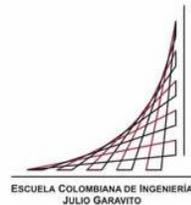


**Maestría en Ingeniería Civil**

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

**Carlos Germán Niño Martínez**

**Bogotá, D.C., 2 de junio de 2017**



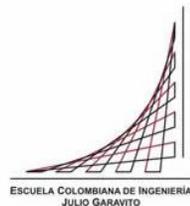
**Métodos de análisis y diseño para la resolución de problemas de estabilidad de taludes y excavaciones mediante técnicas de soil nailing**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Geotecnia**

**Carlos Eduardo Rodríguez Pineda**

**Director**

**Bogotá, D.C., 2 de junio de 2017**



La tesis de maestría titulada “Métodos de análisis y diseño para la resolución de problemas de estabilidad de taludes y excavaciones mediante técnicas de soil nailing”, presentada por Carlos Germán Niño Martínez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

---

Carlos Eduardo Rodríguez Pineda  
Director

---

Ricardo Salazar Ferro - Jurado

---

José Vicente Amórtegui Gil - Jurado

Bogotá, D.C., 2 de junio de 2017

## Dedicatoria

Al Dios de toda gracia, que me llamó a su gloria eterna en Jesucristo.

A mi esposa, cuyo amor en Cristo ha llenado de gozo mi vida.

## Agradecimientos

A mi Dios, el único Dios verdadero, Padre de nuestro Señor Jesucristo, creador de los cielos y de la tierra y quien me ha dado su Espíritu para hacer su voluntad. A Dios sea la gloria por los siglos de los siglos.

A mi esposa, quien con su amor incondicional, su sacrificio y su apoyo es y será un cimiento para mí. Por las miles de horas de su tiempo que sacrificó para que pudiera terminar la enorme tarea que representó sacar adelante esta maestría. Por las muchas veces en que me sentí fatigado y afligido y siempre su corazón estuvo a mi lado para fortalecer el mío. Por todo lo que tuvimos que sacrificar de nuestro tiempo juntos, para lograr mi sueño. Por eso y por muchas otras cosas, gracias. Te amo, esposa mía.

Al Ingeniero Carlos Eduardo Rodríguez Pineda, por quien siento una gran admiración y respeto. Por haberme permitido tener el honor de trabajar a su lado en esta tarea titánica. Por sus continuos consejos y la exigente disciplina con que me guio para llegar con éxito al final del camino.

A las Directivas y profesores de la Maestría en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por hacer parte de mi proceso de formación.

Al Ingeniero Khamis Y. Haramy de la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos por facilitarme el programa SNAP-2.

A la compañía Rocscience por facilitarme la licencia y uso de los programas RS2 y Slide.

## Resumen

En el presente trabajo se realizó 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 descripción solo aplica 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 realizaron modelos en los programas de equilibrio límite SNAP-2 y Slide, y en el programa de elementos finitos RS2.

Se modelaron muros de 2,0 m hasta 10,0 m de altura. Se hicieron modelos con espaciamientos entre nails de 1,0 m, 1,5 m y 2,0 m. Lo anterior 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** (clavos) 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 cual era la contribución del mismo a la estabilidad de los taludes y excavaciones. También se hicieron análisis para determinar cuáles eran los parámetros de mayor incidencia en el comportamiento del sistema.

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. No se tuvieron en cuenta dentro de los análisis taludes inclinados detrás del muro o condiciones de nivel freático, condiciones sísmicas, inclinaciones de los **nails** (clavos) o muros inclinados.

Se obtuvieron hallazgos interesantes con relación a la influencia de las propiedades de resistencia al corte de los suelos, la longitud de los **nails** (clavos) o la influencia del revestimiento sobre el factor de seguridad. Se presenta el procedimiento para el diseño y análisis de estructuras y una tabla de diseño de revestimiento para los muros estudiados.

### Palabras claves:

**Soil nailing** (suelo claveteado), Elementos finitos, modelaciones, Estructuras de contención, Excavaciones, Anclajes pasivos, Interacción suelo-**nail** (clavo).

## Índice general

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1       | EL SISTEMA SOIL NAILING – MARCO TEÓRICO .....  | 19 |
| 1.1     | Descripción del Sistema Soil Nailing.....  | 19 |
| 1.1.1   | Componentes de un sistema de soil nailing.....   | 20 |
| 1.1.2   | Proceso constructivo .....   | 22 |
| 1.2     | Aplicabilidad de los sistemas de soil nailing.....   | 26 |
| 1.2.1   | Aplicaciones generales.....  | 26 |
| 1.2.2   | Cortes verticales o casi verticales.....   | 27 |
| 1.2.3   | Ampliación de vías bajo estribos de puentes. ....  | 29 |
| 1.2.4   | Reparación y reconstrucción de estructuras de retención.....   | 29 |
| 1.2.5   | Evaluación de viabilidad. ....   | 32 |
| 1.2.5.1 | Evaluación de las condiciones del terreno .....  | 32 |
| 1.2.5.2 | Otros criterios de evaluación.....   | 36 |
| 1.2.5.3 | Algunas restricciones .....  | 37 |
| 2       | METODOLOGÍA.....   | 39 |
| 2.1     | Modelos numéricos para sistemas de soil nailing .....  | 39 |
| 2.1.1   | Programas para soil nailing. ....  | 39 |
| 2.1.2   | Descripción de SNAP2. ....   | 39 |
| 2.1.3   | Elementos finitos. ....  | 40 |
| 2.1.4   | Elementos finitos para estructuras de contención.....  | 41 |
| 2.2     | Variables de comportamiento para análisis mediante el método de equilibrio límite para el programa SNAP-2..... | 41 |
| 2.3     | Variables de comportamiento para análisis mediante el método de equilibrio límite para el programa SLIDE ..... | 42 |
| 2.4     | Variables de comportamiento para análisis mediante método de elementos finitos (RS <sup>2</sup> ).....         | 43 |
| 2.4.1   | Selección de los parámetros del modelo. ....   | 43 |
| 2.4.2   | Variables a utilizar en los modelos.....   | 43 |
| 2.5     | Valores de las variables a utilizar en los modelos.....  | 43 |
| 2.6     | Modelos utilizados .....   | 44 |
| 2.6.1   | Modelos en SNAP-2. ....  | 44 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 2.6.1.1 | Limitaciones del modelo en SNAP-2 .....  | 44  |
| 2.6.1.2 | Procedimiento de modelación en SNAP-2 .....  | 45  |
| 2.6.2   | Modelos en RS2. ....   | 46  |
| 2.6.2.1 | Características del modelo .....   | 46  |
| 2.6.2.2 | Procedimiento de modelación en RS2 .....   | 47  |
| 2.6.3   | Modelos en SLIDE.....  | 48  |
| 2.6.3.1 | Características y limitaciones del modelo.....   | 48  |
| 2.6.3.2 | Procedimiento de modelación en Slide .....   | 49  |
| 2.7     | Pasos de diseño .....  | 50  |
| 3       | RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....  | 52  |
| 3.1     | Influencia de los diferentes factores que se involucran en el diseño sobre el comportamiento de un sistema de soil nailing .....         | 52  |
| 3.2     | Contribución del sistema de soil nailing en la estabilidad de un talud .....   | 76  |
| 3.2.1   | Análisis de los modelos sin el sistema de soil nailing.....  | 76  |
| 3.2.2   | Análisis comparando modelos sin el sistema de soil nailing y modelos con el sistema .....  | 79  |
| 3.2.3   | Análisis comparando los modelos con el sistema para los tres tipos de modelaciones (RS2, Slide y SNAP-2) .....                           | 84  |
| 3.2.4   | Análisis comparando los resultados modificando el valor de la sobrecarga en modelos RS2 .....  | 87  |
| 3.3     | Contribución del revestimiento temporal y permanente al sostenimiento de una excavación .....  | 90  |
| 3.3.1   | Análisis comparando un modelo con revestimiento temporal y un modelo sin revestimiento temporal.....                                     | 90  |
| 3.3.2   | Análisis de sensibilidad variando el espesor de revestimiento temporal de un modelo en arena suelta, mediante un análisis en SNAP-2..... | 91  |
| 3.3.3   | Análisis de sensibilidad incluyendo el revestimiento definitivo de un modelo en arena suelta, mediante un análisis en SNAP-2 .....       | 93  |
| 3.3.4   | Análisis comparativo de cortante y momento en el revestimiento de los modelos, para análisis en RS2 y SNAP-2 .....                       | 94  |
| 3.3.5   | Análisis comparativo de fuerzas de tensión en la cabeza del nail para diferentes sobrecargas .....                                       | 97  |
| 3.3.6   | Diseño del revestimiento .....   | 100 |
| 3.4     | Resumen de modelaciones .....  | 103 |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 4   | CONCLUSIONES .....   | 105 |
| 4.1 | Influencia de los diferentes factores que se involucran en el diseño sobre el comportamiento de un sistema de soil nailing ..... | 105 |
| 4.2 | Contribución del sistema de soil nailing en la estabilidad de un talud .....   | 108 |
| 4.3 | Contribución del revestimiento temporal y permanente al sostenimiento de una excavación .....                                    | 110 |
| 5   | RECOMENDACIONES.....   | 112 |
| 5.1 | Recomendaciones constructivas .....  | 112 |
| 5.2 | Futuras investigaciones.....   | 112 |
| 6   | BIBLIOGRAFÍA.....  | 114 |

## Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| TABLA 1-1 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTENCIÓN (TOMADO DE RETAINING DEVICES CLASSIFICATION, O'ROURKE AND JONES, 1990) .....   | 19 |
| TABLA 2-1 VALORES DE LAS VARIABLES A UTILIZAR EN LOS MODELOS .....   | 44 |
| TABLA 3-1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN EL FACTOR DE SEGURIDAD PARA UN MURO DE 2.0 M, SIN REVESTIMIENTO, EN ARCILLAS DURAS Y ARENAS SUELTAS, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN RS2 .....  | 52 |
| TABLA 3-2 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 .....   | 53 |
| TABLA 3-3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN EL FACTOR DE SEGURIDAD EN LA MISMA ETAPA CONSTRUCTIVA PARA MUROS DE VARIAS ALTURAS, CON REVESTIMIENTO, Y ESPACIAMIENTO 1,0 X 1,0, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN RS2 .....   | 53 |
| TABLA 3-4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN EL FACTOR DE SEGURIDAD PARA DIFERENTES LONGITUDES DE NAIL EN UN MURO DE 10,0 M, CON REVESTIMIENTO, Y ESPACIAMIENTO 1,0 X 1,0, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN SNAP2 .....   | 54 |
| TABLA 3-5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN EL FACTOR DE SEGURIDAD PARA LAS DIFERENTES ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN DE UN MURO DE 10 M DE ALTURA Y ESPACIAMIENTOS DE 1,0 X 1,0, EN ARENA SUELTA, MODIFICANDO EL VALOR DE LA ADHERENCIA, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN SNAP-2.....   | 55 |
| TABLA 3-6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN EL FACTOR DE SEGURIDAD PARA VALORES DE ADHERENCIA DE DOS MUROS DE 9 M DE ALTURA Y ESPACIAMIENTOS DE 1,5 X 1,5, EN ARENA SUELTA, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN SLIDE .....   | 57 |
| TABLA 3-7 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN EL FACTOR DE SEGURIDAD PARA LAS DIFERENTES ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN DE UN MURO DE 10 M DE ALTURA Y ESPACIAMIENTOS DE 1,0 X 1,0, EN ARENA SUELTA, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN SNAP-2.....  | 59 |
| TABLA 3-8 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 .....   | 60 |
| TABLA 3-9 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN EL FACTOR DE SEGURIDAD Y OTROS PARÁMETROS PARA UN MURO DE 6 M DE ALTURA Y ESPACIAMIENTOS DE 1,5 X 1,5, EN ARCILLA DURA, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN RS2 .....   | 61 |
| TABLA 3-10 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN EL FACTOR DE SEGURIDAD PARA LAS DIFERENTES ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN DE UN MURO DE 10 M DE ALTURA Y ESPACIAMIENTOS DE 1,0 X 1,0, EN ARENA SUELTA, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN SNAP-2.....   | 65 |
| TABLA 3-11 COMPARACIÓN EN LOS RESULTADOS EN EL FACTOR DE SEGURIDAD PARA UN MURO DE 9 M Y ESPACIAMIENTO DE 1,5 X 1,5, EN ARENA SUELTA, MODIFICANDO EL DIÁMETRO DE LA VARILLA DE REFUERZO, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN RS2 .....   | 65 |
| TABLA 3-12 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.....  | 66 |
| TABLA 3-13 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 .....  | 67 |
| TABLA 3-14 RELACIÓN ENTRE LAS FUERZAS EN LA CABEZA DEL NAIL, EL TIPO DE SUELO Y EL FACTOR DE SEGURIDAD PARA UN MURO DE 9,0 M, Y ESPACIAMIENTOS DE 1,5 X 1,5, MEDIANTE UN ANÁLISIS REALIZADO EN SNAP-2. EN LA PARTE INFERIOR DE LA GRÁFICA INFERIOR SE COMPARAN LOS VALORES CON LOS OBTENIDOS EN RS2..... | 69 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>TABLA 3-15 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE FUERZAS MÁXIMAS DE LOS NAILS PARA DIFERENTES SOBRECARGAS, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN RS2 .....</b>   | <b>73</b>  |
| <b>TABLA 3-16 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE FUERZAS EN LA CABEZA DEL NAIL Y FUERZAS MÁXIMAS DE LOS NAILS PARA DIFERENTES LONGITUDES DE NAIL, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN RS2 .....</b>                    | <b>75</b>  |
| <b>TABLA 3-17 AUMENTO DEL FACTOR DE SEGURIDAD GLOBAL CON LA INCLUSIÓN DEL SISTEMA, MEDIANTE UN ANÁLISIS DE RS2.....</b>  | <b>84</b>  |
| <b>TABLA 3-18 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD PARA MODELOS EN RS2, SLIDE Y SNAP-2, PARA MURO DE 4,50 M EN ARCILLA DURA .....</b>   | <b>85</b>  |
| <b>TABLA 3-19 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD PARA MODELOS EN RS2, SLIDE Y SNAP-2, PARA MURO DE 6,0 M EN ARCILLA DURA.....</b>   | <b>85</b>  |
| <b>TABLA 3-20 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD PARA MODELOS EN RS2, SLIDE Y SNAP-2, PARA MURO DE 7,50 M EN ARCILLA DURA .....</b>   | <b>85</b>  |
| <b>TABLA 3-21 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD PARA MODELOS EN RS2, SLIDE Y SNAP-2, PARA MURO DE 9,0 M EN ARCILLA DURA.....</b>   | <b>86</b>  |
| <b>TABLA 3-22 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD PARA MODELOS EN RS2, MODIFICANDO EL VALOR DE LA SOBRECARGA .....</b>   | <b>87</b>  |
| <b>TABLA 3-23 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 .....</b> | <b>91</b>  |
| <b>TABLA 3-24 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE DIFERENTES VARIABLES PARA UN MURO DE 9,0 M EN ARENA SUELTA CON DIFERENTES ESPESORES DE REVESTIMIENTO TEMPORAL, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN SNAP-2 .....</b>   | <b>92</b>  |
| <b>TABLA 3-25 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 ...</b>                 | <b>93</b>  |
| <b>TABLA 3-26 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE VALORES MÁXIMOS DE CORTANTE Y MOMENTO PARA TODOS LOS MUROS, MEDIANTE ANÁLISIS EN SNAP-2 Y RS2 .....</b>   | <b>94</b>  |
| <b>TABLA 3-27 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD MEDIANTE EL PROGRAMA RS2 PARA DETERMINAR CAUSAS DE LA DIFERENCIA CON SNAP-2 EN LA FUERZAS EN EL REVESTIMIENTO .....</b>                                       | <b>96</b>  |
| <b>TABLA 3-28 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE FUERZAS EN LA CABEZA DE LOS NAILS PARA DIFERENTES SOBRECARGAS, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN RS2 .....</b>  | <b>97</b>  |
| <b>TABLA 3-29 TABLA DE DISEÑO DE REVESTIMIENTO, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN SNAP-2.....</b>  | <b>101</b> |
| <b>TABLA 3-30 EJEMPLO DE DISEÑO DE REVESTIMIENTO MEDIANTE PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL A PARTIR DE LOS DATOS OBTENIDOS MEDIANTE EL PROGRAMA RS2 .....</b>                                   | <b>101</b> |
| <b>TABLA 3-31 RESUMEN DE MODELACIONES .....</b>  | <b>104</b> |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1-1 DETALLE DE LOS COMPONENTES BÁSICOS DE UN SISTEMA DE SOIL NAILING (TOMADO DE GEOTECHNICAL ENGINEERING CIRCULAR No. 7 SOIL NAIL WALLS) .....   | 20 |
| FIGURA 1-2 ESTABILIDAD DE EXCAVACIÓN EN FASES EN MURO EXPERIMENTAL (TOMADO DE CLOUTERRE PROJECT. FRENCH NATIONAL RESEARCH PROJECT CLOUTERRE. SOIL NAILING RECOMMENDATIONS 1991) .....   | 25 |
| FIGURA 1-3 SECUENCIA TÍPICA DE CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE SOIL NAILING (TOMADO DE GEOTECHNICAL ENGINEERING CIRCULAR No. 7 SOIL NAIL WALLS) .....   | 25 |
| FIGURA 1-4 MUROS DE SOIL NAIL PARA APLICACIONES TEMPORALES Y PERMANENTES (TOMADO DE GEOTECHNICAL ENGINEERING CIRCULAR No. 7 SOIL NAIL WALLS) .....  | 28 |
| FIGURA 1-5 AMPLIACIÓN DE VÍAS BAJO ESTRIBOS DE PUENTES (TOMADO DE GEOTECHNICAL ENGINEERING CIRCULAR No. 7 SOIL NAIL WALLS) .....  | 29 |
| FIGURA 1-6 REPARACIÓN DE MUROS DE CONTENCIÓN EN MAMPOSTERÍA (TOMADO DE A MASONRY WALL AND SLIDE REPAIR USING SOIL NAILS AND ROCK DOWELS) .....  | 31 |
| FIGURA 1-7 REPARACIÓN DE MUROS DE CONTENCIÓN ANCLADOS (ADAPTADO DE SOIL NAILING: APPLICATION AND PRACTICE-PART 1) .....   | 32 |
| FIGURA 3-1 RESULTADO DEL FACTOR DE SEGURIDAD EN LA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN 9 DE UN MURO DE 10 M DE ALTURA Y ESPACIAMIENTOS DE 1,0 X 1,0, EN ARENA SUELTA, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN SNAP-2 .....  | 55 |
| FIGURA 3-2 RESULTADO DEL FACTOR DE SEGURIDAD EN LA ETAPA DE SOBRECARGA DE UN MURO DE 10 M DE ALTURA Y ESPACIAMIENTOS DE 1,0 X 1,0, EN ARENA SUELTA, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN SNAP-2 .....  | 56 |
| FIGURA 3-3 EVOLUCIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD DURANTE LAS ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN PARA UN MURO DE 7,50 M CON ESPACIAMIENTO DE 1,50 X 1,50 M, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN RS2, Y SU RELACIÓN CON LAS FUERZAS MÁXIMAS EN LOS NAILS ..... | 68 |
| FIGURA 3-4 FUERZAS DE TENSIÓN EN LOS NAILS PARA UN MURO DE 9,0 M EN ARCILLA DURA CON ESPACIAMIENTO DE 1,50 X 1,50 M, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN RS2 .....  | 71 |
| FIGURA 3-5 FUERZAS DE TENSIÓN EN LOS NAILS PARA UN MURO DE 9,0 M EN ARCILLA BLANDA CON ESPACIAMIENTO DE 1,50 X 1,50 M, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN RS2 .....  | 71 |
| FIGURA 3-6 FUERZAS DE TENSIÓN EN LOS NAILS PARA UN MURO DE 9,0 M EN ARENA DENSA CON ESPACIAMIENTO DE 1,50 X 1,50 M, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN RS2 .....   | 72 |
| FIGURA 3-7 FUERZAS DE TENSIÓN EN LOS NAILS PARA UN MURO DE 9,0 M EN ARENA SUELTA CON ESPACIAMIENTO DE 1,50 X 1,50 M, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN RS2 .....  | 72 |
| FIGURA 3-8 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE FUERZAS MÁXIMAS DE LOS NAILS PARA DIFERENTES SOBRECARGAS, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN RS2 .....   | 74 |
| FIGURA 3-9 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD OBTENIDO EN MODELACIONES EN RS2 Y SLIDE SIN INCLUIR EL SISTEMA, PARA ARCILLAS DURAS .....  | 76 |
| FIGURA 3-10 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD OBTENIDO EN MODELACIONES EN RS2 Y SLIDE SIN INCLUIR EL SISTEMA PARA ARCILLAS BLANDAS .....  | 77 |
| FIGURA 3-11 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD OBTENIDO EN MODELACIONES EN RS2 Y SLIDE SIN INCLUIR EL SISTEMA PARA ARENAS DENSAS .....   | 78 |
| FIGURA 3-12 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD OBTENIDO EN MODELACIONES EN RS2 Y SLIDE SIN INCLUIR EL SISTEMA PARA ARENAS SUELTAS .....  | 79 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>FIGURA 3-13 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD OBTENIDO SIN EL SISTEMA Y CON EL SISTEMA, PARA ARCILLAS DURAS, MEDIANTE MODELOS EN RS2.....</b>    | <b>80</b> |
| <b>FIGURA 3-14 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD OBTENIDO SIN EL SISTEMA Y CON EL SISTEMA, PARA ARCILLAS BLANDAS, MEDIANTE MODELOS EN RS2 .....</b> | <b>81</b> |
| <b>FIGURA 3-15 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD OBTENIDO SIN EL SISTEMA Y CON EL SISTEMA, PARA ARENAS DENSAS, MEDIANTE MODELOS EN RS2 .....</b>    | <b>82</b> |
| <b>FIGURA 3-16 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD OBTENIDO SIN EL SISTEMA Y CON EL SISTEMA, PARA ARENAS SUeltas, MEDIANTE MODELOS EN RS2.....</b>    | <b>83</b> |
| <b>FIGURA 3-17 GRÁFICAS DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD PARA LOS CUATRO MATERIALES ESTUDIADOS Y LAS DISTINTAS SOBRECARGAS .....</b>  | <b>88</b> |
| <b>FIGURA 3-18 GRÁFICAS DE LAS FUERZAS EN LA CABEZA DEL NAIL PARA DIFERENTES SOBRECARGAS, MEDIANTE UN ANÁLISIS EN RS2 .....</b>   | <b>98</b> |

## Índice de anexos

Se adjunta medio magnético de los anexos.

|  |     |
|--|-----|
| Anexo 1. Caracterización Geotécnica.....   | 117 |
| Anexo 2. Modelaciones.....                 | 117 |
| Anexo 3. Tablas y gráficas de diseño.....  | 117 |
| Anexo 4. Procedimientos de modelación..... | 117 |

## Introducción

### Descripción del problema

Análisis de los sistemas de **soil nailing** (suelo claveteado):

- En la actualidad aún no se tiene un completo entendimiento de la interacción entre el suelo y los diferentes componentes de los sistemas de **soil nailing**, especialmente la contribución del revestimiento (temporal y permanente) a la estabilidad en los muros de **soil nail** (clavos del suelo).
- Los métodos de diseño se basan en los métodos de análisis simplificados de equilibrio límite que adoptan una superficie de falla arbitraria y se aplica equilibrio a la masa de suelo fallada. No se tiene en cuenta el estado de esfuerzos ni las deformaciones de la masa de suelo, por lo cual se necesita mejorar en el conocimiento de los métodos de análisis.
- Los diseños deben considerar los criterios requeridos para evaluar la factibilidad del uso de los diferentes sistemas de **soil nailing**.
- En el país no se han utilizado las técnicas de **soil nailing** (anclajes pasivos) de forma extensiva, debido a su desconocimiento, lo que redundará en mayores costos de construcción de obras de estabilización de taludes.

