

**COMPORTAMIENTO DE PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EN TALUDES
COMPUESTOS POR SUELOS EXPANSIVOS**

**CIELO STEPHANY ARDILA MONTIEL
NATALIA LONDOÑO MANRIQUE**

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

2015

**COMPORTAMIENTO DE PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EN TALUDES
COMPUESTOS POR SUELOS EXPANSIVOS**

**CIELO STEPHANY ARDILA MONTIEL
NATALIA LONDOÑO MANRIQUE**

Anteproyecto presentado como requisito para optar al Título de **Ingeniero Civil**

Asesor Disciplinar: IC, MSc Christian Camilo Gutiérrez Angulo,
Asesor Metodológico: Licenciado Roy Morales Pérez

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

2015

Agradecimientos

En este tiempo de estudio varias personas han contribuido con el logro de los objetivos planteados.

Agradecemos naturalmente a la Universidad La Gran Colombia, sede en Bogotá, en donde adquirimos la formación académica, que nos permitió el desarrollo de la presente investigación, desarrollando la temática con los profesionales Ic. MSc Christian Camilo Gutiérrez Angulo y Licenciado Roy Morales Perez, quienes nos orientaron, se preocuparon y nos brindaron valiosos aportes, durante el desarrollo de la investigación.

A nuestras familias, quienes han estado y siempre estarán acompañándonos en el emprendimiento de retos venideros.

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	7
LISTA DE FIGURA	8
GLOSARIO	10
INTRODUCCIÓN	14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
2. ANTECEDENTES.....	17
3. OBJETIVOS.....	22
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	22
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	22
3.2.1 Identificar parámetros geotécnicos para diferentes tipos de suelos expansivos.....	22
3.2.2 Definir las condiciones de nivel freático y sismo de los taludes compuestos por estos suelos.	22
3.2.3 Evaluar el factor de seguridad para diferentes condiciones geomecánicas presentes en los taludes definidos.....	22
3.2.4 Comparar las variaciones encontradas para las propiedades geomecánicas en los distintos suelos.....	22
4. JUSTIFICACIÓN.....	23
5. MARCO REFERENCIAL	25
5.1 . MARCO CONCEPTUAL.....	25
5.1.1 Suelos Expansivos	26
5.1.2 Métodos de análisis en taludes	38
5.2 MARCO LEGAL.....	42
6. DISEÑO METODOLÓGICO	43
6.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.....	43
6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN	43
6.3 DISEÑO MUESTRAL	43

6.3.1	Población universo:	43
6.3.2	Muestra:	44
6.3.3	Individuo:	45
6.3.4	Variables:	45
6.4	FASES DEL PROYECTO	46
6.4.1	FASE I: Identificación de parámetros geomecánicos en taludes compuestos por arcillas expansivas.	46
6.4.2	FASE II. Modelación y sensibilización de parámetros en taludes... ..	47
6.4.3	FASE III. Generación de gráficas y análisis de resultados.	48
7.	DESARROLLO METODOLOGICO.....	49
7.1	DESCRIPCIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS	49
7.2	PROPIEDADES DE LOS SUELOS EXPANSIVOS CH, CL Y MH	51
7.3	SELECCIÓN DE PARÁMETROS.....	53
7.3.1	Parámetros Geomecánicos:	53
7.3.2	Selección de valores de sismo y R_u	64
7.3.3	Parámetros geométricos	67
7.4	DESARROLLO DEL MODELO.....	67
7.4.1	Diseño de modelos estáticos para diferentes suelos expansivos....	69
8.	ANALISIS DE RESULTADOS	90
9.	CONCLUSIONES	108
10.	RECOMENDACIONES.....	110
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	112
ANEXO 1		
COMPARACIÓN DE FACTORES DE SEGURIDAD.....		116
ANEXO 2		
PORCENTAJE DE CAMBIO DE FACTOR DE SEGURIDAD EN RELACIÓN A LA GEOMETRÍA.....		117
ANEXO 3		
MODELACIÓN ADECUADA PARA TALUDES COMPUESTOS POR SUELOS		

EXPANSIVOS.....118

ANEXO 4

VALORES DE COHESIÓN PARA SUELOS EXPANSIVOS.....119

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ensayos y laboratorios, en suelos.	28
Tabla 2. Tipos de remoción en masa.	30
Tabla 3. Efectos de la estructura en la formación de deslizamientos de rotación.	31
Tabla 4. Parámetros geomecánicos	32
Tabla 5. Procesos de remoción en masa.	33
Tabla 6 . Métodos de exploración de suelos.	37
Tabla 7. Métodos de análisis para estabilidad de taludes.	40
Tabla 8. Normatividad	42
Tabla 9. Variables.....	45
Tabla 10.Descripción de suelos expansivos.....	50
Tabla 11. Propiedades físicas de los suelos expansivos.....	51
Tabla 12. Parámetros de resistencia al corte (C y ϕ) para ensayo triaxial no consolidado no drenado Suelo natural antes de ser tratado.....	55
Tabla 13. Parámetros de diferentes tipos de suelos.....	58
Tabla 14. Parámetros geomecánicos de una arcilla inorgánica de alta plasticidad (CH)	61
Tabla 15. Parámetros geomecánicos de una arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL).	62
Tabla 16. Matriz de diseño, para altura del talud de 10 m y 20 m con $r_u= 0.25$ y 0.5	68
Tabla 17.Valores de factor de seguridad.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Arcillas expansivas de Gramalote-Santander	26
Figura 2. Métodos de cálculo.....	39
Figura 3. El efecto del contenido de agua inicial en la presión de hinchamiento por los tres métodos para MH.....	56
Figura 4.El efecto del contenido de agua inicial en la presión de hinchamiento por los tres métodos para CL.....	57
Figura 5. Nivel de amenaza sísmica según valores de A_a y A_v	64
Figura 6.Valores de K_{st}/ A_{max}	65
Figura 7. Factores de seguridad Indirectos Mínimos.	66
Figura 8. Modelo en slide para un CH	69
Figura 9. Factor de seguridad CH, estático.	70
Figura 10. Modelo en slide para un MH, estático.	71
Figura 11. Factor de seguridad para MH, estático.....	71
Figura 12. Modelo de slide para un CL, estático.	72
Figura 13. Factor de seguridad de un CL, estático.....	72
Figura 14. Modelo en slide para un CH, dinámico.....	73
Figura 15. Factor de seguridad CH, dinámico.	74
Figura 16. Modelo en slide para un MH, dinámico.	75
Figura 17. Factor de seguridad para MH, dinámico.....	75
Figura 18. Modelo de slide para un CL, dinámico.	76
Figura 19. Factor de seguridad para un CL, dinámico.....	76
Figura 20. Comparación de factor de seguridad vs ángulo de inclinación en condición estática para $R_u=0.0$, CH, MH y CL, para alturas de 10 m y 20 m.	78
Figura 21. Factor de seguridad vs. r_u en condición estática y dinámica para ángulo 30° y altura de 10 m en CH, MH y CL.	79
Figura 22. Sensitividad de parámetros.	80
Figura 23. Rangos de variables.....	81
Figura 24. Factor de seguridad vs cohesión, para un talud compuesto por CH, con	

altura de 10 m y ángulo de inclinación de 30°	82
Figura 25. Factor de seguridad vs cohesión, para un CH, con altura de 10 m, con $r_u=0.0$, en condición estática.	83
Figura 26. Valor de cohesión, para un CH, CL y MH, con $r_u=0.0, 0.1, 0.25, 0.4$ y 0.5 , en condición estática y dinámica, para ángulos de 30°, 45°, 60° y 75°	84
Figura 27. Factor de seguridad vs. ángulo de inclinación en condición estática para $r_u=0$ en CH, MH y CL para alturas 10 m y 20 m.....	90
Figura 28. Factor de seguridad vs. ángulo de inclinación en condición estática para $r_u=0.25$ en CH, MH y CL para alturas 10 m y 20 m.....	92
Figura 29. Factor de seguridad vs. ángulo de inclinación en condición estática para $r_u=0.50$ en CH, MH y CL para alturas 10 m y 20 m.....	94
Figura 30. Factor de seguridad vs. ángulo de inclinación en condición dinámica para $r_u=0.00$ en CH, MH y CL para alturas 10 m y 20 m.	96
Figura 31. Factor de seguridad vs. ángulo de inclinación en condición dinámica para $r_u=0.25$ en CH, MH y CL para alturas 10 m y 20 m.	98
Figura 32. Factor de seguridad vs. ángulo de inclinación en condición dinámica para $r_u=0.50$ en CH, MH y CL para alturas 10 m y 20 m.	99
Figura 33. Factor de seguridad vs. r_u en condición estática y dinámica para ángulo 30° y altura de 10 m en CH, MH y CL	101
Figura 34. Factor de seguridad vs. r_u en condición estática y dinámica para ángulo 45° y altura de 10 m en CH, MH y CL	103
Figura 35. Factor de seguridad vs. r_u en condición estática y dinámica para ángulo 60° y altura de 10 m en CH, MH y CL	104
Figura 36. Factor de seguridad vs. r_u en condición estática y dinámica para ángulo 75° y altura de 10 m en CH, MH y CL	106

GLOSARIO

Asentamientos: deformación de un suelo.

Asentamientos inmediatos: causado por la deformación elástica del suelo, la cual ocurre en estados del suelo saturado, seco o húmedo.

Asentamientos por consolidación: es el cambio de volumen en suelos cohesivos saturados debido a la expulsión del agua que ocupan los poros. Los suelos cohesivos saturados son suelos arcillosos, los cuales dependen de la permeabilidad que contenga el suelo.

Asentamientos por compresión secundaria: parte de una deformación que ya sucedió y ocurrió con un esfuerzo efectivo constante con ningún cambio de agua en los poros, siendo dependiente del tiempo, esto ocurre por el reajuste del suelo.

Colapso: disminución rápida de volumen del suelo, producida por el aumento de los siguientes factores: contenido de humedad, grado de saturación, tensión mediante actuante, tensión de corte y presión de poros.

Cohesión: es la atracción entre partículas, originada por fuerzas moleculares y películas de agua. Por lo tanto, la cohesión de un suelo variará si cambia el contenido de humedad esta propiedad se mide en kg/cm².

Criterio de falla: se da cuando en una familia de facetas de la tensión alcanza una inclinación crítica (f), con la normal a la faceta. La ruptura será cuando la tensión tangencial alcanza el valor mayor de esfuerzos cortantes.

Expansión: la alteración de las condiciones naturales de una arcilla que

produzcan cambios en el contenido de agua, esta se integra con la estructura laminar de la arcilla y si está confinado presentara una elevación en las presiones internas del material.

Factor de seguridad: es empleado para comprender cuál es el factor de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento. Fellenius (1927) presentó 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.

Fricción: es la resistencia al deslizamiento causado por la fricción existente entre las superficies de contacto de las partículas y su densidad, de tal manera que es el ángulo cuya tangente es la relación entre la fuerza que resiste el deslizamiento a lo largo de un plano y fuerza normal aplicada a este plano.

Geomecánico: implica el estudio geológico del comportamiento del suelo y las rocas.

Grietas de contracción: fisuras relativamente anchas respecto a la longitud que se abren cuando se contrae el suelo o una roca. Su formación constituye un fenómeno característico de los suelos arcillosos que al descascararse forman una red poligonal de las grietas de retracción.

Grietas en cuña: son verticales y son producidas en regiones frías que se encuentran formadas tras la congelación rápida del suelo.

Hinchamiento: separación de las láminas que componen las arcillas por la absorción de agua en el espacio inter-laminar.

Índice de plasticidad: diferencia numérica entre el Limite Líquido y el Limite Plástico. Define el campo plástico de un suelo y representa el porcentaje de humedad que deben tener las arcillas para conservarse en estado plástico.

Inestabilidad: desequilibrio, fluctuación e inconsistencia de un terreno, cuando es afectado por agentes externos.

Limite líquido: es el contenido de agua, expresado en porcentaje respecto al peso del suelo seco, que delimita la transición entre el estado líquido y plástico de un suelo remoldeado o amasado.

Límite de contracción: contenido de humedad por debajo del cual se produce una reducción adicional de volumen o contracción en el suelo.

Ladera: declive lateral de un terreno, cuya pendiente se conforma a través del ángulo que se formó con la horizontal.

Sensitividad: proporción de la resistencia a compresión simple en estado inalterado entre la del estado remoldeado.

Sensibilidad de parámetros geotécnicos: es el análisis del comportamiento de las propiedades que influyen en la estabilidad de taludes.

Suelo: parte superficial de la corteza terrestre, biológicamente activa que proviene de la desintegración o alteración física.

Suelos colapsables: son los suelos que presentan un cambio de relación entre presiones efectivas y las deformaciones sin que se alcance la resistencia última del material. A este grupo pertenecen las arcillas cementadas, los limos y rocas

de gran porosidad.

Suelo expansivo: es un tipo de suelo capaz de producir un aumento de volumen, en relación con los cambios de humedad que puedan llegar a presentarse. Dichos materiales tienen la capacidad de absorber una gran cantidad de agua y retenerla debido a su estructura.

Suelos desmoronables: suelos en los que sin la presencia o cambio de condiciones son capaces de producir colapso, donde no existe un cambio abrupto en relación presión-deformación. La saturación produce un cambio volumétrico debido al incremento de presión de poros que origina la resistencia al corte del suelo.

Talud: porción de tierra elevada, de dimensiones variables, generalmente, rematando por una cuneta y caracterizado por una vegetación específica. Dicho elemento es construido con el tiempo, pero también puede ser producto de la ejecución realizada con una construcción artificial con tierra o piedra, de tal manera que es conformada con cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal.

Terreno: porción de espacio generalmente plano de tierra, en el cual no se tiene nada construido de tal manera que se trata de un área en la que no existe un edificio o algo que cubra la superficie del mismo.

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas característicos de la ingeniería civil es la estabilidad de taludes, ya que los suelos presentan comportamientos dependiendo de la estructura que lo componen y de los factores tanto extrínsecos como intrínsecos, generando movimiento de tierras que pueden terminar siendo generadores de procesos de remoción en masa como deslizamientos debidos a fallas rotacionales o traslacionales, o caídas de rocas y detritos, generando afectaciones socio-económicas a la región. Por ello, es importante abordar temas como la estabilidad de taludes en suelos expansivos como lo son la arcilla de alta plasticidad (CH), arcilla de baja plasticidad (CL) y limo de alta plasticidad (MH), con el fin de identificar el comportamientos de dichos suelos ante variables geométricas, de nivel freático y sismo. A partir de las propiedades geomecánicas de los suelos expansivos en estudio se modelan los taludes de los diferentes perfiles estratigráficos con la correspondiente asignación de parámetros geomecánicos por medio del software Slide ®, en el que al variar las condiciones de sismo y contenido de agua se analiza la influencia que tienen en el factor de seguridad del talud.

La escasez de información en el tema del comportamiento de suelos expansivos genera la importancia necesaria para estudiar y analizar el tema a profundidad, creando herramientas dirigidas a ingenieros civiles tanto en campo como en oficina para diseños óptimos de taludes.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El territorio colombiano presenta variedad de suelos expansivos, por su complejidad en el comportamiento mecánico, se hace necesario conocer la inestabilidad que pueden presentar, principalmente este tipo de suelos¹. Es así como en varias zonas de Colombia se evidencian climas fríos-secos, lo que ocasiona una condición de sequedad que hace que algunos tramos en los taludes presenten características de suelos expansivos², que se caracterizan por tener límites mínimos y máximos de contenido de humedad entre los cuales se presenta la expansión y contracción.

De esta manera se identifica que los suelos compuestos por arcillas y limos, que son capaces de retener gran cantidad de agua debido a su estructura, este proceso induce a movimientos que generan grietas y asentamientos del terreno afectando directamente el comportamiento del suelo, problema que se acusa con los cambios estacionales debido a los ciclos de humedecimiento-secado, así como la ascensión de nivel freático³, de tal manera que esto presenta un riesgo para los usuarios de las vías que presentan esta tipología de material. Otra de las amenazas, se identifica cuando ocurre un sismo, debido a que estos suelos tienden a transmitir las ondas del sismo con rapidez y amplitud, lo que llega a generar colapso del talud⁴.

¹ MALAGÓN CASTRO, D.: Ensayo sobre tipología de suelos colombianos -Énfasis en génesis y aspectos ambientales.pg.371.

² LEÓN SICARD; Tomas Enrique,. Estado del Recurso del Suelo. [en línea] <<http://www.unperiodico.unal.edu.co/dper/article/agroquimicos-envenenan-suelos-en-colombia.html>>. [Citado en 9 de noviembre de 2013].

³ASEFA. Patologías por arcillas expansivas. Naturaleza y comportamiento. [en línea]. <http://www.concretonline.com/index.php?option=com_content&id=3179&Itemid=27>. [citado en 5 agosto del 2015].

⁴CINNA LOMNITZ, Las causas probables de la catástrofe sísmica del 19 de septiembre de 1985. Instituto de Geofísica, UNAM, Ciencia y desarrollo, septiembre/octubre 1988 Vol. XIV Núm. 82, CONACYT

Es así como en varios lugares se han reportado movimientos en masa como deslizamientos y fallas rotacionales, en los cortes realizados en laderas, debido a la inestabilidad generada por los materiales de los que se encuentran compuestos los suelos⁵.

Debido a lo anterior se requiere hacer un estudio a los suelos expansivos, los cuales se identifican mineralógicamente, con la determinación de propiedades básicas, también a través de métodos indirectos del potencial expansivo y medidas directas de la expansión; esto con el fin de observar las características geomecánicas en la ejecución de taludes según los factores básicos mínimos, descritos en la norma sismo resistente (NSR-10) Título H.2.4.1.

Es importante conocer: ¿Cuál es el comportamiento de los parámetros geomecánicos de taludes, compuestos por suelos expansivos ante variables de nivel freático, geometría y sismo?

⁵SEMANA NACIÓN, Noticia; Hay 22 cierres en vías nacionales y 47 regionales. [en línea]. <[http://www.semana.com/nacion/articulo.25 de abril del 2011](http://www.semana.com/nacion/articulo.25%20de%20abril%20del%202011)>.[citado en 5 de agosto del 2015]

2. ANTECEDENTES

Uno de los temas de mayor interés en la Ingeniería Civil es la estabilidad del suelo, debido a sus inesperados y diferentes comportamientos, para los cuales se hace necesario el estudio y análisis taludes con el fin de lograr estabilidad y factores de seguridad óptimos, cuando se encuentran compuestos por suelos expansivos.

Se han presentado diferentes casos en donde se vuelve indispensable realizar una caracterización geomecánica de taludes para el análisis de la vulnerabilidad que tiene un sitio referente a un talud, en donde se cuenta con aspectos que definen la amenaza, asociada valores encontrados para la vulnerabilidad física⁶, metodología para la cual se determina el riesgo asociado a dicha vulnerabilidad. En torno a este tema en particular, la mayoría de las investigaciones trabajan de forma aislada la amenaza, la vulnerabilidad, y no evalúan en forma precisa el riesgo por la acción de procesos de remoción en masa, que desestabilizan los taludes; con base en el esquema de la caracterización geomecánica de taludes es posible desarrollar una metodología que evalúe el riesgo asociado a inundaciones, sismos, vientos o realizar una metodología integral que involucre todas esas variables⁷.

En Colombia se presentan casos diversos de falla en vías, un ejemplo es la falla que ocurrió en la vía Manizales – Mariquita Tramo 5006. Debido a la inadecuada entrega de la alcantarilla presente en ese sitio, esto produjo socavación en el talud inferior de la vía quitándole el soporte al muro ocasionando su volcamiento. Ello

⁶ HERNANDEZ; Yelena, Caracterización y análisis de la amenaza y vulnerabilidad Física por taludes y laderas inestables en la micro Cuenca de la quebrada Cay, Ibagué, Universidad del Tolima. Departamento del Tolima. Maestría en planificación y manejo ambiental de cuencas, 2013, pg. 119.

⁷ *ibíd.*, p. 119.

acelero la rotura de un acueducto veredal que satura el relleno, causando paso restringido de vehículos a un solo carril⁸. El objetivo de este estudio fue identificar las diferentes formas de estabilización y plantear la solución definitiva correspondiente a un sistema de estructura que consta de pilotes metálicos generando estabilización del talud.

La Universidad Nacional incluye en un estudio realizado como parte de la caracterización física, algunas técnicas para el análisis de la composición mineralógica, tamaño de partículas, peso específico de sólidos y propiedades índice en las arcillas de Barranquilla. En donde se tomó como base el cambio volumétrico descrito en la mayoría de investigaciones y como aporte al conocimiento del comportamiento expansivo de las arcillas del distrito de Barranquilla (Colombia), con desarrollo de un programa experimental orientado a caracterizar sus propiedades físicas, micro-estructurales y de comportamiento geotécnico, en muestras naturales inalteradas. La caracterización física incluye composición mineralógica, tamaño de partículas, peso específico de sólidos y propiedades índice; la microestructura de muestras naturales se analiza cualitativamente usando técnicas microscópicas (óptica y electrónica de barrido) y deducciones indirectas a partir de curvas de retención de agua (CRA); por último, el comportamiento geomecánico se enfoca en el estudio del cambio volumétrico en condiciones de humedecimiento - saturación y procesos de carga – descarga⁹. Allí se concluyó que el potencial de expansión / colapso bajo carga no depende exclusivamente de la carga vertical aplicada antes de la saturación, sino de las condiciones de fábrica y succión inicial del material esto difiere en lo que se encuentra en estudios realizados en la zona¹⁰

⁸ RODRIGUEZ CASTIBLANCO; Edgar, Evaluación del Comportamiento Geomecánico de Arcillas en el Sector de Campoalegre – Ciudad de Barranquilla, Maestría en Ingeniería – Geotecnia, 2014, pg. 60.

⁹ RODRIGUEZ CASTIBLANCO; Edgar, Op.cit. 83

¹⁰ RODRIGUEZ CASTIBLANCO; Edgar, Op.cit. 83

Se han desarrollado variedad de estudios sobre el comportamiento de suelos expansivos como ejemplo el libro *Expansive Soils*, editado por Amer Ali Al-Rawas &Mattheus F.A. Goosen, en el cual se describen avances en la caracterización y tratamiento de suelos expansivos; la importancia del tema radica en el problema que presentan estos suelos al estar sometidos a diferentes condiciones que obligan al ingeniero civil a identificar inconvenientes causados por la presencia de los mismos, en un proyecto de construcción, debido a su inestabilidad dada por la expansión que sufren ante la presencia de agua y la contracción que presentan debido a momentos de sequía o cambios en el nivel freático. Se analizó el efecto de las técnicas de remoldeo en el hinchamiento de suelos y las propiedades de las fuerzas de cizallamiento, que se presentan en los resultados de los efectos de métodos sobre la presión por oleaje en el suelo, resistencia a la compresión inconfiada. Para lo cual se tomaron tres tipos de suelos CH, CL y ML con muestras inalteradas, que fueron seleccionadas en la zona norte de Jordania, con una amplia gama de contenido de arcilla.

Las propiedades físicas de estos suelos, incluyendo la gradación, el límite plástico y el límite líquido, la gravedad específica, el peso específico seco máximo, y el contenido óptimo de agua se obtienen a través de las especificaciones con las que cuentan las normas ASTM. Las muestras de suelos perturbados y no perturbados se obtuvieron de los lugares descritos en el párrafo anterior y fueron probadas en el laboratorio de mecánica de suelos en Jordan, Universidad de Ciencia y Tecnología. Los especímenes remoldeados estaban preparados para la compresión inconfiada y los ensayos de hinchazón utilizando tres técnicas de remoldeo: dinámicas, estáticas y amasado. Esto con el fin de lograr un estudio en el potencial de hinchamiento de ese tipo de suelos ante los diferentes ensayos. La evaluación de la presión debida a la hinchazón, la inflamación potencial y la resistencia a la compresión inconfiada se vio afectada por el método de remodelación.

Por lo tanto de este ensayo se concluyó que las muestras inalteradas obtienen valores altos de presión de hinchamiento, la remodelación dinámica tuvo los valores más altos de la hinchazón y la compresión inconfiada, seguido por la fuerza estática y el remoldeo por amasado respectivamente de esta manera se observa, que el contenido inicial de agua afecta tanto a la presión de la hinchazón como a la resistencia a la compresión inconfiada.

De esta manera se encuentra el desarrollo, de otro estudio ejecutado en el libro de Expansive Soils, en donde se describe una serie completa de pruebas, referidas a la compresión no confinada (UC) no consolidado no drenado (UU) triaxiales y columna resonante (RC), se realizaron sobre muestras estabilizadas químicamente de sulfato de rica arcilla expansiva, del sureste de Arlington, Texas, después de haber sido sometido a ciclos (WD) repetidos de humectación-secado inducido artificialmente en el laboratorio, los cuales arrojaron unos resultados que se utilizaron para evaluar la influencia de wd cíclico en resistencia a largo plazo, la rigidez, el efecto de hincharse y su continua contracción brindó respuesta del suelo tratado, incluyendo resistencia a la compresión no confinada, sin olvidar resistencia al corte, módulo de corte dinámico y material de amortiguación. Se utilizó métodos de estabilización que incluyen sulfato resistente cemento Tipo V, baja en calcio clase F mosca ceniza, cal viva mezclándolas con fibras de polipropileno. Muestras de suelo que se trataron y fueron curadas durante 7 días y después se sometieron a 0, 1, 2, 4, 8, 16, y 32 ciclos wd antes de la UC, UU, y RC la prueba. Un ciclo wd consistió en 12 horas de inmersión en un baño de agua potable en la sala de temperatura seguido de 12 horas de secado en el horno a 140 F. Encargó cámaras wd que permiten el monitoreo de 1-D al hincharse y encogerse siendo esta la respuesta durante wd repetido. Una dosis -por peso del 10% de cemento Tipo V, el cual brinda mejor rendimiento general bajo, realizado con el ensayo de la resistencia al corte sin drenaje. En donde se halló, que Las cenizas presentan malos resultados en comparación a todos los estabilizadores,

con una simultánea disminución de la c y bajo continuo $w - d$. Aunque los valores de fibras de cal suelo tratado tienden a aumentar con w_d repetido. Sin embargo, todos los suelos tratados superaron suelo natural después de 32 ciclos w_d , con el tipo del 10% , V, suelo con cemento tratado mostrando un mejor rendimiento c -.

De tal manera que la presencia de agua en este tipo de suelos, los hace menos resistencia a el ensayo de compresión, a fuerzas cortantes o de cizallamiento, debido a que alteran su estructura interna generando comportamientos inadecuados para el cuerpo ingenieril, debido a que se verán afectadas las construcciones realizadas sobre los mismos, de esta manera será necesario hacer un tratamiento de estabilización, para proveer características mecánicas apropiadas de los suelos expansivos.¹¹

¹¹ Amer Ali Al-Rawas &Mattheus F.A. Goosen. Expansive Soils: Efectos en las técnicas de remoldeo en suelos expansivos, y propiedades de fuerza de cizallamiento.2006.Pág. 132. 624.1'5136-dc22. ISBN10 0-415-39681-6.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento de parámetros geomecánicos en taludes compuestos por suelos expansivos ante variables de nivel freático, geometría y sismo.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

3.2.1 Identificar parámetros geotécnicos para diferentes tipos de suelos expansivos.

3.2.2 Definir las condiciones de nivel freático y sismo de los taludes compuestos por estos suelos.

3.2.3 Evaluar el factor de seguridad para diferentes condiciones geomecánicas presentes en los taludes definidos.

3.2.4 Comparar las variaciones encontradas para las propiedades geomecánicas en los distintos suelos.

4. JUSTIFICACIÓN

Los suelos expansivos presentan algunas propiedades que pueden llegar a generar variaciones en el comportamiento del suelo, como los cambios volumétricos en presencia o ausencia de agua produciendo expansión y contracción respectivamente, pérdida de capacidad portante y resistencia al corte cuando se incrementa el contenido de agua.

Al realizar cortes en laderas se presenta un cambio en la condición de resistencia inicial del material, lo que genera inestabilidad y un inminente riesgo, el comportamiento del suelo se analiza a través de la sensibilización de parámetros que conduce a la mejora del factor de seguridad con respecto al diseño, debido a esto se llevó a cabo una comparación de parámetros geomecánicos en taludes los cuales brindaron soluciones óptimas para el diseño de los mismos en suelos expansivos.

