



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

# PROTECCIÓN DE TALUDES UTILIZANDO EL MÉTODO DE SOIL NAILING

**José Julio Pantoja Prera**  
Asesorado por: Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol

Guatemala, enero de 2008.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROTECCIÓN DE TALUDES UTILIZANDO EL MÉTODO DE SOIL  
NAILING**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR:

**JOSÉ JULIO PANTOJA PRERA**  
ASESORADO POR: INGA. DILMA YANET MEJICANOS JOL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, ENERO DE 2008

**UNIVERSIDAD SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

<b>DECANO</b>	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
<b>VOCAL I</b>	Inga. Glenda Patricia García Soria
<b>VOCAL II</b>	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
<b>VOCAL III</b>	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
<b>VOCAL IV</b>	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
<b>SECRETARIA</b>	Inga. Marcia Ivonne Veliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

<b>DECANO</b>	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. Ronald Estuardo Galindo Contreras
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
<b>EXAMINADORA</b>	Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
<b>SECRETARIA</b>	Inga. Marcia Ivonne Veliz Vargas

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**PROTECCIÓN DE TALUDES UTILIZANDO EL MÉTODO DE SOIL NAILING,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, el 01 de octubre de 2007.

  
José Julio Pantoja Prera



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Guatemala, 24 de octubre de 2007.

INGENIERO  
FERNANDO BOITON  
DIRECTOR DE ESCUELA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Por este medio hago constar que he revisado la tesis "PROTECCIÓN DE TALUDES UTILIZANDO EL MÉTODO DE SOIL NAILING", elaborada por José Julio Pantoja Prera. Luego de haber cumplido con todos los requisitos que solicité, APRUEBO dicho trabajo de graduación.

Sin otro particular, le saludo muy atentamente.



DILMA YANET MEJICANOS JOL

INGENIERA CIVIL  
COLEGIADA 5947  
ASESORA



FACULTAD DE INGENIERÍA



Guatemala, 13 de noviembre de 2,007

Ingeniero  
Fernando Amílcar Boiton Velásquez  
Director Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería

Señor Director:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación **"PROTECCIÓN DE TALUDES UTILIZANDO EL MÉTODO DE SOIL NAILING"**, realizado por el estudiante universitario **José Julio Pantoja Prera**, quien contó con la asesoría de la Inga. Dilma Mejicanos Jol.

Considero que el trabajo desarrollado por el estudiante **Pantoja Prera**, cumple con los propósitos para los cuales fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Agradezco a usted su amable atención.

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
Coordinador Área de Materiales y Construcciones Civiles



Cc archivo

## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios:**

Por darme la vida y las herramientas para poder alcanzar las metas que me he trazado.

### **Mis padres:**

#### **Hilda Patricia Prera Leiva**

Porque con su amor, ejemplo y gran sabiduría he logrado estar hoy donde estoy.

#### **Julio Eduardo Pantoja Ramírez**

Por ser ese ángel que siempre me guía desde el cielo.

### **Mis hermanos:**

#### **Luis Eduardo**

Por ser mí confidente y mejor amigo.

#### **Andrea**

Por ser mi apoyo en todo momento y siempre alentarme a seguir adelante.

#### **Fernando**

Por qué aparte de ser mí primo es como mi hermano y amigo.

### **Mis abuelitos:**

#### **Julia Alba Leiva Morales**

#### **Luis Alfonso Prera Sierra**

Por ser la base de una familia muy unida y con muchos valores.

**Mi familia:**

Porque siempre han estado ahí para apoyarme cuando más los he necesitado.

**La Universidad de San Carlos:**

Por darme los conocimientos fundamentales para poder empezar mi vida profesional.

**Mi asesora:****Inga. Dilma Yanet Mejicanos Yol**

Por la ayuda y enseñanzas que siempre me ha brindado como estudiante y en mis inicios como profesional.

**Rodio-Swissboring Guatemala**

Por abrirme la puerta a esta magnífica institución apoyándome y brindándome su amistad.

**Mis amigos:**

Cálalo, Martin (el chino), Meyling, Astrid, Diego (el colocho), El Papa, Jorge Luis, Julito, Ligia, Luis Miguel, Oliver (Bobby), gracias a todos por su apoyo.

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	<b>V</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>VII</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>XI</b>
<b>JUSTIFICACIÓN</b>	<b>XIII</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>XV</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>XVIII</b>
<b>1. GENERALIDADES</b>	<b>1</b>
1.1. Talud	1
1.2. Partes constitutivas de un talud	1
1.2.1.    Altura	1
1.2.2.    Pie	2
1.2.3.    Cabeza	2
1.2.4.    Pendiente	2
1.3. Inestabilidad de un talud	2
1.4. Falla de un talud	3
1.5. Superficie de rotura o de falla	4
1.6. Estabilidad de un talud	4
<b>2. CLASIFICACIÓN DE TALUDES</b>	<b>5</b>
2.1. Taludes naturales	5
2.2. Taludes artificiales	5

2.3. Taludes infinitos	6
2.4. Taludes finitos	6
<b>3. FALLAS DE UN TALUD</b>	<b>7</b>
3.1. Causas	7
3.2. Factores que provocan las fallas	8
3.3. Etapas en el proceso de falla	8
3.4. Forma de fallas de un talud	9
3.4.1. Caída	9
3.4.2. Volcamiento	10
3.4.3. Deslizamiento rotacional	11
3.4.4. Deslizamiento traslacional	13
3.4.5. Extensión lateral	14
3.4.6. Flujos	15
<b>4. ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE UN TALUD</b>	<b>17</b>
4.1. Factor de seguridad (FS)	17
4.2. Equilibrio límite	18
<b>5. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UN TALUD</b>	<b>21</b>
5.1. Taludes infinitos	22
5.2. Taludes finito	22
5.2.1. Método de Fellenius	22
5.2.2. Método de Bishop	24

<b>6. MÉTODO DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES</b>	<b>27</b>
6.1. Corrección externa	27
6.2. Corrección interna a la masa inestable	27
6.2.1. Modificaciones del campo de flujo	27
6.2.2. Inclusiones	27
6.2.3. Retenciones	27
6.2.4. Revegetación-reforestación	28
6.2.5. Estabilización mecánica	28
<b>7. MÉTODO DE SOIL NAILING</b>	<b>33</b>
7.1. Definición	33
7.2. Ventajas y desventajas del Soil Nailing	34
7.3. Utilización	36
7.4. Composición de un Soil Nailing	38
7.5. Análisis del talud utilizando Soil Nailing	44
7.5.1. Estados límites	44
7.5.2. Fallas externas	45
7.5.3. Fallas internas	50
7.6. Diseño de Soil Nailing	51
7.6.1. Pasos a seguir para el diseño del Soil Nailing	51
7.6.2. Modelo Matemático	59
7.7. Proceso constructivo	63
7.8. Análisis de las obras ejecutadas con el método de Soil Nailing en Guatemala	66
7.8.1. Estabilización del talud del Km 24 carretera a El Salvador,	66
7.8.2. Estabilización y protección de los muros del sótano del Edificio Tarragona.	72

<b>CONCLUSIONES</b>	77
<b>RECOMENDACIONES</b>	79
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	81
<b>ANEXOS</b>	83

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1	Talud	1
2	Inestabilidad de un Talud	3
3	Fallas de un Talud	3
4	Talud Infinito	6
5	Talud Finito	6
6	Caída de Roca	10
7	Volcamiento de trozos de roca	11
8	Centro de giro de la superficie de falla	11
9	Superficie curva de falla en movimiento rotacional	12
10	Superficie curva de falla en movimiento rotacional	13
11	Deslizamiento traslacional de una masa de suelo	13
12	Superficie de falla plana	14
13	Extensión lateral	15
14	Flujo de detritos	16
15	Equilibrio límite con centro de gravedad	19
16	Equilibrio límite con dovelas	20
17	Equilibrio límite con el método de Fellenius	23
18	Equilibrio límite con el método de Bishop	25
19	Aplicación del suelo enclavado en deslizamiento de tierra	37
20	Suelo enclavado como estructura de contención	38
21	Detalle típico de suelo enclavado	43
22	Fallas de Soil Nailing	45

23	Falla global	47
24	Falla de deslizamiento	49
25	Tipos de distribución del Soil Nailing	53
26	Longitudes del Soil Nailing	54
27	Deformaciones de un talud	59
28	Equilibrio límite con el método de Bishop	60
29	Abaco de momento vrs ángulo de inclinación	62
30	Equilibrio límite utilizando un Nailing	62

## **TABLAS**

I	Clasificación de taludes	5
II	Métodos de análisis universales	21

## GLOSARIO

**Ángulo de Fricción:** Se define como fuerza de **rozamiento** o fuerza de **fricción** entre dos superficies en contacto a la fuerza que se opone al movimiento de una superficie sobre la otra (*fuerza de fricción cinética*) o a la fuerza que se opone al inicio del movimiento (*fuerza de fricción estática*).

**Cohesión:** Es la atracción entre moléculas que mantiene unidas las partículas de una sustancia, en particular tratándose de terrenos o tipos de suelos.

**Corrosión:** Es definida como el deterioro de un material metálico a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica (oxidación).

**Dinámica:** Es la rama de la mecánica que estudia las causas de un movimiento.

**Detrito:** Es el llamado material suelto o sedimentos. Son los productos de la erosión, el transporte, la meteorización; química y física; y procesos diagenéticos (procesos geológicos externos).

**Erosión:** Se denomina **erosión** al proceso de sustracción de roca al suelo intacto, generalmente por acción de corrientes superficiales de agua o viento, por cambios de temperatura o por gravedad.

**Esfuerzo de Corte:** Es el que viene dado por la resultante de tensiones cortantes  $\tau$ , es decir, tangenciales, al área para la cual pretendemos determinar el esfuerzo cortante.

**Estática:** Parte de la mecánica de suelos que estudia las condiciones de equilibrio de un terreno.

**Falla:** Es una discontinuidad que se forma en las rocas someras de la Tierra por fracturas, cuando concentraciones de fuerzas tectónicas exceden la resistencia de las rocas. La zona de ruptura tiene una superficie más o menos bien definida denominada plano de falla y su formación va acompañada de deslizamiento tangencial (paralelo) de las rocas a este plano.

**Flujo:** Es el caudal de un fluido desplazándose por un talud o ladera.

- Gravedad:** Es la aceleración que sufriría un objeto en caída libre sobre otro. Puede interpretarse como la fuerza gravitatoria por unidad de masa. El concepto de gravedad es el más intuitivo, a diferencia que la propia fuerza. En física se le representa como  $\vec{g}$ .
- Grout:** Es un suelo bien compactado para el relleno de espacios pequeños.
- Mampostería:** Es el sistema tradicional que consiste en la construcción de muros, para diversos fines, mediante la colocación manual de elementos.
- Litológico:** Es la parte de la geología que trata de las rocas, especialmente de su tamaño de grano, del tamaño de las partículas y de sus características físicas y químicas.
- Suelo:** Es un medio poroso, biológicamente activo y estructurado, desarrollado en la superficie emergida de la Tierra.
- Terraplén:** Es la tierra con que se rellena un terreno para levantar su nivel y formar un plano de apoyo adecuado para hacer una obra.

**Terraplenamiento:** Es el corte de suelo que se realiza modificando el estado natural por razones del proyecto.

## RESUMEN

El primer paso en un estudio de estabilidad es la determinación del nivel de riesgo, ya que tanto las actuaciones siguientes, como las inversiones económicas que conllevan, dependen de lo que se pretende salvar. En líneas generales, se debe analizar la probabilidad de pérdidas de vidas humanas, y después estimar la posible cuantía en daños materiales. Este proceso comienza con un estudio exhaustivo de las características topográficas, geológicas, geotécnicas, hidrológicas, climáticas, etc. para así determinar cuáles serán las peores condiciones a que va a ser sometido el talud.

La utilización de inclusiones, como en el suelo enclavado (Soil Nailing), como recurso para la estabilización de suelos y taludes se ha comenzado a popularizar en Guatemala en el transcurso de la década pasada. Esto debido a la versatilidad de aplicaciones y a las ventajas que ofrece respecto a los métodos convencionales de estabilización de suelos (muros de gravedad, muro en voladizo).

El diseño de las inclusiones se relaciona directamente con las propiedades del suelo y la interacción con él. El conocimiento de esta interacción es de gran importancia para la elaboración de un diseño que brinde seguridad y a su vez economía.

El suelo enclavado es una técnica para reforzar el suelo *in-situ*. El sistema consiste en una cubierta o revestimiento de concreto lanzado, construido regularmente de arriba hacia abajo y un arreglo de inclusiones (miembros reforzados o “nails”) perforadas o insertadas en una masa de suelo. El suelo enclavado se compone de tres elementos, el suelo *in-situ*, el refuerzo y la cubierta o revestimiento.

## JUSTIFICACIÓN

Los estudiantes de Ingeniería Civil son los responsables del desarrollo de la infraestructura del país, y como parte importante de este desarrollo es el conocimiento de los métodos de estabilización de taludes que se utilizan en la actualidad, de acuerdo con los suelos y topografía de Guatemala.

La importancia de saber y conocer los diferentes tipos de taludes, las causas de la desestabilización de los mismos y a la vez los métodos para estabilizarlos es lo que impulsa a contar con un documento técnico-teórico que sirva de respaldo para consultas durante el estudio de la materia.

Guatemala es un país que debido a su geografía y geología es muy propenso a que ocurran deslizamientos por la saturación de los suelos, movimientos sísmicos debido a su ubicación sísmica, y sobrecargas de diversos tipos, ya que la inadecuada protección de taludes ha dado como resultado la pérdida de vida y daños materiales, por tal razón es importante expandir los conocimientos a métodos que puedan ayudar a prevenir tales desastres.

La investigación es necesaria para encontrar nuevas alternativas en la solución de problemas, pero cobrará sentido el trabajo de investigación que se pretenda realizar sólo si se pone a la disposición de aquellos que pueden aprovechar estos conocimientos. Es por esto que el documento propuesto es de importancia como una referencia bibliográfica, dado que integra información

sobre los diferentes sistemas y métodos de estabilizar un talud así como una excavación utilizados actualmente en Guatemala y las especificaciones de los mismos.

# OBJETIVOS

## **General**

Aportar un conocimiento integral de los diferentes tipos de cortes de taludes, sus formaciones y los motivos de fallas de los taludes y excavaciones, así como los métodos constructivos y sistemas de estabilización de taludes y excavaciones en Guatemala.

## **Específicos**

1. Dar a conocer los principales motivos de falla en los taludes así como en las excavaciones.
2. Conocer los diferentes tipos de taludes que se presentan en la obra civil.
3. Proporcionar los métodos de cálculo para la estabilización de los taludes y su mejor comportamiento.
4. Proponer el Soil Nailing como un sistema seguro para la estabilización de los taludes.



## INTRODUCCIÓN

Habitualmente se observa que los ríos y arroyos suelen erosionar determinados sectores cercanos a los márgenes de los mismos, especialmente durante la época de invierno, también las erosiones suelen darse a las saturaciones de los suelos como a la cercanía del nivel freático. Esta situación pone en peligro las construcciones que se encuentran en las inmediaciones, lo que obliga a proteger y asegurar esos sectores. Asimismo, es necesario disponer sistemas de protección en laderas de cerros o montañas y costados de terraplenes de obras viales o ferroviarias, donde el riesgo al deslizamiento, cobra especial interés de estudio, por las peligrosas consecuencias que estas vibraciones ocasionan. Por ello, se deben conocer las posibles situaciones de falla de un talud, haciendo uso de un correcto modelo de análisis, y obviamente, se debe saber diferenciar cada método de estabilización, para asegurar con esto el equilibrio del sistema. Cabe mencionar, que un porcentaje de las pérdidas por deslizamiento son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas de prevención y/o control.

Por ello, se debe tener en cuenta que los problemas de estabilidad de taludes no pueden resolverse con soluciones tabuladas o con tablas prediseñadas, ya que no hay dos deslizamientos iguales debido a que no hay homogeneidad de suelos, por la sencilla razón de que el principio de una inestabilidad suele tener origen en la convergencia de múltiples condicionantes de carácter local.

La utilización de inclusiones, como es el suelo enclavado (Soil Nailing), como recurso para la estabilización de suelos y taludes se ha comenzado a popularizar en Guatemala, en el transcurso de la década pasada. Esto debido a la versatilidad de aplicaciones y a las ventajas que ofrece respecto a los métodos convencionales de estabilización de suelos (muros de gravedad, muro en voladizo, vegetación de los taludes o remodelo geométrico de los mismos).

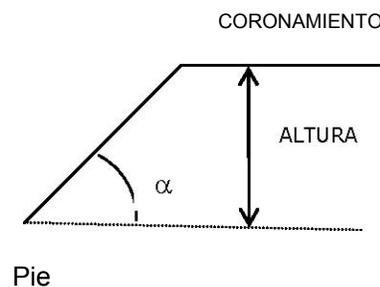
Este estudio consta de una parte teórica donde se desarrolla el tema de los taludes, sus generalidades, clasificación, fallas y métodos de estabilización. En la siguiente parte, se desarrolla el método del suelo enclavado, sus aplicaciones, problemas, soluciones y obras ejecutadas en Guatemala con este método.

# 1. GENERALIDADES

## 1.1 Talud

Es una superficie, cuya extensión en altura separa dos planos de diferente potencial energético.

Figura 1 Talud



## 1.2 Partes constitutivas de un talud

### 1.2.1 Altura

Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza o coronamiento, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales, pero es difícil de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza o coronamiento no son accidentes topográficos bien marcados.

