

Métodos de análisis y diseño para la resolución de problemas de estabilidad de taludes y excavaciones mediante técnicas de *soil nailing*

Analysis and design methods for problem-solving of slope and excavation stability through soil nailing techniques

CARLOS GERMÁN NIÑO MARTÍNEZ¹ - CARLOS EDUARDO RODRÍGUEZ PINEDA²

1. Magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia, M.Sc. y Ph.D., profesor universitario, y consultor e investigador en geotecnia.

carlos.nino-m@escuelaing.edu.co - cerodriguezpi@unal.edu.co

Recibido: 28/01/2018 Aceptado: 01/03/2018

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de un estudio de los principales aspectos que inciden en el comportamiento de las estructuras de *soil nailing* (suelo claveteado), la interacción entre los elementos principales del sistema, sus variables de comportamiento y su contribución a la estabilidad global del sistema. Se analizaron cuatro tipos de suelo de la ciudad de Bogotá: arcillas duras, arcillas blandas, arenas densas y arenas sueltas (esta clasificación rige para los suelos estudiados en la presente investigación). Para la caracterización de los materiales se utilizaron los resultados de los ensayos de campo y laboratorio de los estudios de suelos para las fases I y II del metro. Se hicieron modelos en los programas de equilibrio límite SNAP-2 y Slide, y en el programa de elementos finitos RS2.

Palabras claves: *soil nailing* (suelo claveteado), elementos finitos, modelaciones, estructuras de contención, excavaciones, anclajes pasivos, interacción suelo-*nail* (clavo).

Abstract

This paper presents the results of a study about the main aspects that affect the behavior of soil nailing structures, the interaction between the main elements of the system, its behavioral variables, and its contribution to the overall stability of the system. Four types of Bogota city soil, hard clays, soft clays, dense sands, and loose sands, were analyzed (this classification applies for the soils studied in the present investigation). For characterizing the materials, the results of the field and laboratory tests of the soil studies for phases I and II of the elevated railway were used. We performed models in the equilibrium programs SNAP-2 and Slide, and in the finite element program RS2.

Keywords: soil nailing, finite element, numerical modelling, retaining structures, excavations, passive anchors, soil-nail interaction.

INTRODUCCIÓN

Las técnicas de *soil nailing* (suelo claveteado) representan una alternativa económica y rápida para la estabilización de taludes y excavaciones en un terreno con ciertas condiciones. Tienen un uso extensivo en muchos países de Europa, Norteamérica y Asia, y a lo largo del tiempo han demostrado un buen comportamiento en condiciones estáticas y sísmicas. Teniendo presente esto, es importante para el país incentivar el uso de tales técnicas en proyectos en los cuales pueden ser útiles y generar beneficios económicos para las entidades encargadas de ejecutarlos. No obstante, antes de hacer un uso extensivo de dichas técnicas, es necesario entender el comportamiento de los sistemas, los componentes del sistema y su interacción con el suelo, de tal manera que se logre aprovechar al máximo las ventajas que ofrecen las técnicas de *soil nailing*.

Descripción del sistema

El sistema *soil nailing* (suelo claveteado) es una técnica que consiste en reforzar el suelo *in situ* mediante la instalación de barras pasivas paralelas, denominadas *nails* (clavos), normalmente con algún grado de inclinación hacia abajo con respecto a la horizontal. Éstos trabajan principalmente en tracción, y algunas veces en flexión y cortante. La fricción entre el suelo y el *nail* (clavo) pone los *nails* en tensión¹.

Componentes del sistema

A renglón seguido se observan los componentes de un sistema de *soil nailing* (figura 1).

