



**COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DE LOS TALUDES CONFORMADOS
POR RESIDUOS SOLIDOS EN RELLENOS SANITARIOS.**

DIANA CAROLINA DIOSA VELASQUEZ

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2016



**COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DE LOS TALUDES CONFORMADOS
POR RESIDUOS SOLIDOS EN RELLENOS SANITARIOS.**

Anteproyecto presentado como requisito para optar al Título de
Ingeniero Civil

ASESOR DISCIPLINAR: IC, Msc Christian Camilo Gutiérrez Angulo

ASESOR METODOLÓGICO: Lic. Msc. Bibiana Carolina Gómez

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2016**



Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la fortaleza necesaria para asumir este reto, a mi madre quien me ha apoyado incondicionalmente a lo largo de mi vida, a mi hijo por ser mi motor y mi motivación, a ellos les agradezco por ser parte de este camino y culminación de este logro.

A la Universidad la Gran Colombia por formarme como profesional y mejor persona, al Ingeniero Christian Gutiérrez por su apoyo, dedicación y paciencia y a la profesora Bibiana Gómez por su entrega y orientación en este camino.

TABLA DE CONTENIDO

GENERALIDADES	11
INTRODUCCION	12
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivo General:.....	15
2.2 Objetivos Específicos:	15
3 JUSTIFICACIÓN.....	16
4 ANTECEDENTES	18
5 MARCO REFERENCIAL.....	22
5.1 MARCO CONCEPTUAL.....	22
5.1.1 Tipos de movimiento en masa	23
5.1.2 Factores detonantes y desencadenantes	26
5.1.3 Condiciones del terreno	27
5.1.4 Procesos geomorfológicos.....	28
5.1.5 Procesos físicos	28
5.1.6 Procesos humanos	29
5.1.7 Métodos de análisis de estabilidad de taludes.....	29
5.1.8 Rellenos sanitarios	31
5.1.9 Investigación del subsuelo.....	45
5.1.10 Modelación geotécnica.....	49
5.1.11Parámetros de presión de poros.....	50
5.1.12Resistencia	51
5.1.13 Residuos solidos	52
5.1.14Cambios volumétricos	60
5.1.15Compactación de residuos sólidos.....	62
5.2 MARCO LEGAL	66
6. DISEÑO METODOLÓGICO	68
6.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	68
6.2 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	68
6.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	68
6.3.1 Software SLIDE	69
6.3.2 Modelaciones.....	69
6.4 FASES DEL PROYECTO	69
6.4.1 Identificar los parámetros de resistencia que tienen los residuos sólidos.....	70

6.4.2	Analizar las causas y factores que ocasionan la inestabilidad de los taludes conformados por residuos sólidos.....	70
6.4.3	Determinar los factores de seguridad para diferentes escenarios geotécnicos y conformación de taludes.....	70
6.4.4	Establecer la relación existente entre los parámetros de presión de poros y el factor de seguridad para diferentes configuraciones de conformación de taludes.	70
7	DESARROLLO METODOLOGICO.....	71
	Teniendo en cuenta los análisis de apoyo para esta investigación, para el desarrollo de este proyecto se diseñó taludes en altura y pendiente para diferentes ángulos de inclinación como se observa en las figuras 6 y 7.	76
7.1	SELECCIÓN DE PARÁMETROS.....	77
7.1.1	Parámetro de presión de poros	78
7.1.2	Parámetros geométricos	78
7.1.3	Factores de seguridad.....	78
7.2	DESARROLLO DEL MODELO PARA TALUDES EN ALTURA.....	79
7.2.1	Para fallas circulares.....	79
7.2.1.1	Diseño de modelos estáticos y dinámicos para un talud en altura con falla circular	80
7.2.2	Para fallas no circulares	89
	Para este caso, se tuvieron en cuenta los mismos parámetros y procedimiento mencionado en el numeral 7.2.1.1, su variación consiste en trabajar fallas No circulares para el cálculo de los factores de seguridad, lo que nos dió como resultado FS diferentes, en ángulos de inclinación mayores, el factor de seguridad disminuye a comparación del talud en altura con falla circular, estos valores se observan en las tablas 24 y 25 (matriz de diseño) para condición estática y pseudoestática respectivamente.	89
7.3	DESARROLLO DEL MODELO PARA TALUDES EN PENDIENTE.....	97
7.3.1	Para fallas circulares.....	98
7.3.2	Para fallas No circulares.....	106
7.3.3	Falla de fondo.....	113
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	120
9.	CONCLUSIONES.....	123
10.	RECOMENDACIONES	126
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	127
	ANEXOS	129

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Factores causantes de deslizamientos.....	27
Figura 2 Principios básicos para la operación de relleno sanitario	35
Figura 3 Clasificación de los residuos	53
Figura 4 Esquema general de la descomposición de los residuos por causa del contacto con agua.....	59
Figura 5 Relación de fases	61
Figura 6 Talud de diseño en altura con pendiente de 35°	77
Figura 7 Talud de diseño en pendiente con ángulo de 25° x 30°	77
Figura 8 Modelo en SLIDE relleno en altura de 15° estático.....	81
Figura 9 Factor de seguridad para un talud de 15° estático	81
Figura 10 Modelo en SLIDE relleno en altura de 25° pseudoestático	82
Figura 11 Factor de seguridad para un talud de 25° pseudoestático.....	82
Figura 12 Curva de estabilidad FS Vs Ru para taludes en altura estático y pseudoestático para falla circular	83
Figura 13 Curva RuC Vs β para fallas circulares en condición estática y pseudoestática.....	84
Figura 14 Curva de estabilidad FS Vs ϕ para taludes en altura estático y pseudoestático para falla circular	85
Figura 15 Curva ϕ_c Vs β para fallas circulares en condición estática y pseudoestática.....	86
Figura 16 Curva de estabilidad FS Vs C para taludes en altura estático y pseudoestático para falla circular	87
Figura 17 Curva Cohesión crítica Vs β para fallas circulares en condición estática y pseudoestática.....	88
Figura 18 Modelo en SLIDE relleno en altura de 35° estático.....	90
Figura 19 Factor de seguridad para un talud de 35° estático	90
Figura 20 Modelo en SLIDE relleno en altura de 35° pseudoestático	91
Figura 21 Factor de seguridad para un talud de 35° pseudoestático.....	91
Figura 22 Curva de estabilidad FS Vs Ru para taludes en altura estático y pseudoestático para falla No circular.....	92
Figura 23 Curva RuC Vs β para fallas No circulares en condición estática y pseudoestática ..93	
Figura 24 Curva de estabilidad FS Vs ϕ_c para taludes en altura estático y pseudoestático para falla No circular	94
Figura 25 Curva Angulo de ϕ_c Vs β para fallas No circulares en condición estática y pseudoestática.....	95
Figura 26 Curva de estabilidad FS Vs C para taludes en altura estático y pseudoestático para falla No circular.....	96
Figura 27 Curva cohesión crítica Vs β para fallas No circulares en condición estática y pseudoestática.....	97
Figura 28 Modelo en SLIDE relleno en pendiente de 20° x 30° estático	100

Figura 29 Factor de seguridad para un talud de 20°x30° estático	100
Figura 30 Modelo en SLIDE relleno en pendiente de 25° x 15° estático	101
Figura 31 Factor de seguridad para un talud de 25°x15° estático	101
Figura 32 Modelo en SLIDE relleno en pendiente de 30° x 35° pseudoestático	102
Figura 33 Factor de seguridad para un talud de 30°x35° pseudoestático	102
Figura 34 Curva de estabilidad FS Vs Ru para taludes en pendiente de 20° estático y pseudoestático para falla circular	103
Figura 35 Curva de estabilidad FS Vs Ru para taludes en pendiente 25° estático y pseudoestático para falla circular	103
Figura 36 Curva de estabilidad FS Vs Ru para taludes en pendiente 30° estático y pseudoestático para falla circular	104
Figura 37 RuC Vs β para fallas circulares en condición estática y pseudoestática	105
Figura 38 Modelo en SLIDE relleno en pendiente de 20° x 15° estático	108
Figura 39 Factor de seguridad para un talud de 20°x15° estático	108
Figura 40 Modelo en SLIDE relleno en pendiente de 25° x 25° estático	109
Figura 41 Factor de seguridad para un talud de 25°x25° estático	109
Figura 42 Modelo en SLIDE relleno en pendiente de 30° x 30° pseudoestático	110
Figura 43 Factor de seguridad para un talud de 30°x30° pseudoestático	110
Figura 44 Curva de estabilidad FS Vs Ru para taludes en pendiente de 20° estático y pseudoestático para falla No circular	111
Figura 45 Curva de estabilidad FS Vs Ru para taludes en pendiente 25° estático y pseudoestático para falla No circular	111
Figura 46 Curva de estabilidad FS Vs Ru para taludes en pendiente 30° estático y pseudoestático para falla No circular	112
Figura 47 RuC Vs β para fallas No circulares en condición estática y pseudoestática	113
Figura 48 Modelo en SLIDE relleno en pendiente de 20° x 25° estático para falla de fondo.	115
Figura 49 Factor de seguridad para un talud de 20°x25° estático para falla de fondo.	115
Figura 50 Modelo en SLIDE relleno en pendiente de 30° x 25° pseudoestático para falla de fondo.	116
Figura 51 Factor de seguridad para un talud de 30°x25° pseudoestático para falla de fondo.	116
Figura 52 Curva de estabilidad FS Vs RuC para taludes en pendiente de 20° estático y pseudoestático para falla de fondo	117
Figura 53 Curva de estabilidad FS Vs RuC para taludes en pendiente 25° estático y pseudoestático para falla de fondo	117
Figura 54 Curva de estabilidad FS Vs RuC para taludes en pendiente 30° estático y pseudoestático para falla de fondo	118
Figura 55 RuC Vs β para fallas de fondo en condición estática y pseudoestática	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de taludes	22
Tabla 2 Tipos de movimiento en masa.....	23
Tabla 3 Métodos de estabilidad de taludes.....	30
Tabla 4 Métodos de construcción de rellenos sanitarios.....	34
Tabla 5 Implementación de elementos.....	41
Tabla 6 Tipos de ensayo	47
Tabla 7 Propiedades físicas de los residuos solidos.....	54
Tabla 8 Contenido de humedad y Densidad de los residuos sólidos.....	56
Tabla 9 Lixiviados y Gases.....	57
Tabla 10 Proceso de descomposición de los residuos en un sitio de disposición final.....	58
Tabla 11 Normatividad	66
Tabla 12 Matriz para un talud en altura.....	72
Tabla 13 Matriz para un talud tipo pendiente.....	73
Tabla 14 Resumen datos teóricos – parámetros del suelo	74
Tabla 15 Parámetros de resistencia	74
Tabla 16 Parámetros de resistencia por medio de ensayos	76
Tabla 17 Consolidado de parámetros del suelo.....	76
Tabla 18 Factores de seguridad	79
Tabla 19 Matriz de diseño para talud en altura con falla circular en condición estática	79
Tabla 20 Matriz de diseño para talud en altura con falla circular en condición dinámica	80
Tabla 21 Ruc para β con FS 1,5 Y 1,1	83
Tabla 22 Angulo de fricción crítico para β con FS 1,5 Y 1,1	85
Tabla 23 Cohesión crítica para β con FS 1,5 Y 1,1	87
Tabla 24 Matriz de diseño para talud en altura con falla No circular en condición estática	89
Tabla 25 Matriz de diseño para talud en altura con falla No circular en condición pseudoestática.....	89
Tabla 26 RuC para β con FS 1,5 Y 1,1	92
Tabla 27 Angulo de fricción crítico para β con FS 1,5 Y 1,1	94
Tabla 28 Cohesión crítica para β con FS 1,5 Y 1,1	96
Tabla 29 Matriz de diseño para talud en pendiente con falla circular en condición estática	98
Tabla 30 Matriz de diseño para talud en pendiente con falla circular en condición pseudoestática.....	99
Tabla 31 RuC para β con FS 1,5 Y 1,1	104
Tabla 32 Matriz de diseño para talud en pendiente con falla No circular en condición estática	106
Tabla 33 Matriz de diseño para talud en pendiente con falla No circular en condición pseudoestática.....	107
Tabla 34 RuC para β con FS 1,5 Y 1,1	112

Tabla 35 Ru utilizados en residuos antiguos y residuos nuevos	113
Tabla 36 Matriz de diseño para falla de fondo con talud en pendiente en condición estática	114
Tabla 37 Matriz de diseño para falla de fondo con talud en pendiente en condición pseudoestática	114
Tabla 38 RuC para β con FS 1,5 Y 1,1	118

INDICE DE IMAGENES

Imagen 1 Relleno sanitario	31
Imagen 2 Relleno sanitario en operación	32
Imagen 3 Relleno sanitario en operación	32
Imagen 4 Relleno sanitario mecanizado.....	33
Imagen 5 Relleno sanitario semi mecanizado	33
Imagen 6 Relleno sanitario manual.....	34
Imagen 7 Formación de lixiviado	38
Imagen 8 Soluciones en manejo de lixiviados	39
Imagen 9 Extracción de gas de vertedero y sistema de utilización.....	40
Imagen 10 Capas del suelo	46
Imagen 11 Técnica exploración.....	48
Imagen 12 Estudios de terreno	48
Imagen 13 Ejemplo análisis de estabilidad de taludes.....	49
Imagen 14 Dirección de esfuerzos principales en la falla de un talud.	51
Imagen 15 Grafico esfuerzo - deformación	52
Imagen 16 Compactación de residuos sólidos en un relleno sanitario.....	62
Imagen 17 Compactación de residuos sólidos.....	63
Imagen 18 Compactación de residuos sólidos.....	63
Imagen 19 Diseño de rellenos sanitarios.....	75

GENERALIDADES

TITULO DEL TRABAJO

COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DE LOS TALUDES CONFORMADOS
POR RESIDUOS SOLIDOS EN RELLENOS SANITARIOS

LINEA DE INVESTIGACIÓN

GEOTECNIA

SUBLINEA

FUNDAMENTOS DE GEOTECNIA

AUTOR

ASESOR DISCIPLINAR

IC, MSc Christian Camilo Gutiérrez Angulo

ASESOR METODOLOGICO

Lic. Msc. Bibiana Carolina Gómez

LUGAR

BOGOTÀ

AÑO

2016

INTRODUCCION

Esta investigación se desarrolló con base a la problemática que se tiene hoy en día sobre los lugares de disposición final de residuos sólidos, encontrar espacios aptos para un relleno sanitario es una labor ardua ya que se deben considerar parámetros ambientales y geotécnicos, por tal motivo este proyecto busca fomentar la idea de construir rellenos sanitarios sobre uno ya existente, teniendo en cuenta los parámetros de los residuos sólidos que contribuyen a su estabilidad y resistencia.

Se diseñaron diferentes escenarios geotécnicos con pendientes considerables para taludes en altura y pendiente, logrando determinar cuál es la condición más crítica para cada caso y como la estabilidad del talud se ve afectada por la disminución de los parámetros a lo largo del tiempo.

Se realizaron 936 modelaciones para diferentes condiciones del suelo, obteniendo factores de seguridad que permitieran determinar las mejores alternativas de diseño y construcción para los rellenos sanitarios, de igual manera se hizo un análisis sensitivo que permitiera determinar cómo es el comportamiento de parámetros como la cohesión y el ángulo de fricción bajo ciertas condiciones del suelo y fallas propuestas.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Un relleno sanitario es una técnica de disposición final de los residuos sólidos en el suelo que permite recuperar terrenos que se consideraban improductivos o marginales transformándolos en áreas útiles para la construcción de parques, zonas recreativas o áreas verdes. Esta técnica utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en un área lo más estrecha posible, cubriéndola con capas de tierra diariamente y compactándola para reducir su volumen, dentro de este proceso es importante tener en cuenta: el manejo de los lixiviados producidos por la descomposición natural de la basura, un buen sistema de drenaje, identificar el índice de permeabilidad y la localización de los pozos de monitoreo.

La estabilidad de los taludes es un factor importante en el campo de la geotecnia, pero más aún cuando se deben tratar casos especiales como los taludes de los rellenos sanitarios que en su mayoría son conformados por residuos sólidos, los cuales presentan diferente comportamiento de acuerdo a su composición y descomposición a corto o largo plazo lo que puede llegar a ocasionar distintos tipos de falla. Existen diferentes tipos de movimientos en masa que se presentan en los taludes conformados por estos materiales, como deslizamientos rotacionales y trasnacionales, desprendimientos, avalanchas y fallas de cuerpo y de fondo, que afectan a una masa considerable del suelo y la base de apoyo, estos movimientos son debido a cambios climáticos, al relieve, la historia tectónica y la geología del lugar, ocasionando la disminución de la resistencia al corte del talud, lo cual puede ocasionar pérdidas humanas e importantes daños económicos.

La biodegradabilidad de la basura produce altos contenidos de materia orgánica y altas humedades, lo cual ocasiona una degradación rápida que afecta los desechos sólidos y la estabilidad del talud donde fueron compactados, estos residuos generan vacíos, gases y lixiviados que pueden aumentar la presión de poros, por lo tanto generar una disminución en los esfuerzos efectivos, como lo ocurrido en el relleno de Doña Juana en septiembre de 1997, donde la degradación bioquímica de los residuos sólidos y el aumento de los volúmenes de líquidos internamente en la masa afectaron la estabilidad del talud a lo largo del tiempo produciendo “un

deslizamiento que afectó a los habitantes de las localidades aledañas a Usme, Ciudad Bolívar, San Cristóbal, Tunjuelito y Rafael Uribe.”¹

Este proyecto consistió en estudiar el comportamiento geotécnico de los taludes conformados por residuos sólidos identificando sus propiedades físicas, químicas y mecánicas debido a que por medio de estas propiedades se logró determinar un mejor tratamiento y disposición final de los residuos, que garantice la vida útil del talud donde serán compactados.

Es importante tener en cuenta que son residuos heterogéneos debido al estado físico en el que se encuentran; se presentan líquidos, sólidos y gaseosos y de acuerdo al manejo, se clasifican en peligrosos, inertes, tóxicos o no peligrosos; los residuos sólidos son provenientes de la viviendas, comercio, industria, instituciones entre otros más sitios generadores de desechos y que su comportamiento geotécnico no es ideal como el de un suelo en el cual puede existir continuidad, linealidad, isotropía, homogeneidad y elasticidad con residuos tratados por un proceso acelerado de descomposición dando como resultado un producto más estable.

Por lo tanto la pregunta de investigación del presente proyecto es:

¿Cómo es el comportamiento geotécnico de los taludes conformados por residuos sólidos en rellenos sanitarios?

¹ JUSTICIA GLOBAL. catástrofe ambiental/ deslizamiento relleno sanitarios Doña Juana. Enero 2014 [en línea] [consultado: 02-11-2015]. Disponible en: <http://justiciaglobal.org.co/?p=24>

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General:

- Evaluar el comportamiento geotécnico de los taludes conformados por residuos sólidos en rellenos sanitarios.

2.2 Objetivos Específicos:

- Identificar los parámetros de resistencia que tienen los residuos sólidos.
- Analizar las causas y factores que ocasionan la inestabilidad de los taludes conformados por residuos sólidos.
- Determinar los factores de seguridad para diferentes escenarios geotécnicos y conformación de taludes.
- Establecer la relación existente entre los parámetros de presión de poros y el factor de seguridad para diferentes configuraciones de conformación de taludes.

3 JUSTIFICACIÓN

En Colombia se generan 27.300 toneladas de basura al día y al año 10.037.500 toneladas, la ciudad de Bogotá genera 6.500 toneladas de residuos sólidos diariamente, de los cuales 6.000 de ellas llegan al relleno sanitario Doña Juana; de estos residuos el 70% es reutilizable donde solo un 10% se recupera gracias a los recicladores. De acuerdo a esta cifra, la alarma crece en el país por el estado de los rellenos sanitarios ya que al 69% de ellos les quedan menos de 5 años de vida útil.

Normalmente una persona genera 1.0 kilogramo de basura diario y cada vez se reducen más los espacios para depositarla, por tal razón es importante conocer aspectos como la conservación y mejoramiento continuo de los rellenos sanitarios. La contaminación que generan los lixiviados, los malos olores y la generación de plagas como zancudos, moscas y roedores, es algo que no solo afecta el medio ambiente sino también la salud de las personas que viven a sus alrededores.

Encontrar un lugar que cumpla con los requisitos necesarios para funcionar como un relleno sanitario requiere tiempo entre licencia ambiental y trámites pertinentes como seleccionar el lugar con un espacio aproximado de 300 hectáreas para su implementación en una ciudad capital, además de la aceptación de la comunidad cercana y del previo estudio para conservar las fuentes hídricas.

El tiempo de operación de un relleno sanitario es corto, por tal razón la geotecnia estudia todos los parámetros como la cohesión, compresibilidad, ángulo de fricción y estabilidad de un talud conformado por residuos sólidos, que ayuden a aumentar la resistencia del relleno y determinar su vida útil, un relleno sanitario bien construido y operado minimizará problemas a futuro.

Es importante tener en cuenta que estos materiales son heterogéneos, aproximadamente un 69% son residuos de origen orgánico, el restante corresponde a residuos hospitalarios, baterías y equipos electrónicos, toallas, plásticos e incluso residuos peligrosos como el aceite, los cuales requieren un cuidado especial antes de ser almacenados y la ciudad aún no cuenta con un esquema especial de manejo para este tipo de residuos.

Esta investigación evaluó el comportamiento del talud conformado por residuos sólidos, buscando métodos que ayuden a su conservación y mejoramiento continuo, considerando que cada vez son más escasos los

lugares aptos para la construcción de un nuevo relleno sanitario y donde lo ideal sería mejorar los existentes alargando su funcionamiento y evitando posibles deslizamientos.

4 ANTECEDENTES

La disposición final de los residuos sólidos para muchos países ha sido un tema de gran importancia, no solo porque afecta el medio ambiente, sino también porque cada día los espacios aptos para almacenarlos son más reducidos, por este motivo, se han realizado diversos estudios que ayudan a su conservación.

A nivel internacional, podemos resaltar la investigación desarrollada en Chile donde un grupo de ingenieros realizaron una investigación llamada “Metodología Integrada para rehabilitar rellenos sanitarios y tranques de relave”, realizado entre 2001 y 2004 en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, la investigación consideraba entre sus objetivos, “evaluar las condiciones de estabilidad de un relleno sanitario chileno a través de Métodos de equilibrio límite, a partir del análisis de sus parámetros resistentes y su condición mecánica.”²

Este trabajo fue realizado por los ingenieros Juan Palma, Raúl Espinace y Pamela Valenzuela y su objetivo fue recuperar los rellenos ya existentes, construyendo rellenos sanitarios en altura; la estabilidad se estudió por medio de métodos de equilibrio límite como el de Bishop modificado, Janbú y Spencer aplicando programas computacionales especializados, los cuales suponen una superficie de deslizamiento circular que se ajusta en la mayor parte de deslizamientos en suelos, ellos concluyeron que el principal causante de la baja estabilidad de los rellenos sanitarios es la generación de los lixiviados más aun en rellenos antiguos que presentan saturación, los cuales producen presión intersticiales disminuyendo los parámetros mecánicos, también recomiendan realizar drenes horizontales de alivio, y determinar niveles piezómetros que certifiquen el factor de seguridad durante las etapas de operación y cierre.

Años más tarde, en México se realizó una investigación sobre la descomposición de los residuos sólidos ya sea en rellenos sanitarios o en botaderos a cielo abierto, debido a que si no se realiza un adecuado tratamiento, esto puede causar efectos nocivos al ambiente y a la salud. De

² PALMA, G Juan, ESPINACE A. Raúl, Valenzuela T. Pamela. Análisis de la estabilidad de rellenos sanitarios. En: V-Palma-chile 2005, pág. 1.

aquí parte la importancia de una buena operación de los rellenos sanitarios en sitios adecuados donde se minimicen toda clase de riesgos contra el ser humano.

Dentro de esta investigación “Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en sitios de disposición final” realizada por los señores Gabor Kiss y Guillermo Encarnación en el año 2006, de determinó el proceso que ocurre durante la degradación de los residuos sólidos en los sitios de disposición final, donde influyen las condiciones climáticas, las propiedades fisicoquímicas de los residuos y la edad del relleno, cuyos factores inevitablemente afectan la estabilidad del suelo.

La descomposición de los residuos genera lixiviados y biogás, los cuales de acuerdo a esta investigación de cierta manera pueden ser aprovechados, el factor principal que promueve la generación de estos productos es el agua pluvial que atraviesa la materia depositada, “estableciendo así las condiciones favorables para los procesos fisicoquímicos y bioquímicos de la descomposición”³ tanto el lixiviado como el biogás requieren un tratamiento importante, los cuales bajo tratados internacionales, se busca que su impacto sea lo menor posible reduciendo las emisiones de metano y bióxido de carbono y aprovechando el biogás para la producción de energía eléctrica, ya que de acuerdo a cálculos teóricos, una tonelada de residuos sólidos urbanos puede generar hasta 223 m³ de biogás y un metro cúbico de esta sustancia logra generar 6 horas de luz, mientras que el lixiviado se busca recircular a la superficie del terreno con el objeto de acelerar el proceso de degradación en el cuerpo de los residuo, esto se logra con altos sistemas de drenaje, de esta manera se lograría un talud más estable, con menor cantidad de sustancias que afecten su resistencia portante.

A nivel nacional durante el año 2011 en Medellín, se realizó una investigación llamada “Análisis de estabilidad y probabilidad de falla de dos taludes de suelo tropical en la autopista Medellín - Bogotá” que buscó evaluar la estabilidad para diferentes inclinaciones de dos taludes de suelos tropicales aplicando métodos probabilísticos que estiman no solo el factor de seguridad si no también la probabilidad de falla, el índice de confianza y

³ KISS, Gabor y AGUILAR, Encarnación. Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final, En: Gaceta ecológica Agosto 2005. pág. 12.

el parámetro del suelo de mayor peso en la estabilidad; “con el fin de determinar el talud de corte más seguro en la ejecución de este tramo de vía”⁴, de esta investigación se concluyó que la disminución de la resistencia en los suelos está dada por la pérdida de la cohesión. Mediante el método probabilístico, para el caso del factor de seguridad de la estabilidad de un talud, se determinó su curva de distribución a partir de las variables de cohesión, ángulo de fricción y peso específico, logrando de esta manera determinar la probabilidad de ruptura definida como la parte del área bajo la curva de distribución de probabilidad del factor de seguridad menor que 1.0.

Los ingenieros a cargo de la investigación evidenciaron una alta probabilidad de ruptura del talud de corte cuando se encuentra en estado saturado, para casi todas las inclinaciones analizadas, lo que demuestra la necesidad de “construcción de drenes en el talud que permitan una probabilidad más cercana a la reflejada en la muestra en estado no saturado.”⁵

A nivel local y teniendo en cuenta el deslizamiento ocurrido en el relleno sanitario Doña Juana, se puede rescatar la investigación realizada por el ingeniero Héctor Collazos en el año 1998 sobre el “Deslizamiento de basura en el relleno sanitarios Doña Juana” donde después de una ardua selección del lugar entre 84 sitios preclasificados, finalmente fue Doña Juana el seleccionado gracias a que contaba con una gran extensión y capacidad para recibir basuras, presentaba una zona de muy baja actividad agrícola y sobre todo tenía una alta capacidad de recibir residuos peligrosos. El ingeniero Collazos, dentro de su investigación tuvo en cuenta los estudios realizados por el consorcio INGESAM/URS quienes encontraron los posibles daños en el área de influencia de aguas, aire, suelos y población, concluyendo que “el proyecto inicial consideraba una planta de tratamiento de lixiviados que nunca se construyó.”⁶

⁴ ESCOBAR, L. Javier, GONZÁLEZ, Yamile. Análisis de estabilidad de falla de dos taludes de suelo tropical en la autopista Medellín – Bogotá. Junio 2012 [en línea] [consultado: 11-03-2015]. Disponible en: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/31253/43364>. Pág. 3

⁵ Ibíd., Pág. 8

⁶ COLLAZOS, Héctor. Deslizamiento de basuras en el relleno sanitario Doña Juana. Enero 1998. [en línea] [consultado: 09-11-2015]. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/gtz/deslbasu/deslbasu.html>.

El relleno sanitario inicio su operación el 01 de noviembre de 1988, la capacidad de cada uno de los niveles dependía de la conformación final de las terrazas y de la topografía del terreno. El 27 de septiembre de 1997 se produjo el deslizamiento tras haberse evidenciado ciertos movimientos en bloque, se estima que fueron unas 750.000 a 1.000.000 de toneladas que se deslizaron, cubriendo aproximadamente 10 hectáreas, entre estas parte del río Tunjuelito y se declaró estado de emergencia y alerta roja en el relleno sanitario Doña Juana.

Para el ingeniero Collazos las causas del deslizamiento de acuerdo a su investigación fueron las siguientes: baja recirculación de lixiviados en el interior de la masa y deficiente drenaje, el líquido se fue acumulando en los vacíos del Relleno Sanitario, haciendo subir la posición del nivel de la superficie libre y aumentando las presiones neutras, por otro lado, en ningún momento, fue considerada la existencia de súper - presión hidrostática a partir de la compactación de la basura dispuesta, derivada en parte, por la carga de cada celda y de las que están superpuestas, tampoco “ se tuvo en cuenta las consideraciones iniciales de construir la planta de tratamiento de los lixiviados recomendada por los estudios previos realizados.”⁷ Fueron muchas las causas por las cuales se presentó el deslizamiento y de acuerdo a la investigación realizada por el ingeniero Collazos, es importante tener en cuenta antes de operar un relleno sanitario los caudales de todos los efluentes, análisis físicos y químicos y la cantidad de basura que se colocará, para prevenir desastres como el presentado en el relleno sanitario Doña Juana.

⁷ Ibíd. Pág. 7

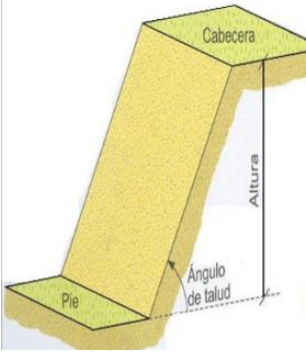
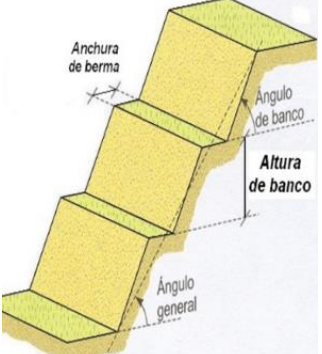
5 MARCO REFERENCIAL

5.1 MARCO CONCEPTUAL

Se conoce como talud a la pendiente o inclinación que registra una pared o superficie respecto a la horizontal. Los taludes se construyen con la pendiente más elevada que permite la resistencia del terreno, manteniendo unas condiciones aceptables de estabilidad, se construyen en ambos lados de las vías (tanto en excavaciones como en terraplén) con una inclinación tal que garanticen la estabilidad de la obra. El diseño de los taludes es uno de los aspectos más importantes de la ingeniería ya que está presente en la mayoría de las actividades constructivas.

La tabla No 1, muestra el tipo de talud dependiendo su geometría y tipo de pendiente.

Tabla 1 Tipos de taludes

TALUD CON ANGULO UNIFORME	TALUD ESCAVADO DE FORMA ESCALONADA CON BERMAS Y BANCOS
	

Tomado de: <http://es.slideshare.net/Irveen/taludes>. En línea (08/10/2015)

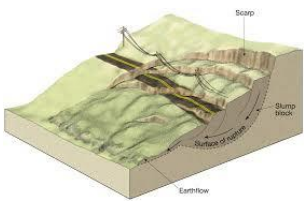
La inestabilidad de los taludes se traduce en una serie de movimientos, que se dan con base a distintos criterios. Hay actividades que se originan con mayor frecuencia de acuerdo a los mecanismos que producen diferentes materiales.

Teniendo en cuenta la geometría de los taludes, se presentan varios tipos de movimientos que se originan dependiendo de los diferentes materiales y composición geotécnica, a continuación se estudiará los tipos de movimientos en masa.

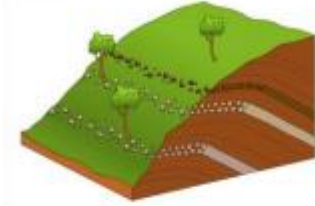
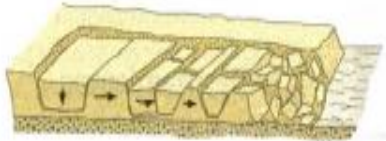
5.1.1 Tipos de movimiento en masa

Un movimiento en masa es un desplazamiento de suelo o roca en dirección en que desciende la ladera (ver tabla No 2), el reconocimiento y clasificación del tipo de movimiento es de gran importancia ya que puede condicionar el análisis y conclusiones de control y estabilización del mismo. Dentro de los tipos de movimientos en masa, están los siguientes:

Tabla 2 Tipos de movimiento en masa

TIPO DE MOVIMIENTO EN MASA	IMAGEN
CAÍDAS Son desprendimientos de suelo o rocas en pendientes muy inclinadas causados por la acción de la gravedad. El movimiento ocurre a gran velocidad.	
DESLIZAMIENTO Es el movimiento pendiente abajo de una masa de suelo o rocas cuando el esfuerzo de corte excede el esfuerzo resistente del material. La superficie de movimiento tiende a ser circular o de forma compuesta. El deslizamiento se puede dar rotacionales o traslacionales. Rotacionales: Movimiento debido a fuerzas que causan un giro alrededor de un punto situado arriba del centro de gravedad. La superficie de rotura es cóncava hacia arriba.	 Rotacional 

Traslacionales: Ocorre a largo de superficies planas, en este tipo de deslizamiento la masa de terreno se desplaza hacia afuera y abajo, con pequeños movimientos de rotación. Cuando este tipo de deslizamiento ocurre en rocas es muy lento, en suelos acelera con la lluvia y puede ser muy rápido.	Traslacional 
FLUJOS Son movimientos de materiales gruesos y finos que son arrastrados por lluvias acumuladas a lo largo de cauces, o superficies de falla propensas a esta situación. Flujos de lodo Es común que se formen cuando una masa de detritos se ablanda por acción del agua hasta tener una consistencia blanda y fluida, poniéndose en movimiento y alcanzando velocidades altas, la intensidad depende de la duración de las lluvias y de la pendiente del terreno. Flujos de tierra Son movimientos de velocidad variable, lentos de carácter viscoso, pierden su estabilidad estructural por efecto del agua. Flujos de detritos Son movimientos de velocidad variable entre rápidos o muy rápidos, se pueden desarrollar a partir del cuerpo de otros tipos de deslizamiento, para formar movimientos complejos.	Flujos de lodo  Flujos de tierra  Flujos de detritos 

AVALANCHA Movimiento de grandes masas de tierra, fragmentos de rocas a gran velocidad, en ocasiones superiores a 50m/s, es un movimiento muy rápido donde se unen las rocas, la arena, el agua y el aire.	
VOLCAMIENTO Es el deslizamiento más complejo que se presenta generalmente en macizos rocosos, sobre un punto o eje situado debajo del centro de gravedad de la masa deslizada. Se sabe en qué circunstancias ocurre pero no hay manera de evaluar su factor de seguridad.	
REPTACIÓN Movimiento superficial de una ladera suavemente inclinada del orden de varios centímetros por año y sin una superficie de falla definida. Se manifiesta en forma de ondulaciones y corrimientos casi imperceptibles de la piel de suelos y colinas.	
PROPAGACIÓN LATERAL El movimiento se distribuye extendiéndose lateralmente en una masa fracturada.	

Tomado de: http://www.segurosbolivar.com.co/wps/wcm/connect/e8e9ba0e-d2d2-471e-921a-13373ad37df2/Guia_Movimientos_en_Masa.pdf. En línea (13/10/2015)

Los causantes de un movimiento en masa pueden ser los siguientes:

- Características y propiedades de las rocas y suelos.
- Topografía cuando existen pendientes fuertes.
- Meteorización de la roca y grado de fracturamiento, por actividad humana y de la naturaleza.
- Actividad sísmica.
- Altas precipitaciones.
- Sobresaturación del terreno por el agua.
- Deforestación y eliminación de la capa vegetal.
- Cortes en ladera y falta de canalización de aguas producto de la actividad humana.

5.1.2 Factores detonantes y desencadenantes

Las áreas con una determinada climatología o ciertas condiciones de sismicidad y vulcanismo, constituyen entornos que desarrollan factores condicionantes y desencadenantes de los movimientos. “El agua constituye el agente natural con mayor incidencia en desatar inestabilidades y la sismicidad constituye un factor de generar grandes deslizamientos, pudiendo ocasionar daños graves.”⁸

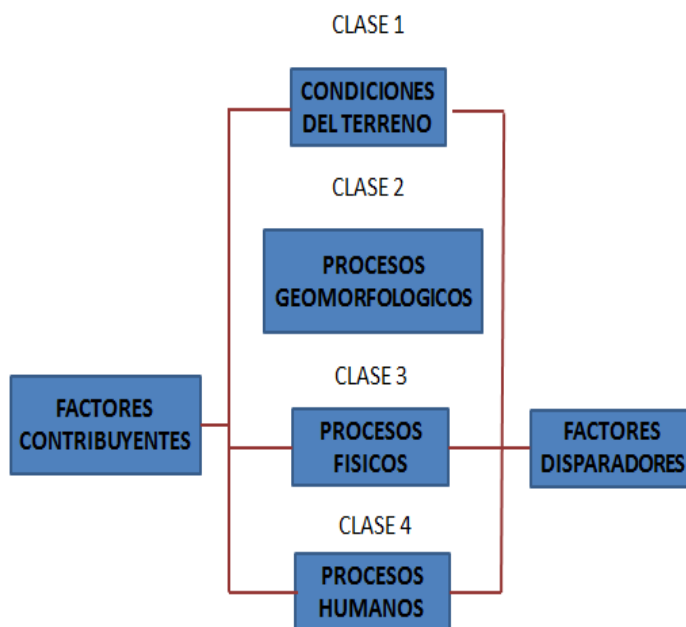
En el estudio del comportamiento de un talud y en especial al analizar el tratamiento correctivo en el caso de un deslizamiento ya ocurrido, es esencial reconocer los factores que contribuyeron y los que causaron al final la falla, estos factores se pueden clasificar en dos categorías.

- ✓ Los que tienden a incrementar los esfuerzos cortantes
- ✓ Los que producen disminución en la resistencia al corte

La Figura No 1, muestra los tipos de factores causantes de deslizamientos de acuerdo con su origen.

⁸ AYALA, F. y ANDREU. P. Manual de ingeniería de taludes. 1ra Edición .Madrid. Instituto geológico y minero de España, 2006 Pág. 27.

Figura 1 Factores causantes de deslizamientos



Tomado de: Manual de estabilidad de taludes pág. 30

5.1.3 Condiciones del terreno

Las condiciones del terreno y sus características se obtienen de una exploración mediante perforaciones, trincheras, ensayos de campo y laboratorio.

- ✓ Material de comportamiento plástico débil
- ✓ Material sensible
- ✓ Material colapsado
- ✓ Material meteorizado
- ✓ Material fallado por corte
- ✓ Material fisurado o con discontinuidades
- ✓ Discontinuidades orientadas desfavorablemente (fallas)
- ✓ Contraste de rigidez

5.1.4 Procesos geomorfológicos

Los procesos geomorfológicos o cambios en la forma del terreno se documentan por medio de los mapas, fotografías aéreas e investigaciones a lo largo del tiempo.⁹

- ✓ Movimiento tectónico
- ✓ Actividad volcánica
- ✓ Avance y retroceso de glaciares
- ✓ Erosión de la pata del talud por glaciares
- ✓ Socavación de la pata del talud por corrientes de agua
- ✓ Socavación de las márgenes de los ríos
- ✓ Erosión subterránea
- ✓ Remoción de la vegetación

5.1.5 Procesos físicos

Los procesos físicos del medio ambiente pueden documentarse en el sitio mediante una adecuada instrumentación como medidores de precipitación sismógrafos y piezómetros.

- ✓ Lluvias intensas de corta duración
- ✓ Descongelamiento rápido de nieves
- ✓ Precipitaciones prolongadas
- ✓ Terremotos
- ✓ Erupción volcánica
- ✓ Rompimiento de lagos en cráteres
- ✓ Deshielo
- ✓ Meteorización por congelamiento
- ✓ Meteorización por contracción

⁹ GARCIA, Manuel. Manual de estabilidad de taludes. Santa fe de Bogotá. Editorial de la escuela Colombiana de ingeniería 1998. Pág. 30.

5.1.6 Procesos humanos

Los procesos humanos pueden documentarse observando o consultado los registros de construcción y excavación del lugar y mediante una observación cuidadosa de la población a lo largo del tiempo

- ✓ Excavación de la pata del talud
- ✓ Carga de la cresta del talud
- ✓ Desembalse rápido de presas
- ✓ Irrigación
- ✓ Mantenimiento defectuoso del sistema de drenaje
- ✓ Escapes de agua de las tuberías
- ✓ Remoción de la vegetación por deforestación
- ✓ Explotación minera
- ✓ Vibración artificial (tráfico, hincado de pilotes, maquinaria pesada)

5.1.7 Métodos de análisis de estabilidad de taludes

Considerando los tipos de movimientos en masa, los cuales son causas naturales o por intervención del ser humano, es necesario evaluar métodos de estabilidad de taludes, realizando un análisis sobre el comportamiento de los mismos. El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas del equilibrio límite. “Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, y arroja como resultado un factor de seguridad al comparar las fuerzas o momentos resistentes en la masa del suelo con respecto a las fuerzas o momentos actuantes. Sin embargo, este método no requiere información sobre las propiedades esfuerzo-deformación del suelo, dado que no considera este tipo de análisis.”¹⁰

El análisis de equilibrio límite se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Generalmente, los métodos son de iteración

¹⁰ ALE, José. Análisis de estabilidad de taludes. Universidad nacional de ingeniería [en línea] [consultado: 16-11-2015]. <http://es.scribd.com/doc/53170729/ANALISIS-DE-ESTABILIDAD-DE-TALUDES#scribd> pág. 2

y cada uno de los métodos posee un cierto grado de precisión (ver tabla No 3).

Tabla 3 Métodos de estabilidad de taludes

Método	Ventajas	Desventajas
Método ordinario de las dovelas Fellenius (1927)	✓ Solo es válido para roturas circulares ✓ Satisface el equilibrio de momentos	✓ No satisface el equilibrio de fuerzas ✓ No tiene en cuenta la fuerza entre dovelas
Método de Bishop simplificado (1955)	✓ Solo es válido para roturas circulares	✓ No cumple el equilibrio de fuerzas horizontales ni de momentos en dovelas ✓ No tiene en cuenta la variación de fuerzas
Método Janbu Simplificado (1957)	✓ Emplea un factor de corrección para mejorar resultados ✓ Obliga a que se cumpla el equilibrio de fuerzas horizontales ✓ Es válido para cualquier curva de rotura	✓ No satisface equilibrio de momentos
Método de Morgenstern y Price (1965)	✓ Es válido para cualquier curva de rotura ✓ Satisface todas las condiciones de equilibrio ✓ Permite variar la orientación de las fuerzas laterales entre dovelas	✓ La ecuación de equilibrio no se satisfacen para cada punto de la masa de suelo. ✓ No satisface la regla de flujo, las condiciones de compatibilidad ni las relaciones constitutivas pre-falla.
Método lowe y Karafiath (1960)	✓ Es válido para cualquier curva de rotura ✓ Asume que las fuerzas entre partículas están inclinados a un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas	✓ No satisface equilibrio de momentos

Método de Spencer (1967)	✓ Es válido para cualquier curva de rotura ✓ Satisface todas las condiciones de equilibrio ✓ Considera todas las fuerzas laterales entre dovelas paralelas	✓ La ecuación de equilibrio no se satisfacen para cada punto de la masa de suelo. ✓ No satisface la regla de flujo, las condiciones de compatibilidad ni las relaciones constitutivas pre-falla.
Método de cárter (1971)	✓ Da resultados conservadores razonablemente exactos ✓ Es válido para cualquier curva de rotura	✓ No cumple equilibrio de fuerzas horizontales y de momentos en dovelas
Método de Sarma (1973)	✓ Satisface todas las condiciones de equilibrio ✓ Desarrolla una relación entre el coeficiente sísmico y el FS. ✓ Utiliza una función de distribución de fuerzas entre dovelas.	

Tomado de:

http://www.academia.edu/12465089/ESTABILIDAD_DE_TALUDES_Y_LADERAS._AN%C3%81LISIS_CUANTITATIV
En línea: (22/10/2015)

5.1.8 Rellenos sanitarios

Un relleno sanitario es una obra de ingeniería destinada a la disposición final de los residuos sólidos domésticos, los cuales se disponen en el suelo, en condiciones controladas que minimizan los efectos adversos sobre el medio ambiente y el riesgo para la salud de la población (Imágenes No 1 y No 2). La obra de ingeniería consiste en preparar un terreno, colocar los residuos extenderlos en capas delgadas, compactarlos para reducir su volumen y cubrirlos al final de cada día de trabajo con una capa de tierra de espesor adecuado. (Ver imagen No 3)

Imagen 1 Relleno sanitario

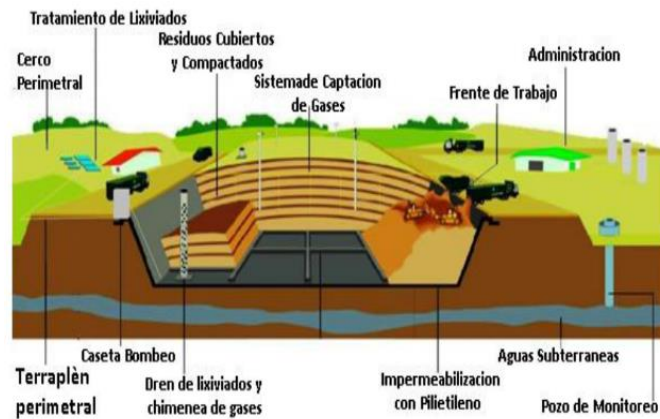


Imagen 2 Relleno sanitario en operación



Tomado de: <https://www.google.com.co/search?q=rellenos+sanitarios&espv=2&biw=y>
<https://www.google.com.co/search?q=rellenos+sanitarios&espv=2&biw=1280&bih=879>. En línea (22/10/2015)

Imagen 3 Relleno sanitario en operación



Tomado de: <https://www.google.com.co/search?q=rellenos+sanitarios&espv=2&biw=1280&bih=879&sour>. En
 línea (22/10/2015)

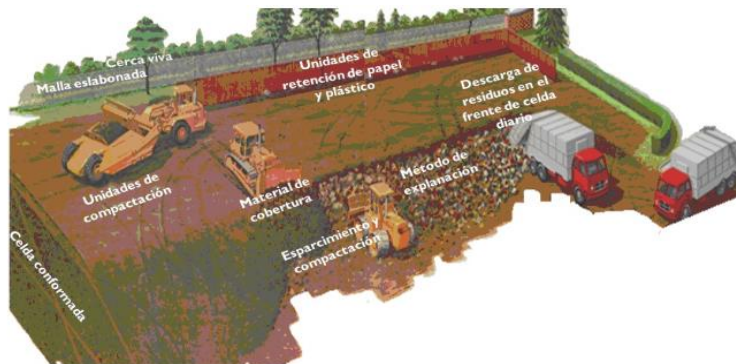
5.1.8.1 Tipos de rellenos sanitarios

En relación con la disposición final de los residuos sólidos y teniendo en cuenta la población, se proponen tres tipos de rellenos sanitarios,

5.1.8.2 Relleno sanitario mecanizado

Los rellenos sanitarios mecanizados (Imagen No 4), son principalmente para poblaciones que generan más de 40 Tn/día de residuos sólidos y utilizan maquinaria especializada para el manejo de la disposición final y métodos constructivos.

Imagen 4 Relleno sanitario mecanizado



Tomado de: <https://www.google.com.co/search?q=relleno+sanitario+mecanizado&eh>. En línea (22/10/2015)

5.1.8.3 Relleno sanitario Semi mecanizado

Los rellenos sanitarios semi mecanizados son construidos para poblaciones que generan hasta 40 Tn/días y utilizan maquinaria y herramientas adaptadas para el trabajo. (Ver imagen No 5).

Imagen 5 Relleno sanitario semi mecanizado



Tomado de: <https://www.google.com.co/search?q=relleno+sanitario+mecanizado+is.ch>. En línea (22/10/2015)

5.1.8.4 Relleno sanitario manual

Los rellenos sanitarios manuales, son destinados para poblaciones que genera menos de 15 ton/día de residuos sólidos y no utilizan maquinaria de ningún tipo únicamente herramientas. (Imagen No 6).

Imagen 6 Relleno sanitario manual



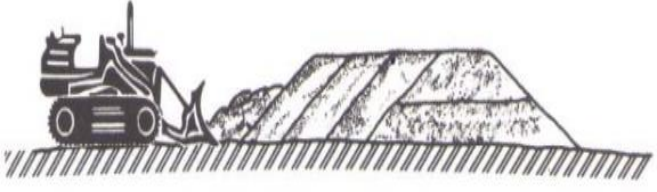
Tomado de:

<https://www.google.com.co/search?q=relleno+sanitario+mecanizado&espv=2&biw=1280&bih=879&tbm=isch>.
En línea (22/10/2015).

5.1.8.5 Métodos de construcción de rellenos sanitarios

El método constructivo y la operación de un relleno sanitario están determinados principalmente por la topografía del terreno, aunque dependen también del tipo de suelo y de la profundidad del nivel freático. Existen tres maneras básicas de construir un relleno sanitario, mostrados en la tabla No 4

Tabla 4 Métodos de construcción de rellenos sanitarios

Relleno sanitario tipo área	
Normalmente se emplea cuando se dispone de terrenos con depresiones naturales y artificiales, canteras, pozos pantanosos	

Relleno sanitario tipo zanja o trinchera Es uno de lo más prácticos y apropiados, ya que su operación es sencilla y el mismo material excavado sirve de recubrimiento	
Relleno sanitario tipo combinado o rampa Se opera de forma similar a los rellenos de área y zanja, los desperdicios descargados se extienden sobre una rampa y se cubren con una capa de material de 0.15m de espesor.	

Tomado de: http://www.bvsde.paho.org/cursoa_rsm/e/unidad3.html. En línea (22/10/2015).

5.1.8.6 Principios básicos para el funcionamiento del Relleno Sanitario

Se considera oportuno resaltar las siguientes prácticas básicas (ver figura No 2) para la construcción, operación y mantenimiento de un relleno sanitario.

Figura 2 Principios básicos para la operación de un relleno sanitario



Tomado de: http://www.bvsde.paho.org/cursoa_rsm/e/unidad3.html. En línea (23/10/2015).

El relleno debe contar con:

- ✓ Una buena compactación de los desechos sólidos, antes y después de cubrirlos con tierra.
- ✓ Cubrimiento diario de la basura con una capa de tierra o material similar.
- ✓ Controlar con drenajes y otras técnicas los líquidos o percolados y los gases que produce el relleno, para mantener las mejores condiciones de operación y proteger el ambiente.
- ✓ Evitar por medio de canales y drenajes que el agua de lluvia ingrese al relleno sanitario.
- ✓ Una supervisión constante, tanto de los administradores como de las organizaciones comunales.

5.1.8.7 Operación y mantenimiento del relleno sanitario

El relleno sanitario se debe llevar a cabo siguiendo un plan general de operaciones preestablecidas o bajo la guía de un manual de operación, el cual debe ser flexible para que las personas encargadas pueda actuar según su criterio cuando se generen situaciones inesperadas, como cambios de clima o emergencias. La basura y el material de cubrimiento deben ser descargados solo en el frente de trabajo autorizado, se recomienda que los residuos no se depositen en la parte inferior del talud sino desde la parte superior de la celda ya terminada, a fin de facilitar el trabajo y poder así conformar la nueva celda.

“El horario de operación del relleno sanitario, será impuesto por el programa de recolección. Es posible, sin embargo que las prácticas de la recolección se acomoden a la operación del sitio, generalmente los sitios de disposición final son abiertos de las 6 a.m. a las 6 p.m., las horas de operación deben tomar en consideración las condiciones de tráfico local.”¹¹

Dar mantenimiento a una obra es efectuar acciones para conservar la funcionalidad de sus equipos e instalaciones, y en un relleno sanitario es muy importante realizarlo adecuadamente, pues de no ser así se ocasionaría:

¹¹ JARAMILLO, Jorge. Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Universidad de Antioquia, 2002. Pág. 157.

- ✓ Graves daños al medio ambiente y con ello rechazo a la obra por parte de la población.
- ✓ Incumplimiento de los planes y programas de trabajo.
- ✓ Fallas en el equipo o en las instalaciones y con ello encarecimiento de la obra.