### **1.2.2 Pie**

Corresponde al sitio de cambio brusco en pendiente en la parte inferior.

### **1.2.3 Cabeza o coronamiento**

Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.

### **1.2.4 Pendiente**

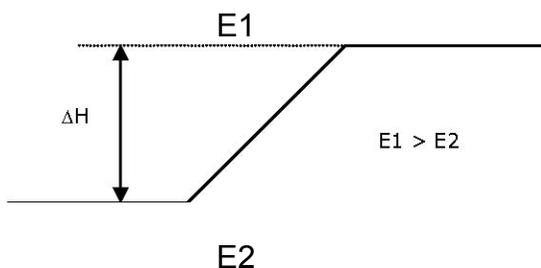
Es la medida de inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación  $m/1$  ( $m$  = distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical).

## **1.3 Inestabilidad de un talud**

Por la diferencia de niveles topográficos, entre los dos planos unidos por un talud, existe una tendencia natural de las masas a equilibrar sus potenciales energéticos.

Esta inestabilidad física, encontraría su estado teóricamente de equilibrio final, cuando las masas igualan sus energías, eliminando la diferencia de potencial inicial. Este equilibrio tiende a alcanzar, como estado límite, la formación de un plano horizontal. Las fuerzas que causan la inestabilidad son la gravedad (peso de la masa) y las presiones neutras, como por ejemplo las generadas por un flujo.

**Figura 2 Inestabilidad de un talud**

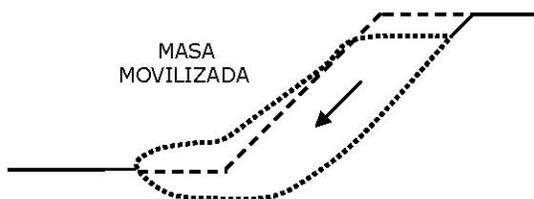


### 1.4 Fallas de un talud

Es el movimiento real de la masa susceptible de deslizamiento.

Físicamente, esto indica que la resistencia al corte de la masa que se moviliza es igual a la resistencia al corte del suelo. En rigor la rotura se alcanza por falla progresiva, dado que los máximos esfuerzos de corte aparecen en el pie de un talud y se propagan hacia arriba. Si se puede identificar el tipo de falla de un talud, su análisis y remediación resultan aceptables.

**Figura 3 Fallas de un talud**



## **1.5 Superficie de rotura o de falla**

Corresponde al área, debajo del movimiento, que delimita el volumen de material desplazado. El volumen de material (suelo o roca) debajo de la superficie de falla no se moviliza.

## **1.6 Estabilidad de un talud**

Es el conjunto de medidas tendientes a reducir el nivel de movilización de la resistencia al corte del material involucrado, o a incrementar su resistencia. La acción del hombre puede evitar estados de inestabilidad de un talud, materializada por algún sistema que impida la movilización de la masa del talud.

## 2. CLASIFICACIÓN DE TALUDES

### 2.1 Taludes naturales

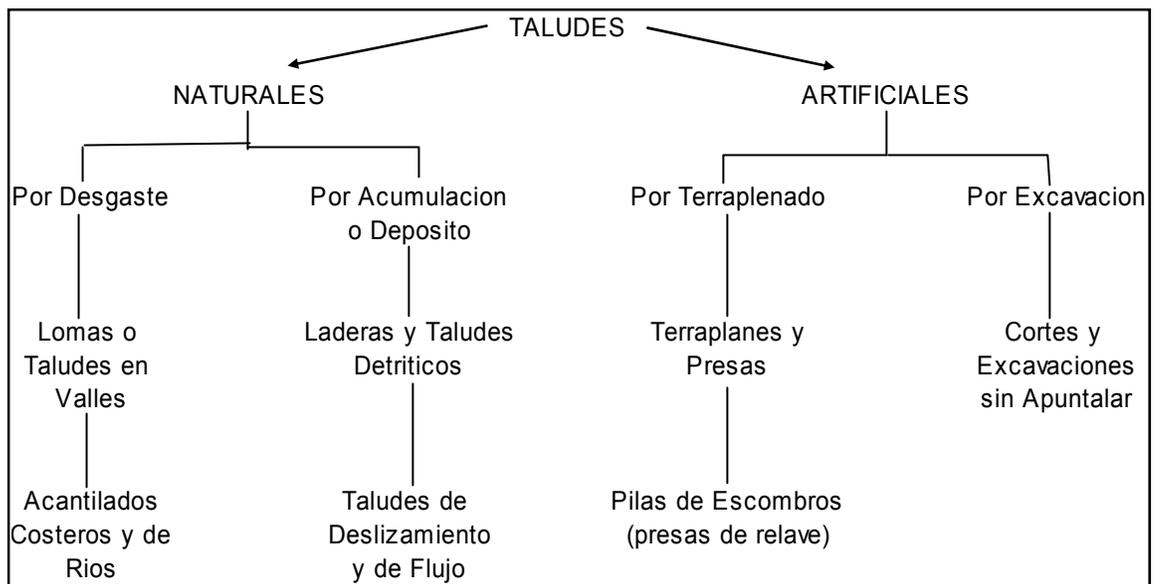
Son pendientes naturales de terrenos, no intervenidos por la acción del hombre. Su conformación actual tuvo como origen un proceso natural. En general se denominan: laderas.

### 2.2 Taludes artificiales

Son aquellos cortes o terraplenamientos que realiza el hombre, modificando el estado natural del terreno, por razones de proyecto.

Puede distinguirse a su vez, la siguiente clasificación:

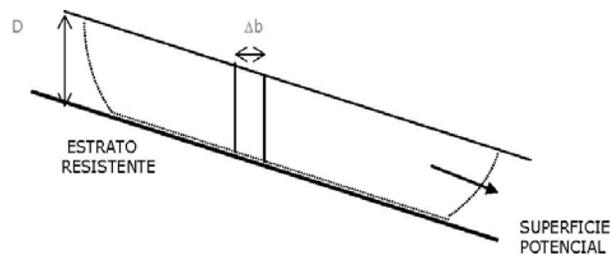
**Tabla I Clasificación de taludes**



## 2.3 Taludes infinito

Cuando las propiedades del suelo a la misma profundidad son iguales y la profundidad  $D$  hasta el substrato resistente es constante y pequeña comparada con la longitud total del talud. La falla del talud produce un desplazamiento del suelo que involucra una longitud muy superior a su profundidad. Para poder estudiar el equilibrio de un talud infinito, se puede tomar una faja vertical de ancho =  $\Delta b$ , representativa de la totalidad de la masa de falla (despreciando los efectos de los extremos superior e inferior del desplazamiento).

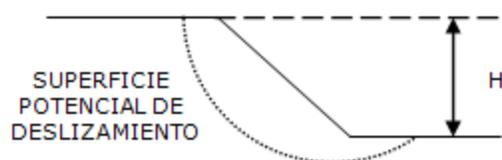
**Figura 4 Talud infinito**



## 2.4 Taludes Finitos

Representan el estado más general, donde debe considerarse la estática de la totalidad de masa que falla. Su estudio es más complejo. Se pueden mencionar, los taludes en corte para carreteras, vías férreas, canales, etc. y los terraplenes de vías y presas de tierra.

**Figura 5 Talud finito**



## **3. FALLAS DE UN TALUD**

### **3.1 Causas de fallas de un talud**

Las laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar en forma imprevista debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo antrópico que modifiquen su estado natural de estabilidad. Las causas del movimiento de los taludes siempre son concurrentes. Los deslizamientos pueden producirse lenta o rápidamente, con o sin provocación aparente. Generalmente, se producen como consecuencia de excavaciones o socavaciones en el pie del talud. Existen casos en los que son originados por la desintegración gradual de la estructura del suelo, la cual se inicia con fisuras capilares y termina por dividir la masa de suelo en fragmentos angulares. En otros casos, se producen como consecuencia del aumento de la presión piezométrica que llevan algunas capas, excepcionalmente permeables o bien por efecto de choques que licuan el suelo situado debajo del talud. Para ello se crea un Modelo de Análisis, en función de una serie de variables representativas (Ej. tipo de talud, tipo de suelo, presencia de agua, etc.) que simulan al caso particular de análisis, Así mismo, debe recordarse que la presencia de discontinuidades no reveladas por las perforaciones (Ej. sistemas de fisuras capilares, cicatrices de viejas superficies de deslizamiento o delgadas lentes de arena acuífera), pueden invalidar por completo los resultados de los cálculos.

Por lo expuesto, los movimientos de masa pueden darse como resultado de una falla por corte a lo largo de cierta superficie interna, o bien cuando una

disminución general del esfuerzo efectivo entre las partículas causa una licuación total o parcial del suelo.

## **3.2 Factores que provocan las fallas**

### **Factores externos**

- Incremento de tensiones de corte (movilización de la resistencia)  
Cambios en la geometría: Excavaciones empinando taludes, erosión, remoción de soporte lateral.

### **Factores internos**

- Decremento en la resistencia al corte disponible, fisuración, movimientos en fallas geológicas, y movimientos sísmicos.
- Cambios en el campo de flujo, incremento de la filtración y retención de agua por lluvia, cambio en la piezometría por cortes.
- Cambios en la resistencia al corte, pérdida de resistencia por humedecimiento, hinchamiento – congelamiento.

## **3.3 Etapas en el proceso de falla**

La clasificación de los deslizamientos pretende describir e identificar los cuerpos que están en movimiento relativo. Deben considerarse cuatro etapas diferentes en la clasificación de los movimientos:

- Etapa de deterioro o antes de la falla donde el suelo esta esencialmente intacto
- Etapa de falla caracterizada por la formación de una superficie de falla o el movimiento de una masa importante de material.
- Etapa post-falla que incluye los movimientos de la masa involucrada en

un deslizamiento desde el momento de la falla y hasta el preciso instante en el cual se detiene totalmente.

- Etapa de posible reactivación en la cual pueden ocurrir movimientos que pueden considerarse como una nueva falla e incluye las tres etapas anteriores.

### **3.4 Formas de falla de un talud**

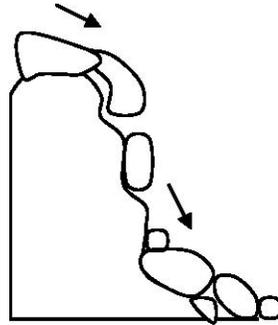
Los procesos geotécnicos activos de los taludes y laderas corresponden generalmente, a movimientos hacia abajo y hacia fuera de los materiales que conforman un talud de roca, suelo natural o relleno, o una combinación de ellos. Los movimientos ocurren a lo largo de una superficie de falla, por caída libre, movimientos de masa, erosión o flujo. Algunos segmentos del talud o ladera pueden moverse hacia arriba, mientras otros se mueven hacia abajo. En función del tipo de suelo que compone la masa de un talud, se presentan diferentes tipos de movimiento, mediante los cuales se alcanza la falla del talud, como es:

#### **3.4.1 Caída**

Descenso de masas de suelo o roca por caída libre y rodamiento de bloques causados por efecto de cuñas hidrostáticas, erosión de pie, grietas de tracción, descomposición de rocas, variaciones de temperatura.

Pueden caer por gravedad, y en forma ocasional bloques individuales de roca de cualquier dimensión, produciendo un deterioro en la estructura del talud. El volumen de la falla depende de los diversos planos de discontinuidad y puede cubrir en un solo momento, varios planos (falla en escalera). La amenaza es difícil de predecir debido al gran rango de tamaños de bloques o piedras que pueden caer. Representa un movimiento de ocurrencia aleatoria.

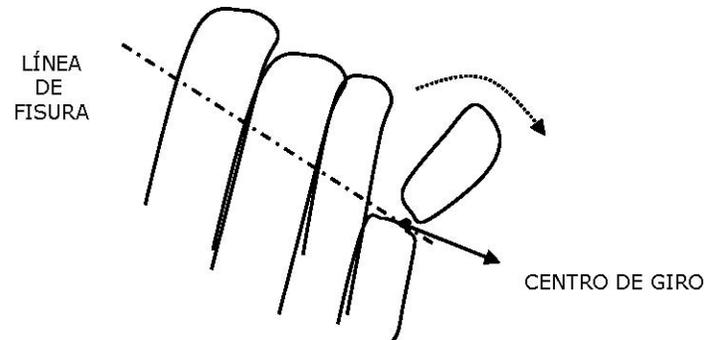
**Figura 6 - Caída de Roca**



### **3.4.2 Volcamiento**

Este tipo de movimiento consiste en una rotación hacia delante de una unidad o unidades de material con centro de giro por debajo del centro de gravedad de la unidad y generalmente, ocurre en las formaciones rocosas. Implica la inclinación y cierta rotación de las unidades litológicas sobre cierto pivote. Las fuerzas que lo producen son generadas por las unidades adyacentes, presión hidrostática sobre las grietas o juntas, expansiones y los movimientos sísmicos. El fenómeno puede abarcar zonas muy pequeñas o incluir volúmenes de varios millones de metros cúbicos. Asimismo, y dependiendo de las características geométricas y de estructura geológica, la misma puede o no terminar en caída o en derrumbe. Las características de la estructura de la formación geológica determinan la forma de ocurrencia de la inclinación.

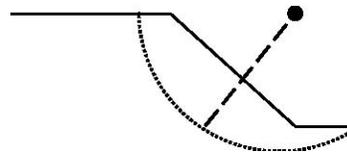
**Figura 7 Volcamiento de trozos de roca**



### **3.4.3 Deslizamiento rotacional**

En un deslizamiento rotacional la superficie de falla está formada por una curva cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo en movimiento. Es decir, se puede distinguir un fenómeno de rotación alrededor de un centro.

**Figura 8 Centro de giro de la superficie de falla**



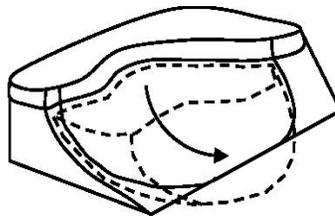
Visto en planta el deslizamiento posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento. El movimiento produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento generándose comúnmente, flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento. El movimiento aunque es curvilíneo no es necesariamente circular, lo cual es común en materiales residuales donde la resistencia al corte de los materiales aumenta con la profundidad.

Las superficies de falla pueden ser circulares o no, pero en general son cóncavas hacia arriba, acercándose a un círculo cuanto más uniforme y homogéneo es un depósito cohesivo.

Con frecuencia, la forma y localización de la superficie de falla está influenciada por las discontinuidades, juntas y planos de estratificación, destacándose que el efecto de estas discontinuidades debe tenerse muy presente al momento de analizar la estabilidad del talud.

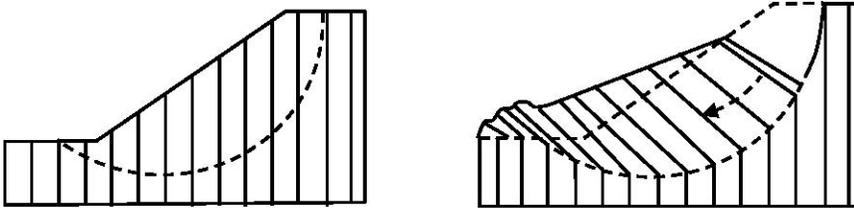
El campo de fuerzas decrece con la deformación en el deslizamiento rotacional. Se originan por erosiones de pie, empujado de laderas o sobrecargas. Este tipo de movimiento ocurre usualmente, en suelos cohesivos homogéneos, sean naturales o artificiales.

**Figura 9 Superficie curva de falla en movimiento rotacional**



Como puede observarse en el gráfico siguiente, la masa deslizante se hunde cerca de la cima del talud y produce una saliente cerca del pie.

**Figura 10 Superficie curva de falla en movimiento rotacional**



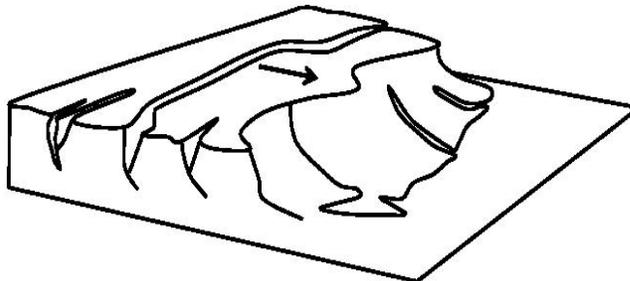
#### **3.4.4 Deslizamiento traslacional**

En este tipo de movimiento, la masa se desplaza hacia afuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada. Se inicia por roturas o fisuras paralelas en la superficie del talud.

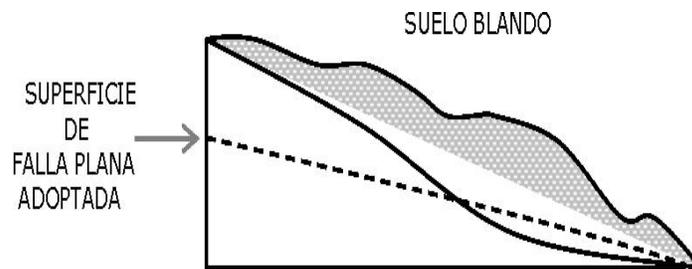
El campo de fuerzas no decrece con la deformación.

Son causados por masas de arenas o limos que contienen un exceso de presión neutra. La masa que se traslada se desintegra durante la deformación. Los movimientos de traslación son comúnmente controlados por superficies de debilidad tales como fallas, juntas, fracturas, planos de estratificación y zonas de contacto entre materiales de diferente resistencia al corte. En algunos casos de deslizamiento traslacional, la masa se deforma y/o rompe y puede convertirse en flujo.