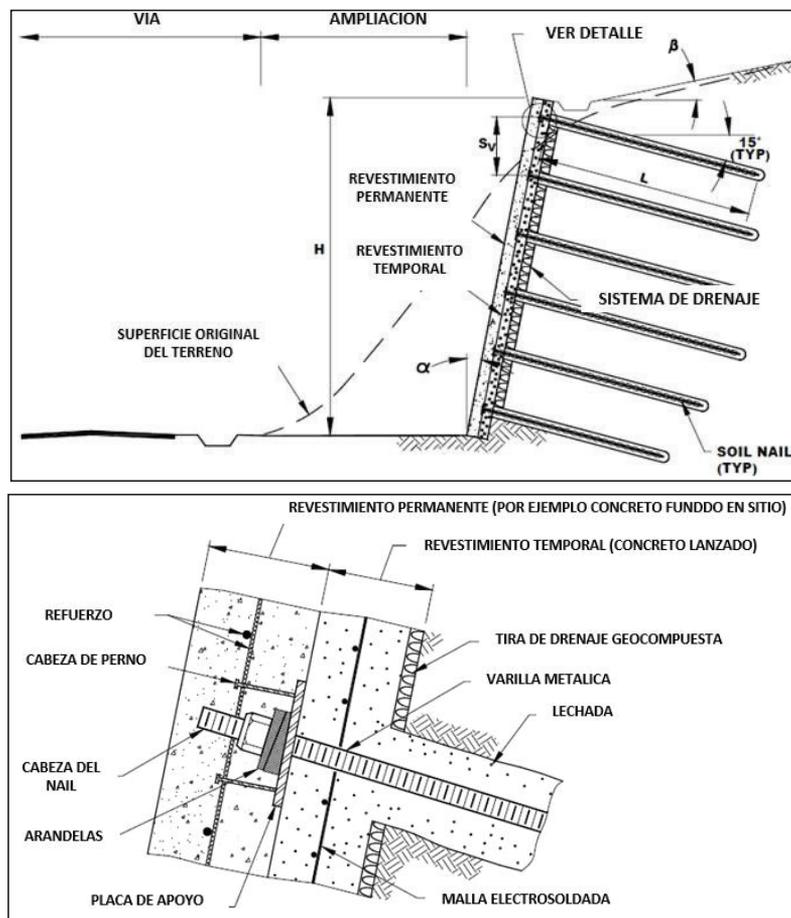


Figura 1. Detalle de los componentes básicos de un sistema de *soil nailing* (tomado de *Geotechnical Engineering*, circular N.º 7, Soil Nail Walls).

1. French National Research Project Clouterre Soil Nailing Recommendations, 1991, p. 1.

Proceso constructivo

La secuencia de construcción comprende, en esencia, los siguientes pasos (Lazarte et al., 2003):

Paso 1. Excavación. La excavación inicial se lleva a cabo a una profundidad para la cual su cara tiene la capacidad de permanecer no soportada por un corto periodo de tiempo, normalmente de 24 a 48 horas. La profundidad de la excavación está, por lo general, entre 1 y 2 m y ligeramente por debajo de la elevación donde se instalarán las varillas. La anchura de la plataforma o banco excavado debe ser suficiente para proporcionar acceso al equipo de la instalación. Durante la fase de excavación el suelo debe permanecer estable, lo cual requiere algún grado de cohesión a corto plazo.

Paso 2. Perforación. Los barrenos son perforados a una longitud específica, diámetro, inclinación y distancia horizontal desde la plataforma.

Paso 3. Instalación de varillas e inyección de lechada. Las varillas se colocan en las perforaciones. Los centralizadores se ponen alrededor de las varillas antes de la inserción, para ayudar a mantener la alineación en el agujero y permitir una adecuada cobertura de la lechada sobre las varillas. Al mismo tiempo, se inserta en el orificio el tubo de suministro de lechada. Cuando los requisitos de protección contra la corrosión son altos, también puede emplearse revestimiento de plástico corrugado para proporcionar un nivel adicional de protección contra la corrosión. La perforación se llena con lechada de cemento a través de la tubería de inyección. La lechada se coloca comúnmente a baja presión. Si se utilizan barras autoperforantes huecas, la perforación y la inyección se llevan a cabo en una sola operación.

Antes del paso 4, se instalan tiras de drenaje geocompuestas en el frente de excavación, aproximadamente en la mitad del espaciamiento entre cada conjunto de varillas adyacentes. Las tiras de drenaje se desenrollan a la siguiente elevación de la pared; éstas se extienden hasta el fondo de la excavación, donde el agua recogida se transporta a través de un drenaje en el talón del *soil nail*.

Paso 4. Construcción de revestimiento temporal de concreto lanzado. Un sistema de revestimiento temporal se construye entonces para soportar la sección de suelo a cielo abierto, antes de excavar el siguiente tramo de suelo. El revestimiento temporal consiste por lo general en una capa de concreto lanzado ligeramente armado, casi siempre de 100 mm de espesor. El refuerzo normalmente se compone de malla electrosoldada, que se

coloca más o menos a la mitad del espesor de revestimiento (figura 1, parte inferior). La longitud de la malla electrosoldada debe ser tal que permita que al menos una célula de malla completa se traslape con paneles posteriores. Después de un tiempo de curado adecuado para el revestimiento temporal, se pone una placa de apoyo de acero sobre la cabeza del *nail* que sobresale de la perforación. La barra es entonces presionada ligeramente en la primera capa de concreto lanzado fresco.

La tuerca hexagonal y las arandelas se instalan posteriormente para asegurar la cabeza del *nail* contra la placa de apoyo. La tuerca hexagonal se aprieta a un par mínimo requerido después de que el revestimiento temporal se ha curado lo suficiente. Esto, por lo general, requiere un mínimo de 24 horas. Si es necesario, se hacen las pruebas de los *nails* instalados para medir deflexiones, en tanto que las pruebas de capacidad de carga se pueden realizar antes de proceder con la siguiente excavación. Antes de hacer excavaciones posteriores, el concreto lanzado debe haberse curado durante al menos 72 horas o haber alcanzado al menos tres días de resistencia a la compresión especificada (generalmente, 10,5 MPa).