Por todo lo anterior, se deben seguir recomendaciones para el mantenimiento de: los equipos, los espacios de trabajo, los vehículos, los caminos, la báscula, la cerca perimetral, las oficinas, área de servicio, áreas verdes, sistema de monitoreo, y cobertura final.

El costo de mantenimiento de la vía de acceso y el camino interno en el relleno sanitario es menor que el de la reparación por daño de los ejes y resortes o que el deterioro del vehículo recolector ocasionado por el mal estado de la carretera o un volcamiento. El frente de trabajo se debe mantener ordenado y sin material disperso, la vía de acceso y el camino interno al frente de trabajo, a las redes de drenaje pluvial y a la superficie terminada del relleno deben mantenerse en adecuadas condiciones de operación, una vez concluidas las labores diarias, las herramientas deberán dejarse limpias y, en caso de daños, deberán ser reparadas o sustituidas a la mayor brevedad.¹²

La operación y el mantenimiento adecuado de un relleno sanitario es necesario para:

- ✓ Evitar que el relleno sanitario se convierta en un tiradero a cielo abierto.
- ✓ Reducir los impactos negativos potenciales en aire, agua y suelo.
- ✓ Minimizar o eliminar los impactos hacia las propiedades vecinas.
- ✓ Reducir los costos de operación (a largo plazo).
- ✓ Incrementar la capacidad volumétrica y ampliar al máximo la vida útil.
- ✓ Establecer y mantener buenas relaciones públicas.
- ✓ Reducir los conflictos con las instancias reguladoras o normativas.
- ✓ Reducir accidentes, demandas e indemnizaciones.
- ✓ Demostrar la capacidad operativa.

¹²Ibíd. Pág. 36

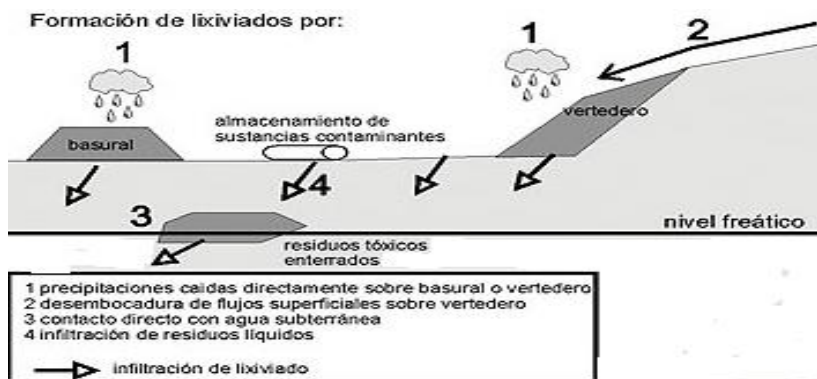
- ✓ Satisfacer las necesidades de disposición final de residuos sólidos de la región

5.1.8.8 Manejo de lixiviados

Uno de los grandes problemas que generan los rellenos sanitarios son los líquidos que discurren a través de los residuos depositados y que están contenido en ellos, es decir, los lixiviados, los cuales son Líquidos que se forman por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, mostrado en la imagen No 9, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos.

Los lixiviados producidos en los vertederos se recogen y almacenan en balsas hasta su tratamiento final (imagen No 7). “Los lixiviados del vertedero se almacenan en una balsa cubierta de hormigón, mientras que los de los vertederos residuos peligrosos y de inertes se recogen en sendas balsas impermeabilizadas con polietileno de alta densidad.”¹³

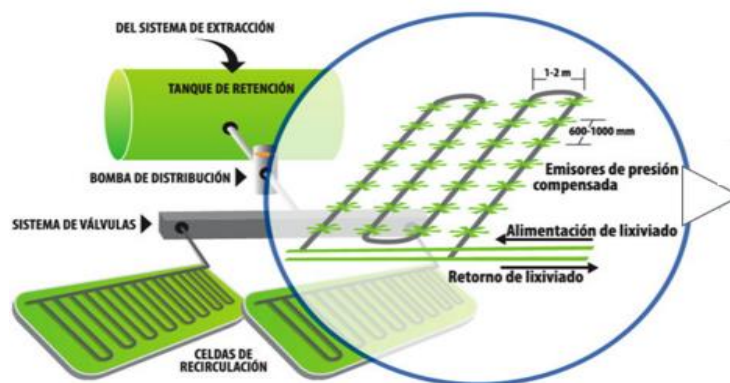
Imagen 7 Formación de lixiviado



Tomado de: <https://www.google.com.co/search?q=imagen+manejo+de+lixiviado>. En línea (23/10/2015)

¹³ COGERSA. Tratamiento de lixiviados [en línea] [consultado: 23-11-2015] <http://www.cogersa.es/metaspaces/portal/14498/19173>. pág. 1

Imagen 8 Soluciones en manejo de lixiviados



Tomado de: <https://www.google.com.co/search?q=imagen+manejo+de+lixiviados>. En línea (23/10/2015)

5.1.8.9 Generación de gases

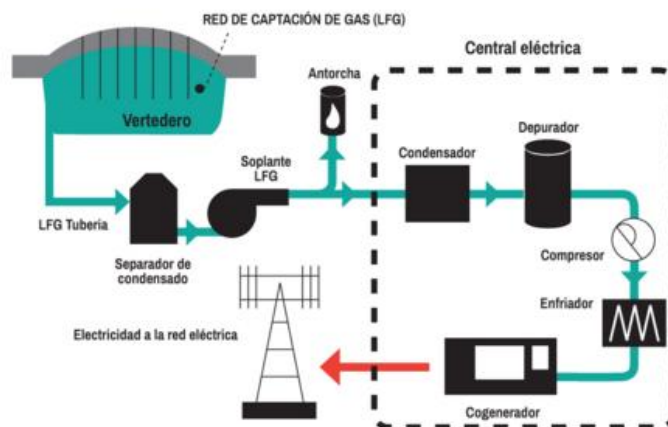
Casi todos los residuos sólidos sufren cierto grado de descomposición, pero es la fracción orgánica la que presenta los mayores cambios. Los subproductos de la descomposición están integrados por líquidos, gases y sólidos. Debido a la descomposición o putrefacción natural de los residuos sólidos, no solo se producen líquidos sino también gases y otros compuestos. La descomposición de la materia orgánica por acción de los microorganismos presentes en el medio tiene dos etapas: aerobia y anaerobia.

- ✓ La aerobia es aquella fase en la cual el oxígeno que está presente en el aire contenido en los intersticios de la masa de residuos enterrados es consumido rápidamente.
- ✓ La anaerobia, en cambio, es la que “predomina en el relleno sanitario porque no pasa el aire y no existe circulación de oxígeno, de ahí que se produzcan cantidades apreciables de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), así como trazas de gases de olor punzante, como el ácido sulfhídrico (H_2S), amoníaco (NH_3) y mercaptanos.”¹⁴

¹⁴ TAAF Consultoría integral S.C. Programa estatal para la prevención y gestión integral de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial. [en línea] [consultado: 24-11-2015] http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/gestionresiduos/pepgir_hidalgo.pdf.

El gas metano reviste el mayor interés porque, a pesar de ser inodoro e incoloro, es inflamable y explosivo si se concentra en el aire en una proporción de 5 a 15% en volumen; los gases tienden a acumularse en los espacios vacíos dentro del relleno y aprovechan cualquier fisura del terreno o permeabilidad de la cubierta para salir. Cuando el gas metano se acumula en el interior del relleno y migra a las áreas vecinas, puede generar riesgos de explosión. Por lo tanto, se recomienda una adecuada ventilación de este gas, aunque en los pequeños rellenos este no es un problema muy significativo. (Ver imagen No 9)

Imagen 9 Extracción de gas de vertedero y sistema de utilización



Tomado de: <https://www.google.com.co/search?q=imagen+manejo+de+lixiviados&biw=1024&bih>. En línea (24/10/2015)

5.1.8.10 Instrumentación y control dentro del relleno sanitario

Un relleno sanitario es una obra de ingeniería muy compleja, son vehículos que entran cargados de basura, dejan su carga y salen vacíos, hay buldóceres, compactadores, palas, cargadores, equipos de perforación, vehículos de transporte de personal, obreros, técnicos, ingenieros y administradores, en general son personas que necesitan comunicarse con frecuencia y medir constantemente una serie de parámetros para poder manejar con seguridad la compactación de los residuos sólidos.

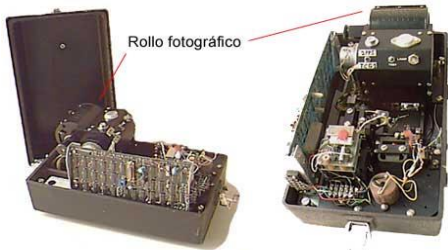
Las técnicas utilizadas en el manejo de los residuos sólidos, requieren equipos especializados para:

- ✓ Medir la compactación
- ✓ Los pesos volumétricos de la basura
- ✓ La calidad de las aguas que pasan por el relleno sanitario y las que salen
- ✓ La calidad del aire
- ✓ Una estación meteorológica para conocer los fenómenos de la atmósfera, con una historia verdadera, para tener elemento y capacidad para pronosticar el tiempo y conocer cuándo pueden dejar destapada la basura , para que aumente la evaporación o cuándo deben iniciar trabajos de restauración en alguna parte, para evitar los daños por la inclemencia de las lluvias .

Tanto en el diseño como en la operación de los rellenos sanitarios es conveniente asesorarse de un geotecnista para que analice la estabilidad de la obra, y es fundamental la implementación de equipos para el control de estabilidad del talud, para tal fin se debe contar con los siguientes elementos (tabla No 5)

Tabla 5 Implementación de elementos

PIEZÓMETROS Instrumento utilizado para medir la presión de poros o el nivel del agua en perforaciones, terraplenes, cañerías y estanques a presión.	
INCLINOMETROS Es un sistema de instrumentación que nos permite medir los desplazamientos horizontales en taludes y terrenos inestables	
EXTENSÓMETROS Es un instrumento utilizado para el monitoreo constante para prevenir cualquier tipo de falla.	

EQUIPO TOPOGRÁFICO El equipo topográfico mide ángulos, distancias y pendientes, en este caso en los rellenos sanitarios.	
ACELERÓGRAFOS Instrumento que monitorea constantemente la actividad sísmica.	
ESTACIÓN METEOROLÓGICA Una estación meteorológica es un lugar escogido adecuadamente para colocar los diferentes instrumentos que permiten medir las distintas variables que afectan al estado de la atmósfera.	
BÁSCULA Consiste en una báscula tipo camionera sin fosa con capacidad de 40 toneladas, efectúa el pesaje de los desechos que ingresan al relleno sanitario.	

Tomado de: http://www.gral.eng.br/g/images/easyblog_images/43/20130916114700-apresentacaoHectorCollazos.pdf. En línea (24/10/2015)

5.1.8.11 Alertas tempranas en los rellenos sanitarios

Dentro de un relleno sanitario es importante tener presente ciertos estados de alarma entre estos la contaminación en caso de ocurrencia, amenaza evidente de episodios de proliferación que requieran medidas inmediatas de mitigación, de igual manera alerta amarilla correspondiente a situaciones o tendencias que amenacen la calidad ambiental causando efectos adversos en la salud humana donde es necesario tomar medidas especiales de

prevención y control. El decreto 401 de 2015, hace referencia a lo mencionado anteriormente y promueve la presentación de alternativas orientadas a la menor producción de residuos sólidos en domicilios y en el espacio público para reducir impactos ambientales y en la salud

5.1.8.12 Impacto ambiental de los rellenos sanitarios.

En la operación y construcción de los rellenos sanitarios, se deben considerar los impactos asociados a los olores y los ruidos generados por el tráfico debido a la operación del relleno e igualmente las medidas para manejar estas situaciones. Las afectaciones que un sitio de disposición final de residuos sólidos puede provocar hacia la atmósfera, dependen en gran medida de la buena o mala operación del relleno sanitario, sin embargo desde la ubicación del sitio para localizar el relleno se pueden tomar medidas para prevenir la migración de contaminantes hasta las zonas pobladas. La principal afectación que un depósito de residuos sólidos puede generar en las aguas superficiales y subterráneas, son por el lixiviado producto del paso del agua de lluvia a través de los paquetes de basuras, estos lixiviados pueden llegar a contaminar los cuerpos superficiales de aguas por escurrimientos no-controlados, o bien infiltrarse a través de formaciones permeables y contaminar los mantos acuíferos.¹⁵

5.1.8.13 Post clausura de los rellenos sanitarios.

El uso futuro de un relleno sanitario depende del clima, de su localización respecto al área urbana, de su distancia de las zonas habitadas, de su extensión o área superficial y de las características constructivas. Estas últimas tienen que ver con la configuración final del relleno, la altura y el grado de compactación y, por supuesto, la capacidad económica de la población.

El terreno de un relleno sanitario clausurado se presta para desarrollar programas de recuperación paisajística y social como un parque, un campo deportivo o una zona verde. No se recomienda la construcción de

¹⁵ Greenpeace Argentina. Resumen de los impactos ambientales sobre la salud de los rellenos sanitarios. [en línea] [consultado: 24-11-2015]
<http://www.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/report/2009/9/resumen-de-los-impactos-ambien-2.pdf>

edificaciones, viviendas, escuelas ni infraestructura pesada sobre la superficie del relleno, debido a su poca capacidad para soportar estructuras pesadas, además de los problemas que pueden ocasionar los hundimientos y la generación de gases. Para la recuperación del paisaje es conveniente la siembra de plantas de raíces cortas y césped o grama. En muchos casos, después de la cobertura final, el pasto crece en forma espontánea.

5.1.8.14 Inestabilidad en rellenos sanitarios

En la etapa de operación de un relleno sanitario, se debe asegurar la correcta construcción y seguridad del mismo, para lo cual se deben integrar diferentes aspectos geotécnicos como: la estabilidad del suelo de fundación y la de los taludes, las características del material para el recubrimiento de los residuos, determinación de la resistencia del relleno así como la evolución de los parámetros resistentes con el tiempo, análisis de la compresibilidad y tiempos de la estabilización de las deformaciones en los rellenos.

“La validez y calidad de los análisis de estabilidad global de un relleno sanitario, dependen de la información obtenida relativa a las deformaciones, parámetros resistentes, presión intersticial, densidad, geometría, tipos de residuos, método de disposición, sistemas de drenaje de biogás y lixiviados, entre otros datos relevantes.”¹⁶

5.1.8.15 Hundimientos y asentamientos en los rellenos sanitarios

En el relleno sanitario se producen también hundimientos (asentamientos uniformes o fallas) que son el problema más obvio y fácil de controlar con una buena compactación; además, asentamientos diferenciales en la superficie, que con el tiempo originan depresiones y grietas de diversos tamaños, lo que causa encharcamientos de agua y un incremento de lixiviados y gases. Estos problemas dependen de la configuración y altura del relleno, del tipo de desechos enterrados, del grado de compactación y de la precipitación pluvial en la zona.

¹⁶PALMA, G Juan, ESPINACE A. Raúl, Valenzuela T. Pamela. Análisis de la estabilidad de rellenos sanitarios. Artículo 2005, pág. 2.

5.1.8.16 Reacciones que se generan en un relleno sanitario (fallas)

Los rellenos sanitarios presentan cambios físicos, químicos y biológicos, los cambios físicos más importantes están asociados con la compactación de los residuos sólidos, la difusión de gases dentro y fuera del relleno sanitario, el ingreso de agua y el movimiento de líquidos en el interior y hacia el subsuelo. El movimiento de gases es de particular importancia para el control operacional y el mantenimiento del sistema, cuando el biogás se encuentra atrapado, la presión interna puede causar agrietamiento de la cubierta y fisuras, lo que permite el ingreso de agua lluvia al interior del relleno sanitario, provocando mayor generación de gases y lixiviados. Lo anterior contribuye a que se produzcan hundimientos y asentamientos diferenciales en la superficie y que se desestabilicen los terraplenes por el mayor peso de la masa de desechos, ocasionando diferentes tipos de falla si no se toman las medidas pertinentes.¹⁷

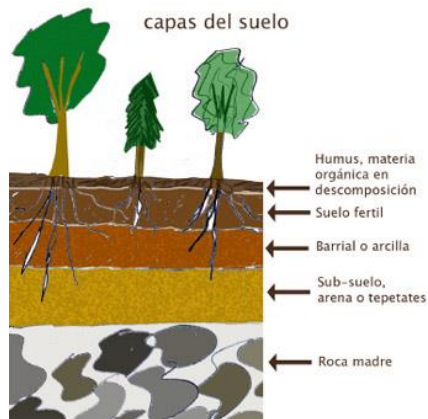
5.1.9 Investigación del subsuelo

La exploración del subsuelo es el proceso de identificar los estratos de depósito que subyacen a una estructura propuesta (imagen No 10) y sus características físicas y el propósito es obtener información para:

- ✓ Seleccionar el tipo y profundidad de una cimentación adecuada para cada estructura.
- ✓ Evaluar la capacidad de carga de una cimentación
- ✓ Estimar el asentamiento probable de una estructura
- ✓ Determinar problemas potenciales de la cimentación (por ejemplo suelo expansivo, suelo colapsable, relleno sanitario)
- ✓ Determinar la posición del nivel del agua
- ✓ Predecir la presión lateral de tierra en estructura tales como muro de contención, tabla estacas etc.
- ✓ Establecer métodos de construcción para condiciones cambiantes del subsuelo.

¹⁷ Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. [en línea] [consultado: 24-11-2015] http://www.bvsde.paho.org/cursoa_rsm/e/unidades/unidad3.pdf

Imagen 10 Capas del suelo



Tomado de: <https://www.google.com.co/search?q=exploracion+del+subsuelo&espv=2&biw=1280&bih=> En línea (26/10/2015)

La exploración del subsuelo es necesaria también para construcciones y excavaciones en el subsuelo y puede ser requerida cuando se contemplan adiciones o alteraciones de estructuras existentes.

5.1.9.1 Exploración de campo

Consiste en la ejecución de apiques, trincheras, perforaciones estáticas o dinámicas, u otros procedimientos exploratorios reconocidos en la práctica, con el fin de ejecutar pruebas directas o indirectas en el terreno y obtener muestras para ensayos de laboratorio. La exploración debe ser amplia y suficiente para garantizar un adecuado conocimiento del subsuelo hasta la profundidad afectada por la construcción.

5.1.9.2 Ensayos de laboratorios

Las muestras obtenidas de la exploración de campo deben ser seleccionadas por el ingeniero geotecnista, quien debe ordenar los ensayos de laboratorio que permitan conocer con claridad la clasificación, pesos unitarios, propiedades de resistencia al corte, deformación y permeabilidad de los diferentes materiales afectados por el proyecto.

5.1.9.2 Tipo y número de ensayos

El tipo y número de ensayos depende de las características propias de los suelos o materiales rocosos por investigar, del alcance del proyecto y del criterio del ingeniero geotecnista. (Ver tabla No 6)

Tabla 6 Tipos de ensayo

Ensayo	Características
Para suelos	Para suelos como mínimo deben realizar ensayos de clasificación completa para cada uno de los estratos o unidades estratigráficas, sus niveles de meteorización, su humedad natural y peso unitario.
Para rocas	Para materiales rocosos, como mínimo se deben realizar ensayos de peso específico, compresión simple, absorción y alterabilidad.

Fuente: Propia

5.1.9.4 Ensayos detallados

Las propiedades mecánicas e hidráulicas del subsuelo tales como: resistencia al corte, deformabilidad, expansión, permeabilidad, peso unitario y alterabilidad, se determinan mediante procedimientos aceptados de campo o laboratorio.

5.1.9.5 Sustitución para ensayos de laboratorio

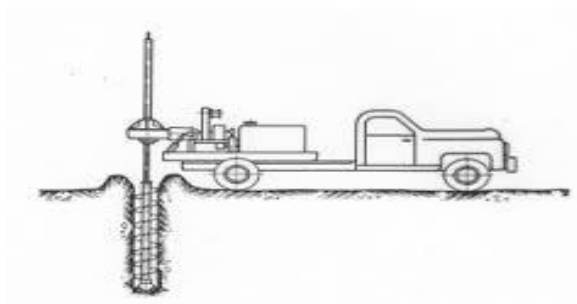
“El ingeniero responsable del estudio puede sustituir ensayos de laboratorio por ensayos de campo, realizados con equipos y metodologías de reconocida aceptación técnica, siempre y cuando sus resultados se respalden mediante correlaciones confiables con los ensayos convencionales.”¹⁸

¹⁸ NORMA SISMO RESISTENTE COLOMBIANA NSR 97 Capítulo H.3 Pág. 4

5.1.9.6 Sondeos geotécnicos

Los sondeos geotécnicos precisan estudiar con gran detalle la geología de las zonas que son objeto de construcción, en algunos casos hasta alcanzar profundidades considerables, como por ejemplo: túneles y presas. En el campo de las cimentaciones, los diagnósticos que han de emitirse antes de que una construcción se apoye en el subsuelo, precisan de un reconocimiento previo del mismo, generalmente basado en sondeos mecánicos y ensayos "in situ" (ver imagen No 11).

Imagen 11 Técnica exploración



Tomado de: <https://www.google.com.co/search?q=sondeos+geotecnicos+y+perforaciones&espv=2>. En línea (26/10/2015)

En muchos casos las dificultades de acceso a los puntos de perforación, el reducido espacio de trabajo (interior de edificaciones, sótanos, etc.), la ubicación en zonas abruptas (laderas, zonas abarrancadas), exige poder contar con una amplia gama de equipos para solventar tales dificultades, así como con personal especializado para cada tipo de reconocimiento (imagen No 12).

Imagen 12 Estudios de terreno



Tomado de: <https://www.google.com.co/search?q=sondeos+geotecnicos+y+perforaciones&espv>. En línea (26/10/2015)

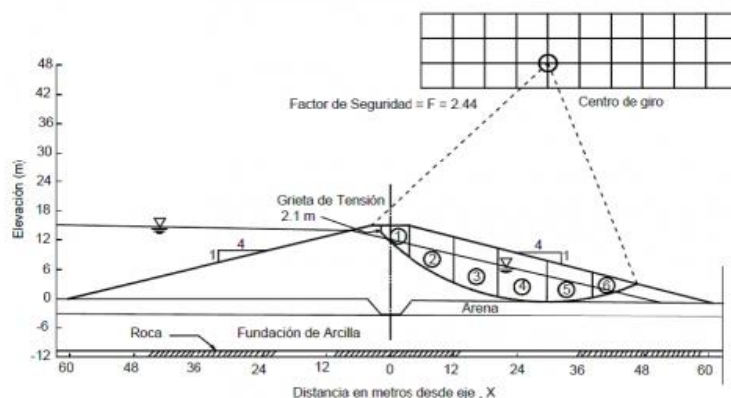
5.1.10 Modelación geotécnica

La modelación matemática de los taludes es parte de la práctica de la ingeniería geotécnica, con el objetivo de analizar las condiciones de estabilidad de los taludes naturales, la seguridad y funcionalidad del diseño en los taludes artificiales. Existe una gran cantidad de metodologías para la modelación matemática, la cual depende del objetivo del análisis y de los resultados que se desee obtener.¹⁹ (Ver imagen No 13).

Los objetivos principales del análisis matemático de los taludes son los siguientes:

- ✓ Determinar las condiciones de estabilidad (si es estable o inestable y el margen de estabilidad)
- ✓ Investigar los mecanismos potenciales de falla (analizar como ocurre la falla)
- ✓ Determinar la sensibilidad o susceptibilidad de los taludes a diferentes mecanismos o factores detonantes (efecto de las lluvias, sismos, etc.)
- ✓ Comparar la efectividad de las diferentes opciones de remediación o estabilización y su efecto sobre la estabilidad del talud.
- ✓ Diseñar los taludes óptimos en término de seguridad, confiabilidad y economía.

Imagen 13 Ejemplo análisis de estabilidad de taludes



Tomado de: <http://estabilidad-de-taludes7.webnode.es/news/estabilidad-de-taludes/>. En línea (26/10/2015)

¹⁹ LOSCO. K. Estabilidad de taludes. 2013 [en línea] [consultado: 24/11/2015] Tomado de: <http://estabilidad-de-taludes7.webnode.es/news/estabilidad-de-taludes>.

5.1.10.1 El factor de seguridad FS

El factor de seguridad es empleado por los ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza para que un talud falle en las peores condiciones de comportamiento.

Fellenius (1922) presento el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla:

$$F.S = \frac{\text{Resistencia al cortante disponible}}{\text{Esfuerzo al cortante actuante}}$$

En las superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes:

$$F.S = \frac{\text{Momento resistente disponible}}{\text{Momento actuante}}$$

5.1.11 Parámetros de presión de poros

Los problemas de estabilidad de taludes pueden formularse correctamente en términos de esfuerzos totales, utilizando pesos unitarios totales y límites externos de presión de poros. Las condiciones de presión de poros son generalmente, obtenidas de las características de las aguas subterráneas y pueden especificarse para los análisis utilizando el método de relación de presión de poros.

Este es un método muy simple y popular para normalizar el valor de la presión de poros en un talud de acuerdo a la definición:

$$r_u = \frac{u}{\sigma_v}$$

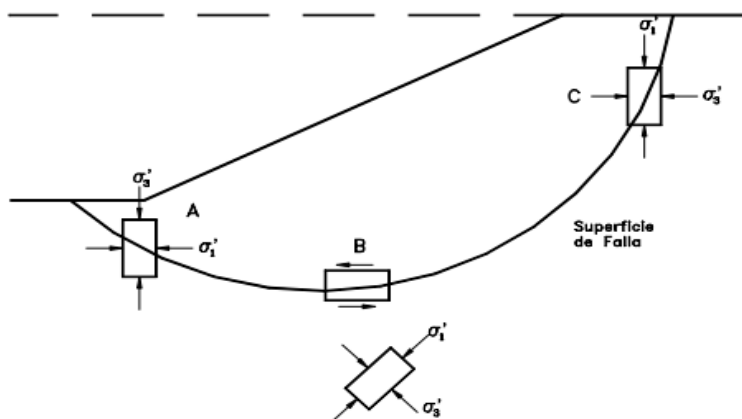
Dónde:

u = Presión de poros

v = Esfuerzo total vertical del suelo a una profundidad z.

Este factor se implementa fácilmente, pero la mayor dificultad está asociada con la asignación de este parámetro a diferentes partes del talud. En ocasiones, el talud requiere de una extensiva subdivisión en regiones con diferentes valores de μ .

Imagen 14 Dirección de esfuerzos principales en la falla de un talud.



Tomado de:

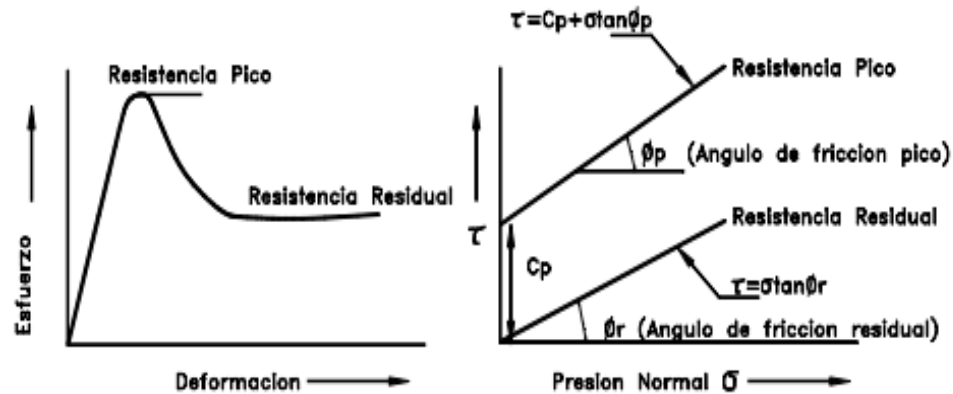
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/466/A5.pdf?sequence=5>. En línea (26/10/2015)

5.1.12 Resistencia

Es la resistencia al corte máximo que posee el material que no ha sido fallado previamente, la cual corresponde al punto más alto en la curva esfuerzo - deformación. La utilización de la resistencia pico en el análisis de estabilidad asume que la resistencia se obtiene simultáneamente a lo largo de toda la superficie de falla. Sin embargo, algunos puntos en la superficie de falla han alcanzado deformaciones mayores que otros, en un fenómeno de falla progresiva y asumir que la resistencia pico actúa simultáneamente en toda la superficie de falla puede producir errores en el análisis.²⁰ (Ver imagen No 15)

²⁰ Caracterización de la resistencia de un material de banco para su uso como relleno compactado. [En línea] [consultado: 26/10/2015] Tomado de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/466/A5.pdf?sequence=5> Pág. 61.

Imagen 15 Grafico esfuerzo - deformación



Tomado de:

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/466/A5.pdf?sequence=5>. En línea (26/10/2015)

5.1.13 Residuos solidos

Los residuos sólidos son sustancias o productos que resultan de las actividades del hombre o de los animales. Todos estos recursos son susceptibles de reaprovecharse o transformarse con un correcto reciclado y la disposición final de la mayoría de ellos son los rellenos sanitarios los demás se depositan en tiraderos a cielo abierto lo que representa riesgo para la salud de los seres humanos e impactos ambientales.

Es fundamental el estudio de los residuos sólidos e identificar los riesgos a la salud que puede acarrear el inadecuado manejo de éstos. Por lo que se hace necesario establecer una clasificación convencional en donde se citen las principales fuentes generadoras y mencionen tanto los residuos peligrosos como los no peligrosos.²¹ Ver Figura No 3.

²¹ GESELLSCHAFT, D. Análisis del mercado de los residuos sólidos municipales. [en línea] [consultado: 14-02-2016] Tomado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd53/analisis/cap5.pdf> Pág. 2

Figura 3 Clasificación de los residuos



Tomado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd53/analisis/cap5.pdf>. En línea (12/02/2016)

El manejo de los residuos sólidos conforma un ciclo en donde se encuentran estrechamente vinculadas las diversas etapas. A partir de la misma producción de los artículos de consumo se inicia la generación, para pasar al almacenamiento, barrido, recolección, transporte, tratamiento y disposición final; por lo tanto, cualquier esfuerzo que se realice en algunas de sus etapas tendrá un efecto directo en los demás.²²

Durante este ciclo mencionado, los residuos sólidos presentan diferentes características como las físicas, químicas y biológicas, es importante reconocer cada una de ellas porque son el punto de partida para el reuso que se les pretende dar a los residuos, especificando los productos que pueden ser clasificados o utilizados en aprovechamiento de su energía.

5.1.13.1 Propiedades físicas de los residuos sólidos

Es necesario conocer algunas de las propiedades de los residuos para organizar los sistemas de recogida y tratamiento final de recuperación o eliminación, y para decidir sistemas de segregación en el caso de los

²² Ibíd. Pág. 3

residuos que generen riesgos especiales para el medio ambiente. La tabla No 7, nos muestra las diferentes propiedades físicas que presentan los residuos.

Tabla 7 Propiedades físicas de los residuos sólidos

Propiedad	Características
Peso específico	Definido como el peso de un material por unidad de volumen (ejemplo Kg/m ³). Para gestionar los residuos es necesario identificar tanto el peso como el volumen, generalmente esta propiedad está dada para los residuos sueltos (no compactos); y dependiendo de factores tales como: localización geográfica, clima, y tiempo de almacenamiento se puede estimar una densidad desde 178 Kg/m ³ hasta 415 Kg/m ³ , siendo el valor típico de 300 Kg/m. ²³
Contenido de humedad	Puede expresarse de dos formas; con el método de medición de peso – húmedo frecuentemente utilizado, en el que la humedad se expresa como un porcentaje del peso del material húmedo; y con el método de medición de peso – seco, referido a un porcentaje del peso del material seco

²³ UNIVERSIDAD ABIERTA Y A DISTANCIA, Propiedades residuos sólidos. [en línea] [consultado: 14-02-2016] Tomado de:
http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358012/ContLin/leccin_9_propiedades.html

Tamaño de partícula y Distribución del tamaño	Esta propiedad es importante especialmente en la recuperación de materiales con medios mecánicos como cribas, tromel y separadores magnéticos. ²⁴
Capacidad de campo	Se refiere a la cantidad de humedad que puede ser retenida por una muestra de residuo sometida a la acción de la gravedad, es de gran importancia para determinar la formación del lixiviado en sitios de disposición final. Puede variar con el grado de presión aplicado y el estado de descomposición de la muestra.
Permeabilidad de los residuos compactados	Este tipo de permeabilidad se refiere a la conductividad hidrológica con que se da el movimiento de líquidos y gases en los residuos en el sitio de disposición final.

Fuente: Propia

Dando continuidad a las propiedades físicas de los residuos sólidos anteriormente mencionadas, en la tabla No 8, observamos el porcentaje de contenido de humedad y densidad de los diferentes tipos de residuos.

²⁴ UNIVERSIDAD ABIERTA Y A DISTANCIA, Propiedades residuos sólidos. [en línea] [consultado: 14-02-2016] Tomado de:
http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358012/ContLin/leccin_9_propiedades.html

Tabla 8 Contenido de humedad y Densidad de los residuos sólidos.

Tipo de Residuos	%H ₂ O	Densidad (kg/m ³)
Orgánicos	70	291
Papel	6	89
Cartón	5	50
Plásticos	2	65
Textiles	10	65
Vidrio	2	196
Aluminio	2	160
Metales Ferrosos	3	320
Residuos Sólidos Urbanos	15	130
Residuos Sólidos Urbanos Compactados	20	297
Residuos en el Relleno Sanitarios	25	600-900

Tomado de <http://gestionintegralresiduos.blogspot.com.co/2010/02/propiedad-fisicas-y-quimicas-de-los.html>. En línea. (14/02/2016)

5.1.13.2 Propiedades químicas de los residuos solidos

Mediante el reconocimiento de las propiedades químicas de los residuos sólidos, se puede determinar la especificación de las alternativas que se tienen para el tratamiento de los mismos. Esta determinación depende del aprovechamiento que se le va a dar a la basura, si el aprovechamiento de los desechos se basa en la recuperación de energía, las características principales a obtener son: humedad y poder calorífico superior e inferior.

Dentro de estas propiedades, es importante tener en cuenta que mediante la biodegradabilidad de los residuos sólidos se generan los lixiviados y los gases, altamente contaminantes para el medio ambiente y el ser humano, la tabla No 9 nos muestra fuente de producción, tratamiento y los efectos que pueden generar.

Tabla 9 Lixiviados y Gases

Lixiviados	Gases
Qué los genera La generación de lixiviados ocurre principalmente por: a) El agua lluvia infiltrada en el relleno mientras se está colocando la basura. b) El agua que se produce al compactar la basura húmeda c) Por la descomposición biológica que se inicia una vez se va conformando el relleno	Qué los genera La descomposición biodegradable de los residuos sólidos, que se da por las condiciones climáticas y por su alto contenido de humedad. Su composición depende de la naturaleza de los residuos dispuestos en el relleno y del equilibrio fisicoquímico alcanzado y la fase sólida.
Tratamiento a) Existen algunas prácticas que consiste en recircular el lixiviado a la parte superior del relleno, con el objeto de acelerar los procesos de degradación en el cuerpo de los residuos y con el mayor aprovechamiento de la evaporación. b) El lixiviado se acumula en el fondo del relleno, de donde es bombeado o conducido por gravedad a un tanque o vaso recolector para darle un adecuado tratamiento.	Tratamiento El biogás generado en rellenos sanitarios puede ser capturado utilizando un sistema de recolección de biogás (chimeneas) construidas en gaviones que faciliten su salida en forma controlada.²⁵ Además de los beneficios energéticos en el uso del biogás, la recolección y control del biogás generado ayuda a reducir emisiones atmosféricas contaminantes.

²⁵ GABOR, Kofalusi, ENCARNACIÓN, A. Guillermo. Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. Artículo, Agosto 2005. pág. 45

Efectos Los componentes tóxicos derivados de la lixiviación de los residuos constituyen un riesgo potencial de contaminación de cuerpos de agua y suelo con su afectación a la salud humana.	Efectos Los gases dan como resultado una potencial contaminación del medio ambiente, por lo que debe tenerse conciencia de los aspectos ambientales, ecológicos y sanitarios que esto implica.
--	--

Fuente: Propia

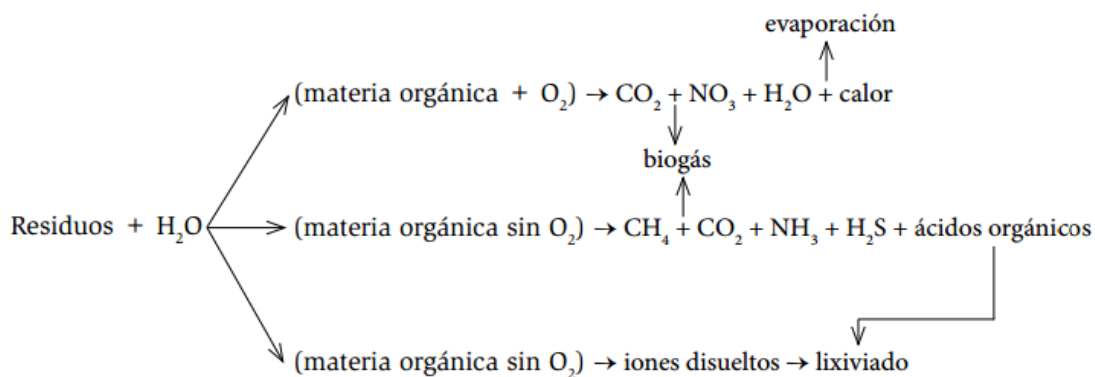
Los residuos sólidos presentan biodegradabilidad por agentes químicos en los sitios de disposición final, la tabla 10 nos muestra la descomposición tanto aeróbica como anaeróbica de los residuos sometidos a diferentes procesos y la figura 4 presenta un esquema de descomposición generada por el contacto con el agua.

Tabla 10 Proceso de descomposición de los residuos en un sitio de disposición final.

PROCESOS	DESCOMPOSICIÓN AEROBIA	DESCOMPOSICIÓN ANAEROBIA	LIXIVIACIÓN
Requisitos	Oxígeno disponible, menos humedad	Falta de oxígeno, más humedad	Gran volumen de agua pluvial, cubierta permeable
Temperatura	50-70° C	35-50° C	—
Reacciones	Oxidación, nitrificación	Reducción, desnitrificación	Disolución, hidrólisis
Consecuencias	Mineralización, esponjamiento	Consolidación, solidificación	Aumento de permeabilidad, acumulación de contaminantes
Productos	CO ₂ , H ₂ O, productos de oxidación	Ácidos orgánicos, CH ₄ , CO ₂ , NH ₃ , H ₂ S, lixiviado	Lixiviado

Tomado de: Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final pág. 43 (14/02/2016)

Figura 4 Esquema general de la descomposición de los residuos por causa del contacto con agua



Tomado de: Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final pág. 44. En línea (14/02/2016)

5.1.13.3 Propiedades mecánicas de los residuos sólidos

Aunque los residuos sólidos tienen un comportamiento mecánico similar al de los suelos de origen mineral, difieren de éstos en dos aspectos:

- Los sólidos de las basuras son en un alto porcentaje biodegradables, lo cual hace que, en especial en un ambiente confinado como el del relleno, estos sólidos biodegradables se descompongan por acción bacterial dando lugar a gases y lixiviados.
- La humedad que traen las basuras en su estado de colocación, inicialmente no está en su gran mayoría en estado libre sino que se libera, en primer lugar por compresión en la medida en la que progresa el apilamiento y luego por la acción de descomposición de los componentes biodegradables.²⁶

Es conveniente recordar que en estos materiales, como en los suelos, tanto la resistencia (a la tracción o al esfuerzo cortante, que son los dos modos de falla posibles) como la rigidez, proviene de la componente sólida y del esfuerzo efectivo que actúa en ella y que por tanto, al ir reduciéndose la proporción de ésta con el tiempo y

²⁶ ESPINOSA, AUGUSTO. La acumulación de basuras como material geotécnico: Comportamiento de las basuras. Artículo, Pag. 62.

transformándose bioquímicamente en líquido y gas (los cuales a su vez reducen los esfuerzos efectivos en la fase sólida remanente) también se irán reduciendo resistencia y rigidez.

La resistencia al corte de los residuos sólidos, aunque heterogéneos, anisotrópicos y aleatorio, puede describirse con la relación de Mohr-Coulomb

$$s = c + \sigma \tan \varphi$$

s = resistencia al esfuerzo cortante

c = cohesión efectiva

σ = esfuerzo normal efectivo

φ = ángulo efectivo de fricción interna

5.1.14 Cambios volumétricos

El suelo es un material constituido por el esqueleto de partículas sólidas rodeado por espacios libres (vacíos), en general ocupados por agua y aire. Para poder describir completamente las características de un depósito de suelo es necesario expresar las distintas composiciones de sólido, líquido y aire, en términos de algunas propiedades físicas.

En el suelo se distinguen tres fases:

Sólida: Formada por partículas minerales del suelo (matriz de suelo)

Líquida: solución de suelo, el agua que contiene sustancias disueltas

Gaseosa: atmosfera de suelo

La composición de las fases líquida y gaseosa varía en el tiempo y en el espacio, algunos suelos contienen, además, materia orgánica (residuos vegetales parcialmente descompuestos) en diversas formas y cantidades. Las fases líquida y gaseosa conforman el Volumen de Vacíos, mientras que la fase sólida constituye el Volumen de Sólidos.²⁷

Entre estas fases es preciso definir un conjunto de relaciones que se refieren a sus pesos y volúmenes, las cuales sirven para establecer la necesaria nomenclatura y para contar con conceptos mensurables, a través

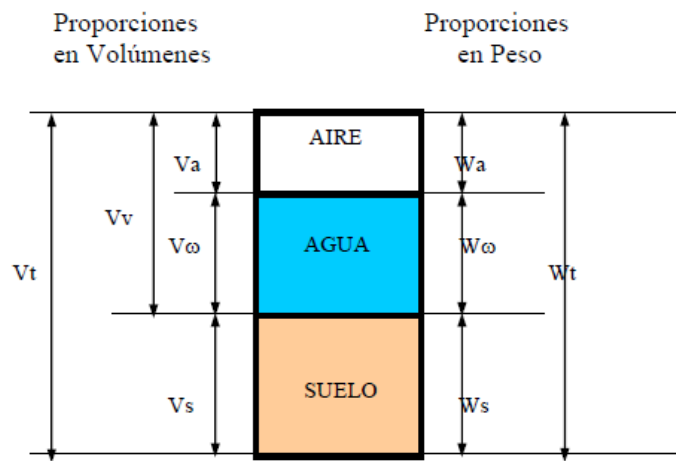
²⁷ LEONI, A. Relaciones volumétricas y gravimétricas. Artículo, Área geotecnia pág. 1

de cuya variación puedan seguirse los procesos ingenieriles que afectan a los suelos.

En los laboratorios de Geotecnia puede determinarse fácilmente el peso de las muestras húmedas, el peso de las muestras secadas al horno, y el peso específico de los suelos.

En figura 5, aparece un esquema de una muestra de suelo, donde se relacionan cada una de las fases anteriormente mencionadas.

Figura 5 Relación de fases



Tomado de: Relaciones volumétricas y gravimétricas pág.2. (24/02/2016)

Dónde:

V_t : volumen total de la muestra del suelo. (Volumen da la masa)

V_s : volumen de la fase sólida de la muestra (volumen de sólidos)

V_ω : volumen de la fase líquida (volumen de agua)

V_a : volumen de la fase gaseosa (volumen de aire)

V_v : volumen de vacíos de la muestra de suelo (volumen de vacíos).

$$V_v = V_\omega + V_a$$

$$V_t = V_v + V_s$$

$$V_t = V_\omega + V_a + V_s$$

W_t : Peso Total de la muestra de suelo. (Peso de la Masa).

W_s : Peso de la fase sólida de la muestra.

W_w : Peso de la fase líquida (peso del agua).

W_a : **Peso** de la fase gaseosa, convencionalmente considerado como nulo en Geotecnia.

5.1.15 Compactación de residuos sólidos

La compactación de los residuos sólidos ayuda a disminuir los espacios vacíos entre los residuos, incrementar su densidad y así reducir el volumen que ocupan. Este tratamiento permite el desarrollo y operación eficaz de otras actividades de manejo integral de residuos sólidos, como el almacenamiento y el transporte. Ver imagen 16.

Imagen 16 Compactación de residuos sólidos en un relleno sanitario.



Tomado de <https://www.google.com.co/search?q=compactacion+de+los+residuos+solidos>. En línea (25/02/2016)

La compactación se realiza principalmente in situ, este tipo de operación generalmente se utiliza para compactar los residuos dispuestos en rellenos

sanitarios y pueden ser equipos con ruedas o con orugas.²⁸ Como lo muestran las imágenes 17 y 18.

Imagen 17 Compactación de residuos sólidos



Tomado de [https://www.google.com.co/search?q=compactacion línea](https://www.google.com.co/search?q=compactacion+l%C3%ADnea) (25/02/2016)

Imagen 18 Compactación de residuos sólidos.



Tomado de <https://www.google.com.co/search?q=compactacion+de+los+residuos+solidos&espv=2&biw> En línea (25/02/2016)

²⁸ UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA. Curso en sistemas de tratamiento y disposición final de residuos sólidos. [en línea] [consultado: 25-02-2016] Tomado de: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358012/ContLin/leccin_20_densificacin.html

El peso de los residuos compactados, depende del peso específico inicial y de la humedad. La densificación además de ahorrar espacio, evita la propagación de organismos vectores, disminuye costos de recolección y transporte, incrementa la vida útil de rellenos sanitarios y reduce costos en la incineración; sin embargo, implica altos costos en energía y mantenimiento, produce ruidos, olores, lixiviados y emisiones atmosféricas.

5.1.15.1 Selección del Equipo de Compactación.

Los factores que se deben considerar en la selección del equipo de compactación incluyen:

- Características de los desechos a ser compactados, incluyendo tamaño, contenido de humedad y densidad.
- Método de transferencia y alimentación de los desechos al compactador.
- Métodos de manejo y usos de los materiales compactados
- Características de diseño del compactador
- Características operacionales incluyendo necesidades de energía, mantenimiento de rutina y especializado, simplicidad de la operación, eficiencia comprobada y contabilidad, nivel de ruido, exigencias de control de polución de aire y agua.
- Consideraciones del sitio incluyendo espacio y altura, acceso, ruido y limitaciones ambientales relacionadas.

5.1.15.2 Equipos de monitoreo para residuos sólido en rellenos sanitarios

Durante las etapas de operación, cierre y clausura, deben funcionar permanentemente equipos de instrumentación que permiten verificar la estabilidad y secuencia del relleno de acuerdo a la topografía, generación de gases y lixiviados, control de potencial contaminación de acuíferos, entre otros eventos, para los que se utiliza la siguiente instrumentación:

- **Concentración y venteo de gases:** Mediante el sistema de drenaje vertical (pozos de captación o chimeneas verticales) que crecen con la disposición de residuos, se utiliza tubería, perforada y protegida con grava la que permitirá la migración del gas del

interior del relleno; la red de captación vertical surgirá superficialmente a tubos que conectados realizarán la evacuación del gas.²⁹

- **Control y estabilidad de taludes:** durante la etapa de operación se debe instalar un sistema de inclinómetros cuya finalidad es mostrar cambios en el perfil cuando se presentan movimientos del terreno midiendo inclinaciones longitudinales del revestimiento e inclinación en el plano perpendicular, medidas que son convertidas en desviaciones laterales, estos cambios determinados por comparación de los datos iniciales con los de control indican los movimientos del terreno; los inclinómetros conjuntamente con acelerómetros, determinan estabilidad estática y sísmica.
- **Control de aguas Freáticas:** se instala para determinar la migración de contaminantes a los acuíferos subterráneos y se miden a través de sistema de piezómetros regularmente tipo “casa grande”
- **Presión de Poros:** el sistema de piezómetros de “hilo vibrátil” determinan la presión que ejercen los líquidos y gases sobre la masa de relleno.
- **Fallas Geológicas:** Los movimientos del terreno se detectan con el sistema de extensiómetros
- **Detección Olores:** Utilizados especialmente, para gases contaminantes y están directamente asociados con sistema de aspersores.

²⁹ UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA. Requerimientos de equipos de monitoreo. [en línea] [consultado: 24-04-2016] Tomado de: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358045/ContenidoLinea/leccin_18_requerimientos_de__equipos_de_monitoreo.html

5.2 MARCO LEGAL

El presente trabajo de investigación está enmarcado en el tema del suelo y su comportamiento en taludes, por tal razón es necesario mencionar el marco legal y tener en cuenta las normas bases de los concepto a tratar durante el desarrollo del proyecto.

Tabla 11 Normatividad

NORMA o DECRETO	DESCRIPCIÓN
NSR – 10	De acuerdo a esta norma de deben realizar ciertos estudios geotécnicos basados en la investigación del subsuelo y las características arquitectónicas y estructurales, con el fin de proveer las recomendaciones geotécnicas de diseño y construcción de excavaciones y rellenos. De acuerdo a los numerales se realiza un estudio geotécnico que comprenda el reconocimiento del campo, la investigación del subsuelo, de igual manera una asesoría geotécnica en las etapas de diseño y construcción de los rellenos sanitarios que garantice la estabilidad de los taludes. Los rellenos se compactarán con procedimientos que eviten el desarrollo de empujes superiores a los considerados en el diseño.
Resolución 227 de 2006	Esta resolución adopta los términos de referencia para la ejecución de estudios detallados de amenaza y riesgo por fenómeno de remoción en masa, indispensable en el momento de desarrollar una obra como los rellenos sanitario. Es necesario tener en cuenta los siguientes términos, cortes, excavaciones, sobrecargas y cambios en el drenaje.
Decreto 1807 de 2014	Como parte del análisis de amenaza se debe tener en cuenta las causas de la inestabilidad del terreno, considerando dentro de los agentes detonantes los siguientes factores: agua, sismo y procesos antrópicos (cortes, excavaciones, rellenos y construcciones en general), mediante el

	análisis mínimo de tres escenarios. La determinación de la condiciones de amenaza por movimientos en masa deberán integrar las diferentes variables que inciden en la ocurrencia tanto actual como futura de estos fenómenos. Se deben considerar dentro de los agentes detonantes los siguientes factores: agua, sismo y procesos antrópicos (cortes, excavaciones, rellenos y construcciones en general).
Ley 1523 de 2012	Gestión del riesgo de desastres, contribuye al desarrollo indispensable para asegurar la sostenibilidad, la seguridad territorial, derechos e intereses colectivos y mejorar la calidad de vida de las poblaciones y comunidades en riesgo, en esta investigación será de vital importancia ya que en la construcción y mantenimiento de los rellenos sanitarios, se debe tener en cuenta la seguridad y salud de las personas considerando que son obras que generan gases perjudiciales para la salud.

Fuente: Propia

6. DISEÑO METODOLÓGICO

6.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación fue de tipo experimental, donde se realizó modelaciones por medio de un software que nos permitió identificar el factor de seguridad desde varios puntos en un talud, y se observó como de acuerdo a varios niveles de residuos sólidos este puede llegar a fallar.

Se tuvo en cuenta variables numéricas, las cuales utilizando modelaciones, se obtuvieron diferentes factores de seguridad del talud de acuerdo a la geometría utilizada.

6.2 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

El enfoque que tuvo la investigación fue de tipo mixto es decir que se obtuvo variables cuantitativas y variables cualitativas, debido a que incorporó elementos a través de los cuales se priorizó la observación, el análisis e interpretación de fenómenos, acontecimientos y hechos en diferentes escenarios de taludes conformados por residuos sólidos como por ejemplo los rellenos sanitario Doña Juana.

Se tuvieron en cuenta de cada variable:

De tipo cuantitativo se obtuvieron valores numéricos de las diferentes probabilidades es decir, amenaza, vulnerabilidad y resultados de acuerdo a la modelación realizada en el software SLIDE

De tipo cualitativo se realizó un análisis que utiliza una forma descriptiva para determinar la magnitud del área de estudio y las consecuencias que se pretendían.

Finalmente la investigación describe y cuantifica como se presentan los diferentes tipos de fallas en taludes conformados por diferentes pendientes.

6.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La técnica fue la utilización del software SLIDE que permitió recopilar la información en la muestra de estudio, esto es de acuerdo a modelaciones del talud donde se terminó el punto máximo alcanzado por un talud

conformado por residuos sólidos. Esta herramienta computacional es especializada para el análisis de estabilidad bajo diferentes métodos existentes, el software permite la incorporación de todos los parámetros geomecánicos y geométricos del talud a modelar, así como la condición del agua subterránea, ya sea como una tabla de agua o con la metodología para modelar el flujo de agua por medio de elementos finitos.

El programa realiza el análisis por medio de diferentes métodos para el talud a modelar y presenta el factor de seguridad (F.S) para diferentes superficies de falla y para la superficie de falla crítica.