Importancia y relevancia del problema para el área de geotecnia:

- En la actualidad, el país se encuentra desarrollando proyectos de infraestructura vial necesarios para el desarrollo económico de todas las regiones, por lo que la inclusión de métodos alternativos a la práctica convencional de estabilización de taludes y excavaciones que generen una mayor rapidez y economía redundará en beneficios económicos para el país.
- Los sistemas de **soil nailing** (entre estos los muros de **soil nail**) son una alternativa económica y viable para la estabilización de terrenos y deslizamientos, muros de contención, sostenimiento de excavaciones, construcción de carreteras, infraestructura de servicios públicos, edificios y otras aplicaciones.
- Otras ventajas pueden consistir en que se requieren menores volúmenes de excavación y menores anchos de afectación, contribuyendo a la protección del medio ambiente.

- Los equipos de construcción que se utilizan en los muros de **soil nail** son de bajo peso y tamaño, por lo que facilitan y economizan los costos de transporte en regiones lejanas o de difícil acceso.
- Su estudio es muy importante debido a que no se conoce mucho en el país y su implementación es un aporte fundamental para mejorar las técnicas de muros de contención en la práctica de la Ingeniería Geotécnica colombiana.
- Estos sistemas se han venido utilizando en el país y cada vez toman mayor importancia. A nivel mundial, los muros de **soil nail** (muros de clavos del suelo) se han utilizado de manera exitosa en muchos lugares. La primera experiencia en el uso de estos métodos fue en Francia en el año 1972 para la ampliación de la línea férrea Versailles-Chantiers. Luego se extendió al resto de Europa, principalmente a Alemania y después a Estados Unidos, donde las técnicas de **soil nailing** son utilizadas fundamentalmente para la construcción de muros de **soil nail** y tienen gran aceptación debido al exitoso comportamiento que han tenido dichas estructuras durante su vida útil. También hay referencias al uso extensivo de estas técnicas en países como China y Malasia.<sup>1</sup>

Solución propuesta:

Lo que se busca con este proyecto es mejorar el entendimiento del comportamiento de los sistemas de **soil nailing** y ayudar a responder las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es la contribución de cada uno de los componentes del sistema de soil nailing a la estabilidad del talud o excavación?
- ¿Cómo es el mecanismo de transferencia de carga suelo-**nail**-revestimiento?
- ¿Cuáles son los factores que condicionan esa transferencia de carga?

## Objetivos

Objetivo general:

---

<sup>1</sup> FHWA. Geotechnical Engineering Circular No. 7. Soil Nail Walls. FHWA-IF-03-017. March 2003. p.1

Definir una metodología de análisis para la solución de problemas de estabilización de taludes y excavaciones mediante sistemas de **soil nailing**.

Objetivos específicos:

- Determinar una metodología de análisis para modelar la interacción entre el suelo y los elementos de un sistema **soil nailing** (Fase 1).
- Analizar la influencia de los diferentes factores que se involucran en el diseño, sobre el comportamiento de un sistema de **soil nailing** (Fase 2)
- Establecer la contribución del sistema de **soil nailing** en la estabilidad de un talud (Fase 3).
- En el caso de los muros de **soil nail** analizar la contribución del revestimiento (temporal y permanente) al sostenimiento de una excavación (Fase 4).

### **Metodología y alcance**

Fase 1: Corresponde al objetivo 1

- Mediante la consulta bibliográfica de documentos tales como normas, códigos, artículos, etc. se define la aplicabilidad de los sistemas de **soil nailing**.
- Se realiza la delimitación del análisis en cuanto al tipo, condiciones y número de modelos.
- Mediante la consulta bibliográfica se estudian y analizan los criterios de análisis y diseño usados en la práctica actual.
- Se define la forma de implementar los modelos en un programa de elementos finitos.

Fase 2: Corresponde al objetivo 2 (Diseño experimental)

- Mediante la consulta bibliográfica se definen cuáles son las variables principales del comportamiento de un sistema de **soil nailing**.
- Se seleccionan las variables principales.
- Una vez se tienen identificadas dichas variables se modelan los sistemas de **soil nailing** haciendo variaciones a las variables principales.
- Se determina el campo de esfuerzos y deformaciones para cada una de las modelaciones.

- Se realiza un análisis comparativo de los resultados para cada modelo.

Fase 3: Corresponde al objetivo 3

- Con los resultados obtenidos en la fase anterior, se hace una modelación geotécnica en el programa SNAP, SLIDE u otros similares.
- Se hace un análisis comparativo de los diferentes modelos a partir de los factores de seguridad obtenidos.
- Se determina la contribución de los sistemas de **soil nailing** a la estabilidad de los taludes o excavaciones.

Fase 4: Corresponde al objetivo 4

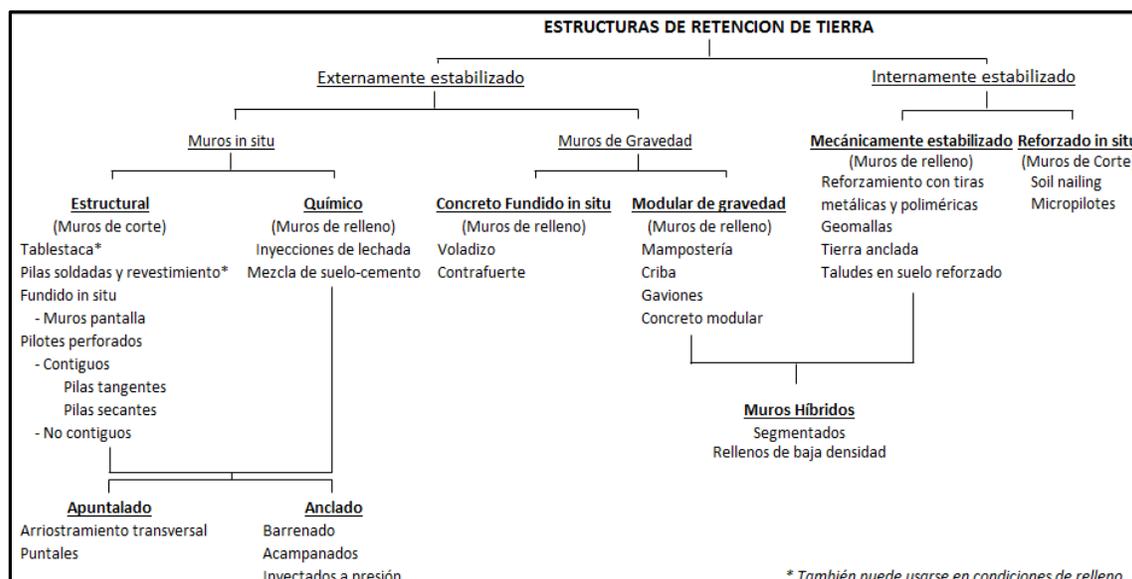
- Se realizan los análisis estructurales para diferentes condiciones de revestimiento mediante modelos de análisis estructural y elementos finitos.
- Se realizan análisis de interacción suelo-estructura.
- Con los resultados anteriores se determina la contribución del revestimiento al sistema de muros de **soil nail**.
- Se escribe un protocolo metodológico para análisis de sistemas de **soil nailing**.

De acuerdo con lo anterior, el presente documento consta de seis capítulos: 1. Marco teórico, que presenta la descripción del sistema, los componentes, la secuencia constructiva, aplicaciones, evaluación de la viabilidad y restricciones. 2. Metodología, que presenta el procedimiento para la elaboración y análisis de los modelos, variables de comportamiento, limitaciones de los modelos, características de los modelos, y el procedimiento general de diseño. 3. Resultados y Análisis de resultados, que presenta los análisis de los resultados obtenidos en los modelos y responde a las preguntas de la investigación. 4. Conclusiones, 5. Recomendaciones. 6. Bibliografía, que presenta los documentos de referencia que se utilizaron durante el proceso de investigación.

# 1 EL SISTEMA SOIL NAILING – MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los conceptos básicos sobre esta técnica de estabilización, y avances actuales, especialmente en los temas de análisis y diseño. Los sistemas de **soil nailing** (suelo claveteado) se enmarcan dentro de los sistemas de retención de tierra como internamente estabilizados (ver tabla 1-1).

**Tabla 1-1 Clasificación de los sistemas de contención (tomado de Retaining Devices Classification, O'Rourke and Jones, 1990)**



## 1.1 Descripción del Sistema Soil Nailing

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. Estos trabajan principalmente en tracción, y eventualmente en flexión y cortante. La fricción entre el suelo y el **nail** (clavo) pone los **nails** en tensión.

2

La zona de suelo reforzado actúa como un muro de gravedad reteniendo el suelo detrás de dicha zona. Los **nails** (clavos) resisten las fuerzas de tracción por la adherencia entre el suelo y la lechada de cemento, que recubre las barras. Por lo

<sup>2</sup> French National Research Project Clouterre Soil Nailing Recommendations, 1991, p.1

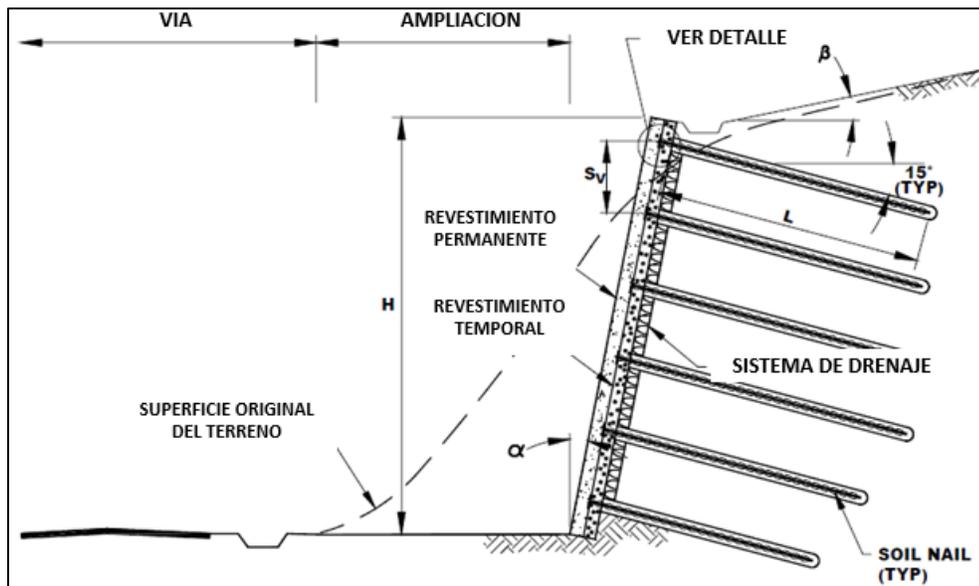
general la cara de la excavación se cubre con un revestimiento que la protege de los agentes erosivos del medio ambiente.

Dependiendo del objetivo del uso de esta técnica, el revestimiento puede consistir simplemente de una malla electrosoldada, cubierta por una o varias capas de concreto lanzado, para trabajos temporales y condiciones poco críticas; y en ocasiones puede incluir adicionalmente un revestimiento en concreto reforzado fundido en sitio o elementos prefabricados por encima del revestimiento temporal, para trabajos permanentes. El **soil nail** (clavo del suelo) es el elemento estructural que proporciona la transferencia de carga al terreno.<sup>3</sup>

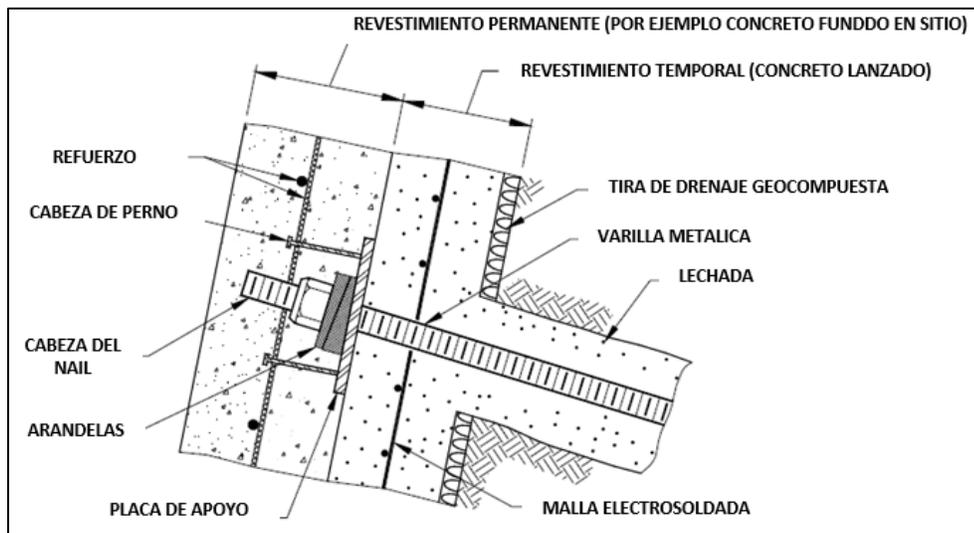
### 1.1.1 Componentes de un sistema de soil nailing

Los trabajos de **soil nailing** incluyen los siguientes componentes básicos que se muestran en la Figura 1-1:

**Figura 1-1 Detalle de los componentes básicos de un sistema de soil nailing (tomado de Geotechnical Engineering Circular No. 7 Soil Nail Walls)**



<sup>3</sup> French National Research Project Clouterre Soil Nailing Recomendattions, 1991



Según Lazarte, et. al, (2003), los componentes básicos de un sistema de **soil nailing** son los siguientes:

- Barras de acero de refuerzo: Las barras de acero de refuerzo son el componente principal del sistema de muros de **soil nail** (muros de clavos del suelo). Estos elementos se colocan en perforaciones previamente realizadas y son cementados en su lugar. El esfuerzo de tracción se aplica de forma pasiva a los **nails** en respuesta a la deformación de los materiales retenidos durante actividades de excavación posteriores.
- Lechada: La lechada se introduce por inyección a baja presión en el barreno después de que se instale la varilla; ésta tiene la función principal de la transferencia de tensión desde el suelo al **nail**. La lechada también proporciona un nivel de protección a la varilla contra la corrosión.
- Cabeza del **nail**: La cabeza del **nail** es el extremo roscado de la varilla que sobresale de la pared.
- Tuerca hexagonal, arandela y la placa de apoyo: Estos componentes se adhieren a la cabeza del **nail** y se utilizan para conectar la varilla al revestimiento.
- Revestimiento Temporal y Permanente: El revestimiento proporciona conectividad estructural. El temporal sirve como superficie de soporte para la placa de apoyo y resistir el suelo expuesto. Este revestimiento se coloca en la excavación sin soporte antes del avance de los siguientes niveles de

excavación. El revestimiento permanente se coloca sobre el temporal después de instalar los **soil nails** y haber apretado la tuerca hexagonal. Este tiene la función de proporcionar conectividad estructural a largo plazo.

- Franja de Drenaje Geocompuesta: Esta se coloca antes de la aplicación del revestimiento temporal para permitir la recolección y transmisión de agua de filtración que pueden migrar al revestimiento.
- Protección adicional a la corrosión (no mostrado) en la Figura 1-1.

### 1.1.2 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 la cara de la misma tiene la capacidad de permanecer no soportada por un corto período de tiempo, normalmente de 24 a 48 horas. La profundidad de la excavación es por lo general entre 1 y 2 m y estará 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 especificada, 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 colocan 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 ser utilizado 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.

Previo al 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; estas 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 que sea excavado el siguiente tramo de suelo. El revestimiento temporal usualmente consiste en una capa de concreto lanzado ligeramente armado comúnmente de 100 mm de espesor. El refuerzo normalmente se compone de malla electrosoldada, que se coloca aproximadamente a la mitad del espesor de revestimiento (véase la parte inferior de la Figura 1-1). La longitud de la malla electro-soldada 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, una placa de apoyo de acero se coloca 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 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 y las pruebas de capacidad de carga se pueden realizar antes de proceder con la siguiente excavación. Antes de proceder con excavaciones posteriores, el concreto lanzado debe haber curado durante al menos 72 horas o haber alcanzado al menos 3 días de resistencia a la compresión especificada (usualmente 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 electro-soldada 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 anterior. 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 y se instalan los *nails* y se realizan las pruebas de carga, se puede construir el revestimiento final. El revestimiento final puede consistir de hormigón armado fundido in situ, hormigón proyectado, o paneles prefabricados. El refuerzo del revestimiento permanente son barras de acero de refuerzo convencionales o malla electro-soldada. En el revestimiento permanente se deben evitar las juntas horizontales en la medida de lo posible.<sup>4</sup>

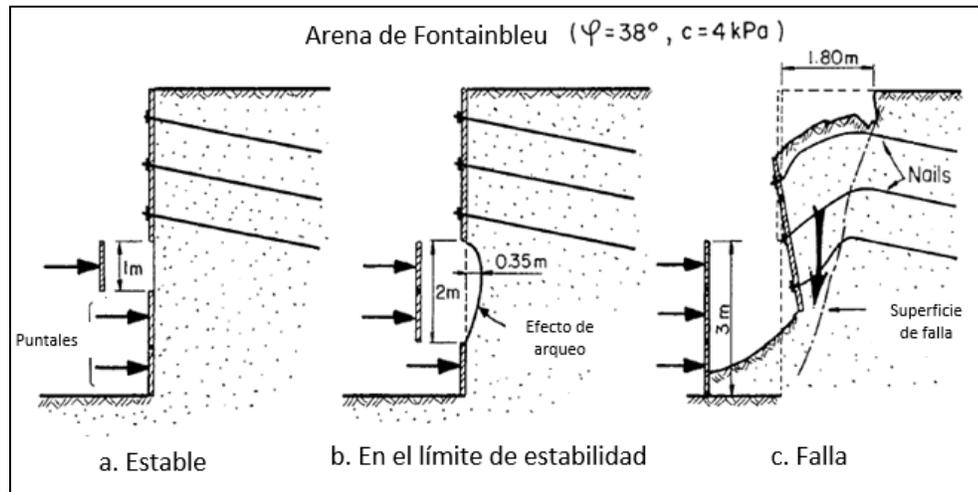
A diferencia de otras técnicas, tales como la tierra reforzada, la construcción de muros de *soil nail* involucra una fase crítica con respecto a la estabilidad global o local. La estabilidad local de la excavación durante la fase de trabajos de tierra depende directamente de la altura del suelo excavado, como se demostró en los ensayos y experimentos realizados para el muro experimental CEBPT No. 2 del proyecto CLOUTERRE (ver Figura 1-2).<sup>5</sup>

---

<sup>4</sup> FHWA. Geotechnical Engineering Circular No. 7. Soil Nail Walls. FHWA-IF-03-017. March 2003. p.7