Paso 5. Construcción de niveles posteriores. Los pasos 1 a 4 se repiten para los niveles de excavación restantes. En cada nivel de excavación, la tira de drenaje vertical se desenrolla hacia abajo a la elevación posterior. Un nuevo panel de malla electrosoldada se coloca traslapando al menos una célula de malla completa. El concreto lanzado se continúa con una junta fría, con el nivel de concreto lanzado antes. En la parte inferior de la excavación, la tira de drenaje está conectada a un desagüe en la base del talud.

Paso 6. Construcción del revestimiento permanente final. Después de que se alcanza el fondo de la excavación, se instalan los *nails* y se realizan las pruebas de carga, se puede construir el revestimiento final, el cual puede consistir en hormigón armado fundido *in situ*, hormigón proyectado, o paneles prefabricados. El refuerzo del revestimiento permanente son barras de acero de refuerzo convencionales o malla electrosoldada. En el revestimiento permanente se deben evitar las juntas horizontales en la medida de lo posible².

2. HWA. *Geotechnical Engineering*, circular N.º 7, Soil Nail Walls. FHWA-IF-03-017. March 2003, p. 7.

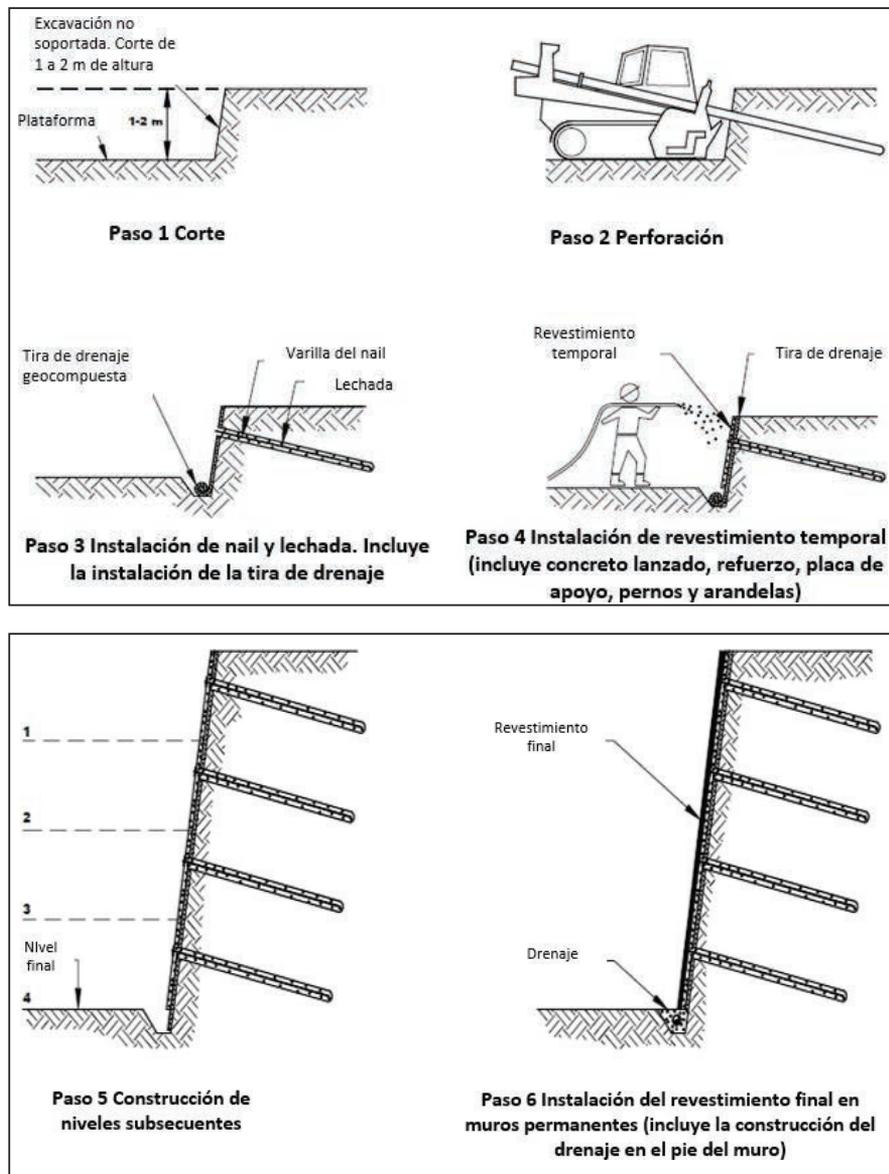


Figura 2. Secuencia típica de construcción de un sistema de *soil nailing* (tomado de *Geotechnical Engineering*, circular N.º 7, Soil Nail Walls).