6.3.1 Software SLIDE

El software SLIDE pertenece a la casa de Rocscience, se utiliza para realizar análisis de estabilidad de taludes en suelo y roca, es un programa fácil de usar, modela problemas como que incluyen desde cargas externas o agua hasta refuerzos tales como geo textil o pilotes.

6.3.2 Modelaciones

En las modelaciones realizadas por medio de SLIDE, se tuvo en cuenta para el proyecto los parámetros del suelo para residuos antiguos y nuevos, superficies de falla circulares y no circulares, análisis sensitivo y falla de fondo, que permitieron realizar un análisis más detallado del comportamiento de taludes conformados por residuos sólidos.

Actualmente se cuenta con varios tipos de métodos de análisis de estabilidad para taludes, para esta investigación solo se trabajó por medio del método de Bishop, el cual presenta equilibrio solo en momentos pero que aun así, nos brinda datos exactos y confiables para el proyecto, teniendo en cuenta que es uno de los métodos más utilizados para el cálculo del factor de seguridad.

6.4 FASES DEL PROYECTO

Las fases a desarrollar durante el proyecto de investigación son las relacionadas a continuación, cada una con sus respectivas actividades a realizar.

6.4.1 Identificar los parámetros de resistencia que tienen los residuos sólidos.

- ✓ Recopilar información sobre investigaciones realizadas a taludes conformados por residuos sólidos
- ✓ Lectura de artículos de la descomposición de residuos sólidos
- ✓ Reconocer cada uno de los parámetros del suelo encontrados en rellenos sanitarios
- ✓ Identificar como es el comportamiento del suelo de acuerdo a cada uno de los parámetros como lo son el peso unitario, la cohesión y el ángulo de fricción

6.4.2 Analizar las causas y factores que ocasionan la inestabilidad de los taludes conformados por residuos sólidos.

- ✓ Recopilación de información sobre los factores de inestabilidad de taludes
- ✓ Determinar el comportamiento del suelo de acuerdo a los diferentes parámetros
- ✓ Identificar el comportamiento de los taludes de acuerdo a su diseño geométrico

6.4.3 Determinar los factores de seguridad para diferentes escenarios geotécnicos y conformación de taludes.

- ✓ Identificar los factores necesarios para la modelación de taludes y poder obtener el factor de seguridad
- ✓ Elaboración de matrices para la definición del modelo geotécnico
- ✓ Determinar parámetros para la modelación y tipos de falla a utilizar

6.4.4 Establecer la relación existente entre los parámetros de presión de poros y el factor de seguridad para diferentes configuraciones de conformación de taludes.

- ✓ Identificar los resultados de acuerdo a la presión de poros y el factor de seguridad tomando en cuenta el talud de estudio y la características de los residuos sólidos encontrados
- ✓ Realización de graficas de acuerdo a resultados
- ✓ Generación de análisis y documento final

7 DESARROLLO METODOLOGICO

Para el desarrollo de esta investigación, se tuvo en cuenta estudios realizados a diferentes escenarios geotécnicos, para este caso investigaciones sobre rellenos sanitarios, de los cuales se tomaron varios aspectos y datos para el desarrollo de las modelaciones.

En la realización de este proyecto se trabajaron taludes diseñados con nuevos y antiguos residuos sólidos, donde cada uno de ellos presenta diferentes parámetros lo que conllevó a realizar una investigación teniendo en cuenta su comportamiento de acuerdo al ángulo de fricción, la cohesión y el peso unitario, también se diseñaron diferentes taludes con pendientes de 15° , 20° , 25° , 30° y 35° tanto en rellenos compactados en altura como en pendiente, esto para una mayor comparación de factores de seguridad y tipos de falla, para estos diferentes escenarios se tuvo en cuenta una condición estática y una dinámica al igual que los diferentes R_u con rangos de 0,0 a 0,8 donde un $R_u=0,0$ presenta una condición drenada y un $R_u = 0,8$ considerando condiciones saturadas.

Se realizó dos tipos de matrices, una para el diseño de un talud en altura y otro para un talud tipo pendiente, en este último se tuvo en cuenta un ángulo de inclinación para residuos compactados antiguamente y otro para residuos nuevos (ver tablas 12 y 13)

En cada diseño, se realizó un análisis sensitivo para R_u , cohesión y ángulo de fricción y de esta manera lograr identificar la inestabilidad y posible falla de los taludes conformados por residuos sólidos, se tuvo en cuenta una condición estática y pseudoestática para lograr una comparación del comportamiento del talud ante diferentes características y parámetros.

Tabla 12 Matriz para un talud en altura

TALUD EN ALTURA																										
CIRCULAR ESTATICO													CIRCULAR SEUDOESTATICO													
β	Aa= 0,0									ANALISIS SENSITIVO				β	Aa= 0,2									ANALISIS SENSITIVO		
	ru									SS	SS	SS	ru									CS	CS	CS		
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	Ru Critico	ϕ Critico	C Critico	0,0		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	Ru Critico	ϕ Critico	C Critico	
15°													15°													
20°													20°													
25°													25°													
30°													30°													
35°													35°													
NO CIRCULAR ESTATICO													NO CIRCULAR SEUDOESTATICO													
β	Aa= 0,0									ANALISIS SENSITIVO				β	Aa= 0,2									ANALISIS SENSITIVO		
	ru									SS	SS	SS	ru									CS	CS	CS		
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	Ru Critico	ϕ Critico	C Critico	0,0		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	Ru Critico	ϕ Critico	C Critico	
15°													15°													
20°													20°													
25°													25°													
30°													30°													
35°													35°													

Fuente: Propia

Tabla 13 Matriz para un talud tipo pendiente

[illegible]

Fuente: Propia

Durante la recopilación de datos se identificaron los siguientes parámetros del suelo para residuos sólidos nuevos y residuos antiguos ya compactados (ver tabla No 14)

Tabla 14 Resumen datos teóricos – parámetros del suelo

FUENTE	MATERIAL	γ	C'	ϕ
Análisis de estabilidad zona de contingencia zona II área 3 - Relleno sanitario Doña Juana		KN/m³	KN/m²	°
	Residuos Nuevos Contingencia	11,5	12,58	29,81
	Residuos Viejos Zona II Área 3	11,5	26,44	20,12
Análisis de la estabilidad de rellenos sanitarios Juan Palma, Raul Espinace, Pamela Valenzuela			Kpa	
	Caja de corte con seccion de 434 x 287 mm		20	29
	Material en estada natural y seco	11,07		
	Caja de corte directo 1,5 x 1,5 m		20	30
	Ensayos triaxiales		22	20
	Caja de seccion 2 x 1 m		17	19

Fuente: Propia ajustado del Análisis de estabilidad de rellenos sanitarios Juan Palma y análisis de estabilidad zona de contingencia zona II área 3.

El análisis de estabilidad realizado en la zona II del relleno sanitario Doña Juana, es un estudio que describe la ampliación proyectada de esta zona como una sobrecarga de residuos nuevos sobre residuos antiguos, entre ellos no habrá capa de separación, el contacto será directo y la transferencia de lixiviado será libre, teniendo en cuenta que los drenajes de lixiviado en el fondo de cada celda están funcionando sin problemas.

Teniendo en cuenta que los parámetros del suelo cambian con el tiempo debido a la descomposición de los residuos sólidos, se toma como referencia la calibración del estudio del peritaje técnico realizado por Gonzales y Espinosa en el año 2000 dando como resultando los siguientes parámetros:

Tabla 15 Parámetros de resistencia

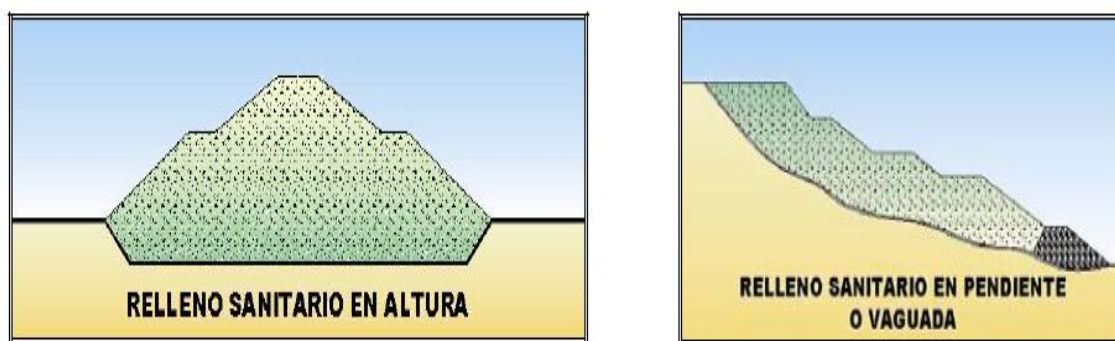
Material	g	C'	F	V_s
	kN/m ³	kN/m ²	°	m/2
Residuos Nuevos Contingencia	11,5	12,58	29,81	95
Residuos Viejos Zona II Área 3	11,5	26,44	20,12	95

Tomado de: Análisis de estabilidad contingencia zona II área 3 Relleno sanitario Doña Juana. Consultado. En línea (24/04/2016)

Estos datos son tenidos en cuenta para la realización de esta investigación, ya que se pretende observar como es el comportamiento del talud conformado por residuos nuevos y antiguos con diferentes parámetros.

Dando alcance a lo anteriormente mencionado, se obtiene otra investigación la cual es un análisis de la estabilidad de rellenos sanitarios realizada por los ingenieros Juan Palma, Raul Espinace y Pamela Valenzuela, un artículo que presenta estudios realizados para rehabilitar rellenos sanitarios dado que en Chile cada vez son más escasos los lugares aptos para la disposición de residuos sólidos, se busca la ejecución de rellenos en altura construido sobre uno ya existente, este análisis propone dos tipos construcción de rellenos sanitarios como lo muestra la Imagen 19, es importante conocer los aspectos geotécnicos relacionados con la estabilidad de taludes para evitar problemas durante la operación del mismo.

Imagen 19 Diseño de rellenos sanitarios



Tomado de: Análisis de estabilidad de rellenos sanitarios. En línea (24/04/2016)

En el análisis de estabilidad de rellenos sanitarios realizada en Chile, se realizaron ensayos para determinar los parámetros del suelo conformado por residuos sólidos, de los cuales se obtuvieron los resultados observados en la tabla No 16.

Tabla 16 Parámetros de resistencia por medio de ensayos

FUENTE	ENSAYO REALIZADO	γ	C'	ϕ
Landva y Clark	Caja de corte con seccion de 434 x 287 mm	11,07	16 - 23	24 - 34
Richardson y Reynolds	Caja de corte directo 1,5 x 1,5 m		20	18 - 42
Jessberger y Kockel	Ensayos triaxiales		22	17 - 22
Kolsch	Caja de seccion 2 x 1 m		15 - 18 KN/m ²	15 - 22

Fuente: Propia ajustado del Análisis de estabilidad de rellenos sanitarios

Teniendo en cuenta estos dos análisis, se realizó un consolidado de datos y de esta manera determinar parámetros tanto para residuos nuevos como para los antiguos, en el análisis realizado en Chile se tomaron rangos de cohesión y ángulo de fricción, por tal razón para esta investigación se realizó un promedio de datos y finalmente se promedió entre las dos investigaciones dando como resultado los siguientes parámetros (tabla No 17), los cuales fueron la base para la realización de las diferentes modelaciones en SLIDE y de esta manera determinar cómo será el comportamiento de cada uno de los taludes de acuerdo a las matrices anteriormente mencionadas.

Tabla 17 Consolidado de parámetros del suelo

	γ	C'	ϕ
	KN/m ³	KN/m ²	°
RESIDUOS NUEVOS	11,3	18,3	25,5
RESIDUOS ANTIGUOS	11.5	26.44	20,12

Fuente: Propia

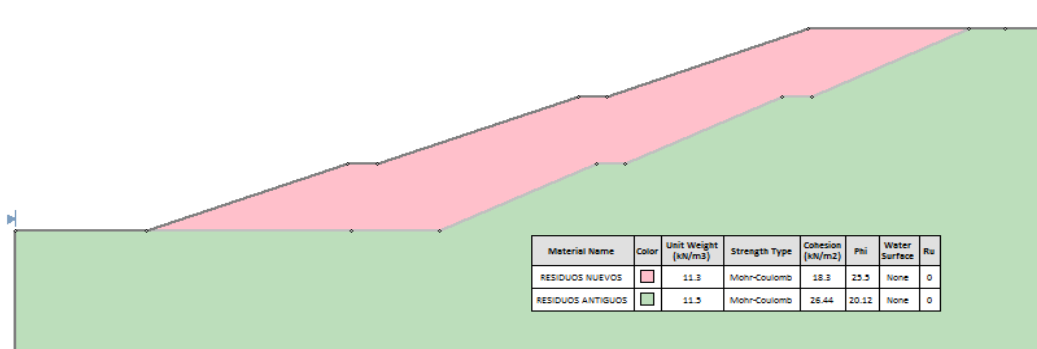
Teniendo en cuenta los análisis de apoyo para esta investigación, para el desarrollo de este proyecto se diseñó taludes en altura y pendiente para diferentes ángulos de inclinación como se observa en las figuras 6 y 7.

Figura 6 Talud de diseño en altura con pendiente de 35°



Fuente: Propia

Figura 7 Talud de diseño en pendiente con ángulo de 25° x 30°



Fuente: Propia

7.1 SELECCIÓN DE PARÁMETROS

Para el desarrollo del proyecto se definió cada uno de los parámetros a utilizar que fueron investigados de diferentes fuentes para la elaboración de este documento.

7.1.1 Parámetro de presión de poros

Para el R_u utilizado para esta investigación, se seleccionaron valores de 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 y 0,8 el cual indica la cantidad de agua que presentará el talud en su diferente composición para este caso en residuos nuevos y antiguos, en el cual 0,0 representa un talud seco y 0,8 uno saturado, recordando que R_u es la relación de poros y el esfuerzo vertical. Es de aclarar que se tomó un R_u hasta 0,8 ya que sé que se siguen los parámetros que se tuvieron en cuenta en la investigación realizada en el relleno sanitario Dona Juana, donde los ingenieros consideraron un $R_u=0,8$ debido a la cantidad de lixiviado generado por residuos sólidos y sumado a esto la cantidad de agua debido a las precipitaciones generadas por la lluvia.

7.1.2 Parámetros geométricos

Teniendo en cuenta la investigación realizada en el relleno sanitario Doña Juana, en la que se evidencian modelos de rellenos sanitarios y por ende las pendientes con las cuales fueron construidas varias de las zonas de contingencia, para esta investigación se diseñaron taludes con esas especificaciones, es decir taludes con pendientes de 15° , 20° , 25° , 30° y 35° , de igual manera con base a la investigación de los ingenieros en Chile, se optó por analizar para esta investigación taludes en altura y pendiente con los mismo ángulos de inclinación y con altura de 10 metros entre cada berma la cual se diseñó de 4 metros.

De igual manera se tuvo en cuenta para cada uno de los ángulos, fallas circulares y no circulares, un sismo de 0.2 de acuerdo a los niveles de amenaza sísmica obtenidos de la norma NSR-10 TITULO A, que hace que este proyecto tenga varias alternativas, para observar el comportamiento del talud con diferentes escenarios geotécnicos.

7.1.3 Factores de seguridad

De acuerdo a lo estipulado por la NSR-10 CAPITULO H, esta investigación trabajó FS para una condición estática de 1.5 y para una dinámica 1.1 como se observa en la siguiente tabla, (ver tabla No 18)

Tabla 18 Factores de seguridad

Tabla H.6.9-1
Factores de seguridad indirectos mínimos

Condición	Construcción	Estático	Sismo	Seudo estático
Deslizamiento	1.60	1.60	Diseño	1.05
Volcamiento: el que resulte más crítico de Momento Resistente/ Momento Actuante Excentricidad en el sentido del momento (e/B)	≥ 3.00 $\leq 1/6$	≥ 3.00 $\leq 1/6$	Diseño Diseño	≥ 2.00 $\leq 1/4$
Capacidad portante	Iguales a los de la Tabla H.4.1			
Estabilidad Intrínseca materiales térreos (reforzados o no)	Iguales a los de la Tabla H.2.1			
Estabilidad Intrínseca materiales manufacturados	Según material (Concreto-Título C; Madera-Título G; etc.)			
Estabilidad general del sistema:				
Permanente o de Larga duración (> 6 meses)	1.20	1.50	Diseño	1.05
Temporal o de Corta duración (< 6 meses)	1.20	1.30	50% de Diseño	1.00
Laderas adyacentes (Zona de influencia > 2.5H)	1.20	1.50	Diseño	1.05

Tomado de: Norma Colombiana Sismo Resistente. Título H. Capítulo H.5. Excavaciones y estabilidad de taludes.

7.2 DESARROLLO DEL MODELO PARA TALUDES EN ALTURA

7.2.1 Para fallas circulares

Teniendo en cuenta la matriz planteada, se desarrollaron modelaciones en SLIDE de la cual se obtuvieron factores de seguridad como se observa en la tabla 19, para una condición estática, con falla circular y diferentes pendientes en el talud.

En la tabla 20, se trabajó las mismas condiciones de pendiente y R_u para el talud, solo que en este caso para una condición pseudoestática.

Tabla 19 Matriz de diseño para talud en altura con falla circular en condición estática

β	Aa=0,0								
	r_u								
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
15°	2,703	2,487	2,271	2,054	1,835	1,616	1,392	1,172	0,954
20°	2,276	2,089	1,903	1,717	1,532	1,348	1,161	0,972	0,786
25°	1,982	1,822	1,657	1,490	1,324	1,159	0,995	0,826	0,658
30°	1,739	1,597	1,453	1,308	1,163	1,016	0,871	0,725	0,582
35°	1,566	1,435	1,304	1,174	1,044	0,915	0,784	0,651	0,515

Fuente: Propia

Tabla 20 Matriz de diseño para talud en altura con falla circular en condición pseudoestática

β	$Aa=0,2$								
	ru								
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
15°	1,413	1,296	1,179	1,063	0,948	0,834	0,719	0,606	0,497
20°	1,324	1,215	1,106	0,996	0,885	0,776	0,668	0,555	0,445
25°	1,250	1,141	1,033	0,926	0,819	0,713	0,608	0,505	0,404
30°	1,148	1,048	0,948	0,849	0,749	0,651	0,554	0,457	0,365
35°	1,074	0,981	0,886	0,790	0,695	0,601	0,508	0,417	0,329

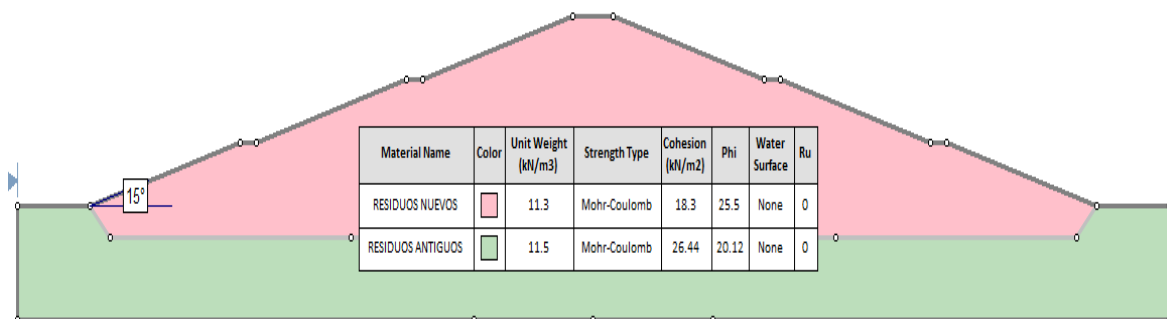
Fuente: Propia

Esta matriz representa cada uno de los factores de seguridad obtenidos de un diseño previo de talud en altura, como se observa en cada una de las tablas, se diseñaron taludes para diferentes ángulos y valores de Ru , para residuos nuevos compactados sobre residuos antiguos en condición estática y pseudoestática.

7.2.1.1 Diseño de modelos estáticos y dinámicos para un talud en altura con falla circular

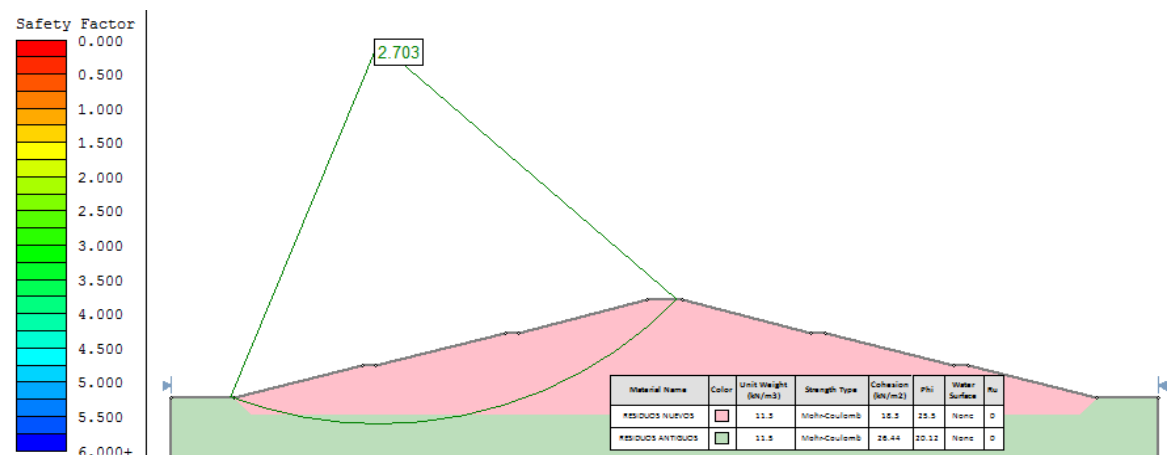
Se realizó el diseño de un talud en altura con pendiente de 15° compuesto por residuos nuevos compactados sobre residuos antiguos, los cuales presentan de acuerdo a sus condición parámetros de resistencia diferentes, una aceleración sísmica de $Aa=0$ y un $Ru=0$ para cada caso, como se observa en las Figuras 8 y 9 Modelo en SLIDE, donde se obtiene un factor de seguridad de 2.703.

Figura 8 Modelo en SLIDE relleno en altura de 15° estático



Fuente: Propia

Figura 9 Factor de seguridad para un talud de 15° estático



Fuente: Propia

Teniendo en cuenta la misma pendiente del talud en altura, se consideran otros valores de R_u entre 0,0 y 0,8 para determinar factores de seguridad para la misma condición estática, para este caso, en la modelación se tiene en cuenta el mismo R_u tanto para residuos nuevos como antiguos, esto con el fin de observar el comportamiento del talud para diferentes niveles de presión de poros.

Este mismo procedimiento se realizó para los taludes conformados por pendientes de 20°, 25°, 30° y 35° con R_u de 0,0 a 0,8.

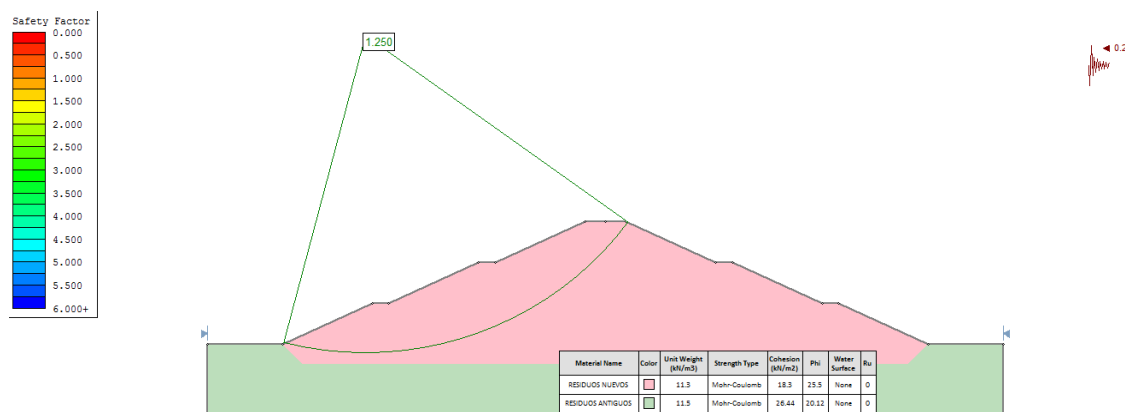
Es necesario para este tipo de investigaciones, considerar condiciones dinámicas en los suelos, por tal razón en este trabajo fue considerado un $A_a = 0,2$ para las mismas condiciones de talud referente a pendientes, R_u y fallas circulares, obteniendo factores de seguridad de la siguiente manera (figura 11). Para este caso considerando un talud de 25° , se obtuvo un factor de seguridad de 1,250 en condición pseudoestática con un R_u de 0,0.

Figura 10 Modelo en SLIDE relleno en altura de 25° pseudoestático



Fuente: Propia

Figura 11 Factor de seguridad para un talud de 25° pseudoestático

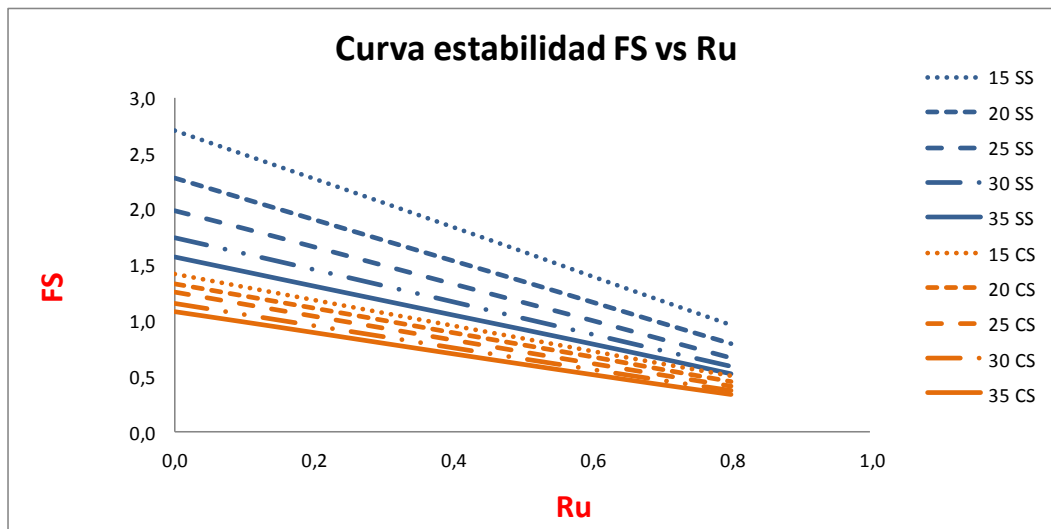


Fuente: Propia

Para los otros diseños del talud en altura se consideraron los mismos parámetros, la variación está en la pendiente utilizada. (Ver anexo 1 condición estática y pseudoestática)

Al obtener cada uno de los factores de seguridad de falla circular tanto para taludes estáticos (ss) como seudoestáticos (cs), se realizaron curvas de estabilidad de FS vs Ru para finalmente determinar en cada talud un Ru crítico, dicho análisis se observa en las figuras 12 y 13 y en la tabla 21.

Figura 12 Curva de estabilidad FS Vs Ru para taludes en altura estático y seudoestático para falla circular



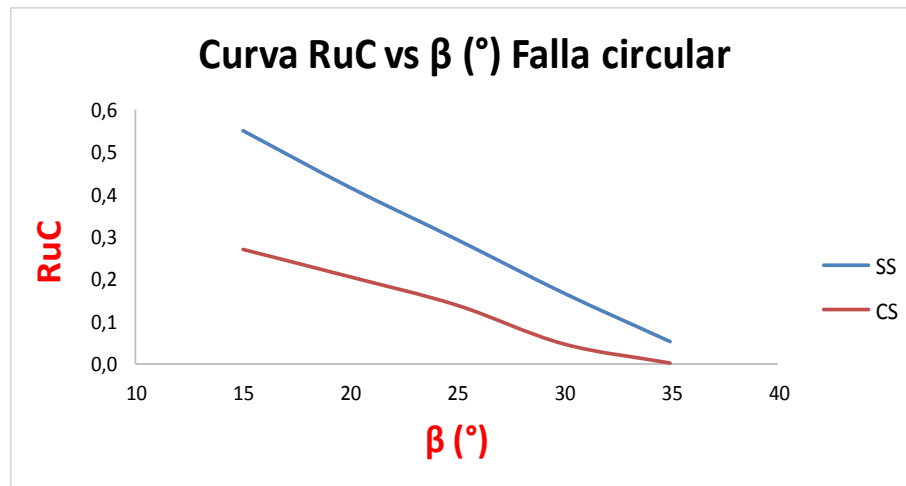
Fuente: Propia

Tabla 21 Ruc para β con FS 1,5 Y 1,1

	FS = 1,5	FS = 1,1
	SS	CS
β (°)	RuC Critico	RuC Critico
15	0,551	0,270
20	0,417	0,205
25	0,294	0,138
30	0,167	0,046
35	0,051	0,000

Fuente: Propia

Figura 13 Curva RuC Vs β para fallas circulares en condición estática y pseudoestática



Fuente: Propia

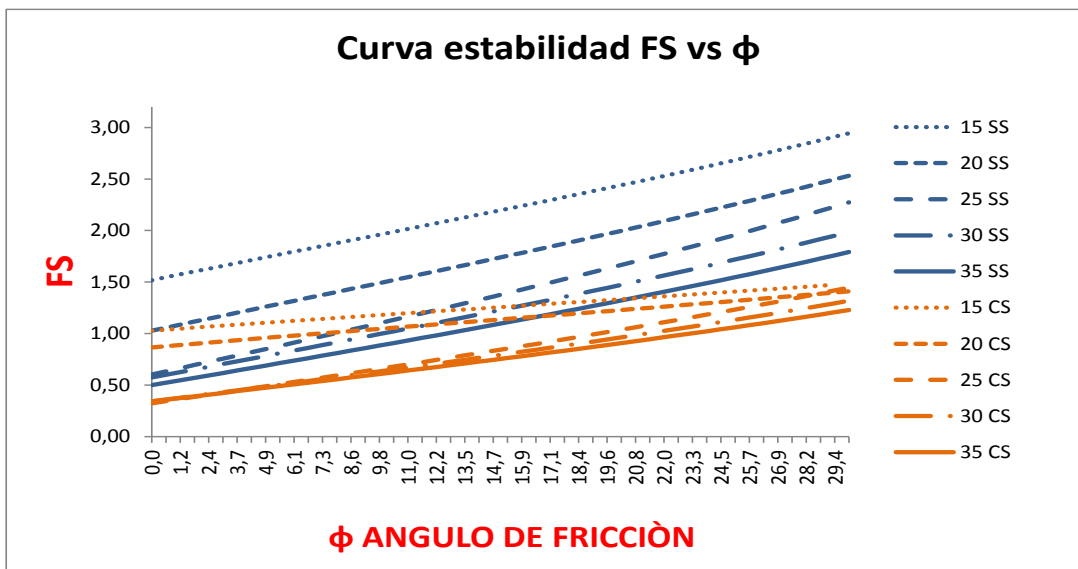
La figura 12 muestra una comparación entre los ángulos de inclinación propuestos para el diseño del talud, en el cual se presenta una disminución del 42% del factor de seguridad en condición estática a medida que aumenta el ángulo de inclinación, para el estado pseudoestático la variación que se presenta en el factor de seguridad corresponde a un 24% entre el ángulo con mayor de inclinación y el menor, haciendo de esta condición la más crítica, más aun cuando se observa un 65% de cambio en el Ru pasando de un estado seco a uno saturado.

De acuerdo a la condición crítica de un talud correspondiente al Ru, la tabla 21 nos muestra cada uno del RuC para un estado estático y pseudoestático dependiendo del ángulo de inclinación, lo que nos lleva a considerar las condiciones en las que el talud puede presentar fallas de acuerdo a la presión de poros y en la figura 13 determinamos que para un talud con pendiente de 15° se presenta una variación del 51% en condiciones estática y pseudoestática de acuerdo al RuC, mientras que para una pendiente de 35° los taludes fallan aun en estado seco.

Con el fin de obtener la cohesión y ángulo de fricción a la que un talud compuesto por residuos sólidos para ángulos de 15°, 20°, 25°, 30° y 35° puede presentar condiciones de falla, se realiza una sensibilización de estos parámetros por medio del SLIDE, de lo cual se obtienen las siguientes datos.

Para determinar la variación del ángulo de fricción en los taludes propuestos, se obtienen las figuras 14 y 15, y la tabla 22 donde se observa el ϕ crítico.

Figura 14 Curva de estabilidad FS Vs ϕ para taludes en altura estático y pseudoestático para falla circular



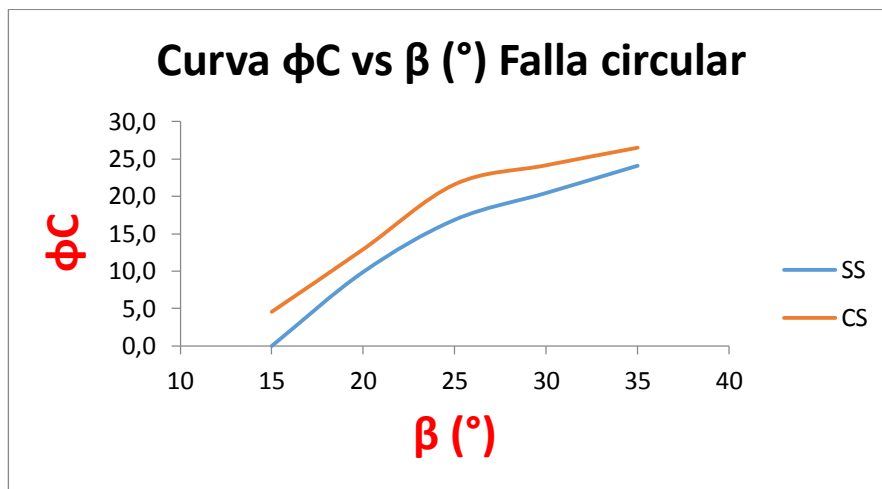
Fuente: propia

Tabla 22 Ángulo de fricción crítico para β con FS 1,5 Y 1,1

	FS = 1,5	FS = 1,1
	SS	CS
β (°)	ϕ Critico	ϕ Critico
15	0,000	4,573
20	9,897	12,927
25	16,871	21,610
30	20,455	24,165
35	24,099	26,510

Fuente: Propia

Figura 15 Curva ϕ_c Vs β para fallas circulares en condición estática y seudoestática



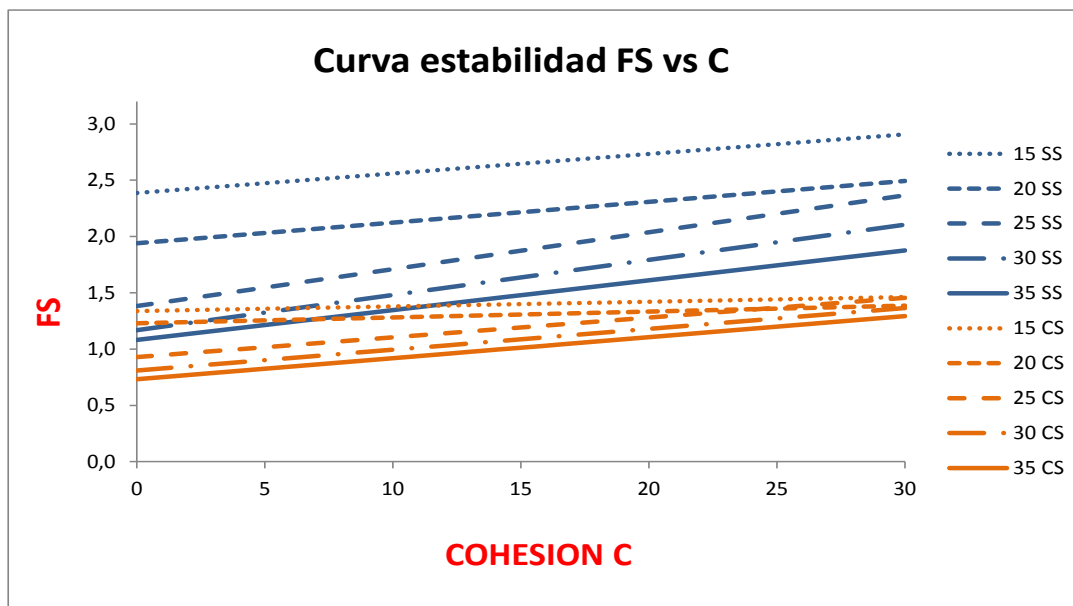
Fuente: propia

De acuerdo a la figura 14, se presenta un 77% de disminución del factor de seguridad para las condiciones estática y seudoestática entre pendientes de 15° y 35° con un ángulo de fricción igual a cero, para lo cual determinamos que a medida que aumenta el ángulo de fricción en los residuos sólidos, mayor será el factor de seguridad para el talud.

Considerando el análisis para determinar el ángulo de fricción crítico, la tabla 22 y la figura 15, nos muestran los valores mínimos necesarios de ϕ para que el talud no presente inestabilidad, la condición más crítica la presenta el ángulo de 35° seudoestático, el cual requiere un mínimo de $26,5^\circ$ de ϕ para que no se genere una falla en el talud.

Posterior a esto, se realiza un análisis sensitivo para la cohesión presentada en los taludes conformados por residuos sólidos, de lo cual se obtuvieron los datos de la figura 16 y se realizó una descripción de cohesión crítica para cada pendiente del talud (ver figura 17 y tabla 23)

Figura 16 Curva de estabilidad FS Vs C para taludes en altura estático y pseudoestático para falla circular



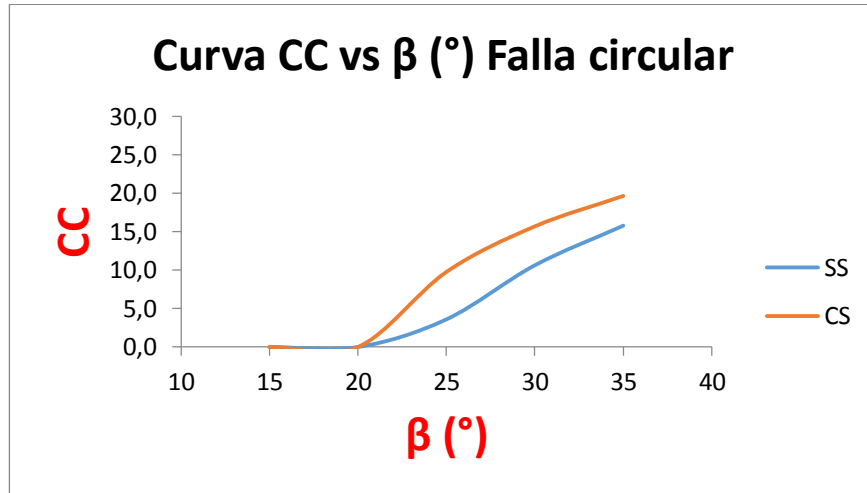
Fuente: Propia

Tabla 23 Cohesión crítica para β con FS 1,5 Y 1,1

	FS = 1,5	FS = 1,1
	SS	CS
β (°)	C Critico	C Critico
15	0,000	0,000
20	0,000	0,000
25	3,591	9,766
30	10,638	15,703
35	15,796	19,668

Fuente: Propia

Figura 17 Curva Cohesión crítica Vs β para fallas circulares en condición estática y pseudoestática



Fuente: Propia

En la figura 16, se evidencia una disminución del 69% del factor de seguridad de acuerdo a las pendientes del talud, abarcando tanto la condición estática como pseudoestática para una condición de cohesión igual a cero, tomando como referencia la condición más crítica que para este caso es el ángulo de 35° en condición pseudoestática, se determina una variación del 43% de cohesión mínima que evitar posibles fallas.

La tabla 23 y la figura 17 determinan la cohesión crítica que pueden llegar a tener los suelos antes de presentar algún tipo de falla, los taludes con pendientes mayores requieren de un mínimo de cohesión equivalente a 15 KN/ m² y 19 KN/ m², mientras que las pendientes más bajas presentan una cohesión igual a cero.

7.2.2 Para fallas no circulares

Para este caso, se tuvieron en cuenta los mismos parámetros y procedimiento mencionado en el numeral 7.2.1.1, su variación consiste en trabajar fallas No circulares para el cálculo de los factores de seguridad, lo que dio como resultado FS diferentes, en ángulos de inclinación mayores, el factor de seguridad disminuye a comparación del talud en altura con falla circular, estos valores se observan en las tablas 24 y 25 (matriz de diseño) para condición estática y seudoestatica respectivamente.

Tabla 24 Matriz de diseño para talud en altura con falla No circular en condición estática

β	Aa= 0,0								
	ru								
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
15°	2,987	2,753	2,519	2,285	2,053	1,821	1,592	1,366	1,137
20°	2,318	2,136	1,955	1,774	1,594	1,405	1,202	1,005	0,818
25°	1,943	1,781	1,619	1,459	1,300	1,144	0,990	0,841	0,688
30°	1,754	1,611	1,463	1,312	1,162	1,015	0,873	0,730	0,583
35°	1,593	1,453	1,313	1,174	1,035	0,899	0,764	0,631	0,503

Fuente: Propia

Tabla 25 Matriz de diseño para talud en altura con falla No circular en condición seudoestatica

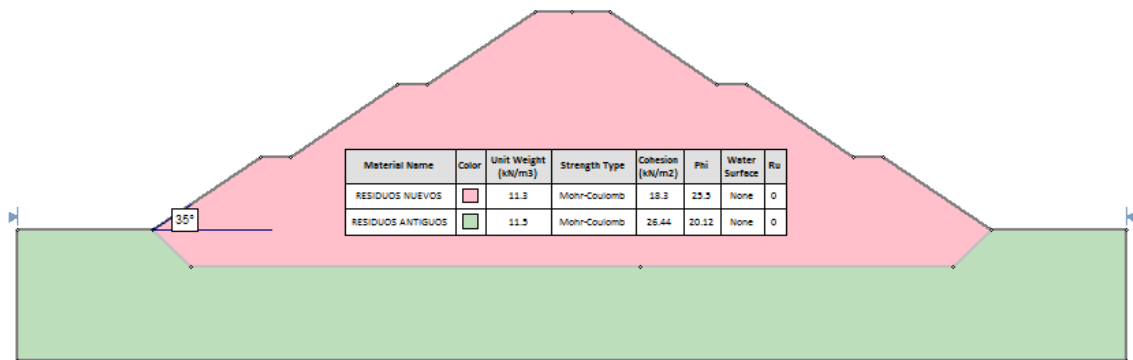
β	Aa= 0,2								
	ru								
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
15°	1,558	1,434	1,311	1,189	1,069	0,951	0,835	0,723	0,617
20°	1,367	1,258	1,150	1,043	0,937	0,831	0,719	0,616	0,512
25°	1,216	1,113	1,011	0,911	0,812	0,717	0,624	0,537	0,441
30°	1,170	1,074	0,971	0,871	0,773	0,677	0,576	0,478	0,387
35°	1,069	0,972	0,875	0,779	0,684	0,591	0,499	0,410	0,325

Fuente: Propia

7.2.2.1 Diseño de modelos estáticos y dinámicos para un talud en altura con falla No circular

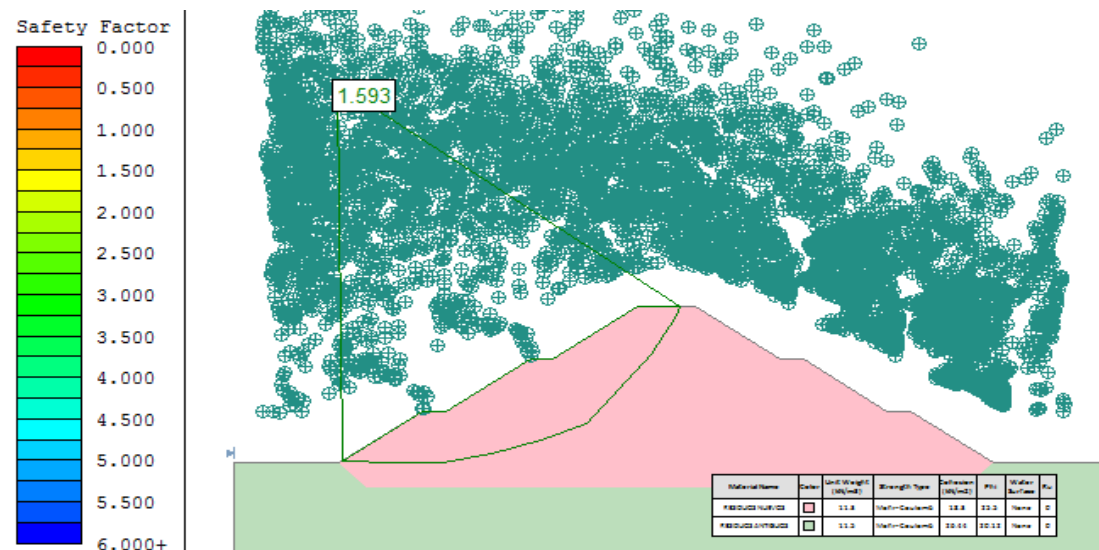
Se realizó el mismo procedimiento que en taludes con presencia de fallas circulares, los mismos parámetros del suelo y por medio del SLIDE se modelaron los diseños con fallas no circulares para observar la variación de los factores de seguridad (ver figuras 16 y 17)

Figura 18 Modelo en SLIDE relleno en altura de 35° estático



Fuente: Propia

Figura 19 Factor de seguridad para un talud de 35° estático

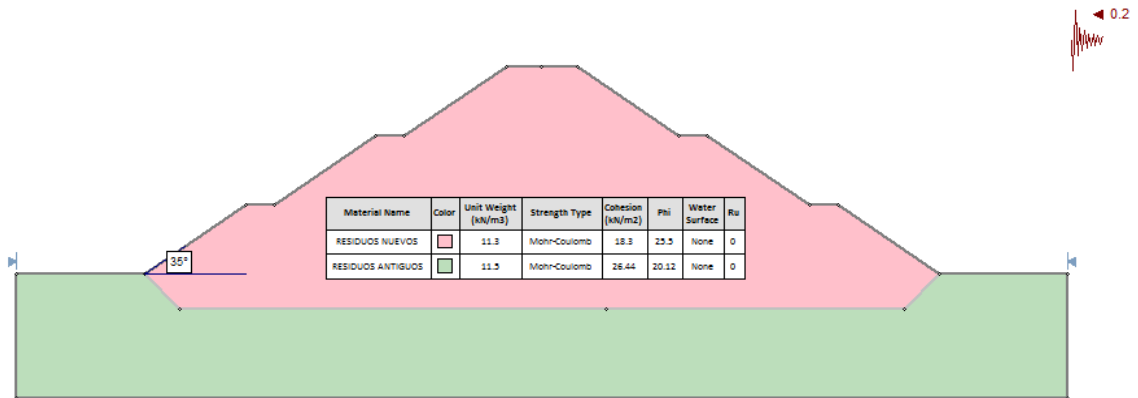


Fuente: Propia

Para un talud de 35° en condición estática y tipo de falla No circular se obtuvo un factor de seguridad de 1.593.

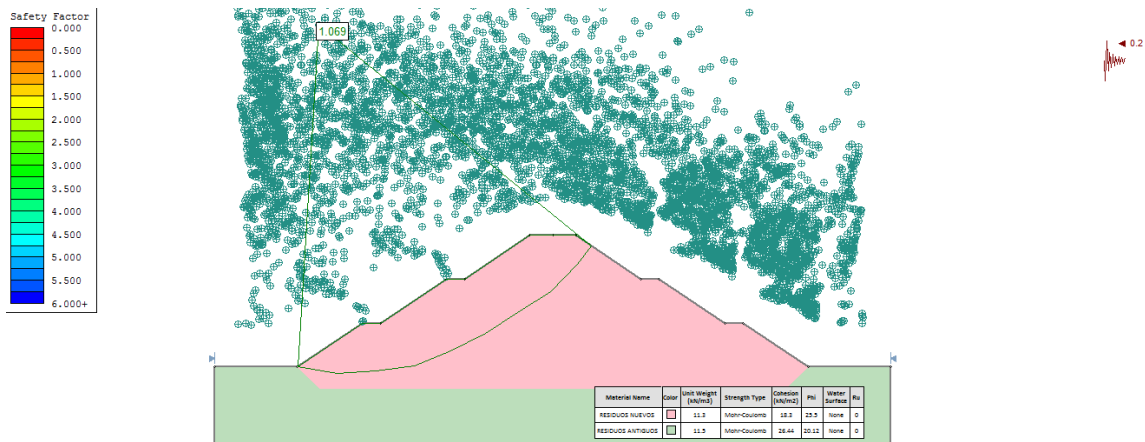
Este procedimiento se realizó para cada pendiente del talud 15°, 20°, 25°, 30° y 35°, para los mismos parámetros de Ru y para condiciones estáticas y pseudoestáticas. (Ver anexo 1)

Figura 20 Modelo en SLIDE relleno en altura de 35° pseudoestático



Fuente: Propia

Figura 21 Factor de seguridad para un talud de 35° pseudoestático

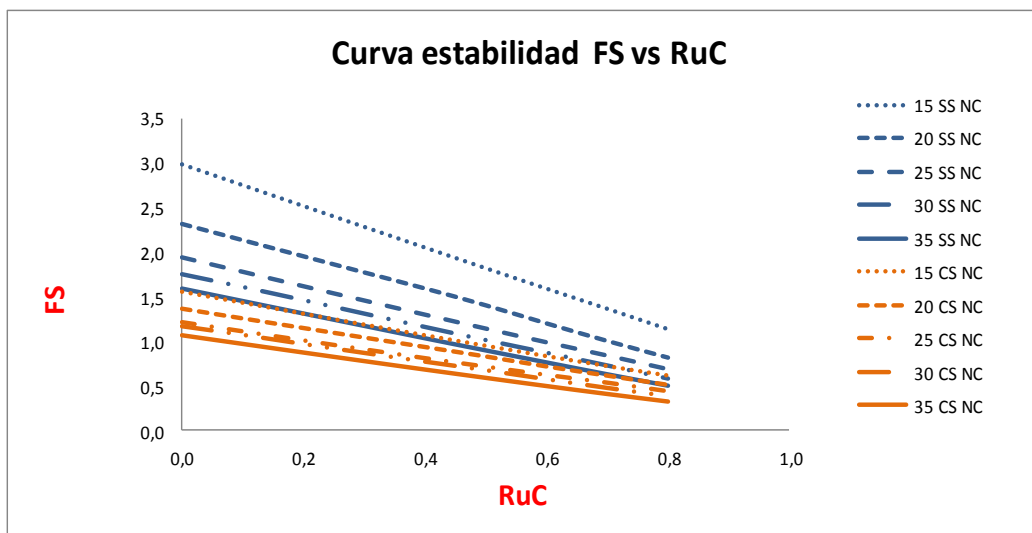


Fuente: Propia

Para un talud con pendiente de 35°, es condición pseudoestática y falla no circular, se presenta un factor de seguridad de 1.069.