Es importante realizar el estudio de suelos expansivos y su comportamiento en taludes, ya que este tipo de suelos generan desplazamientos de materiales. Debido a que los suelos se hidratan y se hinchan, estas condiciones se presentan naturalmente tanto en épocas de lluvia y en épocas de sequía.

Los riesgos que presenta en un proceso de estos son:

- Asentamientos en muros y cimientos.
- Deformación en los pavimentos y aceras.
- Movimientos de laderas.
- Roturas de cañerías y drenajes.
- Aparición de cavidades por disolución de sales.

La finalidad de este trabajo es analizar el comportamiento de parámetros geomecánicos en taludes ante variables de afectación para lo cual se realizan ábacos que permitan identificar la manera en la que se ven afectados dichos taludes y así predecir su comportamiento, por medio de programas de modelación para el diseño de taludes, con el fin de encontrar el factor de seguridad de diseño y obtener las condiciones necesarias para la construcción del mismo pensando en el beneficio de la población.

5. MARCO REFERENCIAL

El trabajo está basado en la presentación de análisis sobre el comportamiento de suelos expansivos en taludes; con el fin de observar la inestabilidad del terreno, el cual se manifiesta mediante desplazamientos implicando ruina total o parcial de sitios aledaños, en donde se presenta este tipo de procesos de remoción en masa. Este análisis conduce a un estudio referente a propiedades de los suelos que son importantes, las cuales generan cambios volumétricos en presencia o ausencia de agua produciendo expansión y contracción respectivamente, pérdida de capacidad portante y resistencia al corte cuando se incrementa el contenido de agua.

Es necesario tener presente conceptos como la composición y comportamiento mecánico de suelos expansivos, que componen taludes, así mismo, la afectación que pueden generar estos suelos cuando son intervenidos por sismo y lluvia.

Para el desarrollo de lo anterior se llevará a cabo la presentación de los conceptos tales como: arcillas expansivas, deslizamientos, procesos de remoción en masa, sensibilidad de parámetros y análisis determinístico.

5.1. MARCO CONCEPTUAL

En el marco conceptual se establecen conceptos relacionados con la investigación sobre la presencia de suelos expansivos como arcillas de baja, alta plasticidad y limos de alta plasticidad, en taludes; debido a que esta clase de suelos tienen características de respuestas y comportamientos de expansión y contracción, asociadas al humedecimiento y secado. Por lo tanto la descripción de estos comportamientos requiere el uso de un marco conceptual que incorpore aspectos de análisis determinísticos y métodos de análisis, con respecto al comportamiento geomecánico.

5.1.1 Suelos Expansivos

Material susceptible que genera cambios de volumen, los cuales se encuentran directamente relacionados con cambios de humedad o variación con respecto al contenido de agua. La estructura del material retiene grandes cantidades de agua lo que puede producir un aumento de volumen notorio¹².

El contenido de humedades un factor importante cuando se habla de la expansión de un suelo, esto se presenta solo en los suelos expansivos, como se observa en la figura 1. Arcillas expansivas de Gramalote-Santander; cuando existen variaciones climáticas, que influyen directamente en el comportamiento, generando grietas en el suelo¹³.

Figura 1. Arcillas expansivas de Gramalote-Santander



Fuente: <http://goo.gl/aVWI0V>

¹²INGS.PATRONE J. & PREFUMO J.E. La acción de los suelos expansivos sobre las cimentaciones, métodos de prevención y control. Pág. 1-16.[en línea]<http://www.um.edu.uy/_upload/_descarga/web_descarga_204_Accindesuelosexpansivos.Año_2004>[citado en 5 de agosto del 2015]

¹³ Ibid.,p.12

5.1.1.1 Identificación de suelos expansivos

Los suelos expansivos se identifican de manera visual por varias características, tienen alta plasticidad si se observan en el terreno se encontrarán grietas ocasionadas por la expansión y contracción constante que sufre dicha superficie, esto se presenta cuando hay variación de humedad¹⁴.

La identificación mineralógica es una de las principales formas por las cuales se ubican los suelos expansivos, debido a que los métodos más recomendados son: difracción de rayos x, análisis térmico diferencial, análisis químico, absorción de tinte y la microscópica electrónica. Las cuales consisten en detectar la presencia de minerales arcillosos, que resultan expansivos¹⁵.

5.1.1.2 Ensayos de identificación de suelos expansivos

Es necesario ejecutar una valoración frente al comportamiento que puede llegar a presentar un suelo con presencia de arcillas y limos, cuando es sometido a diferentes situaciones donde se ve alterada su composición, de tal manera que los diferentes ensayos permiten hacer un acercamiento de lo que sucede en la realidad y especialmente en casos donde el suelo presenta humedad. La tipología y descripción de este tipo de ensayos se presenta en la tabla 1. Ensayos y laboratorios, en suelos, descrita a continuación:

¹⁴INGS.PATRONE J.& PREFUMO J.E., Op.cit.1-16

¹⁵Ibid., p.1-16.

Tabla 1. Ensayos y laboratorios, en suelos.

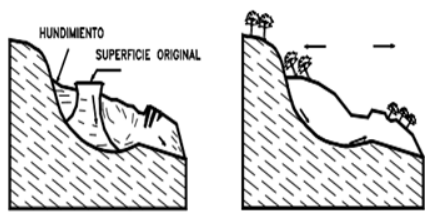
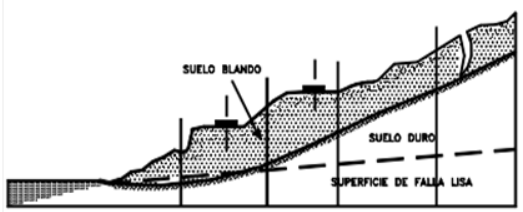
ENSAYOS Y LABORATORIOS	DESCRIPCIÓN
Hinchamiento Libre	Se humecta el suelo permitiendo una expansión vertical de una probeta, por lo que el confinamiento lateral impide la deformación lateral, se realiza sobre muestras inalteradas, saturadas.
Determinación de la presión máxima del hinchamiento	Impide la expansión vertical, al aplicar tensión vertical necesaria que compensa dicho hinchamiento; se realiza sobre muestras inalteradas Y saturadas.
Ensayo de Lambe	Consiste en la preparación de una probeta de suelo, que se compacta en condiciones estandarizadas de humedad inicial, de tal manera que se impide una expansión lateral, confinándola en un anillo. Una vez producida la inundación de la célula se determina la tensión máxima de tensión mediante un anillo dinamométrico con el bastidor quienes se encargan de ejercer la reacción ante la fuerza de expansión que manifiesta la muestra al hinchar. El valor de esta tensión máxima de hinchamiento permite una clasificación cualitativa del material en función de ciertos grados de expansividad.
Ensayo de volumen de sedimentación	Este criterio fue dado por Holtz y Gibbs, el cual se utilizaba para averiguar el potencial de hinchamiento de un suelo, consiste en depositar 10 cm ³ , de suelo seco que pase por el tamiz N°40, en un cilindro graduado con 100 cm ³ de agua y se observa el aumento del volumen de la muestra una vez sedimentada, debido al hinchamiento, dio resultado se expresa en porcentaje de aumento de volumen respecto al volumen inicial del suelo.
Límite Líquido	Es el contenido de humedad para el cual el suelo pasa de un estado líquido a plástico, el ensayo que permite determinar el límite líquido consiste en colocar diferentes muestras de suelo, con humedad variable, en un recipiente o taza metálica accionada por medio de una manivela, que se encarga de levantarla y dejarla caer,

<p style="text-align: center;">Límite líquido</p>	<p>repetidas veces. Antes de iniciar el ensayo se realiza una ranura de diferentes dimensiones, con una espátula contando el número de golpes con el fin de que la ranura quede ½ pulgada cerrada. Dichos datos se grafican y cuando la curva obtenida corta la línea correspondiente a los 25 golpes se considera este valor como el límite líquido del suelo.</p>
<p style="text-align: center;">Límite Plástico</p>	<p>Es el contenido de humedad para el cual se cambia del estado plástico al semisólido, de tal manera que en el estado plástico el suelo es semi moldeable mientras que en el semisólido se agrieta amoldándose. El límite plástico queda definido cuando el suelo contiene justo la humedad necesaria para que al amasar manualmente bastoncitos de 0,3 cm estos no se agrieten y se rompan.</p>
<p style="text-align: center;">Límite de Retracción</p>	<p>Este límite queda determinado por la mínima cantidad de agua necesaria para llenar los poros de una muestra de suelo seco, a este límite corresponde el menor volumen de la masa del suelo, determinado por la frontera entre el estado sólido y semisólido. En las arcillas este límite alcanza el 5% y el 10 %, lo que indica que la capacidad portante se incrementa a medida que disminuye el porcentaje de humedad.</p>
<p style="text-align: center;">Ensayo de Triaxial</p>	<p>A través de esta prueba se identifican las propiedades de tensión- deformación del suelo, en este ensayo una muestra de suelo cilíndrica, normalmente con una relación de altura-diámetro, se somete a dos incrementos, de tensión axial y radial, dicha muestra se encuentra protegida con una membrana y las tensiones radiales son impuestas por una presión de confinamiento en todas sus caras. Los esfuerzos axiales son impuestos por un vástago que penetra la cámara de confinamiento hasta que se produce la rotura.</p>

Fuente: compilación propia tomado de Ensayos sobre suelos expansivos;[en línea].<<http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/ensayos-laboratorio-suelos-expansivos>>. [citado en 5 de agosto del 2015].

De esta manera se hace necesario identificar los tipos de deslizamientos que se presentan en taludes, los cuales generan un proceso de remoción en masa afectando de manera directa la población a niveles sociales, económicos entre otros, identificados en la tabla 2. Tipos de remoción en masa.

Tabla 2. Tipos de remoción en masa.

DESLIZAMIENTOS	
<p>Movimientos que consisten en un desplazamiento de corte a lo largo de una superficie, los cuales pueden detectarse con facilidad dentro de una zona delgada, este movimiento puede ser progresivo lo que indica que no sería simultáneamente a lo largo de donde se estará presentando la falla.</p>	
DESLIZAMIENTO ROTACIONAL	DESLIZAMIENTO TRASLACIONAL
<p>Se presenta cuando la superficie de falla es formada por una curva cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo en movimiento, posee agrietamientos concéntricos y concavos en la dirección del movimiento.</p>	<p>El movimiento de tierra se desplaza hacia afuera o hacia abajo a lo largo de una superficie plana o ligeramente ondulada y tiene muy poca de rotación y volteo, son controlados por superficies débiles como fallas, juntas, fracturas, planos de estratificación y zonas de cambio de estado de meteorización. Cuando la masa se deforma se convierte en flujo; los deslizamientos sobre ondulaciones sencillas en roca se les conoce como deslizamientos en bloque, cuando ocurren a lo largo de dos discontinuidades se llaman en cuña y se presentan sobre varios niveles de una familia de discontinuidades se les denomina falla en escalera.</p>
 <p>a) MOVIMIENTO DE LAS MASAS DE TIERRA b) ORIENTACION DE LOS ARBOLES</p>	 <p>SUELO BLANDO SUELO DURO SUPERFICIE DE FALLA LISA</p>

Fuente: Compilación propia del libro de Suarez Jaime Díaz, Deslizamientos y estabilidad de taludes.

Según la composición y estructura del talud, se produce un tipo deslizamiento esto puede observarse en la tabla 3. Efectos de la estructura en la formación de deslizamientos de rotación, donde se describe el efecto del deslizamiento, causado según la estructura del talud.

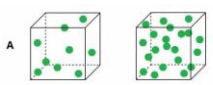
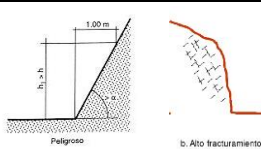
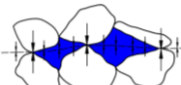
Tabla 3. Efectos de la estructura en la formación de deslizamientos de rotación.

DESLIZAMIENTOS ROTACIONALES	
TIPO	IMAGEN
MATERIAL HOMOGENEO	<p>a) MATERIAL HOMOGENEO</p>
MATERIALES ESTRATIFICADOS INCLINADOS	<p>b) MATERIALES ESTRATIFICADOS INCLINADOS</p>
ESTRATO DURO HORIZONTAL DEBAJO DEL MATERIAL BLANDO	<p>c) ESTRATO DURO HORIZONTAL DEBAJO DEL MATERIAL BLANDO</p>
ESTRATO BLANDO DEBAJO DE UN ESTRATO DURO	<p>d) ESTRATO BLANDO DEBAJO DE UN ESTRATO DURO</p>
RELLENO SOBRE SUELO BLANDO	<p>e) RELLENO SOBRE SUELO BLANDO</p>
RELLENO SOBRE SUELO DURO	<p>f) RELLENO SOBRE SUELO DURO</p>
RELLENO EN TERRAPLEN SOBRE SUELO MUY BLANDO	<p>g) RELLENO EN TERRAPLEN SOBRE SUELO MUY BLANDO</p>
RELLENO EN TALUD SOBRE MATERIAL DURO	<p>h) RELLENO EN TALUD SOBRE MATERIAL DURO</p>

Fuente: Compilación propia tomada de Suarez Jaime Díaz, Capítulo 1. Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales.

Por lo tanto Los parámetros geomecánicos, son elementos necesarios que ayudan a la comprensión del análisis con respecto al comportamiento del suelo, en el presente trabajo se hace el estudio de los parámetros descritos en la tabla 4. Parámetros geomecánicos.

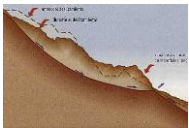


Tabla 4. Parámetros geomecánicos

PARÁMETROS GEOMECÁNICOS			
PARÁMETRO	CONCEPTO	ECUACIONES	DESCRIPCIÓN
DENSIDAD	Relación entre la unidad de peso y la unidad de volúmen de la fase sólida del suelo, siendo más o menos constante, ya que está determinado por la composición química y mineralógica de la fase sólida.	$\rho = m/V$ <small>ρ= densidad m= masa V= volumen</small>	
PESO ESPÉCIFICO	Se definen peso específico relativo a la relación entre el peso específico de una sustancia y el peso específico del agua destilada a 4 grados centígrados sujeta a una atmósfera de presión.	$P_c = p/V$ <small>P_c= Peso específico. P=Peso V= volumen</small>	
CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES	Se refiere a la orientación de las discontinuidades, tamaño y forma de rocas, espaciado, grado de fracturación del macizo rocoso, ángulo de inclinación.	No aplica	
EFFECTO DEL AGUA	La estabilidad del talud y resistencia al cizallamiento.	Terzaghi: $\sigma = \sigma' + u$ $\sigma' = \sigma - u$ $\sigma'_v = \sigma_v - u$ $\tau = c' + \sigma'_v \tan \phi'$	

Fuente: Compilación propia tomada de Suarez Jaime Díaz, Capitulo 1. Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales.

Conociendo los parámetros geomecánicos que componen cada uno de los suelos, se identifica el concepto de remoción en masa, el cual es el desplazamiento de grandes volúmenes de material superficial, descrito de manera detallada en la tabla 5. Procesos de remoción en masa.

Tabla 5. Procesos de remoción en masa.

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA					
CONCEPTO					
Es el desplazamiento de grandes volúmenes de material superficial ladera abajo (a favor de la pendiente) por acción directa de la fuerza de gravedad, hasta volver a encontrar un nuevo punto de reposo. Los movimientos de masa se presentan, sobre todo, en la época lluviosa o durante una actividad sísmica.					
ORIGEN					
Se produce porque la fuerza actuante (sobrecarga) que es originada normalmente por el agua, ejerce una presión hacia abajo que rompe el equilibrio existente hasta ese momento; la gravedad proporciona la energía adicional requerida para que se produzca el movimiento descendente. En lugares secos donde llueve muy poco o no llueve, se origina fundamentalmente por los movimientos sísmicos.					
FACTORES					
LITOLÓGICOS	ESTRUCTURALES	TOPOGRÁFICOS	ANTRÓPICOS	TECTÓNICOS	CLIMÁTICOS
El material superficial se encuentra suelto y puede ser removido con facilidad en una ladera por efecto de la presión de una cantidad de agua, necesariamente si bajo este material superficial existe roca consolidada e impermeable.	En el relieve se presentan grietas o diaclasas juntas, que por efecto de la meteorización física, química o biológica provocan el desmenuzamiento o descomposición de las rocas.	Existen laderas de montañas, de colinas con pendiente abruptas o de terrenos muy inclinados	En áreas con pendientes fuertemente taladas (deforestadas) por el hombre, el material superficial queda expuesto a la intemperie.	Las ondas sísmicas provocan el desplazamiento de materiales superficiales o de unidades más importantes del relieve como puede ser un área accidentada o no.	Caen fuertes precipitaciones o caen de manera continua, provocan deslizamientos sea por aumento de sobrecarga o por cambios extremos en las temperaturas las cuales quiebran los mantos rocosos.
MOVIMIENTOS COMUNES					
DESLIZAMIENTOS		REPTACIÓN		DERRUMBAMIENTO	
Formación de una superficie de ruptura recta o curvada a partir de la cual se desplaza toda la porción de terreno separada del conjunto, con la misma velocidad en todas sus partes, conservando su estructura y forma original.		Movimiento lento del suelo y/o de detritos rocosos cuesta abajo, por lo general no perceptible, que afecta la parte superficial de la ladera, la capa de suelo y en algunos casos la parte superior de la roca alterada. Causas: Lluvias o de fusión de nieves que saturan los suelos en ambientes húmedos y sobre laderas con pendientes moderadas.		Incluye movimientos y caída directa de material rocoso de variable dimensiones. Son causados por: La fuerza gravitacional de la tierra, Grado e inestabilidad de fracturas de la roca, Efecto de meteorización, Efectos de congelamiento del agua en las fracturas.	
					

Fuente: Ajustado de [http://julsgeoambiental.jimdo.com/portafolio/remoción en masa](http://julsgeoambiental.jimdo.com/portafolio/remoción%20en%20masa).

Es así como el subsuelo, o sustrato, es la capa de suelo debajo de la capa superficial de la tierra. El cual incluye sustancias como arcilla y/o arena, que sólo han sido parcialmente desglosadas por aire, luz solar, agua, viento, etc, para producir suelo verdadero. Debajo del subsuelo está el sustrato, que puede ser rocoso, de sedimentos o depósitos eólicos, en gran medida afectados por factores formadores de suelo activo en el subsuelo. El subsuelo contiene

partículas parcialmente degradadas, por lo general, de un tono más claro de color marrón o amarillo y contiene las raíces profundas de las plantas grandes, como los árboles.

Existen diferentes métodos de exploración para tomar muestras alteradas e inalteradas.

- Una muestra alterada es aquella que está constituida por material disgregado o fragmentado en las que no se toman precauciones especiales para conservar las características de estructura y humedad in situ; no obstante, en algunas ocasiones conviene conocer el contenido de agua original del suelo, para lo cual las muestras se envasan en recipientes impermeables y se transportan de forma que estén protegidas de los agentes atmosféricos. Se utilizan en el laboratorio para identificar el tipo de suelo a que corresponden, realizar pruebas índice y preparar especímenes compactados para someterlos a pruebas mecánicas (SAHOP, 1974).
- Una muestra inalterada es aquella en la que se conserva la estructura, no sufre de alteraciones químicas, ni de humedad, es decir, conserva las propiedades que tenía in situ. Estas muestras se utilizan en el laboratorio para identificar el tipo de suelo a que corresponden, realizar pruebas índice y mecánicas.¹⁶

Las muestras inalteradas se obtendrán de suelos finos que pueden labrarse sin que se disgreguen. La obtención puede efectuarse en el piso o en las paredes de una excavación como en un pozo a cielo abierto, en la superficie del terreno natural o en la de una terracería. La excavación para obtener una muestra deberá

¹⁶ Exploración y muestreo de suelos [en línea]. < <http://expsuelos.blogspot.com> > [citado en 23 de Junio de 2015]

ser de dimensiones tales que permitan las operaciones de labrado y extracción de la misma. Las muestras inalteradas deben conservar las condiciones de un suelo en su estado natural, por lo que su obtención, empaque y transporte requieren cuidados especiales a fin de no alterarlas. Las muestras deben ser identificadas claramente. Las superficies que estén expuestas deben ser protegidas con material impermeabilizante y ser transportadas en cajas con empaques que amortigüen las vibraciones que pudiera sufrir.¹⁷

5.1.1.3 Problemas de los suelos expansivos en taludes y laderas ante solicitaciones

Los terrenos con pendiente pronunciadas son aquellos que tienen susceptibilidad ante fenómenos como lo son: los deslizamientos, amplificación sísmica, entre otros¹⁸.

Un sismo en materiales expansivos, brindará una respuesta dinámica generada por los suelos, esto dependerá de las condiciones del esfuerzo de confinamiento y del nivel de deformación que presenten los materiales, de esta manera el suelo no disipa energía por poco amortiguamiento y la degradación a través de los ciclos será pequeña, lo cual indica una respuesta elástica lineal. Es así como a grandes deformaciones el suelo disipa mayor energía por alto amortiguamiento y la presión de poro iguala el esfuerzo efectivo, de confinamiento produciéndose un deterioro del suelo y por consiguiente la pérdida de resistencia, por lo tanto la respuesta es no lineal, donde la rigidez decrece con el número de ciclos¹⁹.

¹⁷ Exploración y muestreo de suelos [en línea]. < <http://expsuelos.blogspot.com> > [citado en 23 de Junio de 2015]

¹⁸ Criterio para calificar los suelos con fines urbanos [en línea]. < <http://es.slideshare.net/carlosjcamacho/presentacion-de-la-materia-3742687> > [citado en 3 de octubre del 2009]

¹⁹ Comportamiento Dinámico de las Arcillas [en línea] <<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/601/4/A4.pdf>>.[citado en 2 de enero del 2009]

Otro de las solicitaciones que modifican el estado de un talud se refiere a la cantidad de agua que se infiltre por el suelo, debido a que los periodos climáticos del año se modifican, y dependiendo de la cantidad de precipitación aumentará o disminuirá el nivel freático, es así como los suelos expansivos, sufrirán aumento o disminución de volumen, según la cantidad de agua sea mayor o menor, lo que causara el hinchamiento en épocas de lluvia y retracciones en época seca; generando grietas y posterior rotura del suelo.

Por consiguiente la gravedad podrá causar deslizamientos con este tipo de suelos. De esta manera se presentaran perdida de asentamientos en muros y cimientos, deformación en pavimentos en las aceras, movimientos de laderas y aparición de cavidades por disolución de sales.

En el caso de las cargas soportadas por suelos expansivos, como lo son pequeñas zapatas soportando cargas livianas, son fácilmente levantadas; mientras que cuando las zapatas son de gran tamaño y soportan cargas pesadas no ocurre este proceso.²⁰

5.1.1.4 Métodos de exploración de suelos.

Dentro de los métodos de exploración de suelos existen dos clasificaciones: métodos directos y métodos indirectos. En la tabla 6. Métodos de exploración de suelos, se muestra una clasificación general de los métodos de exploración más usuales y una breve descripción.²¹

²⁰Villalaz Carlos Crespo. Mecánica de suelos y cimentaciones. 5ta edición. Mexico, Limusa, 2004. ISBN 968-18-6489-1

²¹ Tesis Métodos de exploración de suelos. [En línea] <<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/3273/Capitulo1.pdf>> [citado en 23 de Junio de 2015]

Tabla 6 . Métodos de exploración de suelos.

Método	Descripción	
Métodos directos	Pozos a cielo abierto.	Es el método más satisfactorio para conocer las condiciones del subsuelo. Consiste en excavar un pozo de dimensiones suficientes para poder introducirse en él, examinar los diferentes estratos del suelo en su estado natural y extraer muestras alteradas e inalteradas. Su aplicación eficiente resulta sobre suelos cohesivos.
	Pala posteadora.	Es un método manual de exploración somera que consiste en hincar un barreno y obtener muestras del tipo alterado, pero representativas en cuanto al contenido de agua. Se utiliza en lugares donde otros equipos mecánicos no pueden ser usados.
	Tubo Shelby.	Consiste en un tubo afilado de 7.5 a 10 cm de diámetro que se hincan a presión para obtener muestras relativamente inalteradas de suelos finos blandos o semiduros.
	Sondeo de penetración estándar.	Con esta técnica se rescatan muestras alteradas de los suelos y se mide la resistencia al corte con el número de golpes con el que se hincan el penetrómetro una distancia de 30 cm. El equipo consta de un penetrómetro el cual se hincan a golpes mediante un martinete de 63.5 kg que cae desde 76 cm de alto.
	Muestreador Denison.	Consiste en dos tubos concéntricos que se hincan en el suelo para obtener muestras alteradas o inalteradas con ayuda de la inyección de fluido de perforación que se hace circular entre ambos tubos.
Métodos indirectos	Método sísmico.	Consiste en provocar una explosión en un punto determinado del área a explorar usando una pequeña carga de explosivo, usualmente nitro amonio. Por la zona a explorar se sitúan geófonos cada 15 ó 30 cm. Este procedimiento se funda en la velocidad de propagación de las ondas vibratorias de tipo sísmico a través de diferentes medios materiales.
	Método de resistividad eléctrica.	Consiste en inducir una corriente eléctrica a través de los suelos, de tal forma que se presente una mayor o menor resistividad eléctrica para determinar la presencia de estratos de roca en el subsuelo. Mayores resistividades corresponden a rocas duras, siguiendo con rocas suaves y así sucesivamente hasta valores menores correspondientes a suelos suaves saturados.
	Métodos magnéticos y gravimétricos.	Para el primero se utiliza un magnetómetro, que mide la componente vertical del campo magnético terrestre en la zona considerada en varias estaciones próximas entre sí. En los métodos gravimétricos se mide a aceleración del campo gravitacional en diversos puntos de la zona a explorar. La información que proveen estos métodos es algo errática y difícil de interpretar.

Fuente: Ajustado de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/3273/Capitulo1.pdf>

5.1.2 Métodos de análisis en taludes

Se describen los diferentes métodos de análisis en taludes, con la finalidad de observar la diferencia entre los mismos e identificar cuál de ellos cumple con la desarrollo del trabajo, en el análisis del valor de factor de seguridad, resumidos en la gráfica 2. Métodos de cálculo.

5.1.2.1 Métodos de equilibrio límite

Se basan en leyes de la estática determinando el estado de equilibrio de un terreno inestable. No tienen en cuenta las deformaciones del terreno. Suponen que la resistencia al corte se moviliza total y concordantemente a lo largo de la superficie de corte. Se pueden clasificar en dos grupos:

- Métodos exactos.
- Métodos no exactos.

5.1.2.2 Métodos exactos

El uso de las leyes de la estática da una solución exacta al problema. Esto sólo es posible en taludes de geometría sencilla, como por ejemplo la rotura planar y la rotura por cuñas.

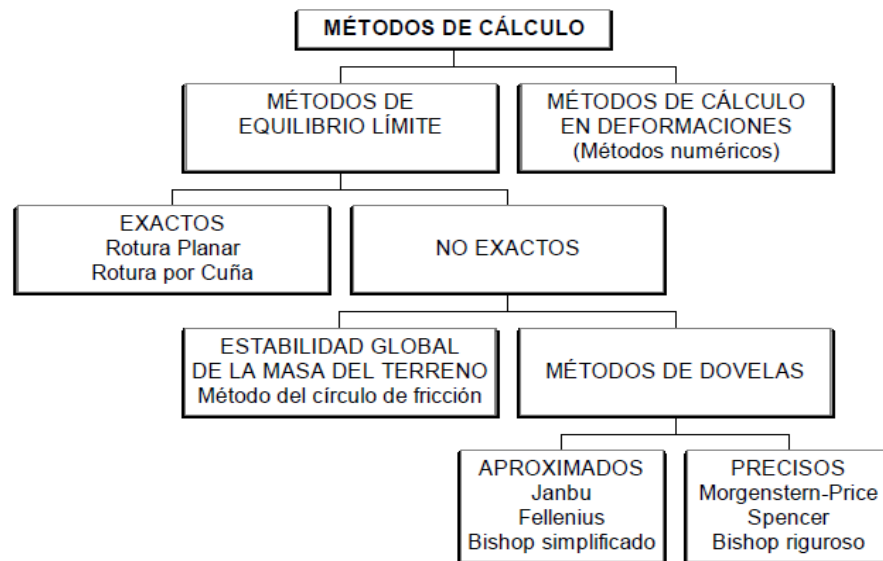
5.1.2.3 Métodos no exactos

En la mayoría de los casos la geometría de la superficie de rotura no permite obtener una solución exacta del problema solamente mediante la aplicación de las leyes de la estática. El problema es hiperestático y ha de hacerse alguna hipótesis previa que permita su resolución. Se pueden tomar los métodos que consideran el equilibrio global de masa deslizante, hoy en desuso, y los métodos de las dovelas o rebanadas, que consideran a la masa deslizante dividida en una serie de fajas verticales.

