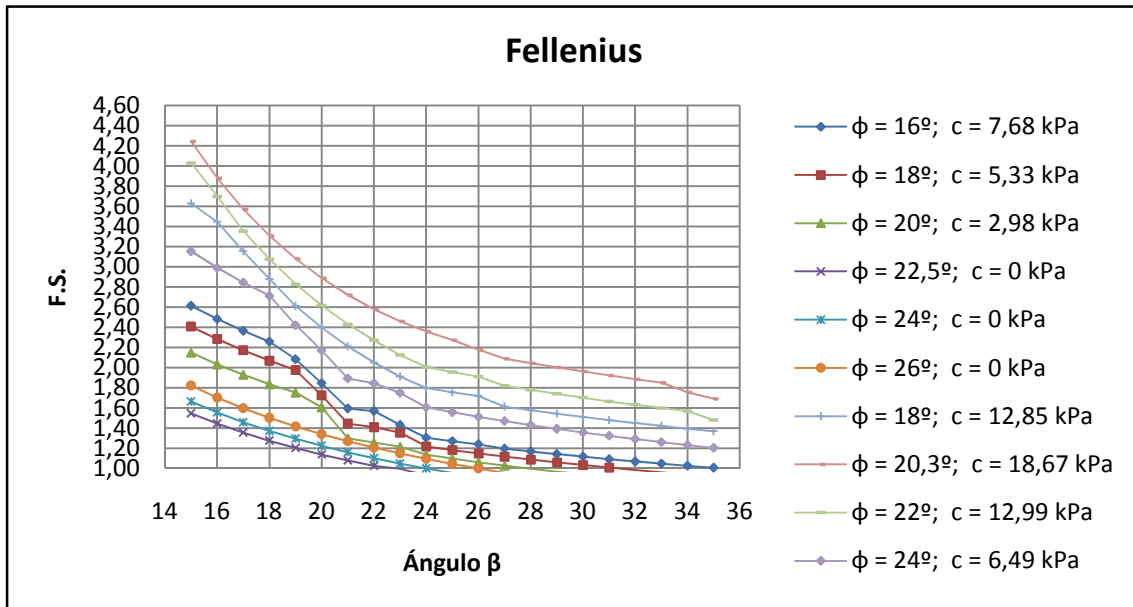
Parámetros: $\Phi = 20,3^\circ$ C = 18,67 kPa				
Ángulo β	Factor de seguridad			
	Ordinary	Bishop	Janbu	Mongersterm - Price
15	4,244	4,333	4,133	4,375
16	3,880	3,960	3,783	3,999
17	3,570	3,642	3,488	3,676
18	3,307	3,373	3,236	3,401
19	3,080	3,140	3,020	3,161
20	2,887	2,940	2,835	2,955
21	2,721	2,769	2,676	2,777
22	2,578	2,621	2,539	2,623
23	2,458	2,496	2,424	2,495
24	2,358	2,391	2,327	2,389
25	2,273	2,312	2,245	2,314
26	2,178	2,213	2,154	2,213
27	2,089	2,120	2,068	2,118
28	2,043	2,073	2,024	2,072
29	2,002	2,030	1,983	2,029
30	1,961	1,988	1,943	1,986
31	1,923	1,949	1,906	1,947
32	1,885	1,910	1,869	1,908
33	1,849	1,873	1,834	1,871
34	1,754	1,816	1,715	1,821
35	1,691	1,747	1,658	1,746