**Figura 11 Deslizamiento traslacional de una masa de suelo**



**Figura 12 Superficie de Falla Plana**



Durante un movimiento de rotación la masa trata de auto estabilizarse, mientras que uno de traslación la masa deslizante puede progresar indefinidamente a lo largo de la ladera hacia abajo.

La diferencia importante para evaluar la estabilidad de taludes sometidos a movimientos de rotación o traslación radica principalmente en la aplicación del Método de Análisis a seguir.

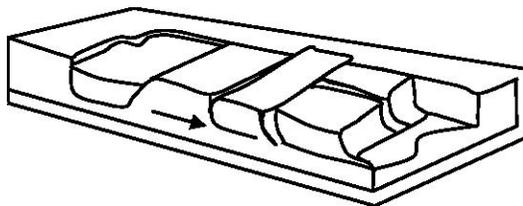
### **3.4.5 Extensión lateral**

Se define como un deslizamiento traslacional retrogrado. La falla es generalmente progresiva, se inicia en un área local y se extiende. Comprende la fracturación y extensión del material blando infrayacente. Puede ocasionarse por la licuefacción de las capas débiles inferiores. El material superior se desintegra en unidades o terrones independientes que pueden rotar o trasladarse. Ocurre en general en taludes tendidos, y como agentes que provocan este fenómeno, se pueden mencionar: lluvias y fisuras. El mecanismo de falla puede incluir elementos de rotación, traslación y de flujo. Los movimientos son complejos y difíciles de caracterizar. La extensión lateral

puede ocurrir en masas de roca sobre suelos plásticos o puede ocurrir en suelos finos (arcillas o limos) que han perdido su resistencia al corte. Se pueden distinguir dos tipos:

- Movimientos que envuelven fracturas y extensión de roca o suelo, debido a la licuefacción o flujo plástico del material subyacente. Las capas superiores pueden hundirse, trasladarse, rotarse, desintegrarse o pueden licuarse y fluir.
- Movimientos que envuelven fracturas y extensión de roca o suelo, debido a la licuefacción o flujo plástico del material subyacente. Las capas superiores pueden hundirse, trasladarse, rotarse, desintegrarse o pueden licuarse y fluir.

**Figura 13 Extensión lateral**



### **3.4.6 Flujos**

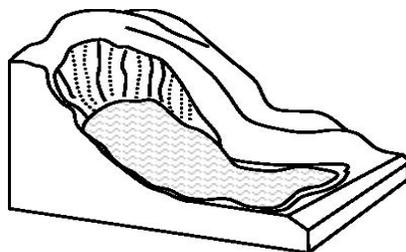
En un flujo existen movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se desliza sobre una superficie de falla. Los materiales se mueven por las pendientes y fluyen como un líquido viscoso.

Los flujos pueden ser lentos o rápidos, así como secos o húmedos y de

diferentes materiales (suelo o roca). Este movimiento descendente continúa por los taludes o pendientes hasta que su energía se agota por falta de alimentación de la fuente o porque se equilibra la pendiente longitudinal. El desprendimiento y transporte de partículas gruesas o finas es una matriz de agua y granos en forma de flujo seco o saturado. Los flujos de material son impredecibles, mueven grandes volúmenes de material y pueden crear una amenaza de moderada a alta. Se requiere un análisis especial en cada caso particular para su tratamiento. Pueden generar grandes deslizamientos del macizo y producir cambios topográficos importantes. La ocurrencia de flujos está generalmente relacionada con la saturación de los materiales subyacentes. Algunos suelos absorben agua muy fácilmente cuando son alterados, fracturados o agrietados por un deslizamiento inicial y esta saturación conduce a la formación de un flujo. En función al tipo de material del talud, se pueden mencionar:

Flujos de: ROCA, DETRITO, TIERRA (Masas secas o saturadas), BARRO (Se producen por acumulación de materiales en los frentes de alimentación - grandes lluvias)

**Figura 14 Flujo de Detritos**



## 4. ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE UN TALUD

### 4.1 Factor de seguridad (FS)

La mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de Equilibrio Límite, donde el tratamiento de la estabilidad desemboca finalmente en un Factor de Seguridad, y en el cual el criterio de falla es satisfecho a lo largo de una determinada superficie. El FS es empleado para conocer cuál es el grado de amenaza probable para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Al estimar el factor de seguridad mínimo para un problema particular, es necesario tomar en cuenta algunos factores:

- Las consecuencias de la situación respecto a la cual se está aplicando el factor de seguridad (por ejemplo: el deslizamiento de un terraplén o de un corte).
- La confiabilidad de los valores medidos o supuestos de los parámetros implicados.
- El aspecto económico del problema.

Las consecuencias de la falla de un talud pueden ser simplemente que deba realizarse algún trabajo de reparación o el bloqueo de una carretera, en cuyo caso se producen inconvenientes y quizá perjuicios económicos. Sin embargo, cuando existe una amenaza para la seguridad de las personas o estructuras, el

asunto es mucho más serio. Desde el punto de vista económico, cada problema debe tratarse en forma individual y decidir un valor mínimo de FS, basado en todos los otros factores involucrados, aunque a modo indicativo, se pueden usar los siguientes valores para taludes artificiales:

- Al final de la construcción: 1.3
- Condición de infiltración a régimen establecido: 1.25
- Después de un desembalse repentino: 1.2
- Talud natural muy antiguo: 1.1 /1.2
- Problemas con edificios: 2.0

Los primeros tres conceptos se aplican a las presas de materiales sueltos.

## 4.2 Equilibrio límite

El análisis de estabilidad según el método del Equilibrio Límite, es una herramienta que permite, pronosticar cuál es la relación entre la resistencia al corte disponible en el suelo y su solución al cizallamiento o resistencia movilizada. Este método consiste en considerar que toda la superficie probable de falla está plastificada.

El análisis de los movimientos de los taludes durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas del equilibrio límite. Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no sobre la relación tensión – deformación. Se estudia un cuerpo libre en equilibrio, partiendo de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes que se requieren para mantener el equilibrio. Calculada esta fuerza resistente, se compara con la disponible del suelo y se obtiene una indicación del factor de seguridad. Por ello, cuando se necesite analizar un talud dado, en un suelo de resistencia conocida, **si se considera un desplazamiento de tipo circular**, es necesario determinar el diámetro y la posición del círculo que representa la superficie por donde se va a

producir el deslizamiento.

Este círculo, conocido como *círculo crítico*, debe satisfacer la condición de que la relación entre la resistencia al corte del suelo a lo largo de la superficie de deslizamiento y las fuerzas tangenciales que tienden a producirlo constituye un mínimo.

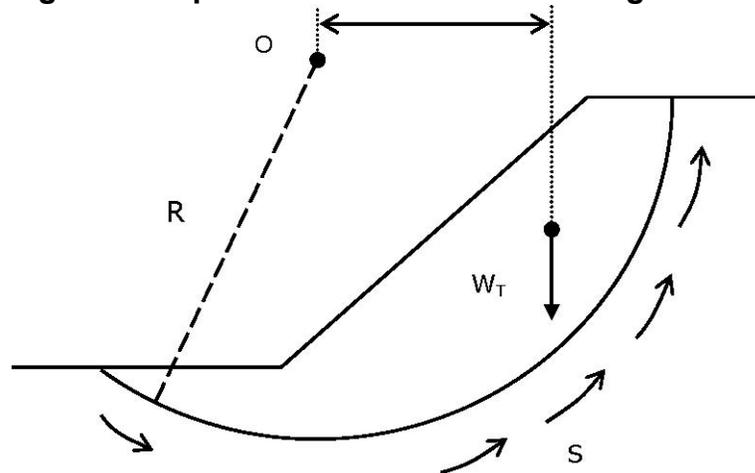
Comparamos entonces, la resistencia al corte disponible del suelo con la necesaria para mantener el equilibrio límite. La resistencia necesaria en definitiva, es una fracción de la disponible. El sistema de equilibrio límite supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalente a un factor de seguridad igual a 1.

Por lo expuesto, el factor de seguridad puede definirse como:

$$F = \frac{\text{RESISTENCIA AL CORTE DISPONIBLE}}{\text{RESISTENCIA AL CORTE MOVILIZADA}}$$

El FS representa por ejemplo, la relación entre los momentos desestabilizadores y los estabilizadores con respecto a un centro de rotación:

**Figura 15 Equilibrio límite con centro de gravedad**



Siendo S= resistencia al corte del suelo una vez determinados el diámetro y la posición del círculo crítico, el FS con respecto a rotura se calcula según la siguiente expresión:

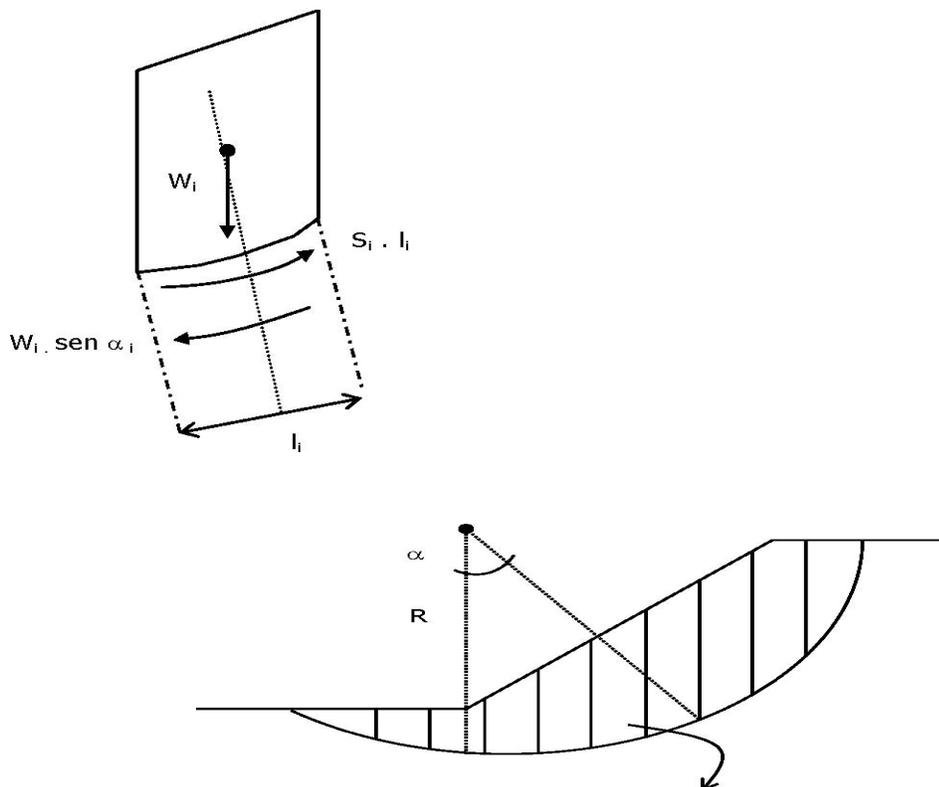
$$F = \frac{S \cdot \text{Long. Sup.}}{W_t \cdot X}$$

Otro criterio especialmente en taludes conformados por distintos estratos de suelo, es el de dividir la masa a estudiar en una serie de faja o dovelas y considerar el equilibrio de cada faja por separado. Una vez realizado el análisis de cada una de ellas, se analizan las condiciones de equilibrio de la sumatoria de las fuerzas o momentos que intervienen.

$$F = \frac{S_i \cdot L_i}{\sum W_i \cdot \text{sen } \alpha_i}$$

En donde: O

**Figura 16 Equilibrio límite con dovelas**



## 5. MÉTODO DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UN TALUD

A continuación se presentan sintéticamente algunos métodos de análisis universalmente conocidos para el estudio de la estabilidad de taludes:

**Tabla II Métodos de análisis universales**

METODO	AÑO	SUPERFICIE DE FALLA	EQUILIBRIO	CARACTERISTICAS
FELLENIOUS	1927	CIRCULAR	DE FUERZAS	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo este método es muy usado por su procedimiento simple. Resulta muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Arroja factores de seguridad bajos en círculos profundos.
BISHOP	1954	CIRCULAR	DE MOMENTOS	Asume que todas las fuerzas de corte entre dovelas son nulas. Reduce el número de incógnitas. La solución es indeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela. El cálculo se lleva a cabo buscando el equilibrio de momentos respecto al centro del arco circular.
MORGENSTERN Y PRICE	1965	CUALQUIER FORMA	MOMENTOS Y FUERZAS	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.
JANBU	1968	CUALQUIER FORMA	DE FUERZAS	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de corte entre dovelas. Este método utiliza un factor de corrección para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son relativamente bajos.
SPENCER	1967	CUALQUIER FORMA	MOMENTOS Y FUERZAS	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son iguales para cada rebanada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre rebanadas elementales tienen una inclinación constante pero desconocida.
ELEMENTOS FINITOS	-	CUALQUIER FORMA	ANALIZA ESFUERZOS Y DEFORM.	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.

## 5.1 Taludes infinitos

Como se vio anteriormente, en aquellos casos en los cuales se presenta una falla paralela a la superficie del talud, a poca profundidad y la longitud de falla es larga comparada con su espesor, se puede usar el método de análisis de un talud infinito. Con este sistema determinamos 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 espesor del talud. Se suponen como hipótesis de análisis:

- Suelo isotópico y homogéneo
- Talud infinitamente largo
- Superficie de falla paralela al talud

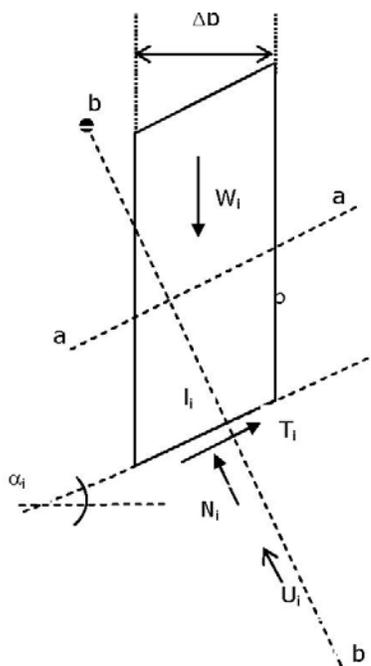
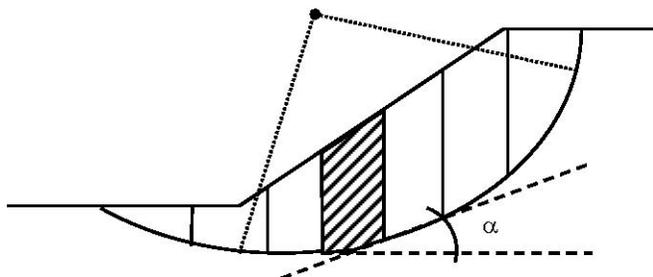
## 5.2 Taludes finitos

El análisis básico que se utiliza para estudiar la estabilidad de taludes finitos se aplica a superficies potenciales de falla que se asumen circulares y que se dividen en fajas verticales con dos alternativas de cálculo:

### 5.2.1 Método de Fellenius

Conocido también como Método de las Dovelas. Este método supone 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. El equilibrio de una faja, se analiza con la figura, donde los espesores de las fajas son de 1 m, convirtiéndose entonces en un problema bidimensional, para este análisis se proyectan las fuerzas actuantes sobre un eje tangente a la base de la faja (a-a) y otro perpendicular (b-b)

**Figura 17 Equilibrio límite con el método de Fellenius**



Cabe recordar que la dificultad en los métodos de análisis consiste en evaluar la presión neutra. Se supone que las fuerzas sobre las caras de cualquier faja tienen resultante nula sobre el eje  $b-b$ . La resultante de todas las fuerzas laterales actúa sobre el eje  $a-a$ . Si se parte de la definición de FS y se lo escribe

en forma algebraica, se genera la ecuación:

$$F = \frac{\text{RESISTENCIA AL CORTE DISPONIBLE}}{\text{RESISTENCIA AL CORTE MOVILIZADA}}$$

$$F = \frac{\sum (c' \cdot l_i + N_i \cdot \text{tg } \phi')}{\sum w_i \cdot \text{sen } \alpha_i}$$

El equilibrio de la faja i puede escribirse como:

$$W_i \cdot \cos \alpha_i = N + U_i \quad \longrightarrow \quad N_i = W_i \cdot \cos \alpha_i - U_i$$

En donde:

$W_i$  = Peso de deslave de la masa

$\alpha$  = ángulo del terreno

$\phi$  = ángulo de fricción interna del suelo

$N$  = fuerza normal de la superficie de falla

$U$  = longitud del plano de falla

### 5.2.2 Método de Bishop

El método de cálculo que se desarrolla aquí se denomina *Simplificado*, dado que se parte de una masa en equilibrio donde:

Se plantea la sumatoria de fuerzas proyectadas en un eje vertical,

$$\sum (X_i - X_{i+1}) = 0$$

y sumatoria de fuerzas proyectadas en un eje horizontal,

$$\sum (E_i - E_{i+1}) = 0$$

A fin de facilitar la demostración se toma el caso de un talud con una presión neutra  $u = 0$  es decir, drenado o simplemente saturado. Este método contempla la proyección de las fuerzas sobre un eje vertical b-b donde la resultante se



$$F = \frac{\sum S_i * l_i}{\sum W_i * \text{sen } \alpha_i}$$

En donde:

$S_i$  = fuerza paralela a la superficie de falla

$W_i$  = Peso de deslave de la masa

$\alpha_i$  = ángulo del terreno

$l_i$  = Superficie de falla

## **6. MÉTODO DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES**

### **6.1 Corrección externa**

- Cambios geométricos de pendiente.
- Remoción de materiales inestables.
- Remoción y reemplazo.
- Contrapesos (bermas).