Trabajo de investigación

En este estudio se modelaron muros de 2,0 a 10,0 m de altura. Se hicieron modelos con espaciamientos entre *nails* de 1,0 m, 1,5 m y 2,0 m, debido a que la práctica usual de construcción de este tipo de sistemas se limita a espaciamientos entre 1,0 y 2,0 m. Para determinar la contribución de cada elemento del sistema se hicieron análisis de sensibilidad, variando las propiedades de cada elemento de tal forma que se pudieran observar los efectos de dichas variaciones. También se hicieron

modelos con diferentes longitudes y diámetros de *nails* para analizar los efectos sobre los factores de seguridad y las fuerzas en el revestimiento. Se realizaron análisis comparativos del factor de seguridad con el sistema y sin el sistema, para verificar cuál era su contribución a la estabilidad de los taludes y excavaciones. Finalmente, se hicieron análisis para determinar cuáles eran los parámetros de mayor incidencia en el comportamiento del sistema.

Tabla 1
Variables de comportamiento

Suelo	γ'_s	ϕ'	c'	q_u	N_c	N_q	N_γ	E	ν
	kN/m ³	°	kPa	kPa	-	-	-	MPa	-
Arcilla dura	18,41	27	29	103	23,94	13,20	14,47	260,65	0,375
Arcilla blanda	18,10	27	26	44	23,94	13,20	14,47	165,00	0,376
Arena densa	19,57	42	15	137	93,71	85,37	155,54	329,5	0,379
Arena suelta	19,91	31	15	100	32,67	20,63	25,99	174	0,377

La investigación se limitó a cuatro tipos de suelo de la ciudad de Bogotá. También se limitó la geometría de los muros, ya que el objetivo principal no era hacer cartas de diseño generales sino analizar los principales elementos del sistema y su influencia. En los análisis no se tuvieron en cuenta taludes inclinados detrás del muro o condiciones de nivel freático, condiciones sísmicas, inclinaciones de los *nails* o muros inclinados.

Se obtuvieron hallazgos interesantes en relación con la influencia de las propiedades de resistencia al corte de los suelos, la longitud de los *nails* o la presencia del revestimiento sobre el factor de seguridad. Se presenta el procedimiento para el diseño y análisis de estructuras.

El objetivo de la investigación era definir una metodología de análisis para la solución de problemas de estabilización de taludes y excavaciones mediante sistemas de *soil nailing*.

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Se realizaron dos tipos de modelos: de equilibrio límite (SNAP-2 y Slide) y de elementos finitos (RS2). Para llevar a cabo el análisis, se siguió este procedimiento:

- Definición de las variables principales de comportamiento.

- Delimitación del análisis y modelación.
- Modelación en SNAP-2.
- Modelación en RS2.
- Modelación en Slide.
- Análisis de resultados.
- Diseño del revestimiento.

Se aclara que la clasificación establecida en la tabla 1 es aplicable únicamente a los suelos estudiados en la presente investigación.

Para la delimitación de las modelaciones se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Suelos: arcillas y arenas de la zona sur de la ciudad de Bogotá.
- Geometría: muros verticales de entre 2,0 m y 10,0 m de altura, con espaciamientos de 1,0, 1,50 y 2,0 m.
- Sobrecarga: 50 kPa, 40 kPa, 30 kPa y 20 kPa.
- *Nails*: diámetro de perforación de 100 mm y diámetro de refuerzo de 25 mm.
- Métodos: equilibrio límite y elementos finitos.
- Análisis de sensibilidad: se hicieron modificaciones en diferentes parámetros para analizar los efectos de éstas sobre el comportamiento del sistema.