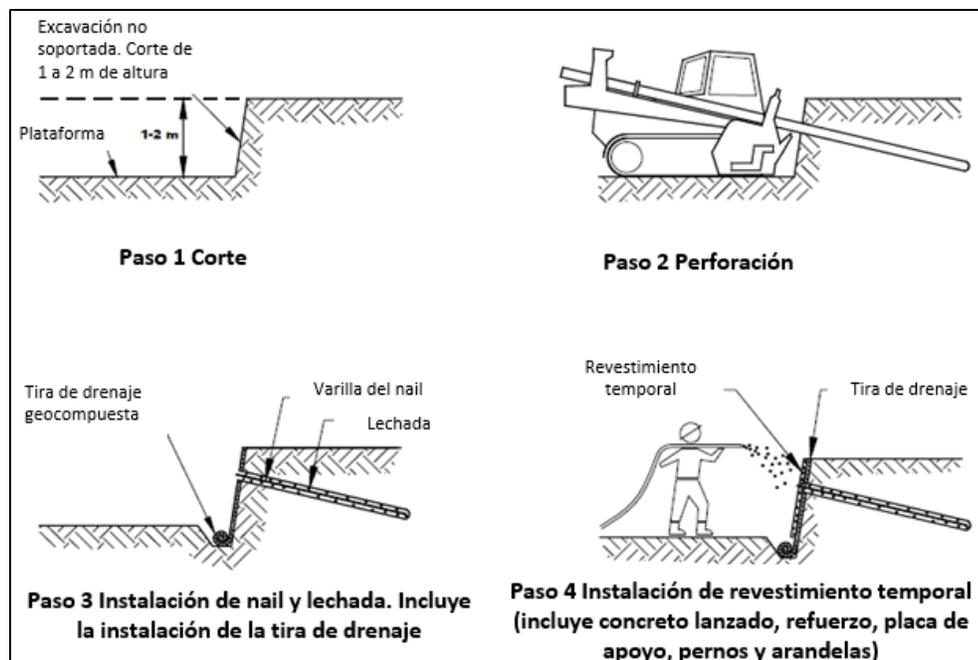
<sup>5</sup> French National Research Project Clouterre Soil Nailing Recommendations, 1991. p4

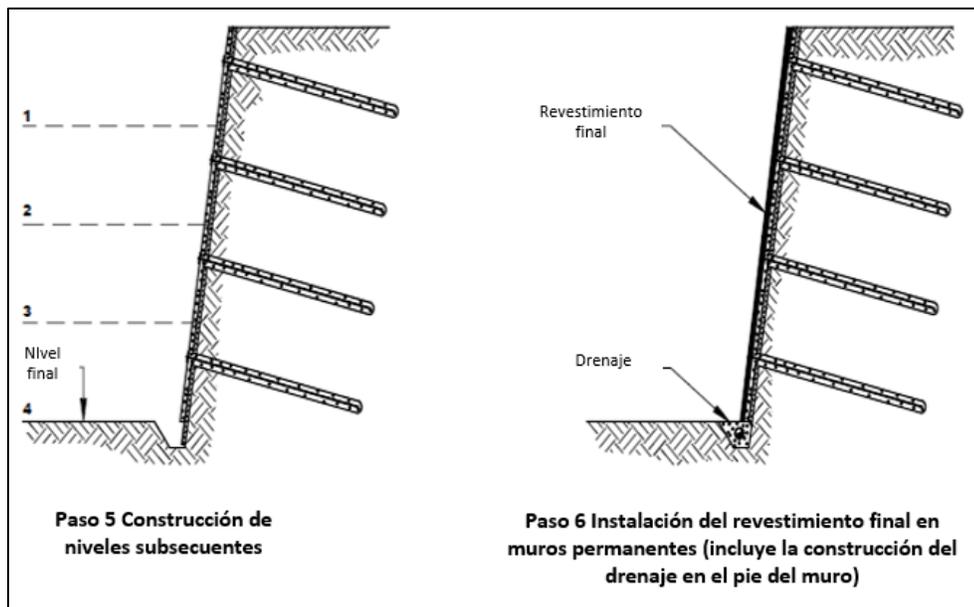
**Figura 1-2 Estabilidad de excavación en fases en muro experimental (tomado de Clouterre Project. French National Research Project Clouterre. Soil Nailing Recommendations 1991)**



La secuencia de construcción se presenta del sistema se presenta en la Figura 1-3:

**Figura 1-3 Secuencia típica de construcción de un sistema de soil nailing (tomado de Geotechnical Engineering Circular No. 7 Soil Nail Walls)**





## 1.2 Aplicabilidad de los sistemas de soil nailing

Para una selección correcta del sistema de retención a utilizar, en primer lugar se debe realizar una investigación del suelo que permita conocer las propiedades del mismo, mediante un programa de exploraciones de campo y ensayos de laboratorio. Se debe contar con información tal como niveles freáticos, análisis granulométricos, plasticidad, humedad natural, etc.

La técnica de **soil nailing**, se utiliza para aplicaciones en suelos o en otros materiales como roca blanda o roca meteorizada. Esta técnica es de aplicación en trabajos temporales o permanentes. Las técnicas de **soil nailing** se pueden utilizar para la construcción de muros de contención pasivos o también como reforzamiento del suelo en estabilización de deslizamientos, en la cual los **nails** se colocan perpendiculares a la superficie de deslizamiento, y están sometidos a fuerzas de corte.<sup>6</sup>

### 1.2.1 Aplicaciones generales.<sup>7</sup>

- Cortes verticales o casi verticales del terreno.

<sup>6</sup> FHWA. Op Cit., p.10

<sup>7</sup> FHWA Ibid., p.10

- Cimentaciones para edificios, parqueaderos subterráneos, etc.
- Cortes para carreteras o vías férreas.
- Ampliación de vías bajo los puentes.
- Ensanchamiento de pasos subterráneos.
- Reparación y reconstrucción de estructuras de retención.
- Portales de túneles.
- Excavaciones temporales y permanentes.
- En Hong Kong, se utilizan técnicas de **soil nailing** para el mejoramiento de taludes de rellenos sueltos, las cuales han tenido un buen comportamiento.

### 1.2.2 Cortes verticales o casi verticales.<sup>8</sup>

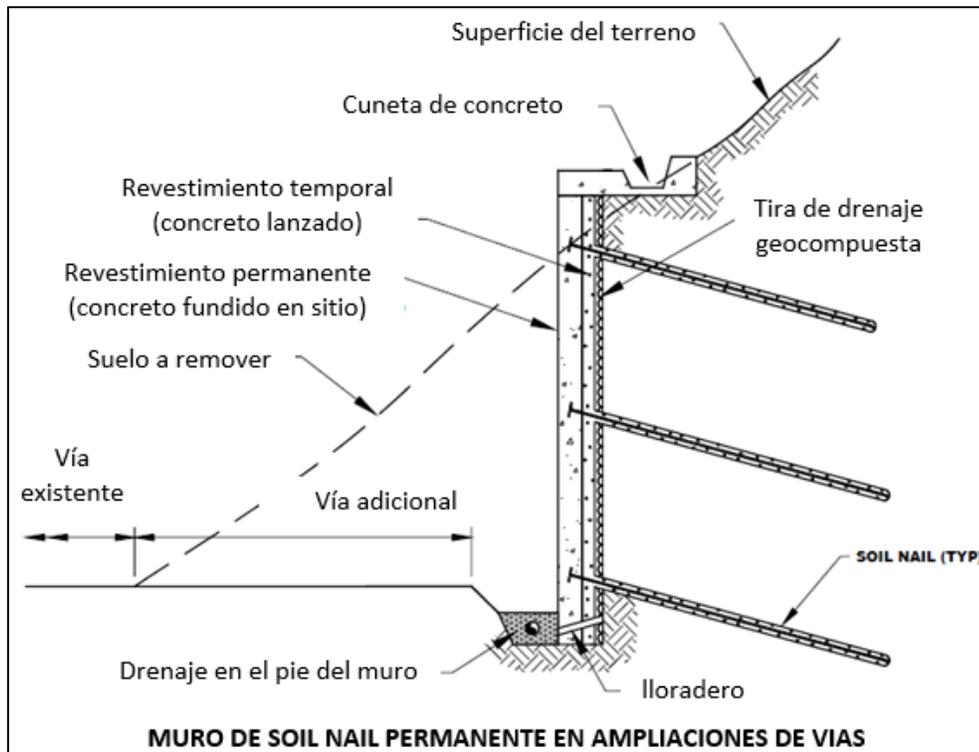
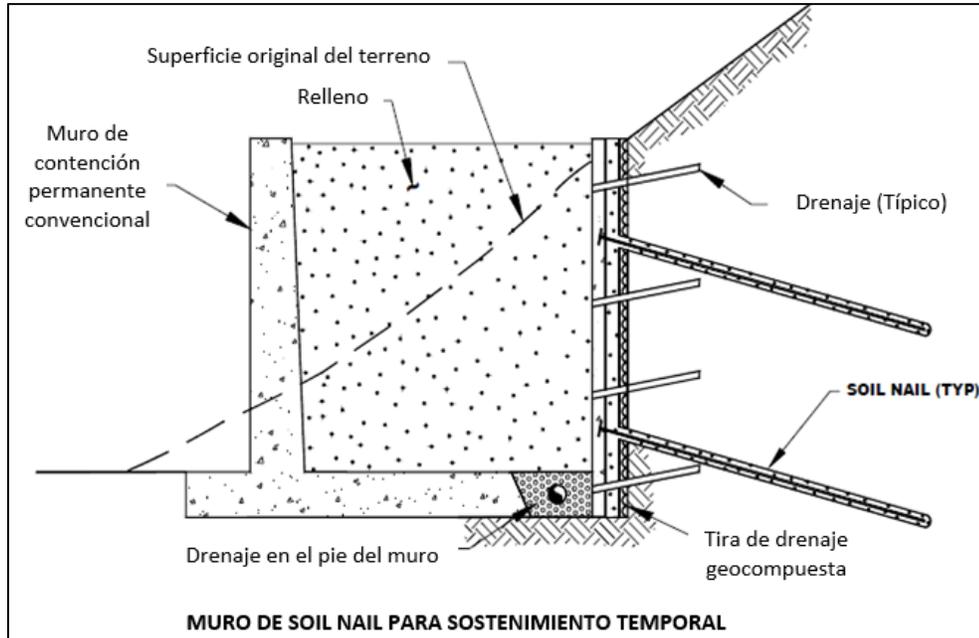
Se puede utilizar en portales de túneles, excavaciones para edificios, carreteras, etc.

- Añaden resistencia estabilizante.
- Se pueden realizar acabados estéticos con la variedad de técnicas de revestimiento disponibles.
- Minimiza la excavación y relleno, y reduce el derecho de vía.
- Se genera un menor impacto ambiental que otras técnicas.
- Se puede utilizar en zonas escarpadas.

---

<sup>8</sup> FHWA. Ibid., p.10

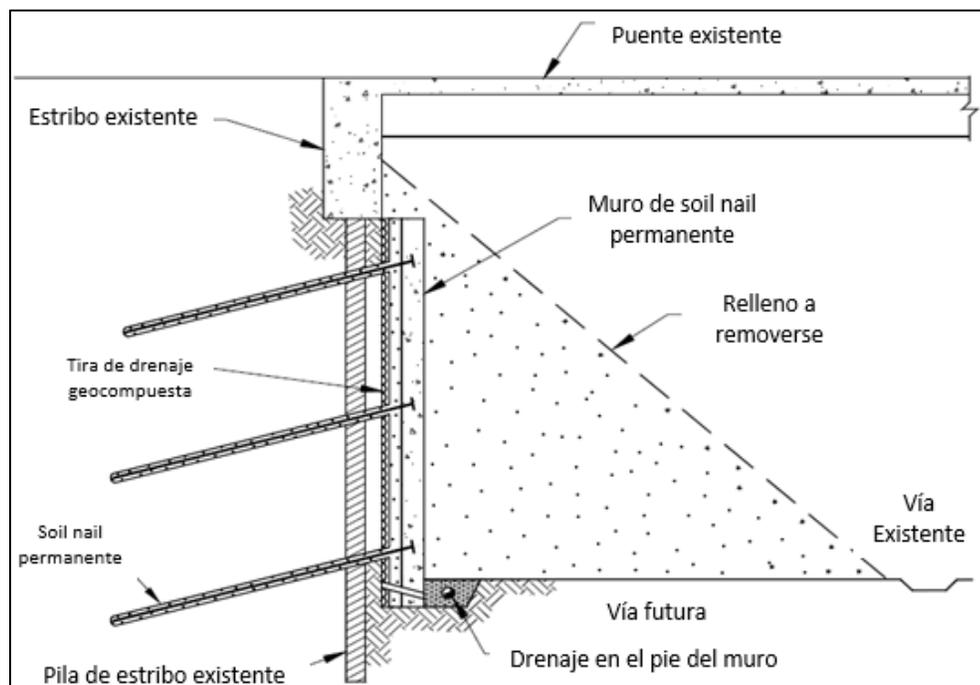
**Figura 1-4 Muros de soil nail para aplicaciones temporales y permanentes (tomado de Geotechnical Engineering Circular No. 7 Soil Nail Walls)**



### 1.2.3 Ampliación de vías bajo estribos de puentes.<sup>9</sup>

- Optimización de costos respecto a tratamientos convencionales.
- Menor impacto sobre el tráfico en vías.
- Se elimina el uso de accesorios como pilas y vigas soldadas.
- Los elementos y accesorios que se utilizan son de fácil consecución.
- La maquinaria y equipos es de tamaño mucho menor que la que se utiliza para tratamientos convencionales.
- Proporciona soporte temporal y permanente.

Figura 1-5 Ampliación de vías bajo estribos de puentes (tomado de Geotechnical Engineering Circular No. 7 Soil Nail Walls)



### 1.2.4 Reparación y reconstrucción de estructuras de retención.<sup>10</sup>

Se pueden instalar los **soil nails** a través de muros de retención existentes que han fallado o que tienen movimientos excesivos. En este caso las fuerzas movilizadas

<sup>9</sup> FHWA. Ibid., p.12

<sup>10</sup> FHWA. Ibid., p.13

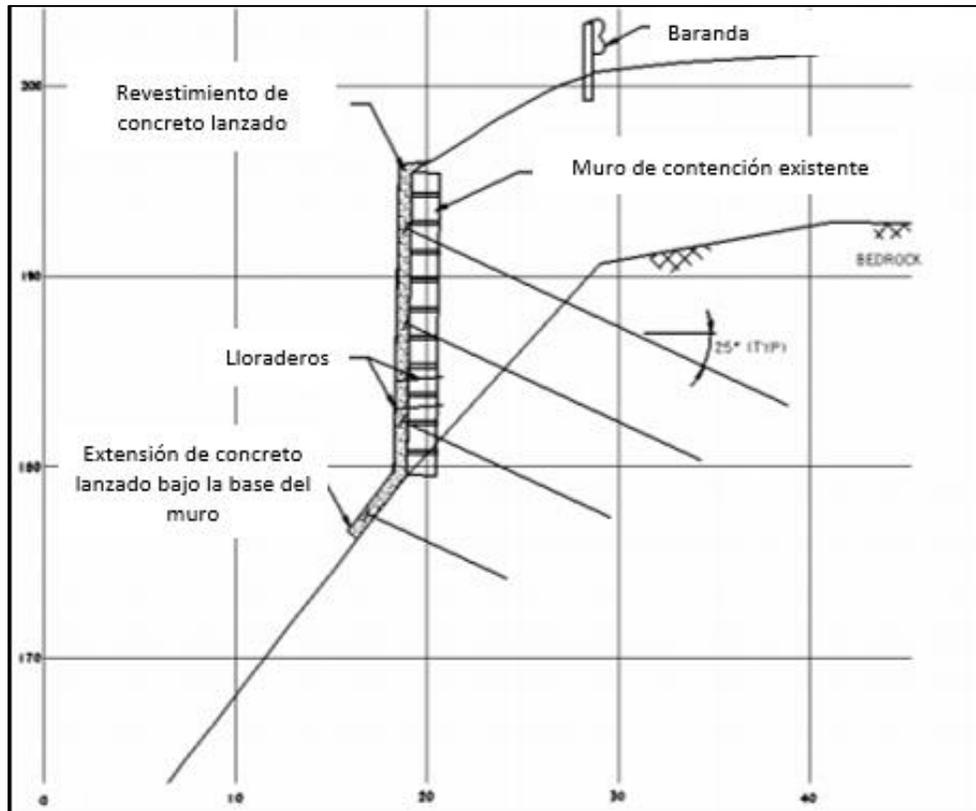
no se deben a la eliminación del soporte lateral por la excavación sino al movimiento de las estructuras falladas o deterioradas.

- Muros de contención de mampostería u hormigón reforzado que han fallado, que presentan deterioro estructural o que presentan deflexiones excesivas, a menudo relacionadas con relleno suelto o débil (ver Figura 1-6).
- Muros mecánicamente estabilizados que han fallado por corrosión de la armadura o falla del terreno (ver Figura 1-7).

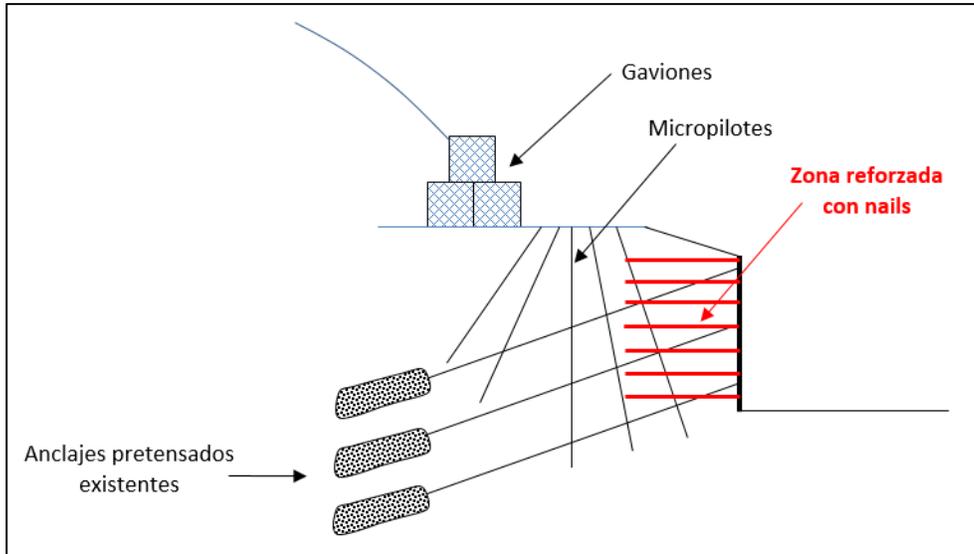
El **soil nailing** tiene varias ventajas cuando se utiliza como medida de rehabilitación:

- Redistribución de fuerzas axiales entre los **soil nails** y las capas de geomalla (en el caso de suelo reforzado) y por lo tanto el mejoramiento de la capacidad de tensión del refuerzo original.
- Reducción de la fuerza neta en la conexión del revestimiento y de esta manera aumenta la estabilidad de la conexión.
- Reducción de los desplazamientos laterales del muro de retención a casi el 50%.
- Mejoramiento de la estabilidad global.

**Figura 1-6 Reparación de muros de contención en mampostería (tomado de A Masonry Wall and Slide Repair Using Soil Nails and Rock Dowels)**



**Figura 1-7 Reparación de muros de contención anclados (adaptado de Soil Nailing: Application and Practice-Part 1)**



### 1.2.5 Evaluación de viabilidad.<sup>11</sup>

Se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones generales:

- Evaluación de las condiciones del terreno.
- Evaluación de las ventajas y desventajas para una aplicación particular.
- Comparación con sistemas alternativos.
- Evaluación de costos.

#### 1.2.5.1 Evaluación de las condiciones del terreno<sup>12</sup>

El **soil nailing** es económico y viable técnicamente en las siguientes condiciones del terreno:

- Cuando la excavación se puede auto-soportar en un corte vertical de 1 a 2 m de altura durante 1 o 2 días.
- Todos los **soil nails** (clavos del suelo) dentro de una sección transversal se encuentran por encima del nivel freático.

<sup>11</sup> FHWA. Ibid., p.13

<sup>12</sup> FHWA. Ibid., p.13

- Si los **soil nails** se encuentran debajo del nivel freático, y el agua subterránea no afecta negativamente la cara de la excavación, la adherencia entre el **nail** (clavo) y el suelo o la integridad a largo plazo de los **soil nails**.
- También es recomendable un terreno donde se puedan hacer perforaciones sin cubierta y que permita un auto-soporte de la perforación por lo menos de unas dos horas hasta que se hayan introducido y cementado las barras.
- Suelos competentes según valor de N del ensayo SPT, para identificación preliminar.
- Suelos granulares densos a muy densos con cohesión aparente, con valores de  $N > 30$  y fracción fina  $< 15\%$ . La cohesión aparente debe ser  $> 5$  kPa.
- Roca meteorizada sin planos de debilidad desfavorables, con un grado de meteorización uniforme a lo largo de la roca y de esta manera usar un solo método de perforación e instalación.
- Suelos glaciales, ya que estos son típicamente granulares, densos, bien graduados y con cantidad limitada de finos.
- Arenas finas o medianamente homogéneas con cohesión aparente (capilar) como mínimo de 5 kPa asociada a un contenido de humedad natural de al menos del 5%. Este tipo de suelo algunas veces puede exhibir problemas de estabilidad cuando el frente de excavación es sujeto a secado por el sol.
- Suelos cohesivos rígidos tales como limos arcillosos y arcillas de baja plasticidad que no sean propensas a **creep** (fluencia).

Las siguientes son las condiciones intermedias para el **soil nailing**:

- Terraplén diseñado. Se pueden instalar en terraplenes con una mezcla del 90% de material granular bien graduado y suelo fino de baja plasticidad ( $IP < 15\%$ ).
- Suelos residuales, suelos lateríticos, dependiendo de la variabilidad espacial y la capacidad de drenaje.