### **6.2 Corrección interna a la masa inestable**

#### **6.2.1 Modificaciones del campo de flujo**

- drenes
- pozos
- trincheras

#### **6.2.2 Inclusiones**

- refuerzos
- anclajes
- claveteado (soil nailing)
- terramesh

#### **6.2.3 Retencion**

- estructuras rígidas
- gaviones (flexibles)
- pneusol (scrap tires)

#### **6.2.4 Revegetación**

–reforestación

#### **6.2.5 Estabilización mecánica**

-Compactación

Asimismo se pueden describir las siguientes medidas tendientes a garantizar la estabilidad de los taludes:

#### **Uso de drenes y subdrenes**

El agua subterránea produce un aumento del peso de la masa deslizante, un incremento de la presión hidrostática en las grietas y por último un incremento de la presión de poros, lo cual da origen a la disminución de la resistencia al corte del suelo. Las principales obras que se pueden construir para evitar daños por las aguas subterráneas son:

- Drenes horizontales
- Filtros longitudinales
- Trincheras estabilizadoras

#### **Terraceo de taludes**

El escalonamiento de los taludes constituye una buena solución para su estabilidad. El escalonamiento en suelos arcillosos busca transformar el talud original en una serie de taludes de menor altura, por lo tanto la huella de cada

escalón (berma) debe ser suficientemente ancha como para que puedan funcionar prácticamente como taludes independientes. El escalonamiento se hace para obtener un abatimiento del talud, recoger materiales caídos y recolectar aguas superficiales.

### **Construcción de estructuras de retención**

Cuando un talud es inestable, se recomienda su retención por medio de muros, la solución es costosa y debe compararse con otras soluciones alternativas. Se debe cuidar que la cimentación del muro quede por debajo de la superficie de falla, se debe prevenir contra el peligro que se presenta durante la construcción, al remover el suelo al pie del talud, cuando se va a cimentar la estructura y debe preverse un buen drenaje. Debe analizarse la estructura de retención, verificando su seguridad al deslizamiento, volcamiento y la falla por capacidad de carga. Las obras más utilizadas son:

- Muros de gravedad
- Muros de tierra armada
- Pilotes
- Anclajes
- Materiales estabilizantes

En cuanto a las principales medidas tendientes a proteger las caras de los taludes, se pueden distinguir:

### **Empradizacion y revestimiento del talud**

Con el fin de evitar daños por la acción de las aguas de lluvia, los vientos y el efecto de la intemperie en el cuerpo del talud, se recomienda reforestar estas

superficies con especies adecuadas. La vegetación cumple una función importante en el control erosivo de un talud, le da consistencia por el entramado mecánico de sus raíces. Son recomendables las especies nativas y se ha comprobado que es más efectivo para defender los taludes, la plantación continua de pastos y plantas herbáceas.

### **Recubrimiento con mortero o riego asfáltico**

El recubrimiento del talud con mortero lanzado, con losas delgadas de mortero o riegos asfálticos, facilitan el escurrimiento superficial sin arrastre de partículas, en taludes rocosos altamente fracturados, protegen las vías de continuos desprendimientos. En general estos recubrimientos son medidas costosas y difíciles de aplicar a taludes grandes.

### **Zanjas de coronación**

Las zanjas en la corona (cima) o parte alta de un talud, son utilizadas para interceptar y conducir adecuadamente las aguas de lluvia, evitando su paso por el talud. Estas zanjas deben construirse paralelas al eje de la vía, no muy cerca del talud para evitar que se conviertan en el comienzo y guía de un deslizamiento en cortes recientes. Deben quedar ubicadas lo suficientemente atrás de las grietas de tracción en la cima del talud. La zanja debe impermeabilizarse y con suficiente pendiente para garantizar una rápida evacuación del agua captada.

### **Estructuras de vertimiento**

Para manejar el flujo de las corrientes superficiales sobre el talud y posibles desmoronamientos de rellenos o laderas, hasta la disposición del drenaje

natural, se deben diseñar estructuras de vertimiento de las aguas, cuyo propósito es el disipar la energía de la corriente en pendientes fuertes. Entre las estructuras de este tipo se encuentran:

- Rápidas escalonadas
- Rápidas con dientes
- Rápidas con salto

### **Sellado de grietas**

En zonas donde se presentan agrietamientos o fisuras, resulta necesario sellarlas para evitar la filtración a través de ellas. Se debe remover una parte del suelo alrededor de la grieta y volver a rellenar con un suelo fino impermeable, bien apisonado.



## 7. MÉTODO DE SOIL NAILING

### 7.1 Definición

La utilización de inclusiones, como en el suelo enclavado (Soil Nailing), como recurso para la estabilización de suelos y taludes se ha comenzado a popularizar en nuestro país en el transcurso de la década pasada. Esto debido a la versatilidad de aplicaciones y a las ventajas que ofrece respecto a los métodos convencionales de estabilización de suelos (muros de gravedad, muro en voladizo).

El diseño de las inclusiones se relaciona directamente con las propiedades del suelo y la interacción con él. El conocimiento de esta interacción es de gran importancia para la elaboración de un diseño que brinde seguridad y a su vez economía.

El suelo enclavado es una técnica para reforzar el suelo *in-situ*. El sistema consiste en una cubierta o revestimiento de concreto lanzado, construido regularmente de arriba hacia abajo y un arreglo de inclusiones (miembros reforzados o “nails”) perforadas o insertadas en una masa de suelo. El suelo enclavado se compone de tres elementos, el suelo *in-situ*, el refuerzo y la cubierta o revestimiento (aunque esta no siempre se utiliza).

La disposición de las inclusiones puede efectuarse para actuar durante un tiempo de servicio más o menos prolongado, por lo que cabe distinguir entre:

- *Inclusiones provisionales*
- *Inclusiones permanentes*

Las primeras tienen el carácter de medio auxiliar, y proporcionan las condiciones de estabilidad a la estructura durante el tiempo necesario para disponer otros elementos resistentes que los sustituyan. Las inclusiones permanentes se dimensionan, evidentemente, con mayores coeficientes de seguridad.

## **7.2 Ventajas y desventajas del Soil Nailing**

### **Ventajas**

El suelo enclavado tiene ventajas técnicas y económicas sobre las técnicas más convencionales de corte y retención. Estas ventajas incluyen las siguientes:

- Bajo costo, la relativa rapidez de instalación de las inclusiones no esforzadas (Nails) la cual es considerablemente más corta que la de los anclajes y la capa de lanzado relativamente es más delgada.
- Únicamente se necesita de equipo liviano de construcción para colocar las inclusiones así como equipo simple de lanzado e inyección de lechada. El llenado de las perforaciones con lechada generalmente se hace por gravedad. Esta característica puede ser de particular importancia en lugares de difícil acceso.
- Debido al gran número de inclusiones, la falla de alguna no es determinante, ni afecta la estabilidad del sistema, como es el caso de los anclajes convencionales.

- En suelos heterogéneos con gravas y zonas intemperizadas o roca dura, se ofrece la ventaja de perforaciones de diámetro pequeño para instalar los nails.
- Las estructuras con suelo enclavado son más flexibles que las estructuras rígidas convencionales. Consecuentemente estas estructuras pueden conformar un terreno perimetral con capacidad de soportar mayores movimientos diferenciales del terreno en todas direcciones.
- Las deformaciones superficiales pueden ser controladas por medio de la instalación de nails adicionales o esforzando los nails del nivel superior a un pequeño porcentaje de sus cargas de trabajo.
- Los volúmenes de corte, relleno y acarreo producto de la construcción de muros de contención convencionales se eliminan.

### **Desventajas**

El suelo enclavado comparte con las otras técnicas de corte y retención las siguientes desventajas:

- Los sistemas de drenajes para aguas subterráneas pueden ser difíciles de construir y es difícil de asegurar su efectividad a largo plazo.
- En áreas urbanas, el espaciado corto de las inclusiones puede interferir con construcciones cercanas. Además, los desplazamientos horizontales pueden ser mayores que con los anclajes activos, la cual puede causar distorsiones inmediatas a construcciones adyacentes.
- La capacidad de la inclusión puede no desarrollarse económicamente en suelos cohesivos sujetos a desplazamiento lento (crep), incluso con niveles de carga relativamente bajas.

### 7.3 Utilización del Soil Nailing

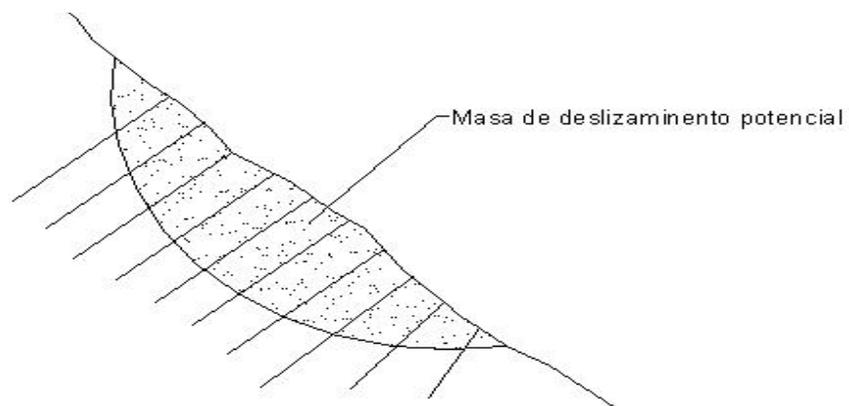
La tecnología del suelo enclavado puede ser considerada ventajosa para cualquier corte de excavación ya sea temporal o permanente, en lugar de cualquier otro método convencional pero especialmente cuando se plantea la utilización de muros anclados. El ahorro comprado con los métodos convencionales de estabilización esta en un rango de 10 a 30%. La utilización de las inclusiones se ha extendido ampliamente con finalidades diversas, que pueden agruparse, en los siguientes campos principales de aplicación:

- **Estructuras de retención en corte**
  - a. Cortes verticales o casi verticales.
  - b. Portales de túneles.
  - c. Estribos o confinamiento de puentes.
  
- **Reparación y reconstrucción de estructuras existentes**
  - a. Muros de contención de mampostería o concreto reforzado después o justo antes de la falla por deflexiones excesivas.
  - b. Muros anclados por falla, sobrecarga o corrosión en los tendones de los cables.
  - c. Muros de tierra armada (mecánicamente estabilizada) para proveer estabilidad horizontal y a la masa que la ha perdido por la corrosión de las mallas o baja calidad del relleno.

- **Estabilización de taludes**

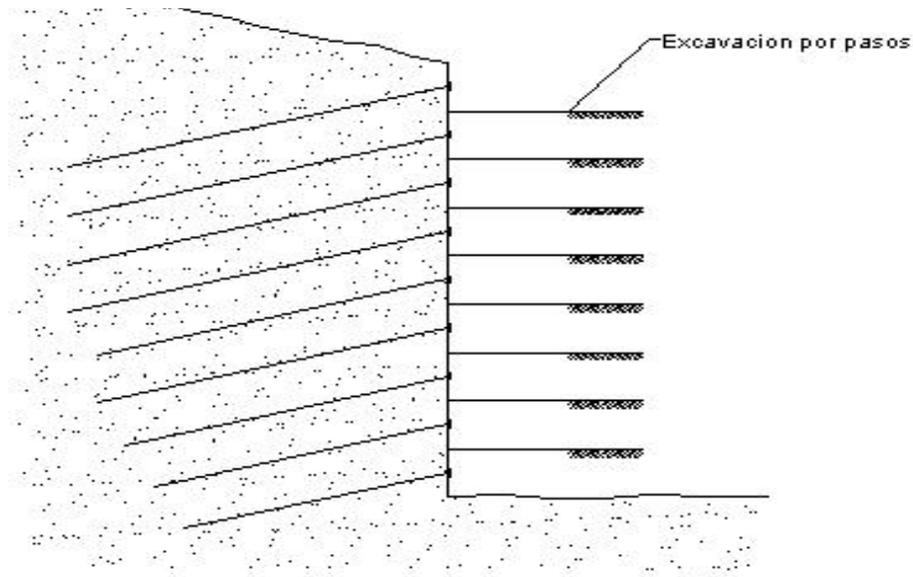
- a. Estabilización de taludes potencialmente inestables donde un pequeño o ningún movimiento ha ocurrido pero el factor de seguridad es inaceptable.
- b. Estabilización de taludes con movimiento lento (crep), donde el movimiento está ocurriendo a una tasa inaceptable.
- c. Cosido de macizos rocosos fisurados con desprendimientos.
- d. Deslizamientos de taludes en roca o terrenos sueltos.

**Figura 19 Aplicación del suelo enclavado en deslizamientos de tierra**



a. Deslizamientos de tierra

**Figura 20 Suelo enclavado como estructura de contención**



b. Estructuras de contención

## 7.4 Composición de un Soil Nailing

### Inclusiones:

Las inclusiones son elementos cortos o largos que se incrustan o colocan en el suelo formando retículas, estabilizando y reforzando el suelo. Las inclusiones en el suelo enclavado trabajan como refuerzo y la carga es transmitida a todo lo largo de la inclusión.

Las inclusiones de acero reforzado se pueden clasificar como:

- Inclusiones clavadas
- Inclusiones llenadas con lechada
- Jet gróate nails
- Inclusiones encapsuladas protegidas contra la corrosión.

Las **inclusiones clavadas** son adecuadas para construcciones temporales y usan barras de acero # 5 a # 11 o angulares estructurales para mayor rigidez de clavado. Las barras de acero, tienen resistencia del orden de 60 a 85 kg/mm<sup>2</sup>, con límite elástico convencional de 50 a 70 kg/mm<sup>2</sup>. Es importante que todos estos tipos de acero sean dúctiles, con alargamientos en rotura superiores al 4% para evitar la rotura frágil, y facilitar, en caso necesario, un reajuste de esfuerzos. Estos tienen una separación corta de 2 a 4 nail por cada 10 pies<sup>2</sup> (0.9 m<sup>2</sup>) creando una masa de suelo homogéneo y reforzado.

Las inclusiones son clavadas utilizando vibro percusión neumática o martillos hidráulicos. Esta técnica de instalación es rápida y económica (3 a 5 inclusiones por hora, pero está limitada por la longitud de la inclusión instalada, por consideraciones de equipo y adicionalmente por las condiciones del suelo (en gravas y rocas intemperizadas no es posible su uso).

Las **inclusiones llenadas** con lechada son adecuadas para construcciones temporales y permanentes. Estos son colocados en perforaciones realizadas con perforación rotativa, perforación por percusión, perforación con auger (barrena helicoidal) o con entubado de protección (casing). La lechada de cemento (grout) es introducida por gravedad o inyectada a bajas presiones desde el fondo del agujero perforado. El espaciamiento es típicamente ancho, desde 4 a 6 pies (1.2 a 1.8 m) entre centros. El diámetro de la perforación varía entre 3.5 pulg. (9 cm) a 12 pulg. (30 cm) cuando se usan barrenas helicoidales.

Los **jet gróate nails** son inclusiones compuestas, hechas de un suelo lechada con un refuerzo central de acero, instalado simultáneamente. Estos son utilizados para aplicaciones temporales y también pueden ser utilizados para aplicaciones permanentes si la necesidad de protección contra la corrosión es pequeña.

El refuerzo puede ser instalado utilizando el clavado con vibro-percusión a altas frecuencias (arriba de 70 Hz) y presiones de inyección de lechada extremadamente altas (mayores a 2,000 psi). El grout bajo esta técnica es inyectado a través de un canal de diámetro pequeño en el refuerzo o a través de un delgado tubo de acero soldado al refuerzo, bajo una presión lo suficientemente alta para causar la fractura hidráulica del suelo perimetral. Esta técnica está cubierta por una patente europea.

La técnicas de jet grouting proporcionan además, recompactación del suelo perimetral y en suelos granulares pueden incrementar significativamente la resistencia al corte y a la tracción del suelo

Las **inclusiones encapsuladas** y protegidas contra la corrosión son utilizadas para estructuras permanentes con necesidades altas de protección contra la corrosión. La encapsulación se puede llevar a cabo insertando la barra de refuerzo en un tubo plástico o de acero y llenando los vacíos con grout, antes o durante la perforación del agujero. Muchas formas de encapsulación están patentadas.

### **Cubierta o revestimiento**

La función del revestimiento es asegurar la estabilidad local del suelo entre los refuerzos, limitar la descompresión inmediata después de la excavación y proteger el suelo retenido en su superficie de la erosión y los efectos del intemperismo. El tipo de cubierta que se utiliza depende en mayor parte de los requerimientos estéticos de la estructura ya que esta será la única parte de la estructura que quedara visible.

Dependiendo de la aplicación las siguientes cubiertas han sido utilizadas:

- **Malla de alambre soldado**

La malla de alambre soldado puede utilizarse para aplicaciones temporales y permanentes. Es utilizada en estratos de roca intemperizada o en suelos granulares fuertemente cementados, donde la erosión de la superficie no se considera significativa. Para aplicaciones permanentes, el galvanizar la malla es necesario generalmente.

- **Concreto lanzado**

El lanzado de concreto es ampliamente utilizado tanto para estructuras temporales como permanentes. El lanzado provee una capa superficial continua y flexible que puede rellenar vacíos y grietas de la superficie excavada. Para aplicaciones permanentes, siempre se refuerza con malla de alambre soldado con el espesor necesario con capas sucesivas de lanzado, cada una de 2 a 4 pulg. (5 a 10 cm) de espesor.