Procedimiento de modelación
Modelos en SNAP-2

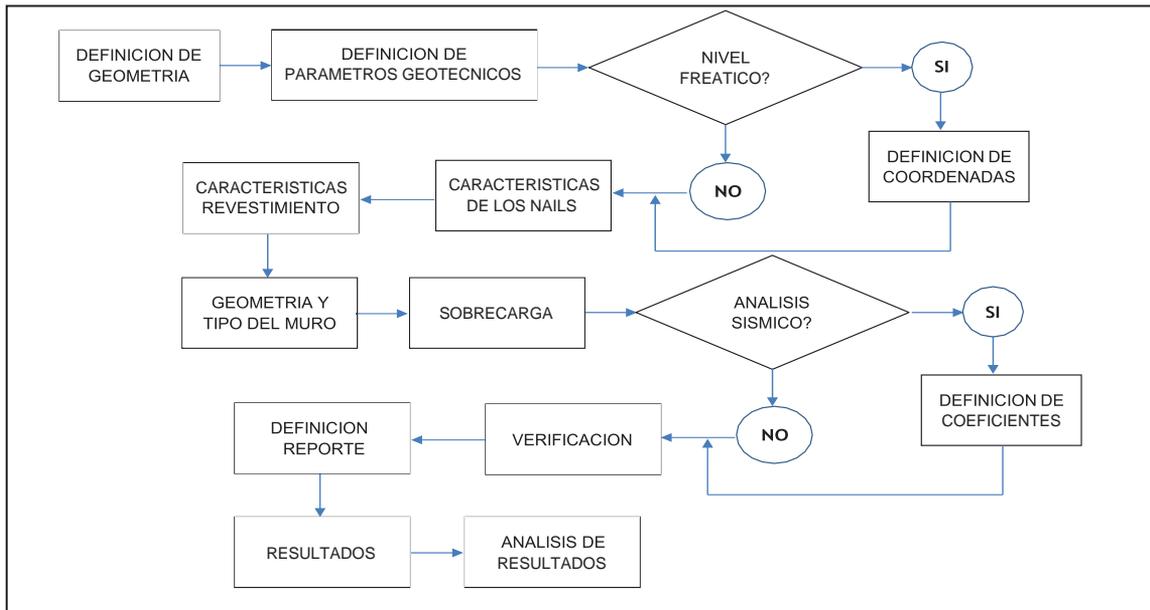


Figura 3. Procedimiento de modelación en SNAP-2.

Modelos en RS2

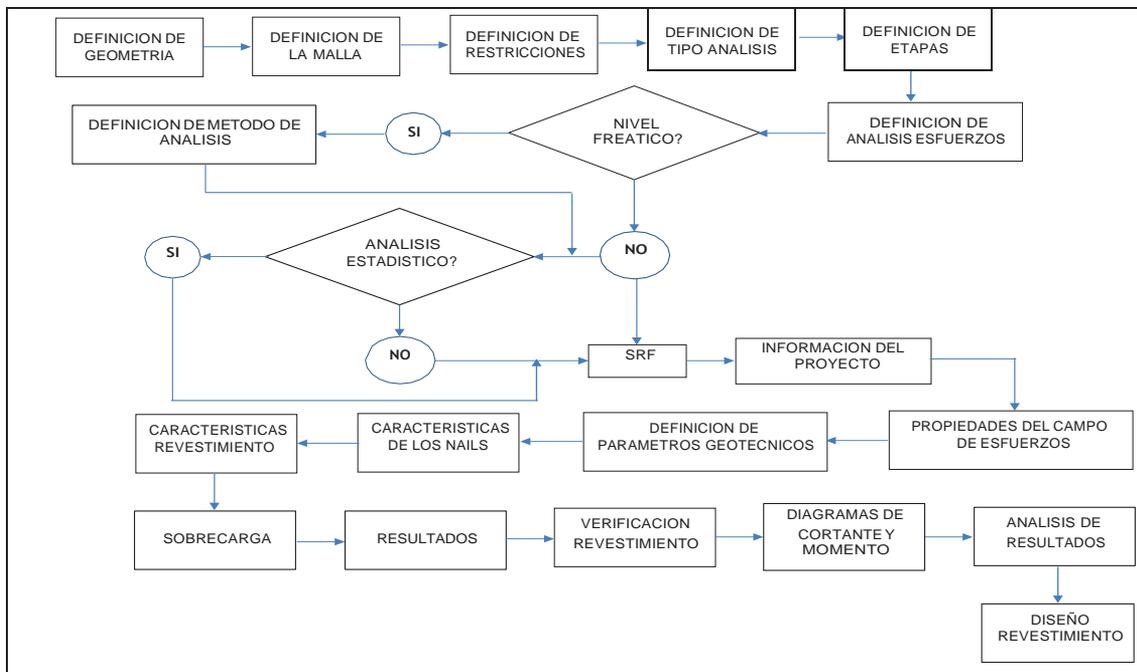


Figura 4. Procedimiento de modelación en RS2.