Las siguientes son las condiciones difíciles o desfavorables del suelo para el soil nailing:

- Suelos no cohesivos secos, pobremente graduados (uniformes) con  $C_u < 2$  a menos que tengan una densidad relativa muy alta. Estos suelos no tienen cohesión aparente por lo que no se pueden realizar cortes verticales o casi verticales. Durante la construcción, este tipo de suelos tenderá a desmoronarse cuando esté expuesto debido a la falta de cohesión aparente.
- Suelos con nivel freático alto. Es difícil que una excavación se sostenga si hay cantidades significativas de agua en el frente de la misma. Su drenaje puede resultar muy costoso y por ende el sistema no sería económicamente viable. Además sería difícil aplicar el hormigón proyectado.
- Suelos con una proporción significativa de guijarros y cantos rodados causan dificultades para la perforación y pueden acarrear costos adicionales.
- Suelos finos blandos a muy blandos. Suelos con valores de  $N < 4$  del SPT no son aptos para el **soil nailing** debido a la baja adherencia entre la lechada del **soil nail** y el terreno. Adicionalmente, las deformaciones a largo plazo (fluencia) son problemáticas en arcillas. Otro problema es que por lo general los suelos de alta plasticidad pueden ser expansivos y generar presiones localizadas en el frente de excavación.
- Los suelos orgánicos. Presentan resistencia al corte muy baja y baja cohesión. Otros pueden ser muy heterogéneos y altamente anisotrópicos. Adicionalmente pueden ser muy corrosivos. Se encuentran en este grupo los limos orgánicos, arcillas orgánicas y turbas.
- Suelos orgánicos o suelos arcillosos con un índice de liquidez  $IL > 0,20$  y resistencia al corte no drenada  $c_u < 50$  kPa pueden conducir a la fluencia (**creep**) significativamente en el largo plazo y puede también

exhibir una disminución en la adherencia suelo-*nail* y la resistencia al arrancamiento del *nail* si la zona permanece saturada.

- Suelos altamente corrosivos (ceniza o escoria) o aguas subterráneas. Estas condiciones pueden conducir a la necesidad de proporcionar una protección contra la corrosión que puede ser muy costosa, especialmente si la estructura a construir es permanente.
- Roca meteorizada con planos de debilidad desfavorables y *karst*. Las grietas, fracturas, cizallas, fallas, estratificación, esquistosidad o clivaje pueden afectar la estabilidad de las perforaciones y dificultar la inyección de lechada. La presencia de estas discontinuidades puede causar la formación de bloques potencialmente inestables durante la excavación. La estabilización de los bloques puede ser necesaria, generando costos adicionales que hacen que la solución no sea económica. Además la inyección de lechada en rocas agrietadas y con vacíos muy grandes es difícil y costoso y en formaciones kársticas no es adecuada.
- **Loess**. En estado seco puede presentar resistencias aceptables. Sin embargo, en estado húmedo este suelo puede colapsar, así que se debe evaluar el potencial de colapso. Puede ser necesario recurrir a medidas de drenaje del suelo que aumenten significativamente los costos, y hacer poco atractiva esta alternativa.
- En suelos altamente susceptibles a la helada y la expansión (*swelling*). Estos suelos pueden resultar en incrementos significativos en las cargas en el *nail* cerca al revestimiento; se pueden registrar daños en el muro en estas condiciones. Con suelos susceptibles a la helada, se recomienda que el diseño prevenga la penetración del hielo en el suelo mediante una adecuada estructura protectora en el revestimiento.
- En zonas de prolongada exposición a temperaturas heladas estas pueden generar en los suelos y sedimentos granulares saturados, aumentos de presión sobre el revestimiento.

- Los ciclos de congelación y descongelación pueden reducir la adherencia en la interfaz lechada-suelo y entre el revestimiento y el suelo retenido.
- Los suelos granulares muy sueltos ( $N < 4$ ) y sueltos ( $4 < N < 10$ ) o  $D_r < 30\%$  (densidad relativa) pueden sufrir asentamientos excesivos debido a las vibraciones causadas por equipos de construcción y tráfico.
- Los suelos granulares sueltos y muy sueltos pueden ser susceptibles a la licuación. Las acciones para densificar los suelos pueden ser costosas y por ende aumentar el costo global del proyecto de **soil nailing**.
- Los suelos con excesiva humedad natural o bolsas húmedas tales que tiendan a enlodarse y crear problemas de estabilidad cuando se esponga, y desaparezca la cohesión aparente.
- Rellenos urbanos y sueltos, y material de relleno.
- Zonas sometidas a grandes sobrecargas: Se debe analizar el impacto de las mismas ya que pueden afectar el comportamiento de los sistemas de **soil nailing**. Se pueden presentar grandes deformaciones y asentamientos.

Por lo anteriormente expuesto, es que siempre se debe evaluar detalladamente antes de tomar la decisión de proponer un tipo particular de diseño.

#### **1.2.5.2 Otros criterios de evaluación**

Los sistemas de **soil nailing** permanente son generalmente considerados para tener una vida útil de 75 a 100 años. Para trabajos temporales se considera que la vida útil es de 18 a 36 meses.

Desde la introducción del **soil nailing**, su aplicación se ha extendido a una amplia variedad de tipos de terreno, desde suelos hasta roca meteorizada.

La más económica aplicación de muros de **soil nail**, es usualmente como una alternativa a los muros convencionales donde la geometría del sitio no permite una excavación permanente no soportada.

### **1.2.5.3 Algunas restricciones**

- Las técnicas de **soil nailing** pueden inducir desplazamientos y deformaciones que podrían afectar zonas adyacentes, especialmente en áreas urbanas.
- La parte superior de la estructura de **soil nailing** siempre tendrá movimientos horizontales y verticales, principalmente durante la fase de construcción. Estos desplazamientos son del orden de 1 a 4 milésimas de la altura del muro. Sin embargo, los valores de estos desplazamientos dependen de varios factores, particularmente, la altura del muro, el ángulo de inclinación del revestimiento, la densidad y rigidez de los **nails**, la calidad del terreno y las condiciones en que se construya la estructura.
- Estos desplazamientos a su vez afectan la superficie de cualquier suelo vecino y disminuyen con la distancia al revestimiento. En la práctica deben realizarse verificaciones para asegurar que ninguna estructura cercana será afectada por estas deformaciones.
- En algunos casos se puede combinar la técnica del **soil nail** con anclajes para evitar que los desplazamientos generen daños a las estructuras cercanas.
- La presencia de facilidades, estructuras subterráneas u otras obstrucciones enterradas genera restricciones para la longitud y geometría de los **soil nails**.
- La zona ocupada por los **soil nails** queda inutilizable y tiene restricciones para el futuro desarrollo.
- La efectividad del **soil nail** puede estar comprometida en sitios que han tenido grandes deslizamientos de tierra, involucrando fallas profundas debido a la alteración del suelo.

- Los **soil nails** muy largos son difíciles de instalar y por tanto la técnica de **soil nailing** puede no ser apropiada para deslizamientos profundos y grandes taludes.
- Los **soil nails** no son efectivos en la estabilización de perfiles de taludes profundos, escarpes, salientes o en áreas de alta erosión potencial.

## 2 METODOLOGÍA

En este capítulo se define el procedimiento para la elaboración y análisis de los modelos. Se presentan las variables de comportamiento y los procedimientos de modelación para los programas SNAP-2; Slide y RS2; y se presenta un procedimiento general para el diseño de las estructuras de *soil nailing*.

### 2.1 Modelos numéricos para sistemas de soil nailing

#### 2.1.1 Programas para soil nailing.

Existen diferentes programas para análisis y diseño de sistemas de *soil nailing*. Estos programas de diseño se dividen fundamentalmente en dos tipos, los que se basan en métodos de diseño de equilibrio límite y los que se basan en modelos numéricos que a su vez pueden ser elementos finitos o diferencias finitas.

Varios programas se han desarrollado en Europa y Estados Unidos, de los cuales los más conocidos son el SNAIL (Departamento de Transporte de California, 1991), GOLDNAIL (Golder Associates, 1993), NAIL-SOLVER (Oxford Geotechnical Software, 1990), TALREN (Terrasol, Montreuil, Francia, años 80), SNAP2 (FHWA, 2014), etc. Todos estos programas utilizan bases teóricas similares, sin embargo para el caso del presente trabajo se utilizará el programa SNAP2, que es de uso y libre y del cual existe una versión bastante actualizada (Septiembre de 2014).

#### 2.1.2 Descripción de SNAP2.

Para una completa descripción y uso del programa, el lector puede consultar el Manual del Usuario de SNAP2 (*Soil Nail Analysis Program FHWA-HIF-14-016*), el cual se encuentra disponible en el siguiente link, <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/software/snap2/snap2.pdf>. El programa se basa en los manuales de muros de *soil nail* “*Geotechnical Engineering Circular No. 7 Soil Nail Walls*” (FHWA-IF-03-017, Marzo de 2003) y su versión actualizada “*Geotechnical Engineering Circular No. 7 Soil Nail Walls Manual Reference*” (FHWA-NHI-14-007, Febrero de 2015). El diseño incluye los siguientes aspectos, 1) Elementos del *nail*, 2) elementos del revestimiento, 3) la estabilidad externa, y 4) la estabilidad global. El programa utiliza el método de diseño por esfuerzos admisibles (ASD), también conocido como método de los esfuerzos de trabajo o método elástico.

### 2.1.3 Elementos finitos.

El método de los elementos finitos, nace de la necesidad de simplificar el análisis del comportamiento muy complejo de los materiales en general, y de los suelos y rocas en particular, de tal forma que mediante la discretización<sup>13</sup> se facilite dicho análisis y se pueda comprender el comportamiento del objeto de estudio; en nuestro caso particular las estructuras que forman los sistemas de **soil nailing**.

Los métodos de elementos finitos tienen ventajas sobre los métodos de equilibrio límite, debido a que pueden tener en cuenta más variables de comportamiento, y además calculan con mayor precisión la forma como los materiales y estructuras responden ante las cargas que actúan sobre ellos. Igualmente, los métodos de equilibrio límite no tienen en cuenta las deformaciones que se presentan en el suelo. Sin embargo, el uso de los métodos de elementos finitos requiere una mayor investigación geotécnica, y el uso de un adecuado modelo constitutivo de comportamiento. Otras ventajas que tienen los métodos de elementos finitos es que permiten analizar geometrías complejas, diferentes condiciones de carga y condiciones límite, entre otras.

Para el caso del presente proyecto, se utiliza el programa RS<sup>2</sup> (Phase<sup>2</sup>), que fue desarrollado por la compañía Rocscience Inc. RS<sup>2</sup> es un programa de elementos finitos de dos dimensiones, que cubre una amplia gama de problemas de diseño para suelos y rocas.

De acuerdo con Barbosa<sup>14</sup>, la solución teórica de todo tipo de estructuras de contención debe satisfacer cuatro requisitos básicos: 1) Equilibrio de fuerzas y esfuerzos, 2) Compatibilidad de esfuerzos y deformaciones 3) Comportamiento constitutivo del material (relación entre esfuerzos y deformaciones) y 4) Condiciones de frontera del problema, tanto de esfuerzos como de desplazamientos. También indica este autor que para analizar un problema se requiere realizar ciertas idealizaciones e hipótesis (relaciones constitutivas matemáticas) y simplificar las

---

<sup>13</sup> Zienkiewicz, O., Taylor, R. El Método de los Elementos Finitos: Formulación Básica y Problemas Lineales. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Cuarta Edición. Barcelona (España). 1994. p1

<sup>14</sup> Barbosa, E. Consideraciones Geotécnicas sobre Análisis de Excavaciones Soportadas. Primer Seminario de Geotecnia, Universidad de la Salle. Bogotá, 1994. p4

condiciones de geometría y de frontera (deformación plana, elasticidad, elasto-plasticidad, modelos de comportamiento). Barbosa concluye que:

*si es posible establecer un modelo constitutivo realístico para el comportamiento del material, identificar las condiciones de frontera y combinar estas con las ecuaciones de equilibrio y compatibilidad se puede obtener una solución teórica exacta. Esta solución será exacta en el sentido teórico, pero será aproximada al problema real en la medida de las hipótesis de geometría, condiciones de frontera aplicadas y comportamiento constitutivo para idealizar el problema real físico en un equivalente matemático.*<sup>15</sup>

#### **2.1.4 Elementos finitos para estructuras de contención.**

De acuerdo con Potts (2001), antes de iniciar cualquier análisis numérico, se deben resolver algunos aspectos claves para asegurar que se utilice el método más apropiado para la modelación del suelo y la estructura. Los aspectos fundamentales que se deben tener en cuenta son: condiciones límite, simetría, geometría del modelo de elemento finito, el sistema de soporte, selección del modelo constitutivo, método de construcción. Todos estos aspectos se deben analizar con precaución, ya que cada uno de ellos tiene influencia en los resultados que se obtengan. Una selección inadecuada de alguno de estos elementos, puede conducir a resultados que no reflejen el comportamiento real de la estructura y/o el suelo.<sup>16</sup>

Los métodos de elementos finitos requieren que las variables de campo sean definidas por elementos, además se requiere que estas se analicen de acuerdo con ciertas formulaciones específicas, denominadas funciones de aproximación.

Una vez que se han dado los pasos iniciales, se define el modelo constitutivo, se resuelve el modelo y se analizan los resultados de dichos análisis.

## **2.2 Variables de comportamiento para análisis mediante el método de equilibrio límite para el programa SNAP-2**

Son muy numerosas las variables de entrada del programa SNAP-2 relacionadas con las propiedades del suelo, geometría, el revestimiento, factores de seguridad,

---

<sup>15</sup> Barbosa, Ibid, p8

<sup>16</sup> Potts, D. Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Application. Thomas Telford. Londres, 2001. p77

refuerzos, tipos de muros, etc. Sin embargo aquí se muestran las principales relacionadas con el suelo.

Propiedades del suelo:

- Peso unitario efectivo del suelo ( $\gamma'_s$ ).
- Angulo de fricción efectivo ( $\phi'$ ).
- Angulo de fricción muro-terreno ( $\delta$ ).
- Cohesión efectiva ( $c'$ ).
- Adherencia suelo-**nail** ( $q_u$ ).
- Factores de capacidad de carga;  $N_c$ ,  $N_q$ ,  $N_\gamma$

Se hacen las siguientes precisiones y simplificaciones:

- Las propiedades de los suelos que se analizan han sido tomadas de investigaciones de campo y ensayos de laboratorio realizados en suelos de la ciudad de Bogotá, para los estudios de la Fase I del Metro. Estos datos, se limitan a los tramos I y II. No se requiere una mayor cobertura, debido a que en los datos seleccionados existe la suficiente variabilidad para tener en cuenta diferentes condiciones de comportamiento de las estructuras de **soil nailing**.
- Las principales variables de comportamiento se limitan a las propiedades del suelo: granulometría, ángulo de fricción ( $\phi$ ), cohesión ( $c$ ), peso unitario ( $\gamma$ ), adherencia suelo-**nail** ( $q_s$ ), humedad ( $\omega$ ), resistencia al corte no drenada ( $c_u$ ), límites, resistencia.
- Otras variables de comportamiento que se tendrán en cuenta son: el espesor del revestimiento temporal ( $h_c$ ), la longitud de los **nails** ( $L$ ), capacidad de carga ( $q_u$ ) y la sobrecarga ( $q_s$ ). Todas las demás características de la estructura serán fijas.
- También se asume para todos los modelos el uso de longitudes uniformes de **nails**. Esto en razón a que en términos prácticos es más económico producir e instalar un solo tipo de **soil nails**.

### 2.3 Variables de comportamiento para análisis mediante el método de equilibrio límite para el programa SLIDE

Geometría del terreno natural: Se determina la geometría del terreno con la opción **add external boundary**.

Propiedades del suelo: Peso unitario, tipo de análisis, cohesión y ángulo de fricción.

Propiedades del *nail*: Tipo de soporte, diámetro, resistencia, capacidad de la placa de apoyo y adherencia.

Propiedades del revestimiento: Peso unitario del concreto, cohesión y ángulo de fricción y tipo de análisis.

## **2.4 Variables de comportamiento para análisis mediante método de elementos finitos (RS<sup>2</sup>)**

### **2.4.1 Selección de los parámetros del modelo.**

Los parámetros de los modelos son usados para cuantificar el comportamiento mecánico de los suelos, y representar principalmente las propiedades de rigidez y resistencia. Estas propiedades de rigidez y resistencia muestran una gran dependencia del nivel y la trayectoria de esfuerzos. Algunos modelos incluyen esta dependencia hasta cierto punto en sus formulaciones. La selección de los parámetros siempre debe incluir una evaluación del procedimiento de selección e interpretación de los resultados con vista a la aplicación<sup>17</sup>.

### **2.4.2 Variables a utilizar en los modelos.**

Al igual que en el caso de los métodos de equilibrio límite, hay una gran cantidad de variables que pueden influir en la modelación y comportamiento del sistema. Sin embargo, para efectos de análisis comparativos, se hacen las mismas precisiones y simplificaciones que se indicaron para los modelos que se realizan en el programa SNAP-2. Ver numeral 2.2, página 42.

## **2.5 Valores de las variables a utilizar en los modelos**

En la siguiente tabla se presentan los valores de las variables que se utilizan en los diferentes modelos. Estos valores se determinan de los resultados de investigaciones de campo y laboratorio realizadas en los estudios para el proyecto Metro de Bogotá Tramos I y II. Para la obtención de estos valores, se realizó un análisis estadístico de varias muestras de cada tipo de suelo. La descripción que se

---

<sup>17</sup> Brinkgreve., R. Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application. Geotechnical Special Publication No. 128. Soil Constitutive Models. Evaluation, Selection and Calibration. Austin (Texas), January 24-26, 2005. p83-84

hace para clasificar los suelos en la tabla 2-1, solo aplica para los suelos estudiados en la presente investigación.

**Tabla 2-1 Valores de las variables a utilizar en los modelos**

| Suelo          | $\gamma'_s$       | $\phi'$ | $c'$ | $q_u$ | $N_c$ | $N_q$ | $N_\gamma$ | E      | $\nu$ |
|----------------|-------------------|---------|------|-------|-------|-------|------------|--------|-------|
|                | kN/m <sup>3</sup> | °       | 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 |

## 2.6 Modelos utilizados

En este numeral se presentan los criterios que se utilizaron para la elaboración de los modelos.

### 2.6.1 Modelos en SNAP-2.

Para la elaboración de los modelos de SNAP-2, se tuvieron en cuenta las recomendaciones de diseño del Manual de Muros de **Soil Nail** de la FHWA y del Manual de SNAP-2.

#### 2.6.1.1 Limitaciones del modelo en SNAP-2

- Se realizaron inicialmente modelaciones de prueba, para verificar cual era la geometría óptima que permitiera definir con precisión el comportamiento de los muros, y no generara resultados erróneos en el programa.
- Era necesario realizar verificaciones y análisis detallados de las variables de entrada, a fin de homogenizar la información del programa con los datos de los programas RS2 y Slide; de tal forma que los resultados fueran comparables. Para esto se hicieron varias simplificaciones en los modelos, pero cuidando que las variables utilizadas permitieran obtener resultados compatibles.

- SNAP-2 tiene la capacidad para analizar estabilidad únicamente por el método de Bishop Simplificado, por tanto fue necesario usar el mismo método en Slide.
- SNAP-2 puede evaluar solo superficies de falla circular.
- El programa no permite evaluar cortes que no incluyan revestimiento.
- Tampoco permite modelar cortes en zonas completamente planas, siempre deben modelarse cortes en taludes, así sean de baja pendiente.
- El programa no permite guardar archivos de cada modelo de forma individual y acceder a estos cada vez que se requiera, tal como se hace en Slide o RS2, en los que para cada modelo, se genera un archivo único e independiente. En SNAP-2 los datos quedan guardados en una base de datos interna en el computador con archivos de extensión .html y cada vez que se necesita el archivo, previamente se debe abrir el programa y llamar el archivo desde la memoria del programa. La única información que se puede almacenar en carpetas definidas por el usuario son los reportes de resultados que se pueden obtener a partir del archivo html luego de convertirlo a un archivo PDF.
- Las características gráficas, la forma de iniciar, ejecutar, introducir datos, correr el programa y obtener resultados se encuentra en el documento ***SNAP-2 (SOIL NAIL ANALYSIS PROGRAM) User's Manual. Publication No. FHWA-HIF-14-016, September 2014.***

### **2.6.1.2 Procedimiento de modelación en SNAP-2**

Una vez se determinó la geometría óptima que permitiría obtener resultados de comportamiento real del sistema, se procedió a iniciar los modelos. En el Anexo 4 se presenta el procedimiento detallado de modelación. A continuación se presenta el resumen de pasos.