Los métodos de las dovelas o rebanas pueden clasificarse en:

- Métodos aproximados: que no cumplen todas las ecuaciones de la estática. Se pueden nombrar los métodos de Fellenius, Janbu y Bishop simplificado.
- Métodos completos: que cumplen todas las ecuaciones de la estática. Los conocidos son los métodos de Morgenstern-Price, Spencer y Bishop riguroso.

Figura 2. Métodos de cálculo



Fuente: Propia

A través de los métodos de cálculo se desarrollan los métodos de análisis para estabilidad de taludes, estos son de gran importancia para el desarrollo a nivel numérico, con el fin de identificar que sucede en un talud al cambiar y modificar ciertos parámetros geomecánicos, mostrados dichos métodos en la tabla 7. Métodos de análisis para estabilidad de taludes.

Tabla 7. Métodos de análisis para estabilidad de taludes.

<p>Método de tablas o número de estabilidad</p>	<p>Para los taludes simples homogéneos, se han desarrollado tablas que permiten un cálculo rápido del factor de seguridad. Existe una gran cantidad de tablas desarrolladas por diferentes autores. La primera de éstas fue desarrollada por Taylor en 1966. Desde entonces, han sido presentadas varias tablas sucesivamente por Bishop y Morgenstern (1960), Hunter y Schuster (1968), Janbú (1968), Morgenstern (1963), Spencer (1967), Terzaghi y Peck (1967) y otros</p>
<p>Método del talud infinito</p>	<p>El método del talud infinito es un sistema muy rápido y sencillo para determinar el factor de seguridad de un talud, suponiendo un talud largo con una capa delgada de suelo, en el cual, cualquier tamaño de columna de suelo es representativo de todo el talud. Las suposiciones del método del talud infinito son las siguientes: suelo isotrópico y homogéneo, talud infinitamente largo y superficie de falla paralela al talud. El principal uso del método del talud infinito es la elaboración de planos de amenaza a los deslizamientos mediante el uso de SIGS.</p>
<p>Método del bloque deslizante</p>	<p>El análisis de bloque puede utilizarse cuando existe a una determinada profundidad, una superficie de debilidad relativamente recta y delgada. La masa que se mueve puede dividirse en dos o más bloques y el equilibrio de cada bloque se considera independientemente, utilizando las fuerzas entre bloques. No considera la deformación de los bloques y es útil cuando existe un manto débil o cuando aparece un manto muy duro sobre el cual se puede presentar el deslizamiento.</p>
<p>Método Ordinario o de Fellenius</p>	<p>Conocido también como método Sueco, método de las Dovelas o método U.S.B.R. Este método asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en tajadas verticales, obtiene las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de estas fuerzas obtiene el Factor de Seguridad.</p>

Método de Bishop	Bishop (1955) presentó un método utilizando Dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las Dovelas. El método simplificado de Bishop es uno de los métodos más utilizados actualmente para el cálculo de factores de seguridad de los taludes. Aunque el método sólo satisface el equilibrio de momentos, se considera que los resultados son muy precisos en comparación con el método ordinario.
Método de Janbú	El método simplificado de Janbú se basa en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son horizontales y no tienen en cuenta las fuerzas de cortante. Janbú considera que las superficies de falla no necesariamente son circulares y establece un factor de corrección f_0 . El factor f_0 depende de la curvatura de la superficie de falla. Estos factores de corrección son solamente aproximados y se basan en análisis de 30 a 40 casos.
Método de Spencer	El método de Spencer es un método que satisface totalmente el equilibrio tanto de momentos como de esfuerzos. El procedimiento de Spencer (1967) se basa en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son paralelas las unas con las otras, o sea, que tienen el mismo ángulo de inclinación.
Método de Morgenstern y Price	El método de Morgenstern y Price (1965) asume que existe una función que relaciona las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas. Esta función puede considerarse constante, como en el caso del método de Spencer, o puede considerarse otro tipo de función. La posibilidad de suponer una determinada función para determinar los valores de las fuerzas entre dovelas, lo hace un método más riguroso que el de Spencer. ²²

Adaptado de: 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

²²Suarez 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

5.2 MARCO LEGAL

Para garantizar la viabilidad normativa, del presente trabajo, este se encuentra acorde a los requisitos legales y normativos de la actualidad descritos en la tabla 8. Normatividad.

Tabla 8. Normatividad

NORMA	OBJETIVO
CE.020 Estabilización de Suelos y de Taludes	Establecer las consideraciones técnicas mínimas, para el mejoramiento requerido de la resistencia de suelos y de la estabilidad de taludes.
NSR 2010 Titulo H	Establecer criterios básicos para realizar estudios geotécnicos de edificaciones, basados en la investigación del subsuelo y las características arquitectónicas y estructurales de las edificaciones con el fin de proveer las recomendaciones geotécnicas de diseño y construcción de excavaciones y rellenos, estructuras de contención, cimentaciones, rehabilitación o reforzamiento de edificaciones existentes y la definición de espectros de diseño sismo resistente, para soportar los efectos por sismos y por otras amenazas geotécnicas desfavorables.
NSR 2010 Titulo A.2.	Establecer los valores de coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva para el diseño, la cual se encuentra implícita en la tabla A.2.2. del cual se toma el valor 0.30; en una escala de 0,05 hasta 0,50; desde amenaza sísmica baja hasta amenaza sísmica alta, lo que indica que para efecto de análisis y diseño de taludes, se debe emplear la aceleración máxima del terreno en donde el coeficiente sísmico de diseño para análisis pseudo estático de taludes KST, tiene el valor inferior, tomando así el valor de 0,80; de suelos enrocados y macizos fracturados; lo que implica ejecutar una operación matemática simple con el fin de obtener el valor de Aa, adecuado para el diseño dinámico del talud el cual es 0,25

Fuente: Propia

6. DISEÑO METODOLÓGICO

En este capítulo se evidencia el enfoque que se expuso en el presente trabajo, dejando claras las características principales para el desarrollo de modelos que presentan el factor de seguridad óptimo en suelos expansivos.

6.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

El enfoque que se empleo es de carácter cuantitativo y cualitativo, ya que se tomó como base de trabajo los estudios realizados en diferentes zonas compuestas por suelos expansivos.

6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Cuenta con una investigación tipo analítica, ya que se desarrolló una matriz de comparación entre parámetros mecánicos y geotécnicos comunes en los suelos expansivos, en donde se buscó, valores mínimos de factores de seguridad en relación a parámetros de resistencia, condiciones geométricas y factores naturales.

6.3 DISEÑO MUESTRAL

Para el trabajo se tiene en cuenta un talud con características geotécnicas y geométricas establecidas, en donde ejecutó una comparación del comportamiento del talud con respecto a valores de factor de seguridad, para lo cual se realiza un análisis de la población universo, muestra, individuo y variables, descritas a continuación.

6.3.1 Población universo:

La población universo de la investigación se basa en el análisis de taludes, ya que es el elemento más grande del cual se tomó la muestra con el fin de ejecutar un

análisis de parámetros geomecánicos, sobre el comportamiento de la presencia de suelos expansivos, frente a las variables correspondientes.

6.3.2 Muestra:

Consiste en 264 modelos ejecutados en SLIDE®, de donde se tienen en cuenta valores de $R_u = 0.0$; 0.25 y 0.5 ; con alturas de 10 m y 20 m, ángulos de inclinación de 30° , 45° , 60° y 75° , así mismo se realizan 120 modelos adicionales en donde la altura es de 10 m, variando el valor de $R_u = 0.0$; 0.1 ; 0.25 ; 0.5 . y ángulos de inclinación de 30° , 45° , 60° y 75° ; en donde se tiene en cuenta los parámetros geomecánicos y geométricos, para diferentes tipos de suelos expansivos correspondientes:

CH: Arcilla de alta plasticidad, suelos inorgánicos de grano muy fino, con alta capacidad de deformación sin agrietarse ante un esfuerzo mecánico, límite líquido mayor de 50 , tacto suave²³.

CL: Arcilla de baja plasticidad, suelos inorgánicos de grano muy fino, con baja capacidad de deformación sin agrietarse ante un esfuerzo mecánico, límite líquido menor de 50 , tacto suave²⁴.

MH: Limo de alta plasticidad, suelo de grano fino, con baja capacidad de deformación sin agrietarse ante su esfuerzo mecánico, límite líquido menor de 50 , tacto áspero²⁵.

²³ El sistema unificado de clasificación de los suelos. [en línea].<
ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s11.htm#83a>. [citado en 3 de noviembre del 2015]

²⁴ *Ibíd.* Cuadro 21

²⁵ *Ibíd.* Cuadro 21

6.3.3 Individuo:

Taludes, con presencia de suelos expansivos como arcilla de baja, alta plasticidad y limos de alta plasticidad, en general.

6.3.4 Variables:

Características del suelo del talud, humedad del suelo que conforma el talud, inclinación de talud, ángulo de fricción del suelo, cohesión, nivel freático, factor de seguridad. Tabla 9. Variables

Tabla 9. Variables

VARIABLES	
CUALITATIVAS	<ul style="list-style-type: none">• Tipo de suelo CH, CL y MH.
CUANTITATIVAS	<ul style="list-style-type: none">• Humedad del suelo que conforma el talud – Nivel Freático• Inclinación de talud• Altura de talud• Angulo de fricción• Cohesión• Factor de seguridad• Sismo

Fuente: Propia

Se establece que para la medición de variables en el problema de investigación del proyecto que se desarrolló el cual está basado en el ANÁLISIS DE PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EN TALUDES COMPUESTOS POR SUELOS EXPANSIVOS. Los métodos que se desarrollan, en la estabilización de taludes son:

- Método de Bishop simplificado, a pesar de solo satisface el equilibrio de momentos y no cumple con la totalidad de las ecuaciones de la estática presenta exactitud frente a los resultados que se obtienen, en comparación con el método ordinario, de igual manera utiliza las dovelas, teniendo en cuenta las fuerzas entre las mismas y es uno de los más utilizados para calcular el factor de seguridad de los taludes, la principal restricción del método es que solo considera las superficies circulares (Jaime Suarez,2002).

De igual manera se ejecuta el respectivo análisis por medio de Software Slide®, en el cual se tienen en cuenta para los modelos, los parámetros descritos anteriormente:

- Slide®, ya que es un programa con análisis de la filtración incorporando elementos finitos y funciones que define directamente el usuario; de esta manera el estudio de sensibilidad permite determinar el efecto de las variables en el factor de seguridad de un talud.

6.4 FASES DEL PROYECTO

A través de las fases es posible identificar, el orden cronológico en el que se desarrolla el presente documento, para cumplir el objetivo general, que es analizar el comportamiento de parámetros geomecánicos en taludes compuestos por suelos expansivos, ante variables de nivel freático, geometría y sismo, que se describen a continuación.

6.4.1 FASE I: Identificación de parámetros geomecánicos en taludes compuestos por arcillas expansivas.

- **Actividad 1.** Consultar en diferentes fuentes de información definiciones de los parámetros geomecánicos de suelos expansivos que serán estudiados.
- **Actividad 2.** Investigación del subsuelo y conocimiento determinado de suelos expansivos referenciando los métodos de exploración.
- **Actividad 3.** Identificación problemas que ocasionan estos materiales con presencia taludes ante sollicitaciones de gravedad, infiltración, sismo, escorrentía y otros.
- **Actividad 4.** Recopilación de información secundaria referente al comportamiento de estos materiales.
- **Actividad 5.** Documentación de antecedentes referentes a deslizamientos y amenazas que presente un talud compuesto por suelos expansivos, identificando cómo se estudian los deslizamientos y los problemas geotécnicos que se presentan en estos materiales.

6.4.2 FASE II. Modelación y sensibilización de parámetros en taludes.

- **Actividad 1.** Definición de los parámetros a estudiar para la modelación en taludes.
- **Actividad 2.** Elaboración de matriz para la definición del modelo geotécnico, el desarrollo y respuesta del mismo.

- **Actividad 3.** Realizar la instrucción en programas de modelación para estabilidad de taludes.
- **Actividad 4.** Modelación geotécnica mediante equilibrio límite para las diferentes condiciones de escenarios descritos en la matriz.

6.4.3 FASE III. Generación de gráficas y análisis de resultados.

- **Actividad 1.** Generación de gráficas de resultados de las modelaciones para la revisión del factor de seguridad.
- **Actividad 2.** Análisis del comportamiento de los parámetros geotécnicos definidos teniendo como base la modelación realizada en diferentes escenarios.
- **Actividad 3.** Generación de gráficas finales de respuesta del comportamiento de los parámetros geomecánicos.
- **Actividad 4.** Análisis de resultados respecto a la generación de gráficas.
- **Actividad 6.** Generación y redacción del documento final.
- **Actividad 7.** Generación de Artículo

7. DESARROLLO METODOLÓGICO

Por medio de la descripción detallada de conceptos se obtiene la identificación de suelos expansivos a estudiar que como se menciona en el documento son materiales compuestos por arcillas de alta y baja plasticidad y limos de alta plasticidad, en donde se identifica las características mecánicas, geotécnicas, físicas que son claves al momento del análisis de cada uno de los modelos a ejecutar en el software Slide®, con el fin de conocer el comportamiento de los suelos en mención, cuando se tienen variables de sismo, nivel freático y geometría, correspondiente a diferentes ángulos de inclinación 30°, 45°, 60° y 75°, y una altura de 10 m, 20 m, y variaciones con respecto al parámetro R_u de 0.0; 0.1 ; 0.25 ; 0.4 ; 0.5, en condiciones estática y dinámica.

7.1 DESCRIPCIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS

Se realiza una descripción detallada acerca de los suelos expansivos que conforman un talud, de los cuales se analiza el factor de seguridad, como lo son arcillas de baja y alta plasticidad y limos de alta plasticidad, donde se identifican las características que componen cada uno de estos suelos y la diferencia de los mismos para su respectiva identificación, descritos en la tabla 10. Descripción de suelos expansivos.

Tabla 10.Descripción de suelos expansivos

SUELOS EXPANSIVOS		
<p>Son suelos que al ser humedecidos sufren una expansión que pone en peligro a las estructuras cimentadas sobre ellos. Su comportamiento se caracteriza principalmente por:</p> <ul style="list-style-type: none"> - La contracción debido al secado. - La expansión al humedecerse. - Desarrollo de presiones de expansión cuando está confinado y no puede expandirse. 		
GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS DE GRANO FINO		
CH	CL	ML
ARCILLA INORGÁNICA DE ALTA PLASTICIDAD	ARCILLA INORGÁNICA DE BAJA PLASTICIDAD	LIMO INORGÁNICO DE BAJA PLASTICIDAD
Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a mediana, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras.	Limos inorgánicos y arenas muy finas, harina de roca, arenas finas limosas o arcillosas, o limos arcillosos de ligera plasticidad
Suelo de grano fino, suelo o roca sedimentaria constituido por agregados de silicatos de aluminio hidratados, procedentes de la descomposición de rocas que contienen feldespato, como el granito.		Suelo de grano fino
Diámetro menor de 0.005 mm		Diámetro de las partículas comprendido entre 0.05 mm y 0.005 mm
Presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, desde el rojo anaranjado hasta el blanco cuando es pura		Color varía desde gris claro a muy oscuro
Suelen tener propiedades colidales		No suelen tener propiedades colidales
Consisten en su mayor parte en minerales arcillosos		A partir de 0,002 mm. y a medida que aumenta el tamaño de las partículas, se va haciendo cada vez mayor la proporción de minerales no arcillosos
Partículas forma laminar		Partículas forma redondeada
Tacto suave		Tacto áspero
Menor permeabilidad		Mayor permeabilidad
Predominan las características de superficie		Predominan las características de masa
Se secan lentamente y se pegan a los dedos		Se secan con relativa rapidez y no se pegan a los dedos
Los terrones secos se pueden partir, pero no reducir a polvo con los dedos		Los terrones secos tienen una cohesión apreciable, pero se pueden reducir a
No son colapsables		Pueden ser colapsables
Fuerte olor a tierra	Ligero olor a tierra	Olor no característico, a menudo ninguno
Consistencia alta	Menor consistencia que las CH	Consistencia baja
Estructura blanda	Estructura menos blanda que las CH	Estructura blanda
Alta capacidad de deformarse sin agrietarse ante un esfuerzo mecánico conservando la deformación al retirarse la carga.	Baja capacidad de deformarse sin agrietarse ante un esfuerzo mecánico conservando la deformación al retirarse la carga.	Baja capacidad de deformarse sin agrietarse ante un esfuerzo mecánico conservando la deformación al retirarse la carga.
Plásticos	Plásticos	Ligeramente plásticos
Límite líquido mayor de 50; arcillas de alta contracción-dilatación	Límite líquido menor de 50; ligeramente plásticos	Límite líquido menor de 50; ligeramente plásticos

Fuente: Adaptado de:

[En línea]. <ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s11.htm#83a>.[citado en 15 de octubre del 2015].

[En línea]. <<http://es.slideshare.net/frkfirtin/suelos-expansivos>>[citado en 15 de octubre del 2015]

[En línea]. <<http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiygeotecnia/Diferencias>>.[citado en 15 de octubre del 2015]

7.2 PROPIEDADES DE LOS SUELOS EXPANSIVOS CH, CL Y MH

Es necesario conocer las propiedades físicas de los suelos, descrita en la tabla 11. Propiedades físicas de los suelos expansivos, ya que de estas depende el comportamiento mecánico que lo mismos presentan ante factores intrínsecos y extrínsecos como los son lluvia y sismo, siendo estos importantes al momento de observar el proceso de remoción en masa de un talud, cuando se afecta por estos factores.

Tabla 11. Propiedades físicas de los suelos expansivos

PROPIEDADES FISICAS DE LOS SUELOS EXPANSIVOS				
LIMITE DE CONSISTENCIA				
<i>PROPIEDADES</i>	<i>UNIDAD</i>	<i>SUELO-1</i>	<i>SUELO-2</i>	<i>SUELO-3</i>
LIMITE LIQUIDO	%	71	63	43
LIMITE PLÁSTICO	%	32	37	24
INDICE PLÁSTICO	%	39	26	19
COMPACTACIÓN				
OPTIMO CONTENIDO DE AGUA	%	31	26	23
DENSIDAD LIBRE MÁXIMA	KN/m ³	13,2	13,9	14,6
PROPIEDADES FISICAS INALTERADAS DE LA MUESTRA DE SUELO				
DENSIDAD LIBRE INICIAL	KN/m ³	14,1	14,6	15,1
CONTENIDO INICIAL DEL AGUA	%	24	22	20
CLASIFICACIÓN DEL SUELO		CH	MH	CL

Ajustado de: Amer Ali Al-Rawas &Mattheus F.A. Goosen. Expansive Soils: Efectos en las técnicas de remoldeo en suelos expansivos, y propiedades de fuerza de cizallamiento.2006.Pág. 132. 624.1'5136–dc22. ISBN10 0–415–39681–6.

A través del estudio realizado en el libro expansive Soils, se obtienen este tipo de propiedades físicas de los materiales que en el presente proyecto se desarrollan, descritos en la tabla 11. Propiedades físicas de los suelos expansivos , en el estudio ejecutado se describe sobre los avances en la caracterización y tratamiento en suelos expansivos, la importancia del tema radica en el problema

que presentan estos suelos al estar sometidos a diferentes condiciones que obligan al ingeniero civil a identificar los inconvenientes que la presencia de estos puedan generar en un proyecto de construcción, debido a su inestabilidad dada por la expansión que sufren ante la presencia de agua y la contracción o dilatación, que presentan debido a momentos de sequía o cambios en el nivel freático.

Por lo tanto el límite líquido que presentan los tipos de suelos analizados es para un CH de 71%, MH de 63% y CL de 43%, lo que indica que este es el porcentaje en el que cada uno de estos suelos pasa de un estado líquido a uno plástico. Es así como se observa que existe más probabilidad de que ocurra este fenómeno con la arcilla de alta plasticidad.

Con respecto al límite plástico, se observan valores obtenidos para un CH 32%, MH 37% y 24%; que es cuando el suelo pasa de un estado semisólido a uno plástico, siendo mayor para el limo de alta plasticidad.

De tal manera que se observa el Índice de plasticidad bajo, como por ejemplo del 19%, para una arcilla de baja plasticidad, la cual significa que un pequeño incremento en el contenido de humedad del suelo, lo transforma de semisólido a la condición de líquido, es decir resulta muy sensible a los cambios de humedad. Por el contrario, un índice de plasticidad alto, como por ejemplo del 39%, perteneciente a la arcilla de alta plasticidad, indica que para que el suelo pase del estado semisólido al líquido, se le debe agregar gran cantidad de agua²⁶.

También se obtiene el contenido óptimo de agua, el cual permite la obtención de la

²⁶ Límites de Atterberg: Índice de Plasticidad, Fluidez, Retracción. [en línea].<
<http://uningenierocivil.blogspot.com.co/2011/03/limites-de-atterberg-indice-de.html>>. [citado en 9 de noviembre del 2015.

densidad máxima mediante la compactación, que según tabla 11. Es 31% para un CH, 26% para el MH y 23% para el CL, Siendo este valor inversamente proporcional a la densidad libre máxima, debido a que entre mayor es el óptimo contenido de agua, menor es la densidad máxima.

De esta manera se obtienen las propiedades físicas de los suelos estudiados, haciendo la respectiva clasificación de los materiales correspondientes a suelos expansivos.

7.3 SELECCIÓN DE PARÁMETROS

Con el fin de lograr la identificación de cada uno de los materiales, se seleccionan los parámetros geomecánicos, siendo los mismos importantes pues de estos depende el comportamiento y el valor de factor de seguridad del talud, cuando se relacionan con parámetros geométricos y de R_u , ante factores estáticos y dinámicos, que se describen en los siguientes numerales a partir del 7.3.1.

7.3.1 Parámetros Geomecánicos:

La selección de parámetros a raíz de la investigación realizada se consolidó teniendo en cuenta los siguientes datos bibliográficos:

En el libro *Expansive Soil*, se observa la descripción de un estudio donde se evalúa la presión de hinchamiento del suelo, el potencial de hinchamiento y la resistencia a la compresión inconfiada de muestras alteradas e inalteradas de suelos expansivos. De donde se describen tres tipos de suelos seleccionados de la parte norte de Jordania, con una amplia gama de contenido de arcilla, caracterizando las propiedades físicas de estos suelos como; la gradación, el límite plástico y el límite líquido, la gravedad específica, el peso específico seco

máximo, y el contenido óptimo de agua, de donde se tienen en cuenta las normas ASTM, para consolidar los resultados en la Tabla 11, del presente documento.

Razón por la cual se toman valores de peso específico para MH, CH y CL, ya que el estudio que se explicó anteriormente estuvo basado en muestras de suelos inalteradas en zonas altamente arcillosas con características similares a las que se analizan.

Otro de los estudios realizados en el libro de *Expansive Soils*, trata de una serie completa de pruebas de la compresión inconfiada (UC) no consolidado no drenado (UU) triaxiales y columna resonante (RC), en donde se realizan sobre muestras estabilizadas químicamente de sulfato de rica arcilla expansiva del sureste de Arlington, Texas, después de haber sido sometido a ciclos repetitivos de humectación-secado (WD) inducido artificialmente en el laboratorio. Se utilizan los resultados para evaluar la influencia de wd cíclico en resistencia a largo plazo, la rigidez y unidimensional (1-D), hinchazón y contracción como respuesta del suelo tratado, incluyendo la resistencia a la compresión inconfiada, parámetros de resistencia al corte sin drenaje, módulo de corte dinámico y material de amortiguación.

Los Métodos de estabilización incluyen sulfato resistente cemento Tipo V, bajo en calcio clase F de ceniza volátil, cal viva y se mezcla con fibras de polipropileno.

Dichas muestras de suelo tratadas se curaron durante 7 días y después se sometieron a 0, 1, 2, 4, 8, 16, y 32 ciclos wd antes de la prueba UC, UU, y RCI. Un ciclo wd consistió en 12 horas de inmersión en un baño de agua potable en la sala de temperatura seguido de 12 horas de secado en el horno a 140 °F. En cambio las cámaras wd permiten el monitoreo de 1-D expansión-contracción, que brinda respuesta durante wd repetido. Una dosis por peso 10% de cemento Tipo V parece dar mejor rendimiento general bajo wd cíclico.

Es de esta manera como se busca resumir los valores c - ϕ , obtenidos de suelos naturales antes de ser tratados, descritos en la tabla 12. Parámetros de resistencia al corte (C y ϕ), para ensayo triaxial no consolidado no drenado, Suelo natural antes de ser tratado. En la misma tabla indicada, pero en la fuente bibliográfica se presentan los demás resultados como resumen de los parámetros de resistencia al cortante (c - ϕ) obtenidos de ensayos triaxiales UU, que en este caso se omitieron debido a que nuestro estudio está basado en suelos expansivos sin tratar.

Tabla 12. Parámetros de resistencia al corte (C y ϕ) para ensayo triaxial no consolidado no drenado Suelo natural antes de ser tratado.

<i>Número de ciclos w-d</i>	<i>C (psi)</i>	<i>C (KPa)</i>	<i>% de cambio</i>	<i>ϕ (°)</i>	<i>% de cambio</i>
<i>Suelo Natural</i>					
0	6,8	46,9	0,0	0,6	0,0
1	6,5	44,9	- 4,4	0,6	0,0
2	6,7	46,2	- 1,5	0,6	0,0
4	6,3	43,5	- 7,4	0,6	0,0
8	6,9	47,6	+ 1,5	0,6	0,0
16	6,9	47,3	+ 0,7	0,6	0,0
32	6,9	47,6	+ 1,5	0,6	0,0

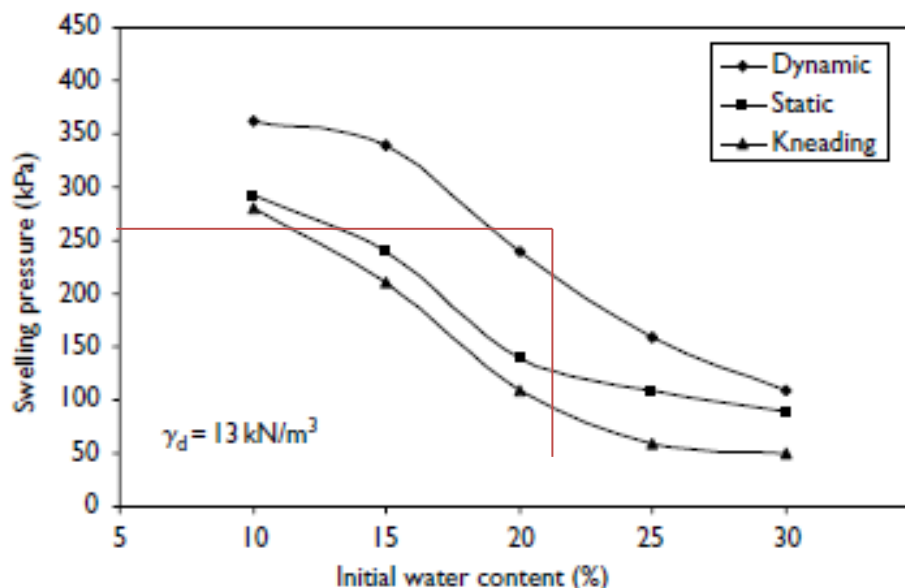
Ajustado de: Amer Ali Al-Rawas & Mattheus F.A. Goosen. Expansive Soils: Efectos en las técnicas de remoldeo en suelos expansivos, y propiedades de fuerza de cizallamiento.2006.Pág. 129. 624.1'5136-dc22. ISBN10 0-415-39681

Los valores que se encuentran resaltados en la tabla 12. Parámetros de resistencia al corte (C y ϕ) para ensayo triaxial no consolidado no drenado Suelo

natural antes de ser tratado, fueron utilizados en el trabajo para los parámetros del material arcilla de alta plasticidad (CH).