Modelos en Slide

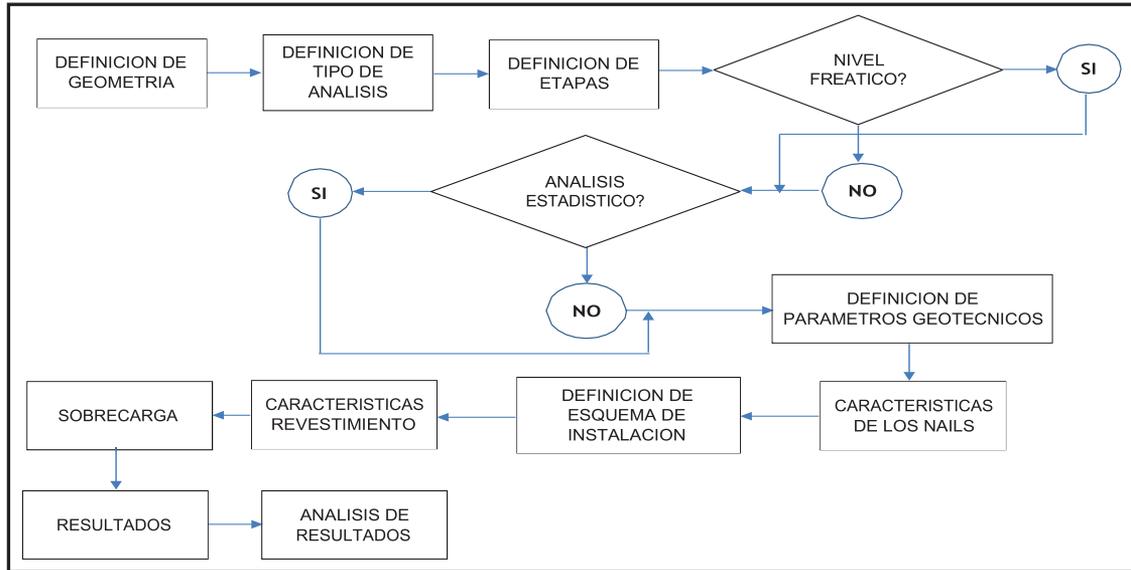


Figura 5. Procedimiento de modelación en Slide.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se evaluaron las siguientes características del sistema:

1. Influencia de los factores que se involucran en el diseño (tipo de suelo, longitud del *nail*, adherencia, diámetro de la perforación, diámetro del *nail*, revestimiento, interacción suelo-*nail*).

Tabla 2

Comparación de resultados en el factor de seguridad en la misma etapa constructiva para muros de varias alturas, con revestimiento, y espaciamiento 1,5 x 1,5, mediante un análisis en RS2

Tipo de análisis	H muro (m)	Long Nail (m)	Etapla constructiva (h = 4,50 m)	FS en la etapa analizada
RS2	4,50	3,15	Revestimiento 3	2,59
RS2	6,00	4,20	Revestimiento 3	2,87
RS2	7,50	5,25	Revestimiento 3	2,87
RS2	9,0	6,30	Revestimiento 3	3,34

A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos.

Longitud de los *nails*

En todos los análisis efectuados se encontró que la longitud del *nail* tiene una influencia significativa en el factor de seguridad. A mayor longitud de *nail*, mayor factor de seguridad global. En los modelos elaborados en RS2 se observó que para un aumento de la longitud del *nail* de un 100 %, se podían obtener aumentos en el factor de seguridad global cercanos al 30 %. Esto indica que en ocasiones es posible recurrir a la modificación en la longitud del *nail* para aumentar el factor de seguridad global.

Adherencia suelo-*nail*

De los modelos realizados en Slide se obtuvo que la adherencia tiene una gran influencia en el aumento o disminución del factor de seguridad global. Es decir, se encontró que hasta ciertos valores límite, al aumentar la adherencia, también aumentaba el factor de seguridad global. Después de este valor límite, al aumentar la adherencia el factor de seguridad puede permanecer constante o incluso disminuir por los efectos sobre el revestimiento, ya que a mayor adherencia, también son mayores las fuerzas sobre el revestimiento. El revestimiento puede fallar y generarse superficies de falla cerca del frente de excavación. Esto indica que la adherencia

Tabla 3

Comparación de resultados en el factor de seguridad y otros parámetros para un muro de 9 m de altura y espaciamientos de 1,5 x 1,5, en arena suelta, mediante un análisis en RS2

Parámetro	Diámetro de la lechada para una varilla de 25,4 mm de diámetro			
	75 mm	100 mm	200 mm	300 mm
Módulo de Young equivalente (Eq) (kPa)	46.842.254	38.161.268	29.790.254	28.240.141
Factor de seguridad	1,39	1,39	1,30	1,02
% variación FS	-	0%	-6,47	-21,54 %
Deformaciones cortantes máximas	0,065	0,063	0,045	0,054
Desplazamientos laterales máximos	0,0071	0,006	0,003	0,0003
Fuerzas máximas cabeza <i>nail</i> (kN)	119	120	128	97
Fuerzas máximas <i>nail</i> (kN)	139	142	145	128
Desplazamientos verticales máximos (m)	0,0076	0,0062	0,0045	0,0005
Movimiento máximo en el revestimiento (kN-m)	18	18	18	10
Cortante máximo en el revestimiento (kN)	64	65	69	53
Deformaciones volumétricas máximas	0,0015	0,0015	0,0018	0,0018

no es el único factor que influye, sino que está también acompañada de la rigidez del revestimiento.

Diámetro de la perforación

Se encontró en los modelos en RS2 que al aumentar el diámetro de la perforación, los factores de seguridad disminuyen. Esto es especialmente importante en los modelos realizados en arenas, donde se encontraron disminuciones muy significativas (tabla 3).

La razón de la disminución en el factor de seguridad está relacionada con la forma como se realiza el modelo. En un modelo de elementos finitos de dos dimensiones, el programa asume el *nail* como una placa continua de un ancho fijo; en otras palabras, en el modelo, esta placa siempre tiene el mismo ancho, o sea, que al aumentar el diámetro de la perforación el ancho no varía, sólo varía la altura. Por lo tanto, el área de contacto suelo-*nail* siempre será la misma. Adicionalmente, si se aumenta el diámetro (es decir, la altura de la placa), se debe disminuir la rigidez equivalente del *nail*, para simular el cambio en el diámetro de la lechada pero dejando constante el diámetro de la varilla de refuerzo.