- Paso 1 – Definición geometría
- Paso 2 – Definición parámetros geotécnicos
- Paso 3 – Condiciones hidráulicas del terreno
- Paso 4 – Características de los ***nails***
- Paso 5 – Características del revestimiento
- Paso 6 – Características del sistema (geometría y tipo de muro)
- Paso 7 – Sobrecarga
- Paso 8 – Análisis sísmico
- Paso 9 – Verificación de datos del muro
- Paso 10 – Definición reporte

- Paso 11 – Resultados de programa
- Paso 12 – Análisis de resultados

## 2.6.2 Modelos en RS2.

Para la elaboración de los modelos de RS2, se tuvieron en cuenta las recomendaciones del documento ***Application of the Finite Element Method to Slope Stability, elaborado por Rocscience Inc, Toronto, 2004.***

### 2.6.2.1 Características del modelo

- El modelo constitutivo para describir las propiedades de los materiales es Mohr-Coulomb.
- Factor de reducción de resistencia al corte: Se define para los parámetros de resistencia al corte factorizados como:

$$C_f = C/SRF$$

$$\phi_f = \tan^{-1}(\tan \phi/SRF)$$

$$FS = \tau/\tau_f$$

$\tau$  : Resistencia al corte del material (en el criterio Mohr-Coulomb)

$$\tau = C + \sigma_n * \tan \phi$$

$\tau_f$  : Resistencia al corte en la superficie de falla

$$\tau_f = C_f + \sigma_n * \tan \phi_f$$

- Colapso del talud: La no convergencia dentro de un programa de elementos finitos se toma como un indicador de falla del talud. Esto realmente significa que no se puede lograr ninguna distribución de esfuerzos para satisfacer tanto el criterio de Mohr-Coulomb como el de estabilidad global. La falla del talud y la no convergencia numérica tienen lugar al mismo tiempo y están unidos por un aumento en los desplazamientos. Por lo general, el valor del desplazamiento nodal máximo justo después de la falla del talud, tiene un gran salto en comparación con el desplazamiento anterior a la falla.<sup>18</sup>
- El modelo Mohr-Coulomb por ser un modelo elástico-perfectamente plástico supone que la rigidez antes de la falla es linealmente elástica, por lo que el modelo tiene limitaciones respecto a la predicción del comportamiento antes de fallar (Callisto et al. 1999).

---

<sup>18</sup> Rocscience. Application of the Finite Element Method to Slope Stability. 2004. p4

- Como se utiliza elasticidad perfecta, las deformaciones cortantes son independientes de las deformaciones normales, es decir, los esfuerzos cortantes no producen cambios de volumen.

### 2.6.2.2 Procedimiento de modelación en RS2

#### Consideraciones iniciales:

- Se definieron tres tipos de geometrías para la modelación. Modelos con espaciamiento entre **nails** 1,0 x 1,0, 1,5 x 1,5 y 2,0 x 2,0 m.
- En los modelos de 1,0 x 1,0 se trató de determinar la cantidad y longitud de **nails** que se deberían utilizar. Por lo tanto en este tipo de modelos se colocaban los **nails** y/o el revestimiento, únicamente al momento en que la estructura no cumplía con el factor de seguridad global de 1,50.
- En los modelos 1,5 x 1,5 y 2,0 x 2,0 se definieron las etapas como: Etapa 1 corresponde a la excavación e instalación del **nail** del nivel 1, etapa 2 corresponde a la instalación del revestimiento del nivel 1. Etapa 3 corresponde a la excavación e instalación del **nail** del nivel 2, etapa 4 corresponde a la instalación del revestimiento del nivel 2. Etapa 5 corresponde a la excavación e instalación del **nail** del nivel 3, etapa 6 corresponde a la instalación del revestimiento del nivel 3. Así sucesivamente hasta llegar a la altura del muro requerido. La última etapa corresponde a la instalación de la sobrecarga.
- Para los espaciamientos de 1,5 x 1,5 se diseñaron muros de 4,5 m a 9,0 m de altura. Para los espaciamientos de 2,0 x 2,0 se diseñaron muros de 4,0 m a 10 m de altura.
- Para cada una de las etapas se hizo un modelo independiente. Es decir, el primer modelo correspondía a la excavación e instalación del **nail** del primer nivel. El siguiente modelo incluye además el revestimiento del primer nivel y así sucesivamente hasta la última etapa que es la instalación de la sobrecarga.

En el Anexo 4 se presenta el procedimiento detallado de modelación. A continuación se presenta el resumen de pasos.

- Paso 1 – Definición geometría
- Paso 2 – Definición de la malla

- Paso 3 – Restricciones de movimiento del terreno
- Paso 4 – Tipo de análisis
- Paso 5 – Etapas del modelo
- Paso 6 – Selección del tipo de análisis de esfuerzos
- Paso 7 – Incidencia del agua subterránea
- Paso 8 – Análisis estadístico
- Paso 9 – Factor de reducción de resistencia
- Paso 10 – Resumen del proyecto
- Paso 11 – Propiedades del campo de esfuerzos
- Paso 12 – Definición de las características del suelo
- Paso 13 – Definición de las propiedades del **nail**
- Paso 14 – Definición de las propiedades del revestimiento
- Paso 15 – Definición de la sobrecarga
- Paso 16 – Presentación de resultados
- Paso 17 – Verificación del revestimiento
- Paso 18 – Análisis de resultados

### 2.6.3 Modelos en SLIDE.

#### 2.6.3.1 Características y limitaciones del modelo

- Con base en los modelos que se realizaron para SNAP-2 y RS<sup>2</sup>, se definió la geometría del modelo en Slide.
- Se utilizó el método de Bishop simplificado para determinar los factores de seguridad de manera que fuera compatible con el SNAP-2.
- Como el programa muestra la superficie de falla crítica y en muchos casos esta no pasaba por el muro, se graficaron las 300 o más superficies de falla críticas, para poder ver las que pasan por el muro.
- El programa no incluye elementos de revestimiento como el SNAP-2 y el RS<sup>2</sup>. Por lo tanto, se debió hacer una equivalencia, colocando un material adicional en la cara de la excavación, con propiedades similares a las del concreto reforzado. Las propiedades utilizadas fueron:  $C = 350 \text{ kPa}$ ;  $\phi = 40^\circ$ ;  $\gamma = 22,56 \text{ kN/m}^3$ .
- Las funciones y características de la interface con el usuario son similares a las del RS<sup>2</sup>, debido a que el programa es desarrollado por la misma empresa.
- Superficies de falla: Se utilizaron superficies de falla circulares y se usó la opción **Autorefine Search**.
- Tipo de soporte: A diferencia del RS<sup>2</sup>, el Slide sí tiene una opción de **Soil Nail**, la cual se seleccionó en modo pasivo. La resistencia a la tensión es de

146 kN; y la de la placa de apoyo, 170 kN. La adherencia depende del diámetro y el material del terreno.

### **2.6.3.2 Procedimiento de modelación en Slide**

#### **Consideraciones iniciales:**

- Se definieron tres tipos de geometrías para la modelación. Modelos con espaciamiento entre **nails** 1,0 x 1,0, 1,5 x 1,5 y 2,0 x 2,0 m.
- En los modelos de 1,0 x 1,0 se trató de determinar la cantidad y longitud de **nails** que se deberían utilizar. Por lo tanto en este tipo de modelos se colocaban los **nails** y/o el revestimiento, únicamente al momento en que la estructura no cumplía con el factor de seguridad global de 1,50.
- En los modelos 1,5 x 1,5 y 2,0 x 2,0 se definieron las etapas como: Etapa 1 corresponde a la excavación e instalación del **nail** del nivel 1, etapa 2 corresponde a la instalación del revestimiento del nivel 1. Etapa 3 corresponde a la excavación e instalación del **nail** del nivel 2, etapa 4 corresponde a la instalación del revestimiento del nivel 2. Etapa 5 corresponde a la excavación e instalación del **nail** del nivel 3, etapa 6 corresponde a la instalación del revestimiento del nivel 3. Así sucesivamente hasta llegar a la altura del muro requerido. La última etapa corresponde a la instalación de la sobrecarga.
- Para los espaciamientos de 1,5 x 1,5 se diseñaron muros de 4,5 m a 9,0 m de altura. Para los espaciamientos de 2,0 x 2,0 se diseñaron muros de 4,0 m a 10 m de altura.
- Para cada una de las etapas se hizo un modelo independiente. Es decir, el primer modelo correspondía a la excavación e instalación del **nail** del primer nivel. El siguiente modelo incluye además el revestimiento del primer nivel y así sucesivamente hasta la última etapa que es la instalación de la sobrecarga.

En el Anexo 4 se presenta el procedimiento detallado de modelación. A continuación se presenta el resumen de pasos.

- Paso 1 – Definición geometría del terreno
- Paso 2 – Selección del tipo de análisis
- Paso 3 – Definición de etapas
- Paso 4 – Incidencia del agua subterránea

- Paso 5 – Análisis estadístico
- Paso 6 – Definición de las características del suelo
- Paso 7 – Definición de propiedades del nail
- Paso 8 – Selección del esquema de instalación de los nails
- Paso 9 – Definición de propiedades del revestimiento
- Paso 10 – Definición de la sobrecarga
- Paso 11 – Presentación de resultados
- Paso 12 – Análisis de resultados

En el Anexo 3 se presentan las tablas y gráficas que resumen los modelos realizados, así como los datos básicos requeridos para un diseño preliminar en los cuatro suelos estudiados.

## 2.7 Pasos de diseño

A continuación se presentan los pasos esenciales de diseño que se deben seguir para un proyecto de **soil nailing**:

- El diseñador debe solicitar al cliente información que incluya: una descripción detallada del proyecto, objetivos, alcance, vida útil, localización, geología, topografía, fotografías aéreas y demás información que se requiera, dependiendo de la magnitud del proyecto.
- Se debe realizar una visita a la zona del proyecto que permita al diseñador obtener información primaria para el análisis preliminar.
- Se debe definir un plan de exploración geotécnica detallada de acuerdo a las versiones vigentes de los siguientes documentos: Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente NSR-10; Normas INVIAS; **Geotechnical Engineering Circular No. 5 (Evaluation of Soil and Rock Properties)**; **Soil Nail Walls Reference Manual – FHWA-NHI-14-007**; u otras normas aplicables.
- Una vez se obtienen los parámetros y condiciones geotécnicas se debe evaluar la aplicabilidad del sistema de **soil nailing**. Se debe realizar un análisis comparativo preliminar de alternativas de contención o refuerzo. Es importante tener en cuenta que dentro de los aspectos críticos de la definición está el ancho del derecho de vía disponible a ser adquirido por el dueño del proyecto. También es importante conocer si el cliente tiene proyectado darle algún uso a la zona donde se construirá el muro de retención. Para análisis preliminares se pueden utilizar cartas de diseño de

estructuras de **soil nail**, las cuales se pueden consultar en el documento **Soil Nail Walls Reference Manual Publication No. FHWA-NHI-14-007**.

- Se debe analizar la complejidad del proyecto: Dependiendo de la complejidad y magnitud del proyecto y de los resultados de la evaluación de las propiedades geotécnicas del suelo se define el tipo de modelación a realizar. En general para terrenos con parámetros geotécnicos muy altos, geometrías sencillas y muros de baja altura ( $H < 10$  m) se pueden realizar análisis con métodos de equilibrio límite con el programa SNAP-2 que es de uso libre. Si se requieren análisis más complejos se pueden utilizar métodos numéricos 2D o 3D. Los modelos en 3D, pueden ser útiles en condiciones muy complejas de geometría del terreno.
- Generar el modelo en el programa que se vaya a utilizar: Se realiza el modelo de acuerdo a los pasos establecidos en el presente capítulo.
- Evaluar resultados: Una vez se ha corrido el programa, se hace el análisis de resultados que permite verificar si el modelo realizado se puede implementar.
- Si la modelación se hizo con SNAP-2, realizar la tabla de refuerzo del muro o muros diseñados. Si la modelación se hizo con RS2, se debe realizar el diseño del revestimiento de acuerdo a los resultados de cortante y momento obtenidos con dicho programa (ver tabla 3-30).
- Construcción: En el sitio de obra y antes de iniciar la construcción se deben realizar pruebas de arrancamiento para verificar que los datos introducidos en el modelo son reales. Si es posible y la magnitud del proyecto lo permite, se pueden hacer pruebas piloto e instrumentación para corroborar los datos obtenidos en el modelo.

### 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 Influencia de los diferentes factores que se involucran en el diseño sobre el comportamiento de un sistema de soil nailing

Para lograr este objetivo se hicieron modelaciones en los diferentes tipos de materiales, con y sin el sistema que permitieron determinar la contribución de cada elemento a la estabilidad de la estructura. Para visualizar estos resultados se muestran algunos modelos representativos, especialmente en arenas sueltas, material que arroja los factores de seguridad más bajos. En el Anexo 2 se presentan los resultados de todas las modelaciones que se realizaron.

- a) Comparando diferentes tipos de suelos: Las características geotécnicas de los suelos tienen influencia en el comportamiento del sistema. Por ejemplo, al comparar arcillas duras con arenas sueltas en un muro de 2 m de altura sin revestimiento, se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 3-1 Comparación de resultados en el factor de seguridad para un muro de 2.0 m, sin revestimiento, en arcillas duras y arenas sueltas, mediante un análisis en RS2**

|                    |                     |           |                  |                    |            |
|--------------------|---------------------|-----------|------------------|--------------------|------------|
| <b>Material</b>    | <b>Arcilla dura</b> | <b>FS</b> | <b>No. Nails</b> | <b>Long. Nails</b> | <b>Rev</b> |
| <b>Altura muro</b> | <b>2,0 m</b>        |           |                  |                    |            |
| <b>Análisis</b>    | RS2                 | 1,71      | 1                | 1,4                | Sin        |
| <b>Material</b>    | <b>Arena suelta</b> | <b>FS</b> | <b>No. Nails</b> | <b>Long. Nails</b> | <b>Rev</b> |
| <b>Altura muro</b> | <b>2,0 m</b>        |           |                  |                    |            |
| <b>Análisis</b>    | RS2                 | 1,5       | 2                | 1,8                | Sin        |

Se observa que el factor de seguridad de la arcilla dura es un 14% más alto que en la arena suelta. De igual manera para la arena suelta se requieren 2 **nails** mientras para la arcilla dura se requiere un solo **nail**. Los **nails** utilizados en la arena suelta tienen una longitud un 28,57% mayor que el **nail** utilizado en la arcilla dura. Los valores presentados en la tabla 3-1 son representativos de los resultados de todas las modelaciones que se hicieron para espaciamientos 1,0 x 1,0 en las que se determinaba un número mínimo de **nails** y la necesidad de utilización de revestimiento. En todos los casos en los que se realiza la comparación entre arcilla dura y arena suelta, se requiere de una mayor cantidad y/o longitud de **nails**. Incluso, en algunos casos, para ciertas alturas, se obtuvo el mismo factor de seguridad en los dos materiales, pero colocando revestimiento en la arena suelta y sin revestimiento en la arcilla dura.

En conclusión, las características geotécnicas tienen una influencia fundamental en el comportamiento del sistema.

- b) Longitud de los **nails**: Examinando los resultados de varios modelos se puede observar la influencia que tiene la longitud de los **nails**. El primer caso que se muestra, se refiere a los resultados de análisis de varios muros de 1,5 x 1,5 en arena suelta. En la tabla 3-2 se observan los resultados.

**Tabla 3-2 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) | Etap 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                     |

Como se observa, para un aumento del 100% en la longitud del **nail**, el factor de seguridad aumenta un 29%.

El segundo caso que se presenta, se refiere a los resultados de análisis de varios muros de 1,0 x 1,0 en arena suelta. En la tabla 3-3 se observan los resultados.

**Tabla 3-3 Comparación de resultados en el factor de seguridad en la misma etapa constructiva para muros de varias alturas, con revestimiento, y espaciamiento 1,0 x 1,0, mediante un análisis en RS2**

| Tipo de Análisis | H muro (m) | Long Nail (m) | Etap constructiva (h=5,0 m) | FS en la etapa analizada |
|------------------|------------|---------------|-----------------------------|--------------------------|
| RS2              | 5,00       | 3,50          | Revestimiento 5             | 2,48                     |
| RS2              | 6,00       | 4,20          | Revestimiento 5             | 2,60                     |
| RS2              | 7,00       | 4,90          | Revestimiento 5             | 2,80                     |
| RS2              | 8,00       | 5,60          | Revestimiento 5             | 3,91                     |
| RS2              | 9,00       | 6,30          | Revestimiento 5             | 3,03                     |

|            |              |             |                        |             |
|------------|--------------|-------------|------------------------|-------------|
| <b>RS2</b> | <b>10,00</b> | <b>7,00</b> | <b>Revestimiento 5</b> | <b>3,18</b> |
|------------|--------------|-------------|------------------------|-------------|

Como se observa, para un aumento del 100% en la longitud del **nail**, el factor de seguridad aumenta un 28%.

En conclusión, la longitud del **nail** tiene una influencia significativa en el factor de seguridad. Esto indica que en ocasiones es posible recurrir a la modificación en la longitud del **nail** para aumentar el factor de seguridad global.

**Tabla 3-4 Comparación de resultados en el factor de seguridad para diferentes longitudes de nail en un muro de 10,0 m, con revestimiento, y espaciamiento 1,0 x 1,0, mediante un análisis en SNAP2**

| PARAMETRO MODIFICADO: <b>LONGITUD DEL NAIL</b>      |    |   |              |                |              |
|---|----|---|--------------|----------------|--------------|
| SIMBOLO: <b>L</b>                                   |    |   |              |                |              |
| UNIDAD: <b>m</b>                                    |    |   |              |                |              |
| VALOR ORIGINAL: <b>7</b>                            |    |   |              |                |              |
| VALOR MODIFICADO: <b>10</b> % Variación: <b>43%</b> |    |   |              |                |              |
| SUELO: <b>ARENA SUELTA</b>                          |    |   |              |                |              |
| ALTURA DEL MURO (H): <b>10,00</b> METROS            |    |   |              |                |              |
| PROGRAMA: <b>SNAP-2</b>                             |    |   |              |                |              |
| MODELO ORIGINAL: <b>H10ARSU</b>                     |    |   |              |                |              |
| MODELO MODIFICADO: <b>H10ARSUMOD11LN</b>            |    |   |              |                |              |
| <b>RESULTADOS DE MODIFICACION:</b>                  |    |   |              |                |              |
| PARAMETRO   |    |   | VR. ORIGINAL | VR. MODIFICADO | % Variación  |
| SIMBOLO   | UN | DESCRIPCION                                   |              |                |              |
| <b>9. Factor de seguridad</b>                       |    |   |              |                |              |
| FS  |    | Etapa 1 (Excavación en el nivel 1)            | 3,48         | 3,48           | <b>0,0%</b>  |
| FS  |    | Etapa 2 (Excavación en el nivel 2 y nail 1)   | 3,81         | 3,83           | <b>0,5%</b>  |
| FS  |    | Etapa 3 (Excavación en el nivel 3 y nail 2)   | 4,05         | 4,12           | <b>1,7%</b>  |
| FS  |    | Etapa 4 (Excavación en el nivel 4 y nail 3)   | 4,19         | 4,32           | <b>3,1%</b>  |
| FS  |    | Etapa 5 (Excavación en el nivel 5 y nail 4)   | 3,22         | 3,42           | <b>6,2%</b>  |
| FS  |    | Etapa 6 (Excavación en el nivel 6 y nail 5)   | 3,26         | 3,68           | <b>12,9%</b> |
| FS  |    | Etapa 7 (Excavación en el nivel 7 y nail 6)   | 2,64         | 3,1            | <b>17,4%</b> |
| FS  |    | Etapa 8 (Excavación en el nivel 8 y nail 7)   | 2,18         | 2,7            | <b>23,9%</b> |
| FS  |    | Etapa 9 (Excavación en el nivel 9 y nail 8)   | 2,07         | 2,32           | <b>12,1%</b> |
| FS  |    | Etapa 10 (Excavación en el nivel 10 y nail 9) | 2,04         | 2,06           | <b>1,0%</b>  |
| FS  |    | Etapa 11 (nail 10)                            | 2,04         | 2,12           | <b>3,9%</b>  |
| FS  |    | Etapa 12 (Sobrecarga)                         | 1,81         | 1,87           | <b>3,3%</b>  |

Se observa que para un aumento en la longitud de los **nails** del 43% (de 7 m a 10 m) se presenta un aumento significativo (23,9%) en el factor de seguridad en las etapas intermedias de construcción y bajo en la etapa final (3,3%).

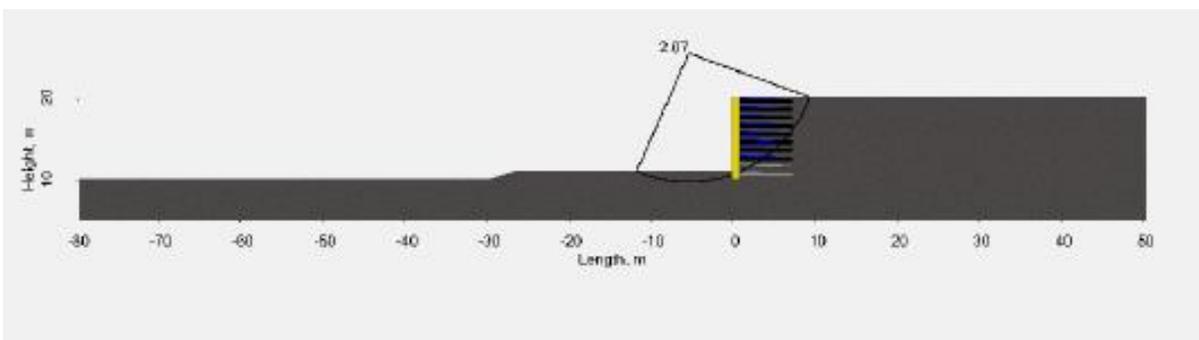
- c) Adherencia: La adherencia tiene una influencia significativa en el factor de seguridad global cuando la superficie potencial de falla intersecta los **nails**, es

decir en las etapas intermedias. En la tabla 3-5 y las figuras 3-1 y 3-2 se puede observar dicha tendencia.