Aplicaciones temporales han sido construidas utilizando malla de alambre soldado o fibras de refuerzo y concreto lanzado. El colocar la malla de alambre soldado o las fibras de refuerzo tiene el fin de dar mayor flexibilidad a la estructura y reducir la propagación de rajaduras. La durabilidad del lanzado depende en gran medida de mantener la relación agua cemento alrededor de 0.4 y utilizar una entrada de aire adecuada.

- **Paneles prefabricados**

Los paneles prefabricados son utilizados en aplicaciones permanentes para proveer un acabado al producto que satisfaga los diversos requisitos estéticos, ambientales y de durabilidad. Estos también proveen un drenaje continuo atrás del revestimiento. Los paneles prefabricados pueden ser adjuntados a las inclusiones o ensamblados a la cabeza de la inclusión por medio de diferentes dispositivos.

## **Cabeza del Nailing**

La cabeza del Soil Nailing la integran tres componentes principales, la platina, la tuerca y la roldana. La platina es fabricada de acero grado 36 (ASTM A 36) y es generalmente cuadrada de 200 a 250 mm de largo por 19 mm de grosor. La función de la platina es la de distribuir la fuerza al final del Nailing durante el procedimiento del concreto lanzado y contrarrestar las fuerzas del talud. La platina contiene un agujero central en donde se coloca la barra de acero. La roldana es luego insertada en la barra de acero la cual es asegurada por medio de una tuerca hexagonal. La roldana y la tuerca son fabricadas con acero consistente con la de la barra de acero por lo tanto, generalmente es grado 60. Las tuercas son ajustadas por medio de una llave de calibración.

## **Inyección**

La inyección para Soil Nailing es comúnmente una mezcla de cemento con agua la cual llena el espacio anular entre la barra del Nailing y el suelo que lo rodea. Los tipos de cementos que se puede utilizar son el tipo I, II, III o V de acuerdo a la norma ASTM C 150.

La relación entre agua/cemento para la inyección en el Soil Nailing varía entre 0.4 y 0.5. en algunos casos se puede utilizar una mezcla más densa con un slump de 30 mm debido a que el Nailing se encuentra en un suelo altamente permeable o roca altamente fracturada. Ocasionalmente una mezcla muy densa puede ocasionar dificultades con la instalación de los centralizadores y en estos casos la mezcla por si sola puede proveer suficiente soporte para centralizar la barra de acero.

Las características de la mezcla para la inyección suele ser de alta influencia para un buen Soil Nailing. Se debe de utilizar una mezcla que logre alcanzar como mínimo a los 28 días una resistencia a la compresión de 3,000 psi. La mezcla es bombeada poco después de ser colocada la barra de acero para reducir el riesgo de derrumbes internos en el agujero.

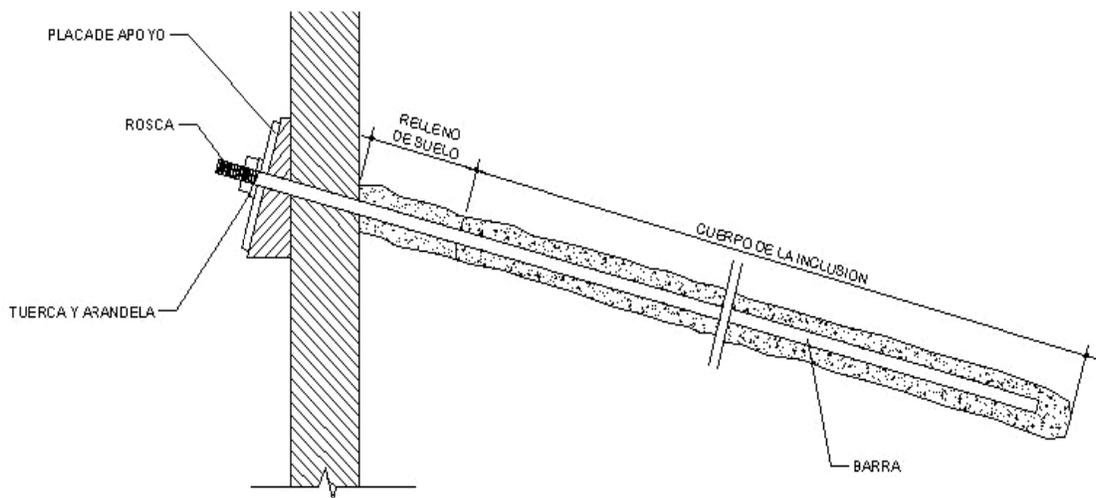
## Centralizadores

Los centralizadores son accesorios hechos de PVC o cualquier otro material sintético que son instalados en varias localizaciones a lo largo de la longitud de la barra del nail para asegurar que un mínimo grosor de mezcla cubre completamente la barra de acero. Estos son instalados en intervalos regulares generalmente no excediendo los 2.50 mts a lo largo de la longitud del nail y a una distancia de aproximadamente 0.5 mts de cada extremo.

## Elementos de protección a la corrosión

Los elementos de protección a la corrosión más utilizados son pinturas epoxicas en los nails que se encuentran en suelos altamente salinos y que serán permanentes. El recubrimiento epoxipo es un material dieléctrico que impide el paso de la corriente eléctrica que favorece al a corrosión.

**Figura 21 Detalle típico de suelo enclavado**



## 7.5 Análisis del talud utilizando Soil Nailing

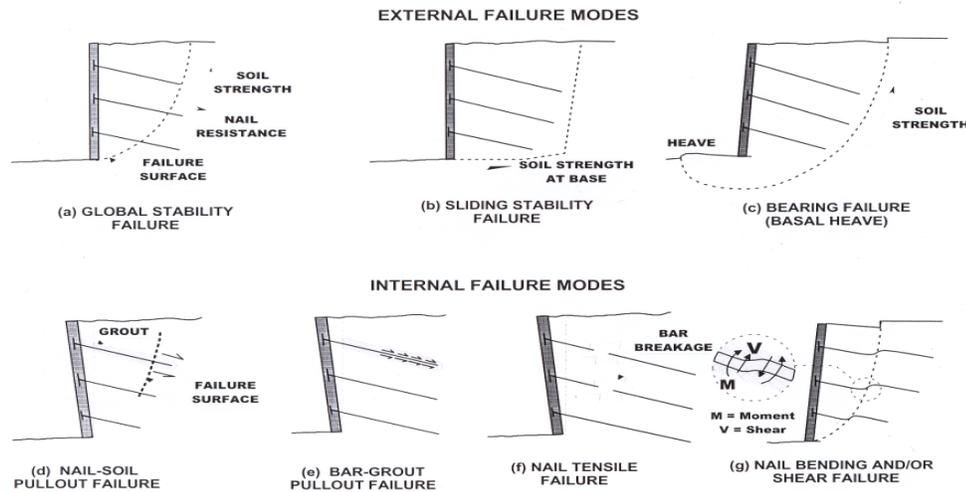
El propósito de este capítulo es el de proporcionar al lector los principios que gobiernan el análisis y diseño de los muros de Soil Nailing. Se introducirán los conceptos técnicos relacionados a los mecanismos que conciernen a la respuesta de construcción y operación del Soil Nailing.

### 7.5.1 Estados límites

El análisis y diseño del Soil Nailing debe considerar dos limitantes: El estado límite de esfuerzos y los estados límites de servicio.

- **Estado límite de esfuerzo:** Este estado límite se refiere a los modos y colapsos en donde las cargas aplicadas inducen fuerzas que son mayores a los esfuerzos del sistema completos o de componentes individuales y por lo tanto la estructura se convierte en inestable. El diseño del Soil Nailing debe de asegurar que el sistema es seguro ante cualquiera de las potenciales condiciones de falla presentada en la figura 23 y clasificada como:
  - Fallas Externas.
  - Fallas Internas

**Figura 22 Fallas de Soil Nailing**



- **Estado límite de servicio:** Este estado límite se refiere a las condiciones que no involucran colapsos, pero afectan la operación normal y segura de la estructura. El mayor estado límite de servicio en sistema de Soil Nailing es la excesiva deformación del muro.

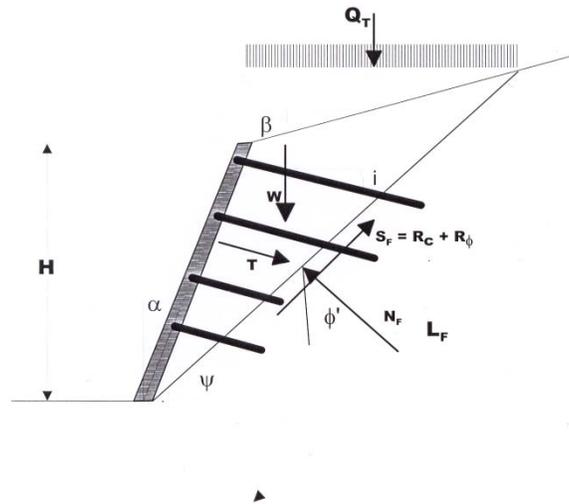
### 7.5.2 Fallas externas

Las fallas externas se refieren al desarrollo de potenciales fallas superficiales que pasan a través o atrás de los Soil Nailing. Para analizar fallas externas el muro de Soil Nailing es generalmente analizado como un bloque. Los cálculos de estabilidad toman en consideración las fuerzas resistentes del suelo actuando a lo largo de la superficie de posible falla para establecer el equilibrio de este bloque. Si la superficie de falla intercepta uno o más Nailing, los Nailing interceptados contribuyen a la estabilidad del bloque proporcionando una fuerza de estabilización externa que debe ser sumada a las fuerzas resistentes del suelo a lo largo de la superficie de falla.

La evaluación de la estabilidad externa es un aspecto importante en el diseño de Soil Nailing debido a la magnitud y consecuencias que una falla puede significar. Los análisis de estabilidad externa son efectuados para verificar que el muro de Soil Nailing propuesto es capaz de resistir las fuerzas desestabilizadoras inducidas por la excavación, las cargas de servicio, las cargas extremas (sísmicas) para cada modo potencial de falla. Entre los factores que controlan la estabilidad externa incluir la altura del muro, la estratigrafía del suelo atrás y abajo del muro, ancho de la zona enclavada, y las fuerzas del suelo, del Nailing y sus interrelaciones. Los siguientes modos de falla externa son considerados en el análisis de los sistemas del muro de Soil Nailing:

- Modo de Falla Global (figura 22a): Estabilidad global se refiere a la estabilidad de la masa de suelo reforzado por medio del Soil Nailing. En este modo de falla la masa retenida excede la resistencia proporcionada por el suelo a lo largo de la superficie de deslave y los nails si se interceptan.

Figura 23 Falla global



Donde:

$\alpha$ : ángulo de la cara del muro

$\beta$ : ángulo del terreno

$\phi'$ : ángulo de fricción interna

$c'$ : cohesión efectiva del suelo

$\psi$ : inclinación del plano de falla

$i$ : inclinación del nail

$L_f$ : longitud del plano de falla

$W$ : peso de la masa de deslave

$Q_t$ : Sobrecargas

$T_{eq}$ : fuerza equivalente del nail

$N_f$ : fuerza normal de la superficie de falla

$S_f$ : fuerza paralela a la superficie de falla

$R_c$ : Componente cohesivo de  $S_f$

$R_\phi$ : componente de fricción de  $S_f$

Las fuerzas desestabilizantes consisten en los componentes del peso (W) y la carga (q). Las fuerzas estabilizantes a lo largo de la superficie de la falla son la paralela (Sf) y la fuerza de tensión equivalente del Nailing (Teq). Es de notar que la fuerza Teq es resultante de la fuerza que combina el efecto de todos los nails instalados a una profundidad H. El factor de seguridad contra la falla global (Fsg) es expresada como una relación de las fuerzas resistentes y las desestabilizantes que actúan tangentes al potencial plano de falla.

$$Fsg = \frac{\Sigma \text{ fuerzas resistentes}}{\Sigma \text{ fuerzas desestabilizantes}}$$

- Modo de falla de Deslizamiento (figura 22b): El análisis de la estabilidad por deslizamiento considera la habilidad del muro de Soil Nailing para resistir el deslizamiento a lo largo de la base del sistema retenido en respuesta a la presión lateral del suelo atrás del Soil Nailing. La falla por deslizamiento puede ocurrir cuando presiones laterales del suelo adicional movilizadas por la excavación exceden la resistencia al deslizamiento a lo largo de la base (figura 25).

Se asume que el desplazamiento del bloque del suelo a lo largo de la base es suficientemente largo para movilizar la presión activa atrás del bloque. El factor de seguridad contra el deslizamiento (FSsl) es calculado como la relación entre las fuerzas horizontales resistentes ( $\Sigma R$ ) y las fuerzas horizontales desestabilizantes ( $\Sigma D$ ).

$$FSsl = \frac{\Sigma D}{\Sigma R}$$

Donde:

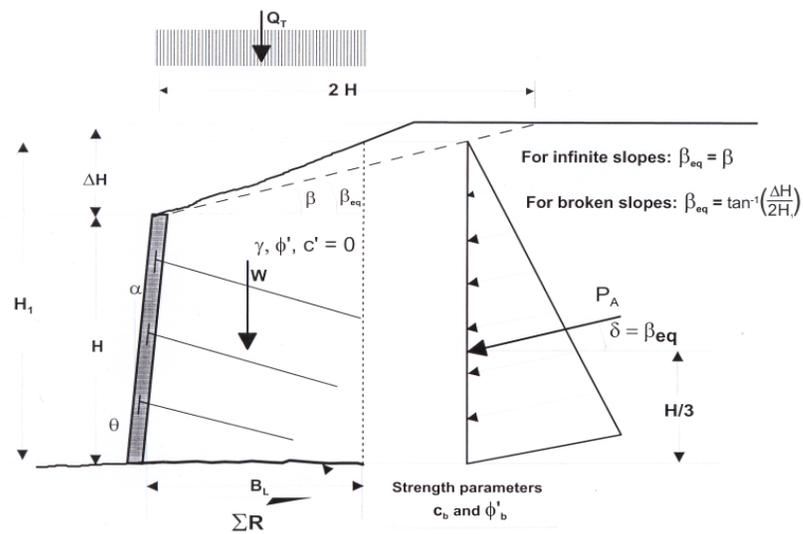
$$\Sigma R = c_b * B_L + (W + Q_D + P_A \sin \beta) \tan \phi_b$$

$$\Sigma D = P_A \cos \beta$$

La fuerza lateral activa del suelo (PA) es definida como:

$$P_A = \frac{\gamma H_1^2}{2} K_A$$

**Figura 24 Falla de deslizamiento**



Donde:

H = alto del muro

$\Delta H$  = alto de la cuesta

$\beta$  = ángulo detrás de la cuesta

$\beta_{eq}$  = ángulo detrás de la cuesta equivalente

$\alpha$  = ángulo del muro

$\theta$  = inclinación del muro desde la horizontal

$C_b$ = cohesión del suelo

$B_L$ = largo de la falla horizontal en donde  $C_b$  es efectivo

$W$ = peso del bloque del Soil Nailing

$Q_D$ = porción permanente de carga total  $Q_T$

$\Phi'_b$ = ángulo efectivo de la fricción de la base

$\Phi'$ = ángulo efectivo de la fricción del suelo detrás del bloque del Soil Nailing

$\delta$ = ángulo de fricción de la interface entre el suelo y el muro

$\gamma$ = peso específico del suelo

$H_1$ = altura efectiva en donde la presión de la tierra actúa

$K_A$ = coeficiente de la presión activa del suelo detrás del muro del Soil Nailing

### 7.5.3 Fallas internas

Las fallas internas se refieren a la falla de los mecanismos de transferencia de las cargas entre el suelo, el nail y la inyección. Los Soil Nailings movilizan resistencia entre la inyección y el suelo que lo rodea en el momento en el que el muro de Soil Nailing se deforma durante la excavación. Las fuerzas de atracción son movilizadas progresivamente a lo largo del Soil Nailing entero con cierta distribución que es afectada por numerosos factores. A medida que la fuerza de atracción es movilizada, fuerzas de tensión en el nail son desarrolladas.

Dependiendo de la resistencia de tensión del Soil Nailing y la longitud, y la fuerza de atracción, la distribución de las fuerzas de atracción varían y diferentes fallas internas pueden presentarse. Las típicas fallas internas relacionadas con Soil Nailing son:

- Falla de extracción del nail (figura 22d): Esta falla se presenta a lo largo de la interface entre el suelo y la inyección debido a insuficiente fuerza de atracción entre estos dos elementos y/o insuficiente longitud del nail.

- Falla de extracción del nail y la inyección (figura 22e): Esta falla se da generalmente por la falta de adhesión y propiedades mecánicas entre la inyección y la corruga de la superficie de la barra de acero. La propiedad mecánica provee una resistencia significativa cuando las barras enroscadas son utilizadas y estas presentan un grado inferior generando falla en la rosca.
- Falla a tensión del nail (figura 22f): El nail puede fallar a tensión si existen una inadecuada resistencia a la tensión por todos los elementos.
- Falla doblado del nail (figura 22g): El Soil Nail generalmente a tensión, sin embargo estos también moviliza fuerzas debido al doblado en la intersección de la superficie de deslizamiento con el Soil Nailing. La resistencia al doblado a lo largo del soil nailing son movilizado únicamente después de que relativamente grandes desplazamientos se han presentado a lo largo de la superficie de desplazamiento. Algunos investigadores han encontrado que las fuerzas de doblado del nail contribuyen no más que aproximadamente 10% de la estabilidad total del muro.