A continuación se presentan las figuras correspondientes a los efectos del contenido inicial de agua en la presión por hinchamiento, para obtener los valores de cohesión en cada uno de los tipos de suelos estudiados, para ello se tiene en cuenta las propiedades físicas de los suelos expansivos, resumidos en la tabla 11, donde se especifica el contenido inicial (%) del agua así: CH 24, MH 22 y CL 20, valores con los que se ingresa en el eje vertical para las figuras correspondientes al suelo compuesto por limo de alta plasticidad y arcilla de baja plasticidad, analizado en condiciones estáticas (la condición dinámica se tendrá en cuenta en el proceso de modelación).

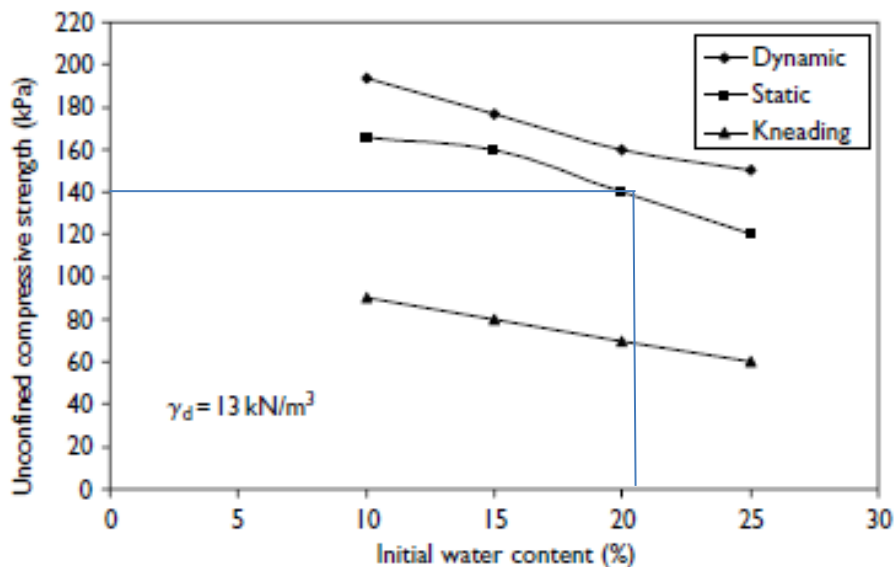
Figura 3. El efecto del contenido de agua inicial en la presión de hinchamiento por los tres métodos para MH



Tomado de: Amer Ali Al-Rawas & Mattheus F.A. Goosen. Expansive Soils: Efectos en las técnicas de remoldeo en suelos expansivos, y propiedades de fuerza de cizallamiento.2006.Pág. 134. 624.1'5136-dc22. ISBN10 0-415-39681-6

A partir de la figura 3, se obtiene un valor de $\frac{140Kpa}{2} = 70 kpa = 70KN/m^2$ y a su vez $\frac{70Kpa}{2} = 35 Kpa = 35 KN/m^2$, valor de la cohesión para una arcilla inorgánica de alta plasticidad.

Figura 4.El efecto del contenido de agua inicial en la presión de hinchamiento por los tres métodos para CL.



Tomado de: Amer Ali Al-Rawas &Mattheus F.A. Goosen. Expansive Soils: Efectos en las técnicas de remoldeo en suelos expansivos, y propiedades de fuerza de cizallamiento.2006.Pág. 135. 624.1'5136–dc22. ISBN10 0–415–39681–6

A partir de la figura 4, se obtiene un valor de $\frac{140 kpa}{2} = 70Kpa$ y a su vez $\frac{70Kpa}{2} = 35 Kpa = 35 KN/m^2$, valor de la cohesión para una arcilla inorgánica de alta plasticidad.

En la investigación se encuentran diferentes parámetros para distintos tipos de suelos de los cuales se analiza y compara con la fuente del libro de Expansive

Soils, seleccionando los apropiados para ejecutar la modelación en el software Slide®, en la Tabla 13. Parámetros de diferentes tipos de suelos, en el cual se evidencian valores comparados con la fuente confiable del libro.

Tabla 13. Parámetros de diferentes tipos de suelos.

Tipo de suelo	Consistencia	Angulo de fricción interna ϕ en grados	Peso específico Kg/cm²
Arena gruesa o arena con grava	Compacta	40	2250
	Suelta	35	1450
Arena media	Compacta	40	2080
	Suelta	30	1450
Arena limosa fina o limo arenoso	Compacta	30	2080
	Suelta	25	1365
Limo uniforme	Compacta	30	2160
	Suelta	25	1365
Arcilla-limo	Suave a mediana	20	1440-1920
Arcilla limosa	Suave a mediana	15	1440-1920
Arcilla	Suave a mediana	0,1	1440-1920

Fuente: Parámetros de diferentes tipos de suelos. [En línea]. < <http://civilgeeks.com/2011/11/30/valores-referenciales-sobre-diferentes-propiedades-de-los-suelos/>>. [citado en 11 de noviembre del 2015].

7.3.1.1 Parámetros para limo inorgánico de alta plasticidad (MH):

Este tipo de materiales cuentan con suelos de grano fino, con baja capacidad de deformación sin agrietarse antes los esfuerzos mecánicos, contando con un límite líquido menor de 50. Los parámetros para este material se establecen en la tabla 13. Parámetros geomecánicos del limo inorgánico de alta plasticidad (MH).

Tabla 14. Parámetros geomecánicos del limo inorgánico de alta plasticidad (MH).

LIMO INORGÁNICO DE ALTA PLASTICIDAD (MH)		
COHESIÓN	ÁNGULO DE FRICCIÓN	PESO ESPECÍFICO
C	ϕ	γ
(KN/M ²)	(°)	(KN/M ³)
35	15	14,6

Fuente propia

Los parámetros relacionados se toman de diferentes fuentes como resultado a la investigación de los datos requeridos para la elaboración del presente documento:

- Cohesión: correspondiente al efecto del contenido de agua inicial en la presión de hinchamiento por los tres métodos mencionados para MH. En donde se observa la selección del parámetro en la gráfica 3. El efecto del contenido de agua inicial en la presión de hinchamiento por los tres métodos para MH, Ingresando en el eje horizontal con el contenido inicial del agua descrito en la tabla No. 11 Propiedades Físicas de los suelos expansivos, en la cual se describe un contenido de agua inicial de 22%, que para condición estática es de 140 Kpa como presión de hinchamiento

que permite obtener el valor de la cohesión: $\frac{140 \text{ Kpa}}{2} = 70 \text{ kpa}$; $\frac{70 \text{ Kpa}}{2} = 35 \text{ Kpa} = 35 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$

- Ángulo de fricción: los datos obtenidos de la web ingeniero civil denominada, Civilgeeks.com Ingeniería y Construcción, de la tabla 13. Parámetros de diferentes tipos de suelos, que se encuentra en un blog peruano creado en agosto de 2010 por **John J. Rojas**, se identifica como un portal que dedica a compartir y difundir temas relacionados con la ingeniería civil, desde artículos, libros y manuales.
- Peso específico: Se describe en el párrafo introductorio del numeral 7.3. de selección de parámetros geomecánicos, y es tomado de la tabla 11. Propiedades físicas de los suelos.

7.3.1.2 Parámetros para arcilla inorgánica de alta plasticidad (CH):

La arcilla de alta plasticidad, pertenece a suelos inorgánicos de grano muy fino, con baja capacidad de deformación sin agrietarse ante un esfuerzo mecánico, su límite líquido es mayor a 50, presentando así los parámetros geomecánicos a continuación para el respectivo material, descrito en la tabla 15. Parámetros geomecánicos de una arcilla inorgánica de alta plasticidad (CH).

Tabla 14. Parámetros geomecánicos de una arcilla inorgánica de alta plasticidad (CH)

ARCILLA INORGÁNICA DE ALTA PLASTICIDAD (CH)		
COHESIÓN	ÁNGULO DE FRICCIÓN	PESO ESPECÍFICO
C	ϕ	γ
(KN/M2)	(°)	(KN/M3)
46,9	0,6	14,1

Fuente propia

Los parámetros relacionados se tomaron de diferentes fuentes como resultado a la investigación de los datos requeridos para la elaboración del presente documento:

- **Cohesión:** se encuentran resumidos los valores c - ϕ , obtenidos de suelos naturales antes de ser tratados, el análisis, es efectivo por que el suelo se presenta en estado natural. En la tabla 12. Parámetros de resistencia al corte (C y ϕ) para ensayo triaxial no consolidado no drenado Suelo natural antes de ser tratado.
- **Ángulo de fricción:** tomado para el suelo natural sin ningún tipo de estabilización ni alteración en el contenido del mismo, basada en las condiciones iniciales de suelos expansivos después de haber sido sometida dicha muestra a ciclos repetitivos de humectación-secado (WD) inducido artificialmente en el laboratorio para identificar el comportamiento del mismo en cuanto a la resistencia al cortante donde el ángulo de fricción interna determina su comportamiento junto con la cohesión, resumidas dichas

Condiciones en la tabla 12. Parámetros de resistencia al corte (C y ϕ) para ensayo triaxial no consolidado no drenado Suelo natural antes de ser tratado.

- Peso específico: este valor se encuentra descrito en el párrafo introductorio de selección de parámetros geomecánicos, Tabla 11. Parámetros físicos de los suelos expansivos.

7.3.1.3 Parámetros para arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL):

La arcilla de baja plasticidad, hace parte de los suelos inorgánicos de grano muy fino, con baja capacidad de deformación, sin sufrir de grietas ante un esfuerzo mecánico, el límite líquido es menor a 50, de esta manera en la tabla 16. Parámetros geomecánicos de una arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL), se describen los parámetros a considerar para la modelación ejecutada.

Tabla 15. Parámetros geomecánicos de una arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL).

ARCILLA INORGÁNICA DE BAJA PLASTICIDAD (CL)		
COHESIÓN C	ÁNGULO DE FRICCIÓN ϕ	PESO ESPECÍFICO γ
(KN/M ²)	(°)	(KN/M ³)
35	0,1	15,1

Fuente propia

Los parámetros relacionados se toman de distintas fuentes como resultado a la investigación de los datos requeridos para la elaboración del presente documento:

- Cohesión: corresponde al efecto del contenido de agua inicial en la presión de hinchamiento por los tres métodos mencionados para CL. Ingresando en el eje horizontal con el contenido inicial del agua descrito en la tabla 11. Propiedades Físicas de los suelos expansivos, se describe un contenido de agua inicial de 20% que para condición estática muestra un valor de 140 Kpa como presión de hinchamiento que permite obtener el valor de la cohesión: $\frac{140 \text{ kpa}}{2} = 70 \text{ kpa}$; $\frac{70 \text{ Kpa}}{2} = 35 \text{ Kpa}$; 35 KN/m^2 .
- Ángulo de fricción: Se obtiene de la web del ingeniero civil denominada Civilgeeks.com Ingeniería y Construcción, un blog peruano creado en agosto de 2010 por **John J. Rojas**, descrito en la tabla 13. Parámetros de diferentes tipos de suelos, en donde se tiene en cuenta el portal que se dedica a compartir y difundir temas relacionados con la ingeniería civil, desde artículos, libros y manuales.
- Peso específico: descrito en el párrafo introductorio de selección de parámetros geomecánicos, de la tabla 11. Propiedades físicas de los suelos expansivos.

7.3.2 Selección de valores de sismo y Ru

Para la selección del valor cuando hay presencia de sismo en la modelación del talud, se tiene en cuenta la norma NSR-10 TITULO A, de donde se selecciona el valor del coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva, el cual se determina en su máximo valor de amenaza sísmica igual a 0.30, descrito en la Tabla A.2.3-1. Nivel de amenaza sísmica según valores A_a y de A_v , descrito en la figura 5. Nivel de amenaza sísmica según valores A_a y A_v .

Figura 5. Nivel de amenaza sísmica según valores de A_a y A_v .

Tabla A.2.3-1
Nivel de amenaza sísmica según valores de A_a y de A_v

Mayor valor entre A_a y A_v	Asociado en mapas de las figuras A.2.3-2 y A.2.3-3 a Región N°	Amenaza Sísmica
0.50	10	Alta
0.45	9	Alta
0.40	8	Alta
0.35	7	Alta
0.30	6	Alta
0.25	5	Alta
0.20	4	Intermedia
0.15	3	Intermedia
0.10	2	Baja
0.05	1	Baja

Fuente: Norma Colombiana Sismo Resistente. Título A. Capítulo A.2. Zona de Amenaza Sísmica y movimientos sísmicos de diseño.

El valor que se selecciona en el párrafo anterior para una amenaza sísmica alta, se multiplica por el coeficiente K_{st} , que se utiliza para el análisis y diseño de taludes en donde se debe incluir la aceleración máxima del terreno, teniendo en cuenta el tipo de material terreo que se manejará en el presente proyecto. Tomado de la tabla H.5.2-1, de la norma sismo resistente. Observado en la figura 6. Valores de K_{st}/ A_{max} .

Figura 6. Valores de K_{ST}/A_{max} .

Tabla H.5.2-1
Valores de K_{ST}/a_{max} Mínimos para Análisis Seudoestático de Taludes

Material	K_{ST}/a_{max} Mínimo	Análisis de Amplificación Mínimo
Suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados (RQD < 50%)	0.80	Ninguno
Macizos rocosos (RQD > 50%)	1.00	Ninguno
Todos los materiales térreos	0.67	Amplificación de onda unidimensional en dos columnas y promediar
Todos los materiales térreos	0.50	Amplificación de onda bidimensional

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

Seleccionando el valor que pertenece a suelos, enrocados y macizos muy rocosos; con un K_{ST} de 0.80, ya que no se ejecutó ningún análisis de amplificación en los suelos expansivos de estudio.

$$K_{ST} * \text{valor de amenaza sísmica alta} = \text{coeficiente de } A_a$$

$$0.80 * 0.30 = 0.24$$

El valor se aproxima de 0,24 a 0,25; como coeficiente de aceleración de amenaza sísmica en el diseño de los taludes en el software Slide ®.

De tal manera que para el análisis de factor de seguridad de los taludes se tiene en cuenta el capítulo H, en donde se especifican los valores máximos para que el talud se encuentre en amenaza por un fenómeno de remoción en masa. El cual se puede observar en la figura 7. Factores de seguridad indirectos mínimos.

Figura 7. Factores de seguridad Indirectos Mínimos.

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	≥ 3.00	≥ 3.00	Diseño	≥ 2.00
Excentricidad en el sentido del momento (e/B)	$\leq 1/6$	$\leq 1/6$	Diseño	$\leq 1/4$
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

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

7.3.2.1 Parámetro de presión de poros Ru

Teniendo en cuenta que el Ru, es una relación de poros y esfuerzo vertical, se seleccionan valores de 0.0; 0.1; 0.25; 0.4 y 0.5; en donde a medida que aumenta dicho valor indica el nivel de agua contenido en el suelo del talud, para el valor 0.0; el suelo se encuentra de estado natural-húmedo, en 0.25, es un nivel de agua medio en el talud y 0.5, talud saturado.

7.3.3 Parámetros geométricos

En la etapa de recolección de datos se investigaron tesis relacionadas con el tema de donde se tuvo en cuenta el documento desarrollado sobre Influencia Del Abatimiento Del Nivel Freático En El Cálculo del Factor De Seguridad Para La Estabilidad De Taludes, realizado por el Ingeniero Leonardo Leuro, Año 2015. Universidad La Gran Colombia.

Para lo cual se seleccionan diferentes alturas en la geometría del talud y ángulos de inclinación estudiados en el proyecto descrito anteriormente, los cuales fueron:

Ángulos: 30°, 45°, 60° y 75°

Alturas de talud de 10 m y 20 m

7.4 DESARROLLO DEL MODELO

A través de los parámetros geomecánicos y geométricos anteriormente descritos se diseñan taludes con diferentes condiciones con el fin de lograr un análisis completo de lo que se presenta en campo, descrito en la tabla 17. Matriz de diseño.

Tabla 16. Matriz de diseño, para altura del talud de 10 m y 20 m con ru= 0.25 y 0.5

ANGULO	ALTURA	CH						MH						CL					
		C (KN/M2)		φ		γ(KN/M2)		C (KN/M2)		φ		γ(KN/M2)		C (KN/M2)		φ		γ(KN/M2)	
		46,9		0,6		14,1		35		15		14,6		35		0,1		15,1	
		ESTÁTICO			DINÁMICO			ESTÁTICO			DINÁMICO			ESTÁTICO			DINÁMICO		
		0			0,25			0			0,25			0			0,25		
		Ru			Ru			Ru			Ru			Ru			Ru		
		0,00	0,25	0,50	0,00	0,25	0,50	0,00	0,25	0,50	0,00	0,25	0,50	0,00	0,25	0,50	0,00	0,25	0,50
30	10	2,127	2,116	2,105	1,460	1,454	1,447	2,416	2,184	1,937	1,471	1,307	1,139	1,468	1,466	1,465	0,909	0,907	0,906
	20	1,033	1,018	1,003	0,684	0,677	0,670	1,575	1,365	1,146	0,993	0,851	0,705	0,733	0,731	0,729	0,492	0,490	0,489
45	10	1,991	1,983	1,975	1,404	1,398	1,392	2,007	1,817	1,624	1,380	1,246	1,111	1,377	1,376	1,374	0,882	0,881	0,880
	20	1,008	1,000	0,991	0,677	0,670	0,664	1,246	1,073	0,902	0,887	0,756	0,626	0,689	0,687	0,686	0,466	0,464	0,463
60	10	1,810	1,804	1,798	1,345	1,340	1,336	1,654	1,479	1,319	1,248	1,131	1,015	1,251	1,250	1,248	0,868	0,867	0,866
	20	0,958	0,951	0,945	0,649	0,644	0,638	1,011	0,858	0,705	0,763	0,646	0,527	0,623	0,622	0,621	0,460	0,459	0,458
75	10	1,548	1,542	1,536	1,242	1,238	1,233	1,306	1,141	0,981	1,107	0,988	0,858	1,069	1,068	1,067	0,831	0,830	0,830
	20	0,779	0,773	0,767	0,587	0,582	0,578	0,797	0,640	0,485	0,648	0,534	0,406	0,536	0,535	0,534	0,403	0,402	0,402

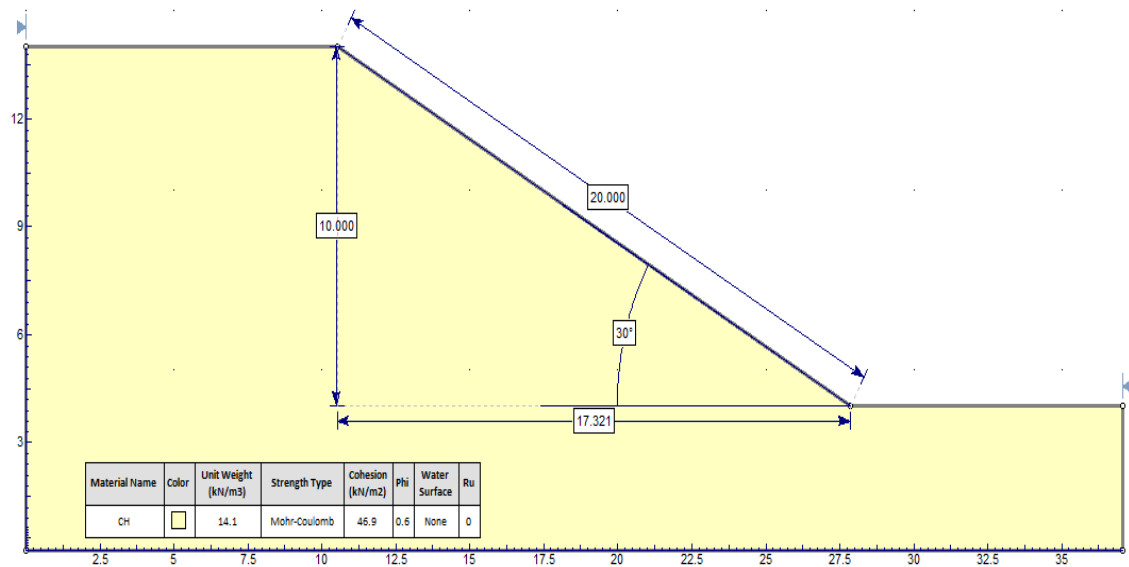
Fuente: propia

De la cual se generan los modelos teniendo en cuenta los diferentes ángulos y alturas, en estado dinámico y estático, para diferentes valores de Ru, de donde se obtienen valores de factor de seguridad, para el material de Arcilla de alta plasticidad, limo de alta plasticidad y arcilla de baja plasticidad, en el cual se evidencian los parámetros geomecánicos descritos a partir del numeral 7.3. Parámetros geomecánicos, del presente documento.

7.4.1 Diseño de modelos estáticos para diferentes suelos expansivos

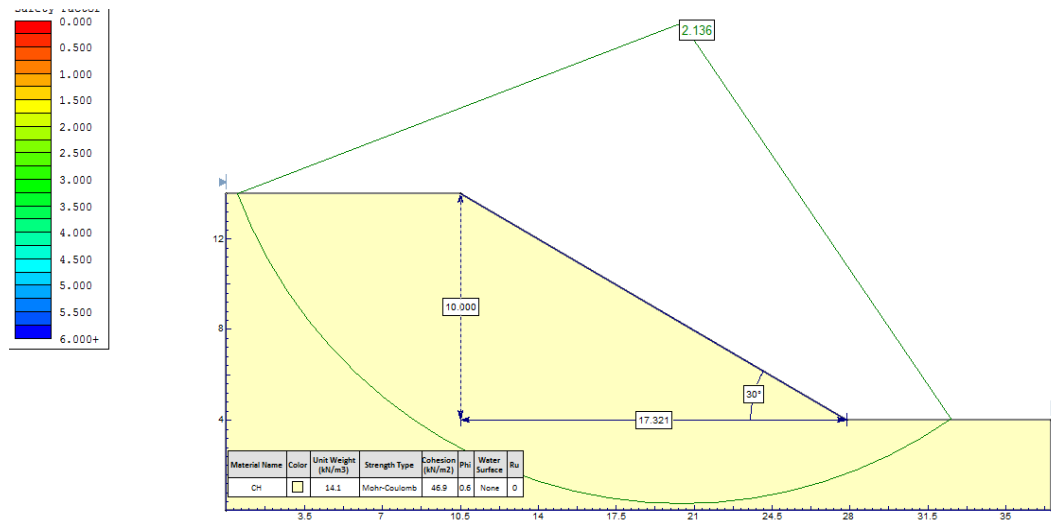
Se realiza el diseño de un talud compuesto por CH: Arcillas de alta plasticidad, en condiciones de $R_u: 0.0$ y con un coeficiente de Aceleración sísmica de $A_a: 0$, en donde se indica una geometría de Angulo de 30° y altura de 10 metros. Que se observa, en la figura 8. Modelo en Slide® para un CH, de donde se obtiene el valor de factor de seguridad que se muestra en la figura 9. Factor de seguridad CH, estático.

Figura 8. Modelo en slide para un CH



Fuente: Propia

Figura 9. Factor de seguridad CH, estático.

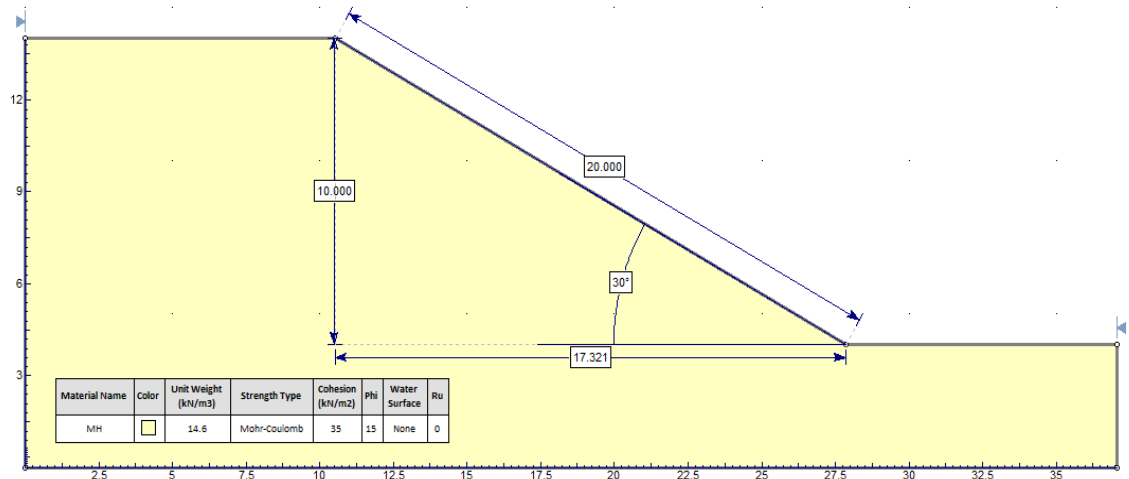


Fuente: Propia

De esta manera se realiza este procedimiento para los materiales de MH: Limo de alta plasticidad y CL: Arcilla de alta plasticidad, que se describe a continuación.

Se lleva acabo el diseño de un talud compuesto por MH: Limos de alta plasticidad, en condiciones de Ru: 0.0 y con un coeficiente de Aceleración sísmica de Aa: 0, con una geometría de ángulo de 30° y altura de 10 metros, el cual se observa en la figura 10. Modelo en slide para un MH, estático, brindando así un factor de seguridad que se muestra en la figura 11. Factor de seguridad para MH, estático.

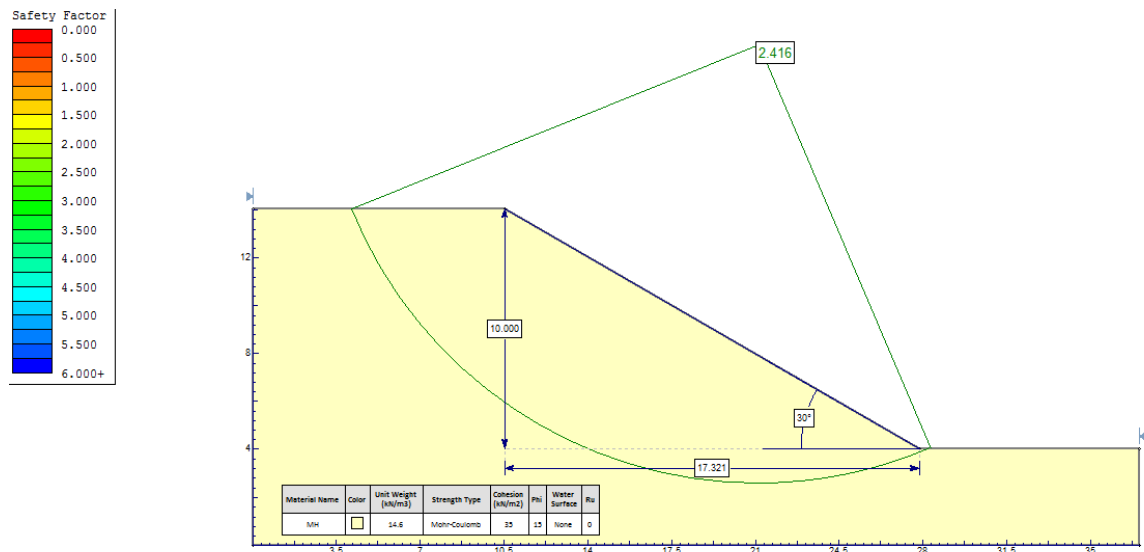
Figura 10. Modelo en slide para un MH, estático.



Fuente: propia

De donde se obtiene el factor de seguridad, para dicho modelo, descrito en la figura 11. Factor de seguridad para MH, estático.