Al obtener cada uno de los factores de seguridad de falla No circular tanto para taludes estáticos (ss) como pseudoestáticos (cs), se realizaron curvas de estabilidad de FS vs Ru para determinar en cada pendiente del talud un Ru crítico (ver figuras 22 y 23 y tabla 26 para RuC)

Figura 22 Curva de estabilidad FS Vs Ru para taludes en altura estático y pseudoestático para falla No circular



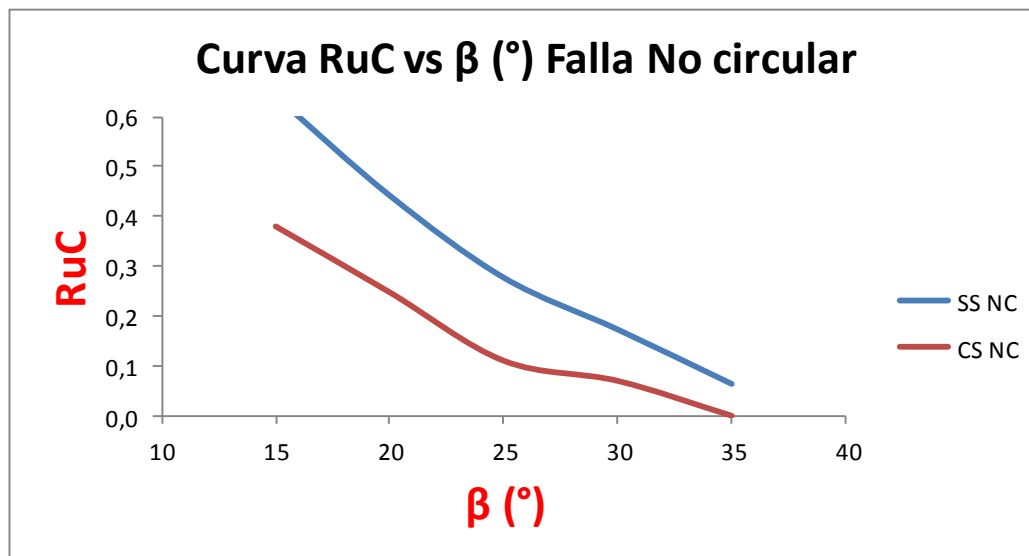
Fuente: Propia

Tabla 26 RuC para β con FS 1,5 Y 1,1

	FS = 1,5	FS = 1,1
	SS	CS
β (°)	RuC Critico	RuC Critico
15	0,641	0,380
20	0,442	0,248
25	0,277	0,110
30	0,173	0,070
35	0,064	0,000

Fuente: Propia

Figura 23 Curva Ru_c Vs β para fallas No circulares en condición estática y pseudoestática



Fuente: Propia

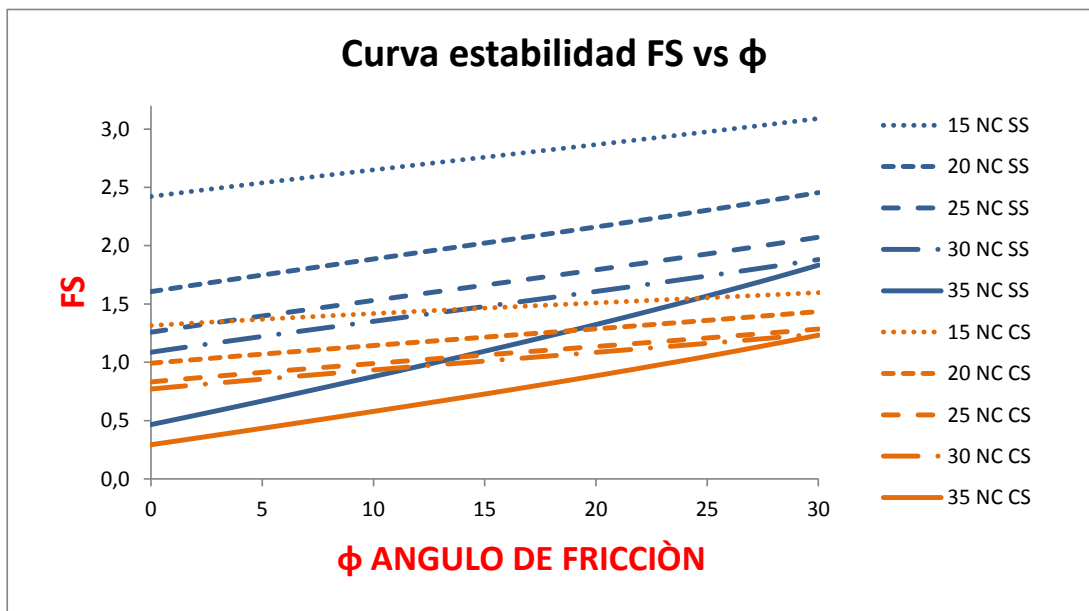
La figura 22 nos muestra una relación de factores de seguridad vs el Ru , donde la condición estática presenta una disminución del 47% del FS entre las diferentes inclinaciones del talud para un estado seco, la condición pseudoestática presenta una variación del 24% con respecto al factor seguridad y los ángulos de inclinación. El Ru muestra un valor máximo del 67% necesario para que el talud con inclinación de 35° no presente fallas.

Luego de este análisis se determinó el Ru crítico para pendientes de $15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ y 35° obteniendo los resultado presentando en la tabla 26 y la figura 23, donde se evidencia cada uno de los Ru_c mínimos para que un talud compactado con residuos sólidos no presente inestabilidad, es importante resaltar que los taludes con pendientes mayores, en este caso de 35° incluso con un $Ru=0$ presentan algún tipo de falla.

Al igual que en el numeral 7.2.1.1 se realizó un análisis sensitivo para los parámetros de ángulo de fricción y cohesión para fallas No circulares y de esta manera determinar la condición más crítica en cada caso para cada ángulo de inclinación en los taludes tipo altura.

Para el ángulo de fricción se obtuvieron los resultados descritos en la figura 24.

Figura 24 Curva de estabilidad FS Vs ϕ_c para taludes en altura estático y seudoestático para falla No circular



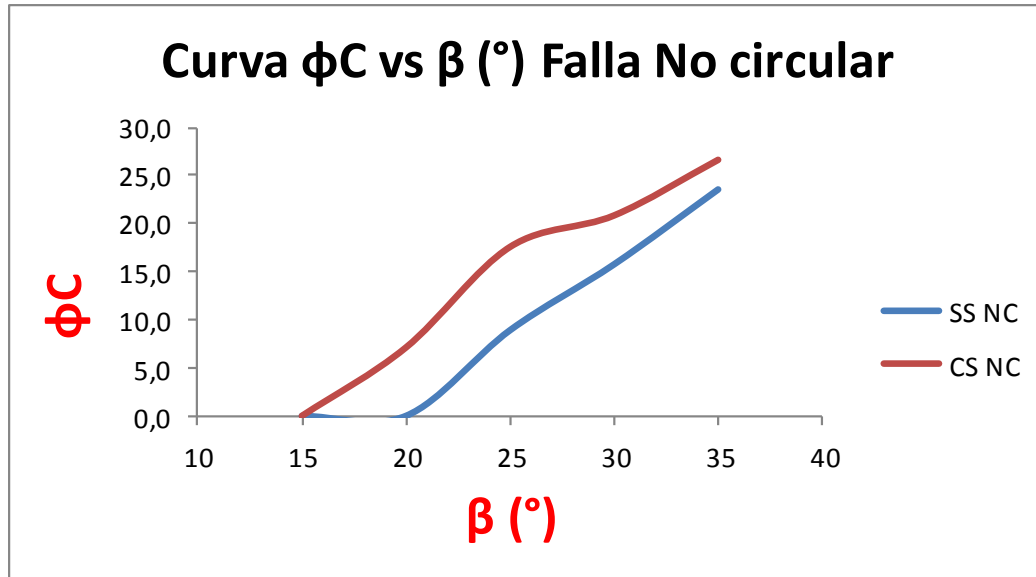
Fuente: propia

Tabla 27 Angulo de fricción crítico para β con FS 1,5 Y 1,1

	FS = 1,5	FS = 1,1
	SS	CS
β (°)	ϕ Critico	ϕ Critico
15	0,000	0,000
20	0,000	7,116
25	8,910	17,570
30	15,759	20,845
35	23,549	26,629

Fuente: Propia

Figura 25 Curva Angulo de ϕC Vs β para fallas No circulares en condición estática y pseudoestática



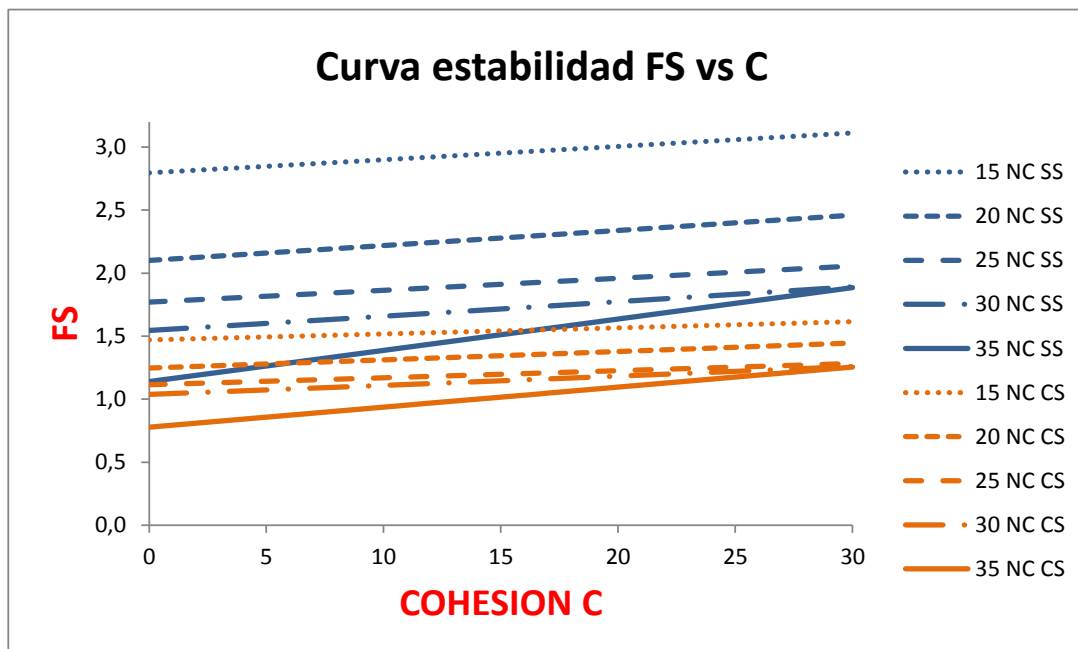
Fuente: propia

De acuerdo a la figura 24, el factor de seguridad en relación al ángulo de fricción de los taludes disminuye un 88%, tomando en general condiciones estáticas y pseudoestáticas, lo que determina que cuando se presentan fallas no circulares, el factor de seguridad referente al ángulo de fricción aumenta, el suelo se vuelve más estable. Teniendo en cuenta una pendiente crítica en este caso de 35°, el ángulo de fricción necesario es de 76% para que el talud no presente fallas.

Con relación a los datos obtenidos, se determina el ángulo de fricción crítico para cada pendiente del talud en altura, lo cual se evidencia en la tabla 27 y en la figura 25, donde se observa que a mayor pendiente mayor debe ser el ángulo de fricción.

Siguiendo con la misma metodología, se realiza el análisis sensitivo para la cohesión en fallas No circulares, obteniendo los valores que se evidencian en la figura 26 y valores críticos propuestos en la figura 27 y tabla 28.

Figura 26 Curva de estabilidad FS Vs C para taludes en altura estático y pseudoestático para falla No circular



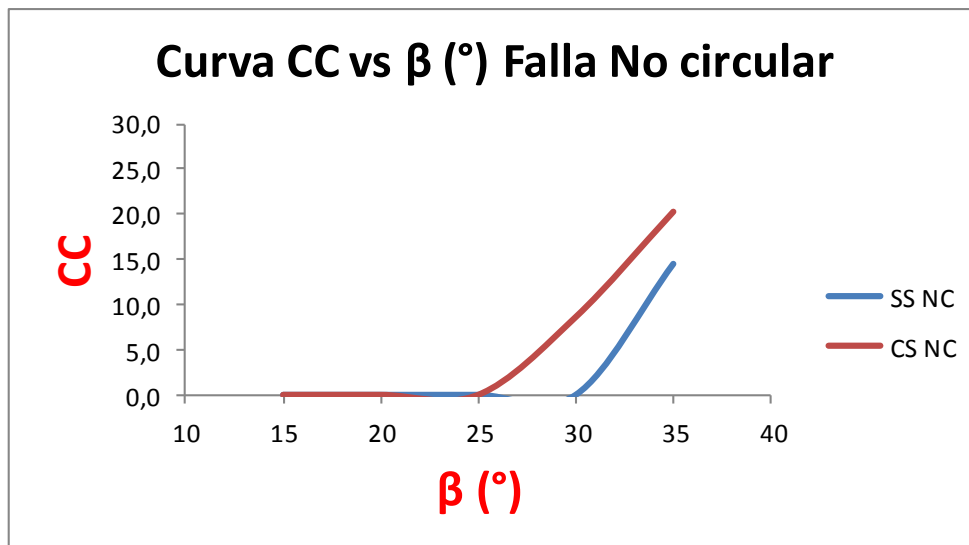
Fuente: propia

Tabla 28 Cohesión crítica para θ con FS 1,5 Y 1,1

	FS = 1,5	FS = 1,1
	SS	CS
β (°)	C Critico	C Critico
15	0,000	0,000
20	0,000	0,000
25	0,000	0,000
30	0,000	8,622
35	14,502	20,277

Fuente: propia

Figura 27 Curva cohesión crítica Vs β para fallas No circulares en condición estática y pseudoestática



Fuente: propia

La figura 26 representa una curva de estabilidad donde el factor de seguridad presenta una disminución del 72% con relación a la pendiente mayor y menor propuesta para este talud en condición estática y pseudoestática respectivamente, y para una condición crítica tomando el mayor ángulo de inclinación, la cohesión presenta una variación de 38% como valor mínimo necesario para que el talud no presente inestabilidad.

Para condiciones críticas de cohesión, se observa en la tabla 28 valores mínimos necesarios para cada ángulo de inclinación, donde se determina que para taludes con pendiente de 15°, 20° y 25° conformados por residuos sólidos no presentaran fallas aun con una cohesión=0, mientras que un talud de 35° es necesario una cohesión entre 14KN/m2 y 20 KN/M2 para evitar posibles fallas.

7.3 DESARROLLO DEL MODELO PARA TALUDES EN PENDIENTE

Para este tipo de talud, se tuvo en cuenta dos clases de pendientes una interna que de acuerdo al diseño propuesto fueron de 20°, 25° y 30°, y un ángulo de inclinación externo que varía entre 15°, 20°, 25°, 30° y 35° como

se evidencia en las matrices más adelante expuestas y en los figuras, esto para determinar cómo sería el comportamiento del talud con residuos nuevos compactados sobre pendientes diferentes de residuos antiguos.

7.3.1 Para fallas circulares

Se trabajó la matriz mencionada en el numeral 7, donde por medio de modelaciones se obtuvieron factores de seguridad, en este caso el diseño del talud se desarrolló teniendo en cuenta dos pendientes, para condiciones estáticas y seudoestáticas. (Ver tablas 29 y 30) y se trabajó las mismas condiciones de Ru para el talud.

Tabla 29 Matriz de diseño para talud en pendiente con falla circular en condición estática

PENDIENTE	β	Aa= 0,0								
		ru								
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
20°	15°	2,570	2,377	2,184	1,992	1,795	1,594	1,393	1,186	0,977
	20°	2,129	1,972	1,815	1,659	1,501	1,340	1,179	1,013	0,845
	25°	1,848	1,715	1,582	1,449	1,314	1,177	1,038	0,900	0,759
	30°	1,649	1,530	1,412	1,294	1,172	1,049	0,927	0,806	0,684
	35°	1,502	1,394	1,286	1,177	1,065	0,954	0,844	0,734	0,622
25°	15°	2,562	2,373	2,182	1,991	1,794	1,595	1,396	1,190	0,981
	20°	2,121	1,969	1,814	1,659	1,502	1,344	1,183	1,020	0,852
	25°	1,853	1,720	1,586	1,450	1,314	1,178	1,043	0,904	0,763
	30°	1,648	1,535	1,418	1,297	1,177	1,057	0,936	0,813	0,690
	35°	1,502	1,395	1,288	1,179	1,071	0,964	0,854	0,745	0,633
30°	15°	2,569	2,381	2,188	1,994	1,800	1,599	1,398	1,189	0,981
	20°	2,125	1,975	1,822	1,668	1,513	1,352	1,190	1,021	0,852
	25°	1,855	1,725	1,594	1,460	1,324	1,189	1,049	0,909	0,764
	30°	1,656	1,539	1,421	1,303	1,185	1,064	0,942	0,821	0,698
	35°	1,502	1,397	1,293	1,189	1,083	0,974	0,860	0,748	0,634

Fuente: propia

Tabla 30 Matriz de diseño para talud en pendiente con falla circular en condición pseudoestática

PENDIENTE	β	Aa=0,2								
		ru								
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
20°	15°	1,345	1,241	1,137	1,032	0,928	0,821	0,714	0,606	0,500
	20°	1,240	1,147	1,053	0,959	0,864	0,770	0,674	0,579	0,482
	25°	1,158	1,071	0,985	0,897	0,809	0,722	0,636	0,548	0,461
	30°	1,088	1,008	0,925	0,842	0,760	0,678	0,596	0,515	0,436
	35°	1,027	0,949	0,871	0,793	0,716	0,639	0,563	0,486	0,410
25°	15°	1,348	1,245	1,140	1,035	0,929	0,823	0,717	0,613	0,508
	20°	1,243	1,151	1,058	0,965	0,870	0,774	0,677	0,581	0,487
	25°	1,160	1,074	0,988	0,903	0,817	0,729	0,640	0,552	0,465
	30°	1,085	1,006	0,927	0,848	0,768	0,687	0,607	0,523	0,440
	35°	1,024	0,949	0,874	0,799	0,723	0,647	0,571	0,496	0,420
30°	15°	1,352	1,251	1,145	1,039	0,934	0,829	0,725	0,619	0,516
	20°	1,245	1,151	1,057	0,964	0,871	0,777	0,681	0,585	0,492
	25°	1,162	1,076	0,991	0,905	0,817	0,729	0,642	0,556	0,468
	30°	1,096	1,017	0,936	0,854	0,773	0,691	0,607	0,524	0,443
	35°	1,029	0,954	0,879	0,804	0,727	0,650	0,573	0,495	0,418

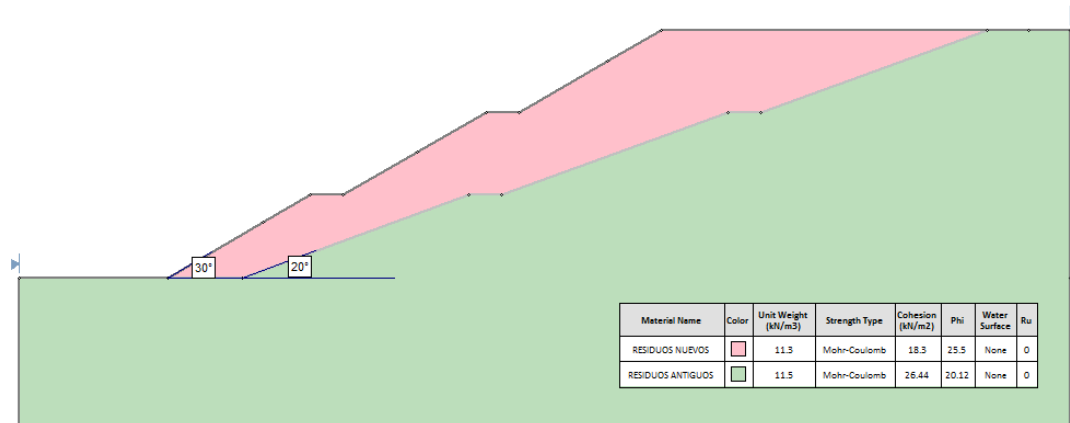
Fuente: propia

7.3.1.1 Diseño de modelos estáticos y dinámicos para un talud en pendiente con falla circular

Se diseñaron taludes con diferentes pendientes, una interna que permanece fija durante las modelaciones y una externa que varía, para lograr de esta manera identificar el comportamiento del talud cuando se compactan residuos nuevos sobre una pendiente de residuos antiguos, esto se observa en las figuras expuestas a continuación.

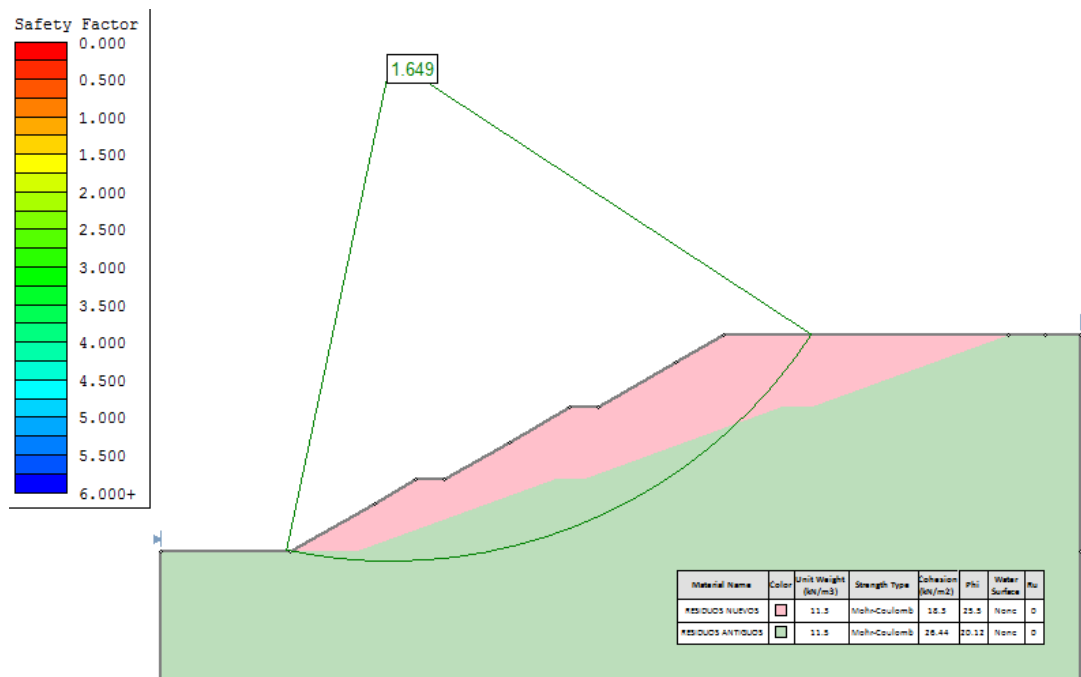
Modelo SLIDE con pendiente interna de 20° y pendiente externa de 30°

Figura 28 Modelo en SLIDE relleno en pendiente de 20° x 30° estático



Fuente: propia

Figura 29 Factor de seguridad para un talud de 20°x30° estático

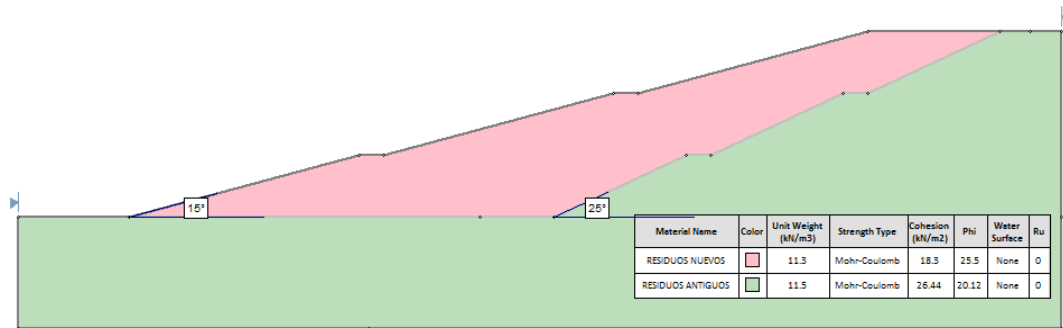


Fuente: propia

Para este diseño, se obtuvo un factor de seguridad de 1,649 en condición estática y talud de 20°x30°. Para los demás taludes con pendiente interna de 20° en condición estática y pseudoestática Ver anexo 2.

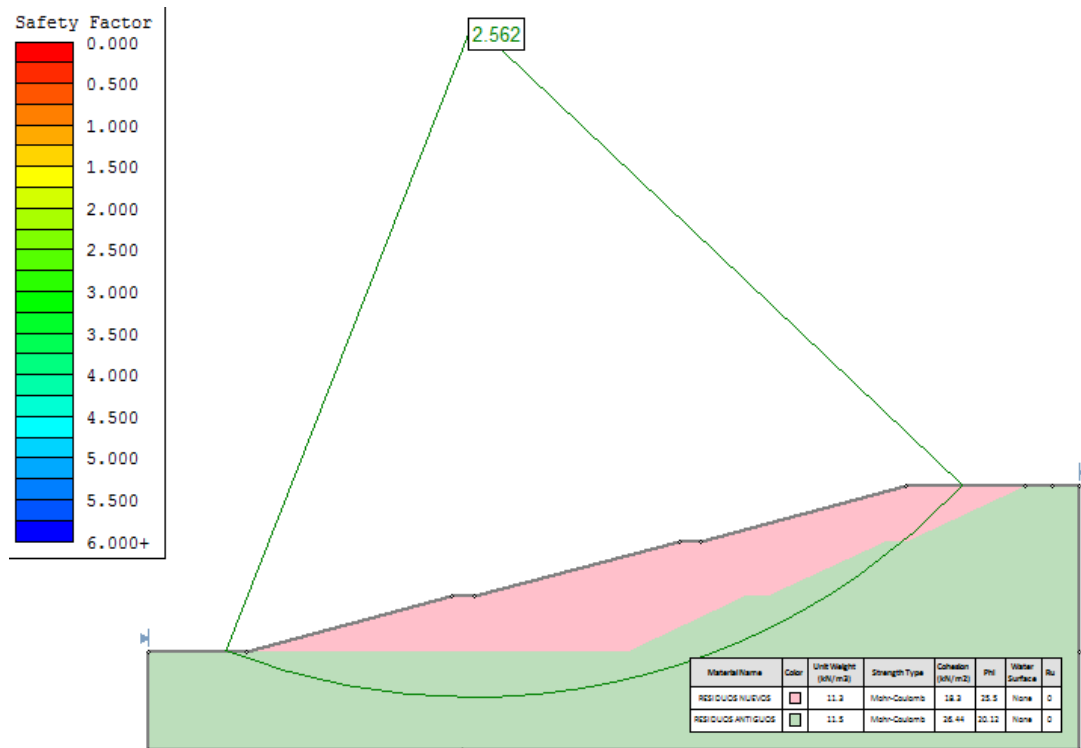
Modelo SLIDE con pendiente interna de 25° y pendiente externa de 15°

Figura 30 Modelo en SLIDE relleno en pendiente de 25° x 15° estático



Fuente: propia

Figura 31 Factor de seguridad para un talud de 25°x15° estático

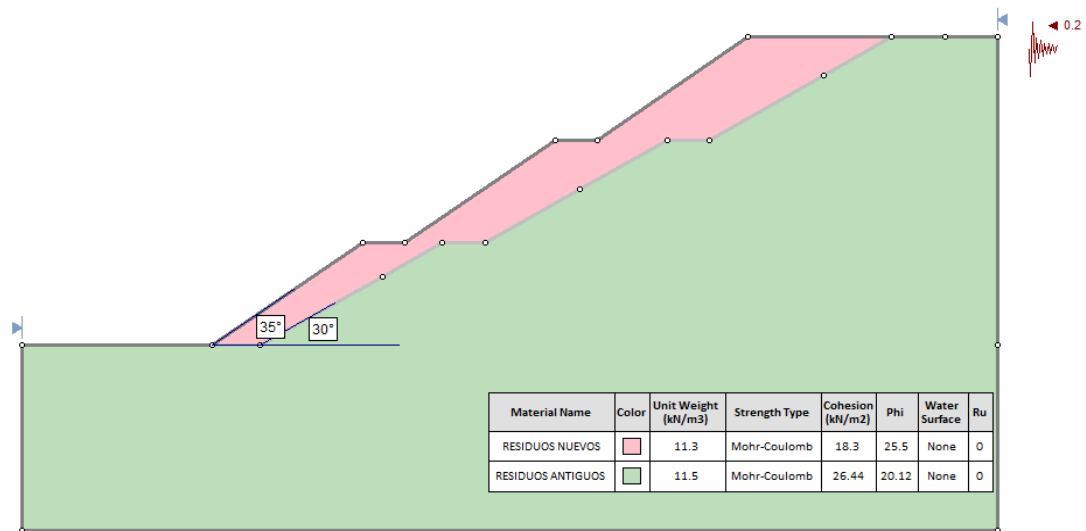


Fuente: propia

Para este diseño, se obtuvo un factor de seguridad de 2,562 en condición estática y talud de 25°x15°. Para los demás taludes con pendiente interna de 25° en condición estática y pseudoestática Ver anexo 3.

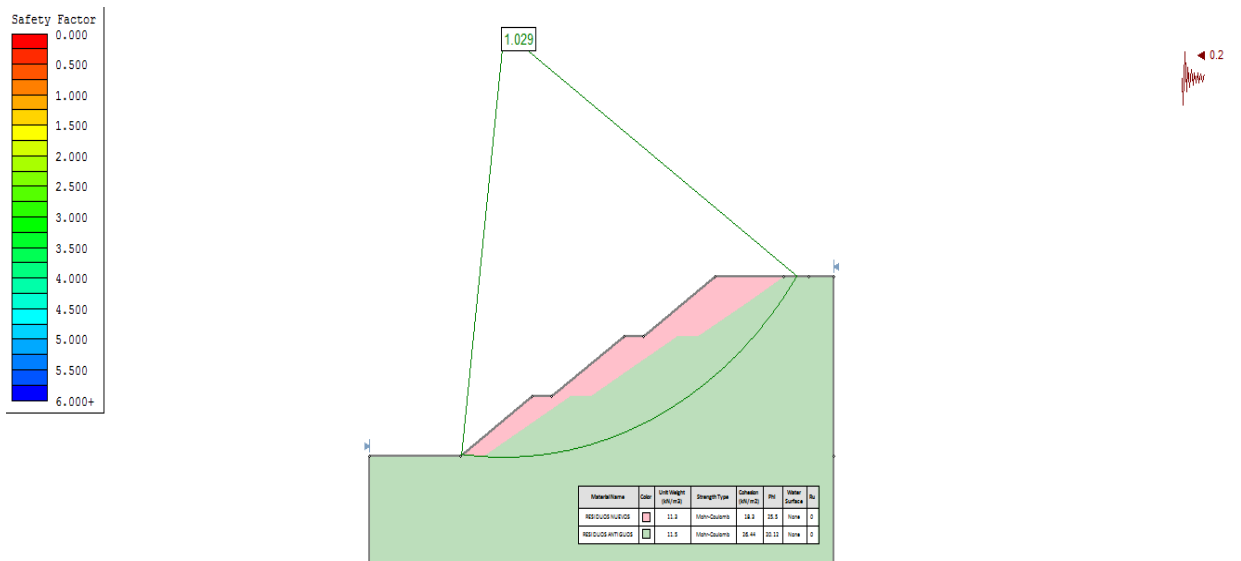
Modelo SLIDE con pendiente interna de 30° y pendiente externa de 35°

Figura 32 Modelo en SLIDE relleno en pendiente de 30° x 35° pseudoestático



Fuente: propia

Figura 33 Factor de seguridad para un talud de 30°x35° pseudoestático

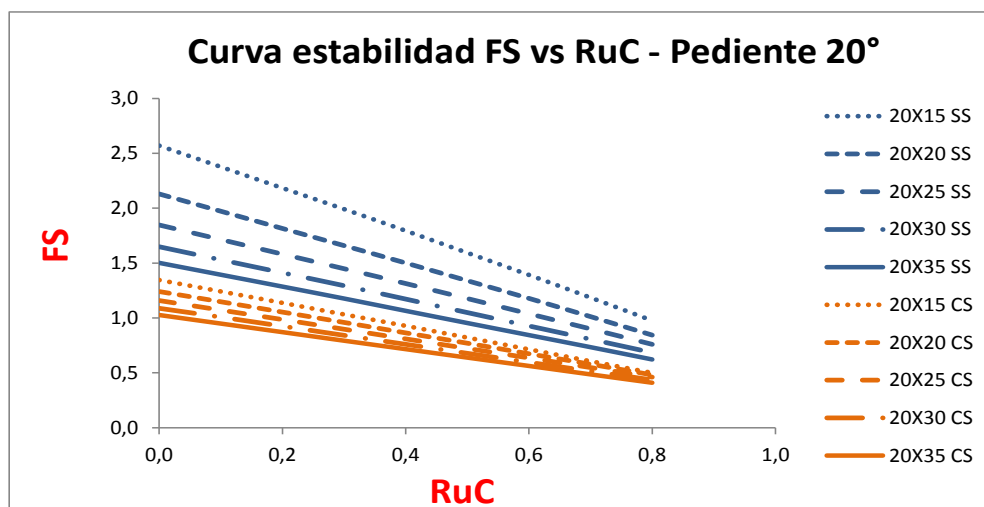


Fuente: propia

Para este diseño, se obtuvo un factor de seguridad de 1,029 en condición estática y talud de 30°x35°. Para los demás taludes con pendiente interna de 30° en condición estática y seudoestática Ver anexo 4.

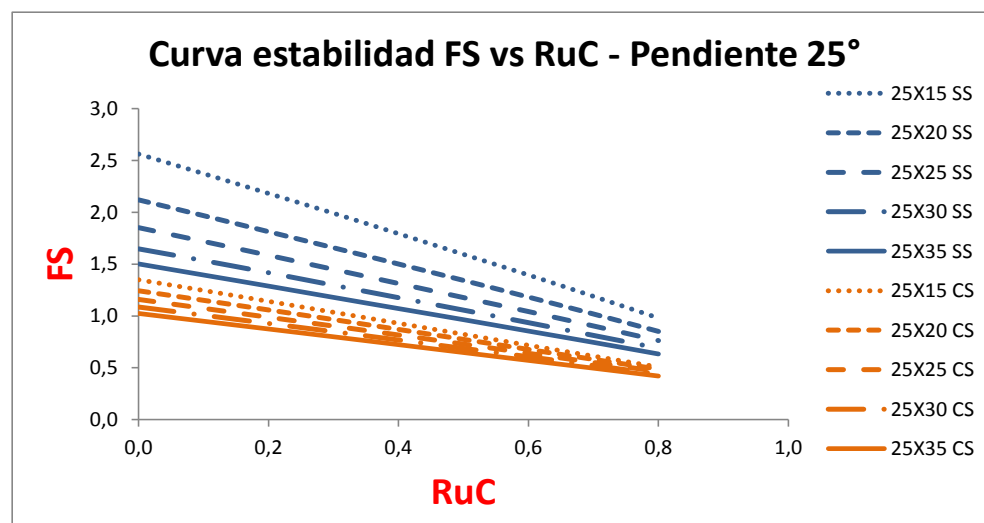
Al obtener cada uno de los factores de seguridad de falla circular para taludes en pendiente, tanto estáticos (ss) como seudoestáticos (cs), se realizaron curvas de estabilidad de FS vs Ru para determinar en cada pendiente del talud un Ru crítico (ver figuras 34, 35 y 36 Tabla 31 para RuC)

Figura 34 Curva de estabilidad FS Vs Ru para taludes en pendiente de 20° estático y seudoestático para falla circular



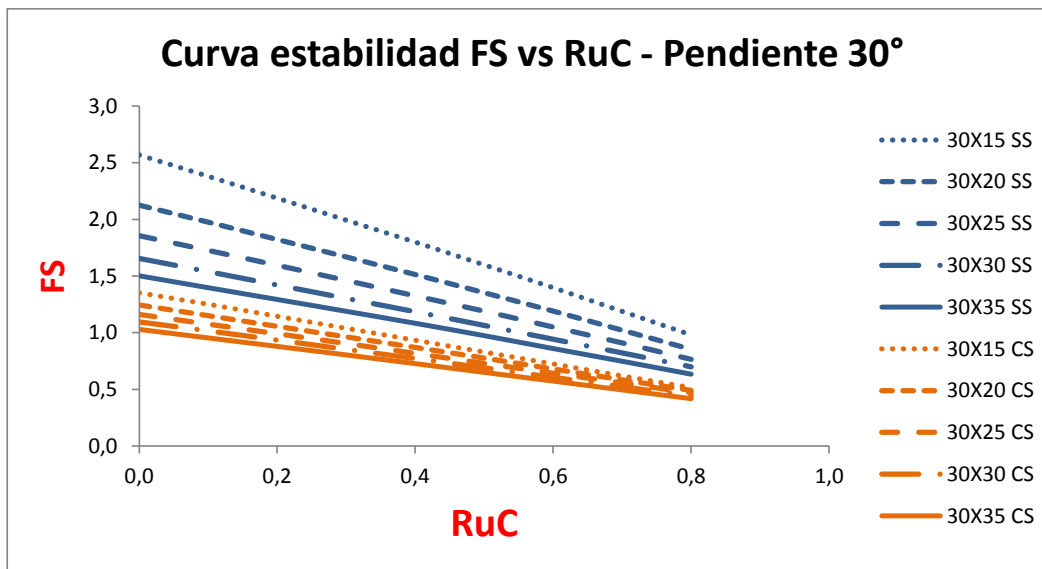
Fuente: propia

Figura 35 Curva de estabilidad FS Vs Ru para taludes en pendiente 25° estático y seudoestático para falla circular



Fuente: propia

Figura 36 Curva de estabilidad FS Vs Ru para taludes en pendiente 30° estático y pseudoestático para falla circular

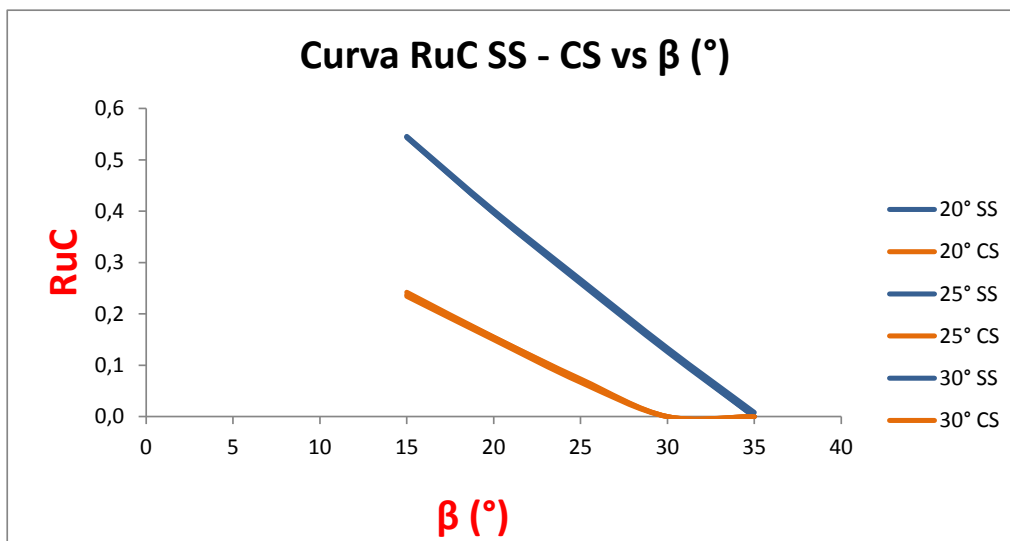


Fuente: propia

Tabla 31 RuC para β con FS 1,5 Y 1,1

		FS = 1,5	FS = 1,1
		SS	CS
		RuC Critico	RuC Critico
20	β (°)		
	15	0,544	0,234
	20	0,397	0,150
	25	0,260	0,067
	30	0,126	0,000
	35	0,000	0,000
25	β (°)		
	15	0,544	0,237
	20	0,397	0,155
	25	0,262	0,071
	30	0,129	0,000
	35	0,000	0,000
30	β (°)		
	15	0,546	0,242
	20	0,401	0,155
	25	0,267	0,073
	30	0,134	0,000
	35	0,008	0,000

Figura 37 RuC Vs β para fallas circulares en condición estática y pseudoestática



Fuente: Propia

En las figuras 34, 35, 36 están representados los factores de seguridad obtenidos por medio de las modelaciones en SLIDE, teniendo en cuenta la variación del ángulo de inclinación interno, donde se observa que los factores de seguridad dan muy similares entre sí, por tal razón se realizó un promedio entre los FS obtenidos de las tres pendientes 20°, 25° y 30°, y se observó que se presenta una disminución del factor de seguridad del 44% en condición estática en un suelo seco, en condición saturada se evidencia una disminución del FS de 35%, para un estado pseudoestático la reducción de factor de seguridad es de 24% en condición seco y para suelos saturados la variación es de 18%. La variación del Ru en condición crítica es del 59% entre condición seca y saturada.

De acuerdo a la tabla 31, se observa el valor mínimo de Ru para cada pendiente del talud, lo que conlleva a decir que las condiciones más críticas se ven en los taludes con gran pendiente.

7.3.2 Para fallas No circulares

Par las fallas no circulares, se utilizó la misma metodología utilizada en capítulo 7.3.1, para este caso la única variación radica en que se trabajaron fallas no circulares y así lograr hacer un comparativo de los factores de seguridad obtenidos con fallas circulares.

Los resultados de FS se ven reflejados en las tablas 32 y 33.

Tabla 32 Matriz de diseño para talud en pendiente con falla No circular en condición estática

PENDIENTE	β	Aa= 0,0								
		ru								
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
20°	15°	2,905	2,684	2,463	2,243	2,025	1,806	1,590	1,376	1,166
	20°	2,240	2,060	1,881	1,702	1,525	1,350	1,178	1,009	0,846
	25°	1,856	1,714	1,572	1,430	1,282	1,136	0,992	0,851	0,715
	30°	1,645	1,517	1,389	1,262	1,136	1,010	0,886	0,765	0,645
	35°	1,479	1,369	1,259	1,149	1,034	0,921	0,811	0,697	0,587
25°	15°	2,976	2,750	2,523	2,297	2,071	1,847	1,624	1,403	1,174
	20°	2,210	2,046	1,883	1,720	1,558	1,397	1,231	1,056	0,885
	25°	1,810	1,673	1,536	1,399	1,264	1,130	0,998	0,870	0,728
	30°	1,626	1,507	1,388	1,270	1,143	1,014	0,888	0,763	0,642
	35°	1,465	1,357	1,249	1,142	1,035	0,922	0,810	0,701	0,593
30°	15°	2,958	2,738	2,518	2,298	2,074	1,848	1,615	1,376	1,142
	20°	2,256	2,087	1,918	1,750	1,580	1,386	1,195	1,008	0,828
	25°	1,850	1,716	1,582	1,437	1,290	1,144	0,999	0,856	0,717
	30°	1,625	1,505	1,385	1,265	1,144	1,018	0,893	0,770	0,649
	35°	1,467	1,364	1,262	1,157	1,042	0,927	0,815	0,705	0,600

Fuente: propia

Tabla 33 Matriz de diseño para talud en pendiente con falla No circular en condición pseudoestática

PENDIENTE	β	Aa= 0,2								
		ru								
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
20°	15°	1,552	1,432	1,312	1,194	1,077	0,962	0,849	0,739	0,634
	20°	1,321	1,214	1,108	1,004	0,901	0,801	0,704	0,612	0,540
	25°	1,177	1,085	0,994	0,900	0,807	0,717	0,629	0,545	0,469
	30°	1,089	1,002	0,916	0,831	0,746	0,663	0,581	0,500	0,422
	35°	1,024	0,943	0,862	0,782	0,704	0,626	0,545	0,466	0,390
25°	15°	1,553	1,433	1,314	1,196	1,079	0,964	0,851	0,741	0,636
	20°	1,321	1,223	1,126	1,029	0,924	0,820	0,720	0,624	0,536
	25°	1,152	1,064	0,977	0,891	0,804	0,718	0,634	0,551	0,473
	30°	1,090	1,008	0,920	0,833	0,746	0,662	0,579	0,499	0,423
	35°	1,004	0,928	0,852	0,776	0,698	0,620	0,543	0,467	0,394
30°	15°	1,557	1,436	1,316	1,198	1,080	0,964	0,851	0,741	0,635
	20°	1,337	1,236	1,135	1,036	0,924	0,813	0,707	0,608	0,540
	25°	1,178	1,085	0,993	0,902	0,811	0,720	0,628	0,538	0,452
	30°	1,083	1,000	0,917	0,836	0,751	0,667	0,585	0,505	0,428
	35°	1,020	0,948	0,875	0,795	0,715	0,637	0,560	0,483	0,408

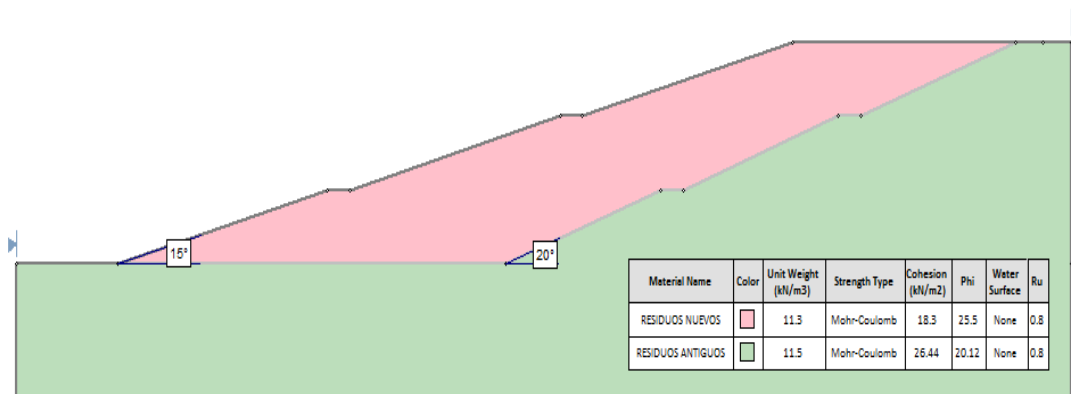
Fuente: propia

7.3.2.1 Diseño de modelos estáticos y dinámicos para un talud en pendiente con falla No circular

Se manejaron los mismos diseños de taludes expuestos en el capítulo 7.3.1.1, donde se diseñaron dos pendientes una interna y otra externa, para este caso se trabajaron solo fallas No circulares como se observa en las siguientes figuras.

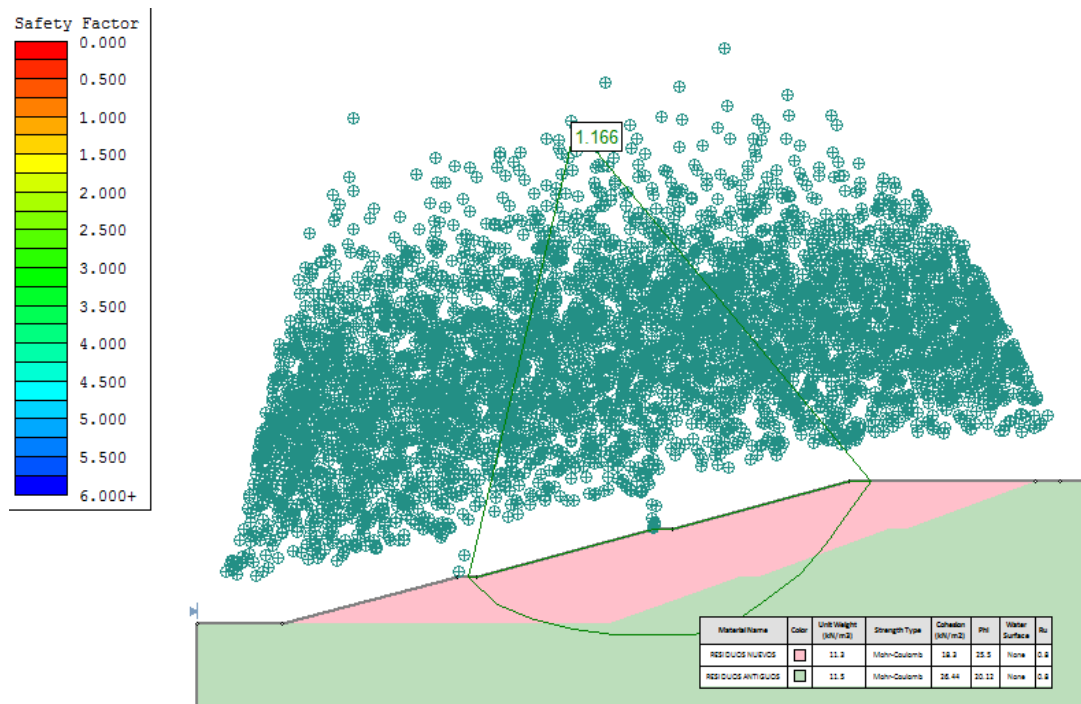
Modelo SLIDE con pendiente interna de 20° y pendiente externa de 15°

Figura 38 Modelo en SLIDE relleno en pendiente de 20° x 15° estático



Fuente: propia

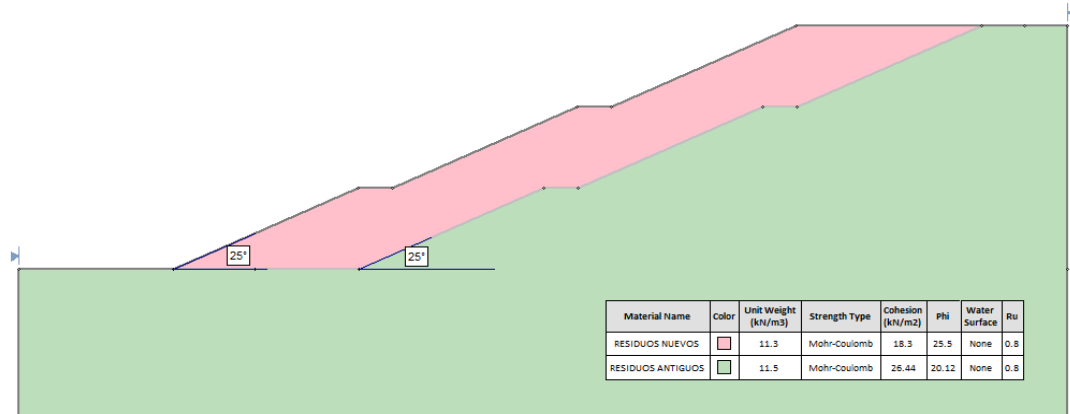
Figura 39 Factor de seguridad para un talud de 20°x15° estático



Para este diseño, se obtuvo un factor de seguridad de 1,166 en condición estática y talud de 20°x15°.

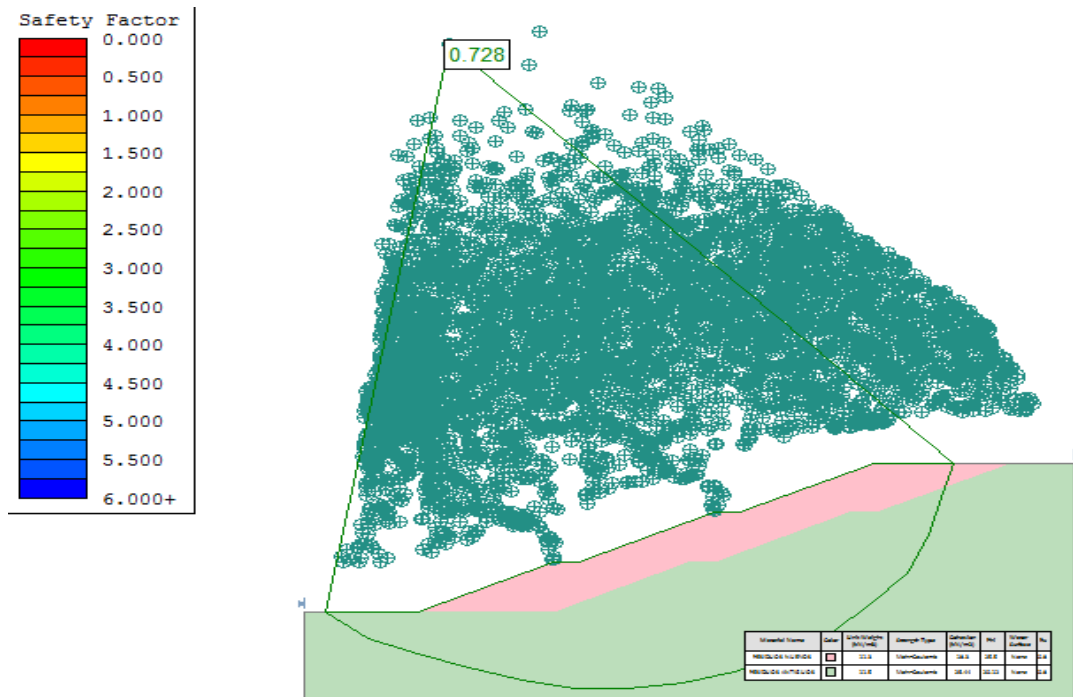
Modelo SLIDE con pendiente interna de 25° y pendiente externa de 25°

Figura 40 Modelo en SLIDE relleno en pendiente de 25° x 25° estático



Fuente: propia

Figura 41 Factor de seguridad para un talud de 25°x25° estático

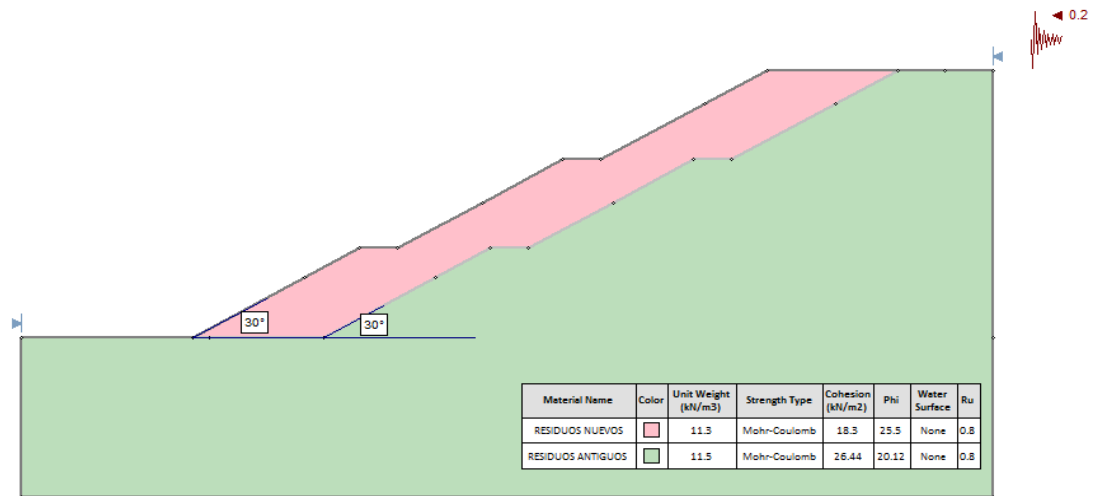


Fuente: propia

Para este diseño, se obtuvo un factor de seguridad de 0,728 en condición estática y talud de 25°x25°.