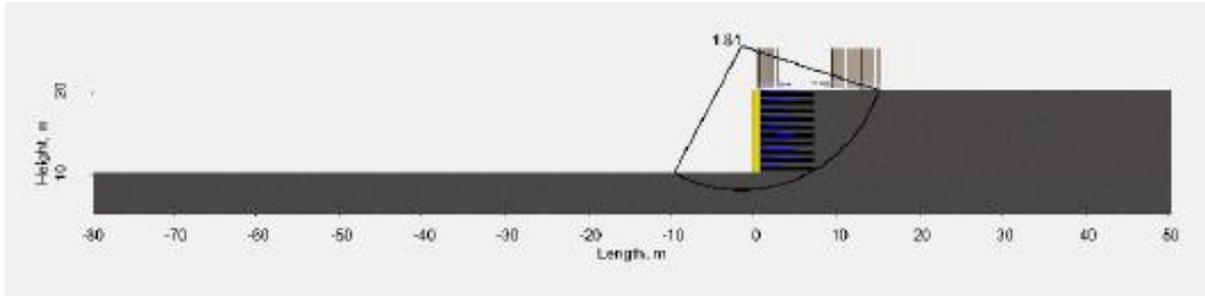
**Tabla 3-5 Comparación de resultados en el factor de seguridad para las diferentes etapas de construcción de un muro de 10 m de altura y espaciamentos de 1,0 x 1,0, en arena suelta, modificando el valor de la adherencia, mediante un análisis en SNAP-2**

| PARAMETRO MODIFICADO: <b>ADHERENCIA</b>              |    |   |              |                |             |
|--|----|---|--------------|----------------|-------------|
| SIMBOLO: <b><math>q_u</math></b>                     |    |   |              |                |             |
| UNIDAD: <b>kPa</b>                                   |    |   |              |                |             |
| VALOR ORIGINAL: <b>100</b>                           |    |   |              |                |             |
| VALOR MODIFICADO: <b>70</b> % Variación: <b>-30%</b> |    |   |              |                |             |
| SUELO: <b>ARENA SUELTA</b>                           |    |   |              |                |             |
| ALTURA DEL MURO (H): <b>10,00</b> METROS             |    |   |              |                |             |
| PROGRAMA: <b>SNAP-2</b>                              |    |   |              |                |             |
| MODELO ORIGINAL: <b>H10ARSU</b>                      |    |   |              |                |             |
| MODELO MODIFICADO: <b>H10ARSUMOD4AD</b>              |    |   |              |                |             |
| <b>RESULTADOS DE MODIFICACION:</b>                   |    |   |              |                |             |
| PARAMETRO  |    |   | VR. ORIGINAL | VR. MODIFICADO | % Variación |
| SIMBOLO  | UN | DESCRIPCION                                   |              |                |             |
| <b>9. Factor de seguridad</b>                        |    |   |              |                |             |
| FS   |    | Etapa 1 (Excavación en el nivel 1)            | 3,48         | 3,48           | 0,0%        |
| FS   |    | Etapa 2 (Excavación en el nivel 2 y nail 1)   | 3,83         | 3,81           | -0,5%       |
| FS   |    | Etapa 3 (Excavación en el nivel 3 y nail 2)   | 4,11         | 4,05           | -1,5%       |
| FS   |    | Etapa 4 (Excavación en el nivel 4 y nail 3)   | 4,19         | 4,19           | 0,0%        |
| FS   |    | Etapa 5 (Excavación en el nivel 5 y nail 4)   | 3,22         | 3,22           | 0,0%        |
| FS   |    | Etapa 6 (Excavación en el nivel 6 y nail 5)   | 3,27         | 3,26           | -0,3%       |
| FS   |    | Etapa 7 (Excavación en el nivel 7 y nail 6)   | 2,66         | 2,64           | -0,8%       |
| FS   |    | Etapa 8 (Excavación en el nivel 8 y nail 7)   | 2,25         | 2,18           | -3,1%       |
| FS   |    | Etapa 9 (Excavación en el nivel 9 y nail 8)   | 2,24         | 2,07           | -7,6%       |
| FS   |    | Etapa 10 (Excavación en el nivel 10 y nail 9) | 2,04         | 2,04           | 0,0%        |
| FS   |    | Etapa 11 (nail 10)                            | 2,04         | 2,04           | 0,0%        |
| FS   |    | Etapa 12 (Sobrecarga)                         | 1,81         | 1,81           | 0,0%        |

**Figura 3-1 Resultado del factor de seguridad en la etapa de construcción 9 de un muro de 10 m de altura y espaciamentos de 1,0 x 1,0, en arena suelta, mediante un análisis en SNAP-2**



**Figura 3-2 Resultado del factor de seguridad en la etapa de sobrecarga de un muro de 10 m de altura y espaciamientos de 1,0 x 1,0, en arena suelta, mediante un análisis en SNAP-2**



Como se observa, si la superficie potencial de falla no atraviesa los **nails** no tiene ninguna influencia en el factor de seguridad. Para el caso que se analiza, se disminuyó el parámetro de adherencia en un 30% (100 kPa a 70 kPa), sin embargo, en la etapa final de construcción no se observan cambios en el factor de seguridad global.

También se observó en este análisis que las fuerzas máximas de tensión en los **nails** disminuyen de forma significativa, aunque no en la cabeza del **nail**.

En las modelaciones en Slide, la adherencia tiene una influencia significativa sobre el factor de seguridad global solo hasta ciertos valores límite a partir de los cuales esta permanece constante o incluso disminuye. En la tabla 3-6 se observa esta tendencia.

**Tabla 3-6 Comparación de resultados en el factor de seguridad para valores de adherencia de dos muros de 9 m de altura y espaciamientos de 1,5 x 1,5, en arena suelta, mediante un análisis en SLIDE**

| <b>Cohesión del revestimiento C (kPa)</b> | <b>Adherencia (kN/m)</b> | <b>FS</b> | <b>% de variación</b> |
|---|--------------------------|-----------|-----------------------|
| 3500                                      | 0                        | 1,34      | -                     |
| 3500                                      | 10                       | 1,54      | 14,93%                |
| 3500                                      | 20                       | 1,83      | 18,83%                |
| 3500                                      | 30                       | 1,77      | -3,28%                |
| 3500                                      | 40                       | 1,81      | 2,26%                 |
| 3500                                      | 50                       | 1,83      | 1,10%                 |
| 3500                                      | 60                       | 1,85      | 1,09%                 |
| 3500                                      | 70                       | 1,86      | 0,54%                 |
| 3500                                      | 80                       | 1,87      | 0,54%                 |
| 3500                                      | 90                       | 1,88      | 0,53%                 |
| 3500                                      | 100                      | 1,88      | 0%                    |
| 350                                       | 0                        | 0,69      | -                     |
| 350                                       | 10                       | 1,18      | 71,01%                |
| 350                                       | 20                       | 1,25      | 5,93%                 |
| 350                                       | 30                       | 1,27      | 1,60%                 |
| 350                                       | 40                       | 1,55      | 22,05%                |
| 350                                       | 50                       | 1,55      | 0%                    |
| 350                                       | 60                       | 1,21      | -21,94%               |
| 350                                       | 70                       | 1,21      | 0%                    |
| 350                                       | 80                       | 1,33      | 9,92%                 |
| 350                                       | 90                       | 1,24      | -6,77%                |
| 350                                       | 100                      | 1,24      | 0%                    |

De los anteriores resultados se puede concluir que la rigidez del revestimiento tiene una mayor importancia en el factor de seguridad que la adherencia en los modelos realizados en Slide.

Se observa que en algunos casos a pesar de que se aumenta el valor unitario de la adherencia, el factor de seguridad global disminuye. Esto se debe a la forma como el programa Slide asume la superficie crítica de falla, ya que él la genera de forma automática. Dependiendo de los valores de adherencia, el programa genera diferentes superficies de falla crítica.

En el caso del análisis con un revestimiento más rígido (3500 kPa), se observó que para una adherencia de 20 kPa, el factor de seguridad era mayor que para una adherencia de 30 kPa porque la superficie potencial de falla interseca una mayor cantidad de *nails* y por lo tanto tiene una mayor longitud de adherencia.

En el caso del revestimiento menos rígido (350 kPa) se observó un fenómeno similar, pero en este caso la superficie potencial de falla se genera muy cerca a la cara de la excavación. En este caso para una adherencia de 60 kPa el factor de seguridad da menor que para una adherencia de 50 kPa porque la superficie potencial de falla está por encima del último *nail*, es decir, que no tiene en cuenta la adherencia del último *nail*.

De especial importancia en este punto es que para todos los modelos realizados con un revestimiento de cohesión=350 kPa, la superficie de falla está muy cerca a la cara de la excavación, es decir, que al aumentar la adherencia, las fuerzas son mayores en el revestimiento y por lo tanto se genera una disminución de la resistencia. Luego se hizo un modelo para las siguientes condiciones de resistencia y adherencia ( $c=350$  kPa, Adherencia=100 kN/m), pero esta vez variando el espesor del revestimiento de 10 cm a 30 cm y se encontró que el factor de seguridad aumentaba de 1,24 a 1,77 y la superficie de falla ya no pasaba cerca a la cara de la excavación, lo que demuestra que la adherencia por sí sola no es determinante en el factor de seguridad sino la interacción de todos los elementos del sistema. Resumiendo, la adherencia tiene influencia en el aumento o disminución del factor de seguridad, pero dependiendo del comportamiento de otros elementos del sistema.

Para las modelaciones en RS2 no se hace este análisis, ya que en la opción Fully Bonded no se incluye este parámetro. La adherencia se toma en cuenta dentro de los parámetros de resistencia del suelo, es decir, en el ángulo de fricción.

- d) Diámetro de la perforación (lechada de cemento): Se hicieron varias modelaciones tanto en SNAP-2 como en RS2 para verificar la influencia de esta

variable. En el análisis de sensibilidad realizado en SNAP-2 se modificó el diámetro de la perforación de 100 mm a 200 mm, es decir una variación del 100%.

**Tabla 3-7 Comparación de resultados en el factor de seguridad para las diferentes etapas de construcción de un muro de 10 m de altura y espaciamientos de 1,0 x 1,0, en arena suelta, mediante un análisis en SNAP-2**

| PARAMETRO MODIFICADO: <b>DIAMETRO DE LA PERFORACION</b> |    |   |              |                |             |
|---|----|---|--------------|----------------|-------------|
| SIMBOLO: <b>D</b>                                       |    |   |              |                |             |
| UNIDAD: <b>mm</b>                                       |    |   |              |                |             |
| VALOR ORIGINAL: <b>100</b>                              |    |   |              |                |             |
| VALOR MODIFICADO: <b>200</b> % Variación: <b>100%</b>   |    |   |              |                |             |
| SUELO: <b>ARENA SUELTA</b>                              |    |   |              |                |             |
| ALTURA DEL MURO (H): <b>10,00</b> METROS                |    |   |              |                |             |
| PROGRAMA: <b>SNAP-2</b>                                 |    |   |              |                |             |
| MODELO ORIGINAL: <b>H10ARSU</b>                         |    |   |              |                |             |
| MODELO MODIFICADO: <b>H10ARSUMOD5DP</b>                 |    |   |              |                |             |
| <b>RESULTADOS DE MODIFICACION:</b>                      |    |   |              |                |             |
| PARAMETRO   |    |   | VR. ORIGINAL | VR. MODIFICADO | % Variación |
| SIMBOLO   | UN | DESCRIPCION                                   |              |                |             |
| <b>9. Factor de seguridad</b>                           |    |   |              |                |             |
| FS  |    | Etapa 1 (Excavación en el nivel 1)            | 3,48         | 3,48           | 0,0%        |
| FS  |    | Etapa 2 (Excavación en el nivel 2 y nail 1)   | 3,81         | 3,85           | 1,0%        |
| FS  |    | Etapa 3 (Excavación en el nivel 3 y nail 2)   | 4,05         | 4,14           | 2,2%        |
| FS  |    | Etapa 4 (Excavación en el nivel 4 y nail 3)   | 4,19         | 4,19           | 0,0%        |
| FS  |    | Etapa 5 (Excavación en el nivel 5 y nail 4)   | 3,22         | 3,22           | 0,0%        |
| FS  |    | Etapa 6 (Excavación en el nivel 6 y nail 5)   | 3,26         | 3,28           | 0,6%        |
| FS  |    | Etapa 7 (Excavación en el nivel 7 y nail 6)   | 2,64         | 2,64           | 0,0%        |
| FS  |    | Etapa 8 (Excavación en el nivel 8 y nail 7)   | 2,18         | 2,18           | 0,0%        |
| FS  |    | Etapa 9 (Excavación en el nivel 9 y nail 8)   | 2,07         | 2,07           | 0,0%        |
| FS  |    | Etapa 10 (Excavación en el nivel 10 y nail 9) | 2,04         | 2,04           | 0,0%        |
| FS  |    | Etapa 11 (nail 10)                            | 2,04         | 2,04           | 0,0%        |
| FS  |    | Etapa 12 (Sobrecarga)                         | 1,81         | 1,81           | 0,0%        |

En la anterior tabla se observa que este parámetro tiene una influencia mínima en el factor de seguridad en las etapas intermedias de construcción, pero ninguna influencia en la etapa final. En este caso sucede exactamente igual que en el caso de la adherencia, y es que la superficie potencial de falla en la etapa final de construcción está por fuera de la zona reforzada con los **nails**, es decir, que esta superficie no intersecta los **nails** y por tanto, el diámetro de la perforación no afecta el factor de seguridad.

Luego se hicieron dos grupos de modelaciones en RS2 tanto en arena suelta como en arcilla dura, cuyos resultados se presentan en las tablas 3-8 y 3-9 presentadas a continuación.

**Tabla 3-8 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                      |
| Superficie de falla                            | No definida  | No definida                 | No definida                | Aprox. Definida en la base |
| Desplazamientos Laterales máximos (m)          | 0,0071   | 0,006                       | 0,003                      | 0,0003                     |
| Localización Desplazamientos Laterales máximos | Zona superior revestimiento                                    | Zona superior revestimiento | Fuera de la zona reforzada | Detrás del revestimiento   |
| Fuerzas máximas cabeza nail (kN)               | 119  | 120                         | 128                        | 97                         |
| Fuerzas máximas nail (kN)                      | 139  | 142                         | 145                        | 128                        |
| Localización fuerzas máximas nail (m)          | 1,59   | 2,57                        | 1,01                       | 4,58                       |
| Desplazamientos verticales máximos (m)         | 0,0076   | 0,0062                      | 0,0045                     | 0,0005                     |
| Momento 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                     |

|   |                           |                           |                              |                               |
|---|---------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Localización deformaciones volumétricas máximas | Base de la zona reforzada | Base de la zona reforzada | Aprox. 4 m debajo de la base | Aprox. 10 m debajo de la base |
|---|---------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|

**Tabla 3-9 Comparación de resultados en el factor de seguridad y otros parámetros para un muro de 6 m de altura y espaciamientos de 1,5 x 1,5, en arcilla dura, 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                            | 1,88   | 1,85                        | 1,85                        | 1,82                        |
| % variación FS                                 | -  | -1,59%                      | 0%                          | -1,62%                      |
| Deformaciones Cortantes máximas                | 0,063  | 0,057                       | 0,04                        | 0,036                       |
| Superficie de falla                            | No definida  | No definida                 | No definida                 | No definida                 |
| Desplazamientos Laterales máximos (m)          | 0,0163   | 0,0133                      | 0,0097                      | 0,0076                      |
| Localización Desplazamientos Laterales máximos | Zona superior revestimiento                                    | Zona superior revestimiento | Zona superior revestimiento | Zona superior revestimiento |
| Fuerzas máximas cabeza nail (kN)               | 79   | 76                          | 76                          | 74                          |
| Fuerzas máximas nail (kN)                      | 143  | 136                         | 146                         | 145                         |
| Localización fuerzas máximas nail (m)          | 4,2  | 4,2                         | 4,2                         | 4,2                         |
| Desplazamientos verticales máximos (m)         | 0,0198   | 0,0166                      | 0,0142                      | 0,0124                      |
| Momento máximo en el revestimiento (kN-m)      | 11   | 13                          | 9                           | 8                           |

|   |                           |                           |                           |                           |
|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Cortante máximo en el revestimiento (kN)        | 42                        | 40                        | 40                        | 38                        |
| Deformaciones volumétricas máximas              | 0,0008                    | 0,0008                    | 0,0007                    | 0,0007                    |
| Localización deformaciones volumétricas máximas | Base de la zona reforzada |

De las anteriores tablas, se encontraron algunos aspectos que vale la pena resaltar:

- Contrario a lo que se podría intuir inicialmente, al aumentar el diámetro de la lechada del **nail**, los factores de seguridad disminuyeron. Para la arena suelta la máxima disminución fue del orden del 21,54%. En el caso de la arcilla dura, disminuía en unos porcentajes mucho menores que en la arena suelta, del orden del 1,62%.
- En cuanto a las deformaciones cortantes, se observó que estas disminuyen a medida que el diámetro de la lechada aumenta, aunque para el modelo en arena suelta estas aumentaron en el **nail** de 300 mm.
- La superficie de falla no se ve muy bien definida en ninguno de los modelos, aunque para la arena suelta, se observa una pequeña superficie pero solo en la base del muro.
- En general todos los desplazamientos laterales disminuyen con el aumento del diámetro de la lechada. De manera general los desplazamiento laterales máximos se encontraron en la parte superior del muro, junto al revestimiento. Sin embargo, en la arena suelta se observó que para el **nail** de 300 mm se encontraron dichos desplazamiento detrás del revestimiento pero no en la parte superior.
- Las fuerzas máximas de tensión en la cabeza del **nail** en arena suelta son mayores en los nails de 75 mm, 100 mm y 200mm, y se nota una disminución en el **nail** de 300 mm, es decir, del orden del 24%. Esto tiene relación directa con el hecho de que en los modelos con diámetros de 300 mm hay menores desplazamientos laterales. En la arcilla dura no es tan clara esta tendencia, ya que la diferencia en las fuerzas en la cabeza del **nail** son mucho menores, del orden del 6%.

- En el análisis de fuerzas máximas de tensión en los **nails**, no hay una tendencia totalmente clara. Se observó en la arena suelta que el valor en el **nail** de 300 mm está un 8% por debajo del promedio. En la arcilla dura todos los valores están muy cercanos al promedio.
- Los desplazamientos verticales también disminuyen a medida que aumenta el diámetro de la lechada.
- Los momentos máximos en el revestimiento se ven afectados de manera significativa por el cambio en el diámetro de la lechada. En la arena suelta se observó que el momento máximo en el revestimiento para un **nail** de 300 mm era un 38% menor que el promedio. En la arcilla dura también es menor pero la incidencia es menos significativa, un 22% por debajo del promedio para un **nail** de 300 mm.
- Los valores de cortante máximo en el revestimiento no son afectados de una manera significativa por el aumento en el diámetro de la lechada. Para el modelo en arena suelta se observó una variación del 15% por debajo del promedio para el **nail** de 300 mm. Para la arcilla dura, no se presentan variaciones significativas.
- Tampoco se observaron variaciones significativas en las deformaciones volumétricas máximas en ninguno de los dos casos y por lo general estas siempre se encontraron en la parte inferior de la zona de suelo reforzado.
- Para la arena suelta, en los modelos de **nails** de 75 mm y 100 mm se observa una gran densidad de elementos plastificados dentro de la masa reforzada y debajo de la base del revestimiento. Esta densidad disminuye en el modelo con **nails** de 200 mm. En el modelo con **nails** de 300 mm, ya no se observa la misma densidad de elementos plastificados en la masa de suelo reforzado, esta se observa más cerca del revestimiento y debajo de la base pero a una menor profundidad.
- A diferencia de lo observado en la arena suelta, en los modelos con arcilla dura las densidades de elementos plastificados son muy similares aunque sí disminuye la cantidad de puntos en zona de plastificación. Las zonas donde se concentran estos puntos son principalmente en la zona de suelo reforzado y en la base de la misma.

A través de este análisis de resultados se ha tratado de explicar la disminución en factor de seguridad. En conclusión, debe tenerse en cuenta que estos modelos son realizados con elementos finitos de dos dimensiones, en los que para poder simular las condiciones en tres dimensiones se supone una deformación plana de un refuerzo que el programa analiza como una placa continua en su sección transversal. Para esto se hace necesario la determinación de los módulos de Young equivalentes, cuyo cálculo se muestra en el Anexo 4 y sus valores se muestran en la tablas anteriores. El **nail** es tomado como una placa de un ancho igual a 1 m (**out-of-plane spacing**=1.0 m en el modelo RS2) en la dirección perpendicular al plano de deformaciones. Esto indica que sin importar cuanto aumente el diámetro el área de contacto suelo-**nail** siempre será la misma. Por el contrario, como las rigideces equivalentes de los **nails** van disminuyendo con el cambio de diámetro, se tendrán menores fuerzas de tensión en los **nails** y menores factores de seguridad.

- e) Diámetro del **nail**: En la tabla 3-10 se observan los resultados del análisis de sensibilidad, los cuales muestran que al aumentar el diámetro de 25,4 mm a 50,8 mm, es decir una variación del 100%, el factor de seguridad global disminuye en las etapas intermedias, pero no tiene ninguna incidencia en la etapa final.