No obstante lo anterior, sí se puede observar la tendencia general a una disminución en los desplazamientos y deformaciones, así como en las fuerzas en los *nails* y en el revestimiento al aumentar el diámetro de la perforación en el modelo; esto se debe a que aunque el *nail* tiene una menor rigidez, el conjunto suelo-*nail* sí tiene una mayor rigidez.

Efecto del revestimiento

El revestimiento tiene una influencia muy significativa en el factor de seguridad global. En la siguiente tabla se pueden observar los resultados de varios análisis realizados en RS2 (tabla 4):

Tabla 4

Comparación de resultados en el factor de seguridad para varios muros de 9 m de altura y espaciamientos de 1,5 x 1,5, mediante un análisis en RS2

Análisis	Material	Altura muro (m)	FS con revestimiento	FS sin revestimiento	% Variación
RS2	Arena suelta	9,0	1,44	1,15	-20,71 %
RS2	Arena densa	9,0	1,98	1,36	-31,31 %
RS2	Arcilla blanda	9,0	1,57	1,47	-6,37 %
RS2	Arcilla dura	9,0	1,63	1,53	-6,14 %

Se observa en la anterior tabla que en los suelos arenosos la influencia del revestimiento es mucho mayor que en los suelos arcillosos analizados en la presente investigación.

Interacción suelo-*nail*

En este punto se destaca la importancia de los parámetros de resistencia del suelo. Se encontró que el principal parámetro de comportamiento es el ángulo de fricción. Obviamente, este parámetro tiene una relación directa

Tabla 5

Comparación de los factores de seguridad en función de los parámetros geomecánicos del suelo para un muro de 7,50 m con espaciamientos de 1,50 x 1,50, mediante un análisis en RS2

SUELO	ϕ'	% Variación	C'	% Variación	FS	% Variación
ARENA SUELTA	31		15		1,51	
		35%		0%		37%
ARENA DENSA	42		15		2,07	
SUELO	ϕ'	% Variación	C'	% Variación	FS	% Variación
ARCILLABLANDA	27		26		1,65	
		0%		12%		4%
ARCILLA DURA	27		29		1,72	
SUELO	ϕ'	% Variación	C'	% Variación	FS	% Variación
ARENA DENSA	42		15		2,07	
		-36%		93%		-17%
ARCILLA DURA	27		29		1,72	
SUELO	ϕ'	% Variación	C'	% Variación	FS	% Variación
ARENA SUELTA	31		15		1,51	
		-13%		73%		9%
ARCILLABLANDA	27		26		1,65	

con la adherencia entre el suelo y la lechada de cemento. En la siguiente tabla se presenta este análisis (tabla 5).

- La contribución del sistema de *soil nailing* en la estabilidad de un talud (modelos con sistema y sin él, resultados entre los diferentes modelos, efecto de la sobrecarga).

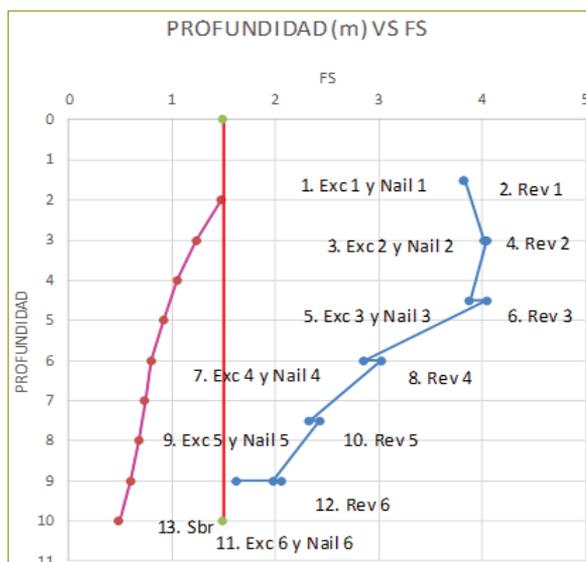


Figura 6. Comparación de los resultados del factor de seguridad obtenido sin el sistema y con el sistema, para arcillas duras, mediante modelos en RS2.

En la tabla siguiente se presenta la comparación de resultados de los factores de seguridad global de excavaciones sin el sistema de reforzamiento de *soil nailing* y los resultados, incluyendo el reforzamiento (tabla 6).

En esta figura se observan los resultados de la modelación sin la inclusión del sistema de reforzamiento en la parte izquierda, en los cuales todos los valores del FS están por debajo del valor de referencia de 1,50. A la derecha se observan los resultados del modelo una vez que se incluye el sistema de reforzamiento. En todas las etapas, el FS está por encima de 1,50.