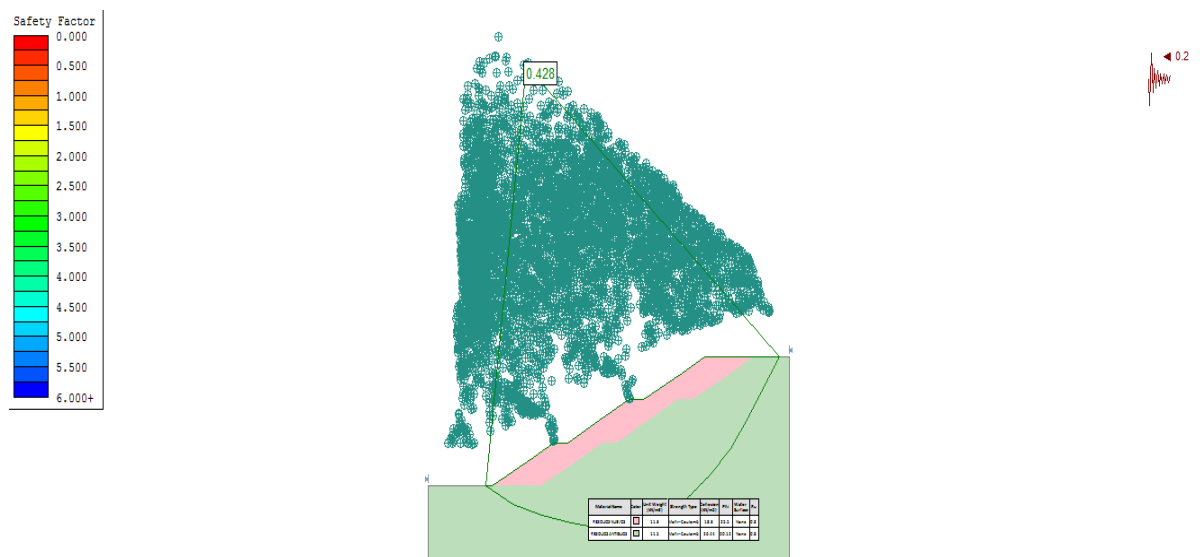
Modelo SLIDE con pendiente interna de 30° y pendiente externa de 30°

Figura 42 Modelo en SLIDE relleno en pendiente de 30° x 30° seudoestático



Fuente: propia

Figura 43 Factor de seguridad para un talud de 30°x30° seudoestático

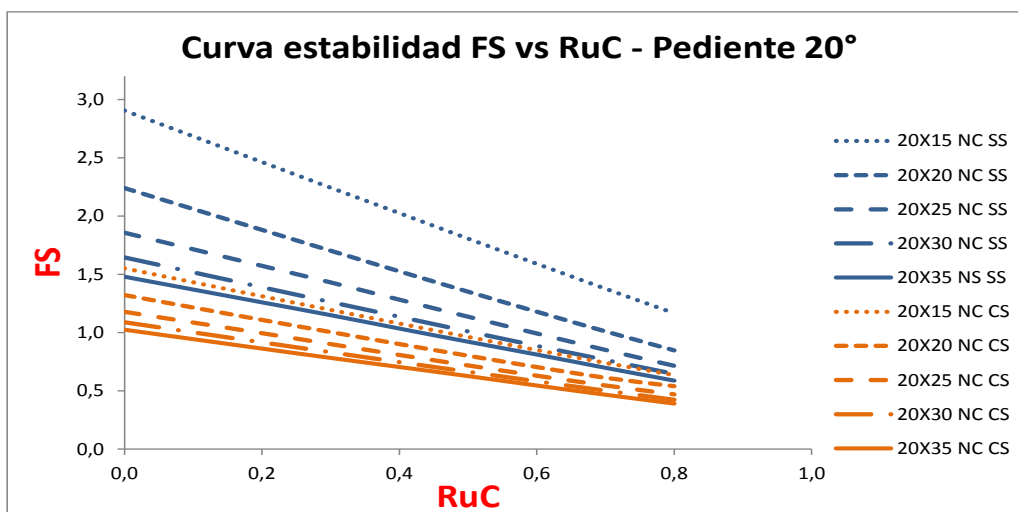


Fuente: propia

Para este diseño, se obtuvo un factor de seguridad de 0,428 en condición estática y talud de 30°x30°.

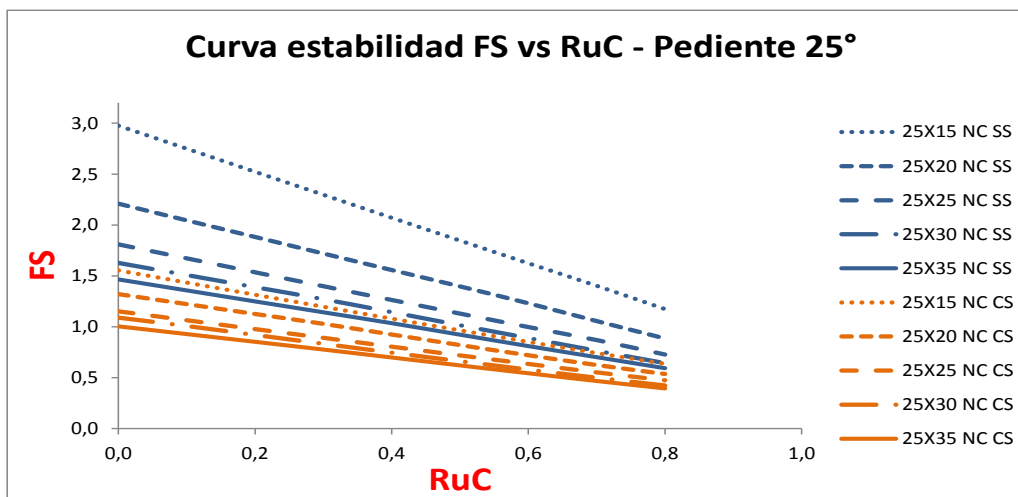
Al obtener cada uno de los factores de seguridad de falla No circular para taludes en pendiente, tanto estáticos (ss) como pseudoestáticos (cs), se realizaron curvas de estabilidad de FS vs Ru para determinar en cada pendiente del talud un Ru crítico (ver figuras 44, 45 y 46 Tabla 34 para RuC)

Figura 44 Curva de estabilidad FS Vs Ru para taludes en pendiente de 20° estático y pseudoestático para falla No circular



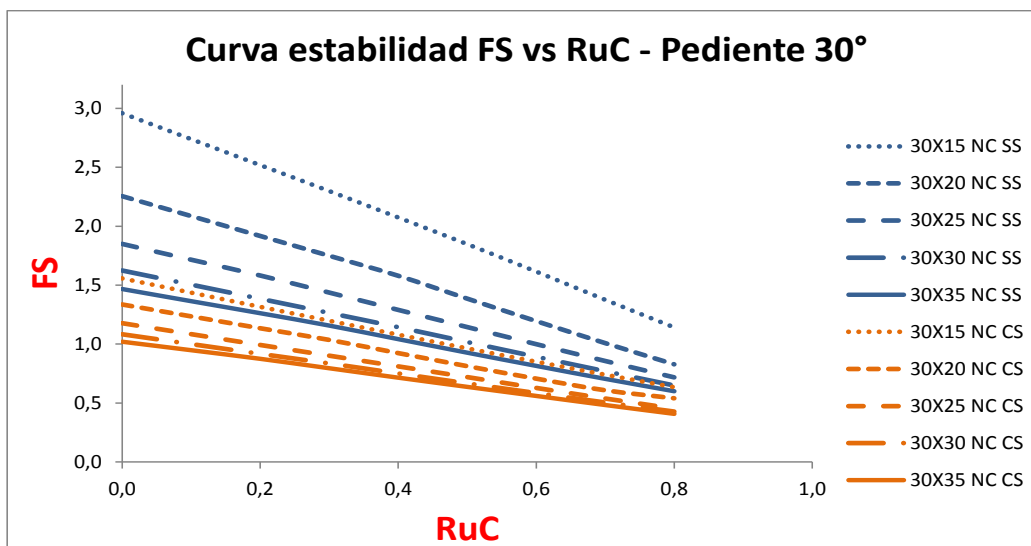
Fuente: propia

Figura 45 Curva de estabilidad FS Vs Ru para taludes en pendiente 25° estático y pseudoestático para falla No circular



Fuente: propia

Figura 46 Curva de estabilidad FS Vs Ru para taludes en pendiente 30° estático y pseudoestático para falla No circular



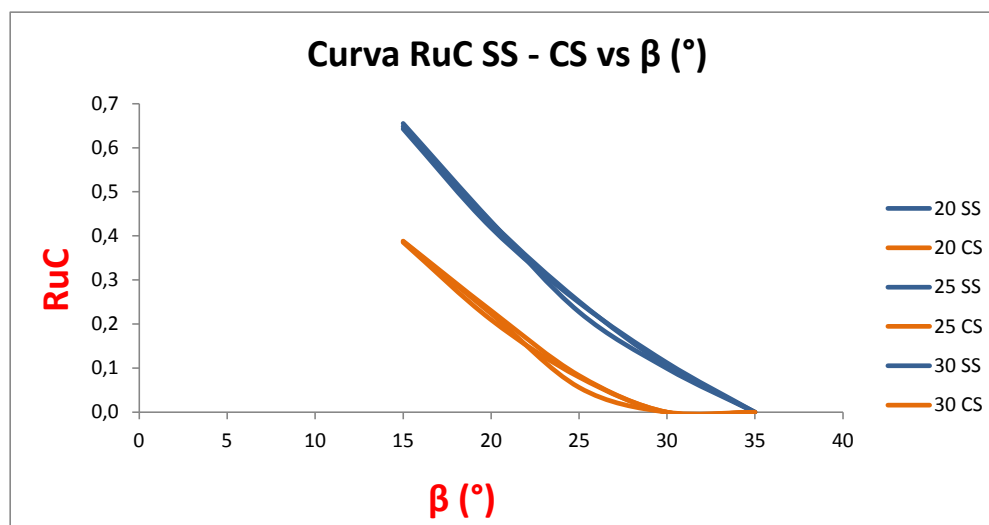
Fuente: propia

Tabla 34 RuC para β con FS 1,5 Y 1,1

		FS = 1,5	FS = 1,1
		SS	CS
β (°)		RuC Critico	RuC Critico
20	15	0,643	0,386
	20	0,419	0,210
	25	0,249	0,080
	30	0,112	0,000
	35	0,000	0,000
25	15	0,655	0,387
	20	0,433	0,224
	25	0,227	0,056
	30	0,099	0,000
	35	0,000	0,000
30	15	0,648	0,388
	20	0,431	0,230
	25	0,252	0,083
	30	0,105	0,000
	35	0,000	0,000

Fuente: propia

Figura 47 RuC Vs β para fallas No circulares en condición estática y pseudoestática



Fuente: propia

Las figuras 44, 45 y 46 establecen la relación del factor de seguridad vs el Ru, en donde se observa que aunque se manejen pendientes diferentes, los factores de seguridad dan muy similares, como en el caso de fallas circulares, por tal razón se promedian los datos y se evidencia una disminución en el FS del 50% en condición estática para un suelo seco, para una estado saturado, la variación del factor de seguridad es de 47%, en condiciones pseudoestáticas la disminución del FS es de 35% y 37% en suelo seco y saturado respectivamente. La variación del Ru en condición crítica es de 62%.

De acuerdo a la tabla 34, se observa el valor mínimo de Ru para cada pendiente del talud, lo que conlleva a decir que las condiciones más críticas se ven en los taludes con gran pendiente.

7.3.3 Falla de fondo

Para determinar la falla de fondo se realizó una matriz (ver tabla 36) donde se definen los ángulos a evaluar, se modeló el diseño teniendo en cuenta el Ru en residuos antiguos y nuevos de la siguiente manera:

Tabla 35 Ru utilizados en residuos antiguos y residuos nuevos

RESIDUOS NUEVOS	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
RESIDUOS ANTIGUOS	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

Fuente: propia

Tabla 36 Matriz de diseño para falla de fondo con talud en pendiente en condición estática

PENDIENTE	β	Aa=0,0								
		ru								
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
		0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
20°	15°	3,041	2,988	2,935	2,882	2,829	2,776	2,723	2,670	2,618
	20°	2,569	2,513	2,457	2,401	2,345	2,290	2,234	2,179	2,123
	25°	2,335	2,275	2,215	2,156	2,096	2,037	1,977	1,918	1,858
	30°	2,196	2,125	2,054	1,984	1,913	1,843	1,772	1,702	1,631
25°	15°	2,886	2,842	2,799	2,755	2,712	2,668	2,625	2,581	2,538
	20°	2,408	2,362	2,317	2,271	2,226	2,180	2,135	2,089	2,044
	25°	2,192	2,141	2,091	2,041	1,990	1,940	1,890	1,840	1,790
	30°	2,106	2,048	1,990	1,932	1,874	1,817	1,759	1,701	1,644
30°	15°	2,834	2,796	2,759	2,722	2,685	2,648	2,611	2,574	2,537
	20°	2,333	2,295	2,257	2,219	2,181	2,143	2,105	2,068	2,030
	25°	2,094	2,053	2,011	1,970	1,929	1,888	1,847	1,806	1,766
	30°	1,978	1,932	1,885	1,838	1,791	1,745	1,698	1,652	1,605

Fuente: propia

Tabla 37 Matriz de diseño para falla de fondo con talud en pendiente en condición pseudoestática

PENDIENTE	β	Aa=0,2								
		ru								
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
		0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
20°	15°	1,522	1,495	1,469	1,442	1,416	1,390	1,363	1,337	1,311
	20°	1,414	1,383	1,352	1,321	1,290	1,259	1,228	1,197	1,167
	25°	1,359	1,323	1,288	1,253	1,217	1,182	1,147	1,112	1,077
	30°	1,326	1,282	1,237	1,193	1,150	1,106	1,062	1,018	0,974
25°	15°	1,506	1,483	1,460	1,438	1,415	1,393	1,371	1,348	1,326
	20°	1,391	1,365	1,338	1,312	1,285	1,259	1,233	1,207	1,181
	25°	1,359	1,321	1,287	1,255	1,224	1,193	1,161	1,130	1,099
	30°	1,350	1,319	1,283	1,244	1,206	1,168	1,130	1,092	1,054
30°	15°	1,497	1,477	1,458	1,439	1,420	1,400	1,381	1,362	1,343
	20°	1,373	1,351	1,328	1,306	1,284	1,262	1,240	1,218	1,196
	25°	1,318	1,291	1,265	1,239	1,213	1,187	1,161	1,135	1,110
	30°	1,312	1,280	1,248	1,216	1,185	1,153	1,122	1,091	1,060

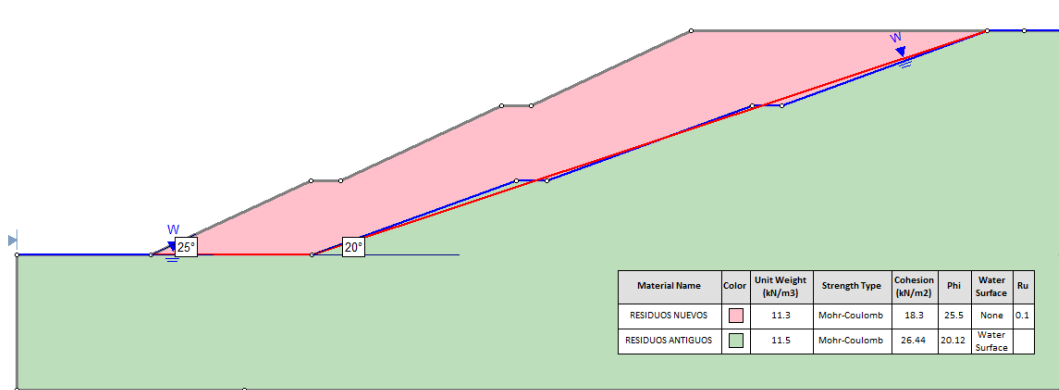
Fuente: propia

Para la falla de fondo, se tuvo en cuenta el mismo diseño geométrico expuesto anteriormente para taludes en pendiente, para este caso se manejaron los mismos ángulos internos de 20°, 25° y 30° y ángulos externos

de 15°, 20°, 25° y 30°. Este proceso se realizó tanto para taludes estáticos como pseudoestáticos y de esta manera terminar el comportamiento en diferentes condiciones.

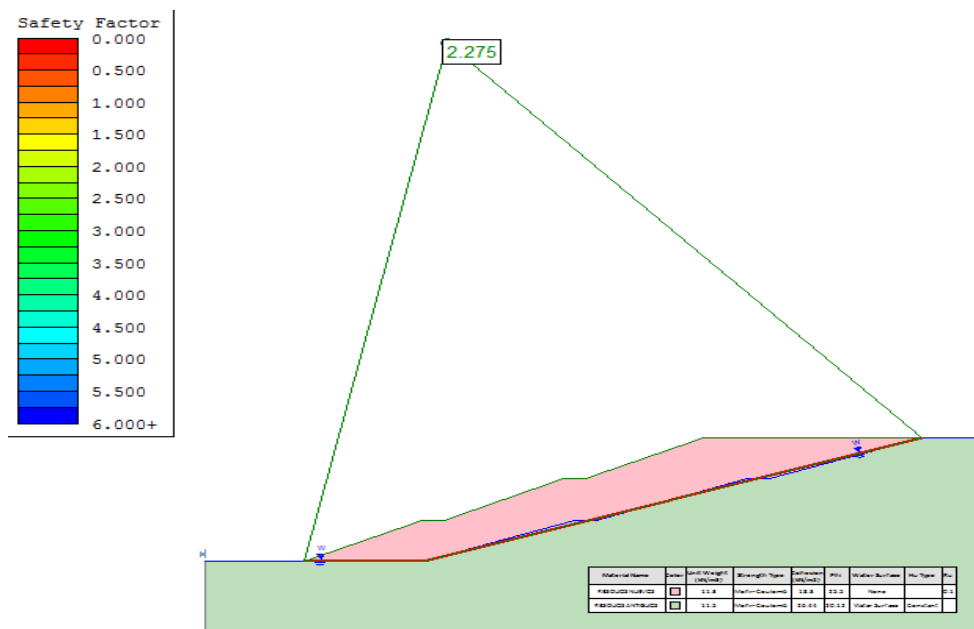
Modelo SLIDE falla de fondo con pendiente interna de 20° y pendiente externa de 25°

Figura 48 Modelo en SLIDE relleno en pendiente de 20° x 25° estático para falla de fondo.



Fuente: propia

Figura 49 Factor de seguridad para un talud de 20°x25° estático para falla de fondo.

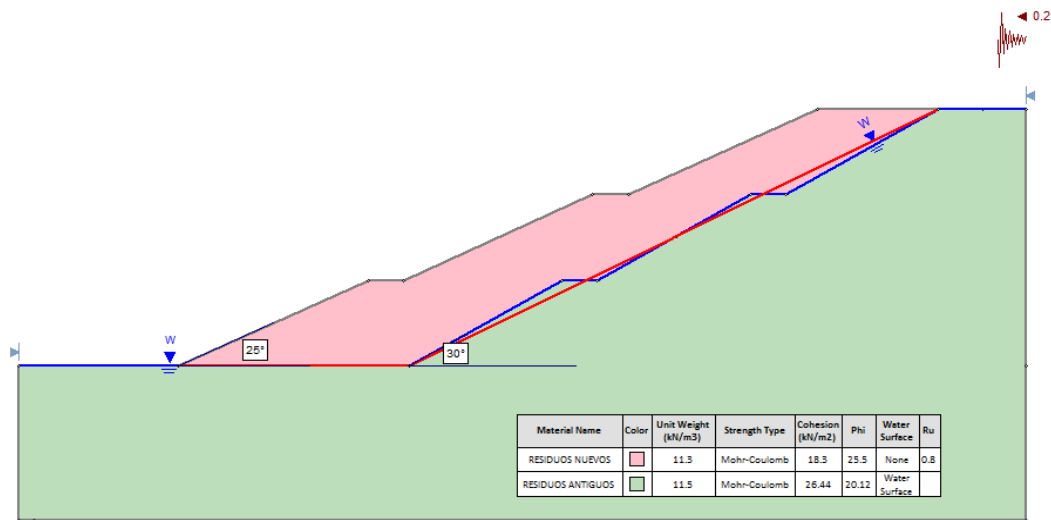


Fuente: propia

Para este diseño, se obtuvo un factor de seguridad de 2,275 en condición estática y talud de 20°x15°.

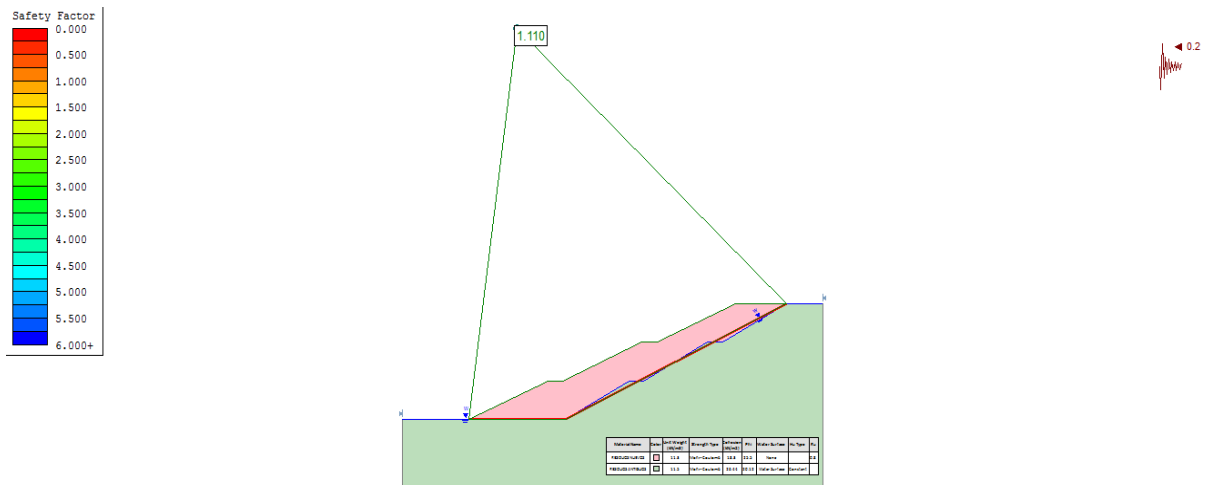
Modelo SLIDE con pendiente interna de 30° y pendiente externa de 25°

Figura 50 Modelo en SLIDE relleno en pendiente de 30° x 25° pseudoestático para falla de fondo.



Fuente: propia

Figura 51 Factor de seguridad para un talud de 30°x25° pseudoestático para falla de fondo.

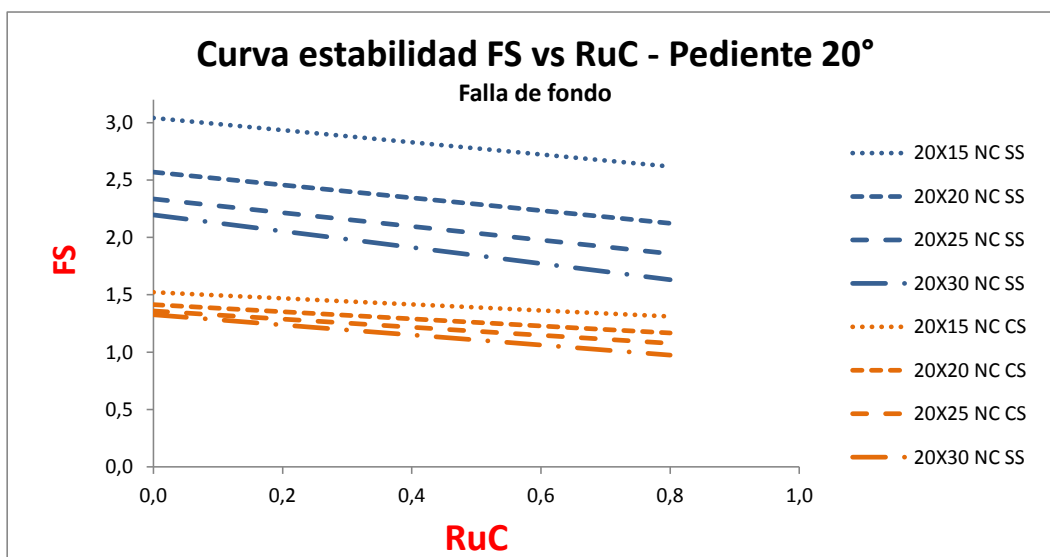


Fuente: propia

Para este diseño, se obtuvo un factor de seguridad de 1,110 en condición pseudoestática y talud de 30°x25°. (Ver anexo 5)

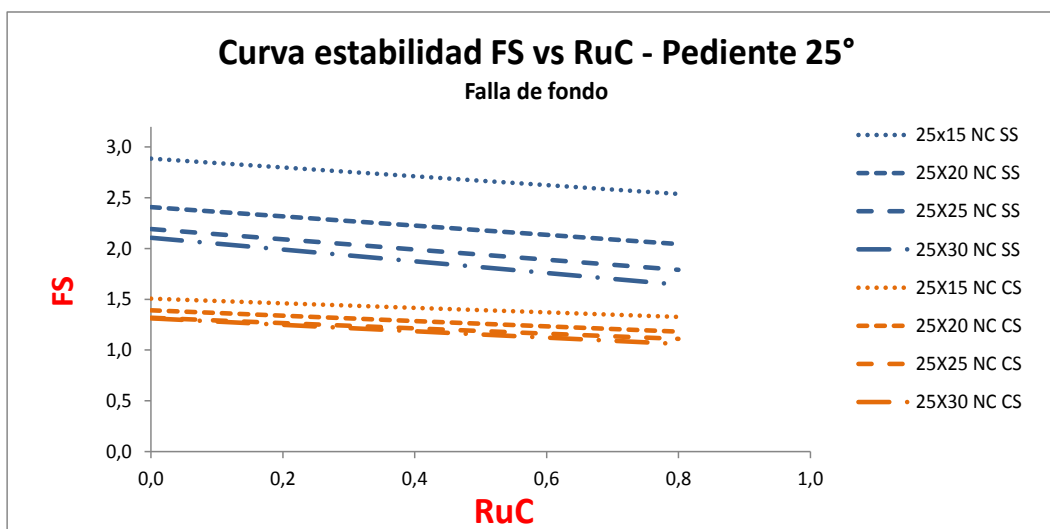
Al obtener cada uno de los factores de seguridad de la falla de fondo para taludes en pendiente, tanto estáticos (ss) como pseudoestáticos (cs), se realizaron curvas de estabilidad de FS vs Ru para determinar en cada pendiente del talud un Ru crítico (ver figuras 52, 53 y 54 Tabla 38 para RuC)

Figura 52 Curva de estabilidad FS Vs RuC para taludes en pendiente de 20° estático y pseudoestático para falla de fondo



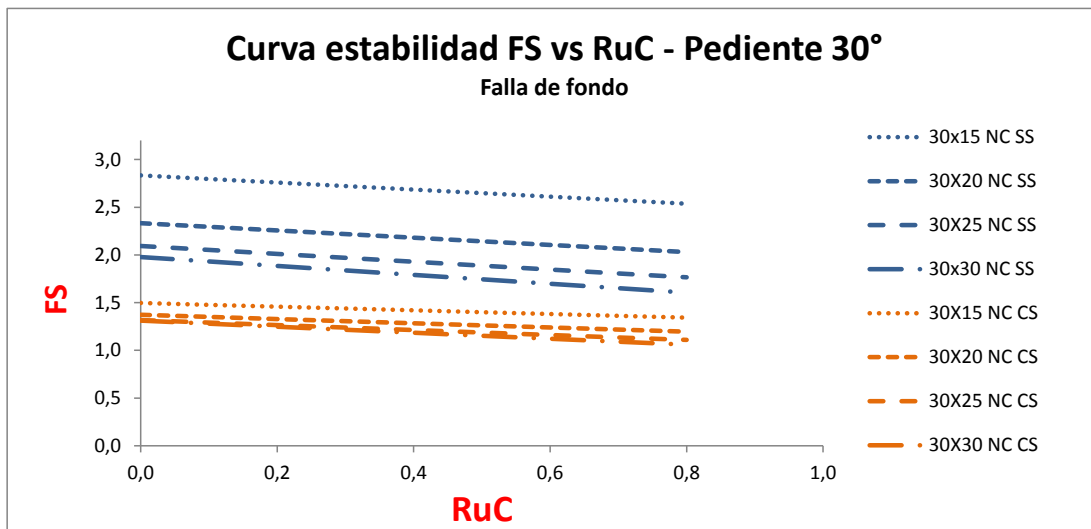
Fuente: propia

Figura 53 Curva de estabilidad FS Vs RuC para taludes en pendiente 25° estático y pseudoestático para falla de fondo



Fuente: propia

Figura 54 Curva de estabilidad FS Vs RuC para taludes en pendiente 30° estático y pseudoestático para falla de fondo



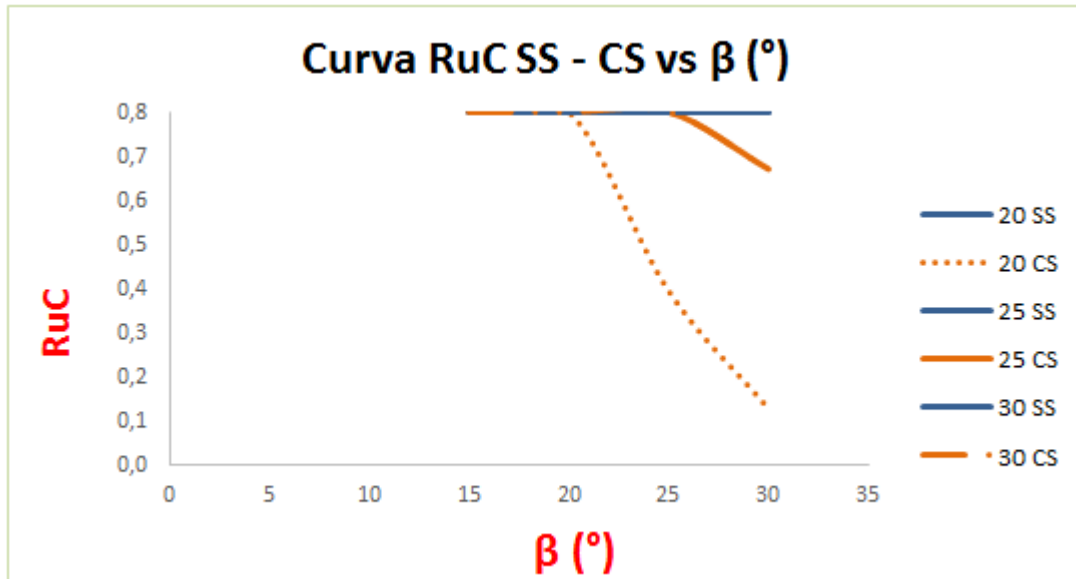
Fuente: propia

Tabla 38 RuC para β con FS 1,5 Y 1,1

		FS = 1,5	FS = 1,1
		SS	CS
		RuC Critico	RuC Critico
20	β (°)		
	15	0,800	0,800
	20	0,800	0,800
	25	0,800	0,393
	30	0,800	0,126
25	β (°)		
	15	0,800	0,800
	20	0,800	0,800
	25	0,800	0,800
	30	0,800	0,670
30	β (°)		
	15	0,800	0,800
	20	0,800	0,800
	25	0,800	0,800
	30	0,800	0,670

Fuente: propia

Figura 55 RuC Vs β para fallas de fondo en condición estática y pseudoestática



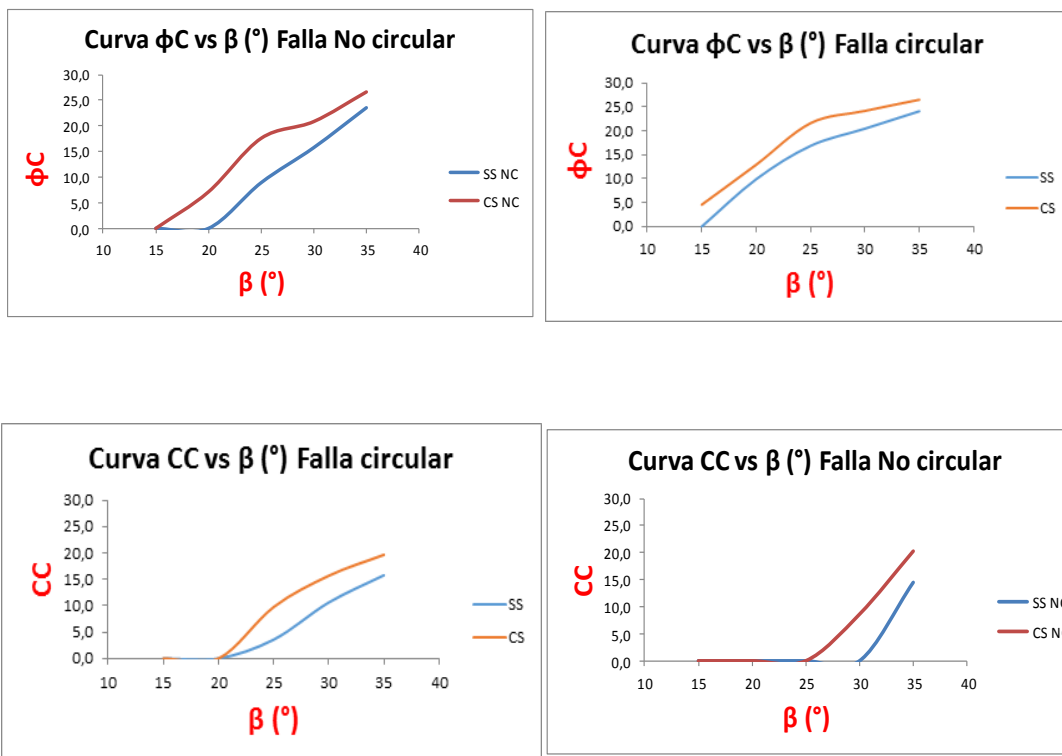
Fuente: propia

Las figuras 52, 53 y 54 establecen la relación del factor de seguridad vs el Ru , para cada talud interno propuesto, se observa que su comportamiento es similar para cada pendiente, pero el talud diseñado con un ángulo interno de 20° , presente factores de seguridad más altos, la variación entre la pendiente mayor y menor es de 28% en estado seco para residuos nuevos, y 38% en condición saturada.

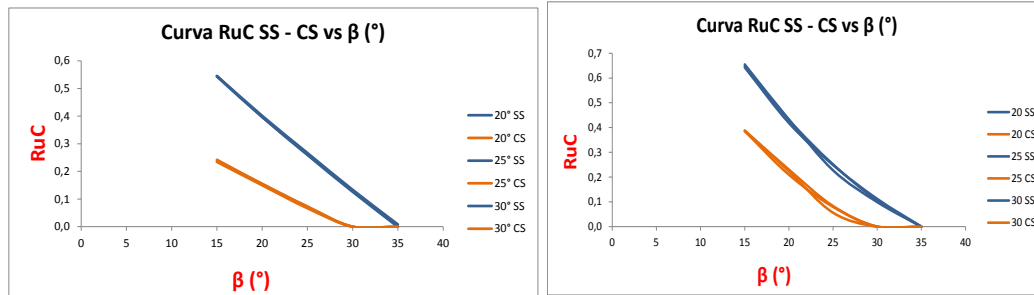
Analizando los factores de seguridad obtenidos en condición estática y pseudoestático, estos se reducen en un 50% a lo largo de cada una de sus pendientes.

De acuerdo a la figura 55 se determina que en condición estática, el talud solo presentará inestabilidad si está saturado, en condición pseudoestático la pendientes más alta con un $Ru=0.6$ comenzaría a presentar inestabilidad.

de inclinación. La cohesión para este tipo de taludes se comporta de igual manera, a medida que aumenta el ángulo de inclinación, mayor deberá ser la cohesión en los suelos para evitar posibles fallas, este tipo de relación se puede observar en las figuras expuestas a continuación de ángulo de fricción y cohesión. De acuerdo a estas graficas se determina que el ángulo de fricción siempre será mayor que la cohesión, parámetros de resistencia necesarios en cada talud.



Los taludes tipo pendiente, se diseñaron teniendo en cuenta dos ángulos de inclinación para fallas circulares y no circulares en los cuales se evidencia una reducción de factor de seguridad cuando se presentan fallas No circulares, de acuerdo al Ru propuesto, este talud se comporta igual que el tipo altura, debido a que si aumenta el Ru, el factor de seguridad tiende a disminuir, donde las condiciones más críticas se presentan en taludes de 30° y 35° como se observa en las siguientes gráficas.



Para este tipo de talud, el estado más crítico es cuando se presenta una condición seudoestática para los dos tipos de fallas tanto circular como No circular, se presenta una reducción del factor de seguridad del 47% entre estos estados.

Para la falla de fondo, se obtuvieron mayores factores de seguridad, lo que determina que el talud no presentará deslizamiento de residuos aun cuando se presente saturación en los residuos antiguos, debido a la interfaz y rozamiento entre estos.

9. CONCLUSIONES

- ✓ El ángulo de fricción y la cohesión son parámetros mecánicos encontrados en los suelos conformados por residuos sólidos que contribuyen a su estabilidad y resistencia.
- ✓ La acumulación de lixiviado producido por la descomposición de los residuos sólidos afectan directamente los parámetros mecánicos a lo largo del tiempo si no se toman las medidas necesarias de un buen sistema de drenaje.
- ✓ Al compactar residuos nuevos con mejores parámetros mecánicos, sobre residuos antiguos, es importante tener en cuenta el grado de inclinación, el incremento del peso propio de los materiales a causa de la altura y la saturación del relleno ya que esto afecta la estabilidad del talud por cambios en su resistencia.
- ✓ La estabilidad del relleno sanitario se ve afectada por el contenido de materia orgánica, la descomposición de los residuos sólidos, deficientes sistemas de drenaje que conlleva a la saturación y pendientes muy altas.
- ✓ En la construcción de un relleno sanitario es importante tener en cuenta las propiedades de resistencia, la geometría y el diseño, que garantice la vida útil del mismo, ya que de acuerdo a resultado obtenidos estas características se ven afectadas por diversos factores como lo son el aumento en la presión de poros y altos ángulos de inclinación, reduciendo de esta manera los factores de seguridad.
- ✓ Con base a la relación FS vs Ru se observa que los factores de seguridad disminuyen a medida que el Ru aumenta a lo largo del talud, la presión de poros se ve afectada por condiciones climáticas, ineficiencia en el sistema de drenaje y por la humedad generada debido a los gases internos en el talud.
- ✓ Los taludes en altura para un $Ru=0.0$, presentan factores óptimos superiores a 1.5 en una condición estática.

- ✓ Los taludes diseñados con pendiente de 15° , presentan estabilidad hasta obtener un $R_u=0.5$, mientras que los taludes con inclinación de 35° solo son estables en condición seca y estática.
- ✓ Cada uno de los taludes propuestos en altura con diferentes ángulos de inclinación de 15° , 20° , 25° , 30° y 35° en condición saturada presentan inestabilidad, ya que se obtienen factores de seguridad muy bajos con rangos de 0.3 y 0.5 que no cumplen de acuerdo a lo establecido por la NSR -10.
- ✓ Teniendo en cuenta que el factor de seguridad establecido es de 1.0 para condiciones seudoestáticas, los taludes en altura solo presentan estabilidad con un $R_u=0.0$ en cada una de las pendientes, a medida que el R_u aumenta, los factores de seguridad disminuyen.
- ✓ Para taludes diseñados en altura, los factores de seguridad para fallas no circulares aumentan un 10% respecto a los obtenidos en fallas circulares, pero presentan los mismos tipos de inestabilidad mencionadas anteriormente en condiciones estáticas y seudoestáticas, mientras que en los taludes en pendiente la variación es del 12%
- ✓ Tanto para fallas circulares como no circulares, la condición más crítica es para taludes con pendientes de 35° , ya que aún en estado seco presentan inestabilidad.
- ✓ A medida que las pendientes aumenten, el R_u debe disminuir para evitar que el talud presente inestabilidad.
- ✓ De acuerdo con el análisis sensitivo realizado para taludes en altura con fallas circulares y no circulares, se identifica que los factores de seguridad aumentan a medida que el ángulo de fricción aumenta, esta característica aplica para estado estático y seudoestático, aunque cabe resaltar que los valores correspondientes a los factores de seguridad para una condición seudoestática son menores.

- ✓ Analizando el ángulo de fricción, la pendiente más crítica es la de 35° , ya que requiere como mínimo un $\phi=24$ para una condición estática y un $\phi=26$ para una condición pseudoestática para no presentar inestabilidad, a mayor pendiente, se requiere mayor ángulo de fricción.
- ✓ Para la cohesión se presenta la misma característica, los factores de seguridad aumentan si de igual manera ésta aumenta, la condición crítica se presenta cuando las pendientes de inclinación son altas ya que requieren mayor cohesión para evitar posibles deslizamientos.
- ✓ Para taludes en pendiente, se determina que a medida que el ángulo interno aumenta, los factores de seguridad disminuyen tanto para condiciones estáticas y pseudoestáticas.
- ✓ En condición pseudoestático, las pendientes externas 30° y 35° , son las más críticas, ya que aun en estado seco presentan deslizamiento, mientras que para una condición estática, solo los taludes con pendiente externa de 35° presentan inestabilidad.
- ✓ En la falla de fondo, considerando que se compactarán residuos nuevos con diferentes condiciones de R_u , sobre residuos antiguos con un $R_u=0.8$, se obtienen factores de seguridad que cumplen según lo estipulado por la NSR-10, desde un estado seco hasta un estado saturado, tanto en condición estática como pseudoestática.
- ✓ Al haber pocos residuos sólidos compactados sobre residuos antiguos la incidencia principal no está sujeta a los parámetros de resistencia si no al parámetro R_u , esto se evidenció al realizar el análisis sensitivo de los parámetros mecánicos para taludes en pendiente.

10. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda la construcción de taludes en altura ya que estos presentaron mayores factores de seguridad tanto para una condición estática como seudoestática, un relleno en altura puede estar construido sobre uno ya existente logrando evitar una profundidad mayor de cimentación, la capacidad de estos rellenos aumenta en función de la altura y su ángulo de inclinación.
- ✓ Se recomienda para otras investigaciones realizar modelaciones utilizando elementos finitos para el cálculo de deformaciones a corto y largo plazo y poder establecer relaciones más elaboradas entre taludes.
- ✓ Es importante que para la proyección y construcción de un relleno sanitario se realicen diseños óptimos teniendo en cuenta el análisis sensitivo y el cambio de los parámetros a lo largo del tiempo con el parámetro R_u para poder tener unas mejores etapas de construcción.
- ✓ Se recomienda medidas de operación que aseguren la estabilidad en los rellenos sanitarios ya que el principal motivo de inestabilidad se debe a la acumulación de lixiviados, elevando las presiones intersticiales que disminuye con el tiempo los parámetros mecánicos.
- ✓ Se recomienda analizar permanentemente la geometría y el diseño del talud propuesto originalmente, para controlar posibles asentamientos.
- ✓ Se recomienda contar con la instrumentación necesaria para un monitoreo y control periódico, que determine deformaciones y acumulación del líquidos en el relleno, para prevenir futuras inestabilidades optimizando riesgos.

11. BIBLIOGRAFÍA

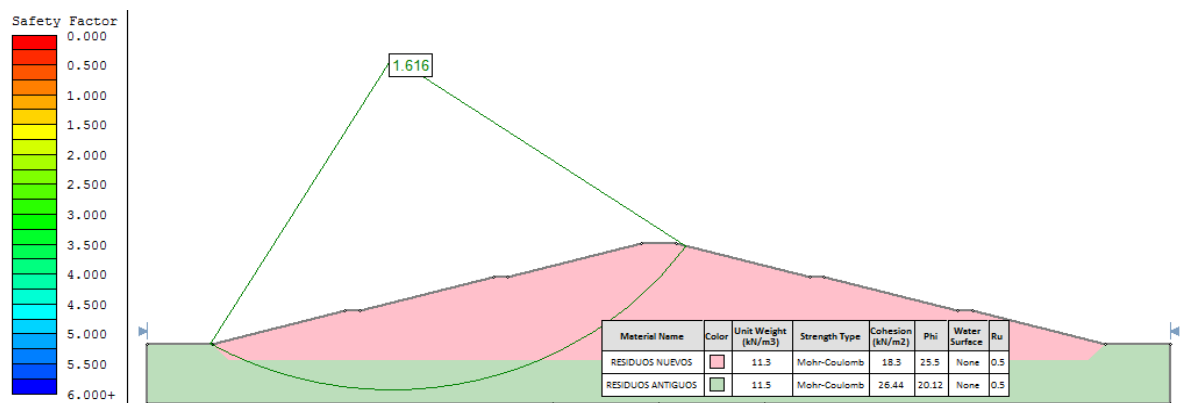
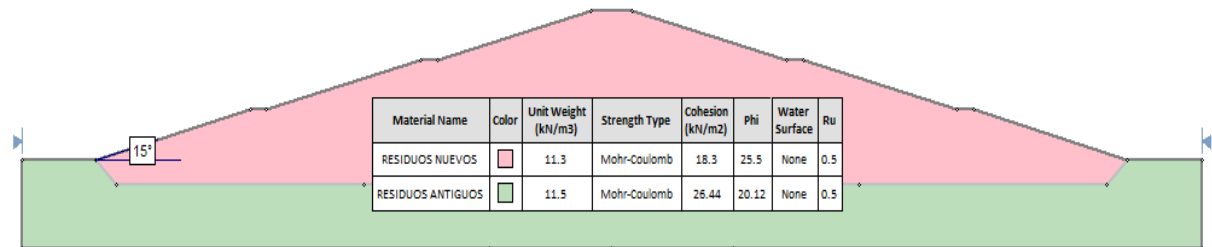
- ✓ AYALA, C. Francisco. Manual de ingeniería de taludes. Primera Edición. Madrid: Instituto geológico y minero de España 2006
- ✓ BUENROSTRO, O. La producción de residuos sólidos municipales y sus implicaciones ambientales. Ciencia y desarrollo en internet. 2006.
- ✓ EXPLORACIÓN Y MUESTREO DE SUELOS. [en línea]. < <http://expsuelos.blogspot.com> > [citado en 23 de Marzo del 2016]
- ✓ GABOR, Koalas. Encarnación, A. Guillermo. Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. México 2005.
- ✓ Gobierno de Jalisco. Guía de reciclaje. 1ra Edición. 2008. Secretaria del medio ambiente para el desarrollo sustentable. México.
- ✓ NIÑO, Javier. Análisis de estabilidad zona de contingencia zona II área 3. Centro de gerenciamiento de residuos Doña Juana. 2014.
- ✓ JAIME, Lizbeth. El consumo y la generación de residuos sólidos: una problemática ambiental. México 2010
- ✓ MOYA, Julio. Manual de estabilidad de taludes. Santa fe de Bogotá D.C. 1998
- ✓ NORMA COLOMBIANA SISMO RESISTENTE. Título A. Capitulo A.2. Zona de Amenaza Sísmica y movimientos sísmicos de diseño
- ✓ NORMA COLOMBIANA SISMO RESISTENTE. Título H. Capitulo H.5. Excavaciones y estabilidad de taludes.