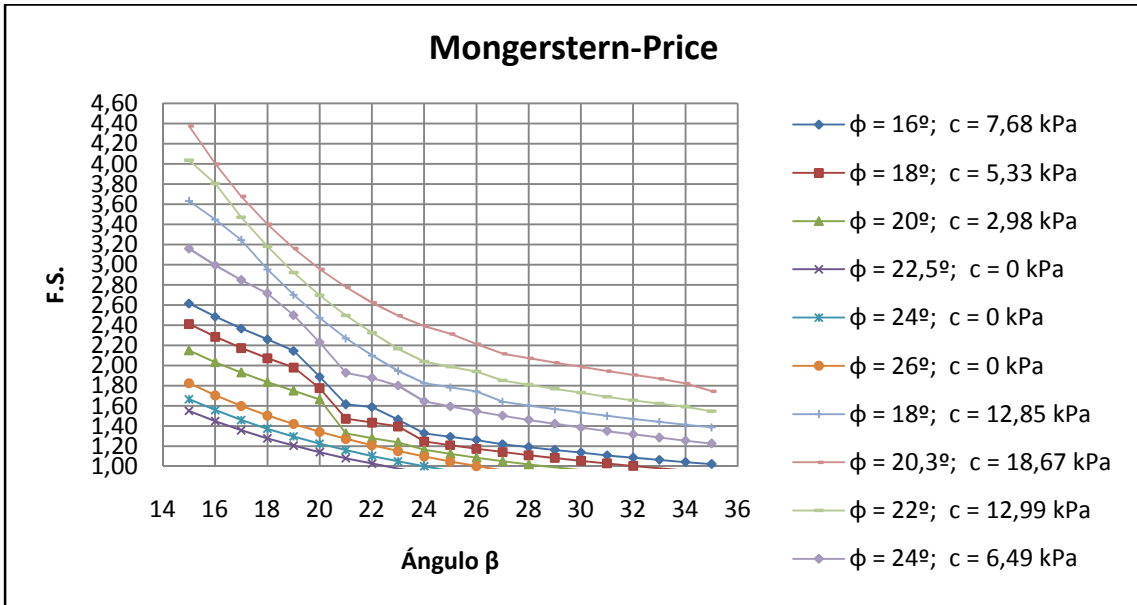
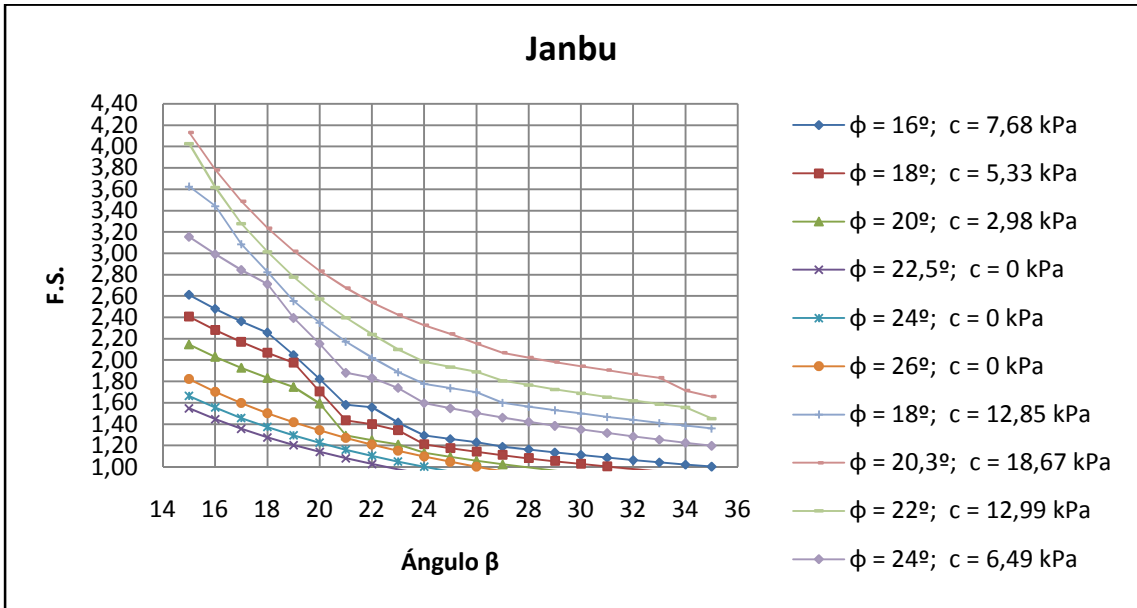
Parámetros: $\Phi = 22^\circ$ C = 12,99 kPa				
Ángulo β	Factor de seguridad			
	Ordinary	Bishop	Janbu	Mongersterm - Price
15	4,031	4,036	4,028	4,035
16	3,697	3,775	3,618	3,805
17	3,354	3,438	3,279	3,471
18	3,076	3,154	3,014	3,182
19	2,829	2,900	2,778	2,921
20	2,618	2,681	2,575	2,696
21	2,431	2,488	2,396	2,496
22	2,271	2,321	2,241	2,324
23	2,126	2,168	2,101	2,168
24	2,006	2,041	1,985	2,039
25	1,957	1,991	1,937	1,989
26	1,912	1,944	1,892	1,942
27	1,821	1,855	1,807	1,853
28	1,781	1,813	1,767	1,812
29	1,740	1,771	1,727	1,769
30	1,703	1,733	1,691	1,731
31	1,666	1,693	1,654	1,692
32	1,632	1,658	1,621	1,657
33	1,600	1,625	1,589	1,624
34	1,569	1,593	1,558	1,591
35	1,481	1,548	1,453	1,548