- La contribución del revestimiento temporal y permanente al sostenimiento de una excavación (efecto del revestimiento temporal sobre el comportamiento del sistema, efecto del revestimiento definitivo sobre el comportamiento del sistema, efecto de la sobrecarga en las fuerzas en la cabeza del *nail*).

El revestimiento temporal tiene una influencia muy significativa en el comportamiento de todo el sistema, tal como puede verse en los resultados que aparecen en la tabla siguiente (tabla 6).

En el caso citado se necesita el revestimiento temporal para aumentar el factor de seguridad global hasta un valor mínimo requerido. También se observa que el revestimiento no influye solamente en el factor de seguridad sino en la disminución de

Tabla 6

Comparación de resultados de diferentes variables para un muro de 9,0 m en arena suelta con revestimiento temporal y sin revestimiento temporal, mediante un análisis en RS2

Constr.	FS	Máx. def. cortante	Máx. despl. horizontal (m)	Máx. despl. vertical (m)	Máx. despl. total (m)	Máx. def. volumétrica	Fuerza nail 1 (kN)	Fuerza máx. nail (kN)
Con revestimiento	1,44	0,025	0,00841	0,00824	0,0101	0,00131	28	117
Sin revestimiento	1,15	0,045	0,02315	0,02386	0,0332	0,00150	3	7
% de variación	-20 %	80 %	175 %	190 %	229 %	15 %	-89 %	-94 %

deformaciones y desplazamientos, así como en las fuerzas en los *nails*.

Respecto a la contribución del revestimiento definitivo, se encontró que no tiene ninguna influencia en el factor de seguridad global ni en los parámetros de comportamiento. En la siguiente tabla se puede observar este resultado (tabla 7):

Tabla 7

Comparación de resultados de diferentes variables para un muro de 9,0 m en arena suelta, incluyendo el revestimiento definitivo, mediante un análisis en SNAP-2

Parámetro	Sin revestimiento definitivo	Con revestimiento definitivo	% de variación
Fuerza cabeza <i>nail</i> (kN)	47	47	0 %
Resistencia admisible en la cabeza del <i>nail</i>	46	46	0 %
Resistencia del concreto al punzonamiento (kN)	167	167	0 %
Resistencia disponible a la flexión en la cabeza (kN)	46	46	0 %
Resistencia disponible al punzonamiento en la cabeza (kN)	141	141	0 %
Factor de seguridad en etapas intermedias (etapa 9)	2,24	2,07	-7 %
Factor de seguridad en la etapa final	1,81	1,81	0 %

Esto se debe a que el revestimiento definitivo no participa en el mecanismo de transferencia de carga. El terreno transmite la carga a los *nails*, los *nails* transmiten carga a la cabeza del *nail*, la cabeza del *nail* transmite carga a la placa de apoyo y la placa de apoyo transmite carga al revestimiento temporal, generando fuerzas de corte sobre éste. El revestimiento definitivo se coloca

para dar continuidad estructural y durabilidad a largo plazo.

CONCLUSIONES

A continuación se presentan las principales conclusiones de la investigación:

- El factor de seguridad y el esquema de diseño de un sistema de *soil nailing* dependen directamente de los parámetros c' y ϕ' .
- El parámetro ϕ' es el de mayor influencia en el factor de seguridad.
- A mayor longitud de los *nails*, mayor es el factor de seguridad.
- La adherencia suelo-*nail* tiene una influencia significativa en el factor de seguridad.
- El revestimiento es el elemento que tiene mayor influencia en la estabilidad del sistema.
- Cuanto mayor sea la sobrecarga, menor es el factor de seguridad.
- A mayor profundidad, menor influencia de la sobrecarga.
- Sin la implementación del sistema, todas las excavaciones tienen factores de seguridad menores de 1,50.
- El revestimiento temporal produce un incremento significativo del factor de seguridad en cualquier etapa de construcción.
- La inclusión del sistema de *soil nailing* aumenta el factor de seguridad entre 130 y 190 %.
- La inclusión del revestimiento temporal aumenta los factores de seguridad de manera significativa y disminuye los desplazamientos y deformaciones del sistema.
- El revestimiento definitivo no tiene influencia en el comportamiento del sistema.

- El valor de la sobrecarga influye de modo significativo en las fuerzas de cortante y momento sobre el revestimiento.

Se aclara que las conclusiones obtenidas son válidas y aplicables para los suelos estudiados en la presente investigación y no se pueden generalizar para todos los tipos de arenas y arcillas que se pueden encontrar en el medio geológico local o regional.

REFERENCIAS

- Clouterre Project (1991). French National Research Project Clouterre. *Soil Nailing Recommendations*. Publication FHWA-SA-93-026. Washington: Department of Transportation Federal Highway Administration.
- Lazarte, C., Elías, V., Espinoza, D., Sabatini, P. (2003). *Geotechnical Engineering*, circular N.º 7, Soil Nail Walls. Publication FHWA-IF-03-017. Washington: U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.