- ✓ PALMA, G Juan, Espinace A. Raúl, Valenzuela T. Pamela. Análisis de la estabilidad de rellenos sanitarios. Chile 2005.
- ✓ SUAREZ DÍAZ, JAIME; Universidad central de Santander, Profesor de la facultad de Ingeniería Civil, Bucaramanga-Colombia, Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales.1998.ISBN
- ✓ TESIS MÉTODOS DE EXPLORACIÓN DE SUELOS. [En línea] <<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/3273/Capitulo1.pdf>> [citado en 03 de Marzo de 2016]
- ✓ [Citado el 28 de febrero del 2016] Disponible en: http://www.accefyn.org.co/revista/Vol_34/132/347-356.pdf
- ✓ [Citado el 28 de febrero de 2016] Disponible en: <http://www.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/report/2009/9/resumen-de-los-impactos-ambien-2.pdf>
- ✓ [Citado el 28 de febrero de 2016] Disponible en: <http://ocw.uis.edu.co/ingenieria-civil/estabilidad-de-aludes/clase4/tema04-en-proceso.pdf>
- ✓ [Citado el 02 de noviembre de 2015] Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/es/www/fulltext/gtz/deslbasu/deslbasu.html>
- ✓ [Citado el 03 de noviembre de 2015] Disponible en: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/31253/4336>
- ✓ [Citado el 16 de noviembre de 2015] Disponible en: <http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Estabilidad%20de%20Taludes.pdf>.
- ✓ [Citado el 28 de septiembre de 2015] Disponible en: <http://contambientaljuana.blogspot.com>

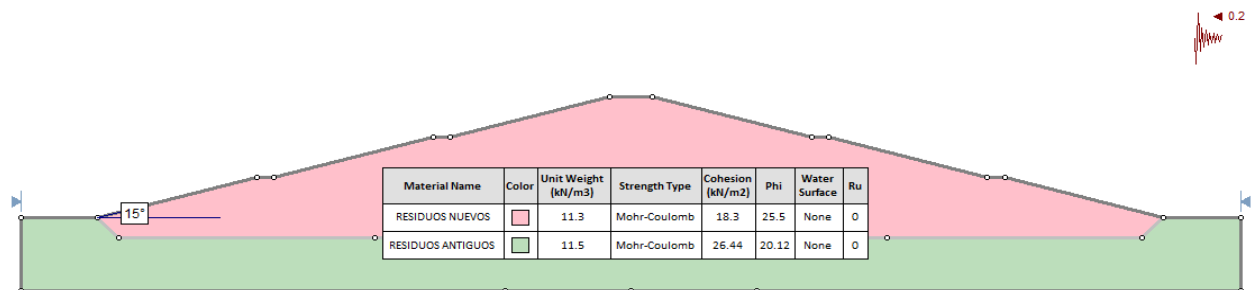
ANEXOS

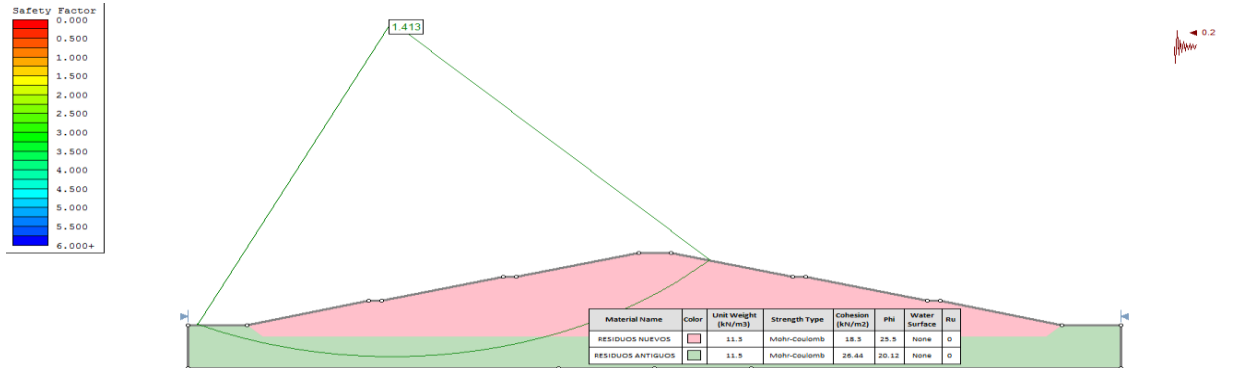
ANEXO 1 RELLENO EN ALTURA

Talud pendiente de 15° estático y falla circular

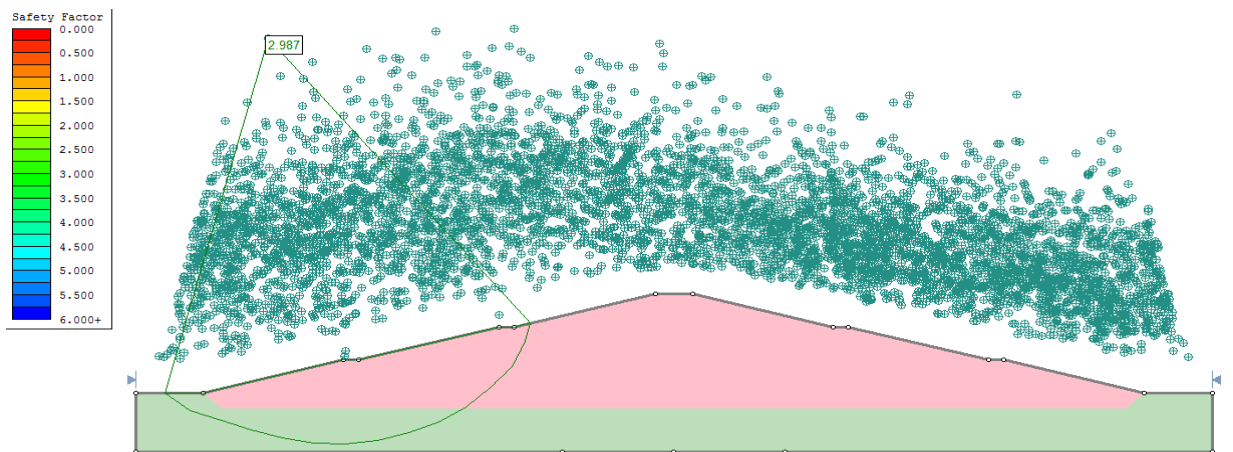
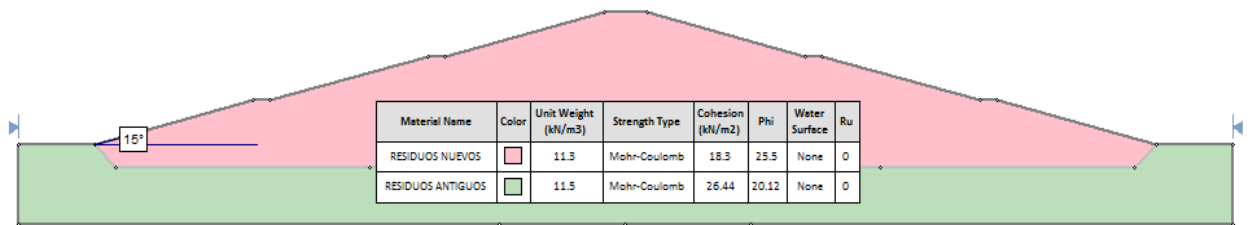


Talud pendiente de 15° seudoestático y falla circular

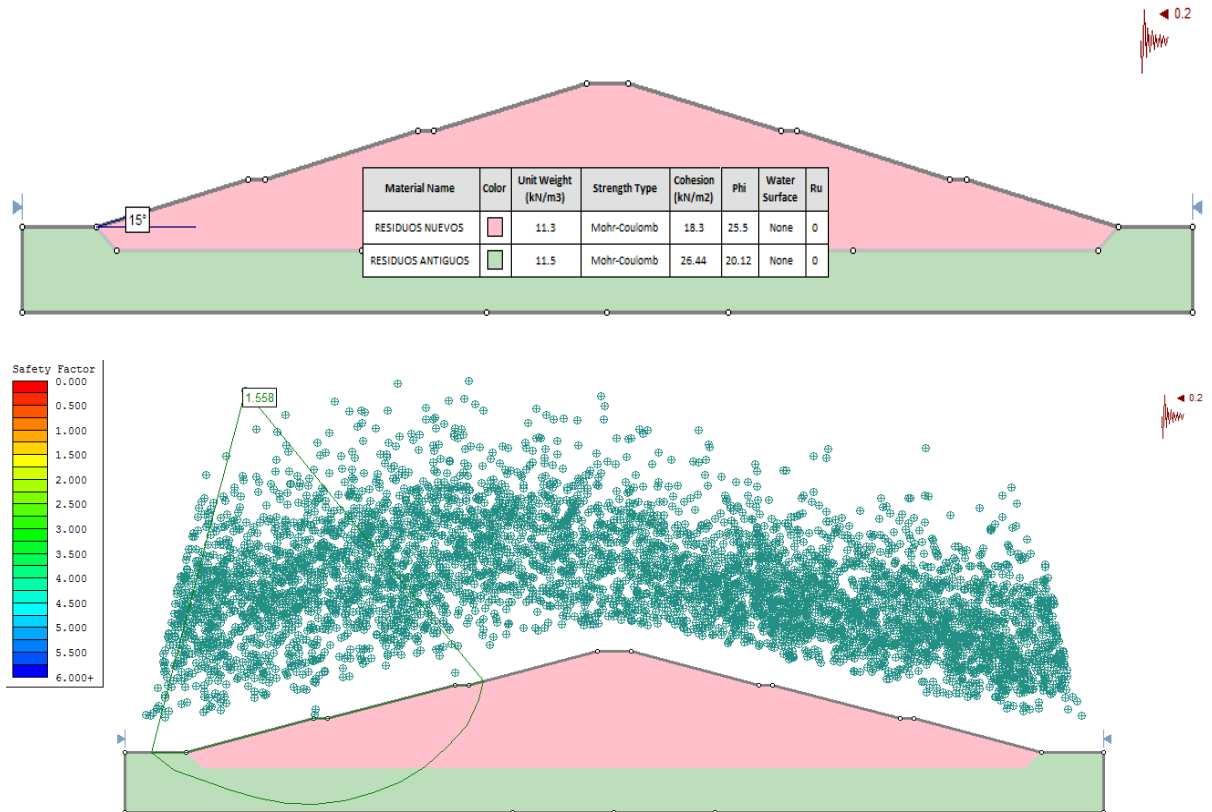




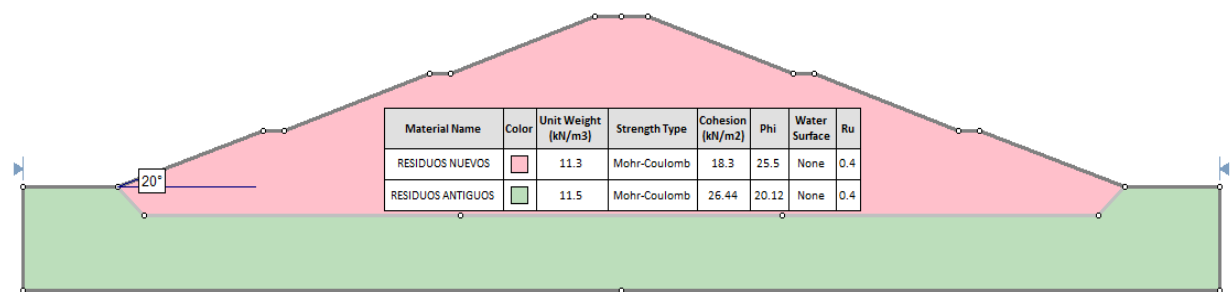
Talud pendiente de 15° estático y falla No circular

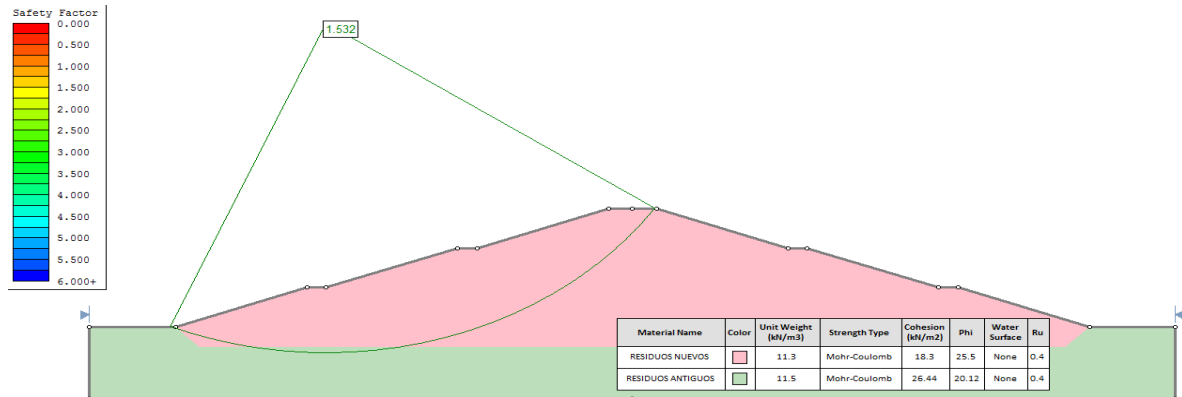


Talud pendiente de 15° seudoestático y falla No circular

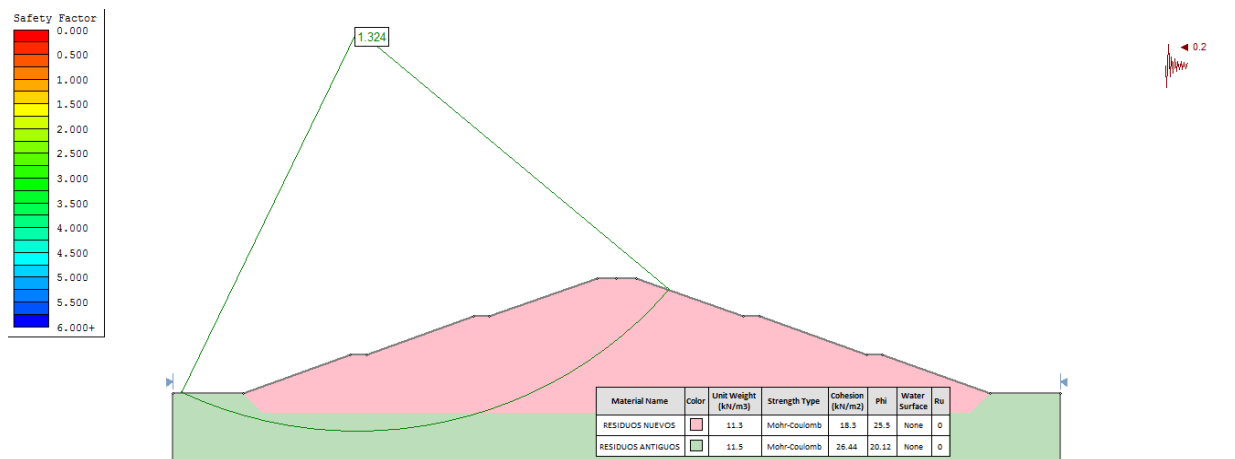
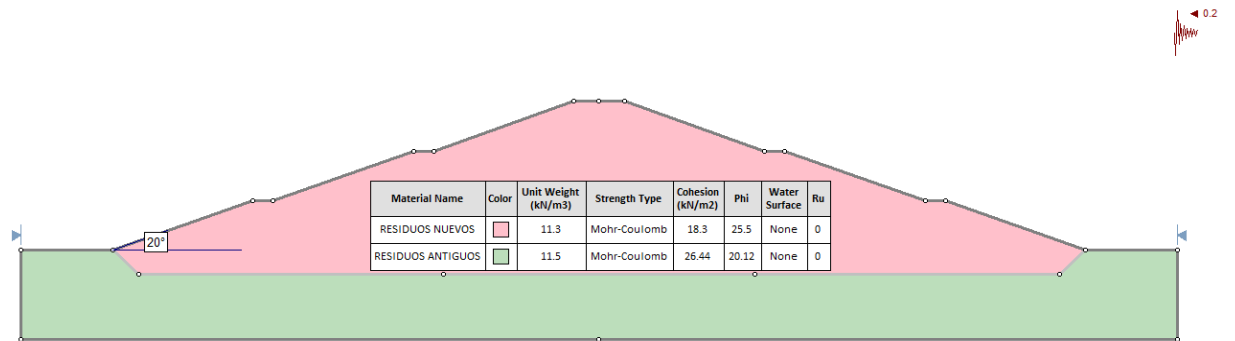


Talud pendiente de 20° estático y falla circular

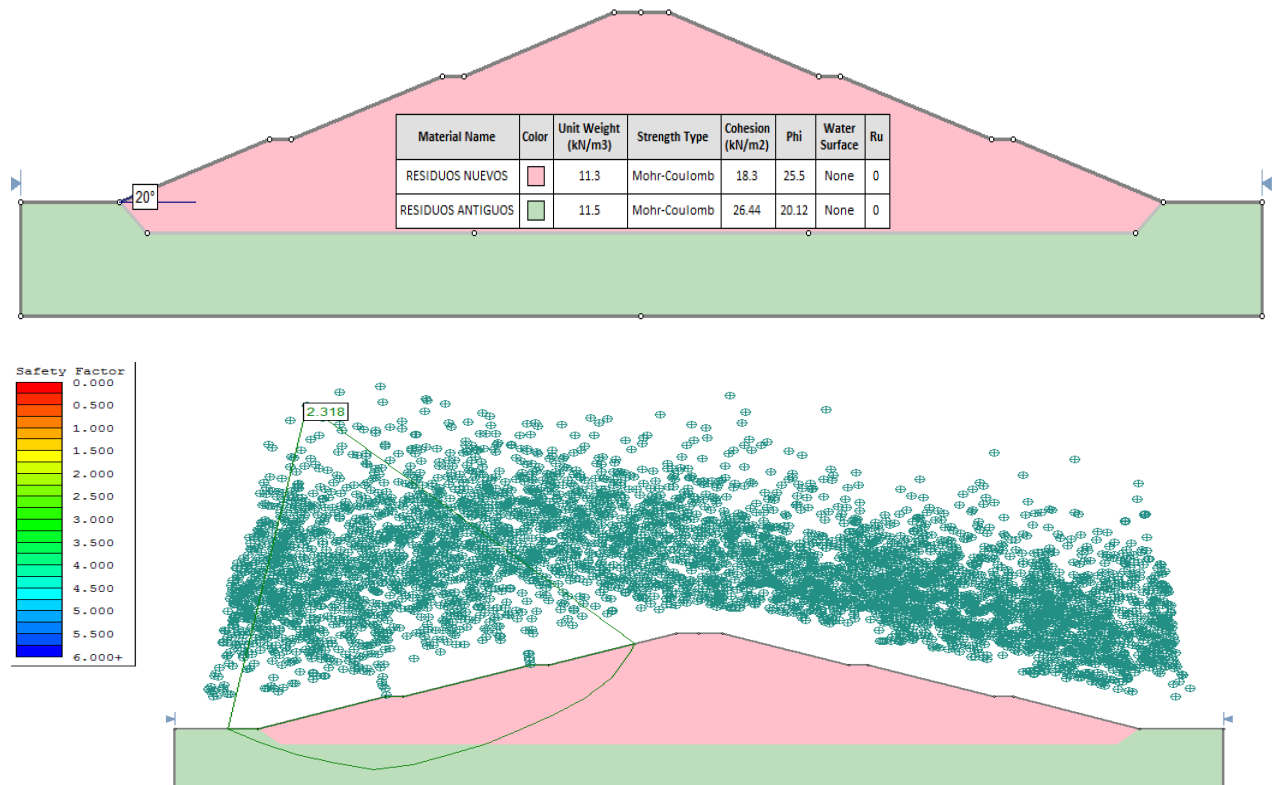




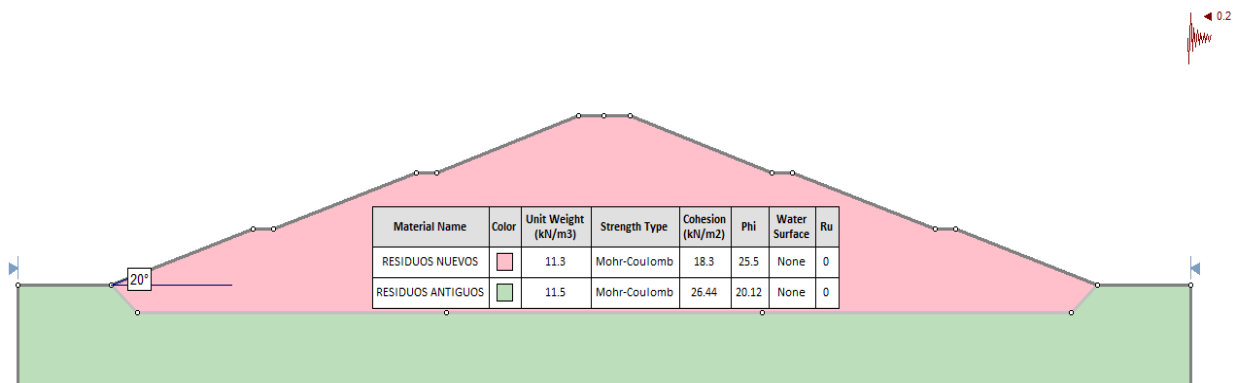
Talud pendiente de 20° seudoestático y falla circular

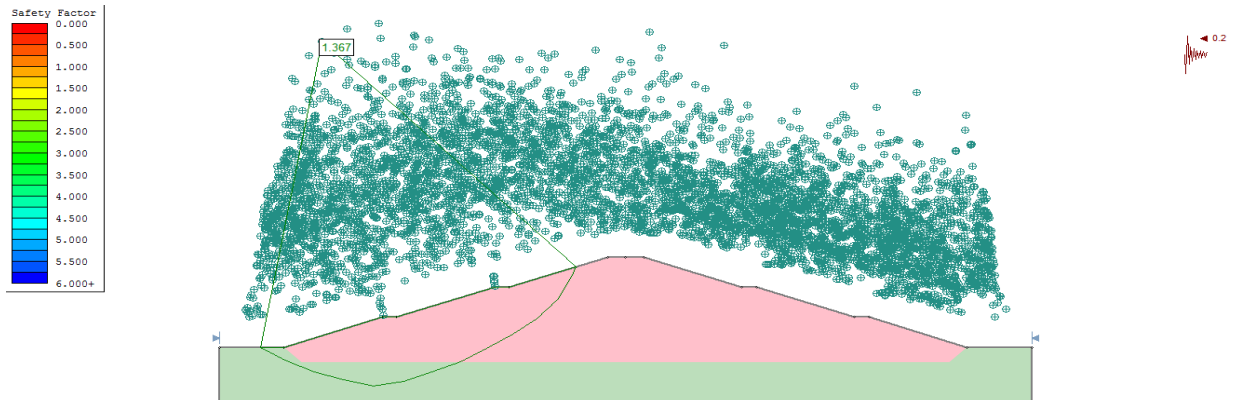


Talud pendiente de 20° estático y falla No circular

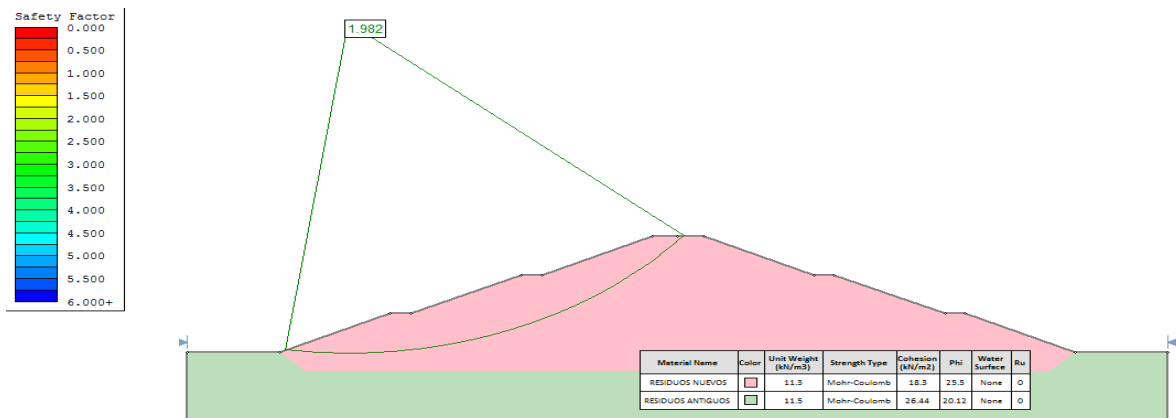
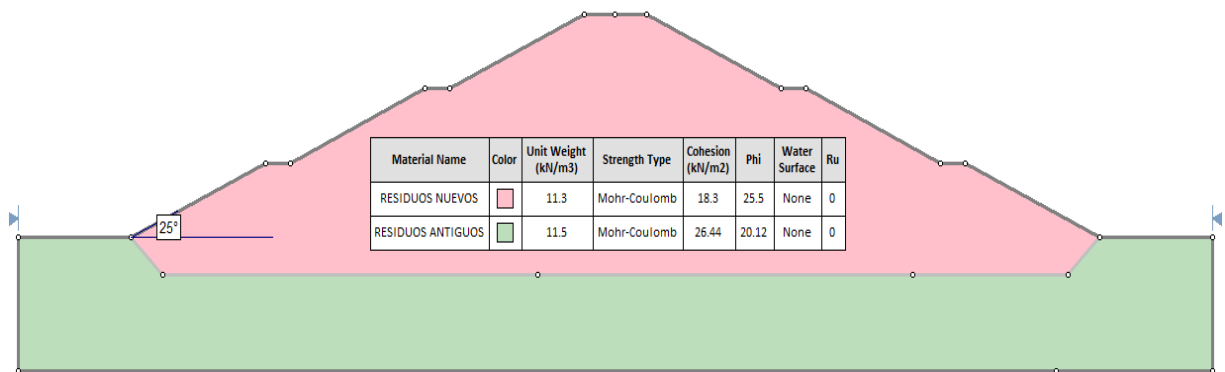


Talud pendiente de 20° pseudoestático y falla No circular

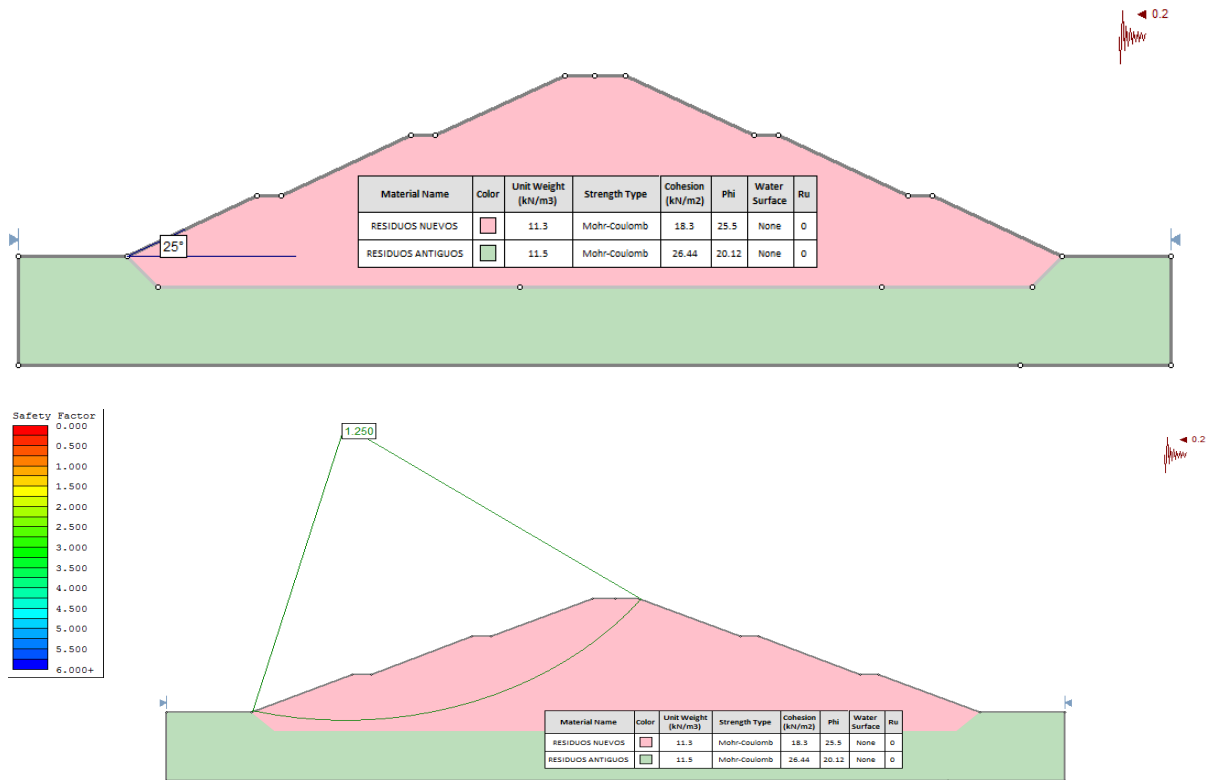




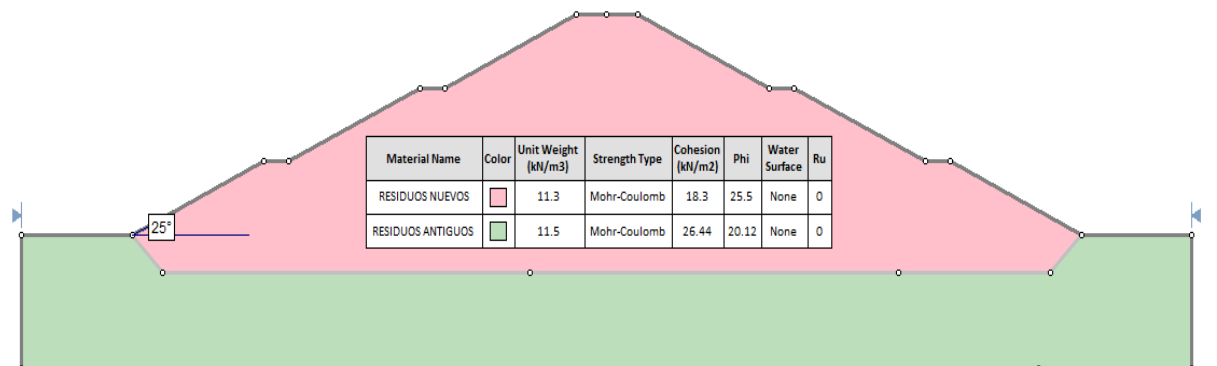
Talud pendiente de 25° estático y falla circular

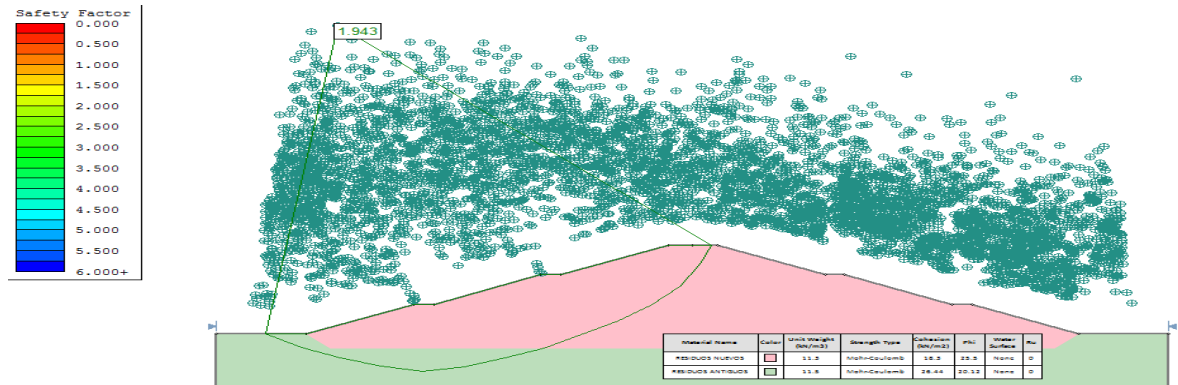


Talud pendiente de 25° seudoestático y falla circular

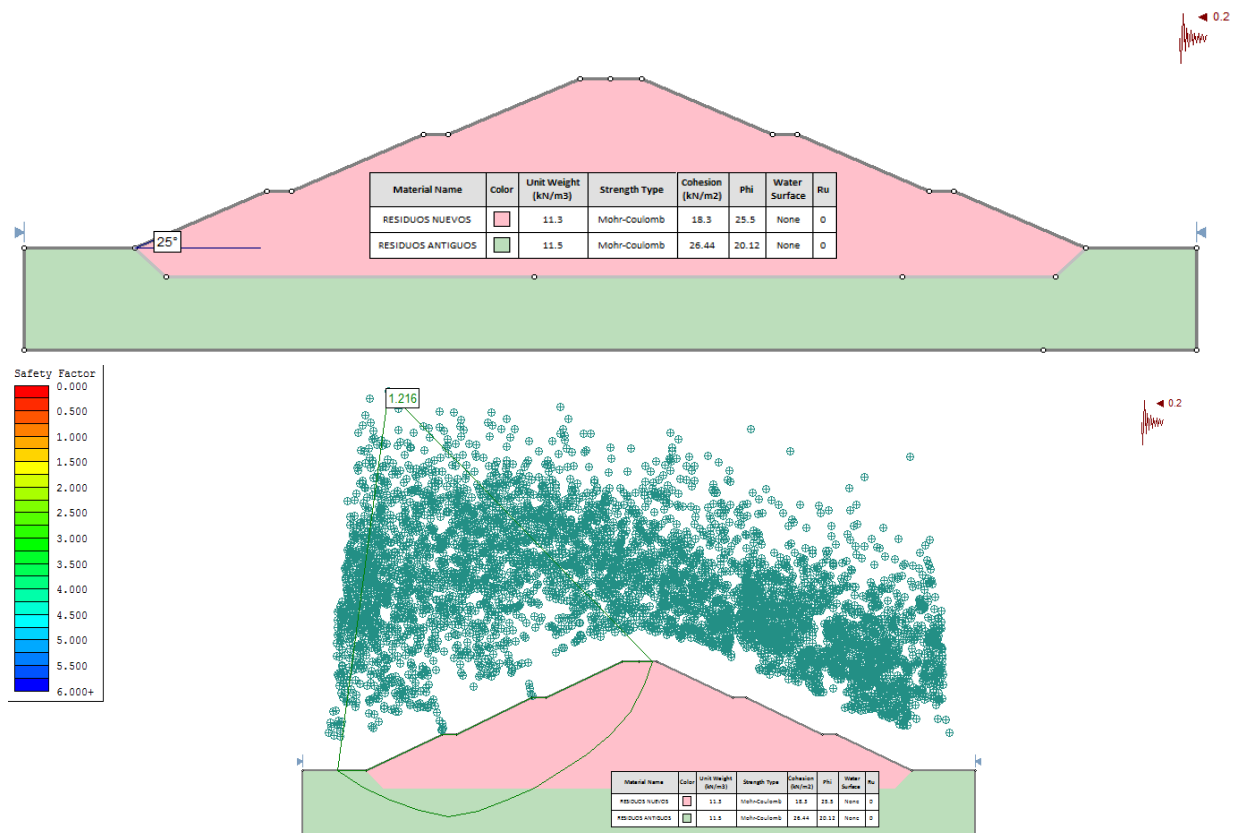


Talud pendiente de 25° estático y falla No circular

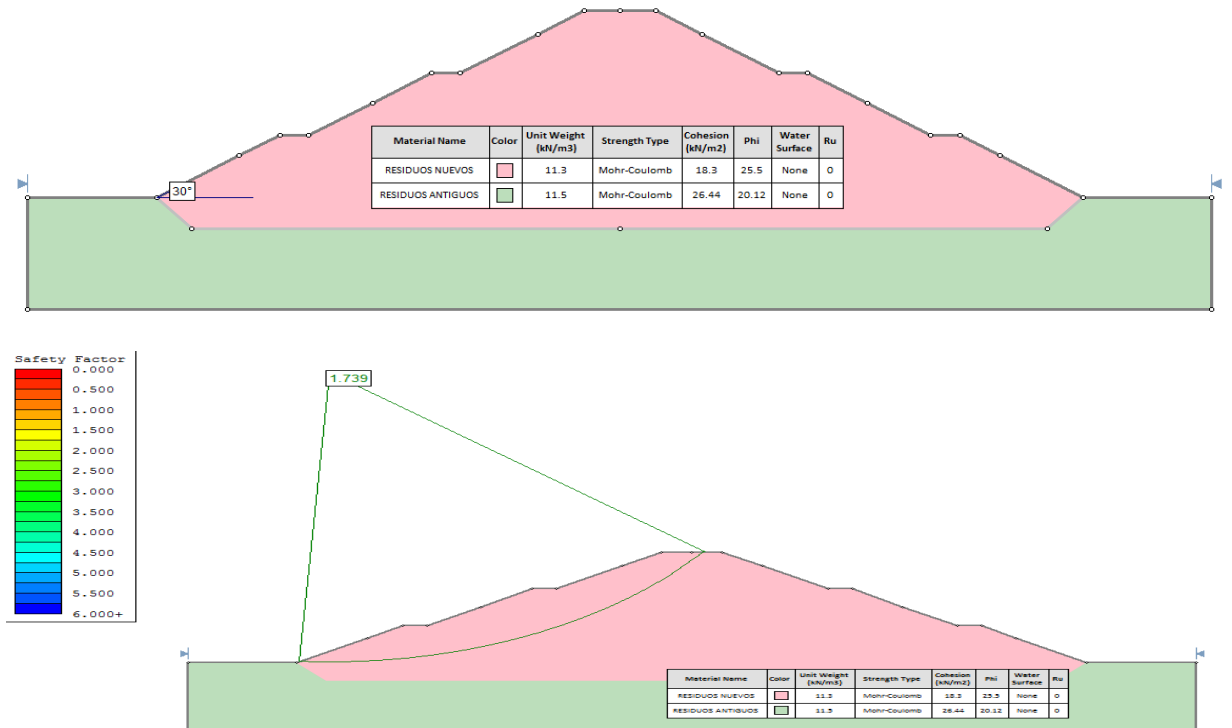




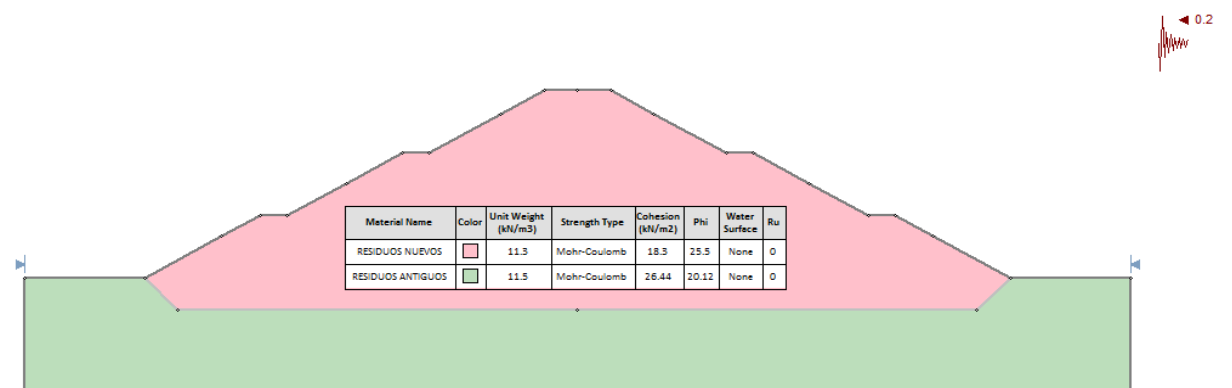
Talud pendiente de 25° seudoestático y falla No circular

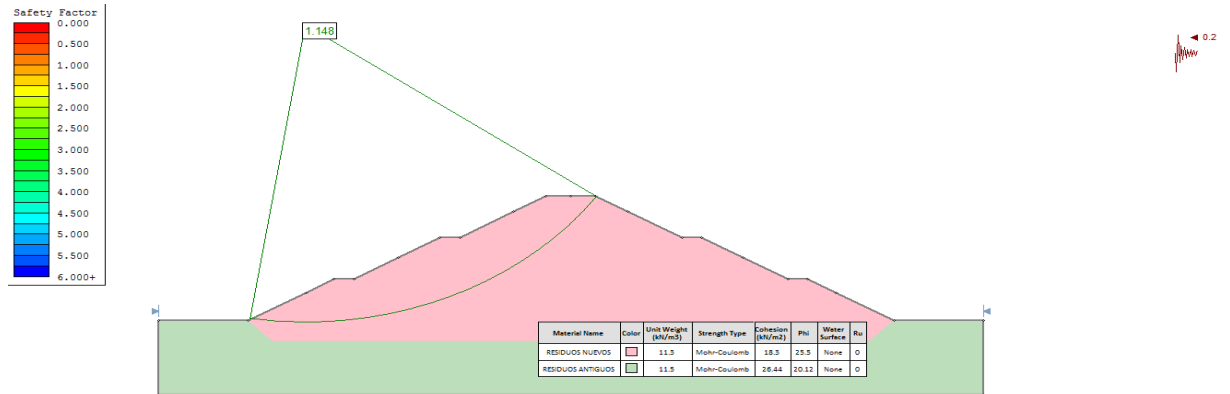


Talud pendiente de 30° estático y falla circular

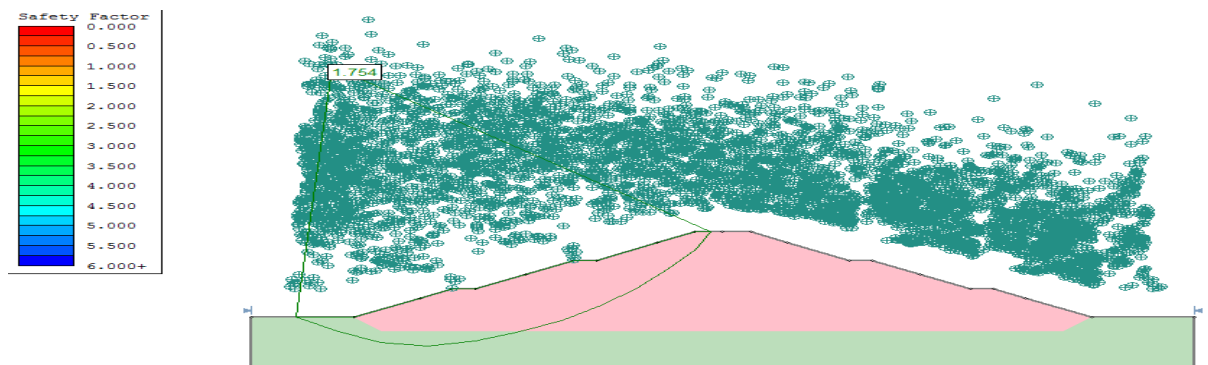
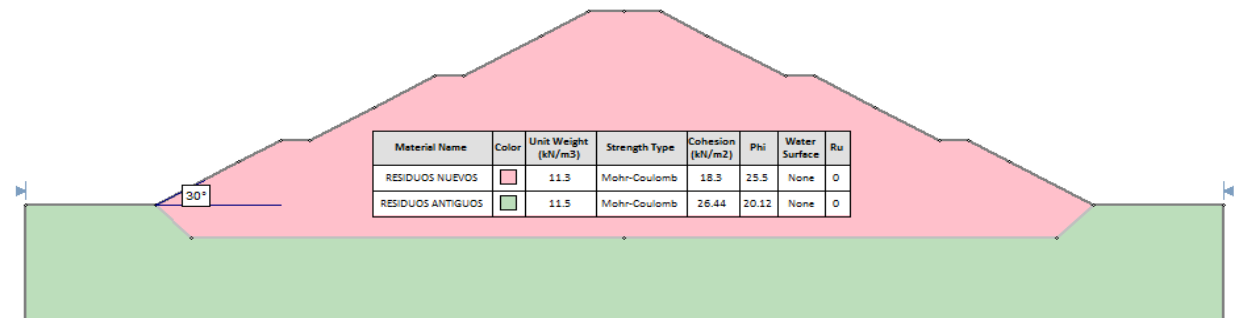


Talud pendiente de 30° seudoestático y falla circular

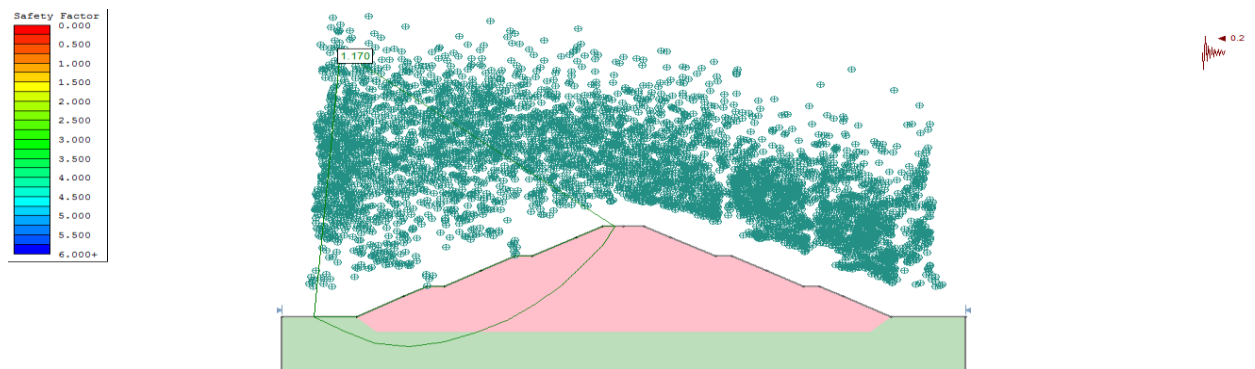




Talud pendiente de 30° estático y falla No circular

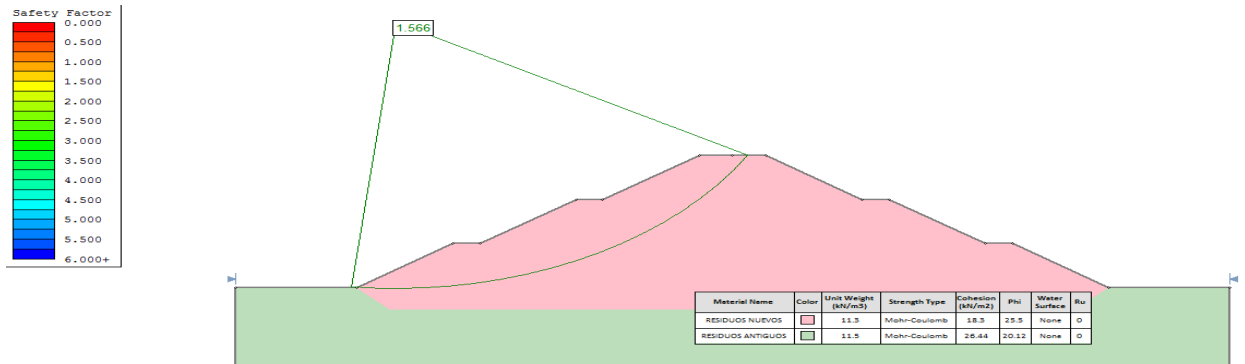


Talud pendiente de 30° seudoestático y falla No circular

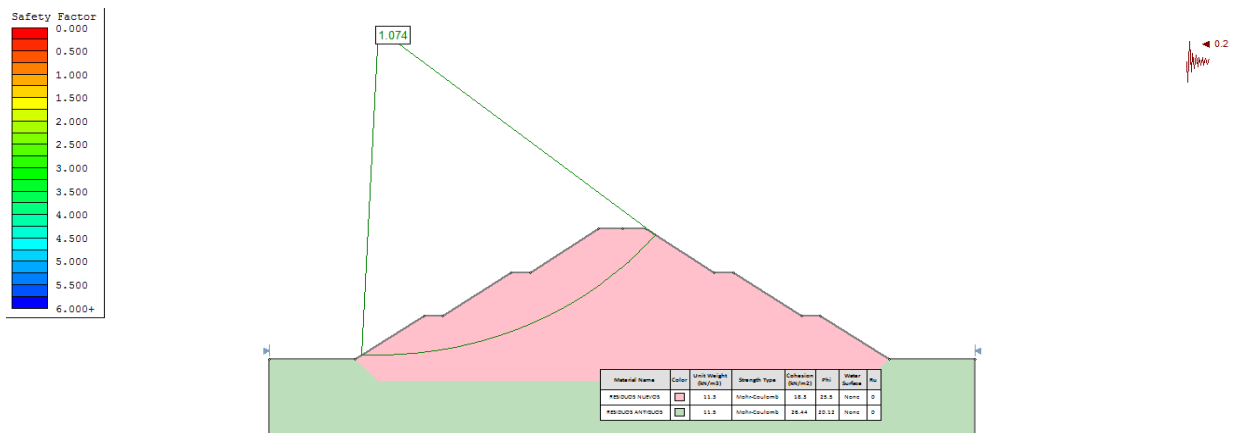
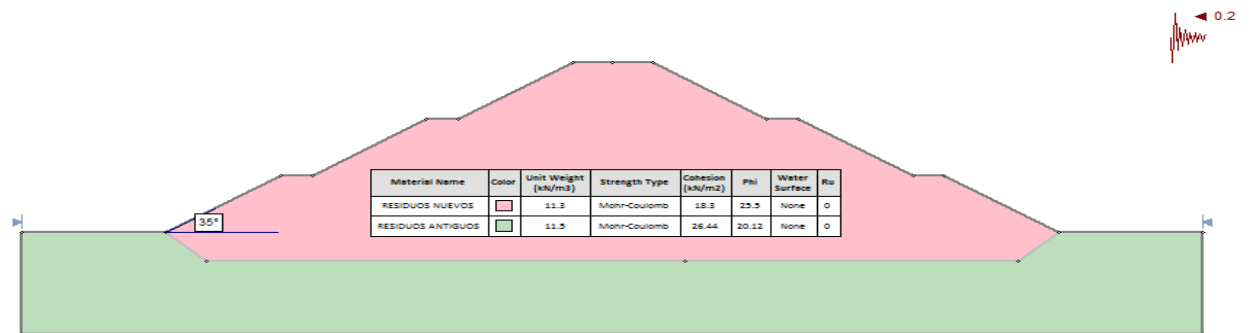


Talud pendiente de 35° estático y falla circular

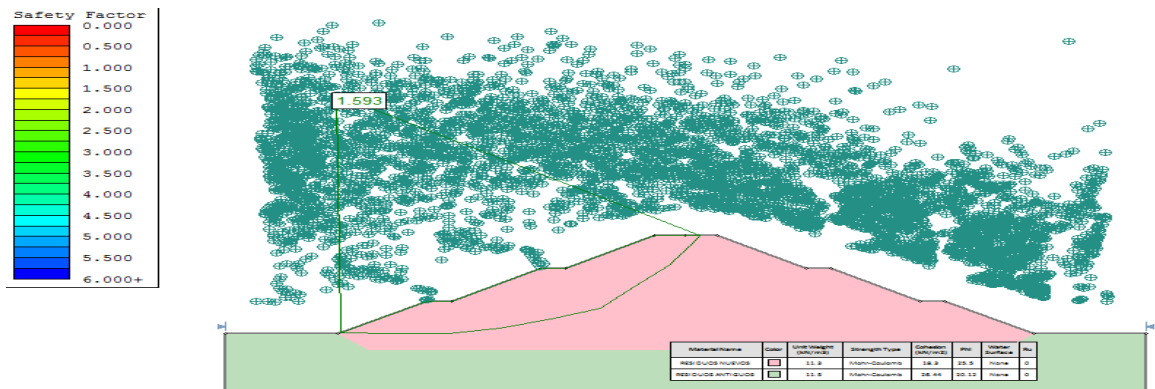
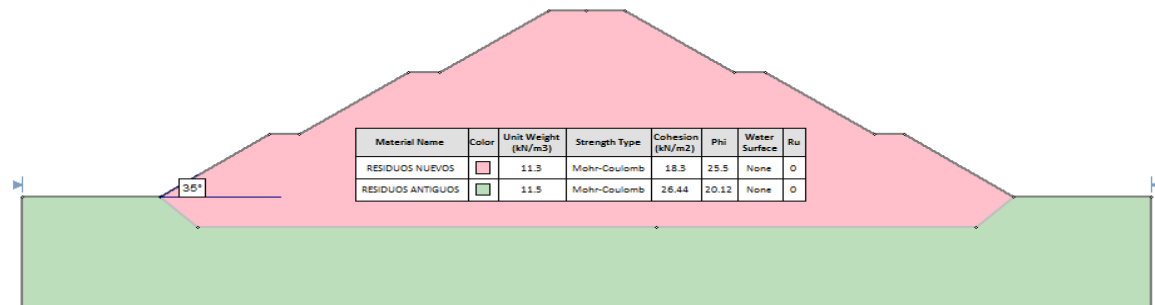




Talud pendiente de 35° seudoestático y falla circular

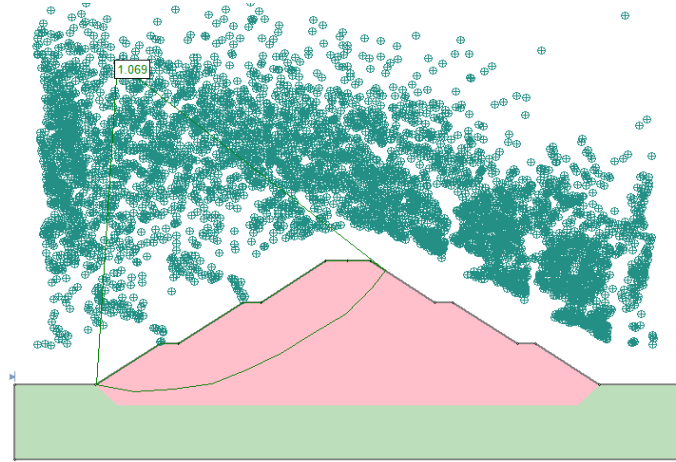
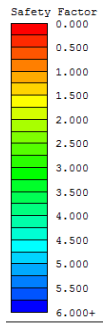


Talud pendiente de 35° estático y falla No circular



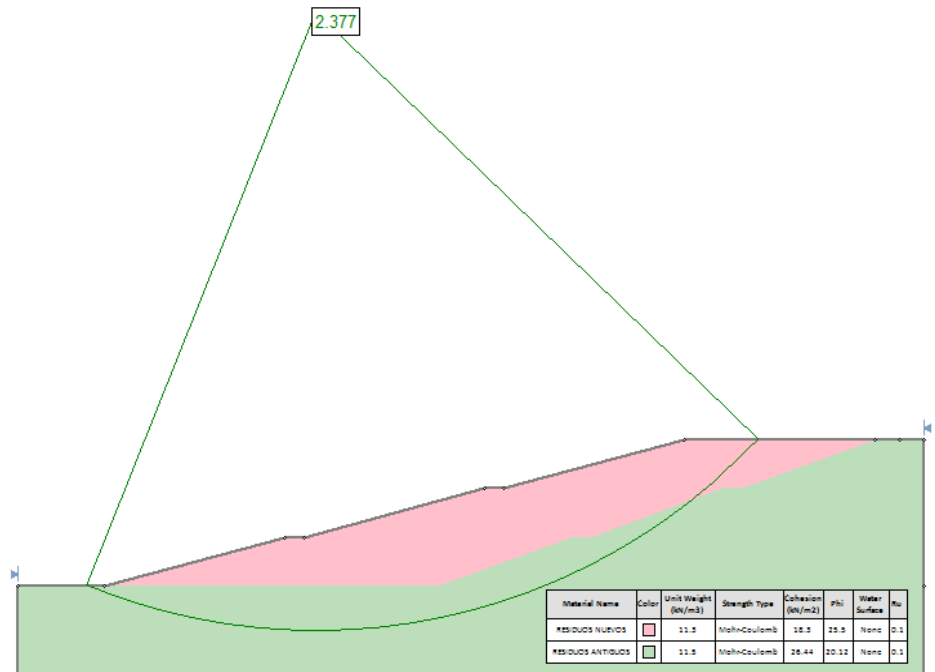
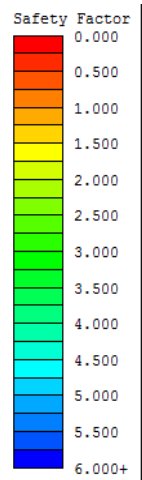
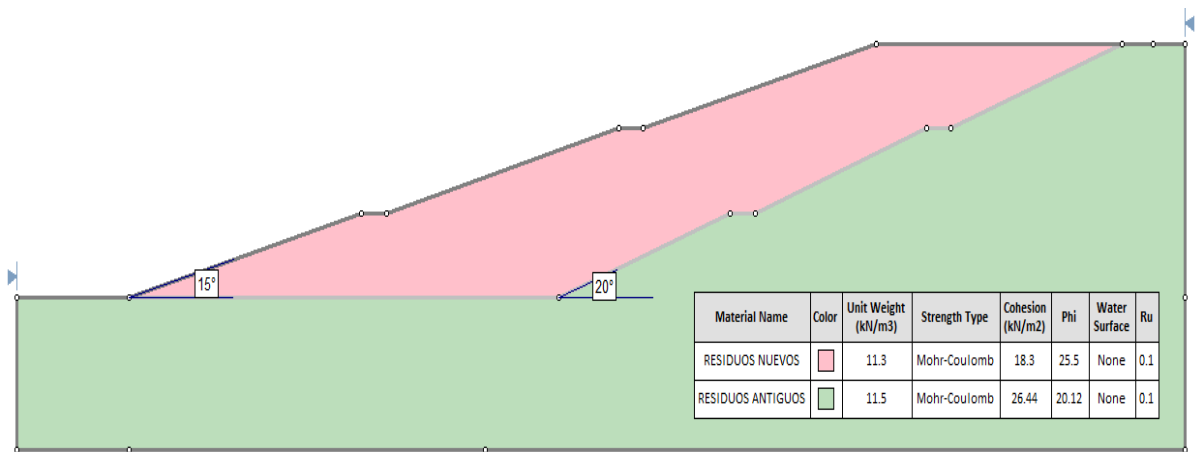
Talud pendiente de 35° seudoestático y falla No circular