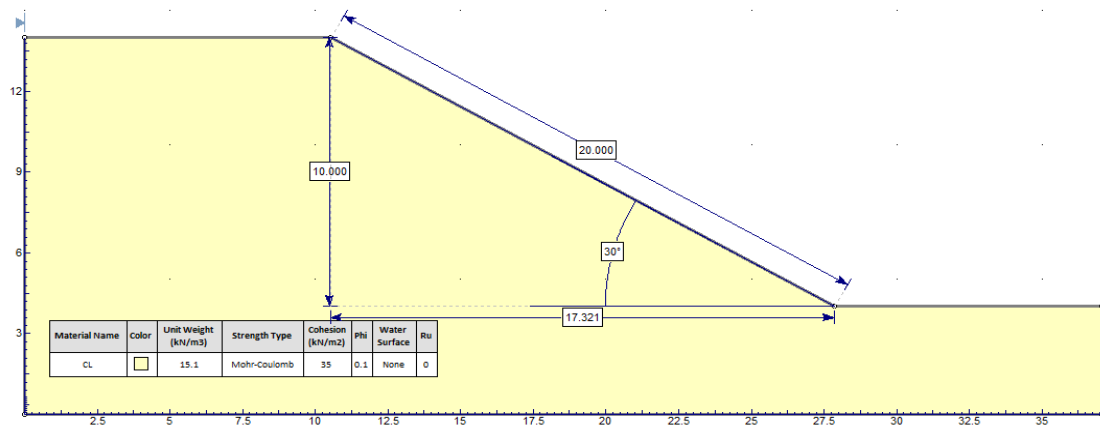
Figura 11. Factor de seguridad para MH, estático



Fuente: propia

Se realiza el diseño para un talud con presencia de CL: Arcillas de baja plasticidad, en condiciones de $R_u: 0.0$ y con un coeficiente de aceleración sísmica de $A_a: 0$, con una geometría de Angulo de 30° y altura de 10 metros, el cual se observa en la figura 12. Modelo de Slide® para un CL, estático.

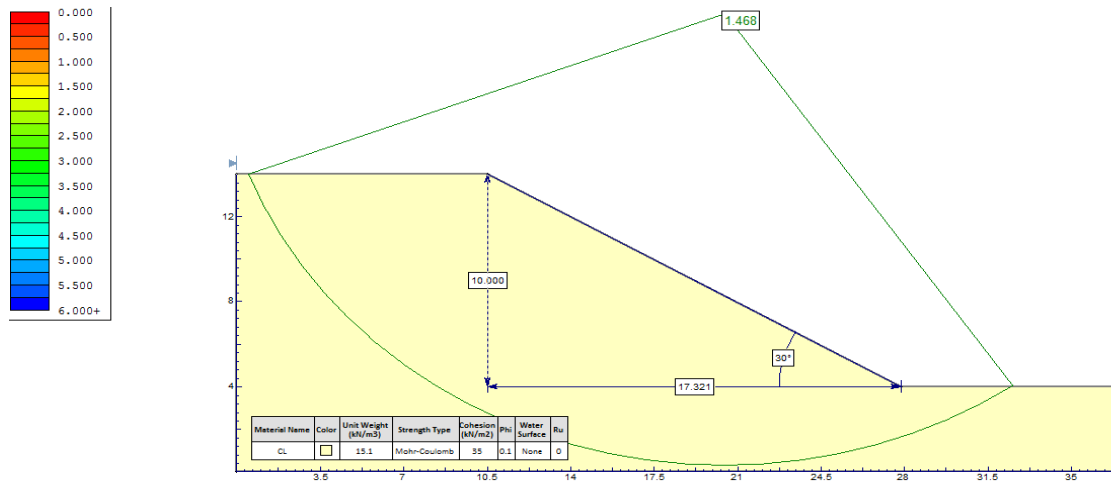
Figura 12. Modelo de slide para un CL, estático.



Fuente: propia

De donde se obtiene el factor de seguridad, del talud, que se observa en la figura 13. Factor de seguridad de un CL, estático.

Figura 13. Factor de seguridad de un CL, estático.

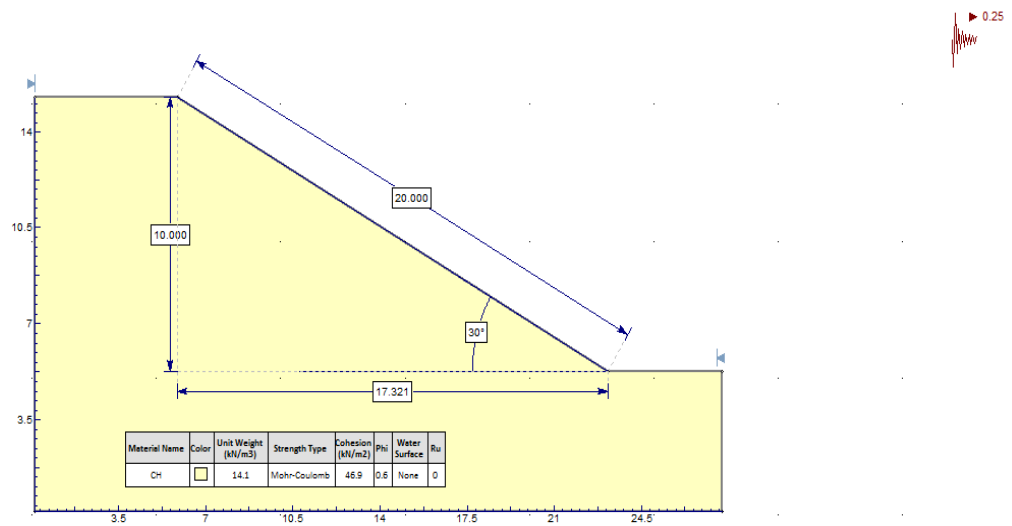


Fuente: propia

En el proceso de modelación se incluye la condición de sismicidad, en donde en el Software SLIDE®, se agrega en LOADING, seismic load, y se coloca el valor de 0.25, como coeficiente de amenaza sísmica Aa.

De esta manera se tiene en cuenta la condición dinámica, la cual se realiza en el diseño de un talud compuesto por CH: Arcillas de alta plasticidad, en condiciones de Ru: 0.0 y con un coeficiente de Aceleración sísmica de Aa: 0.25, para una geometría de Angulo de 30° y altura de 10 metros. Observado en la figura 14. Modelo en Slide para un CH, dinámico.

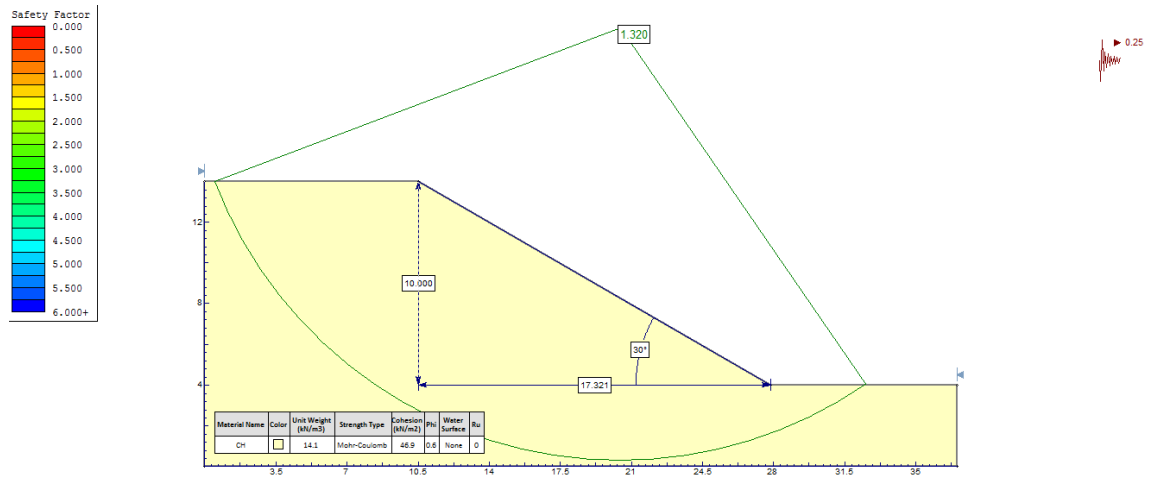
Figura 14. Modelo en slide para un CH, dinámico.



Fuente: Propia

Del anterior diseño se logra obtener el factor de seguridad que se observa en la figura 15. Factor de seguridad CH, dinámico.

Figura 15. Factor de seguridad CH, dinámico.

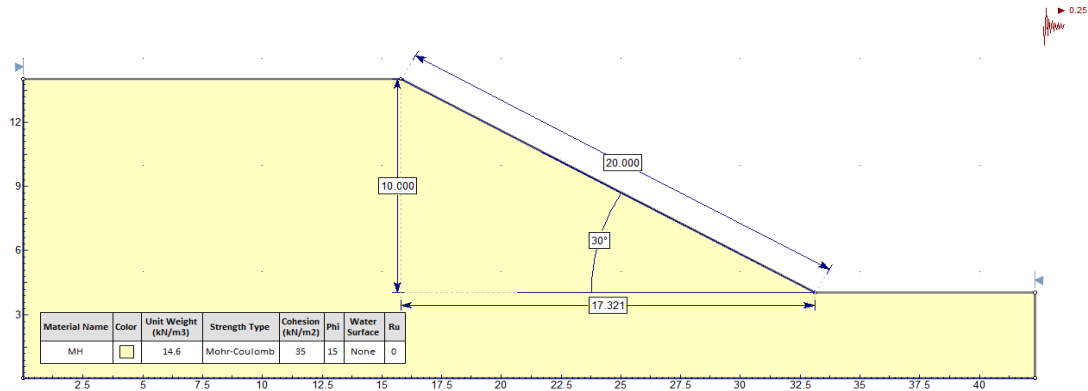


Fuente: Propia

Es así como se lleva a cabo este procedimiento para los materiales de MH: Limo de alta plasticidad y CL: Arcilla de alta plasticidad, que se describe a continuación.

El diseño de un talud compuesto por MH: Limos de alta plasticidad, en condiciones de Ru: 0.0 y con un coeficiente de Aceleración sísmica de Aa: 0.25, con una geometría de Angulo de 30° y altura de 10 metros, el cual se observa en la figura 16. Modelo en slide para un MH, dinámico.

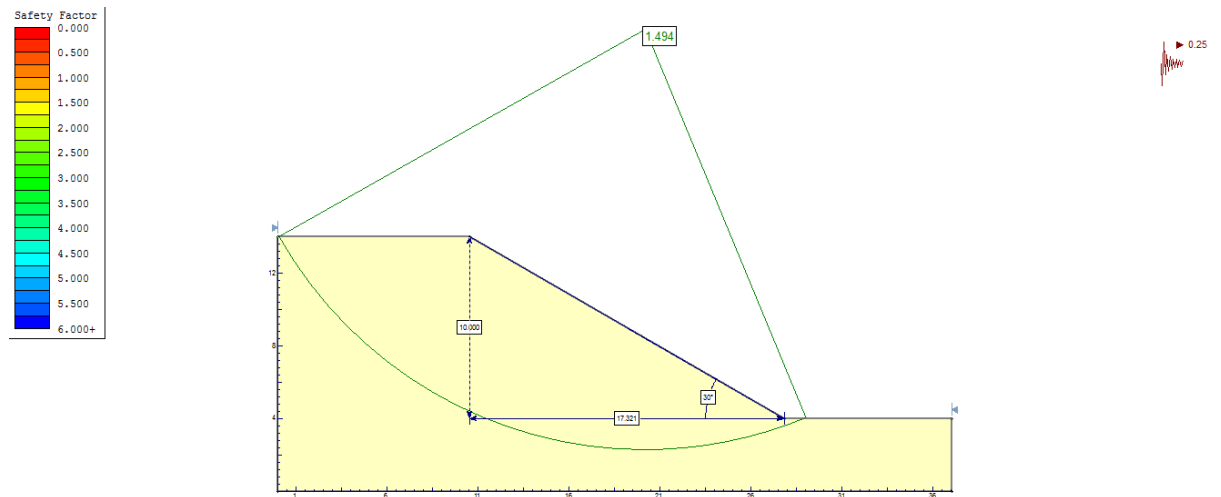
Figura 16. Modelo en slide para un MH, dinámico.



Fuente: propia

Del cual se obtiene el factor de seguridad, observado en la figura 17. Factor de seguridad para MH, dinámico

Figura 17. Factor de seguridad para MH, dinámico

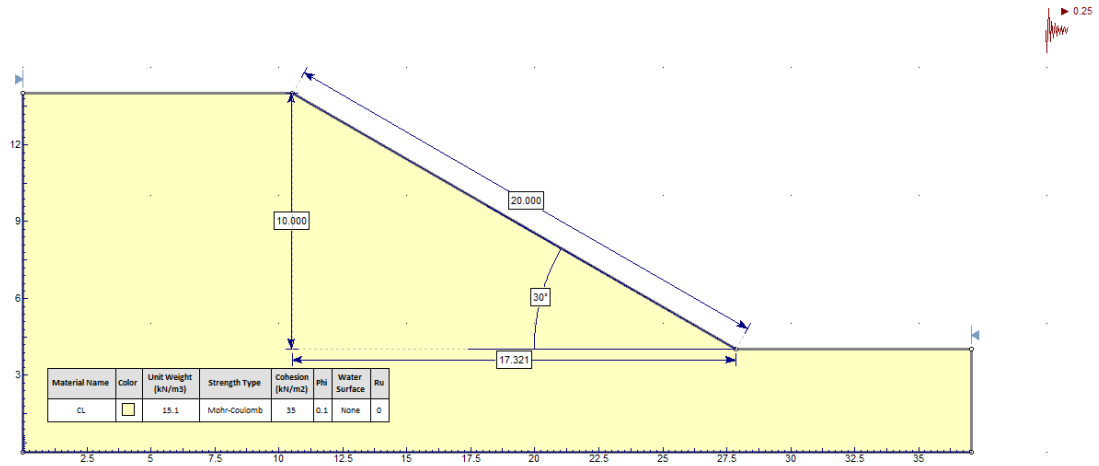


Fuente: propia.

Se realiza el diseño para un talud con presencia de CL: Arcillas de baja plasticidad, en condiciones de Ru: 0 y con un coeficiente de Aceleración sísmica de Aa: 0.25, con una geometría de Angulo de 30° y altura de 10 metros, el cual se observa en la figura 12. Modelo de Slide para un CL, estático, el cual se observa

en la Figura 18. Modelo de Slide para un CL, dinámico

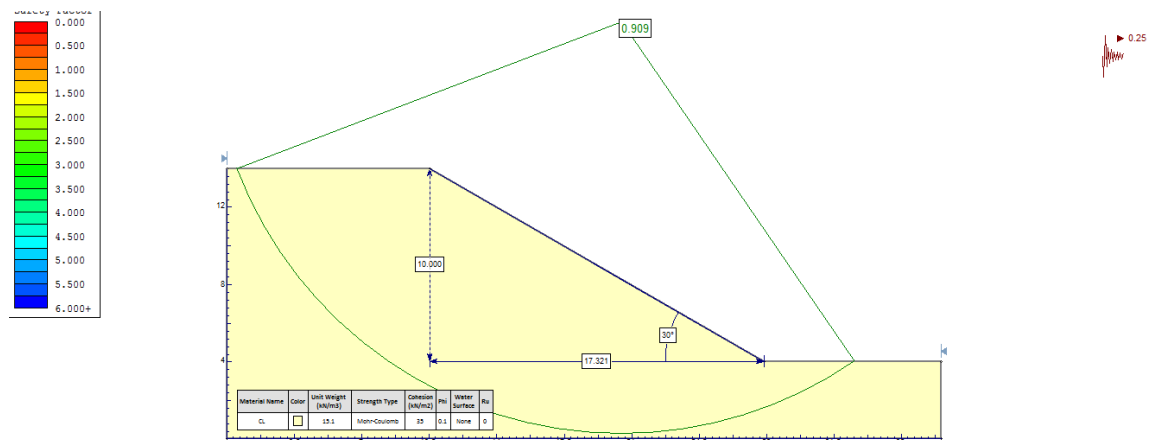
Figura 18. Modelo de slide para un CL, dinámico.



Fuente: propia

Del cual se obtiene el factor de seguridad, del talud en condición de sismo, visto en la figura 19. Factor de seguridad para un CL, dinámico.

Figura 19. Factor de seguridad para un CL, dinámico.



Fuente: propia

De esta manera se modifican en el modelo los valores de $R_u=0$; 0.25 y 0.5, y las alturas de 10m y 20m, con ángulos de inclinación de 30°, 45°, 60° y 75°, relacionándolos entre sí, obteniendo el factor de seguridad, para condiciones estáticas en 144 modelos, en condiciones estáticas y dinámicas. En la segunda modelación se realiza el mismo procedimiento con 120 modelos, incluyendo valores de $R_u= 0.1$ y 0.4, con una altura específica de 10 metros, para diferentes ángulos.

De donde se obtiene como resultado la matriz de factores de seguridad, que se muestra en la tabla 17. Valores de factor de seguridad.

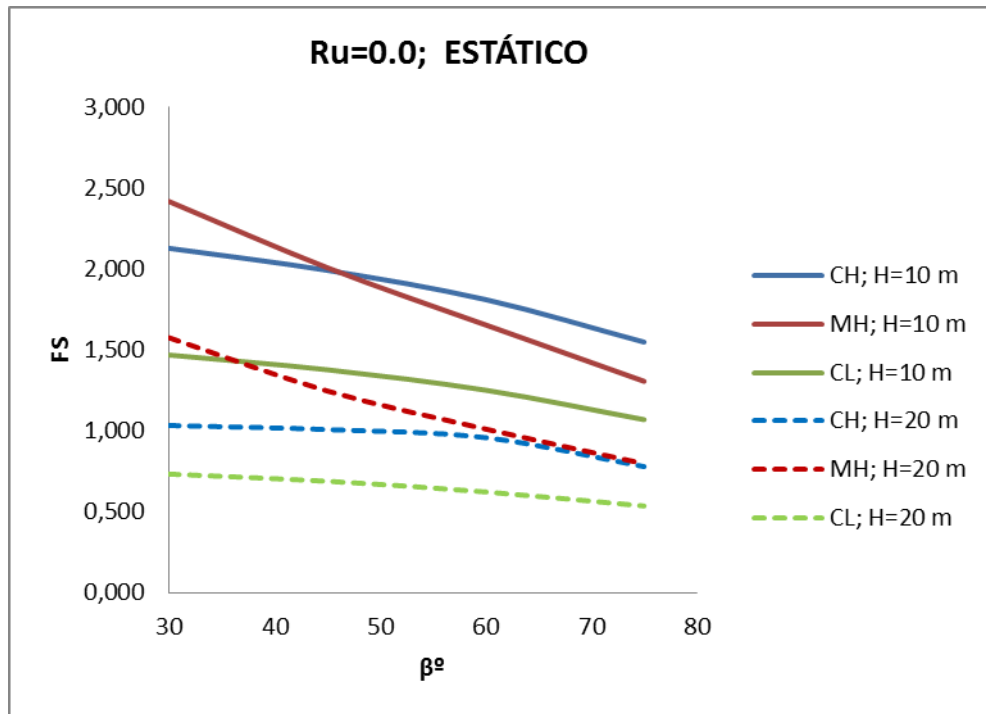
Tabla 17. Valores de factor de seguridad.

		CH					
		C (KN/M2)		ϕ		γ (KN/M2)	
		46,9		0,6		14,1	
		ESTÁTICO			DINÁMICO		
		0			0,25		
ANGULO	ALTURA	Ru			Ru		
		0,00	0,25	0,50	0,00	0,25	0,50
30	10	2,127	2,116	2,105	1,460	1,454	1,447
	20	1,033	1,018	1,003	0,684	0,677	0,670

Fuente: propia

De estos resultados se efectúa el análisis de gráficas, que se observa en el numeral 8.análisis de resultados, comparando el factor de seguridad vs el ángulo β° , para diferentes alturas del talud con presencia de CH, MH y CL, en condiciones dinámicas y estáticas, como se muestra en la figura 20. Comparación de factor de seguridad vs ángulo de inclinación en condición estática para $R_u=0.0$, CH, MH y CL, para alturas de 10 m y 20 m.

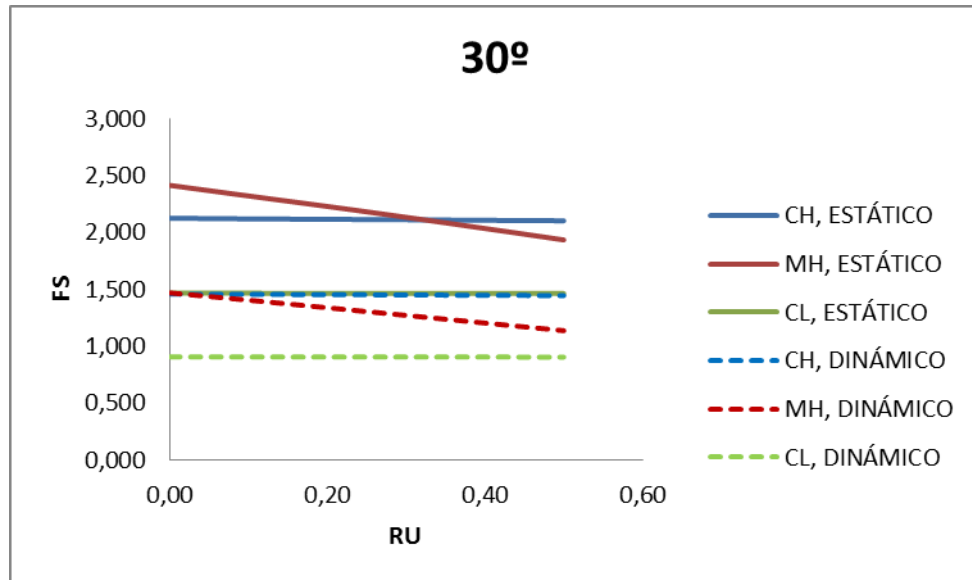
Figura 20. Comparación de factor de seguridad vs ángulo de inclinación en condición estática para $R_u=0.0$, CH, MH y CL, para alturas de 10 m y 20 m.



Fuente: propia

De esta manera para los 120 modelos donde los $R_u = 0.0; 0.1; 0.25; 0.4$ y 0.5 , con una altura de 10 metros y ángulos de inclinación de $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ y 75° , se elaboran las gráficas en Excel, con el fin de hacer una comparación de cada uno de los ángulos con respecto al valor de factor de seguridad vs R_u , en estado dinámico y estático, que se muestra en la Figura 21. Gráfica Factor de seguridad Vs. R_u en condición estática y dinámica para ángulo 30° y altura de 10 m en CH, MH y CL, de esta manera se estudian los comportamientos respectivamente en el ítem 8. análisis de resultados,

Figura 21. Factor de seguridad vs. ru en condición estática y dinámica para ángulo 30° y altura de 10 m en CH, MH y CL.



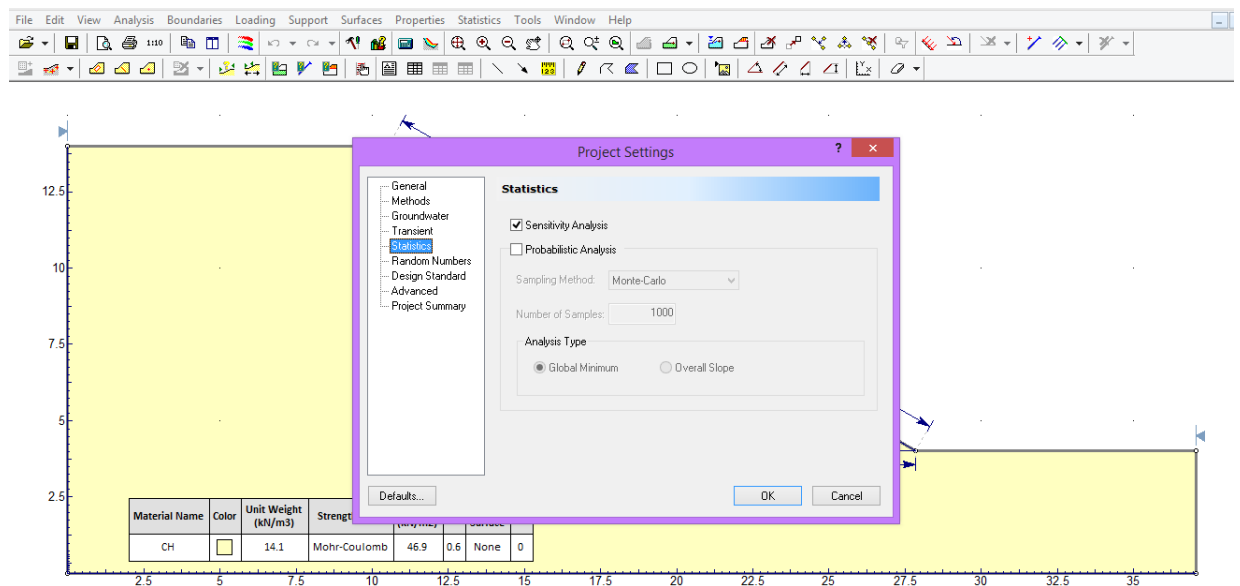
Fuente: propia

Con el fin de obtener la cohesión a la que un talud compuesto por suelos expansivos con ángulos de 30°, 45°, 60° y 75°, a una altura de 10 metros, cumple con los factores de seguridad expuestos en el numeral 7.3.2. Selección de valores de sismo y ru; en estado estático y dinámico, se ejecuta una sensibilización del parámetro cohesión para los diferentes modelos, modificando así el valor de ru, en 0.0, 0.1, 0.25, 0.4 y 0.5, siendo 0.0, la condición seca o en estado natural del suelo, 0.25, condición intermedia de nivel de agua en el talud y 0.5, condición de saturación; mientras que 0.1 y 0.4, son valores intermedios.

Se realiza el siguiente procedimiento con cada uno de los modelos en donde se encuentra una modificación de la geometría (ángulo), el valor ru y su condición estática o dinámica:

1. Se toma como ejemplo el modelo de talud para 10 metros, con un ángulo de 30° , con material de arcilla de alta plasticidad; se verifica que se encuentre la selección en análisis, Project settings, statistics, y se selecciona sensitivity analysis. Como se muestra en la figura 22. Sensitividad de parámetros.

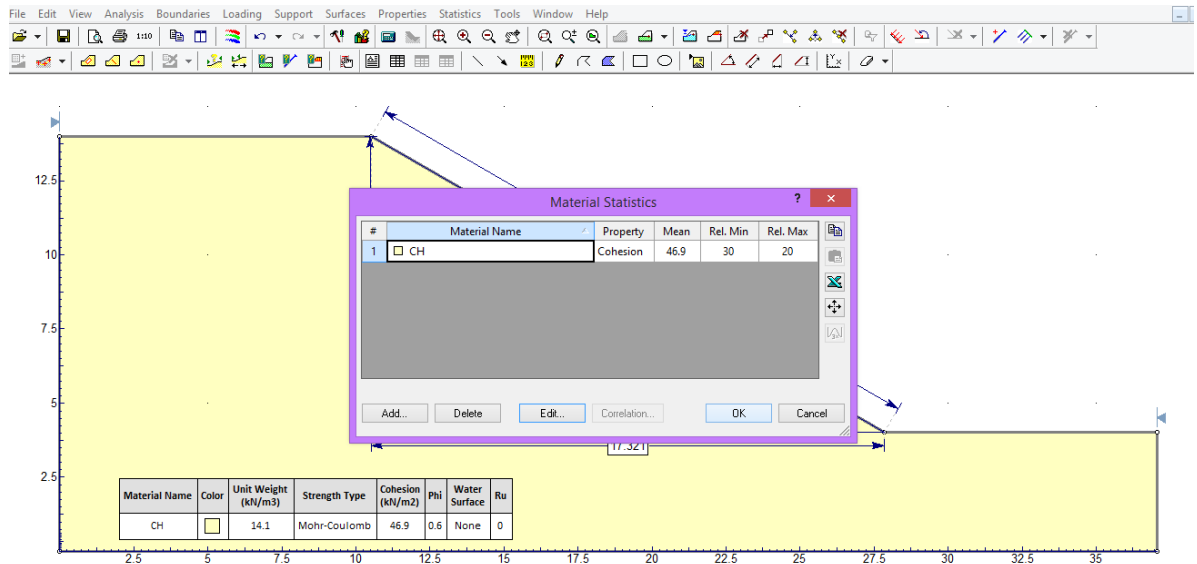
Figura 22. Sensitividad de parámetros.