## **7.6 Diseño del método de Soil Nailing**

### **7.6.1 Pasos a seguir para el diseño del Soil Nailing**

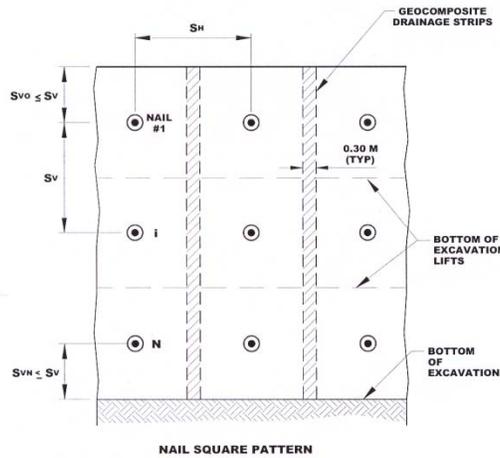
A continuación se presenta paso a paso el proceso para el diseño de un muro de Soil Nailing:

## PASO I

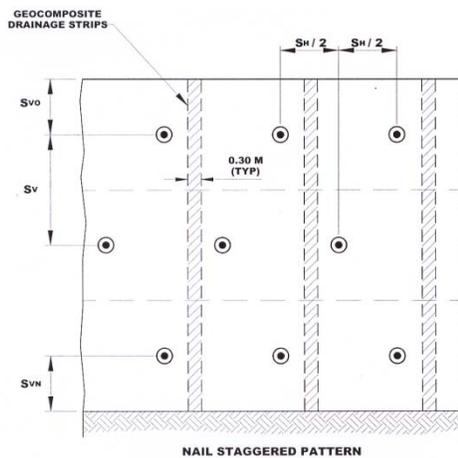
### Consideraciones iniciales para el diseño de un muro Soil Nailing

- a) **Características del muro de Soil Nailing:** Las características para estabilizar el muro Soil Nailing incluyen: (1) altura del muro; (2) longitud del muro; y (3) inclinación del muro (la inclinación típica esta en el rango de 0° a 10°). La inclinación de la cara del muro puede ser improvisada temporalmente para la estabilidad ya que disminuye el esfuerzo en la cara del muro el cual disminuye el Soil Nailing.
  
- b) **Espaciamiento vertical y horizontal del Soil Nailing:** El espaciamiento horizontal es proporcional al espaciamiento vertical y comprende un rango entre 1.25 a 2.00 mts para una inyección y perforación convencional y a la vez este espaciamiento contiene un área de influencia de  $\leq$  a 4.00 m<sup>2</sup>.
  
- c) **Patrones para la distribución del Soil Nailing en el muro:** Esta distribución puede ser (1) Rectangular; (2) Triangular; y (3) Irregular. El patrón rectangular resulta como una columna alineada al muro y facilita la construcción vertical de las juntas para la instalación de los paneles de concreto. Al mismo tiempo el patrón rectangular necesita una continuidad vertical para la fácil instalación de sistemas de drenaje.

**Figura 25 Tipos de distribución del Soil Nailing**



**(a) RECTANGULAR**



**(b) TRIANGULAR**

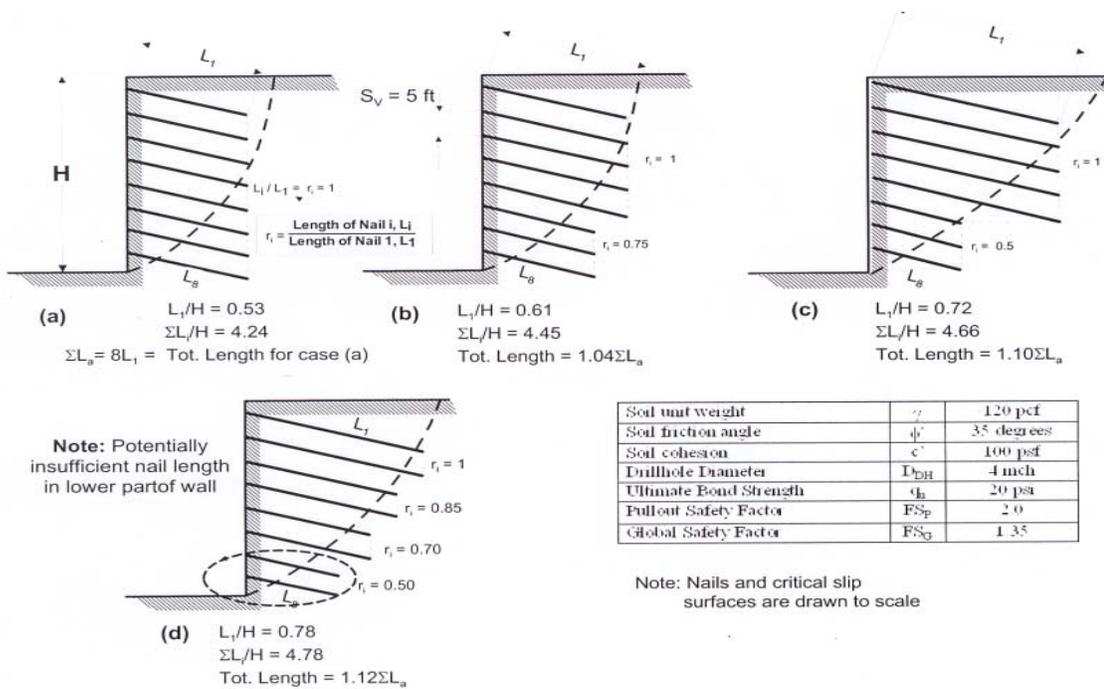
**d) Inclinación del Soil Nailing:** Normalmente, el Soil Nailing se instala con una inclinación en un rango del  $10^\circ$  a  $20^\circ$  respecto a la horizontal siendo la inclinación típica de  $15^\circ$ . Es recomendado este rango de inclinación para evitar el regreso de la inyección de la lechada de agua cemento que se aplica a cada Nailing. A la vez se presenta este rango de inclinación debido a la posible localización de estructuras vecinas.

**e) Longitud de Soil Nailing y distribución:** La distribución del largo de las barras del Soil Nailing en el muro pueden ser seleccionadas

uniformemente o variable dependiendo la longitud de la falla a proteger. (1) Longitud uniforme del nail, es cuando existe una sobrecarga menor y constante y no se encuentran estructuras cercanas y solo actúa el peso del suelo. (2) Longitud variable del nail, es cuando existe estructuras cercanas y su sobrecarga es mayor, y así controlar mejor las deformaciones del muro.

La longitud de la barra del Nailing puede ser asumida del  $0.7H$ , donde  $H$  es la altura del muro. La longitud del Nailing puede ser mayor a  $0.7H$  si la sobre carga es esperada o el muro es muy alto (mayor a 10.00 mts).

**Figura 26 Longitud del Soil Nailing**



**f) Materiales para el Soil Nailing:** La calidad de los materiales del Soil Nailing tiene que ser comparado por ensayos de laboratorio de alta calidad.

**g) Propiedades del Suelo:** Las propiedades del suelo son fundamentales en el diseño del muro de Soil Nailing debido a que es el elemento principal de la estabilización de los taludes. Las propiedades del suelo que se requieren a la hora del diseño de un muro de Soil Nailing son: (1) el peso específico del suelo  $\gamma$ ; (2) la cohesión  $c$ ; y (3) el ángulo de fricción  $\phi$ .

**h) Otras consideraciones iniciales del diseño:**

- Evaluación de corrosión.
- Estimación del diámetro de perforación.
- Selección de factores de seguridad.
- Definición de cargas.

## **PASO II**

### **Diseño preliminar**

Longitud, diámetro y espaciamiento del nail típicamente controla la estabilidad externa e interna de un muro de Soil Nailing. Por lo tanto estos parámetros pueden ser ajustados hasta que los requerimientos de la estabilidad interna y externa sean completados. Para preparar un diseño preliminar se hacen las siguientes suposiciones utilizando los criterios validos:

- 1) Suelo Homogéneo
- 2) No sobrecarga
- 3) No fuerzas sísmicas
- 4) Longitud, espaciamiento e inclinación uniforme de los nails
- 5) No agua en el subsuelo

## Procedimiento para el diseño preliminar

A continuación se presenta un procedimiento paso a paso para el diseño preliminar:

- a) Para una aplicación específica de un proyecto se tiene que evaluar la inclinación del muro conforme a la vertical ( $\alpha$ ), el ángulo de inclinación de la corona del muro ( $\beta$ ), el ángulo de fricción ( $\varphi$ ), la carga última del suelo ( $q_u$ ), calcular la resistencia normalizada de la extracción ( $\mu$ ) utilizando la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{q_u * D_{DH}}{FS \rho \gamma S_h S_v}$$

- b) Obtener la longitud normal (L/H) del diseño de barras.
- c) Obtener la fuerza normal ( $t_{\max-s}$ ).
- d) Utilizar las figuras del anexo I para la evaluación de los factores de corrección para (1) La longitud normal para un diámetro de perforación diferente a 4 pulgadas (factor de corrección de  $C_{1L}$ ), (2) a  $c^*$  otro valor de 0.02 (factor de corrección  $C_{2L}$ ), y (3) factor global de seguridad diferente a 1.35 (factor de corrección  $C_{3L}$ ).
- e) Utilizar las figura anexo I para evaluar los factores de corrección para la fuerza máxima normalizada del nail para obtener: (1) un diámetro de perforación diferente a 4 pulgadas (factor de corrección de  $C_{1L}$ ), (2) a  $c^*$  otro valor de 0.02 (factor de corrección  $C_{2L}$ ).

- f) Aplique el factor de corrección a la longitud normalizada y/o fuerza normalizada.
- g) Multiplicar la longitud normalizada por el alto del muro para obtener la longitud del Soil Nailing.

- h) Calcule el diseño de la carga máxima del nail  $T_{max-s}$  utilizando el valor de  $t_{max-s}$  y la ecuación:

$$t_{max-s} = \frac{T_{max-s}}{\gamma H S_H S_V}$$

- i) Calcule el área de la sección cruzada ( $A_t$ ) de la barra del nail de acuerdo de:

$$A_t = \frac{T_{max-s} F S_t}{f_y}$$

Donde  $f_y$  es el esfuerzo del acero y  $F S_t$  es el factor de seguridad para la fuerza de tensión de la barra de nail.

- j) Seleccione el tamaño de barra más comercial de la región que tenga una sección equivalente al área mínima evaluada en el paso (i).
- k) Verifique que el tamaño de barra seleccionada sea equivalente al diámetro de la perforación con un espacio mínimo para el cobertor de la inyección de 1 pulgada.
- l) Si la longitud y/o diámetro del nail no son factibles, seleccione otro espaciamiento del nail y/o diámetro de perforación. Recalcule la resistencia de extracción y empiece el proceso de nuevo.

### PASO III

#### Estimación de deformaciones

- a) Utilicé la figura 27 para estimar la magnitud del desplazamiento vertical y horizontal.
- b) Obtenga el alto del muro (H) y la inclinación del muro conforme a la vertical ( $\alpha$ ) (vea figura 27 para descripción de las variables).
- c) Identifique las condiciones del suelo.
- d) Estime el desplazamiento horizontal y vertical  $\delta_h$  y  $\delta_v$  en la parte superior del muro.

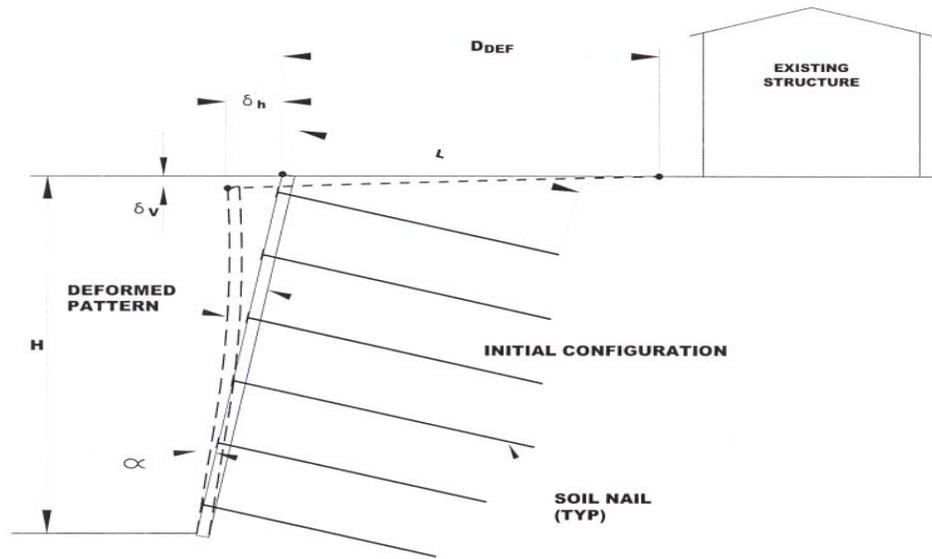
VARIABLE	SUELO ROCOSO	ARENOSO	ARCILLOSO
$\delta h/H$ y $\delta v/H$	1/1000	1/500	1/333
C	1.25	0.8	0.7

- e) Calcule la zona de influencia,  $D_{DEF}$ , donde deformaciones notables del suelo ocurra:

$$\frac{D_{DEF}}{H} = C(1 - \tan \alpha)$$

- f) Verifique desplazamiento estimados contra criterio de máximas deformaciones.

**Figura 27 Deformaciones de un talud**



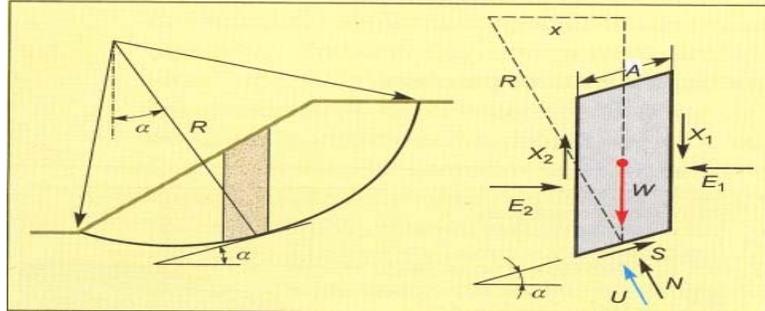
### **7.6.2 Modelo matemático del diseño del Soil Nailing**

El modelo matemático en el cálculo del Soil Nailing que comúnmente se utiliza es el método de Bishop modificado, el cual se basa en interacciones utilizando el factor de seguridad más bajo debido a que es el más crítico, debido a la cantidad de interacciones que se tendrían que realizar para el cálculo idóneo, regularmente se usan programas de computadoras para encontrar este factor, los programas más utilizados son el Talren 4.0 y Snail.

#### **El método de Bishop simplificado**

A partir de las fuerzas actuantes sobre cada una de las rebanadas consideradas en el talud, se establece el equilibrio de momentos:

Figura 28 Equilibrio limite con el método de Bishop



$$\Sigma S * R = \Sigma W * x = \Sigma W * R \operatorname{sen} \alpha$$

Como:

$$F = \frac{cA + N \operatorname{tg} \phi}{S}$$

El valor de S es:

$$S = \frac{cA + N \operatorname{tg} \phi}{F}$$

Luego:

$$\Sigma \frac{cA + N \operatorname{tg} \phi}{F} R = \Sigma (WR \operatorname{sen} \alpha)$$

$$F = \frac{\Sigma (cA + N \operatorname{tg} \phi)}{\Sigma (W \operatorname{sen} \alpha)}$$

Para despejar la incógnita  $N$  (fuerza normal de la superficie) se establece el equilibrio vertical en la rebanada:

$$W + \Delta X = N \cos\alpha + U \cos\alpha + S \sin\alpha$$

Sustituyendo  $S$  (fuerza resistente) y despejando  $N$  se obtiene:

$$N = \frac{W + \Delta X - U \cos\alpha - \left[ \frac{cA + N \operatorname{tg}\phi}{F} \right] \sin\alpha}{\cos\alpha}$$

De donde:

$$N = \frac{W + \Delta X - \left[ \left( cA \frac{\sin\alpha}{F} \right) + U \cos\alpha \right]}{\cos\alpha + \left[ \frac{\operatorname{tg}\phi \sin\alpha}{F} \right]}$$

Y el coeficiente de seguridad queda (considerando  $\Delta X=0$ ):

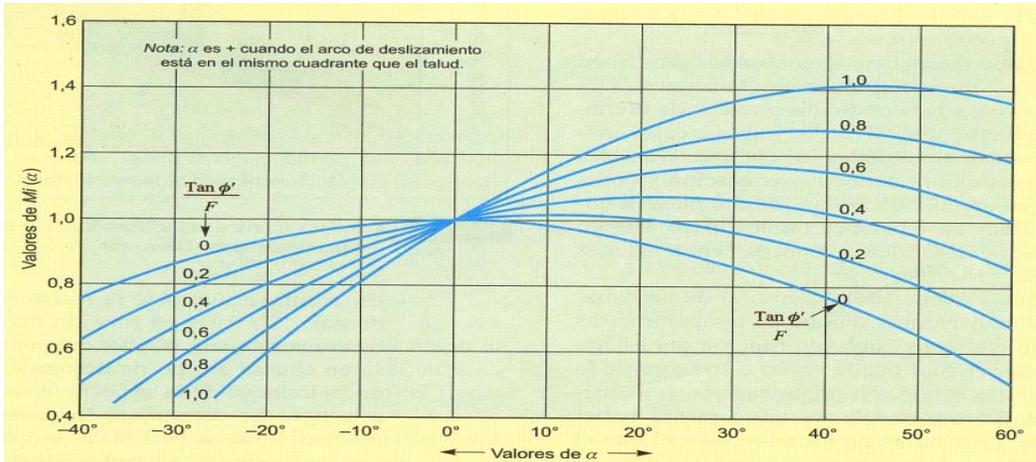
$$F = \frac{\Sigma [cA \cos\alpha + (W - U \cos\alpha) \operatorname{tg}\phi] \left[ \frac{1}{Mi(\alpha)} \right]}{\Sigma W \sin\alpha}$$