**Tabla 3-10 Comparación de resultados en el factor de seguridad para las diferentes etapas de construcción de un muro de 10 m de altura y espaciamientos de 1,0 x 1,0, en arena suelta, mediante un análisis en SNAP-2**

| PARAMETRO MODIFICADO: <b>DIAMETRO DEL NAIL</b>         |    |   |              |                |             |
|--|----|---|--------------|----------------|-------------|
| SIMBOLO: <b>D<sub>out</sub></b>                        |    |   |              |                |             |
| UNIDAD: <b>mm</b>                                      |    |   |              |                |             |
| VALOR ORIGINAL: <b>25,4</b>                            |    |   |              |                |             |
| VALOR MODIFICADO: <b>50,8</b> % Variación: <b>100%</b> |    |   |              |                |             |
| SUELO: <b>ARENA SUELTA</b>                             |    |   |              |                |             |
| ALTURA DEL MURO (H): <b>10,00</b> METROS               |    |   |              |                |             |
| PROGRAMA: <b>SNAP-2</b>                                |    |   |              |                |             |
| MODELO ORIGINAL: <b>H10ARSU</b>                        |    |   |              |                |             |
| MODELO MODIFICADO: <b>H10ARSUMOD6DN</b>                |    |   |              |                |             |
| <b>RESULTADOS DE MODIFICACION:</b>                     |    |   |              |                |             |
| PARAMETRO  |    |   | VR. ORIGINAL | VR. MODIFICADO | % Variación |
| SIMBOLO  | UN | DESCRIPCION                                   |              |                |             |
| <b>9. Factor de seguridad</b>                          |    |   |              |                |             |
| FS   |    | Etapa 1 (Excavación en el nivel 1)            | 3,48         | 3,48           | 0,0%        |
| FS   |    | Etapa 2 (Excavación en el nivel 2 y nail 1)   | 3,83         | 3,81           | -0,5%       |
| FS   |    | Etapa 3 (Excavación en el nivel 3 y nail 2)   | 4,11         | 4,04           | -1,7%       |
| FS   |    | Etapa 4 (Excavación en el nivel 4 y nail 3)   | 4,19         | 4,19           | 0,0%        |
| FS   |    | Etapa 5 (Excavación en el nivel 5 y nail 4)   | 3,22         | 3,22           | 0,0%        |
| FS   |    | Etapa 6 (Excavación en el nivel 6 y nail 5)   | 3,27         | 3,26           | -0,3%       |
| FS   |    | Etapa 7 (Excavación en el nivel 7 y nail 6)   | 2,66         | 2,61           | -1,9%       |
| FS   |    | Etapa 8 (Excavación en el nivel 8 y nail 7)   | 2,25         | 2,15           | -4,4%       |
| FS   |    | Etapa 9 (Excavación en el nivel 9 y nail 8)   | 2,24         | 2,02           | -9,8%       |
| FS   |    | Etapa 10 (Excavación en el nivel 10 y nail 9) | 2,04         | 2,04           | 0,0%        |
| FS   |    | Etapa 11 (nail 10)                            | 2,04         | 2,04           | 0,0%        |
| FS   |    | Etapa 12 (Sobrecarga)                         | 1,81         | 1,81           | 0,0%        |

En la tabla 3-11 se observa la variación del factor de seguridad global con el cambio en el diámetro del *nail* para un análisis mediante RS2.

**Tabla 3-11 Comparación en los resultados en el factor de seguridad para un muro de 9 m y espaciamiento de 1,5 x 1,5, en arena suelta, modificando el diámetro de la varilla de refuerzo, mediante un análisis en RS2**

| Diámetro de la varilla (mm) | % de aumento en el diámetro | Diámetro de la perforación (mm) | FS   | %Aumento en el FS |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|------|-------------------|
| 25,4                        | -                           | 100                             | 1,44 | -                 |
| 50,8                        | 100%                        | 100                             | 1,53 | 6%                |
| 76,2                        | 200%                        | 100                             | 1,54 | 7%                |

De la anterior tabla, se observa que en los análisis mediante RS2 para la etapa final, se presenta una variación relativamente menor en el factor de seguridad global a aumentar el diámetro del *nail*.

- f) El revestimiento: El revestimiento tiene una influencia muy significativa en el factor de seguridad global. En la tabla 3-12, se muestra la variación de los factores de seguridad al eliminar el revestimiento en varios modelos realizados en RS2.

**Tabla 3-12 Comparación de resultados en el factor de seguridad para varios muros de 9 m de altura y espaciamentos 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%      |

De los resultados obtenidos en la tabla 3-12, se puede concluir que en los materiales arenosos, la influencia del revestimiento en el factor de seguridad es mucho mayor.

- g) Interacción suelo/*nail*:

A partir de los resultados obtenidos en todos los modelos, se puede establecer que los parámetros de diseño más importantes son la adherencia, que está relacionada con el ángulo de fricción y la presencia del revestimiento.

Para determinar el parámetro de suelo que tiene mayor incidencia, se muestra la tabla 3-13, donde se comparan los resultados del factor de seguridad en función de los parámetros geotécnicos.

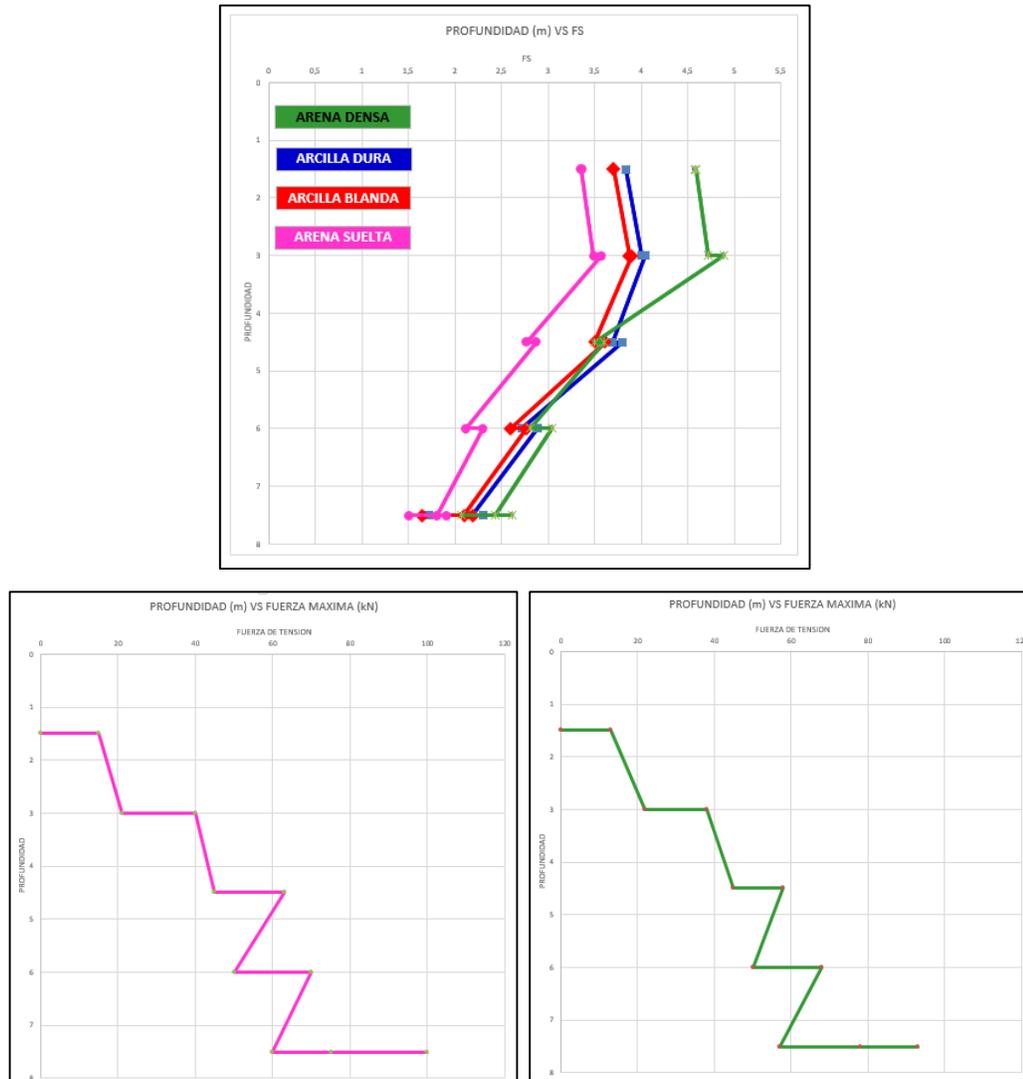
**Tabla 3-13 Comparación de los factores de seguridad en función de los parámetros geomecánicos del suelo para un muro de 7,50 m con espaciamientos de 1,50 x 1,50, mediante un análisis en RS2**

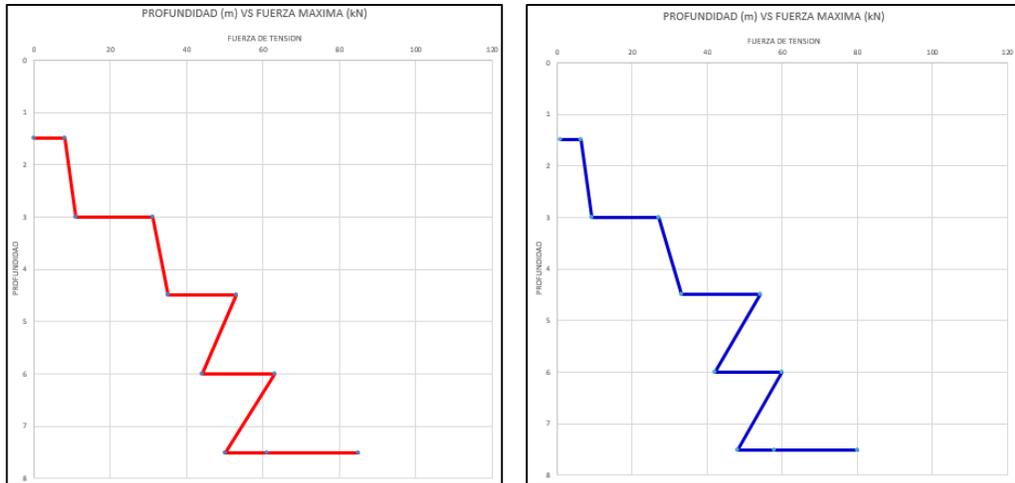
| SUELO         | $\phi'$ | % Variación | C' | % Variación | FS   | % Variación |
|---------------|---------|-------------|----|-------------|------|-------------|
| ARENA SUELTA  | 31      |             | 15 |             | 1,51 |             |
|               |         | 35%         |    | 0%     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

De la anterior tabla se puede observar que el parámetro de mayor incidencia en el factor de seguridad es el ángulo de fricción, el cual está directamente relacionado con la adherencia suelo-*nail*.

Existe una relación entre las propiedades del suelo y las fuerzas en los *nails*. A continuación se muestra cómo se relaciona esta interacción con el factor de seguridad. Para visualizar este aspecto se muestran los desarrollos de las fuerzas en la cabeza del *nail* y las fuerzas máximas en el *nail*, en un muro de 7,50 m de altura para los cuatro materiales que se estudiaron en la presente investigación. Se observó que los factores de seguridad son menores en las arenas sueltas, le siguen las arcillas blandas, después las arcillas duras y los factores de seguridad más altos son para arenas densas.

**Figura 3-3 Evolución de los factores de seguridad durante las etapas de construcción para un muro de 7,50 m con espaciamiento de 1,50 x 1,50 m, mediante un análisis en RS2, y su relación con las fuerzas máximas en los nails**



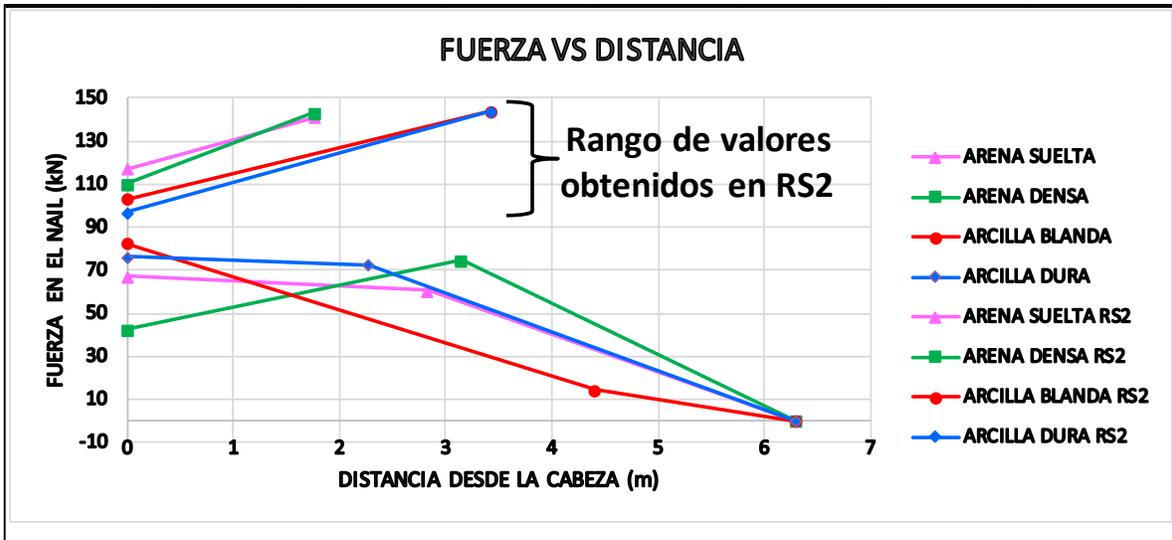


De la anterior gráfica se puede concluir que para los dos suelos arenosos son mayores las fuerzas en los *nails* que para los suelos arcillosos, independiente del factor de seguridad. Es decir, la relación entre la fuerza en el *nail* y el terreno depende principalmente del ángulo de fricción.

Otro aspecto importante en relación a la interacción suelo/*nail* es la fuerza en la cabeza del *nail*. En la tabla 3-14 se muestra la relación entre el factor de seguridad, el tipo de suelo y la fuerza en la cabeza del *nail*, a partir de los análisis realizados en el programa SNAP-2 para un muro de 9,0 m.

**Tabla 3-14 Relación entre las fuerzas en la cabeza del nail, el tipo de suelo y el factor de seguridad para un muro de 9,0 m, y espaciamientos de 1,5 x 1,5, mediante un análisis realizado en SNAP-2. En la parte inferior de la gráfica inferior se comparan los valores con los obtenidos en RS2**

| ANÁLISIS EN SNAP-2                          |             |   |             |   |             |   |             |
|---|-------------|---|-------------|---|-------------|---|-------------|
| ARENA SUELTA<br>FS=1,67                     |             | ARENA Densa<br>FS=2,29                      |             | ARCILLA BLANDA<br>FS=1,85                   |             | ARCILLA DURA<br>FS=2,0                      |             |
| DISTANCIA<br>A LA<br>CABEZA DEL<br>NAIL (m) | FUERZA (kN) |
| 0   | 67,2        | 0   | 42,3        | 0   | 82,6        | 0   | 76,4        |
| 2,83  | 60,5        | 3,15  | 74,7        | 4,41  | 14,5        | 2,27  | 72,5        |
| 6,3   | 0           | 6,3   | 0           | 6,3   | 0           | 6,3   | 0           |
| ANÁLISIS EN RS2                             |             |   |             |   |             |   |             |
| 0   | 117         | 0   | 110         | 0   | 103         | 0   | 97          |
| 1,76  | 141         | 1,76  | 143         | 3,43  | 144         | 3,43  | 144         |

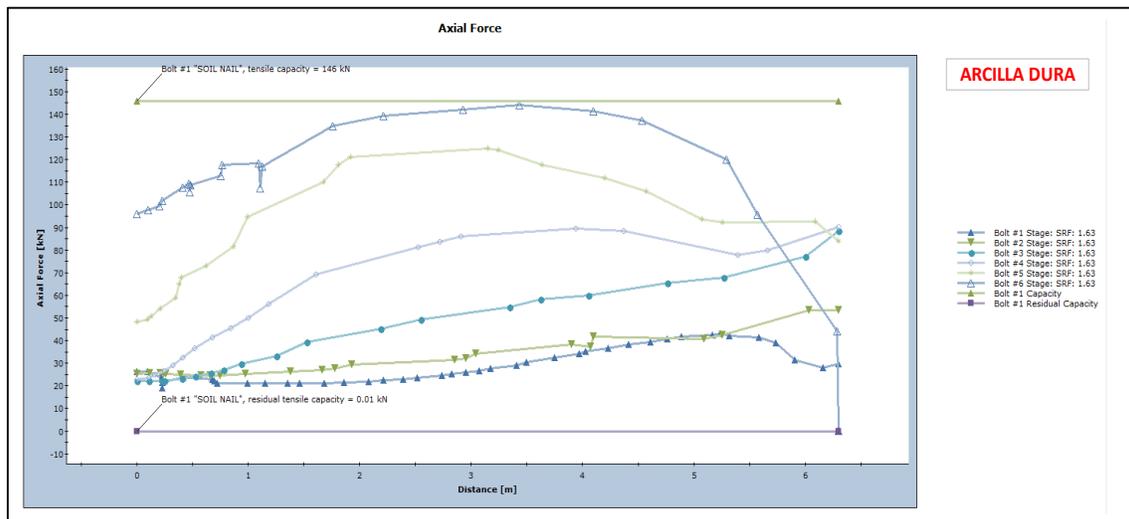


De la anterior tabla se puede concluir que en los análisis realizados en SNAP-2 las fuerzas en la cabeza son menores para los materiales arenosos y son mayores para las arcillas. Esto se debe a que las superficies potenciales de falla de los modelos mostrados no intersectan los *nails*, y por lo tanto la adherencia no tiene una influencia significativa en las fuerzas en la cabeza de los *nails*. La adherencia, también llamada resistencia al arrancamiento, se vuelve importante cuando las superficies potenciales de falla intersectan los *nails*, y la porción de *nail* que está detrás de la superficie de falla queda anclada al suelo que no está en movimiento.

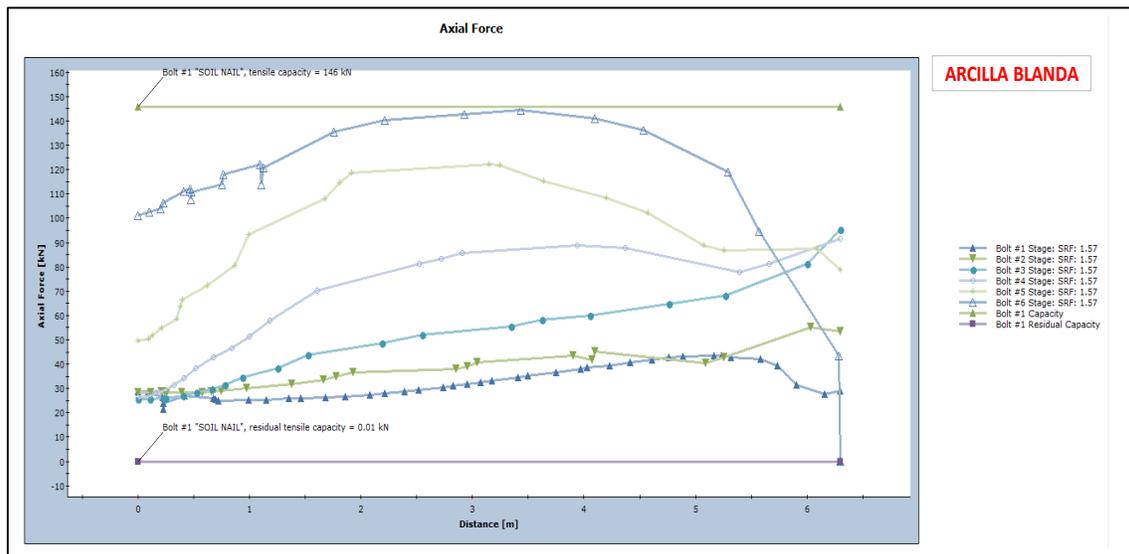
En los análisis con RS2 las fuerzas son mayores en la cabeza en materiales arenosos. Esto se debe a que en este caso el ángulo de fricción y por lo tanto la adherencia sí tienen una influencia significativa en la interacción entre el *nail* y el revestimiento.

En las figuras 3-4 a 3-7 se muestra la variación de las fuerzas de tensión en los *nails* para un muro de 9,0 m en los cuatro materiales estudiados, mediante un análisis en RS2.