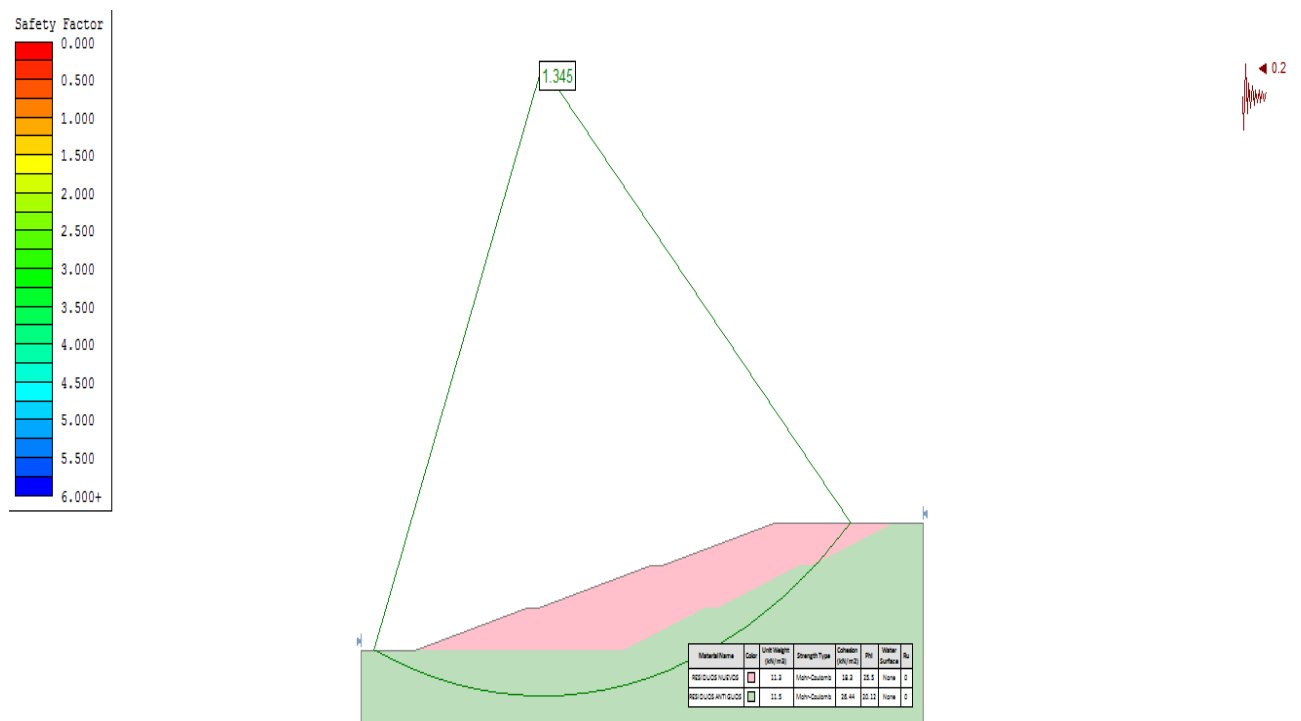
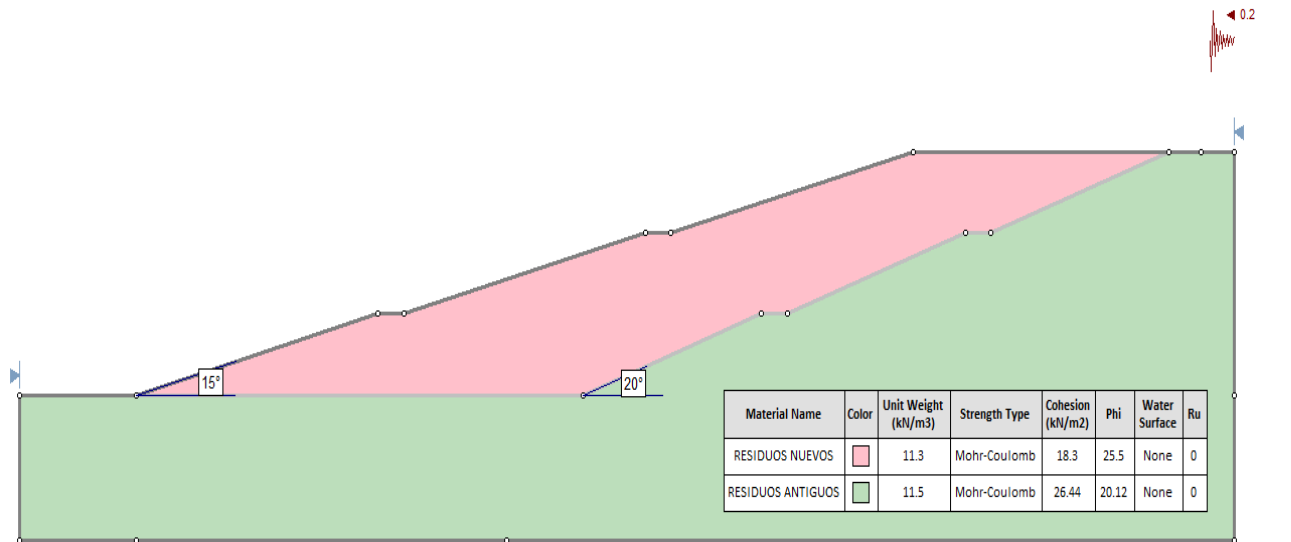


ANEXO 2 RELLENO EN PENDIENTE

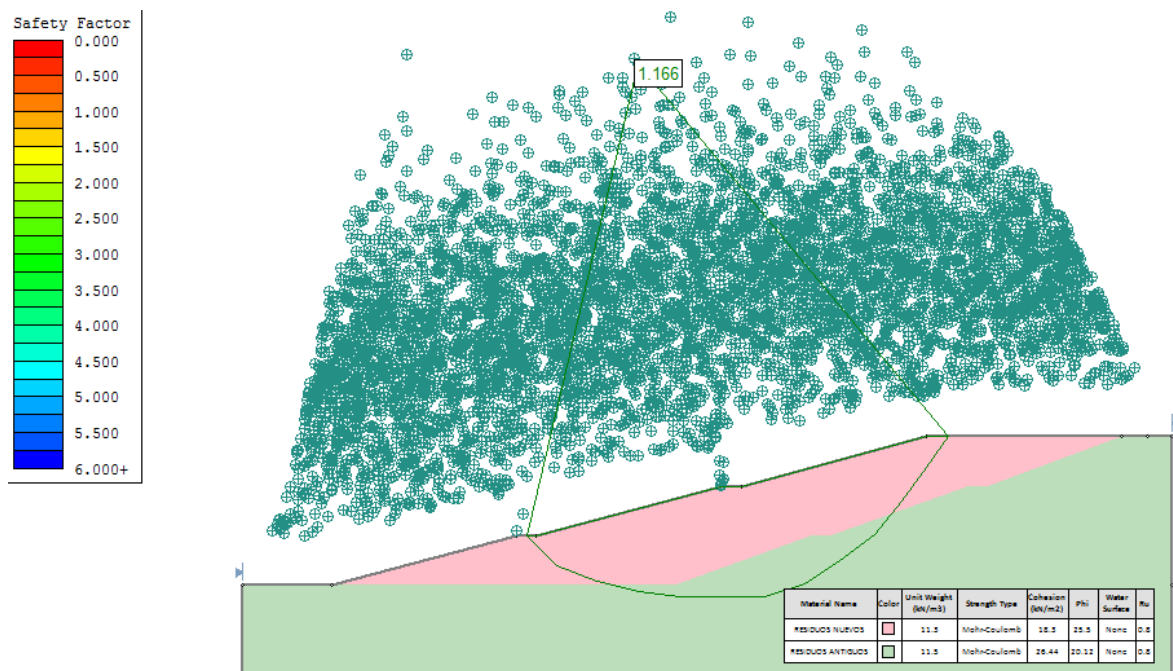
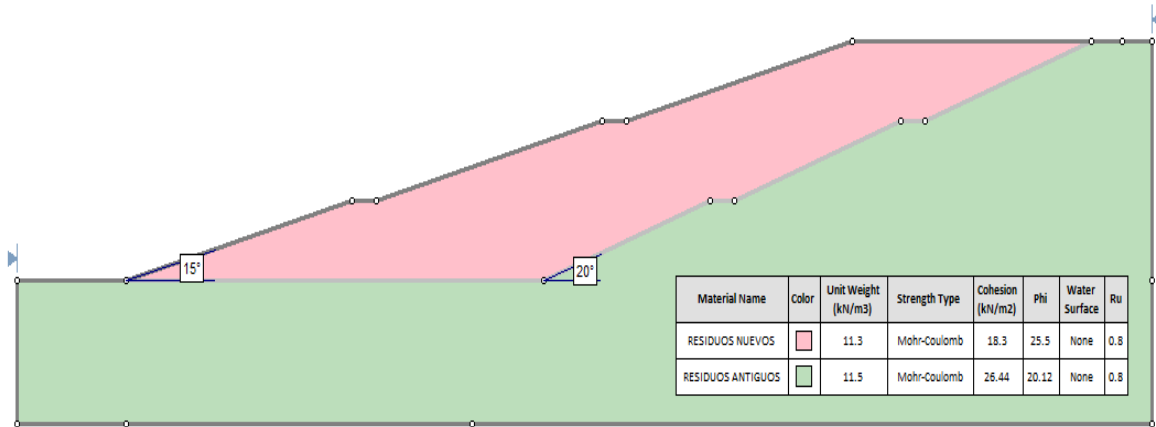
Talud pendiente de 20°X15° estático y falla circular



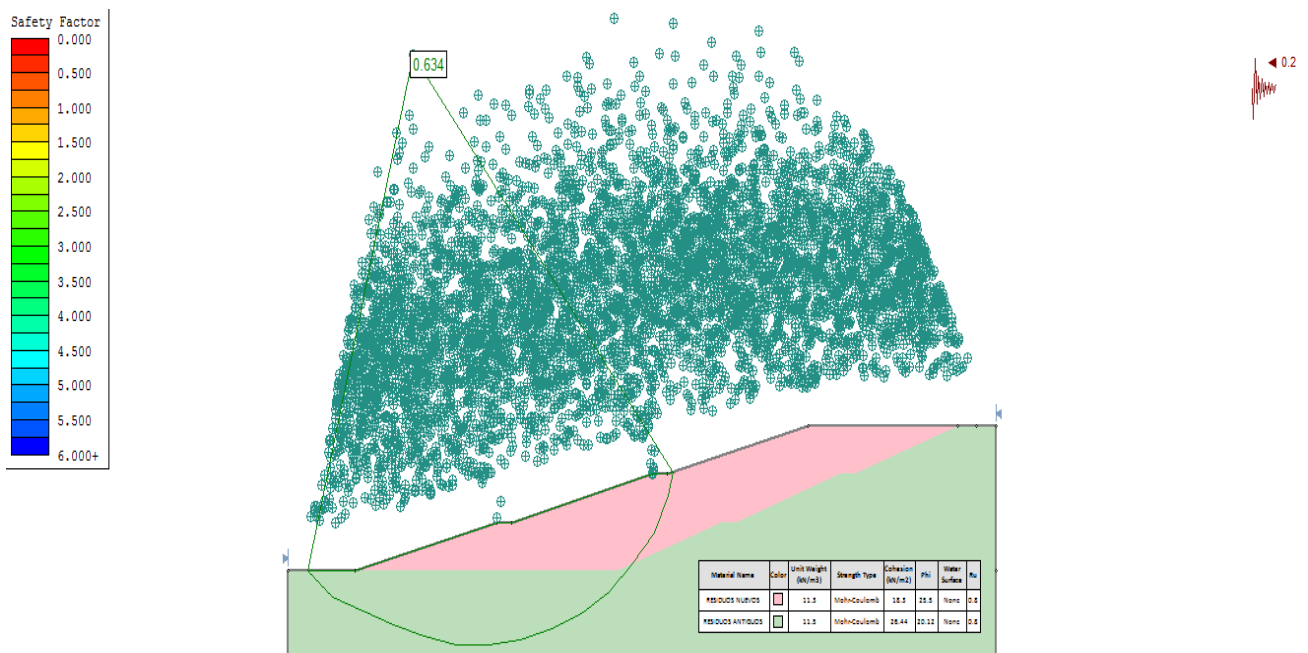
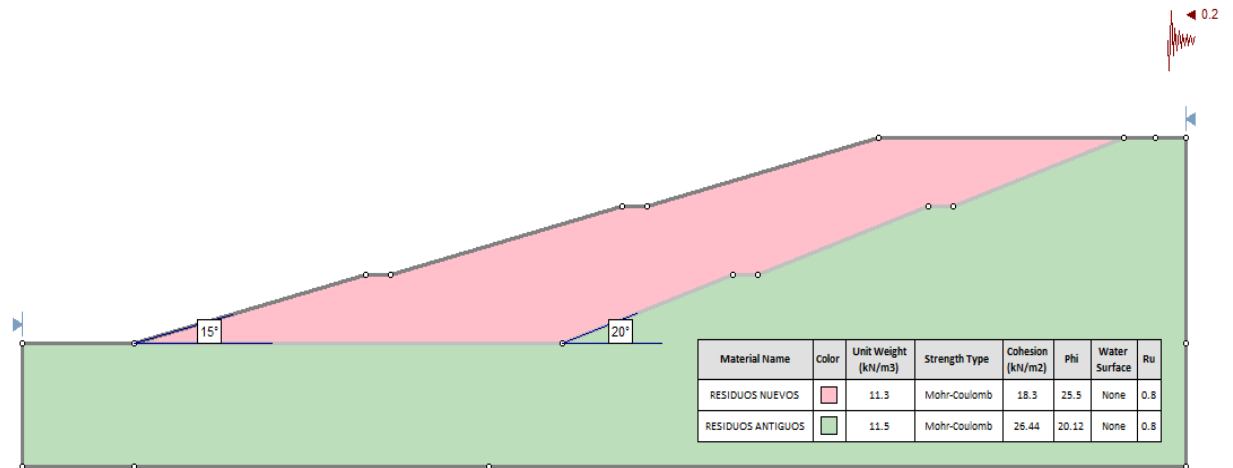
Talud pendiente de 20°X15° seudoestático y falla circular



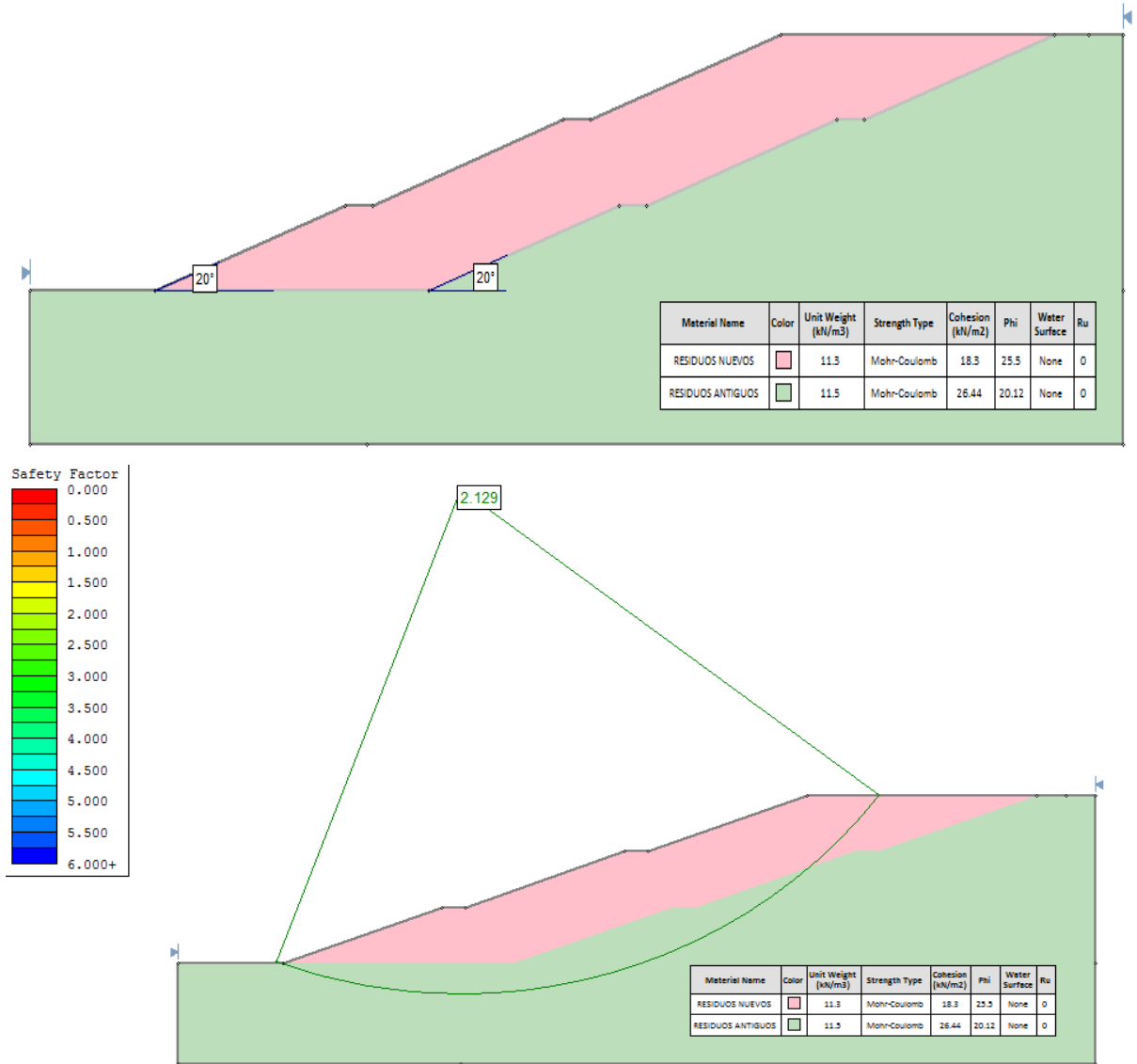
Talud pendiente de 20°X15° estático y falla No circular



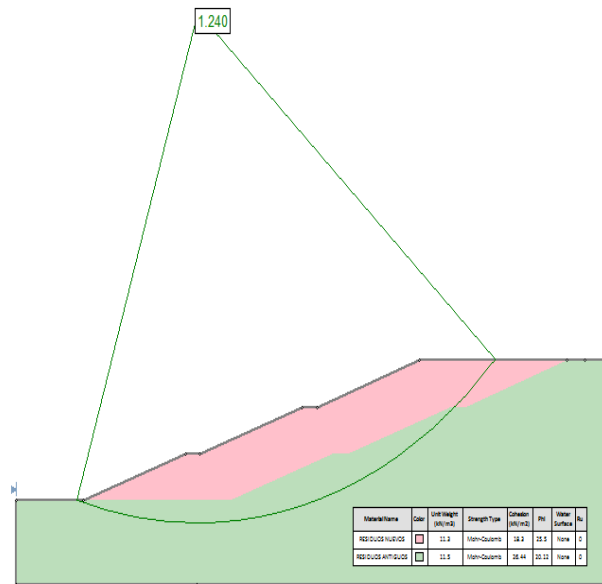
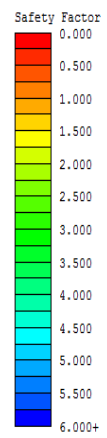
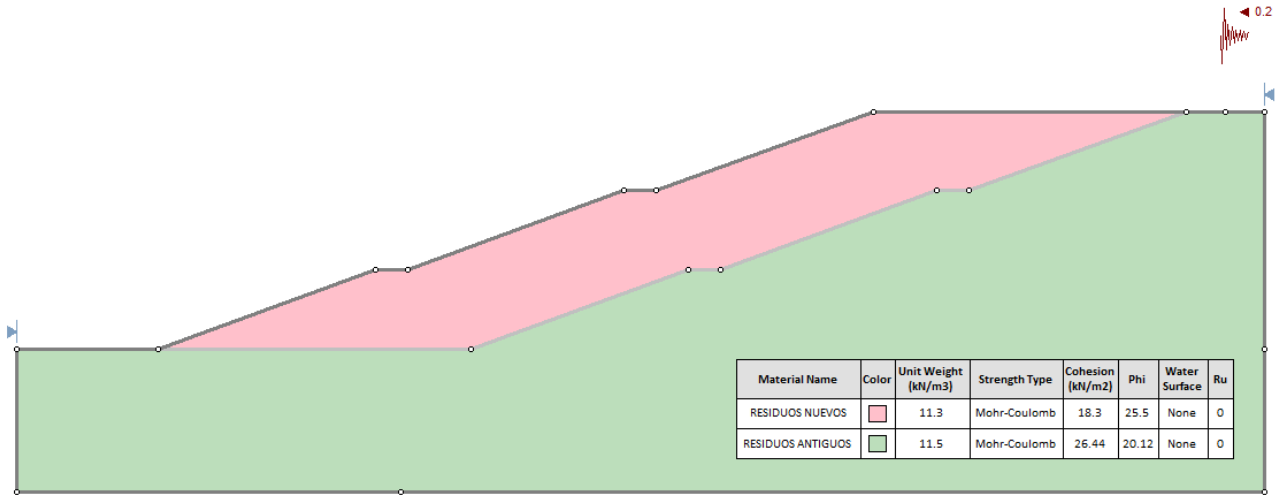
Talud pendiente de 20°X15° seudoestático y falla No circular



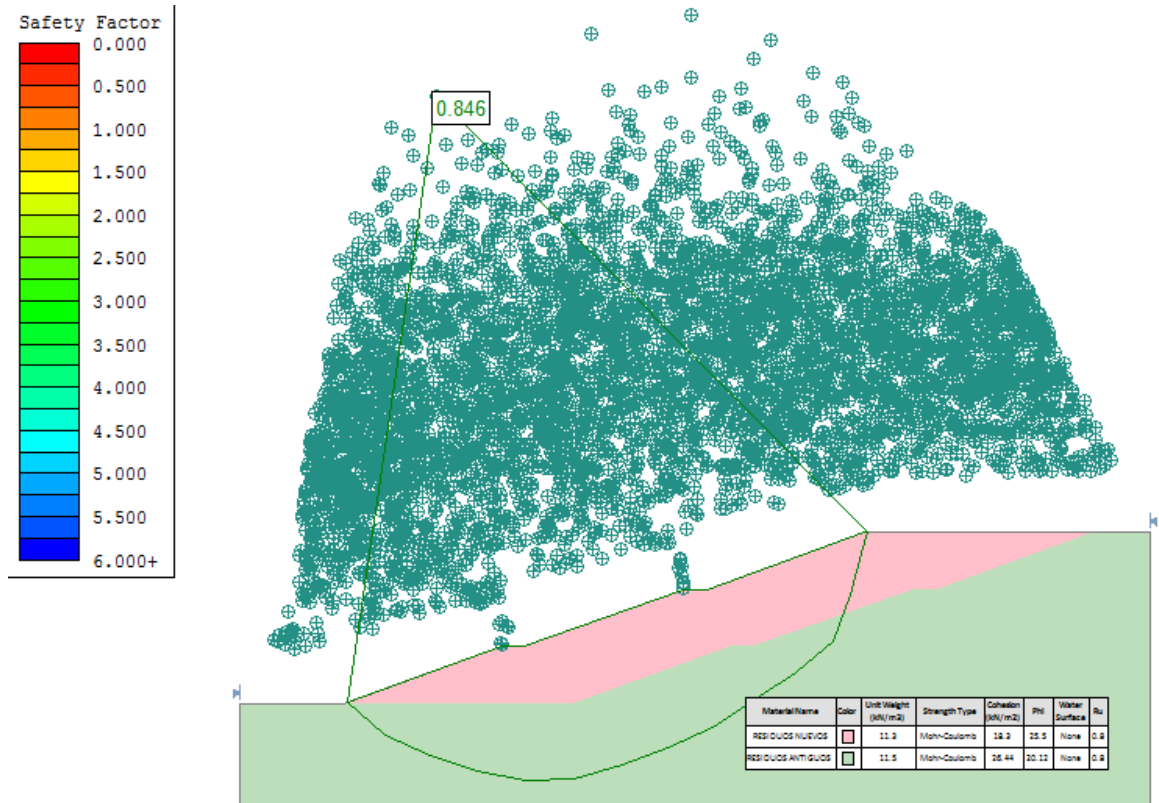
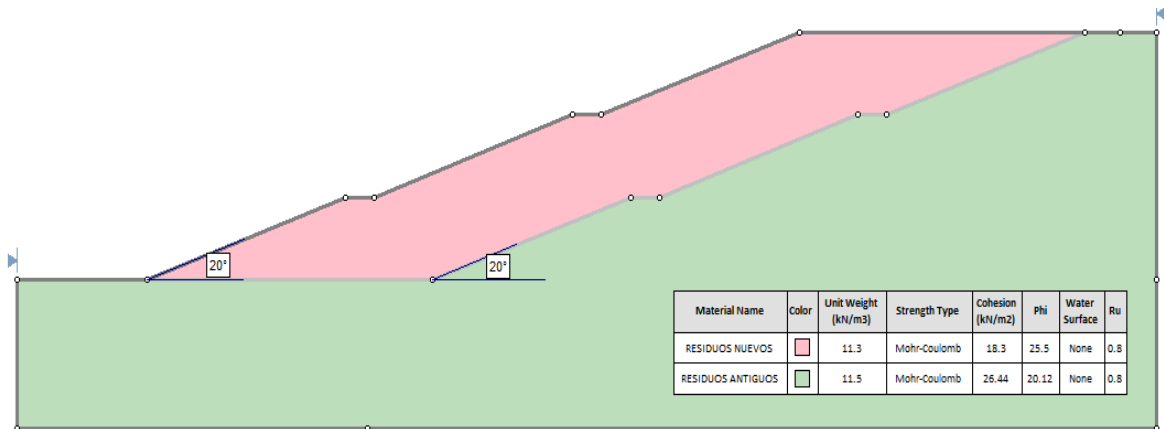
Talud pendiente de 20°X20° estático y falla circular



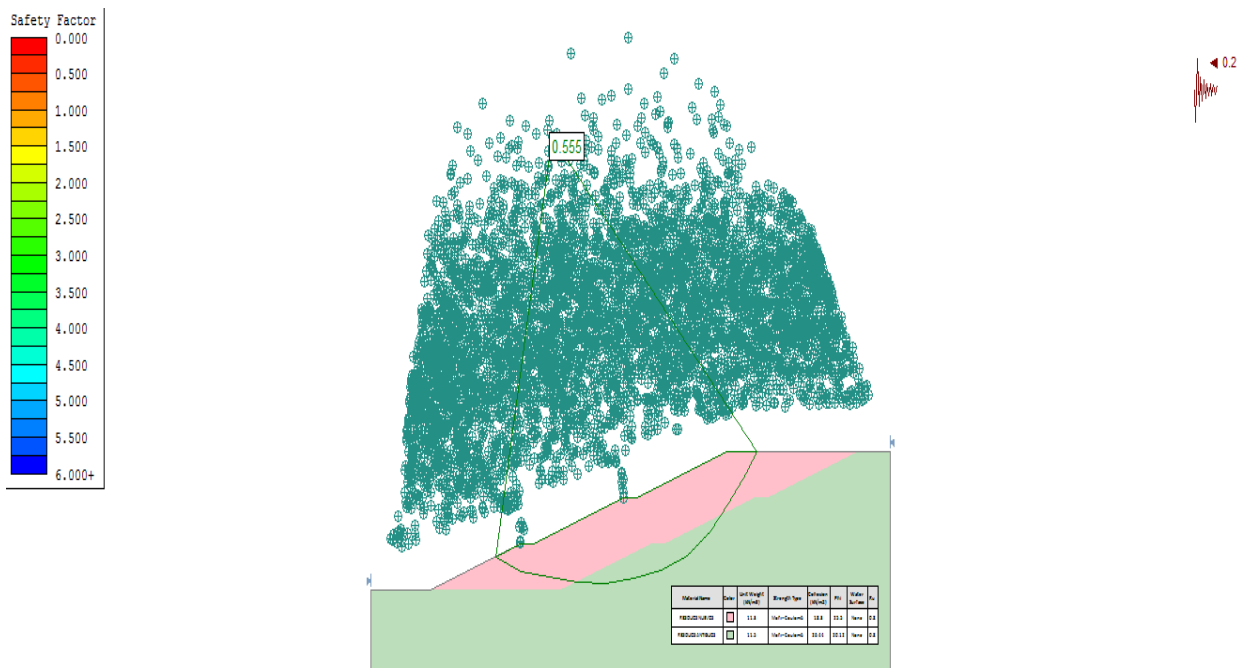
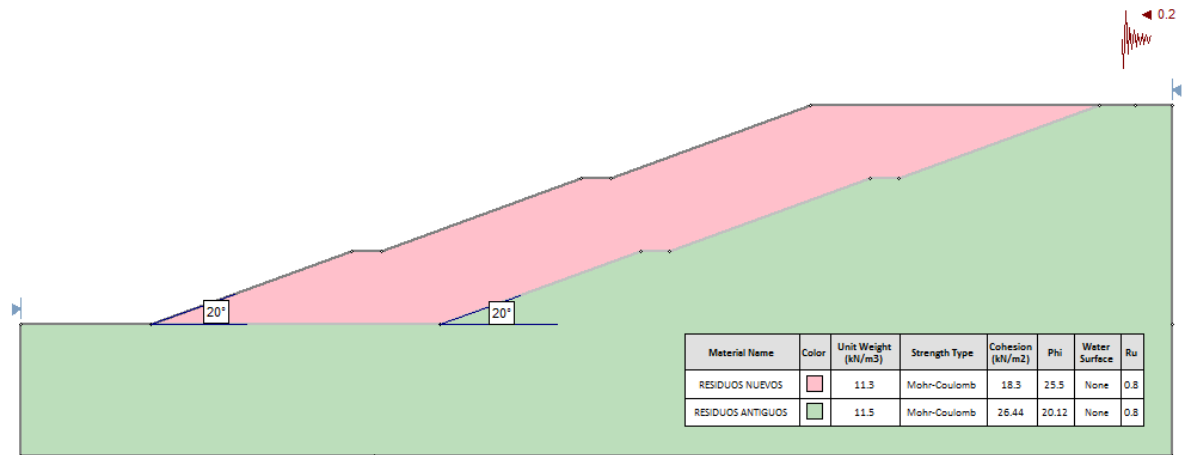
Talud pendiente de 20°X20° pseudoestático y falla circular



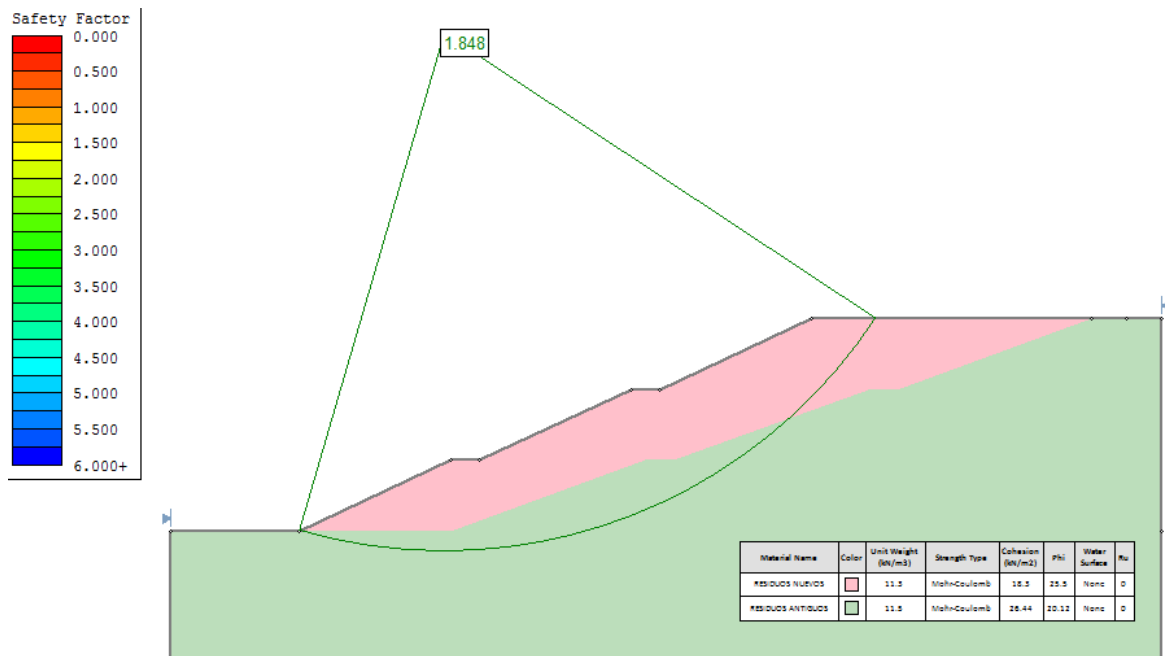
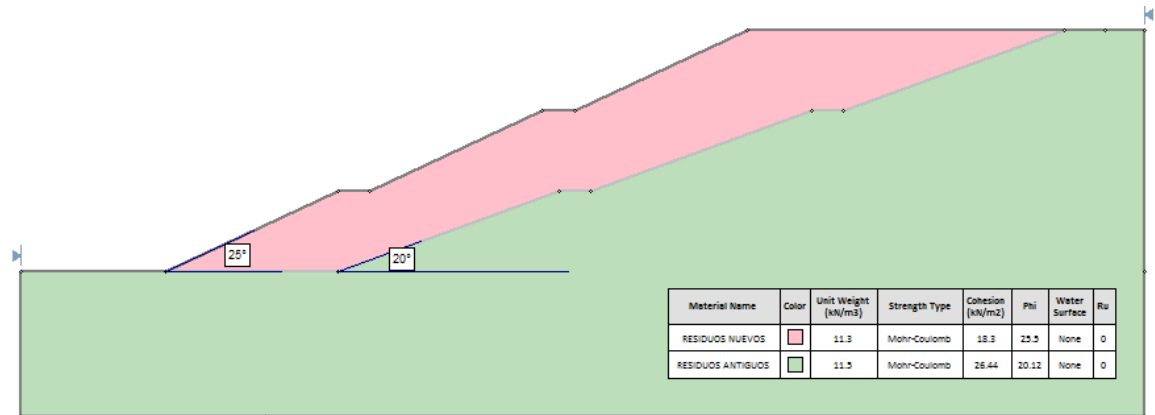
Talud pendiente de 20°X20° estático y falla No circular



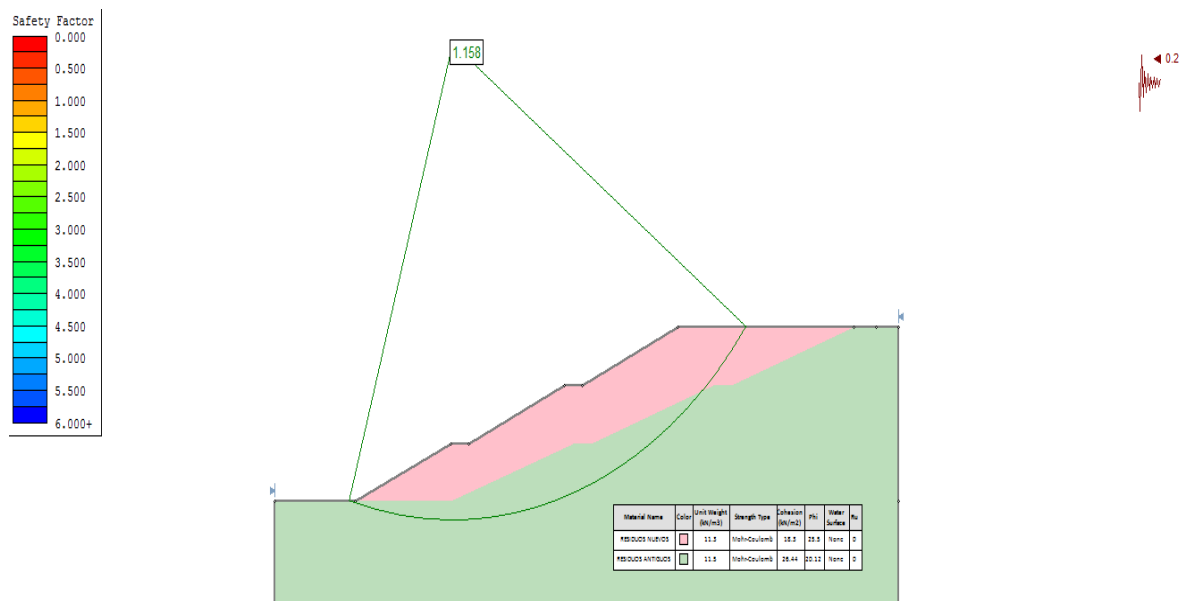
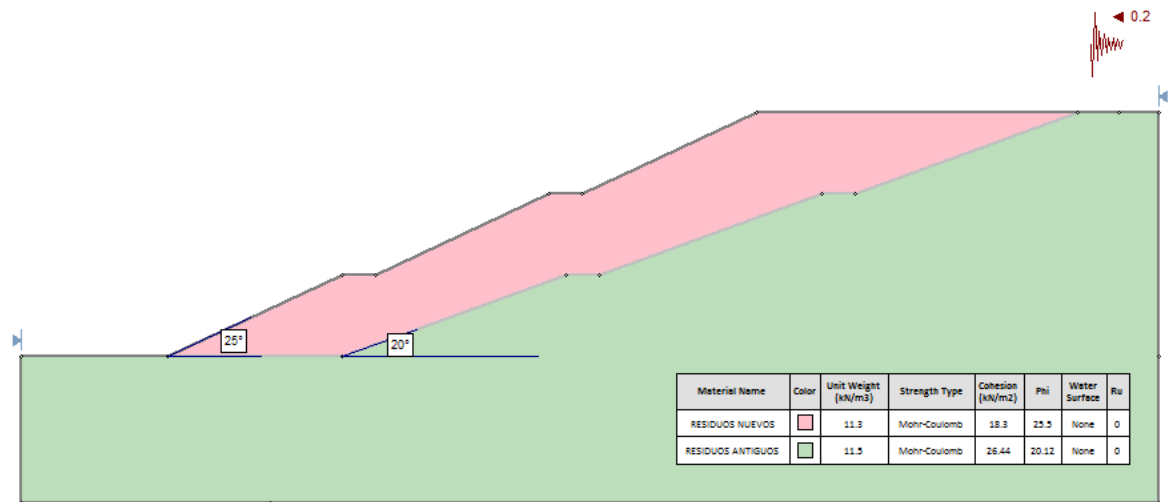
Talud pendiente de 20°X20° pseudoestático y falla No circular



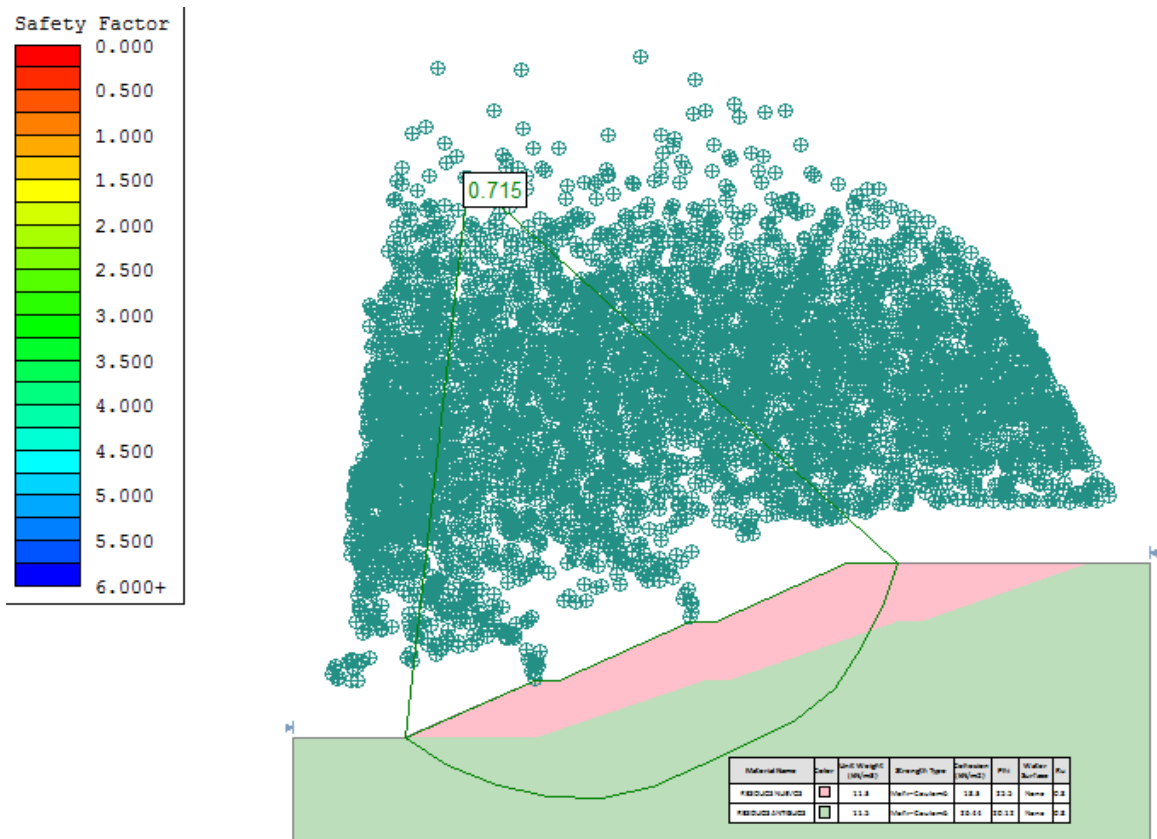
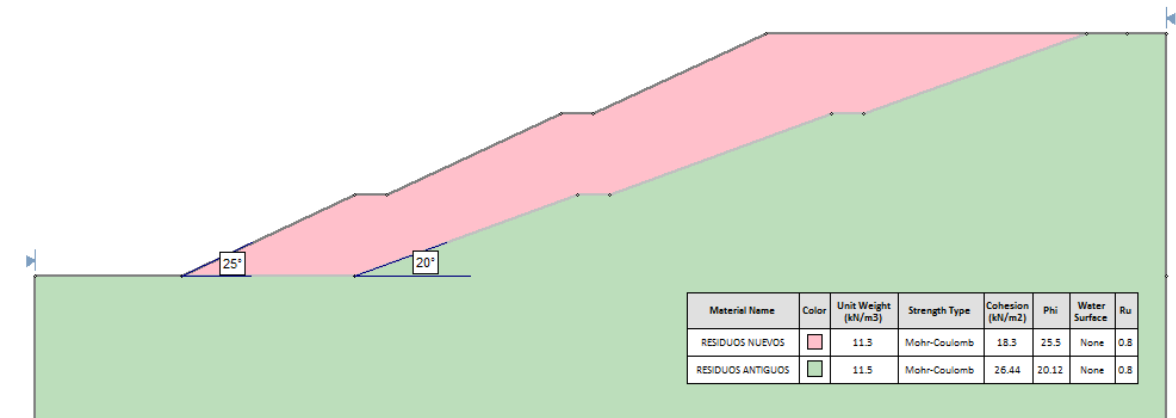
Talud pendiente de 20°X25° estático y falla circular



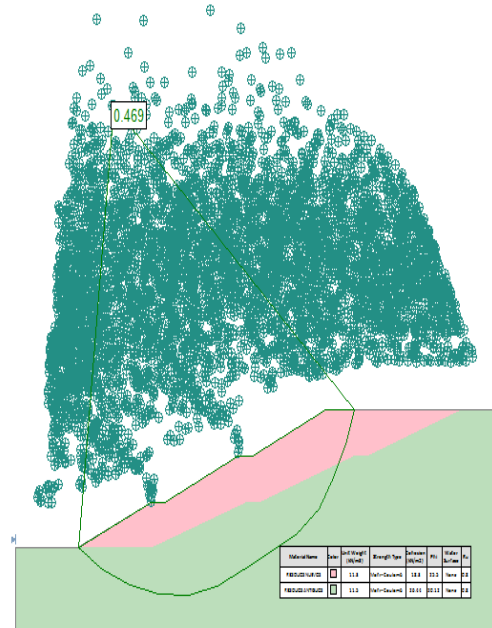
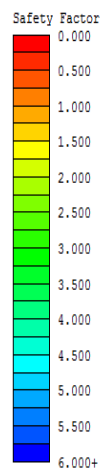
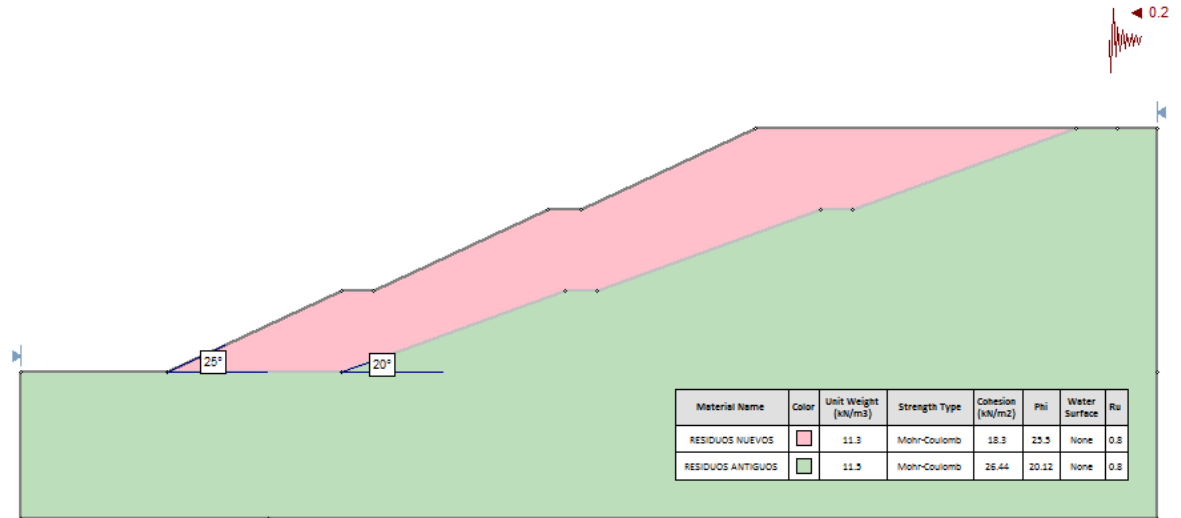
Talud pendiente de 20°X25° pseudoestático y falla circular



Talud pendiente de 20°X25° estático y falla No circular

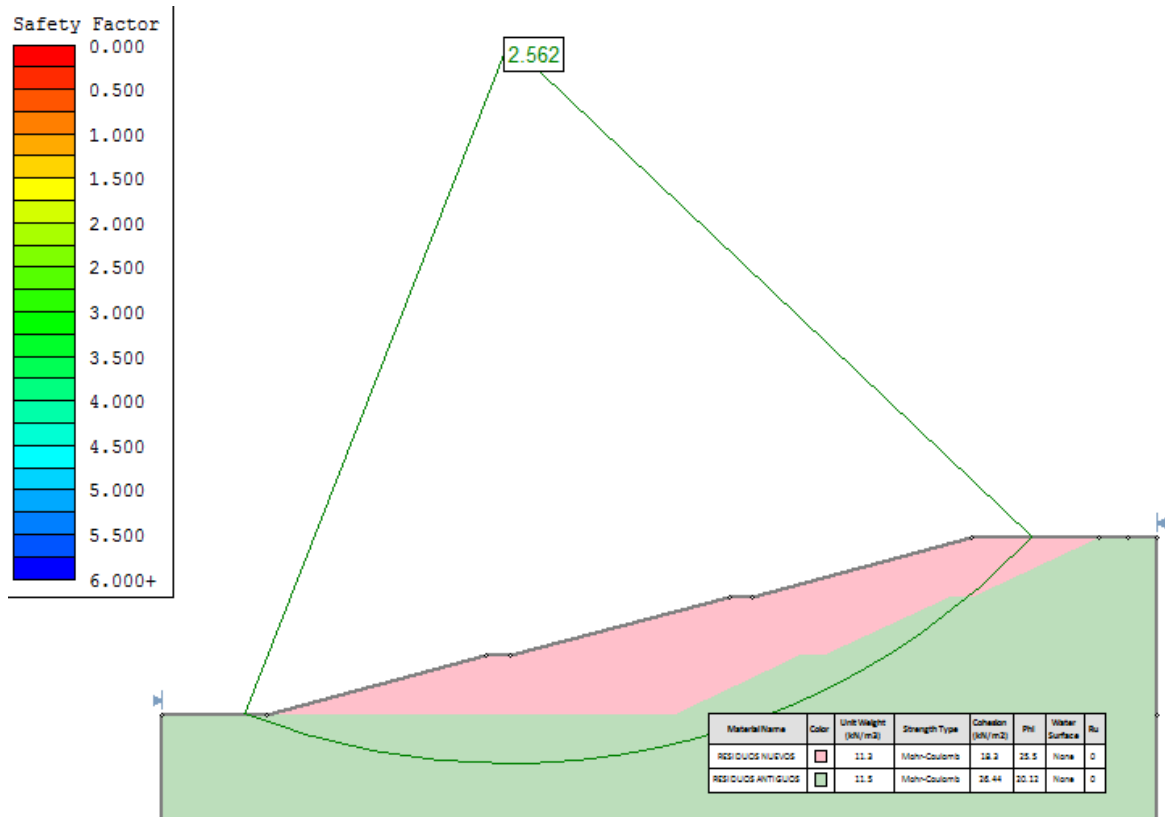
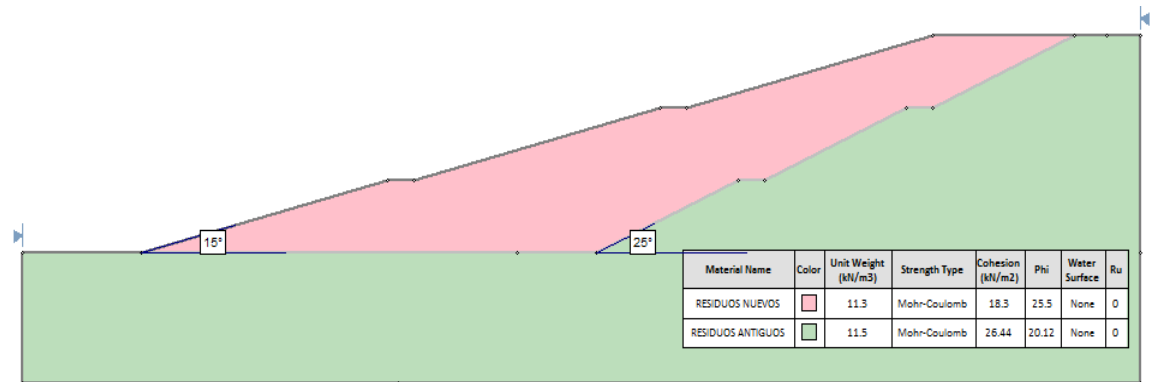