Donde:

$$Mi(\alpha) = \cos\alpha \left( 1 + \frac{\operatorname{tg}\phi \operatorname{tg}\alpha}{F} \right)$$

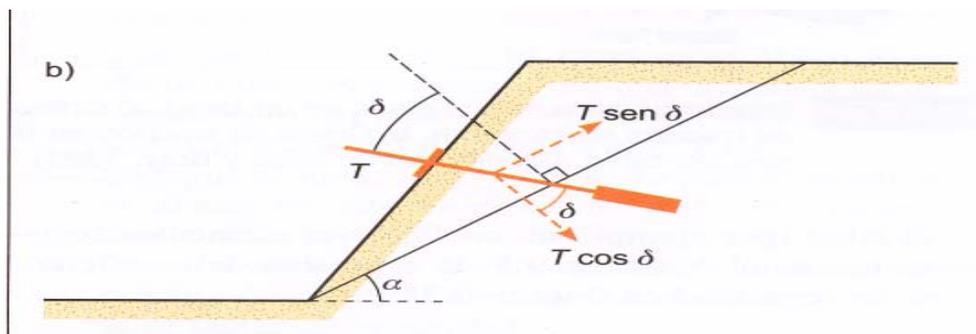
Para el cálculo de  $M_i(\alpha)$  puede utilizarse el ábaco de la figura 29

**Figura 29 Abaco de Momento vrs Ángulo de inclinación**



Y para el análisis de un talud utilizando una fuerza externa resistente aplicada sobre el talud la expresión del coeficiente de seguridad es:

**Figura 30 Equilibrio límite utilizando un Soil Nailing**



$$F = \frac{cA + (W \cos \alpha - U + T \cos \delta) \operatorname{tg} \phi}{W \operatorname{sen} \alpha - T \operatorname{sen} \delta}$$

## 7.7 Proceso constructivo

- a. Se realiza un corte inicial en el cual el suelo pierde su estabilidad, pero no a tal punto en el cual las inclusiones no lo puedan estabilizar.
- b. Las cunetas y/o los drenajes horizontales son instalados si es necesario.
- c. Inmediatamente después de la excavación, la superficie recientemente expuesta es cubierta con una capa de concreto lanzado.
- d. Las barras del refuerzo son instalados en ubicaciones predeterminadas con la longitud e inclinación especificadas, utilizando los métodos de perforación y colocación de lechada apropiados para el suelo en el cual serán construidos.
- e. Las inclusiones son pre-esforzadas a un pequeño porcentaje de sus cargas de trabajo, contra unas platinas aseguradas en la capa inicial de concreto lanzado. La carga de pre-esfuerzo usualmente no excede el 20 % de la carga de trabajo.
- f. Una segunda capa de concreto lanzado es aplicada. El drenaje vertical debe colocarse antes de realizar el lanzado.
- g. El proceso se repite para todos los niveles subsecuentes.

Cuando se les aplica pre-esfuerzo a las inclusiones se efectúa normalmente mediante gatos hidráulicos, o mediante llave dinamométrica si la cabeza dispone de rosca. La acción se puede ejercer, según los casos, sobre la

totalidad de las inclusiones (parte superior) o bien sobre uno o varios de los elementos que componen la masa de suelo enclavada.

La transferencia de los esfuerzos de las inclusiones al terreno se realizará directamente a través de la lechada de inyección, o indirectamente a través de tuberías metálicas, o de otros materiales. El comportamiento de las inclusiones cuando la fuerza exterior actúa sobre la placa de apoyo, depende de las características de rigidez, longitud, inclinación del nail y del terreno.

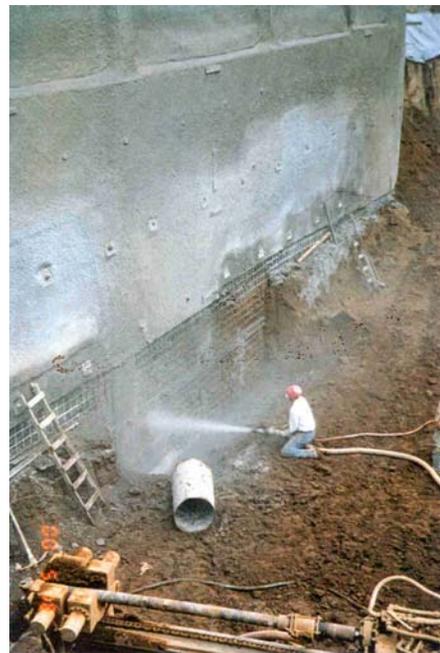
Colocación de acero de refuerzo  
Nails



Colocación de acero de refuerzo  
transversal, Provee continuidad a la  
estructura, haciéndola funcionar como  
unidad. Uniformiza la distribución de  
cargas.



Proceso de Lanzado, provee protección  
contra la erosión, y es el cuerpo del muro  
de contención.



## **7.8 Análisis de las obras ejecutadas con el método de Soil Nailing en Guatemala.**

### **7.8.1 Estabilización del talud del km 24 carretera a el salvador.**

El estudio de la estabilización del Talud del Km. 24 Carretera a El Salvador se dio después que hubo un derrumbe en el sitio debido a las lluvias y al aumento de las presiones intersticiales del mismo, debido a eso se programó evitar que prosiguiera los derrumbes y evitar la erosión de los suelos después de haber erradicado el agua en el suelo.

Para este estudio se necesitó un plano topográfico del lugar a proteger y la inspección visual y estudio de suelo para el diseño de protección, y así poder emplear el Software Talren 4.0 para el diseño de las soluciones posibles.

El terreno medio a utilizar es el que se detalla en la siguiente tabla,

	<b>Suelo Arenoso</b>	<b>Bolos de Arcilla y limos</b>
<b>Peso Unitario (t/m<sup>3</sup>)</b>	1.6	1.75
<b>Cohesión (t/m<sup>2</sup>)</b>	1.0	1.5
<b>Angulo de Fricción</b>	30	31

El factor de Seguridad mínimo de diseño utilizado en esa obra fue de FS: 1.50 y el método utilizado para el cálculo fue el método de Bishop.

El tratamiento final y el que se construyó tomando en cuenta que se tenían alturas hasta de 30.0 metros fue el de inclusiones de Soil Nailing con barras de acero corrugado No. 7 de grado 60 de hasta 12.0 metros de longitud con un espesor de 0.10 metros de muro de concreto lanzado con una resistencia de 3,000 PSI, y espaciados a 1.75 metros en ambos sentidos. Con este tratamiento el factor de seguridad de la obra nos dio como resultado FS: 1.66.

Project number : 7236-SN-GUA  
 Calculation title : Taludes Km 24 CA-1  
 Location : Carretera a El Salvador, Guatemala  
 Comments :  
 Talud No. 1 (0+010 - 0+070)  
 Units : t,t/m2,t/m3  
 yw : 1

**Soil layers**

	Name	$\gamma$	$\phi$	c	$\Delta c$	qs nails	pl	KsB
1	Suelo arenoso	1.6 -	30.0	1.0	0	7.0	0.0	0.0
2	Bolos+limo+arenoso	1.8 -	31.0	1.5	0	10.0	0.0	0.0

**Points**

	X	Y		X	Y		X	Y
1	0.00	11.00	3	0.00	2.50	5	15.00	0.00
2	10.00	11.00	4	13.87	2.50	6	30.00	0.00

**Segments**

	Point 1	Point 2		Point 1	Point 2		Point 1	Point 2
1	1	2	3	3	4	5	5	6
2	2	4	4	4	5			

**Slope boundary**

	Segment		Segment
1	1	3	4
2	2	4	5

**Distributed loads**

	Name	X left	Y left	q left	X right	Y right	q right	Ang/horizontal	Width of diffusion base	Diffusion angle
1	Sd 1	0.00	11.00	0.8	10.00	11.00	0.8	90.0	0.00	0.0

**Linear loads and moments**

None

**Nails**

	Name	TR	Horizontal spacing	X	Y	Length	Angle/horizontal	Width of diffusion base	Diffusion angle	
1	Nail 1	9.00		1.75	10.40	10.25	6.00	15	0.20	10.0
2	Nail 2	9.00		1.75	11.10	8.75	6.00	15	0.20	10.0
3	Nail 3	9.00		1.75	11.85	7.25	6.00	15	0.20	10.0
4	Nail 4	9.00		1.75	12.50	5.75	6.00	15	0.20	10.0
5	Nail 5	9.00		1.75	13.15	4.25	6.00	15	0.20	10.0
6	Nail 6	9.00		1.75	13.90	2.75	6.00	15	0.20	10.0

Rsc	Equivalent radius	Tension/shear rule	Imposed shear force Rcis	L mini	Plastification moment	EI
	0.057	Tcal, Cimp	0.00	-		
	0.057	Tcal, Cimp	0.00	-		
	0.057	Tcal, Cimp	0.00	-		
	0.057	Tcal, Cimp	0.00	-		
	0.057	Tcal, Cimp	0.00	-		
	0.057	Tcal, Cimp	0.00	-		

Critical angle	Traction	Shear	qs nails from...	$\Phi$ bar	$\sigma$ e
5.0	external	external	Curves	-	-
5.0	external	external	Curves	-	-
5.0	external	external	Curves	-	-
5.0	external	external	Curves	-	-
5.0	external	external	Curves	-	-
5.0	external	external	Curves	-	-

**Anchors**

None

**Strips**

None

**Struts**

None

# Hoja de datos de cálculo del Software TALREN 4.0

## Taludes del Km 24 Carretera a El Salvador

Unidades de medidas: t, t/m<sup>2</sup>, t/m<sup>3</sup>

### Propiedades del Suelo

#### Estratos de Suelos

	Nombre	peso específico y (t/m <sup>3</sup> )	Angulo de Friccion $\phi$	cohesion c (t/m <sup>2</sup> )	Esfuerzo de friccion del suelo qs (t/m <sup>2</sup> ) para el nail
1	Suelo Arenoso	1.6	30	1.0	7.0
2	Bolos+limo+arenoso	1.6	31	1.5	10.0

Estas son las propiedades del suelo que influyen en conjunto a la geometria del talud para encontrar su estabilidad deseada

### Geometria del Talud

#### Puntos

	X	Y
1	0.00	11.00
2	10.00	11.00
3	0.00	2.50
4	13.87	2.50
5	15.00	0.00
6	30.00	0.00

#### Segmentos

	punto 1	punto 2
1	1	2
2	2	4
3	3	4
4	4	5
5	5	6

#### Figura Construida

	segmento
1	1
2	2
3	4
4	5

Con estos puntos y segmentos se podra modular la figura del talud estudiado

### **Sobrecargas**

	punto X izquierdo	punto Y izquierdo	sobrecarga (t/m <sup>2</sup> )	Angulo	base de difusion	Angulo de difusion
	0.00	11.00	0.80	90	0.00	0.00

	punto X derecho	punto Y derecho	sobrecarga (t/m <sup>2</sup> )	Angulo	base de difusion	Angulo de difusion
	10.00	11.00	0.80	90	0.00	0.00

### **Refuerzos de Clavos**

	Nombre	Tension (t/m <sup>2</sup> )	espacio horizontal (mts)	punto X	punto Y	Longitud (mts)
1	clavo 1	9.00	1.75	10.40	10.25	6.00
2	clavo 2	9.00	1.75	11.10	8.75	6.00
3	clavo 3	9.00	1.75	11.85	7.25	6.00
4	clavo 4	9.00	1.75	12.50	5.75	6.00
5	clavo 5	9.00	1.75	13.15	4.25	6.00
6	clavo 6	9.00	1.75	13.90	2.75	6.00

	angulo horizontal del clavo	medidas de base (mts)	angulo de base	radio equivalente de perforacion (mts)	traccion del clavo	diametro de varilla (pulg)
1	15	0.20 x 0.20	10	0.057	externo	7/8
2	15	0.20 x 0.20	10	0.057	externo	7/8
3	15	0.20 x 0.20	10	0.057	externo	7/8
4	15	0.20 x 0.20	10	0.057	externo	7/8
5	15	0.20 x 0.20	10	0.057	externo	7/8
6	15	0.20 x 0.20	10	0.057	externo	7/8

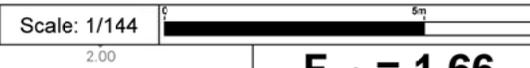
Estas son las propiedades del refuerzo del clavo en busca del factor de seguridad deseada en la cual tenemos la tension de la varilla de acero, el espacio horizontal entre clavos, los puntos en donde se localizan cada clavo en el perfil estudiado, la longitud de la varilla, las propiedades del muro como medidas de la base o platina, el radio equivalente de la perforacion y el diametro de la varilla de refuerzo.

Layer n°	1	2
$\gamma$ (t/m3)	1.60	1.75
$\phi$ (°)	30.00	31.00
c(t/m2)	1.00	1.50
$\Delta c$ (t/m2/m)	0.00	0.00
qs nails(t/m2)	7.00	10.00

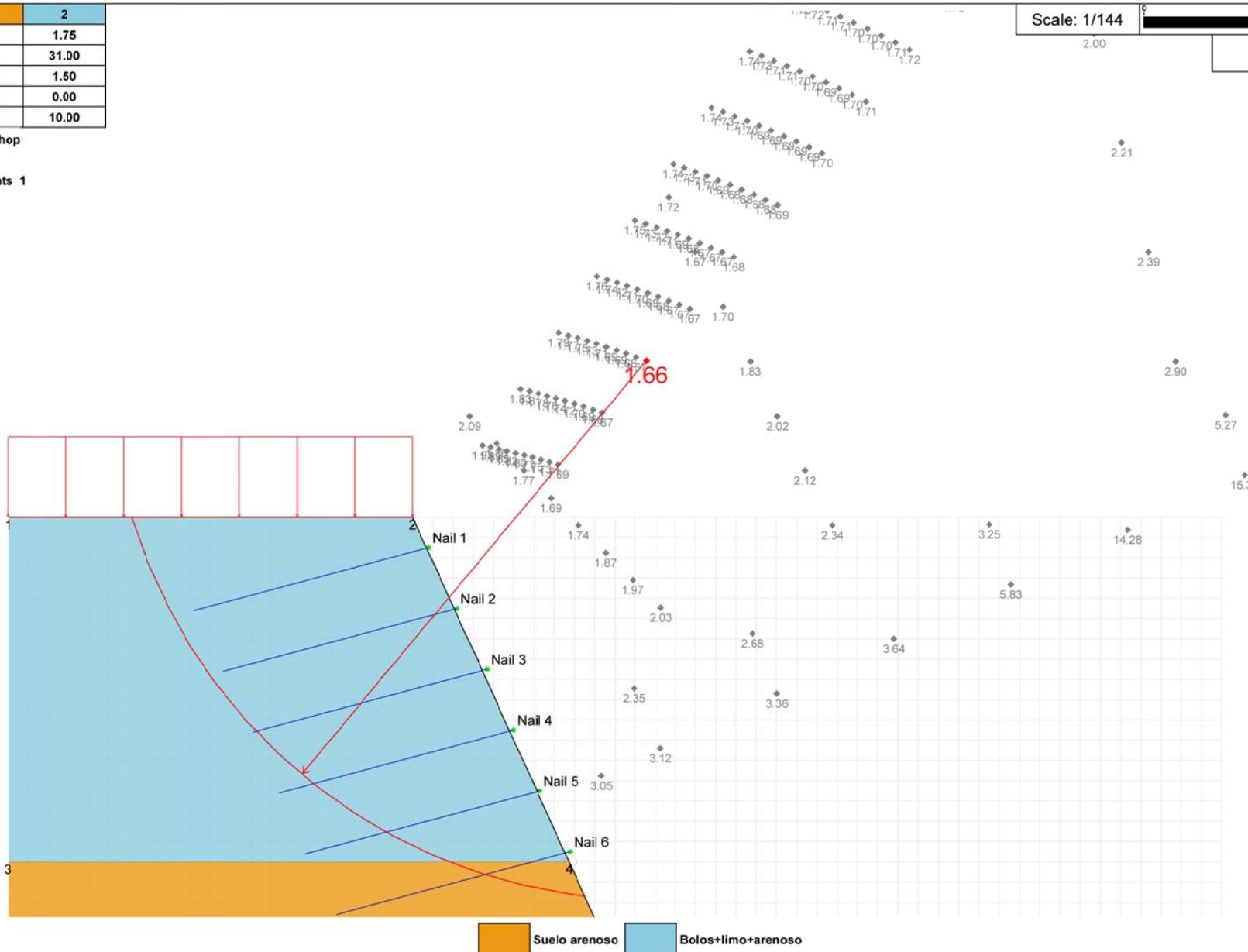
Calculation method : Bishop

Units : t,m2,t/m3

Safety factors : Coefficients 1



**F<sub>min</sub> = 1.66**





## 7.8.2 Estabilización y protección de los muros del sótano del edificio tarragona.

El estudio de la estabilización y protección de los Muros del Sótano del Edificio Tarragona se da para evitar derrumbes y socavaciones debido a la excavación de los sótanos del edificio que se construirá en el lugar.