Parámetros: $\Phi = 24^\circ$ C = 6,49 kPa				
Ángulo β	Factor de seguridad			
	Ordinary	Bishop	Janbu	Mongersterm - Price
15	3,155	3,159	3,153	3,159
16	2,991	2,995	2,990	2,995
17	2,845	2,848	2,843	2,848
18	2,713	2,716	2,711	2,716
19	2,422	2,490	2,394	2,498
20	2,171	2,227	2,152	2,229
21	1,894	1,930	1,881	1,928
22	1,845	1,878	1,833	1,877
23	1,751	1,801	1,739	1,800
24	1,607	1,646	1,597	1,645
25	1,559	1,596	1,549	1,594
26	1,514	1,549	1,504	1,547
27	1,471	1,505	1,462	1,503
28	1,431	1,463	1,422	1,461
29	1,394	1,424	1,385	1,422
30	1,358	1,387	1,350	1,385
31	1,325	1,353	1,317	1,351
32	1,293	1,319	1,285	1,317
33	1,262	1,288	1,255	1,285
34	1,233	1,257	1,226	1,255
35	1,205	1,228	1,198	1,226

Parámetros: $\Phi = 20^\circ$ C = 2,98 kPa				
Ángulo β	Factor de seguridad			
	Ordinary	Bishop	Janbu	Mongersterm - Price
15	2,148	2,151	2,147	2,151
16	2,032	2,035	2,031	2,035
17	1,929	1,932	1,928	1,932
18	1,835	1,837	1,834	1,837
19	1,750	1,753	1,749	1,752
20	1,606	1,659	1,594	1,665
21	1,299	1,329	1,293	1,328
22	1,255	1,283	1,249	1,282
23	1,215	1,240	1,209	1,240
24	1,135	1,166	1,131	1,166
25	1,097	1,127	1,093	1,126
26	1,061	1,089	1,057	1,088
27	1,028	1,054	1,024	1,053
28	0,997	1,023	0,994	1,022
29	0,968	0,992	0,964	0,991
30	0,941	0,964	0,937	0,963
31	0,888	0,936	0,879	0,933
32	0,865	0,910	0,857	0,907
33	0,844	0,886	0,836	0,883
34	0,825	0,864	0,817	0,861
35	0,806	0,843	0,799	0,840

Factor de seguridad vs. Ángulo del talud – Criterio de Sanchez Alciturri et al (1993)





ANEXO 2

Criterio de Kavazanjian (1995)				
Ángulo β	Factor de seguridad			
	Ordinary	Bishop	Janbu	Mongerstern - Price
15	3,177	3,195	3,198	3,191
16	3,013	3,033	3,037	3,028
17	2,863	2,885	2,889	2,879
18	2,738	2,761	2,765	2,754
19	2,616	2,640	2,644	2,633
20	2,328	2,420	2,370	2,417
21	1,978	2,048	2,034	2,042
22	1,903	1,972	1,967	1,966
23	1,835	1,905	1,908	1,907
24	1,762	1,822	1,794	1,819
25	1,701	1,759	1,735	1,755
26	1,643	1,701	1,681	1,697
27	1,589	1,646	1,631	1,642
28	1,543	1,600	1,587	1,595
29	1,495	1,552	1,543	1,546
30	1,455	1,511	1,505	1,505
31	1,411	1,469	1,467	1,462
32	1,375	1,433	1,433	1,426
33	1,340	1,399	1,402	1,392
34	1,307	1,367	1,372	1,359
35	1,275	1,336	1,344	1,328

Criterio de Manassero (1997)				
Ángulo β	Factor de seguridad			
	Ordinary	Bishop	Janbu	Mongerstern - Price
15	4,653	4,793	4,575	4,803
16	4,307	4,437	4,239	4,445
17	4,011	4,132	3,953	4,138
18	3,759	3,873	3,709	3,877
19	3,539	3,647	3,497	3,648
20	3,351	3,453	3,316	3,451
21	3,183	3,280	3,153	3,275
22	3,034	3,126	3,009	3,119
23	2,901	2,988	2,880	2,980
24	2,782	2,865	2,765	2,856
25	2,708	2,790	2,693	2,780
26	2,640	2,720	2,626	2,709
27	2,540	2,615	2,531	2,608
28	2,481	2,555	2,474	2,547
29	2,419	2,492	2,414	2,484
30	2,366	2,437	2,362	2,429
31	2,308	2,378	2,306	2,370
32	2,259	2,328	2,258	2,319
33	2,120	2,269	2,101	2,261
34	2,049	2,192	2,037	2,181
35	1,983	2,120	1,977	2,107

ANEXO 3