Fuente: propia

2. Se seleccionan las variables y se escriben los valores de cohesión que en este caso son de 46,9 kn/m² para CH; 35 kn/m² para CL y 35 kn/m² para MH, en cada uno de los modelos correspondientes a cada material y con su respectiva geometría, determinando los rangos de las variables, que en este caso se manejan 20 por encima y por debajo para el CH y 30 por encima y por debajo para el CL y MH; como se muestra en la figura 23. Rangos de variables

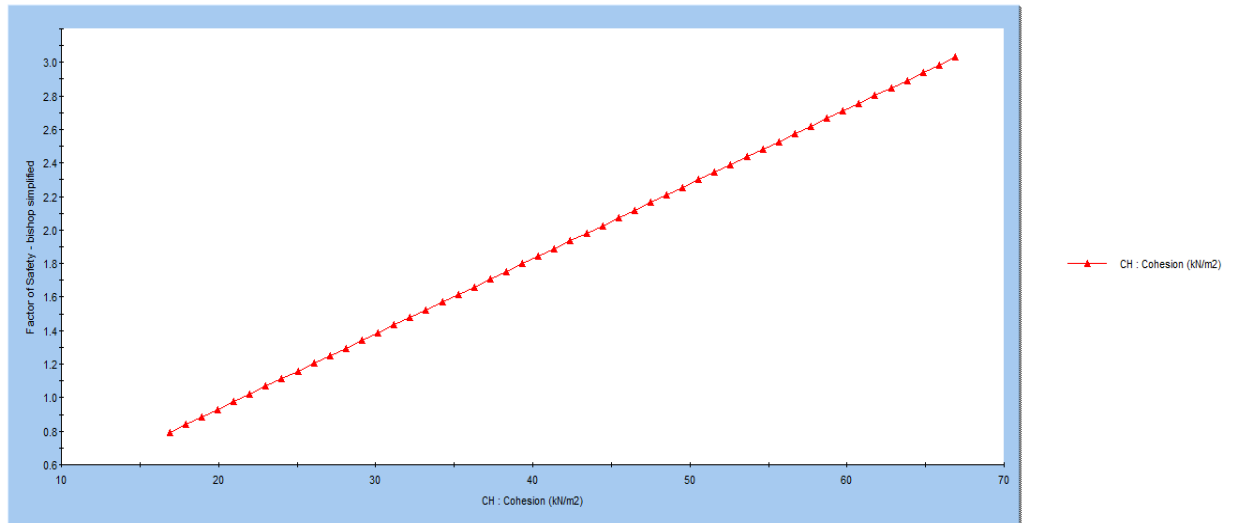
Figura 23. Rangos de variables



Fuente: propia

3. Se corre el modelo con el fin de obtener la falla que presenta el talud, y cuando se obtiene, se da clic en statistics, sensitivity analysis plot, se selecciona cohesión y el método que para este caso es bishop; y se da clic en plot, de donde se obtiene la gráfica factor de seguridad vs cohesión. Que se muestra en la figura 24. Factor de seguridad vs cohesión, para un talud compuesto por CH, con altura de 10 m y ángulo de inclinación de 30°.

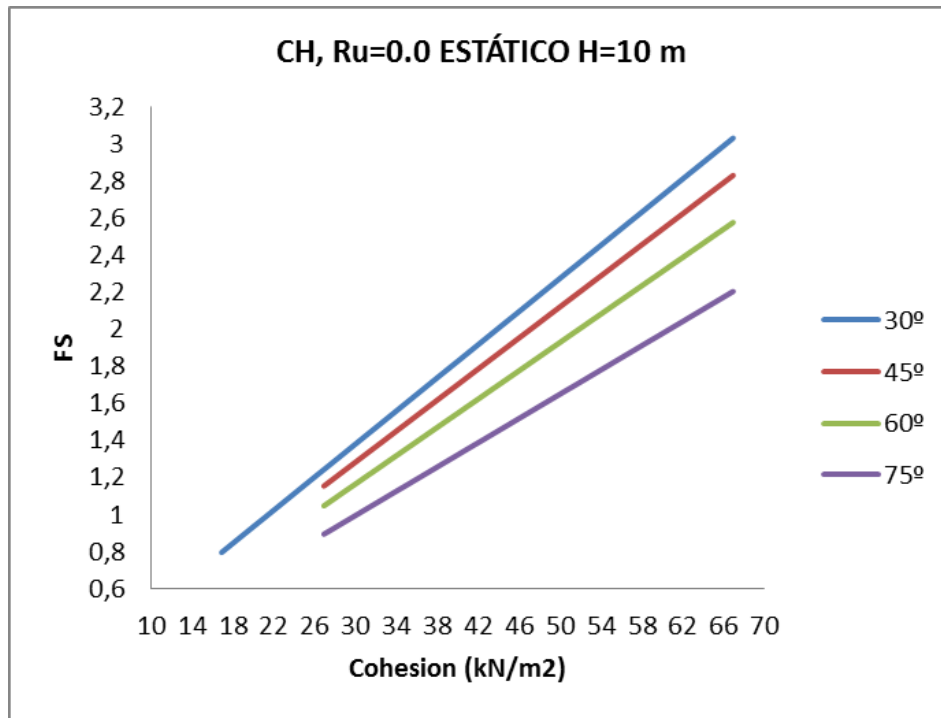
Figura 24. Factor de seguridad vs cohesión, para un talud compuesto por CH, con altura de 10 m y ángulo de inclinación de 30°.



Fuente: propia

4. La figura 24. Factor de seguridad vs cohesión, para un talud compuesto por CH, con altura de 10 m y ángulo de inclinación de 30°, se exporta a Excel, y se realiza el mismo procedimiento para los ángulos de 30°, 45°, 60° y 75°; para cada uno de los materiales CH, MH y CL, de donde se modifica la condición de ru y de estático a dinámico, de donde se obtienen las gráficas correspondientes a cada uno de los ángulos por cada material. Como se muestra en la figura 25. Factor de seguridad vs cohesión, para un CH, CL y MH, con altura de 10 m, con $r_u=0.0, 0.1, 0.25, 0.4$ y 0.5 en condición estática y pseudo-estática.

Figura 25. Factor de seguridad vs cohesión, para un CH, con altura de 10 m, con $r_u=0.0$, en condición estática.

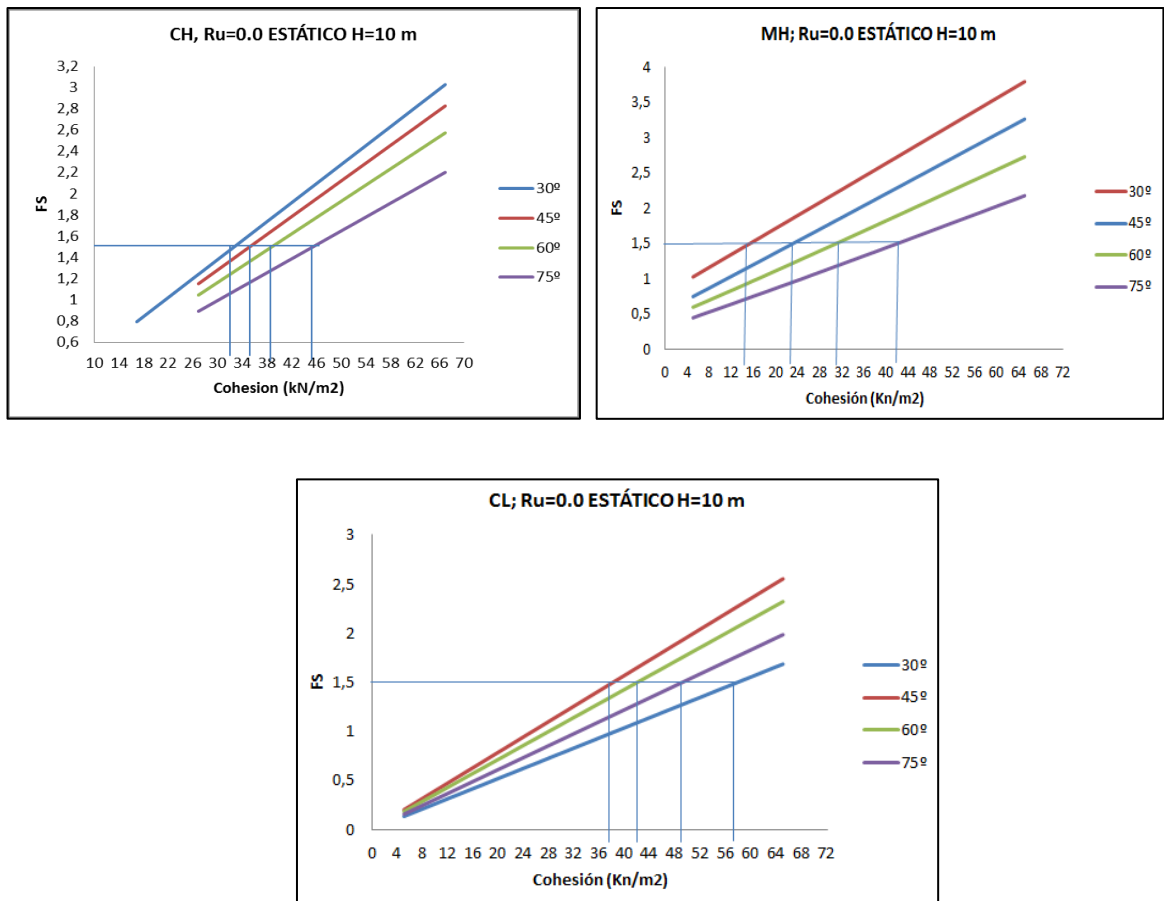


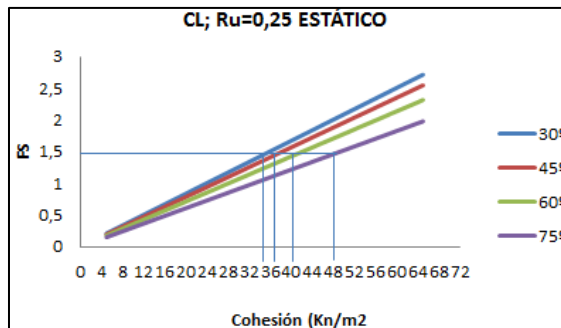
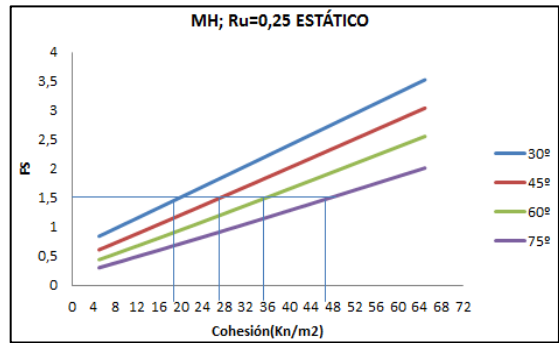
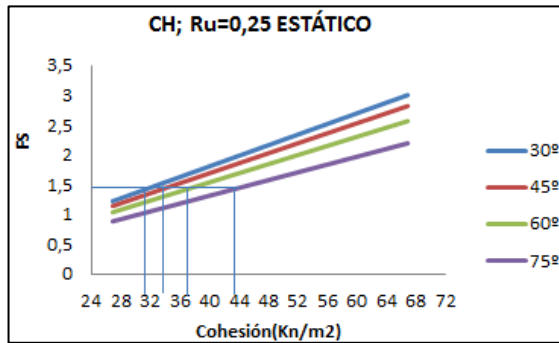
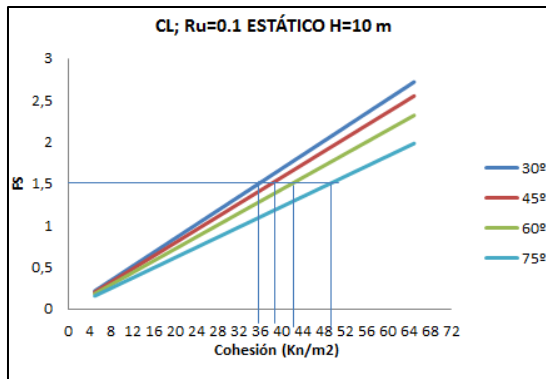
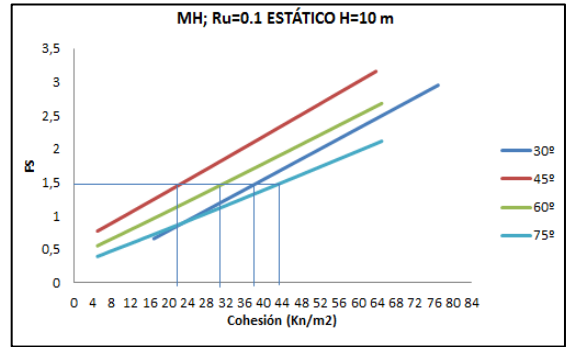
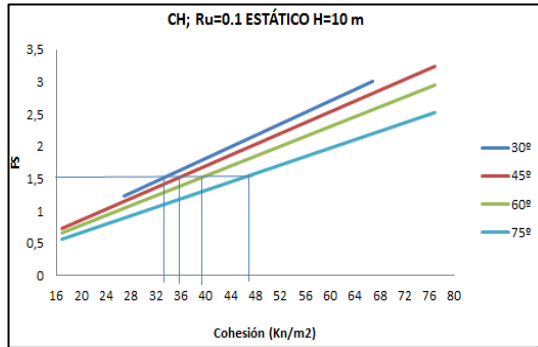
Fuente: propia

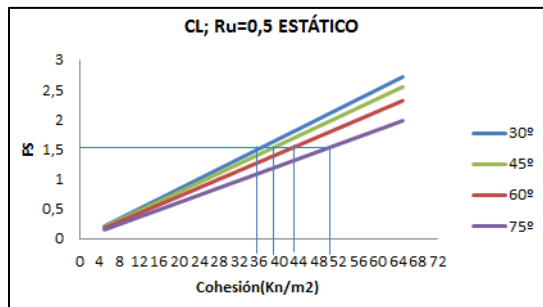
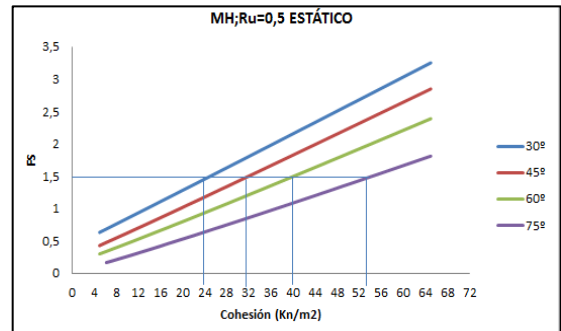
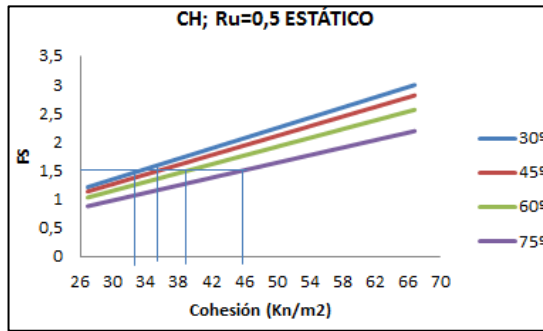
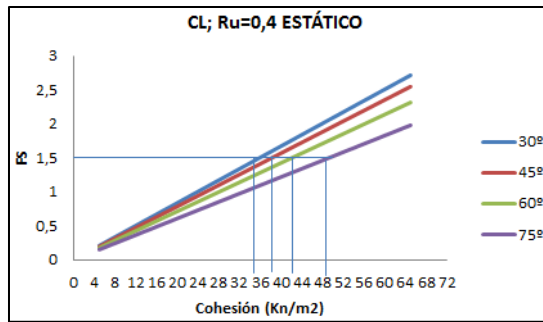
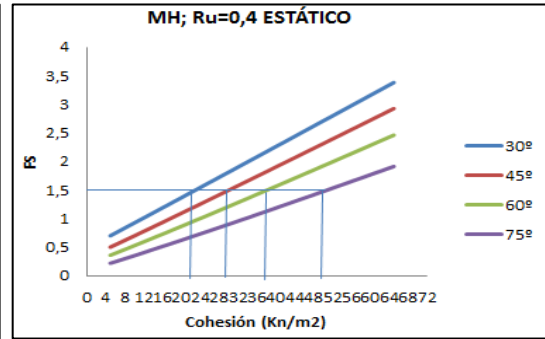
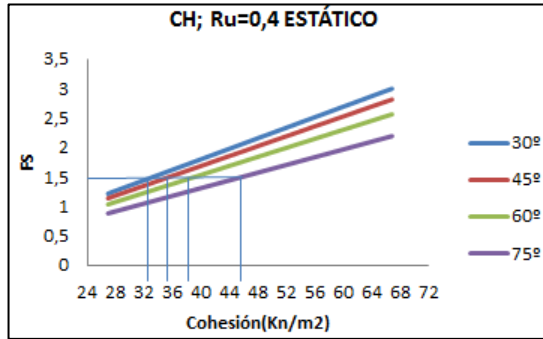
- Al obtener las gráficas para CH, MH y CL, con condiciones de $r_u=0.0, 0.1, 0.25, 0.4$ y 0.5 , se traza un línea horizontal en el valor de 1.5 para condición estática y en 1.05 , para condición dinámica, que se describen en la tabla 7. Factores de seguridad indirectos mínimos, tomados de la NSR-10; y una línea vertical que intersecta con la línea horizontal, con las pendientes correspondientes a cada uno de los valores de factor de seguridad vs cohesión, que se realiza para cada ángulo, encontrando así el valor de cohesión, de tal manera que los mismos indican que para las condiciones geométricas descritas, los valores de cohesión que se muestran en el anexo 4. Valores de cohesión para suelos expansivos; cuando se tiene un

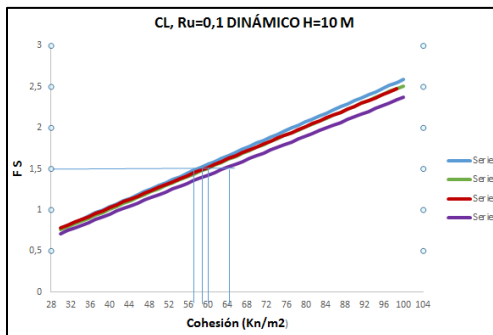
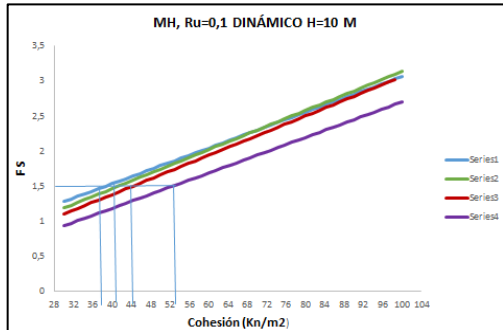
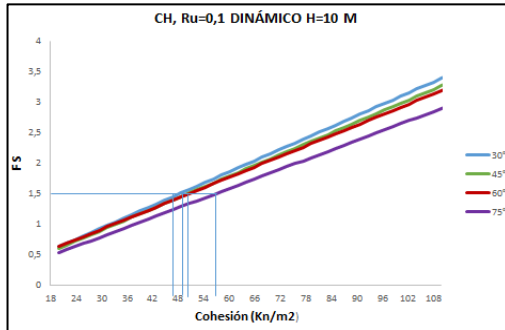
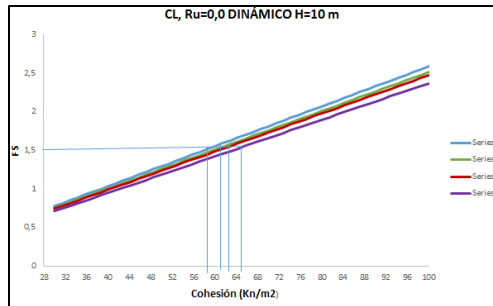
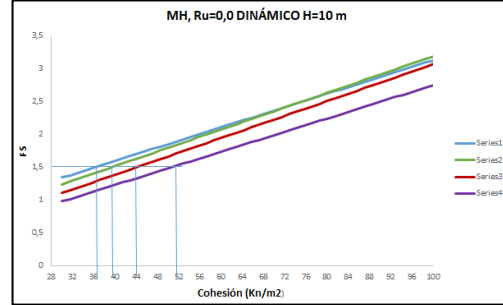
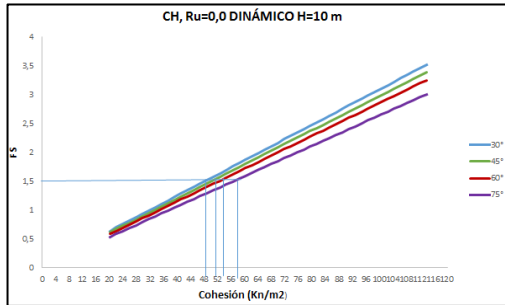
valor menor al mostrado en la tabla, los valores de factor de seguridad no cumplen y es necesario realizar una modificación en el talud, con el fin de obtener estabilidad en la estructura. El procedimiento para la obtención del valor de cohesión, se realiza como se muestra en la figura 26. Valor de cohesión, para un CH, con $ru=0.0$, en condición estática para ángulos de 30° , 45° , 60° y 75° .

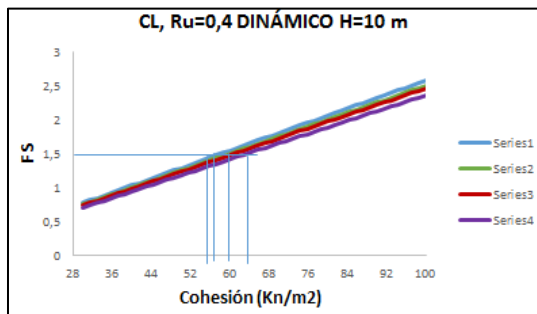
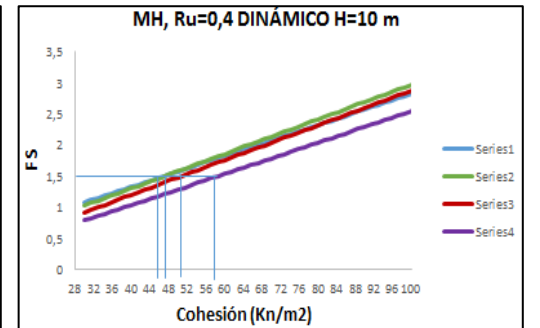
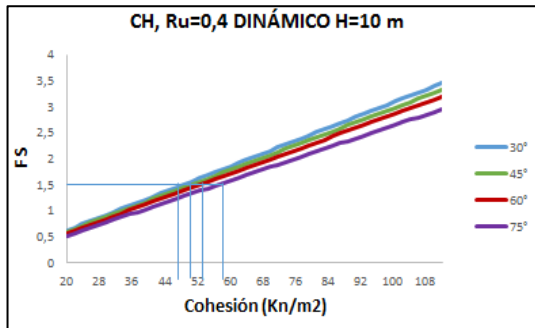
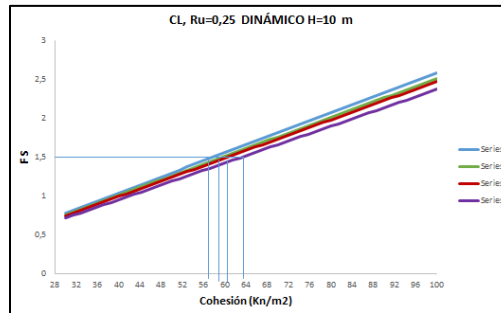
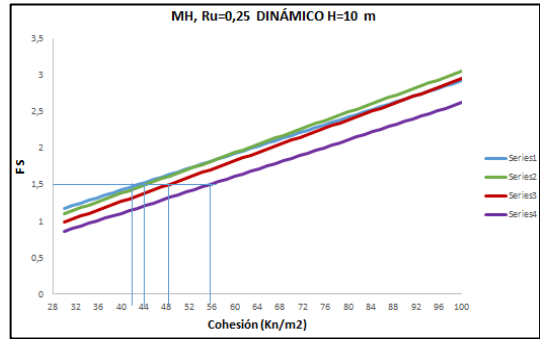
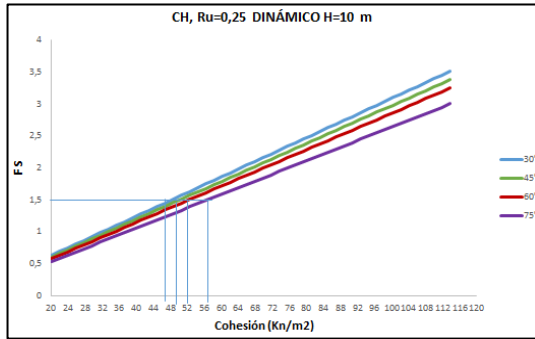
Figura 26. Valor de cohesión, para un CH, CL y MH, con $ru=0.0, 0.1, 0.25, 0.4$ y 0.5 , en condición estática y dinámica, para ángulos de $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ y 75° .

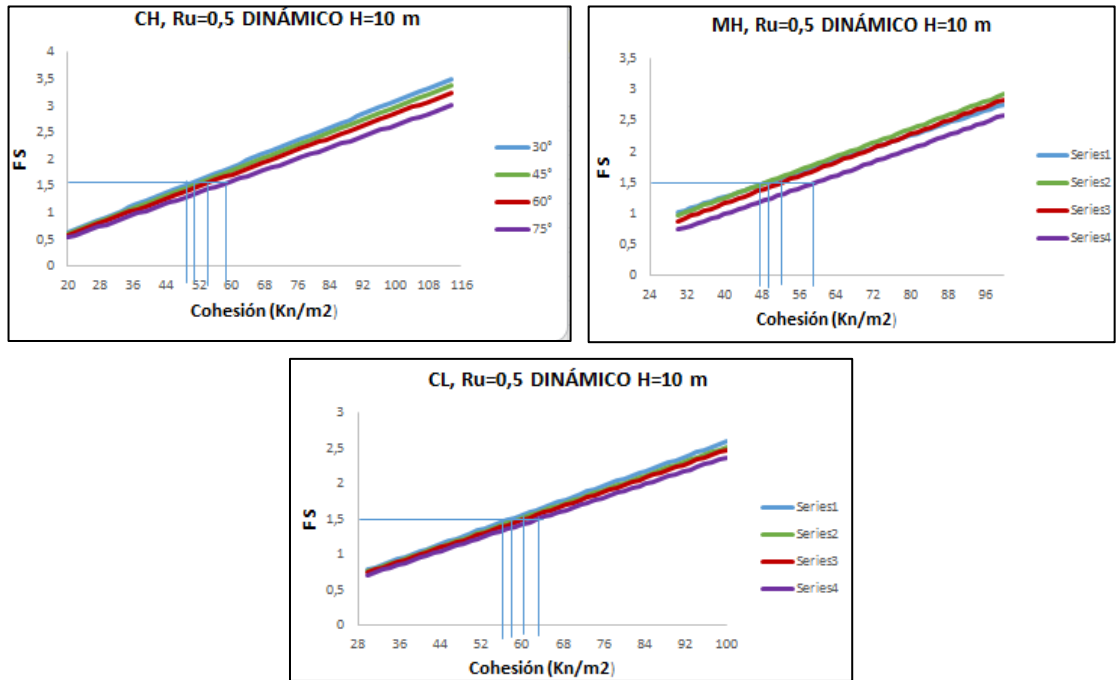












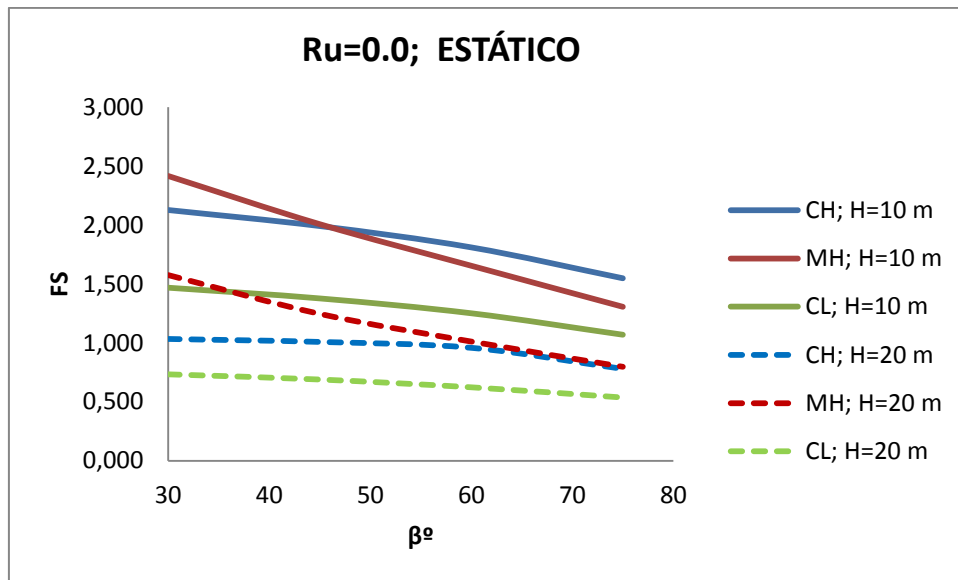
Fuente: propia

6. A través de este proceso se obtienen los resultados que se muestran en el anexo 4. Valores de cohesión para suelos expansivos.

8. ANALISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados y análisis de comportamiento de los taludes compuestos por suelos expansivos. Dichos resultados se asocian al valor de factor de seguridad, de los modelos diseñados en el software Slide®, de acuerdo a parámetros geomecánicos, descritos en el título 7.3. Selección de parámetros, encontrados en el libro Expansive Soils de Amer Ali Al-Rawas & Mattheus F.A. Goosen, de tal manera que los resultados se asocian a diferentes condiciones como los son dinámicos y estáticos; y cambios en el valor de ru; con respecto a alturas de 10 metros y 20 metros.

Figura 27. Factor de seguridad vs. ángulo de inclinación en condición estática para ru=0 en CH, MH y CL para alturas 10 m y 20 m.



Fuente Propia

En la Figura 27, se analiza un comportamiento la disminución del factor de seguridad (FS) al aumentar el ángulo de inclinación, en un 28%, para estado estático, dicho comportamiento difiere entre cada uno de los tres suelos

expansivos, siendo evidente que la arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL) tanto para la altura de 10m como para la de 20m, presenta un porcentaje de reducción 13,6% y 21,2%, en comparación a los demás tipos de suelos expansivos, debido a que tiene menor consistencia.

Por lo tanto el limo inorgánico de alta plasticidad (MH), es el material que a menor ángulo de inclinación muestra un factor de reducción de 59%, sin embargo su factor de seguridad disminuye con una representación de pendiente más inclinada a medida que aumenta el ángulo, mientras que la pendiente en arcillas es menor, al aumentar la inclinación del talud FS, disminuyendo de manera leve.

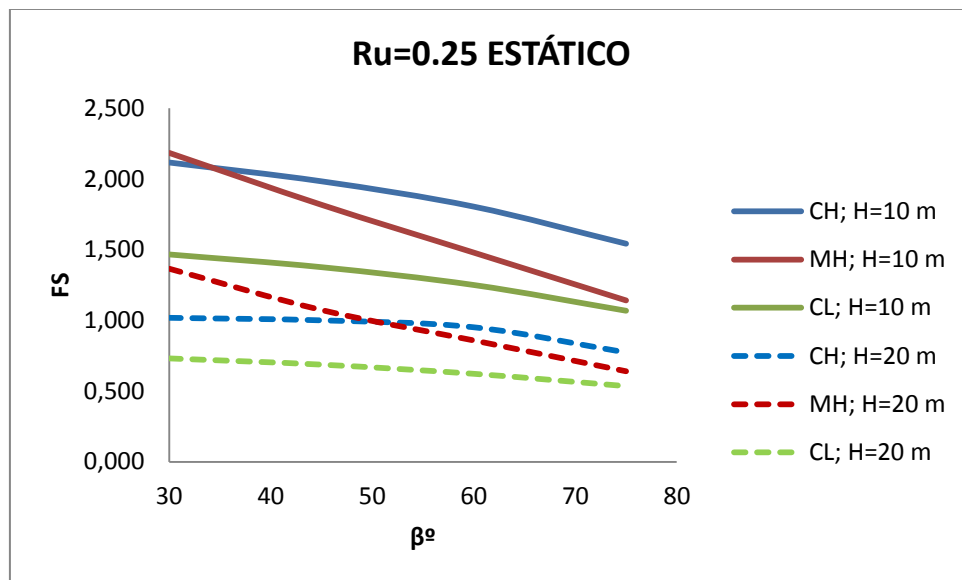
En la gráfica se evidencia que cerca de los 60°, de inclinación del talud para una altura de 20 m, MH y CH se comportan de manera similar con un factor de seguridad de 1.01 y 0.96, equivalente al 5.5%, respectivamente, lo que indica inestabilidad según la norma NSR-10 Título H; Tabla H.6.9-1 donde se especifica que la estabilidad general del sistema permanente en condición estático debe ser de 1.50. Mientras que en un talud de 10 m, cerca de los 45° de inclinación tanto el MH como el CH, presentan un comportamiento similar con un factor de seguridad de 2, cumpliendo el factor mínimo que rige la Norma NSR-10.

Al observar en la gráfica, la arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL), en un talud de 20 m, a cualquier ángulo de inclinación presenta inestabilidad aún en condición estática y sin afectación del parámetro ru.

Finalmente, en condiciones estáticas y sin afectación del parámetro ru, el material óptimo es CH, solo en un talud de 10 m de altura, puesto que a cualquier inclinación muestra estabilidad con un factor de reducción del 28%. Cumpliendo con el valor mínimo establecido en la NSR-10.

Es así como, es preciso aclarar que en cualquier caso el FS, es inversamente proporcional, al ángulo de inclinación y a la altura.

Figura 28. Factor de seguridad vs. ángulo de inclinación en condición estática para $ru=0.25$ en CH, MH y CL para alturas 10 m y 20 m.



Fuente Propia

En la Figura 28, se analiza un comportamiento en la disminución de FS al aumentar el ángulo de inclinación y el parámetro ru , dicho comportamiento difiere entre cada uno de los tres suelos expansivos, siendo evidente que para condición estática ninguno de los materiales analizados en un talud de altura de 20m cumplen con el factor de seguridad establecido por la NSR-10 correspondiente a 1.50, esto se debe a que la presencia de agua en el suelo representa con parámetro ru , el cual afecta de manera directa al talud.

Uno de los factores de gran importancia es la geometría que representa el talud

debido a que para un talud de 10 m hasta 20 metros, el factor de reducción oscila entre el 40% al 60%.

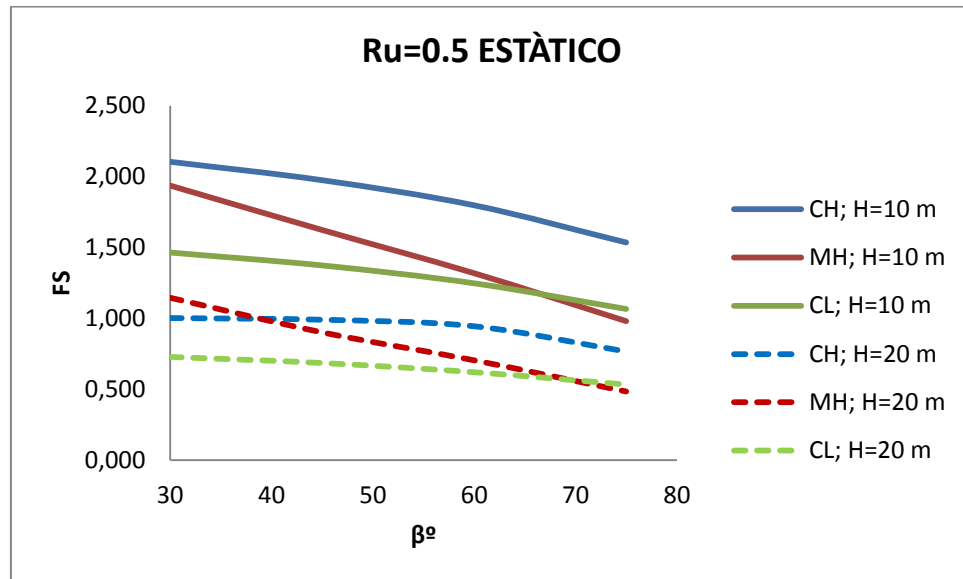
El limo inorgánico de alta plasticidad (MH) es el material que a menor ángulo de inclinación muestra el mejor comportamiento, sin embargo su factor de seguridad disminuye con una representación de pendiente más inclinada a medida que aumenta el ángulo; mientras que la pendiente en arcillas (C) es menor, al aumentar la inclinación del talud el FS, disminuye de manera leve. Este comportamiento continua siendo característico de este material, pues al ser comparado con la Figura 27, el material es inadecuado no solo al aumentar la inclinación sino también a la presencia de agua en el suelo.

En la gráfica se puede evidenciar que cerca de los 50°, de inclinación para una altura de 20 m, MH y CH se comportan con un valor de 1.7%, de manera diferente; quiere decir que su porcentaje restante su comportamiento es igual. Sin llegar a cumplir con el $FS=1.5$ que indica la NSR-10. Mientras que en un talud de 10 m, cerca de los 30° de inclinación tanto el MH como el CH presentan un comportamiento similar, cumpliendo con $FS=2.1$.

Finalmente, en condiciones estáticas y con $ru=0.25$, el material óptimo es CH, sólo en un talud de 10 m de altura, puesto que a cualquier inclinación muestra estabilidad, modificado con el 28% de probabilidad, Cumpliendo con el valor mínimo establecido en la NSR-10.

Entonces, es preciso aclarar que en cualquier caso FS, inversamente proporcional al ángulo de inclinación, a la altura y al ru.

Figura 29. Factor de seguridad vs. ángulo de inclinación en condición estática para $ru=0.50$ en CH, MH y CL para alturas 10 m y 20 m.



Fuente Propia

En la Figura 29, se analiza un comportamiento en la disminución de FS, al aumentar el ángulo de inclinación y en condición crítica de saturación con $ru=0.5$, dicho comportamiento difiere entre cada uno de los tres suelos expansivos, siendo evidente que para condición estática ninguno de los materiales analizados en un talud de altura de 20m, cumple con el factor de seguridad establecido por la NSR-10 correspondiente a 1.50, esto se debe a que la presencia de agua en el suelo afecta de manera directa al talud y al comportamiento mecánico del suelo.

El limo inorgánico de alta plasticidad (MH), es el material que a menor ángulo de inclinación muestra el mejor comportamiento, sin embargo, continúa siendo significativo que su factor de seguridad disminuye con una representación de

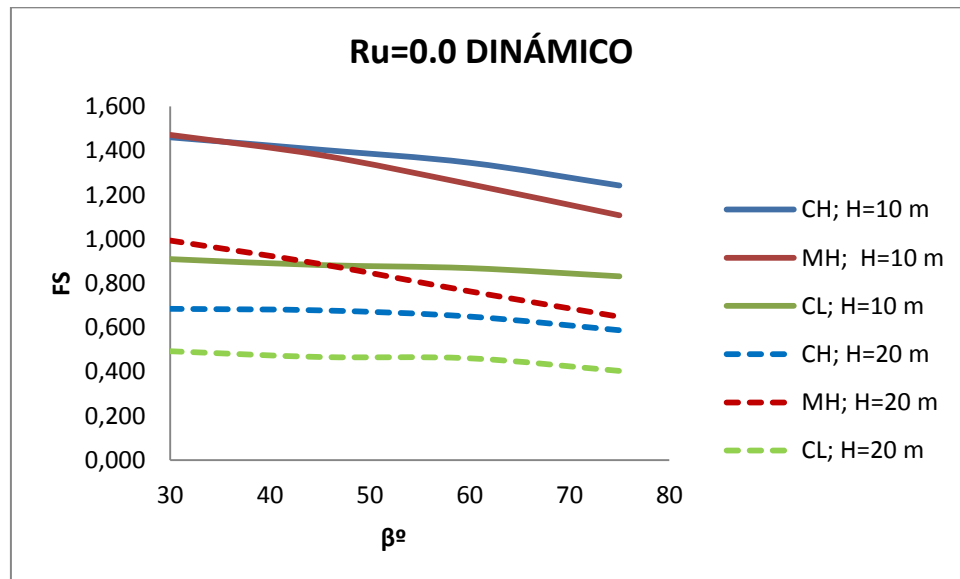
pendiente más inclinada a medida que aumenta el ángulo, el material genera condiciones inadecuadas no solo al aumentar la inclinación, sino también a la presencia de agua en el suelo. En donde se evidencia que para un CH, con presencia de $ru=0.0$ hasta $ru=0.5$, su factor de reducción se ve modificado en un 1%, mientras que para MH, da un valor de 19.82% y para un CL de 0.1%.

Cabe resaltar que cerca de los 40° , de inclinación para una altura de 20 m, MH y CH, se comportan de manera similar con un $FS=1.00$, lo que indica estabilidad pero no cumple con el $FS=1.5$ que indica la NSR-10. Mientras que en un talud de 10 m, cerca de los 70° , de inclinación tanto el MH como el CL presentan un comportamiento similar con $FS=1.25$. A partir de éste último análisis es importante aclarar que el MH ya no se relaciona con el comportamiento del CH sino del CL.

Finalmente, en condiciones estáticas y condición crítica de $ru=0.5$, el material óptimo sigue siendo CH, como en los casos anteriores, pero solo en un talud de 10 m de altura, puesto que a cualquier inclinación muestra estabilidad con factores de reducción que no cambian bruscamente, si no que oscilan entre el valor de 33.8% hasta 33.2% . Cumpliendo con el valor mínimo establecido en la NSR-10.

Todo lo descrito anteriormente indica que en cualquier caso, se analiza, que el FS, es inversamente proporcional al ángulo de inclinación, a la altura y al ru .

Figura 30. Factor de seguridad vs. ángulo de inclinación en condición dinámica para $r_u=0.00$ en CH, MH y CL para alturas 10 m y 20 m.



Fuente Propia

En la Figura 30, se analiza un comportamiento en la disminución del factor de seguridad (FS), al aumentar el ángulo de inclinación, dicho comportamiento difiere entre cada uno de los tres suelos expansivos, siendo evidente que para condición dinámica con un coeficiente de aceleración sísmica de 0.25, descrito en la selección de valores de sismo (ítem 7.3.2), del presente proyecto, ninguno de los materiales analizados en un talud de altura de 20m, ni el CL del talud de 10 m de altura cumplen con el factor de seguridad establecido por la NSR-10, correspondiente a 1.05, esto se debe a que la presencia de sismo afecta de manera directa al talud.

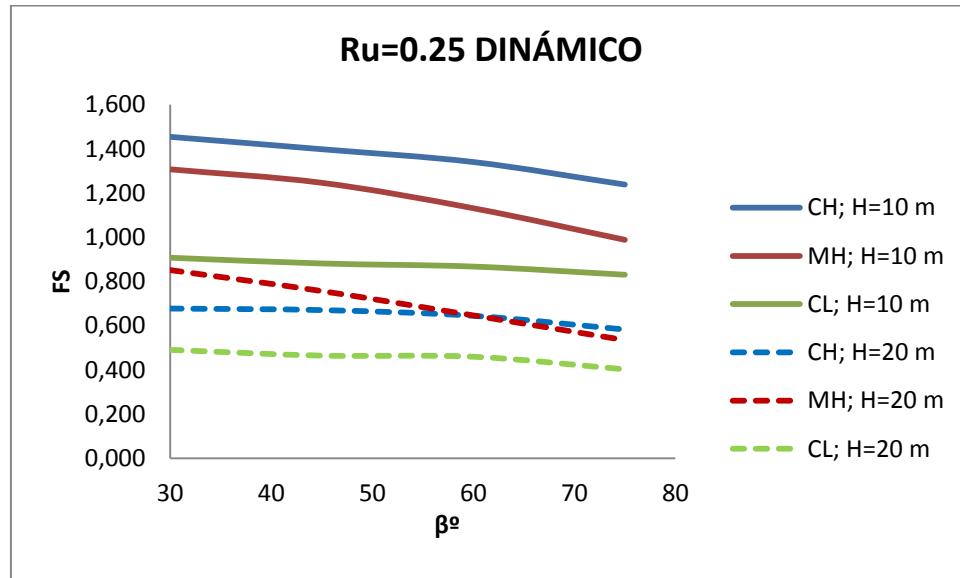
El MH, es el material que a menor ángulo de inclinación de 51° , en condiciones dinámicas muestra el mejor comportamiento, sin embargo, continúa siendo significativo que su factor de seguridad disminuye con una representación de pendiente más inclinada a medida que aumenta el ángulo, el material presenta comportamientos mecánicos débiles, no solo al aumentar la inclinación sino también a la presencia de un sismo., lo cual se evidencia en el 18.7%, con $ru=0.0$ y se evidencia en $ru=0.5$ con un porcentaje de 66.9%.

De tal manera se evidencia que a los 45° , de inclinación para el MH en un talud de altura de 20 m y un CL con un talud de 10 m de altura, se comportan de manera similar comparándolo con una diferencia del 0.8%, de tal manera que a pesar de sus diferencias, dichos factores le generan inestabilidad a el talud. Por lo tanto para un ángulo de inclinación de 30° y una altura 10 m, su inferencia con respecto al factor de seguridad es del 1%, cumpliendo así para los valores descritos en la matriz de resultados con la NSR-10.

Finalmente, en condiciones dinámicas, el material óptimo sigue siendo CH, como en los casos anteriores ya que cumple con el 31.3%, pero solo en taludes de 10 m de altura, puesto que a cualquier inclinación muestra estabilidad con FS entre 1.242 y 1.46. Cumpliendo con el valor mínimo establecido en la NSR-10.

Todo ello indica que en cualquier caso, se analiza que FS, es inversamente proporcional al ángulo de inclinación y a la altura aun en condiciones dinámicas.

Figura 31. Factor de seguridad vs. ángulo de inclinación en condición dinámica para $r_u=0.25$ en CH, MH y CL para alturas 10 m y 20 m.



Fuente Propia

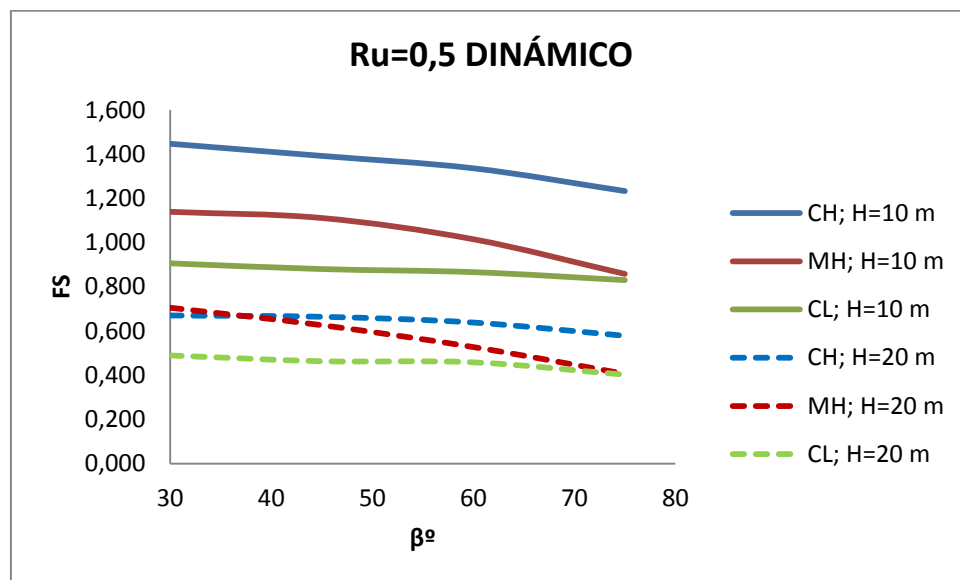
En la Figura 31, se analiza un comportamiento inadecuado en la disminución del factor de seguridad (FS) al aumentar el ángulo de inclinación, dicho comportamiento difiere entre cada uno de los tres suelos expansivos, siendo evidente que para condición dinámica, y presencia de agua en el suelo ninguno de los materiales que se analizan en un talud de altura de 20m, ni el CL del talud de 10 m de altura cumple con el factor de seguridad establecido por la NSR-10 correspondiente a 1.05, esto se debe a que la presencia de sismo y de agua en el suelo afecta de manera directa al talud, teniendo en cuenta que el factor de reducción para un CH, es de 50,5% en condiciones de 75° de inclinación, mientras que para MH es mayor pues es de 62.8%, y para el CL, de 50.4%.

De esta manera se observa que a los 60° de inclinación para el MH y el CL en un talud de 20 m de altura, se comportan de manera similar con un factor de

reducción de 25.6%, lo que indica inestabilidad. Dicha inestabilidad se presenta para todos los materiales en un talud de 20 m de altura y en una altura de 10 m, para los CL.

Finalmente, en condiciones dinámicas, el material óptimo continúa siendo CH, como en los casos anteriores, pero solo en un talud de 10 m de altura, puesto que frente a cualquier ángulo de inclinación muestra estabilidad con FS, entre 1.238 y 1.454. Cumpliendo con el valor mínimo establecido en la NSR-10. Sin embargo el MH, también se comporta de manera adecuada hasta inclinaciones de 60°, puesto que bajo estas condiciones presenta FS entre 1.131 y 1.307.

Figura 32. Factor de seguridad vs. ángulo de inclinación en condición dinámica para $ru=0.50$ en CH, MH y CL para alturas 10 m y 20 m.



Fuente Propia

En la Figura 32, se analiza un comportamiento inadecuado en la disminución del factor de seguridad (FS) al aumentar el ángulo de inclinación, dicho

comportamiento difiere entre cada uno de los tres suelos expansivos, siendo evidente que para condición dinámica y presencia de agua en el suelo ninguno de los materiales analizados en un talud de altura de 20m, ni el CL del talud de 10 m de altura cumplen con el factor de seguridad establecido por la NSR-10, esto se debe a que la presencia de sismo y de agua en el suelo afecta de manera directa al talud, siendo el factor de reducción para las arcillas cercano al 1%, mientras que para los limos da superior al 20%.

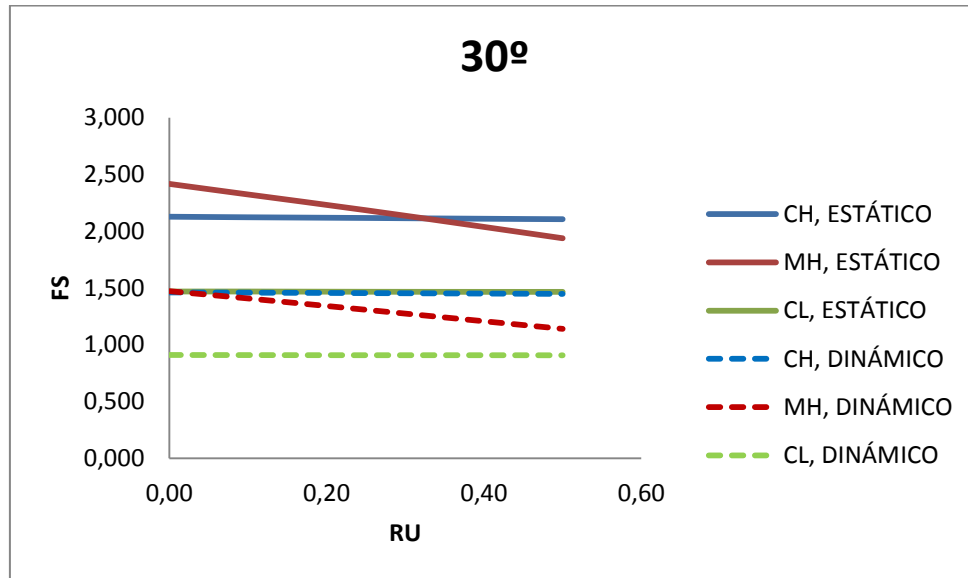
Es así, como se puede observar que cerca de los 40° de inclinación para el MH y el CL en un talud de 20 m de altura, se comportan de manera similar con un porcentaje igual de 44.7%, lo que con lleva a que el comportamiento mecánico del suelo no es igual y genera inestabilidad. Dicha inestabilidad se presenta para todos los materiales en un talud de 20 m de altura y el CL en una altura de 10 m.

En condiciones dinámicas, el material con las mejores características se suelo es el CH, como en todos los casos mencionados anteriormente, pero solo en un talud de 10 m de altura, puesto que frente a cualquier ángulo de inclinación muestra estabilidad con FS entre 1.233 y 1.447. Sin embargo el MH también se comporta de manera adecuada hasta inclinaciones de 45°, puesto que bajo estas condiciones presenta FS entre 1.111 y 1.139.

Es así como se concluye que FS, es inversamente proporcional al ángulo de inclinación, a la altura y al ru en condición dinámica y estática al ser comparado entre los modelos con las diferentes condiciones de sismo.

Es evidente la influencia que tiene la presencia de agua en los suelos expansivos, a continuación se presenta un análisis del comportamiento de los suelos ante la variación del parámetro ru para taludes con una altura de 10m, con el fin de analizar cuál de estos materiales se ve más afectado por dicho parámetro.

Figura 33. Factor de seguridad vs. ru en condición estática y dinámica para ángulo 30° y altura de 10 m en CH, MH y CL



Fuente Propia

De la Figura 33, la arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL) describe un comportamiento constante que disminuye el factor de seguridad (FS) de manera insignificante al ser alterado con diferentes valores de ru entre 0 y 0.5, con factores de reducción de 39.2% hasta 32.8% desde 30° de inclinación hasta 75°, respectivamente, cumpliendo con el factor de seguridad descrito en la NSR-10 (1.5 en condición estática). A diferencia del limo inorgánico de alta plasticidad (MH) que aun presentando disminución en el factor de seguridad a medida que aumenta el parámetro ru cumple con FS entre 2.416 y 1.937. Por otro lado, la arcilla inorgánica de alta plasticidad (CH) disminuye FS de 2.127 a 2.105 a medida que aumenta el parámetro ru.

A partir de lo mencionado, es claro que el factor de seguridad es inversamente proporcional al parámetro ru, puesto que a mayor presencia de agua en el suelo

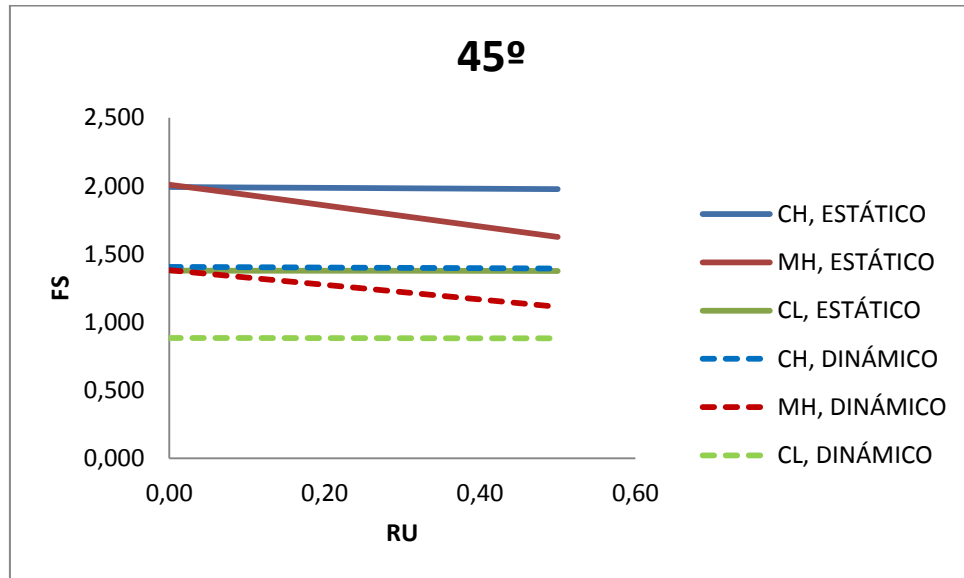
menor factor de seguridad, el cual se hace evidente en el cambio que se presenta para los diferentes materiales, que como ejemplo se cita del CH, que para un ángulo de 30° , 10 metros de altura con $r_u=0$ hasta 0.5, brinda un factor de reducción del 1.034%.

Se evidencia que el CH, tiene un comportamiento constante frente al cambio del factor r_u , valores que en condiciones dinámicas cumplen con respecto al valor brindado en la norma sismo resistente Colombiana, que como límite se establece a 1,05; pues los valores del FS, oscilan entre 1.460 hasta 1.447, que comparado con el material de MH, para un ángulo de 30° , la diferencia está en un 13.06%, mientras que para el CL, es de 30.9%.

El CL, el FS, es de 0.909 hasta 0.906, donde el $r_u=0.0$ y $r_u=0.5$; teniendo posibilidades altas de falla con respecto a los materiales CH y MH, siendo afectado cada uno de los suelos por la condición dinámica, que hace a los materiales propensos para que ocurra fenómenos por remoción en masa.