Talud pendiente de 20°X25° pseudoestático y falla No circular

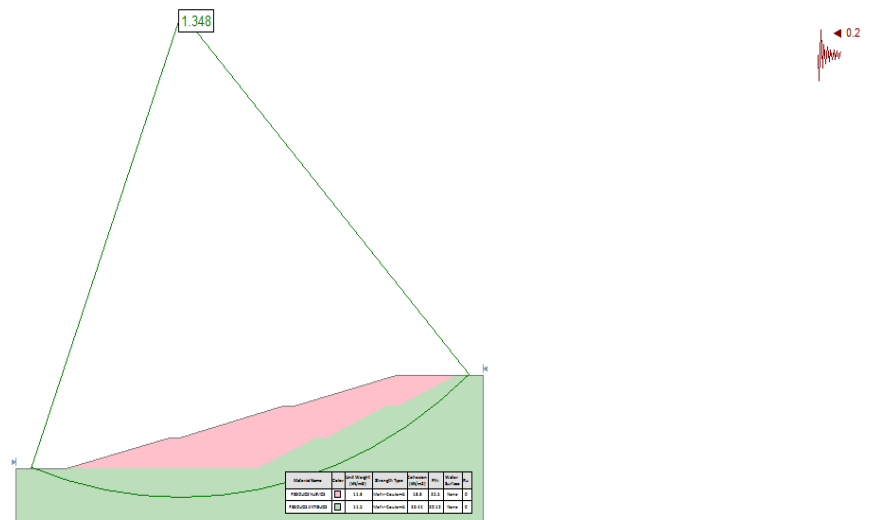
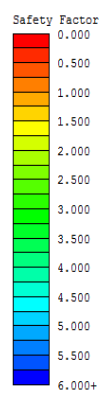
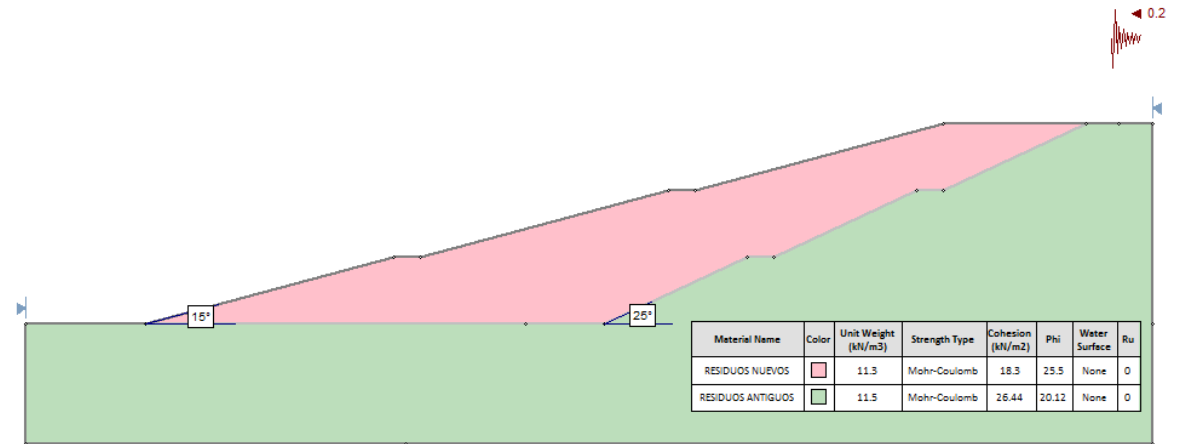


ANEXO 3

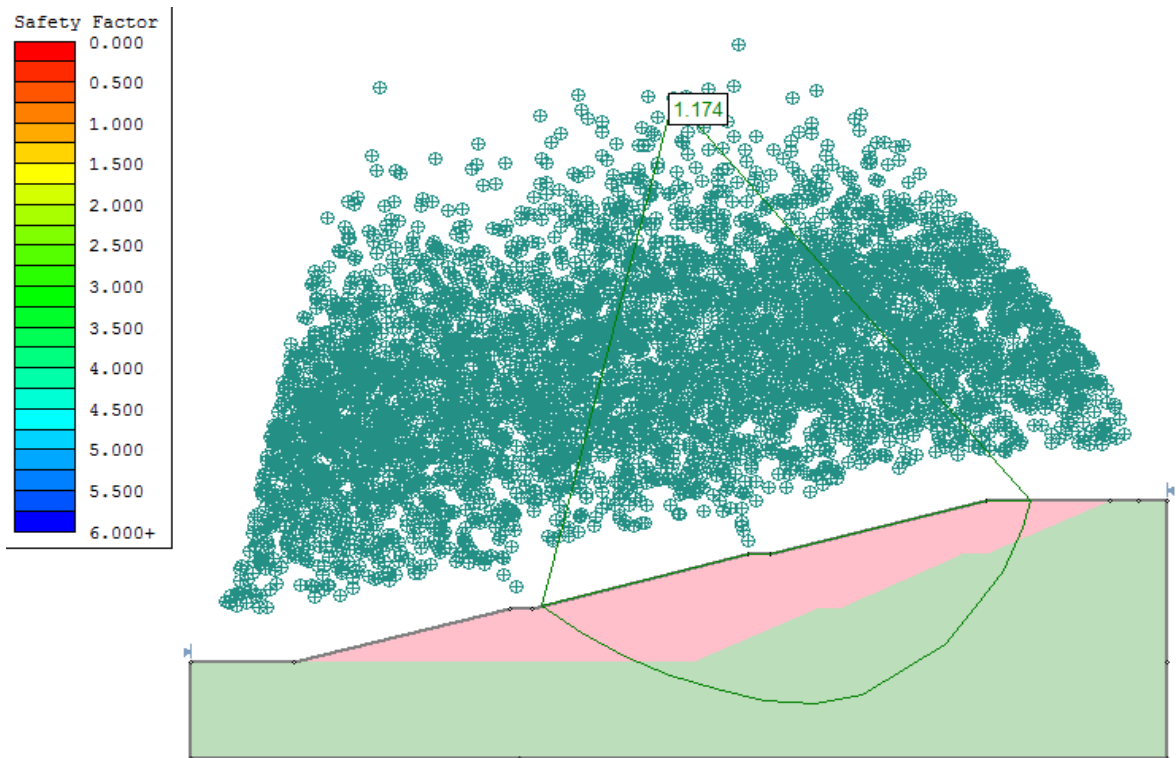
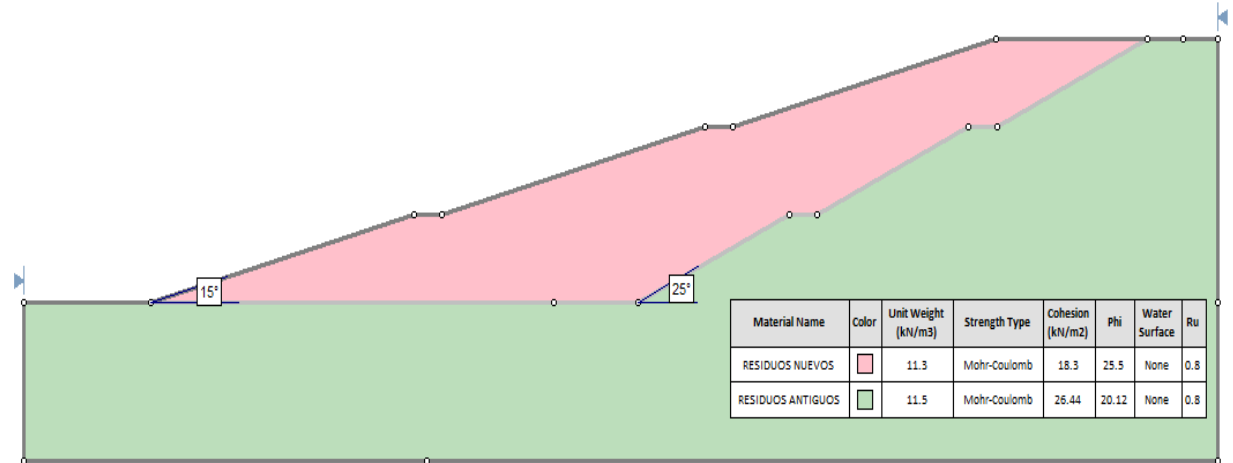
Talud pendiente de 25°X15° estático y falla circular



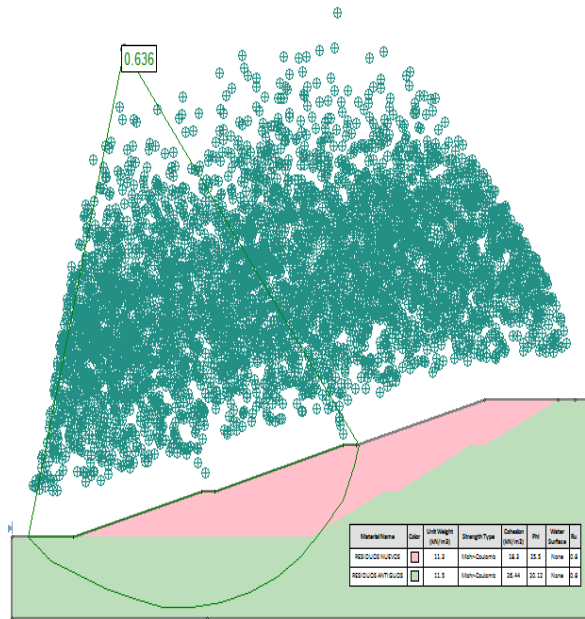
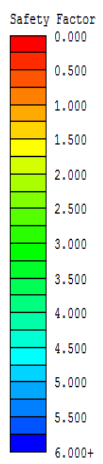
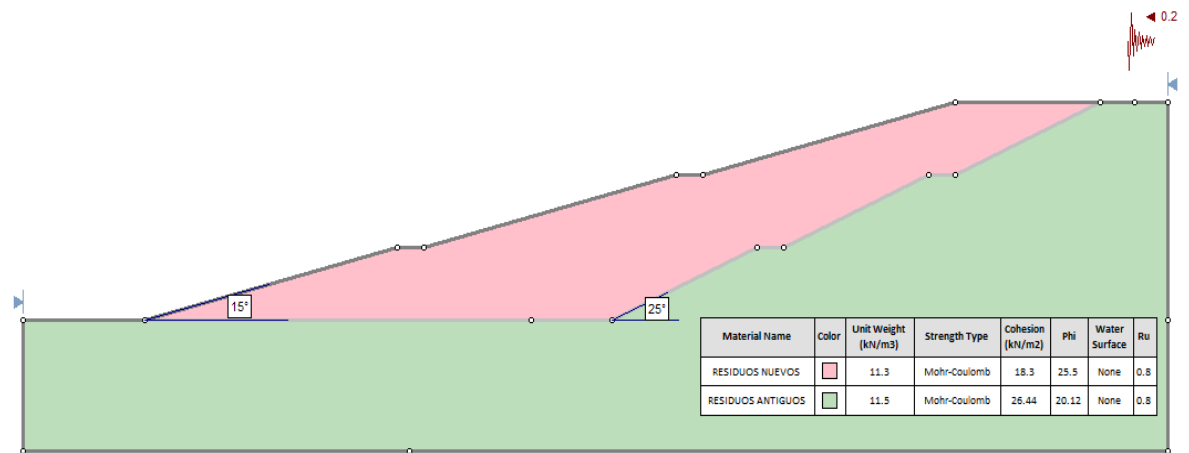
Talud pendiente de 25°X15° pseudoestático y falla circular



Talud pendiente de 25°X15° estático y falla No circular

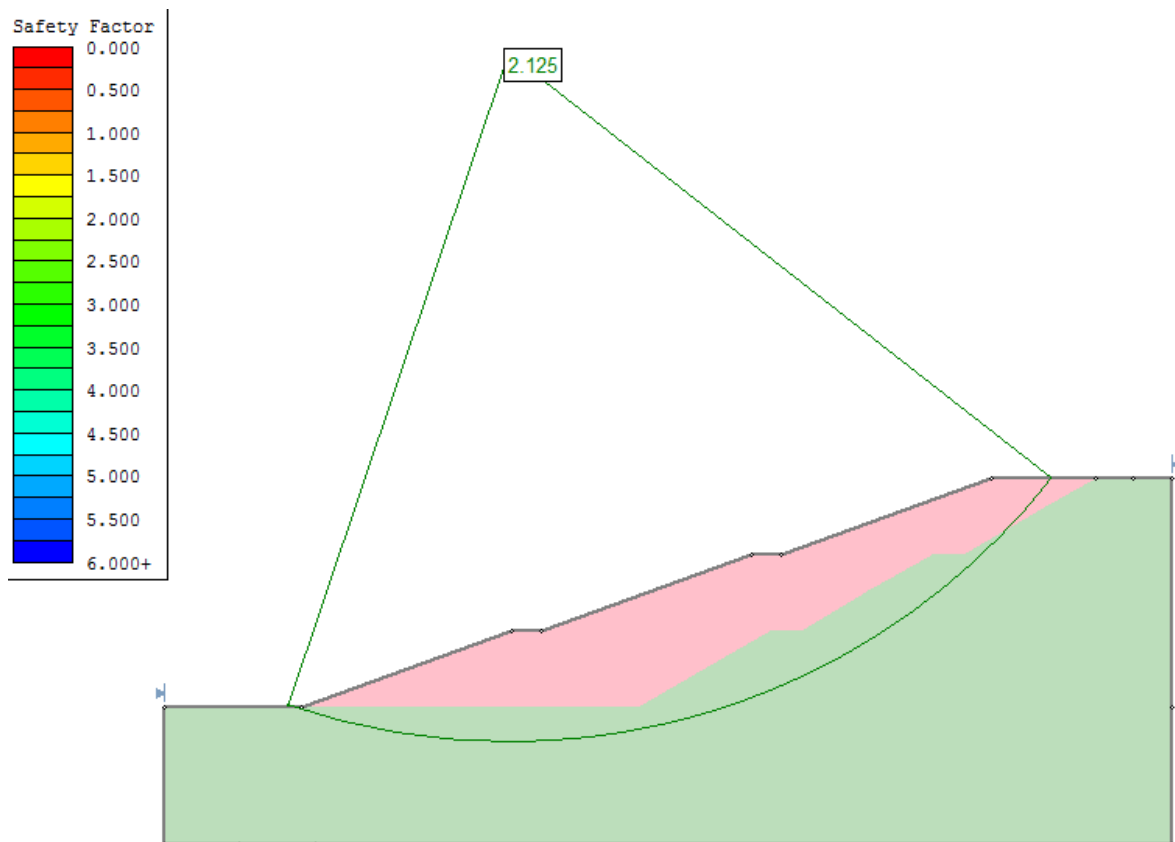
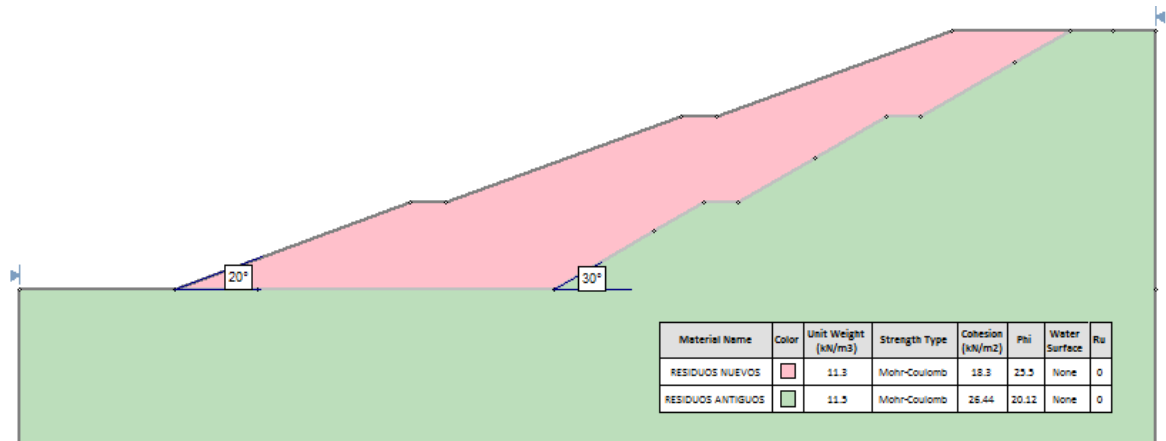


Talud pendiente de 25°X15° seudoestático y falla No circular

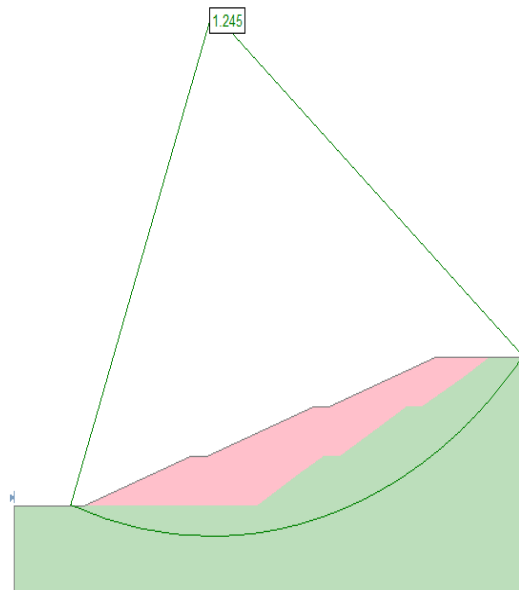
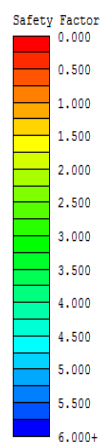
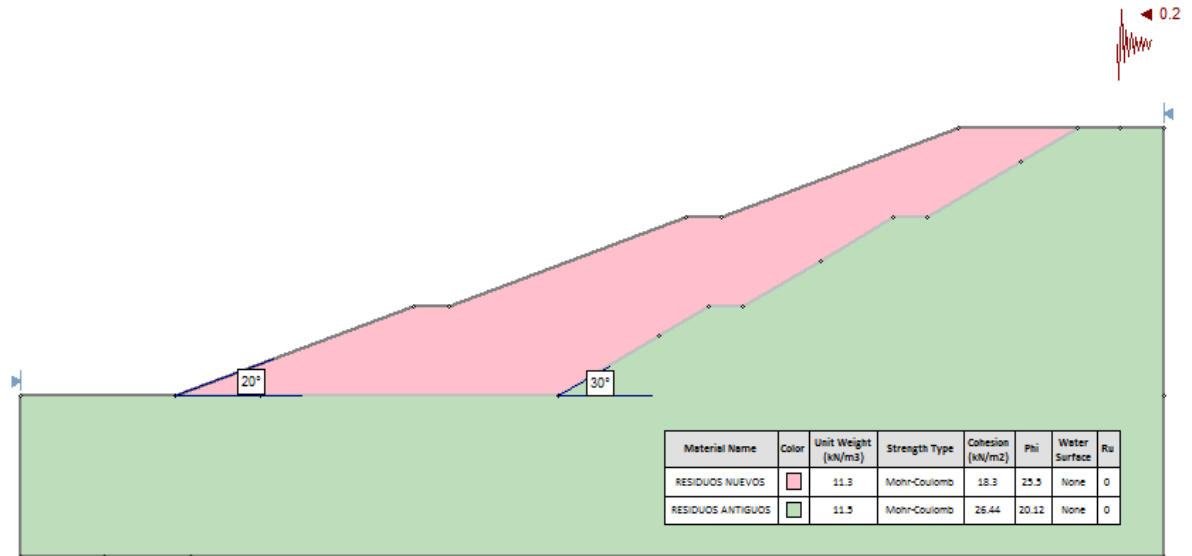


ANEXO 4

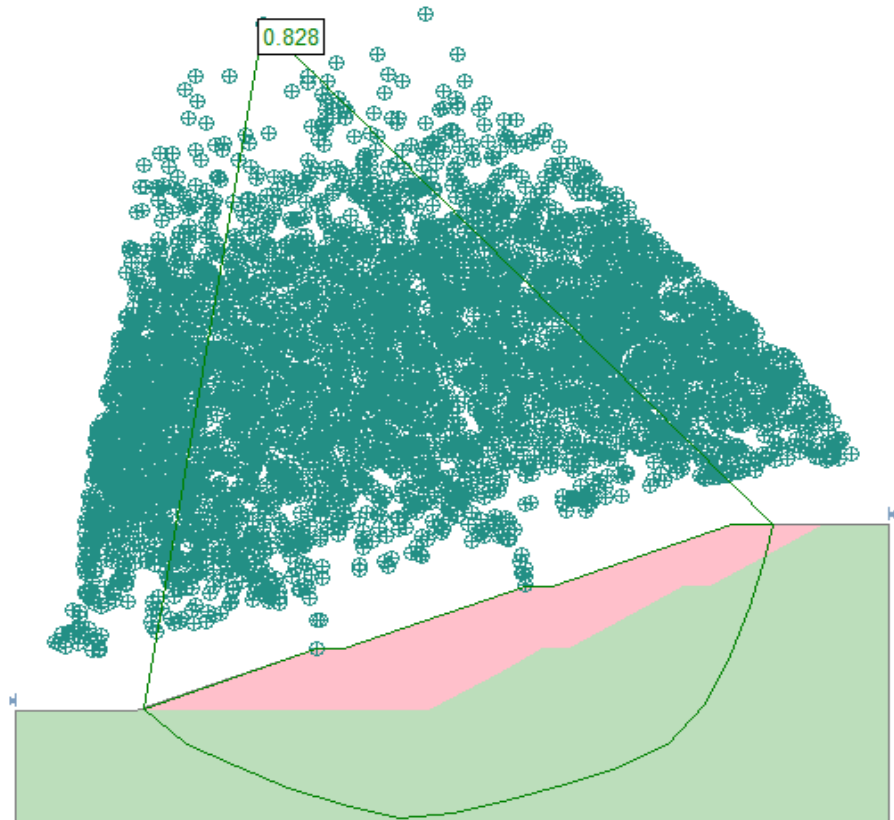
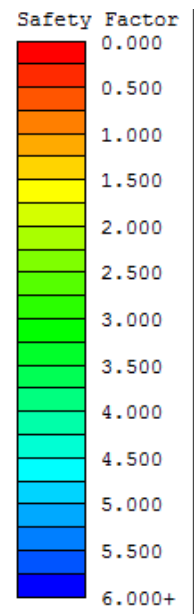
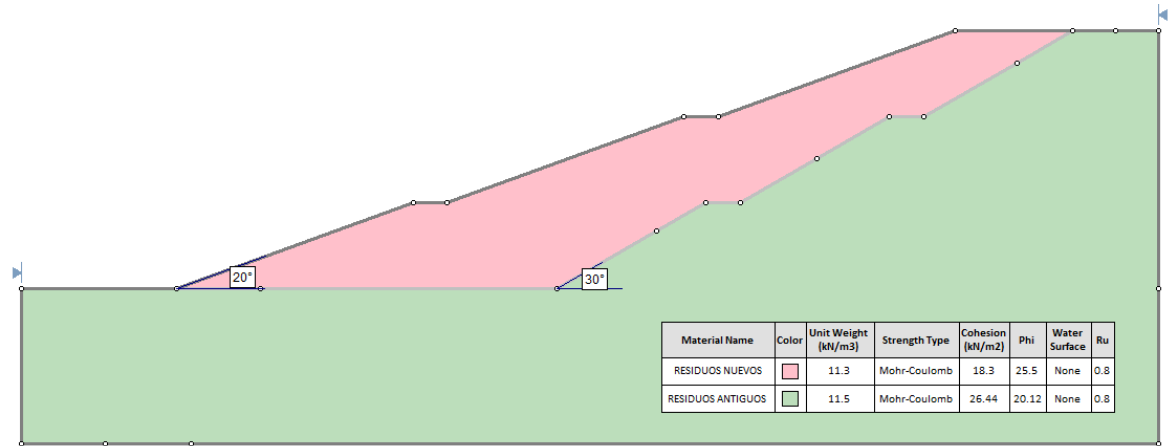
Talud pendiente de 30°X20° estático y falla circular



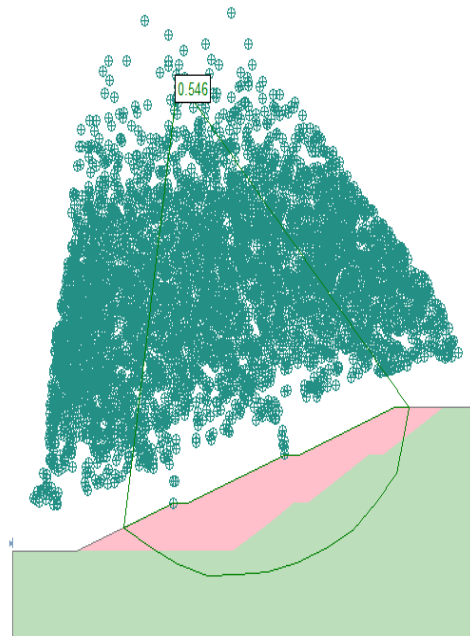
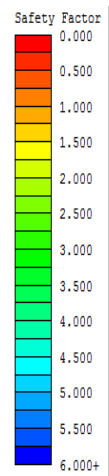
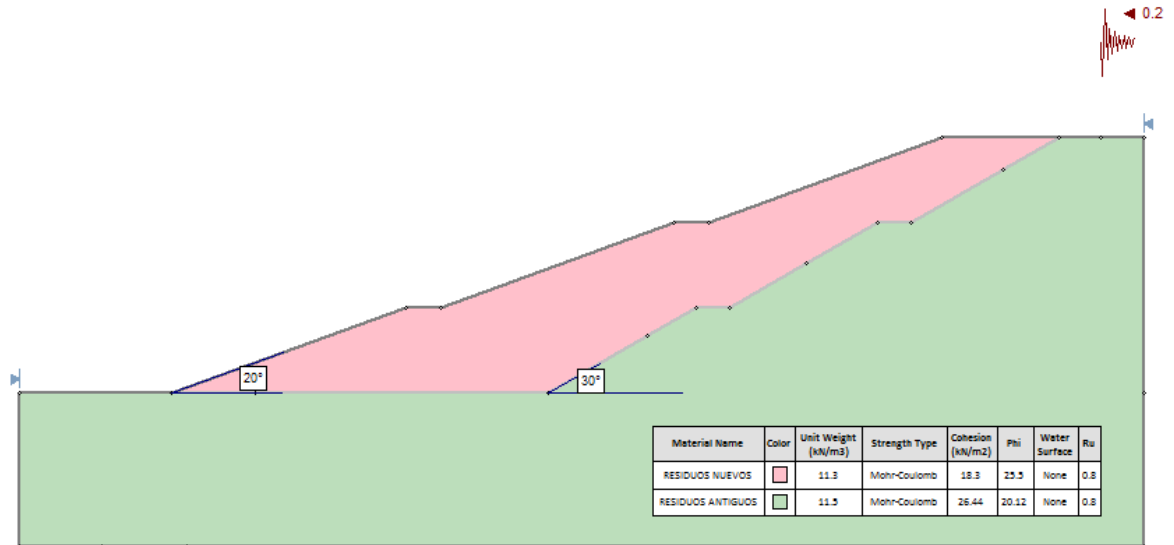
Talud pendiente de 30°X20° pseudoestático y falla circular



Talud pendiente de 30°X20° estático y falla No circular

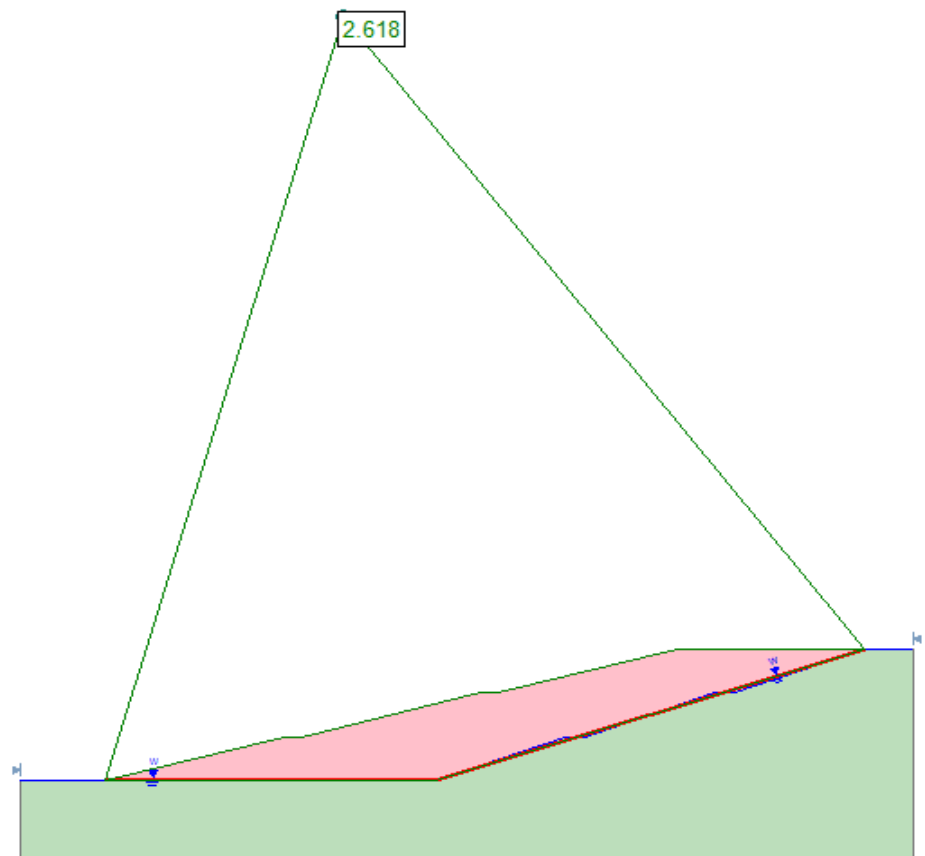
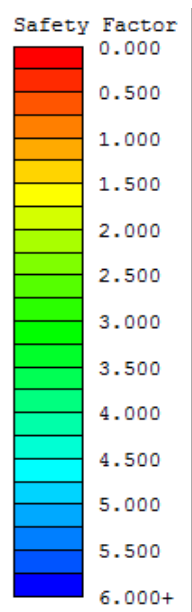
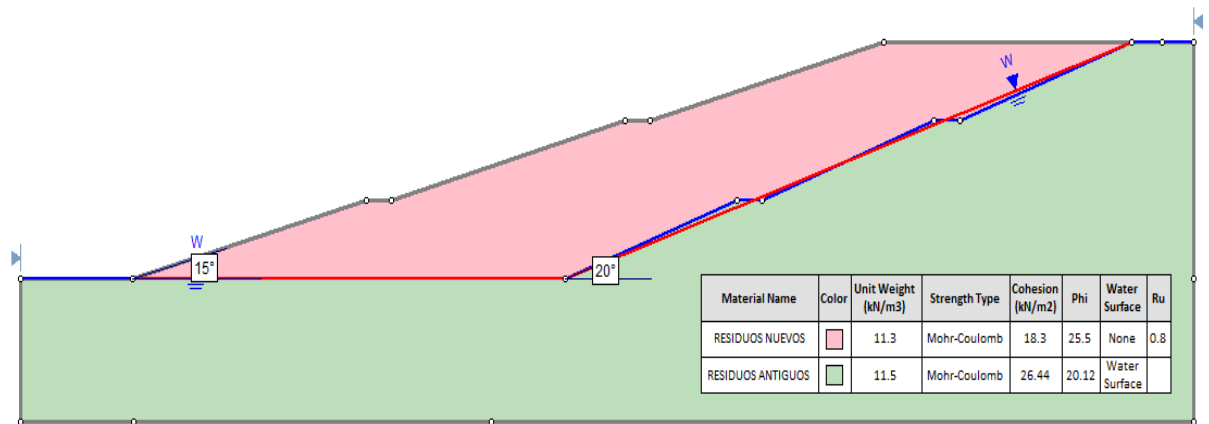


Talud pendiente de 30°X20° pseudoestático y falla No circular

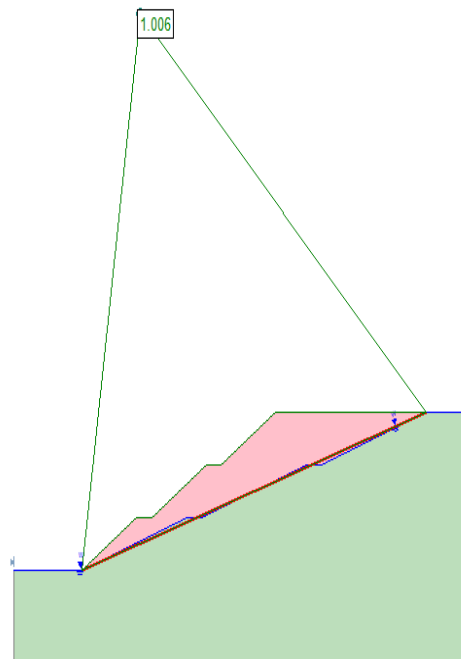
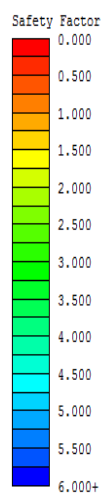
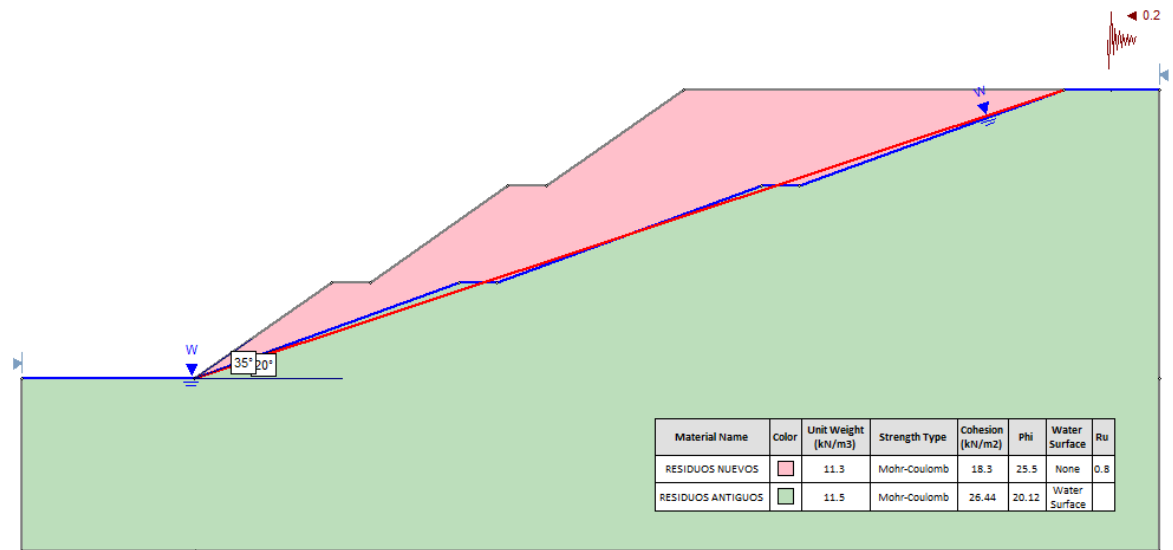


ANEXO 5 FALLA DE FONDO

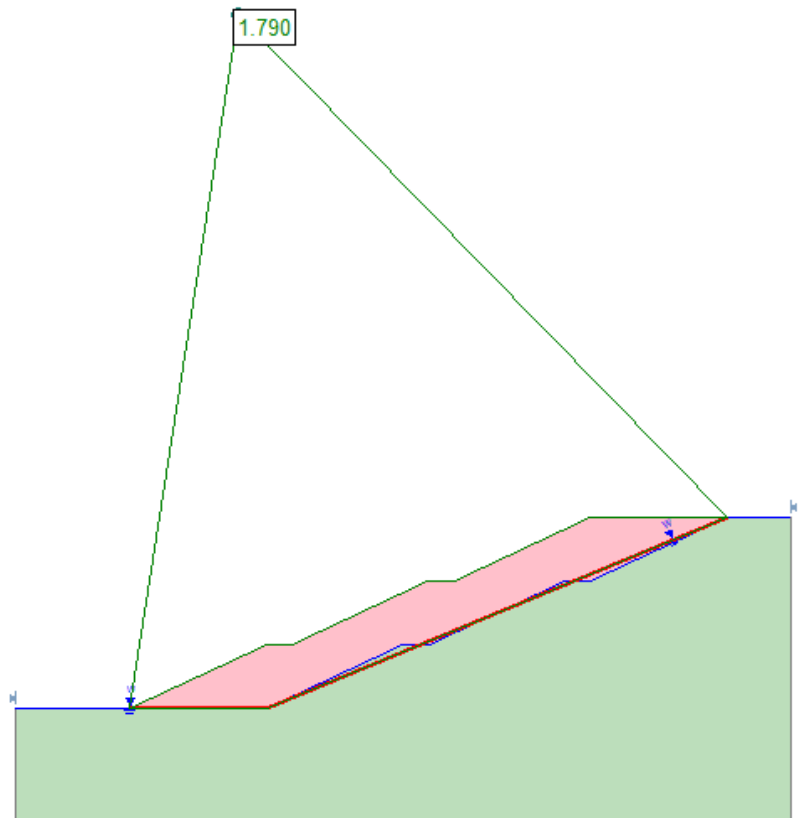
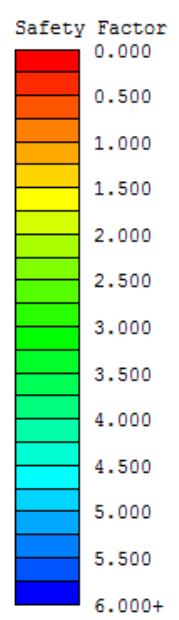
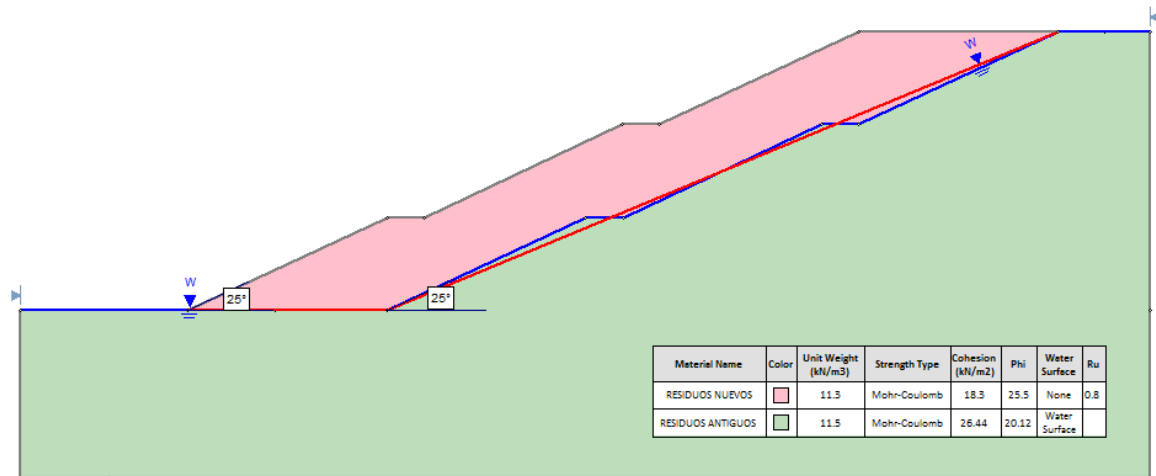
Talud pendiente de 20°X15° estático y falla de fondo



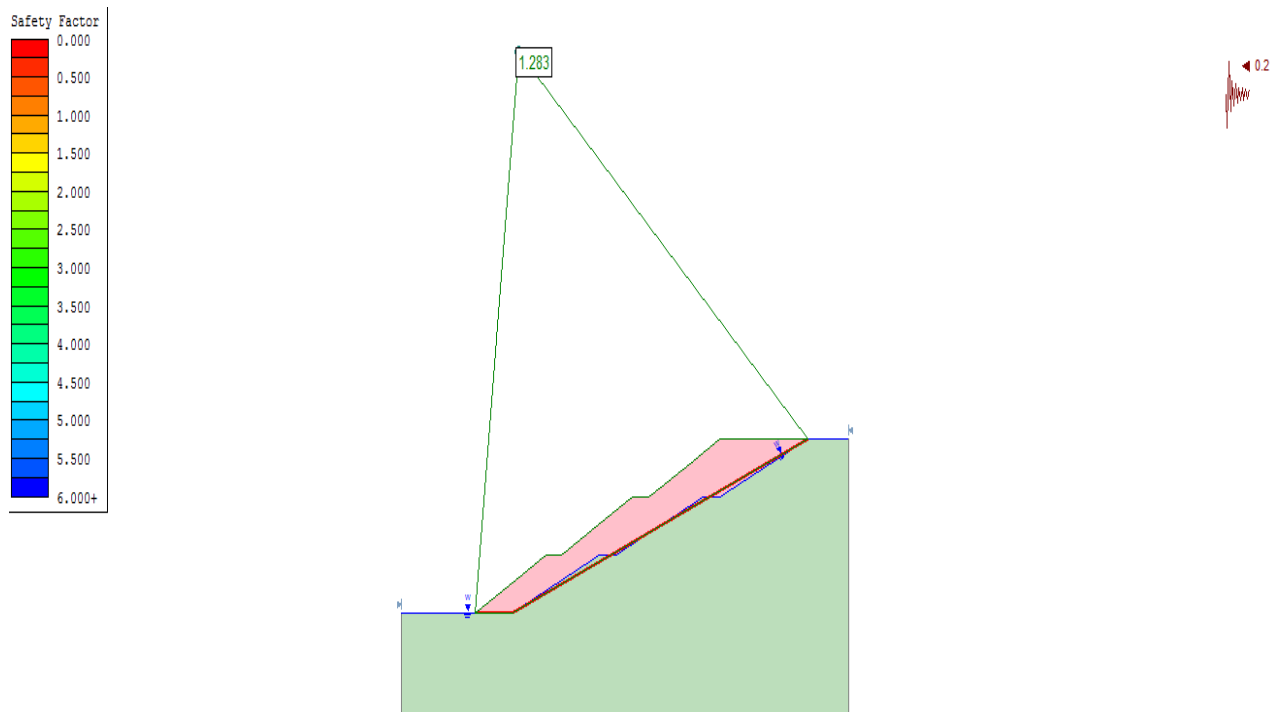
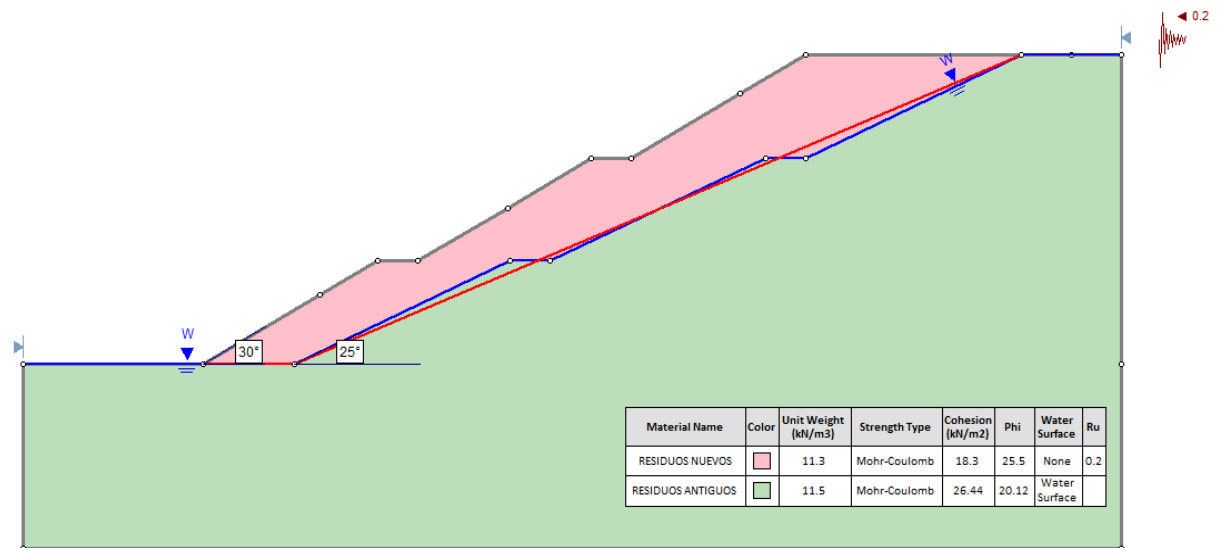
Talud pendiente de 20°X35° seudoestático y falla de fondo



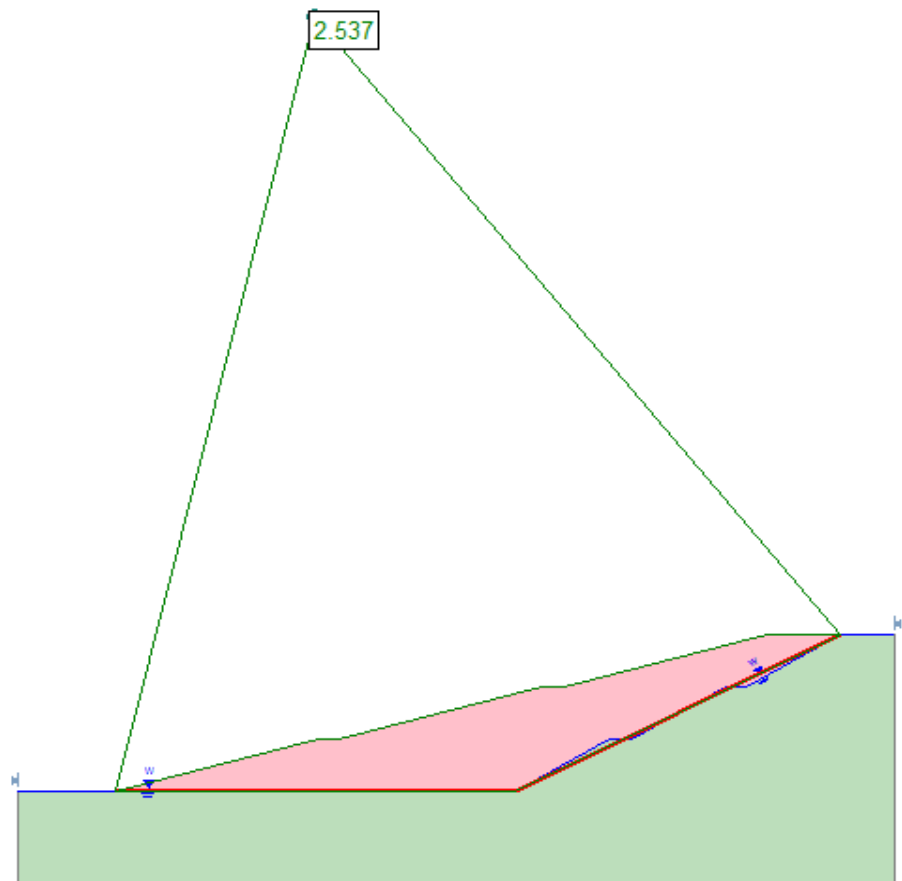
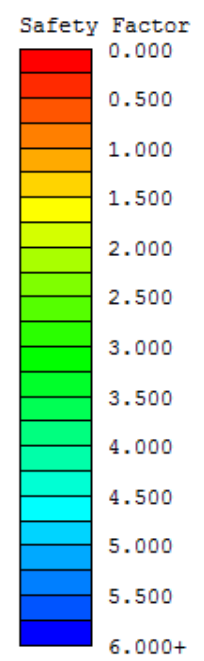
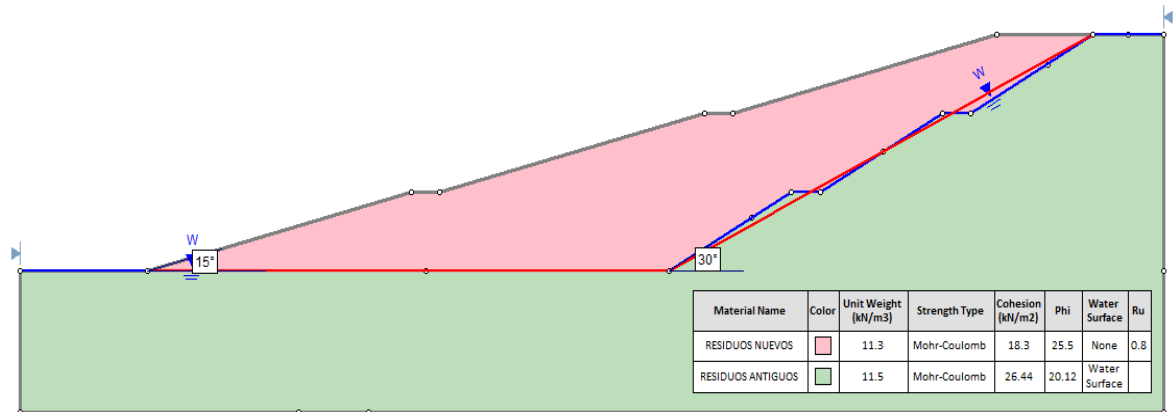
Talud pendiente de 25°X25° estático y falla de fondo



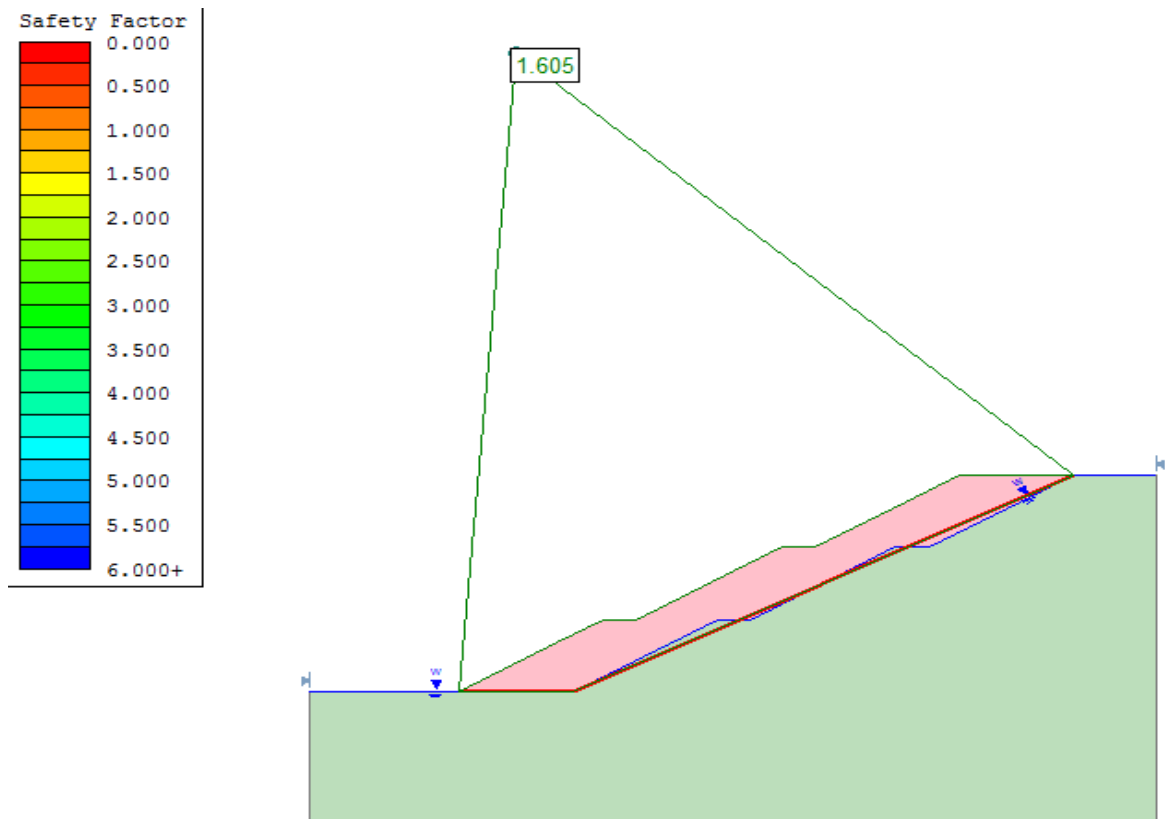
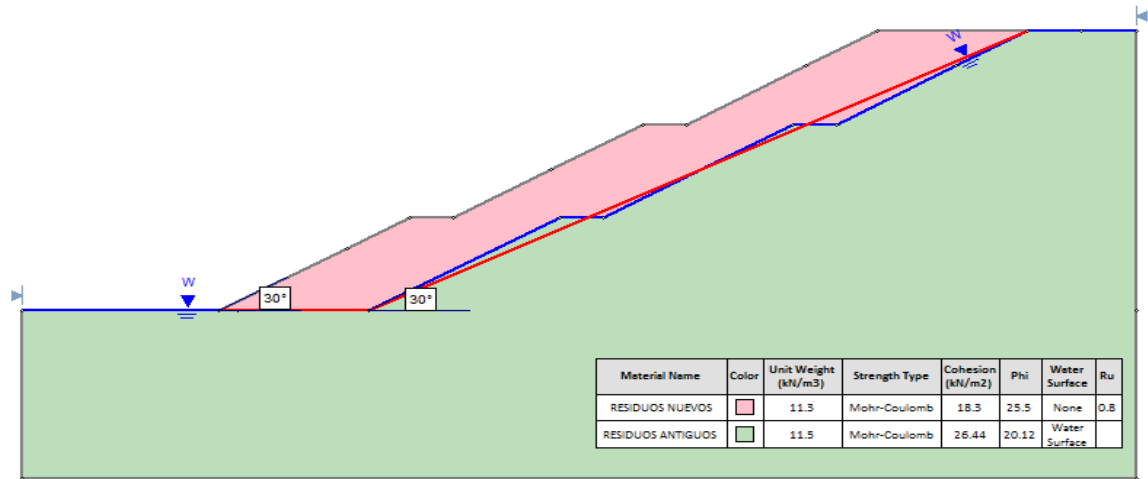
Talud pendiente de 25°X30° pseudoestático y falla de fondo



Talud pendiente de 30°X15° estático y falla de fondo



Talud pendiente de 30°X30° estático y falla de fondo



Talud pendiente de 30°X30° seudoestático y falla de fondo