Para este estudio se necesitó un plano topográfico del lugar a proteger y la inspección visual y estudio de suelo para el diseño de protección, y así poder emplear el Software Talren 4.0 para el diseño de las soluciones posibles.

El terreno medio a utilizar es el que se detalla en la siguiente tabla,

	<b>Suelo 1</b>	<b>Suelo 2</b>	<b>Suelo 3</b>	<b>Suelo 4</b>
<b>Peso Unitario (t/m<sup>3</sup>)</b>	1.6	1.6	1.6	1.6
<b>Cohesión (t/m<sup>2</sup>)</b>	1.5	2.5	3.5	1.5
<b>Angulo de Fricción</b>	20	28	30	34

El factor de Seguridad mínimo de diseño utilizado en esa obra fue de FS: 1.40 y el método utilizado para el cálculo fue el método de Bishop.

El tratamiento final y el que se construyó tomando en cuenta que se tenían alturas hasta de 13.0 metros fue el de inclusiones de Soil Nailing con barras de acero corrugado No. 7 de grado 60 de hasta 9.0 metros de longitud con un espesor de 0.10 metros de muro de concreto lanzado con una resistencia de 3,000 PSI, y espaciados a 1.75 metros en ambos sentidos. Con este tratamiento el factor de seguridad de la obra nos dio como resultado FS: 1.42.



# Hoja de datos de cálculo del Software TALREN 4.0

## Taludes del Edificio Tarragona

Unidades de medidas: t, t/m<sup>2</sup>, t/m<sup>3</sup>

### Propiedades del Suelo

#### Estratos de Suelos

	Nombre	peso especifico $\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	Angulo de Friccion $\phi$	cohesion c (t/m <sup>2</sup> )	Esfuerzo de friccion del suelo $q_s$ (t/m <sup>2</sup> ) para el nail
1	suelo 1	1.6	20	1.5	12.0
2	suelo 2	1.6	28	2.5	12.0
3	suelo 3	1.6	30	3.5	12.0
4	suelo 4	1.6	34	1.5	12.0

Estas son las propiedades del suelo que influyen en conjunto a la geometria del talud para encontrar su estabilidad deseada

### Geometria del Talud

#### Puntos

	X	Y
1	-40.00	0.00
2	0.00	0.00
3	0.00	-2.00
4	0.00	-6.00
5	0.00	-9.00
6	0.00	-13.00
7	20.00	-13.00
8	-40.00	-9.00
9	-40.00	-6.00
10	-40.00	-2.00

#### Segmentos

	punto 1	punto 2
1	1	2
2	2	3
3	3	4
4	4	5
5	5	6
6	6	7
7	5	8
8	4	9
9	3	10

**Figura Construida**

	segmento
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6

Con estos puntos y segmentos se podra modular la figura del talud estudiado

**Sobrecargas**

	punto X izquierdo	punto Y izquierdo	sobrecarga (t/m <sup>2</sup> )	Angulo	base de difusion	Angulo de difusion
	-40.00	0.00	1.00	90	0.00	0.00

	punto X derecho	punto Y derecho	sobrecarga (t/m <sup>2</sup> )	Angulo	base de difusion	Angulo de difusion
	0.00	0.00	1.00	90	0.00	0.00

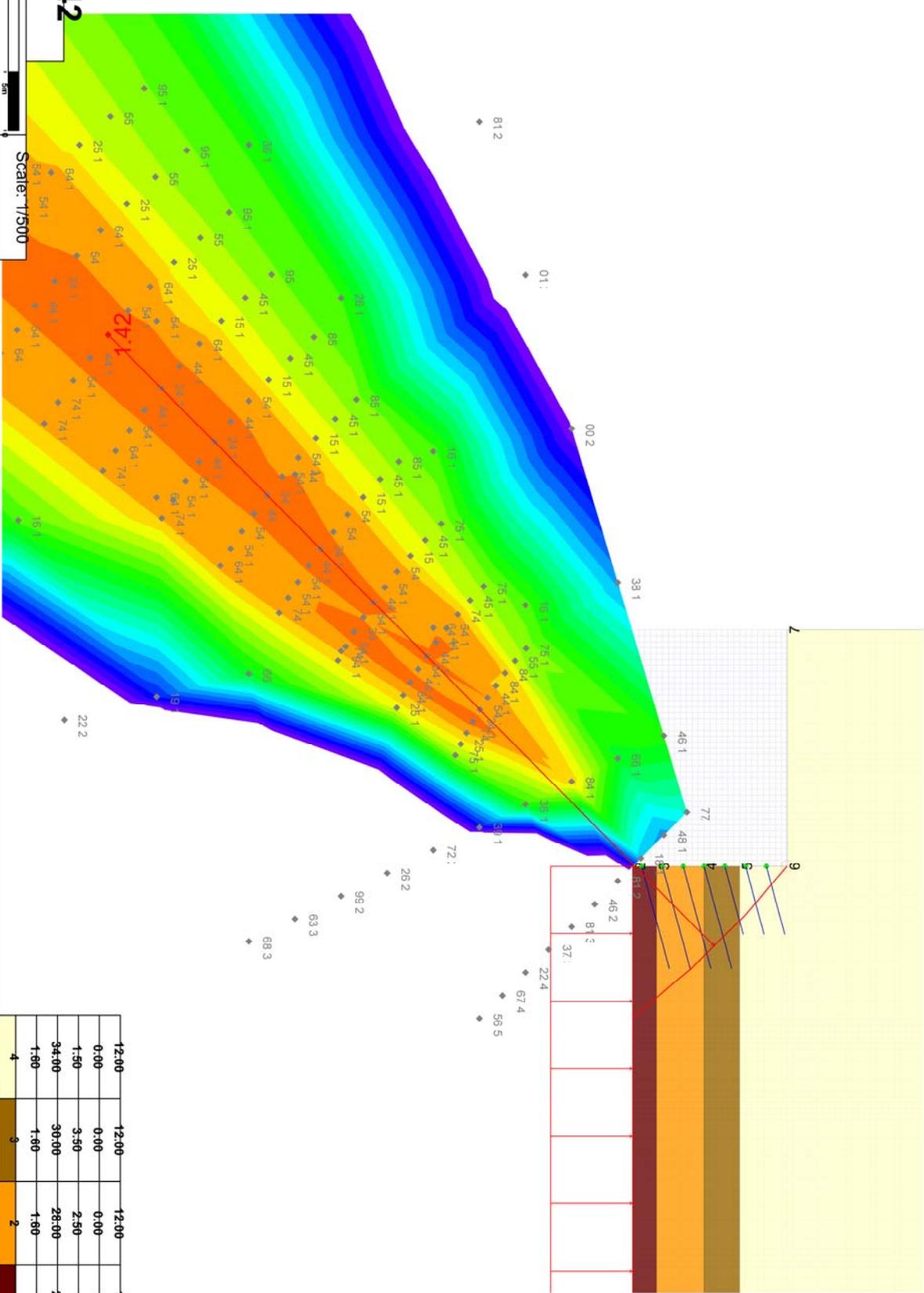
**Refuerzos de Clavo**

	Nombre	Tension (t/m <sup>2</sup> )	espacio horizontal (mts)	punto X	punto Y	Longitud (mts)
1	clavo 1	9.80	1.75	0.00	-0.75	9.00
2	clavo 2	9.80	1.75	0.00	-2.50	9.00
3	clavo 3	9.80	1.75	0.00	-4.25	9.00
4	clavo 4	9.80	1.75	0.00	-6.00	9.00
5	clavo 5	9.80	1.75	0.00	-7.75	6.00
6	clavo 6	9.80	1.75	0.00	-9.50	6.00
7	clavo 7	9.80	1.75	0.00	-11.25	6.00

	angulo horizontal del clavo	medidas de base (mts)	angulo de base	radio equivalente de perforacion (mts)	traccion del clavo.	diametro de varilla (pulg)
1	15	0.20 x 0.20	10	0.057	externo	7/8
2	15	0.20 x 0.20	10	0.057	externo	7/8
3	15	0.20 x 0.20	10	0.057	externo	7/8
4	15	0.20 x 0.20	10	0.057	externo	7/8
5	15	0.20 x 0.20	10	0.057	externo	7/8
6	15	0.20 x 0.20	10	0.057	externo	7/8
7	15	0.20 x 0.20	10	0.057	externo	7/8

Estas son las propiedades del refuerzo del clavo en busca del factor de seguridad deseada en la cual tenemos la tension de la varilla de acero, el espacio horizontal entre clavos, los puntos en donde se localizan cada clavo en el perfil estudiado, la longitud de la varilla, las propiedades del muro como medidas de la base o platina, el radio equivalente de la perforacion y el diametro de la varilla de refuerzo.

Strato Super C/C Couche 4



**F<sub>min</sub> = 1.42**

Scale: 1/500

12:00	12:00	12:00	12:00
0:00	0:00	0:00	0:00
1:50	3:50	2:50	1:50
34:00	30:00	26:00	20:00
1:80	1:80	1:80	1:80
4	3	2	1
			Layer n°



## CONCLUSIONES

1. La inestabilidad de un talud se da por la diferencia de niveles topográficos, entre los dos planos unidos por un talud, existe una tendencia natural de las masas a equilibrar sus potenciales energéticos. Esta inestabilidad física, encontraría su estado teóricamente de equilibrio final, cuando las masas igualan sus energías, eliminando la diferencia de potencial inicial. Este equilibrio tiende a alcanzar, como estado límite, la formación de un plano horizontal.
2. Los factores que influyen a las fallas de un talud son los externos e internos. Los factores externos se refieren al incremento de tensiones de corte o movilización de la resistencia, a los cambios en la geometría, la excavación empinada de taludes, erosión y la remoción de soporte lateral. Los factores internos se refieren al decremento en la resistencia al corte disponible, fisuración, movimiento en fallas geológicas, sismos, al cambio en el campo de flujo, incremento de la filtración y retención de agua por lluvias, cambio en la piezometría por corte.
3. Existen diferentes tipos de taludes en los cuales se puede mencionar el talud natural, el cual contiene una pendiente natural del terreno, no intervenidos por la acción del hombre.

Su conformación actual tuvo como origen un proceso natural. En general se denominan: laderas; el talud artificial que son aquellos cortes o terraplenamientos que realiza el hombre, modificando el estado natural del terreno, por razones de proyecto y determinando la pendiente a mayor conveniencia de diseño; El talud infinito es cuando las propiedades del suelo a la misma profundidad son iguales y la profundidad hasta el substrato resistente es constante y pequeña comparada con la longitud total del talud; y el talud finito representa el estado más general, donde debe considerarse la estática de la totalidad de masa que falla. Su estudio es más complejo. Se pueden mencionar, los taludes en corte para carreteras, vías férreas, canales, etc. y los terraplenes de vías y presas de tierra.

4. Como se puede observar en la tabla II del trabajo presentado, los métodos de estabilización de taludes y los cálculos que estos requieren son muy simplificados y no requieren de un análisis bastante profundo pueden ser calculados para cualquier tipo de obra sin ninguna limitante.
5. Los métodos más utilizados en el cálculo y diseño de taludes son los métodos de Fellenius y el de Bishop debido a su simplicidad y exactitud que estos proporcionan.
6. El Soil Nailing es un sistema que debido a la versatilidad de aplicaciones y a las ventajas que ofrece respecto a los métodos convencionales de estabilización de suelos (muros de gravedad, muro en voladizo) se ha empezado a popularizar en Guatemala en los últimos tiempos.

## RECOMENDACIONES

El suelo enclavado tiene ventajas técnicas y económicas sobre las técnicas más convencionales de corte y retención. Por eso se recomienda el sistema de suelo enclavado en el territorio de Guatemala, el cual presenta una geografía muy vulnerable a los deslizamientos y las fallas que este pueda tener. Esta recomendación general se hace tomando en cuenta las ventajas que se tienen en la utilización de este sistema:

1. Bajo costo, la relativa rapidez de instalación de las inclusiones no esforzadas (nails) la cual es considerablemente más corta que la de los anclajes y la capa de lanzado relativamente es más delgada.
2. Únicamente se necesita equipo liviano de construcción para colocar las inclusiones así como equipo simple de lanzado e inyección de lechada. El llenado de las perforaciones con lechada generalmente se hace por gravedad. Esta característica puede ser de particular importancia en lugares de difícil acceso.
3. Debido al gran número de inclusiones y que se encuentran conectados por medio de varillas de refuerzos transversales, la falla de alguna no es determinante, ni afecta la estabilidad del sistema, como es el caso de los anclajes convencionales porque estas actúan en bloque.

4. En suelos heterogéneos con gravas y zonas intemperizadas o roca dura, se ofrece la ventaja de perforaciones de diámetro pequeño para instalar los nails.
5. Las estructuras con suelo enclavado son más flexibles que las estructuras rígidas convencionales. Consecuentemente, estas estructuras pueden conformar un terreno perimetral con capacidad de soportar mayores movimientos diferenciales del terreno en todas direcciones.
6. Las deformaciones superficiales pueden ser controladas por medio de la instalación de nails adicionales o esforzando los nails del nivel superior a un pequeño porcentaje de sus cargas de trabajo.
7. Los volúmenes de corte, relleno y acarreo producto de la construcción de muros de contención convencionales se eliminan.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Manual Técnico del Software TALREN 4.0 para la estabilización de taludes.
2. Carlos, Crespo Villalez. Mecánica de suelos y Cimentaciones 5ª edición México: Limusa, 2005. Página 217-240.
3. José, Clemente de Ucelay. Revista del Colegio de Ingeniería de caminos, canales y puertos de España, 1942, tomo II 27.  
[www.ropdigital.ciccp.es](http://www.ropdigital.ciccp.es)
4. Manuales de Procedimiento de Construcción de Rodio-Swissboring Guatemala, tomo Soil Nailing.
5. Carlos Lazarte, Víctor Elías, David Espinoza. Manual Técnico 2001-2002 de Ingeniería Geotécnica Circular No. 7 Muros Soil Nailing. Washington D.C, Estados Unidos de Norteamérica: FHWA Consultas Técnicas, 2003. Página 22-145.

### Referencia Electrónica

6. [www.lancuyen.cl](http://www.lancuyen.cl)
7. [www.idh-geotecnia.com](http://www.idh-geotecnia.com)
8. [www.construmatica.com](http://www.construmatica.com)
9. [www.aimecuador.com](http://www.aimecuador.com)
10. [www.es.wikipedia.org](http://www.es.wikipedia.org)



# ANEXO

## ANEXO No. 1

### Corrections of Soil Length

$$\frac{L}{H} \text{ (corrected)} = C_{1L} \times C_{2L} \times C_{3L} \times \frac{L}{H} \text{ (from charts for } D_{DH} = 100 \text{ mm, } c^* = 0.02, FS_G = 1.35)$$

where:

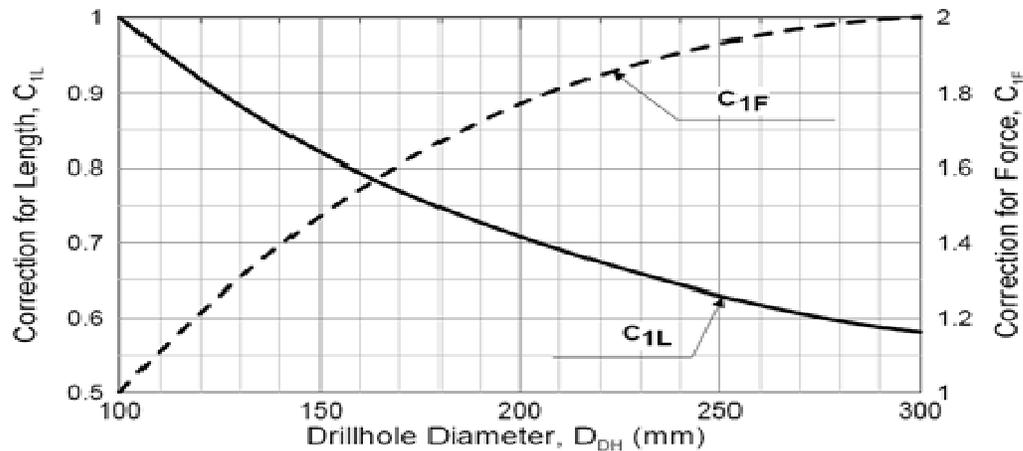
$C_{1L}$ = Correction for Drillhole Diameter	see chart (a) below
$C_{2L}$ = Correction for Soil Cohesion	see formula (b) below
$C_{3L}$ = Correction for Global Factor of Safety	see formula (c) below

### Corrections of Normalized Maximum In-Service Nail Force

$$t_{\max-s} \text{ (corrected)} = C_{1F} \times C_{2F} \times t_{\max-s} \text{ (from charts for } D_{DH} = 100 \text{ mm, } c^* = 0.02)$$

$C_{1F}$ = Correction for Drillhole Diameter	see chart (a)
$C_{2F}$ = Correction for Soil Cohesion	see formula (b)

#### (a) Correction for Drillhole Diameter



#### (b) Correction for different values of normalized cohesion ( $c^*=c/H$ )

$$C_{2L} = -4.0 c^* + 1.09 \geq 0.85$$

$$C_{2F} = -4.0 c^* + 1.09 \geq 0.85$$

#### (c) Correction for different global factors of safety

$$C_{3L} = 0.52 FS + 0.30 \geq 1.0$$

Fuente: Manual Técnico 2001-2002 Circular No 7