En conclusión, para condición estática con inclinación de 30° y una altura de 10 m todos los materiales son óptimos, siendo MH el mejor de ellos, representado en porcentajes de 19.82% hasta el 39.14%. Mientras que en dinámico el CL. No cumple en ningún momento con los parámetros establecidos por la norma sismo resistente, mientras que los otros materiales si, hasta cierto ángulo de inclinación como se especifica en el anexo 3. Modelación adecuada para taludes compuestos por suelos expansivos.

Figura 34. Factor de seguridad vs. ru en condición estática y dinámica para ángulo 45° y altura de 10 m en CH, MH y CL



Fuente Propia

De la Figura 34, la arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL), describe un comportamiento constante que disminuye el factor de seguridad a medida que aumenta el contenido de agua en el suelo, al igual que el CH y MH.

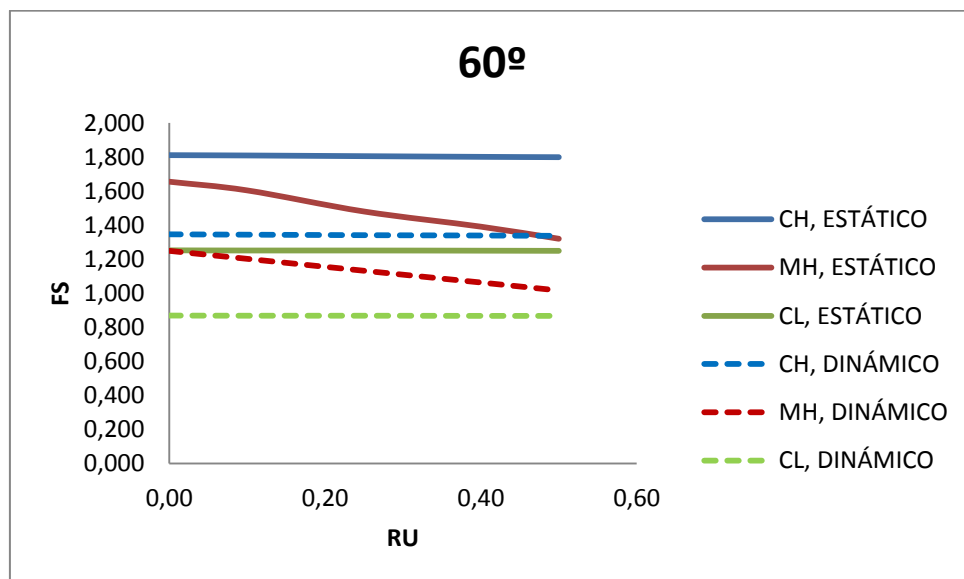
De tal manera que para el material CH, los valores de $ru=0.0$, entre el 1% al 2.9%, esto se debe a que la modificación que le pueda llegar a generar el agua al suelo es mínima, frente al resto de materiales, pues en el MH, da un valor del 30%. Lo cual indica, que existe un paso rápido del agua por las partículas del suelo, generando así que en condición estática para una inclinación de 45° el CL no cumpla con respecto al factor de seguridad de la norma NSR-10, mientras que MH y CL si, siendo CH el material más óptimo para estas condiciones de talud.

Se infiere que al aumentar el ángulo a 45°, el factor de seguridad disminuye, siendo dicho valor directamente proporcional con el coeficiente ru, pues se

observa que para un talud que se encuentra compuesto por un CH, al aumentar el valor de ru, se ve afectado de una manera constante, debido a la composición del suelo y su conformación de partículas, lo que no ocurre con el MH, que presenta una pendiente más alta con respecto a CH y CL.

Por lo tanto al observar los parámetros que tiene en cuenta la norma sismo resistente colombiana, del valor mínimo que es de 1.05, se observa que para los suelos CH y MH, cumple para el ángulo de 45°, mientras que para el suelo CL, no cumple con dicha condición., cuando presenta un fenómeno de sismo.

Figura 35. Factor de seguridad vs. ru en condición estática y dinámica para ángulo 60° y altura de 10 m en CH, MH y CL



Fuente Propia

De la Figura 35, se evidencia que CL, describe un comportamiento constante que disminuye FS en un 27%, al ser alterado con diferentes valores de ru entre 0 y 0.5, con FS entre 0.24% a 0.44% respectivamente, incumpliendo la NSR-10. A diferencia del MH que aun presentando disminución en el factor de seguridad a

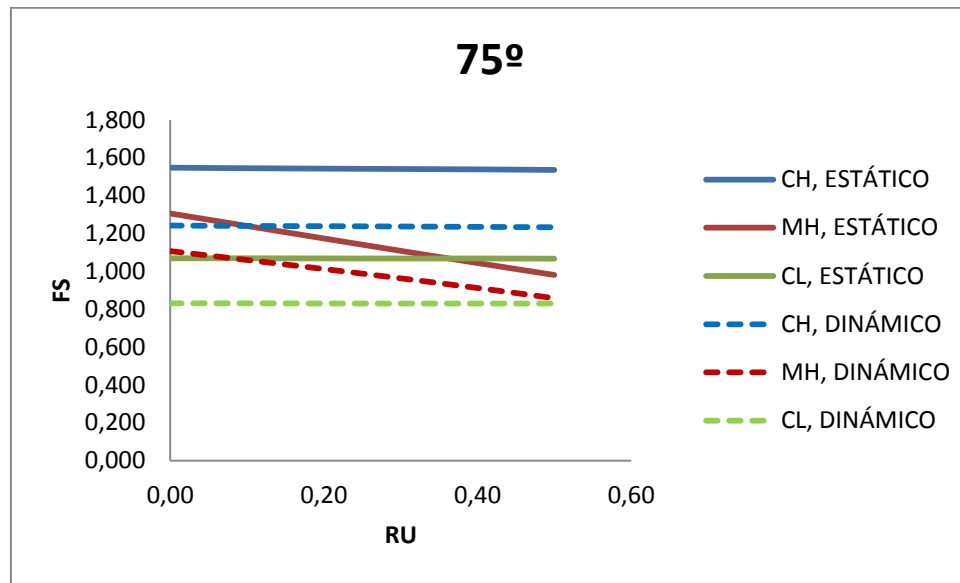
medida que aumenta el parámetro r_u , cumple con FS. Por otro lado en el suelo compuesto por CH disminuye en 1.4%, a medida que aumenta la condición de agua.

Se observa que el CH, presenta un comportamiento constante frente al cambio del factor r_u , valores que en condiciones dinámicas que cumplen con respecto al valor brindado en la norma sismo resistente Colombiana, que como límite se establece a 1,05.

De tal manera que el comportamiento para el MH, se evidencia que el FS es inversamente proporcional al factor r_u , debido que al aumentar las condiciones de r_u en el talud el FS, disminuye, cumpliendo con el valor mínimo descrito en NSR 10, hasta un r_u de 0.4.

En conclusión para condición estática con inclinación de 45° y una altura de 10 m solo el CH y MH cumplen con el factor siendo materiales óptimos para el diseño, siendo CH el mejor de ellos, en condición dinámico el CL, no cumple con el factor de seguridad, mínimo establecido, mientras que el CH, es un material óptimo para las diferentes condiciones establecidas, el MH, en cambio cumple con ángulos menores a 72° , con un $r_u=0.25$, mientras que en condiciones totalmente saturadas, cumple para ángulos de inclinación menores a 59° . como se evidencia en el anexo 3. modelación adecuada para taludes compuestos por suelos expansivos.

Figura 36. Factor de seguridad vs. ru en condición estática y dinámica para ángulo 75° y altura de 10 m en CH, MH y CL



Fuente Propia

En la figura 36, se evidencia que para condiciones estáticas, el FS, se cumple para el material de CH, mientras que para los otros materiales de MH y CL no cumple con las condiciones debido a que se encuentra por debajo de lo establecido que es de 1.5, con la altura de 10 m. De esta manera se evidencia en los tres materiales que el FS, es inversamente proporcional al ru, con cambios de 0,8% en el valor del ru=0 hasta un 1.5%, para un CH, mientras que para el MH, varia entre el 24,88% hasta el 37.34% y para un CL, la variación es de 0.18% a 0.25%, pues entre mayor es dicho coeficiente, menor es el factor de seguridad. Siendo afectado igualmente por el ángulo de inclinación y la geometría del talud.

Es así como se infiere que al aumentar el ángulo a 75°, el factor de seguridad disminuye, siendo el valor directamente proporcional con el coeficiente ru, pues se

observa que para un talud que se encuentra compuesto por un CH, al aumentar el valor de r_u , se ve afectado de una manera constante, debido a la composición del suelo y su conformación de partículas, lo que no ocurre con el MH, que presenta una pendiente más alta con respecto a CH y CL.

Por lo tanto al observar los parámetros que tiene en cuenta la norma sismo resistente colombiana, del valor mínimo que es de 1.05, cuando se encuentra amenazado por un factor de sismo, se observa que para los suelos CH, cumple para el ángulo de 75° , mientras que para el suelo MH, cumple hasta condiciones de $r_u = 0.1$, lo que indica que para condiciones de $r_u = 0.25, 0.4$ y 0.5 , no cumpliría con dicha condición, es así como se observa el CL, no cumple las condiciones mínimas para el factor de seguridad, en condiciones dinámicas.

Al realizar los diferentes modelos con las condiciones descritas se observa que el parámetro geomecánico que modifica el comportamiento de los suelos expansivos presentes en un talud, es la cohesión, por lo tanto se ejecuta sensibilización del parámetro, y se hace un análisis del comportamiento que presenta frente a cambios de geometría y parámetro r_u , de donde se observa que de los valores descritos en el anexo 4. Para un r_u establecido con una altura y ángulos, seleccionados se debe tener una cohesión mayor al valor presentado en la tabla, pues se tiene en cuenta que a partir de un factor de seguridad en condiciones estáticas 1.5, los valores de cohesión deben estar por encima de dicho valor, mientras que en condiciones dinámicas deben estar por encima del valor de 1.05; lo que indica que entre mayor sea el valor de cohesión a los valores determinados, mayor será la atracción y unión de las partículas del suelo evitando así que se presente un proceso de remoción en un talud, aumentando respectivamente el factor de seguridad.

9. CONCLUSIONES

Se definieron los parámetros geomecánicos de los materiales que se analizan en cada una de las modelaciones (arcillas y limos), a partir de la información descrita en los antecedentes del presente trabajo de grado. Gracias al libro de Amer Ali Al-Rawas & Mattheus F.A. Goosen. Expansive Soil. En Effect of remolding techniques on soil swelling and shear strength properties. Londres: Taylor & Francis e-Library, 2006, a partir del cual se obtiene detalle sobre los comportamientos de suelos expansivos en taludes, de tal manera que se ejecutan diferentes modelaciones en las que se tienen en cuenta cambios en la geometría, con el fin de comparar los factores de seguridad a través de gráficas, de las cuales se concluyó:

El factor de seguridad es inversamente proporcional al ángulo de inclinación, a la altura y al r_u en condición dinámica y estática; de donde se observa detalladamente la influencia de la altura en el diseño del talud en el cual se identifica que para alturas de 20 m, conformado por este tipo de suelos, bajo esta condiciones de modelación, los factores de seguridad tanto en condiciones dinámicas como estáticas están por debajo del valor descrito en la Norma Sismo Resistente Colombiana, título H, tabla H.6.9-1, en donde se especifica que la estabilidad general del sistema permanente en condición estática debe ser de 1.50 y para condición dinámica 1.05, sin embargo para los taludes con alturas de 10 m se identifica que los suelos compuestos por arcilla inorgánica de alta plasticidad (MH) son materiales con excelentes comportamiento en condición estática y dinámica, mientras que el limo inorgánico de alta plasticidad es óptimo en condiciones críticas con sismo y $r_u=0.5$ para inclinaciones de 45° o menores y con sismo y $r_u=0.25$ inclinaciones de 60° o menores.

La arcilla de alta plasticidad (CH) contiene una cohesión mayor, comparada a la de la arcilla de baja plasticidad (CL) y al limo de alta plasticidad (MH), lo que indica una mayor resistencia a la presencia de agua lo que genera mayor estabilidad en el talud, así mismo el CH por presentar un valor de límite líquido mayor es susceptible al cambio de estado de plástico a líquido, contrario a lo que sucede con el MH ya que su límite plástico es mayor al resto de los suelos debido a esto es susceptible al cambio de estado de semi-sólido a plástico. De igual manera, para que la arcilla de alta plasticidad cambie de estado es necesario que el suelo presente un mayor valor de $ru=0.5$, que en suelos expansivos este valor es hasta 0.67.

Para las modelaciones que se realizan en el presente proyecto se utiliza el software Slide®, el cual resulta de fácil manejo con respecto al análisis del factor de seguridad en diferentes condiciones de ru en estado dinámico y sismo. Así mismo el método utilizado (Bishop simplificado), es un método que a pesar de solo satisfacer el equilibrio de momentos y no cumplir con la totalidad de las ecuaciones de la estática presenta exactitud frente a los resultados que se obtienen en comparación al método ordinario. El cual utiliza las dovelas en donde se tiene en cuenta las fuerzas entre las mismas siendo el más utilizado para calcular el factor de seguridad de los taludes, la única restricción que presenta es que solo considera las superficies de falla circulares.

Con respecto al ángulo de inclinación en un talud, el mismo tiene una afectación directa del factor de seguridad; ya que a medida que la reconfiguración geométrica del talud aumenta, se genera una condición de inestabilidad directa con respecto a la geometría lo que se evidencia en las gráficas para un talud de 30° a 75° , respectivamente en un 28% en estado estático y un 16% en estado dinámico, para un MH, en estado estático es un factor de reducción de 59%, mientras que en dinámico es del 42% y para CL, es de 27% para dinámico y estático.

10.RECOMENDACIONES

Dentro de las recomendaciones se exponen las diversas limitaciones existentes en cuanto a parámetros geomecánicos que se usan en las modelaciones y los métodos para observar el comportamiento mecánico del suelo y el cálculo del factor de seguridad.

Para los parámetros geométricos de los taludes modelados, se recomienda el diseño de taludes de 45° a 60° dependiendo del espacio del terreno, ya que una mayor inclinación implica mayores costos y el talud se hace susceptible a sufrir procesos de remoción en masa. Así mismo se recomiendan alturas de 10 m para este tipo de suelos expansivos, ya que mostraron mejores factores de seguridad.

Cuando se tiene presencia de limos de alta plasticidad se hace necesario tener inclinaciones en los taludes menores a 67° con alturas de 10m y $R_u=0$, mientras que para un $R_u=0.25$ se recomienda hacer el diseño de un talud con una inclinación menor a 51° y en estado dinámico con una inclinación menor a 72° , y con un $R_u=0.5$ menor a 59° , con el fin de que cumpla con los criterios descritos en la Norma Sismo Resistente Colombiana, título H.

Para obtener el diseño de un talud en el presente proyecto de grado, se recomienda tener precisión en el suelo sobre el cual se vaya a diseñar debido a que se presenta los parámetros geomecánicos, para resultados de factores de seguridad que dependen por completo de la definición de los mismos, y al variarlos no se comportarán de la manera en que se analizó en el presente trabajo de grado. Esto se comprueba durante la modelación realizada debido a que se generan diferentes modelos con diferentes parámetros geomecánicos, no mencionados en el presente trabajo, pero si tenidos en cuenta para la selección de los mismos.

En la modelación de taludes del proyecto, se utilizó el método de Bishop Simplificado para la modelación en el software Slide®, de tal manera que la modelación queda abierta a la utilización de los diversos métodos existentes.

11. BIBLIOGRAFÍA

- AMER ALI AL-RAWAS & MATTHEUS F.A. GOOSEN. EXPANSIVE SOILS: Efectos en las técnicas de remoldeo en suelos expansivos, y propiedades de fuerza de cizallamiento. 2006. Pág. 132. 624.1'5136–dc22. ISBN10 0–415–39681–6.
- ASEFA. Patologías por arcillas expansivas. Naturaleza y comportamiento. [en línea]. <http://www.concretonline.com/index.php?option=com_content&id=3179&Itemid=27> . [Citado en 5 agosto del 2015].
- CINNA LOMNITZ, Las causas probables de la catástrofe sísmica del 19 de septiembre de 1985. Instituto de Geofísica, UNAM, Ciencia y desarrollo, septiembre/octubre 1988 Vol. XIV Núm. 82, CONACYT
- COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LAS ARCILLAS. [en línea] <<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/601/4/A4.pdf>> . [citado en 2 de enero del 2009]
- CRITERIO PARA CALIFICAR LOS SUELOS CON FINES URBANOS. [en línea]. < <http://es.slideshare.net/carlosjcamacho/presentacin-de-la-materia-3742687>> [citado en 3 de octubre del 2009]
- EL SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS. [en línea]. < ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s11.htm#83a> . [citado en 3 de noviembre del 2015]

- EXPLORACIÓN Y MUESTREO DE SUELOS. [en línea]. <
<http://expsuelos.blogspot.com> > [citado en 23 de Junio de 2015]
- HERNANDEZ; Yelena, Caracterización y análisis de la amenaza y vulnerabilidad Física por taludes y laderas inestables en la micro Cuenca de la quebrada Cay, Ibagué, Universidad del Tolima. Departamento del Tolima. Maestría en planificación y manejo ambiental de cuencas, 2013, pg. 119.
- INGS.PATRONE J. & PREFUMO J.E. La acción de los suelos expansivos sobre las cimentaciones, métodos de prevención y control. Pág. 1-16.[en línea]<http://www.um.edu.uy/_upload/_descarga/web_descarga_204_Accin_desuelosexpansivos.Año_2004>[citado en 5 de agosto del 2015]
- LEÓN SICARD; Tomas Enrique,. Estado del Recurso del Suelo. [en línea] <<http://www.unperiodico.unal.edu.co/dper/article/agroquimicos-envenenan-suelos-en-colombia.html>>. [Citado en 9 de noviembre de 2013].
- LÍMITES DE ATTERBERG: ÍNDICE DE PLASTICIDAD, FLUIDEZ, RETRACCIÓN[en línea]. <<http://uningenierocivil.blogspot.com.co/2011/03/limites-de-atterberg-indice-de.html>>. [citado en 9 de noviembre del 2015]
- MALAGÓN CASTRO, D.: Ensayo sobre tipología de suelos colombianos - Énfasis en génesis y aspectos ambientales.pg.371.
- NORMA COLOMBIANA SISMO RESISTENTE. Titulo A. Capitulo A.2. Zona de Amenaza Sísmica y movimientos sísmicos de diseño

- NORMA COLOMBIANA SISMO RESISTENTE. Título H. Capítulo H.5.Excavaciones y estabilidad de taludes.
- PARÁMETROS DE DIFERENTES TIPOS DE SUELOS. [En línea]. <<http://civilgeeks.com/2011/11/30/valores-referenciales-sobre-diferentes-propiedades-de-los-suelos/>>. [Citado en 11 de noviembre del 2015].
- RODRIGUEZ CASTIBLANCO; Edgar, Evaluación del Comportamiento Geomecánico de Arcillas en el Sector de Campoalegre – Ciudad de Barranquilla, Maestría en Ingeniería – Geotecnia, 2014, pg. 60.
- SEMANA NACIÓN, Noticia; Hay 22 cierres en vías nacionales y 47 regionales. [en línea]. <<http://www.semana.com/nacion/articulo.25> de abril del 2011>.[citado en 5 de agosto del 2015]
- 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 23 de Junio de 2015]
- VILLALAZ CARLOS CRESPO. Mecánica de suelos y cimentaciones. 5ta edición. Mexico, Limusa, 2004.ISBN 968-18-6489-1. [En línea]. <<http://uningenierocivil.blogspot.com.co/2011/03/limites-de-atterberg-indice-de.html>>. [citado en 9 de noviembre del 2015]

ANEXO 1

COMPARACIÓN DE FACTORES DE SEGURIDAD

		CH								MH								CL							
		MH				CL				CH				CL				MH				CH			
		ESTÁTICO		DINÁMICO		ESTATICO		DINAMICO		ESTÁTICO		DINÁMICO		ESTATICO		DINAMICO		ESTÁTICO		DINÁMICO		ESTATICO		DINAMICO	
ANGULO (º)	H(m)	RU=0,0	RU=0,5	RU=0,0	RU=0,5	RU=0,0	RU=0,5	RU=0,0	RU=0,5	RU=0,0	RU=0,5	RU=0,0	RU=0,5	RU=0,0	RU=0,5	RU=0,0	RU=0,5	RU=0,0	RU=0,5	RU=0,0	RU=0,5	RU=0,0	RU=0,5	RU=0,0	RU=0,5
30	10	13,6%	8,0%	0,8%	21,2%	30,9%	30,4%	37,7%	37,4%	13,6%	7,9%	0,7%	21,3%	39,2%	24,4%	38,2%	20,4%	39,2%	24,4%	38,2%	20,5%	30,9%	30,4%	37,7%	37,4%
	20	52,5%	17,8%	1,7%	20,2%	29,0%	27,3%	28,1%	27,0%	52,5%	14,3%	45,2%	5,2%	53,5%	36,4%	50,5%	30,6%	53,4%	36,4%	50,5%	30,6%	29,0%	27,3%	28,1%	27,0%
45	10	0,8%	17,8%	1,7%	20,1%	30,8%	30,4%	37,2%	36,8%	0,8%	17,8%	1,7%	20,2%	31,3%	15,4%	36,1%	20,7%	31,3%	15,4%	36,1%	20,8%	30,8%	30,4%	37,2%	36,8%
	20	23,6%	9,0%	31,0%	5,7%	31,6%	30,8%	31,2%	30,3%	23,6%	8,9%	31,0%	5,7%	44,0%	23,9%	47,5%	26,0%	44,7%	24,0%	47,5%	26,0%	31,6%	30,8%	31,2%	30,3%
60	10	8,6%	26,6%	7,2%	24,0%	30,8%	30,5%	35,5%	35,2%	8,6%	26,6%	7,2%	24,0%	24,3%	5,4%	30,5%	14,7%	24,4%	5,4%	30,5%	14,7%	30,8%	30,6%	35,5%	35,2%
	20	5,5%	25,3%	17,6%	17,3%	35,0%	34,3%	29,1%	28,2%	5,5%	25,4%	17,6%	17,4%	38,4%	11,9%	39,7%	13,1%	38,4%	11,9%	39,7%	13,1%	34,9%	34,3%	29,1%	28,2%
75	10	15,6%	36,1%	10,9%	30,4%	30,9%	30,5%	33,1%	32,7%	15,6%	36,1%	1,9%	3,4%	18,2%	8,8%	24,9%	3,3%	18,2%	8,8%	24,9%	3,3%	30,9%	30,5%	33,1%	32,7%
	20	2,3%	36,7%	10,4%	29,8%	31,2%	30,3%	31,3%	30,4%	2,3%	36,8%	10,4%	29,8%	32,8%	10,1%	37,8%	1,0%	32,8%	10,1%	37,8%	1,0%	31,2%	30,4%	31,4%	30,5%
		CAMBIO DE RU						DE ESTÁTICO A DINÁMICO						ALTURA DE 10 metros A 20 metros											
		CH		MH		CL		CH		MH		CL		CH		MH		CL							
		RU=0,0 A RU=0,5		RU=0,0 A RU=0,5		RU=0,0 A RU=0,5		RU=0,0		RU=0,5		RU=0,0		RU=0,5		ESTÁTICO		DINÁMICO							
ANGULO (º)	H(m)	ESTÁTICO	DINÁMICO	ESTÁTICO	DINÁMICO	ESTÁTICO	DINÁMICO	RU=0,0	RU=0,5	RU=0,0	RU=0,5	RU=0,0	RU=0,5	ESTÁTICO	DINÁMICO	ESTÁTICO	DINÁMICO	ESTÁTICO	DINÁMICO						
30	10	1,0%	0,9%	19,82%	22,50%	0,20%	0,33%	31,3%	31,3%	41,3%	41,2%	38,0%	38,1%	52,8%	46,0%	52,7%	52,1%	50,3%	46,2%						
	20	2,9%	2,0%	13,33%	29,00%	1,91%	0,61%	33,8%	33,2%	36,9%	38,5%	32,9%	32,9%												
45	10	0,8%	0,9%	19,08%	19,40%	0,22%	0,22%	29,5%	29,5%	31,2%	31,6%	35,9%	32,4%	50,2%	47,3%	55,1%	54,6%	50,2%	47,5%						
	20	1,7%	1,9%	27,60%	29,40%	0,43%	0,64%	32,8%	34,0%	28,8%	36,3%	36,0%	32,5%												
60	10	0,7%	0,7%	20,25%	18,60%	0,24%	0,23%	25,7%	25,7%	24,5%	20,0%	30,6%	30,6%	47,8%	52,6%	57,4%	57,8%	50,3%	47,2%						
	20	1,4%	1,7%	30,26%	30,93%	0,32%	0,44%	32,3%	32,5%	24,5%	25,2%	26,2%	26,2%												
75	10	0,8%	0,7%	24,88%	22,49%	0,18%	0,10%	19,8%	20,0%	15,2%	12,4%	22,3%	22,2%	50,5%	53,5%	62,8%	63,3%	50,4%	51,6%						
	20	1,5%	1,5%	39,14%	37,34%	0,37%	0,25%	24,6%	24,6%	18,7%	16,3%	24,8%	24,7%												

Fuente: propia

ANEXO 2

PORCENTAJE DE CAMBIO DE FACTOR DE SEGURIDAD EN RELACIÓN A LA GEOMETRÍA

CON INCLINACIONES DE 30° A 75°							
		CH		MH		CL	
H (m)	ESTÁTICO	DINÁMICO	ESTÁTICO	DINÁMICO	ESTÁTICO	DINÁMICO	
10	28%	16%	59%	42%	27%	27%	
20	26%	16%	69%	59%	9%	18%	

Fuente: propia

ANEXO 3

MODELACIÓN ADECUADA PARA TALUDES COMPUESTOS POR SUELOS EXPANSIVOS

		CH																							
		ESTÁTICO												DINÁMICO											
		RU=0.0				RU=0,25				RU=0,5				RU=0.0				RU=0,25				RU=0,5			
ALTURA(m)	ANGULOS (º)	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75
10	CUMPLE	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	NO CUMPLE																								
20	CUMPLE																								
	NO CUMPLE	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		MH																							
		ESTÁTICO												DINÁMICO											
		RU=0.0				RU=0,25				RU=0,5				RU=0.0				RU=0,25				RU=0,5			
ALTURA(m)	ANGULOS (º)	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75
10	CUMPLE	X	X	<66,9º		X	<59º			X	<51º			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	<72º	X
	NO CUMPLE				>67º			>60º	X			>52º	X											>73º	
20	CUMPLE																								
	NO CUMPLE	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		CL																							
		ESTÁTICO												DINÁMICO											
		RU=0.0				RU=0,25				RU=0,5				RU=0.0				RU=0,25				RU=0,5			
ALTURA(m)	ANGULOS (º)	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75
10	CUMPLE																								
	NO CUMPLE	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
20	CUMPLE																								
	NO CUMPLE	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Fuente: propia

ANEXO 4

VALORES DE COHESIÓN PARA SUELOS EXPANSIVOS

ESTÁTICA		RU				RU				RU				RU				RU			
		0				0,1				0,25				0,4				0,5			
		ANGULOS (°)				ANGULOS (°)				ANGULOS (°)				ANGULOS (°)				ANGULOS (°)			
		30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75
CH	C(Kn/m ²)	32,5	35,2	39	45	33	36	39	46	36	38	43	50	34	36	39,5	46,5	33,5	36	40	46,5
MH	C(Kn/m ²)	15	23,5	31	42	23	32	39	44	20	27	36	47,5	23	30	38	51	22,3	31	40	52
CL	C(Kn/m ²)	39	42	49	58	36	39	42	50	33	35	39	45	36	38,5	42,5	49,5	35,9	38,9	43	49,5
DINÁMICA		RU				RU				RU				RU				RU			
		0				0,1				0,25				0,4				0,5			
		ANGULOS (°)				ANGULOS (°)				ANGULOS (°)				ANGULOS (°)				ANGULOS (°)			
		30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75
CH	C(Kn/m ²)	34	35,3	36	39,2	34	35	36	39,1	34	35,2	37	40	34	35,3	37	40	34	35,3	37	40
MH	C(Kn/m ²)	0	0	0	32,8	0	0	30	34,7	0	0	32	37,5	0	31	34,8	40,8	30	33	36	42,5
CL	C(Kn/m ²)	40,4	42	42,4	44,3	40,4	42	42,5	44,2	40	41,8	42	44,2	40,5	42	42,4	44,2	40,8	41,9	42	44,2