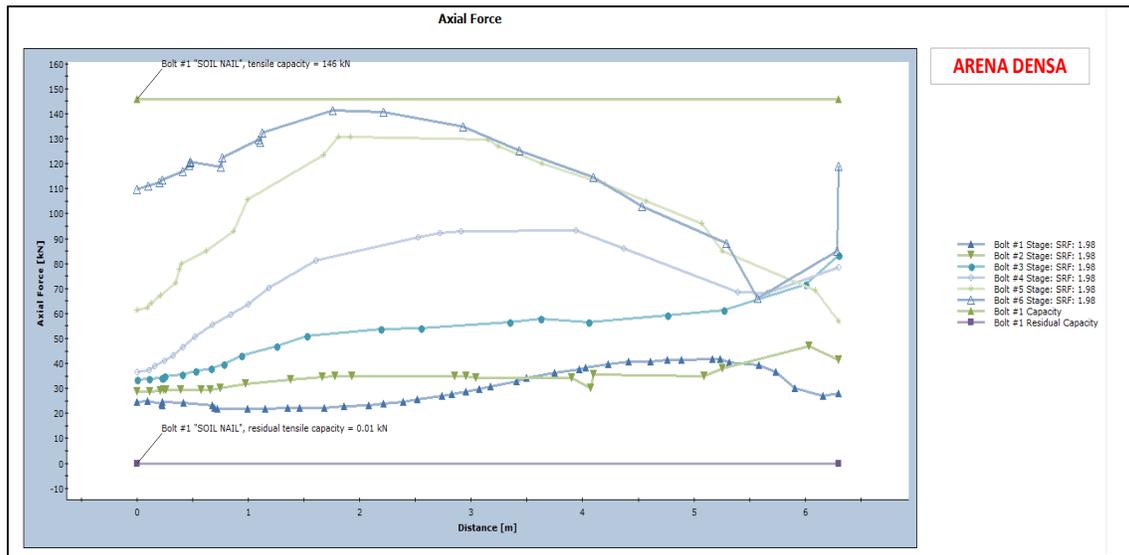
**Figura 3-4 Fuerzas de tensión en los nails para un muro de 9,0 m en arcilla dura con espaciamiento de 1,50 x 1,50 m, mediante un análisis en RS2**



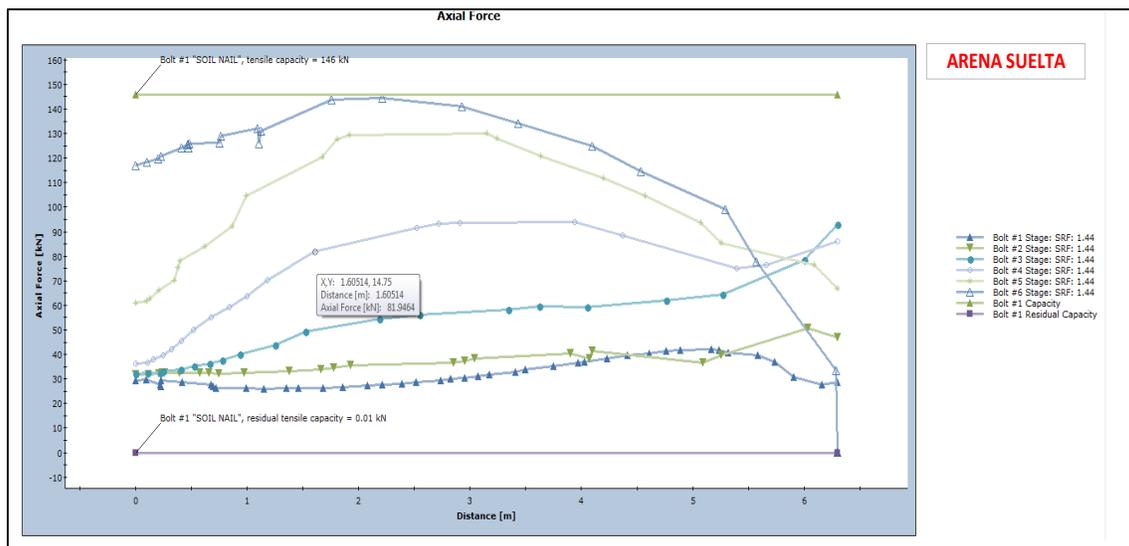
**Figura 3-5 Fuerzas de tensión en los nails para un muro de 9,0 m en arcilla blanda con espaciamiento de 1,50 x 1,50 m, mediante un análisis en RS2**



**Figura 3-6 Fuerzas de tensión en los nails para un muro de 9,0 m en arena densa con espaciamiento de 1,50 x 1,50 m, mediante un análisis en RS2**



**Figura 3-7 Fuerzas de tensión en los nails para un muro de 9,0 m en arena suelta con espaciamiento de 1,50 x 1,50 m, mediante un análisis en RS2**



En la tabla 3-15 y la figura 3-8 se muestra la variación de las fuerzas de tensión máximas en los nails para muros de 4,50 m, 6,0 m, 7,50 m y 9,0 m en los cuatro materiales estudiados para diferentes valores de sobrecarga.

**Tabla 3-15 Comparación de resultados de fuerzas máximas de los nails para diferentes sobrecargas, mediante un análisis en RS2**

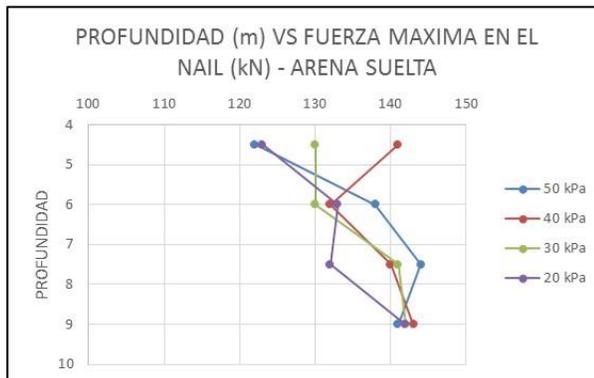
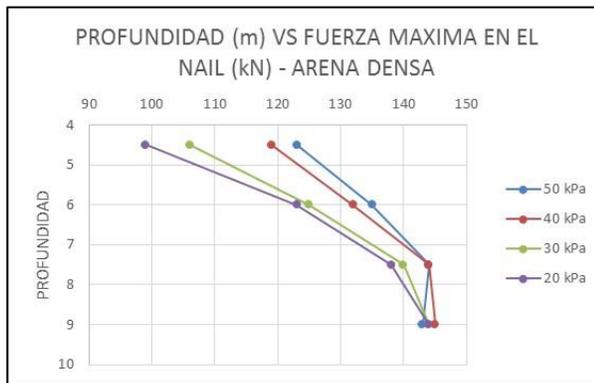
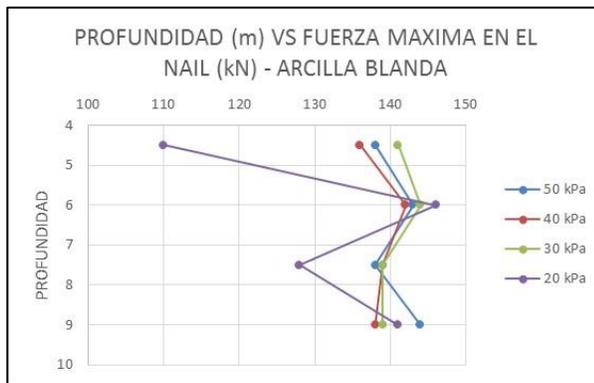
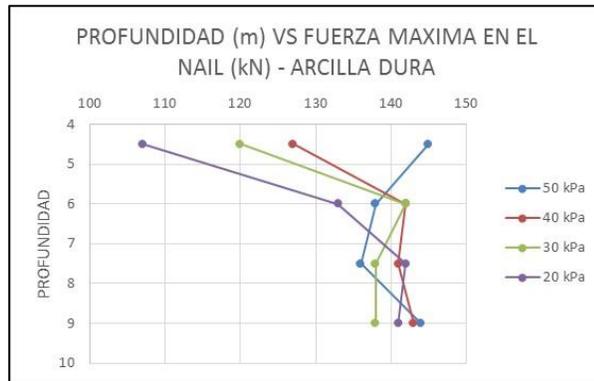
| <b>ARCILLA DURA</b>     |                         |            |            |            |
|-------------------------|-------------------------|------------|------------|------------|
| <b>H<sub>MURO</sub></b> | <b>SOBRECARGA (kPa)</b> |            |            |            |
|                         | <b>50</b>               | <b>40</b>  | <b>30</b>  | <b>20</b>  |
|                         | <b>FZA</b>              | <b>FZA</b> | <b>FZA</b> | <b>FZA</b> |
| 4,5                     | 145                     | 127        | 120        | 107        |
| 6                       | 138                     | 142        | 142        | 133        |
| 7,5                     | 136                     | 141        | 138        | 142        |
| 9                       | 144                     | 143        | 138        | 141        |

| <b>ARCILLA BLANDA</b>   |                         |            |            |            |
|-------------------------|-------------------------|------------|------------|------------|
| <b>H<sub>MURO</sub></b> | <b>SOBRECARGA (kPa)</b> |            |            |            |
|                         | <b>50</b>               | <b>40</b>  | <b>30</b>  | <b>20</b>  |
|                         | <b>FZA</b>              | <b>FZA</b> | <b>FZA</b> | <b>FZA</b> |
| 4,5                     | 138                     | 136        | 141        | 110        |
| 6                       | 143                     | 142        | 144        | 146        |
| 7,5                     | 138                     | 139        | 139        | 128        |
| 9                       | 144                     | 138        | 139        | 141        |

| <b>ARENA DENSA</b>      |                         |            |            |            |
|-------------------------|-------------------------|------------|------------|------------|
| <b>H<sub>MURO</sub></b> | <b>SOBRECARGA (kPa)</b> |            |            |            |
|                         | <b>50</b>               | <b>40</b>  | <b>30</b>  | <b>20</b>  |
|                         | <b>FZA</b>              | <b>FZA</b> | <b>FZA</b> | <b>FZA</b> |
| 4,5                     | 123                     | 119        | 106        | 99         |
| 6                       | 135                     | 132        | 125        | 123        |
| 7,5                     | 144                     | 144        | 140        | 138        |
| 9                       | 143                     | 145        | 144        | 144        |

| <b>ARENA SUELTA</b>     |                         |            |            |            |
|-------------------------|-------------------------|------------|------------|------------|
| <b>H<sub>MURO</sub></b> | <b>SOBRECARGA (kPa)</b> |            |            |            |
|                         | <b>50</b>               | <b>40</b>  | <b>30</b>  | <b>20</b>  |
|                         | <b>FZA</b>              | <b>FZA</b> | <b>FZA</b> | <b>FZA</b> |
| 4,5                     | 122                     | 141        | 130        | 123        |
| 6                       | 138                     | 132        | 130        | 133        |
| 7,5                     | 144                     | 140        | 141        | 132        |
| 9                       | 141                     | 143        | 142        | 142        |

**Figura 3-8 Comparación de resultados de fuerzas máximas de los nails para diferentes sobrecargas, mediante un análisis en RS2**



**Tabla 3-16 Comparación de resultados de fuerzas en la cabeza del nail y fuerzas máximas de los nails para diferentes longitudes de nail, mediante un análisis en RS2**

| ARENA DENSA                       |           |                      |           |                                     |           |                          |           |
|-----------------------------------|-----------|----------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|--------------------------|-----------|
| $H_{\text{muro}} = 9,0 \text{ m}$ | % AUMENTO | $FS_{\text{Global}}$ |           | Fuerza máxima en la cabeza del nail |           | Fuerza máxima en el nail |           |
|                                   |           | -                    | % Aumento | (kN)                                | % Aumento | (kN)                     | % Aumento |
| LONG NAIL = 6,30 m                | -         | 1,56                 | -         | 107                                 | -         | 146                      | -         |
| LONG NAIL = 9,0 m                 | 43%       | 1,78                 | 14%       | 113                                 | 6%        | 145                      | -0,68%    |
| LONG NAIL = 13,50 m               | 114%      | 2,05                 | 31%       | 125                                 | 17%       | 145                      | -0,68%    |

De las anteriores tablas y gráficas y de las modelaciones realizadas, se puede concluir lo siguiente:

- Las fuerzas de tensión a lo largo de los **nails** son dependientes del ángulo de fricción.
- Los **nails** instalados en las primeras etapas de construcción tienen factores de seguridad más altos que los **nails** instalados en las etapas finales. Por lo tanto, los diámetros de los **nails** 5 y 6 deben ser tales que cumplan con un adecuado factor de seguridad a la tensión.
- Las fuerzas máximas de tensión no se presentan en la cabeza del **nail**.
- Los revestimientos se deben diseñar para soportar las cargas inducidas por los **nails**.
- Para las mismas condiciones de sobrecarga y geometría, la longitud de los **nails** tiene una incidencia significativa sobre el factor de seguridad global.
- Para las mismas condiciones de sobrecarga y geometría, la longitud de los **nails** tiene una incidencia significativa sobre las fuerzas en la cabeza de los **nails**.
- Para las mismas condiciones de sobrecarga y geometría, la longitud de los **nails** tiene una incidencia mínima sobre las fuerzas máximas en los **nails**.
- A mayor profundidad, la sobrecarga tiene una menor influencia en las fuerzas de tensión en los **nails**.

### 3.2 Contribución del sistema de soil nailing en la estabilidad de un talud

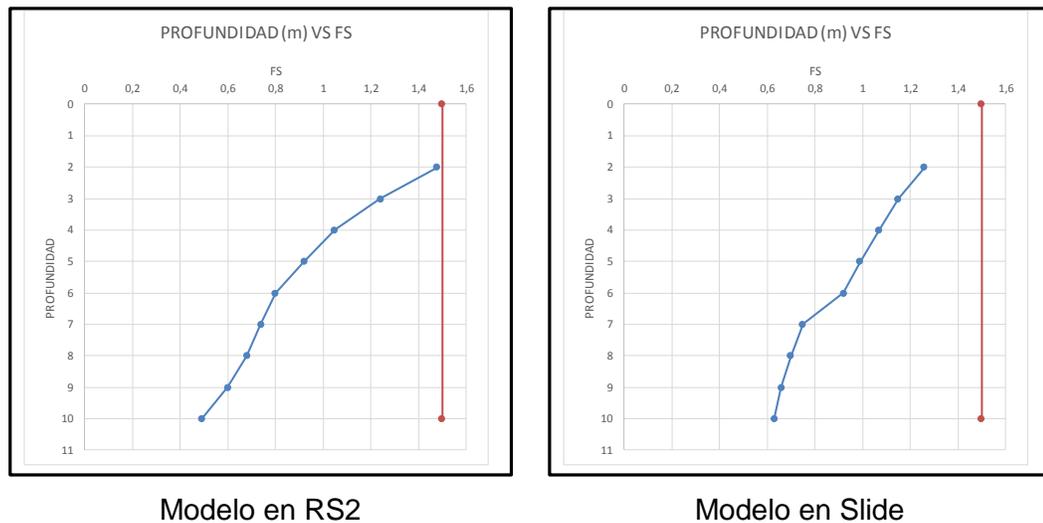
Para mostrar los resultados de la contribución del sistema de **soil nailing** a la estabilidad de un talud, se deben presentar los análisis sin el sistema y con el sistema.

#### 3.2.1 Análisis de los modelos sin el sistema de soil nailing

Se presenta en este numeral los resultados de las modelaciones en RS2 y Slide para las excavaciones, sin incluir el sistema de reforzamiento.

a) Arcillas duras RS2 VS Slide

**Figura 3-9 Comparación de los resultados del factor de seguridad obtenido en modelaciones en RS2 y Slide sin incluir el sistema, para arcillas duras**



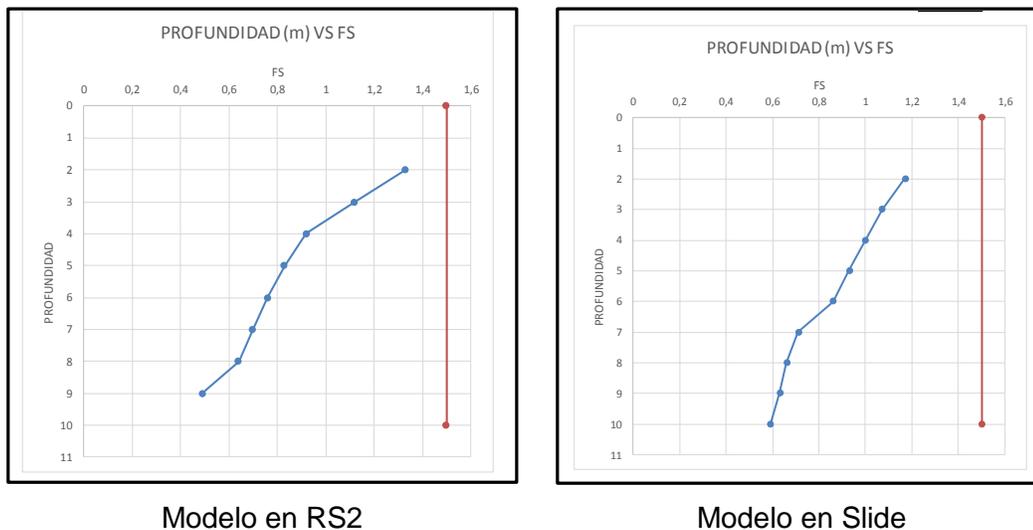
De la anterior gráfica se obtienen los siguientes resultados:

- Para el modelo en RS2 se observa que sin la implementación del sistema las excavaciones siempre tienen un FS menor de 1,50.
- Para el modelo en Slide se observa que sin la implementación del sistema las excavaciones siempre tienen un FS menor de 1,50.
- Se observa que el rango de variación de los factores de seguridad en las modelaciones con RS2 es mayor que en Slide para las mismas alturas de excavación. Esto debido a que los análisis por elementos finitos tienen un nivel de precisión mayor que los métodos de equilibrio límite.

- Para una excavación de 2,0 m el factor de seguridad en RS2 es un 20% mayor. Para una excavación de 10 m el factor de seguridad en Slide es un 38% mayor.

b) Arcillas blandas RS2 VS Slide

**Figura 3-10 Comparación de los resultados del factor de seguridad obtenido en modelaciones en RS2 y Slide sin incluir el sistema para arcillas blandas**



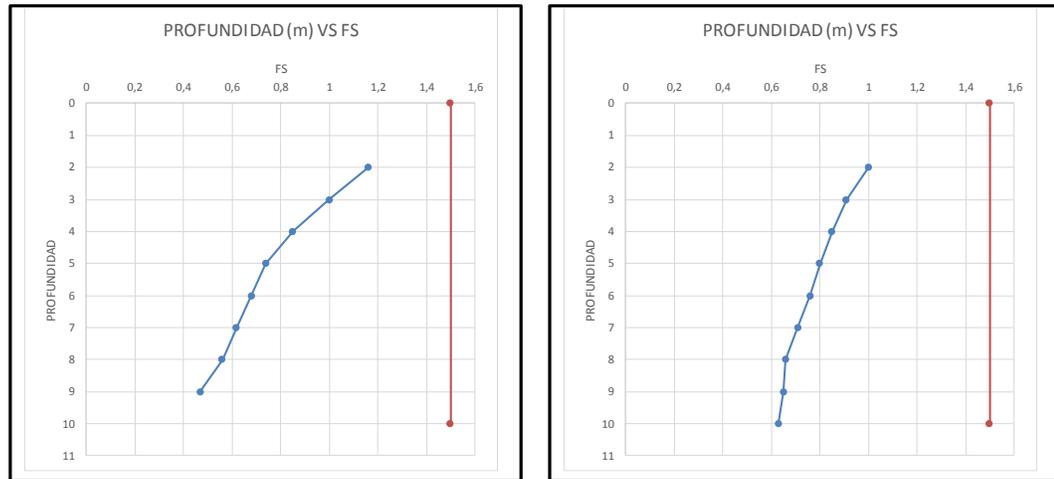
De la anterior gráfica se obtienen los siguientes resultados:

- Para el modelo en RS2 se observa que sin la implementación del sistema las excavaciones siempre tienen un FS menor de 1,50.
- Para el modelo en Slide se observa que sin la implementación del sistema las excavaciones siempre tienen un FS menor de 1,50.

Se observa que los factores de seguridad sin la inclusión del sistema son muy similares para arcillas duras y blandas tanto en la modelación con RS2 como con Slide.

c) Arenas densas RS2 VS Slide

**Figura 3-11 Comparación de los resultados del factor de seguridad obtenido en modelaciones en RS2 y Slide sin incluir el sistema para arenas densas**



Modelo en RS2

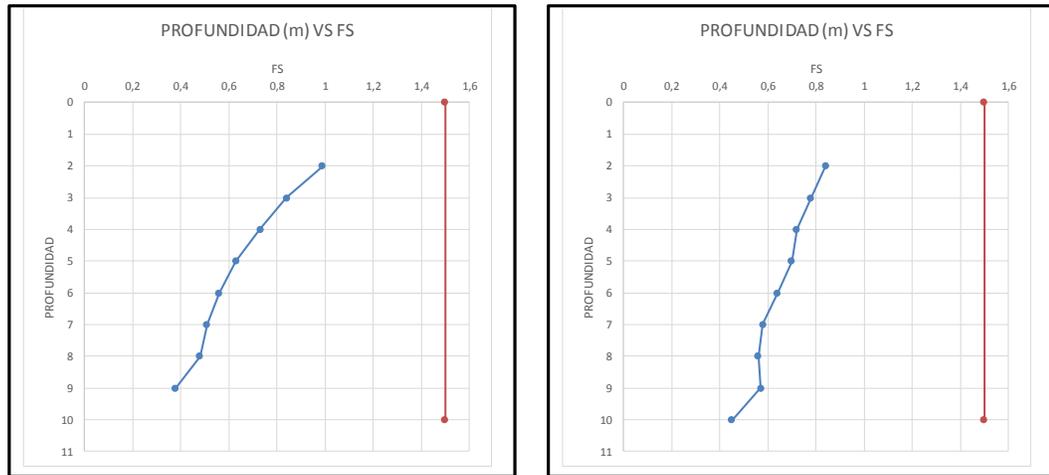
Modelo en Slide

De la anterior gráfica se obtienen los siguientes resultados:

- Para la modelación en RS2 se observa que sin la implementación del sistema las excavaciones siempre tienen un FS menor de 1,50.
- Para la modelación en Slide se observa que sin la implementación del sistema, las excavaciones siempre tienen un FS menor de 1,50.
- Se observa que el rango de variación de los factores de seguridad en las modelaciones con RS2 es mayor que en Slide para las mismas alturas de excavación. Esto debido a que los análisis por elementos finitos tienen un nivel de precisión mayor que los métodos de equilibrio límite.

d) Arenas sueltas RS2 VS Slide

**Figura 3-12 Comparación de los resultados del factor de seguridad obtenido en modelaciones en RS2 y Slide sin incluir el sistema para arenas sueltas**



Modelo en RS2

Modelo en Slide.

De la anterior gráfica se obtienen los siguientes resultados:

- Para la modelación en RS2 se observa que sin la implementación del sistema las excavaciones siempre tienen un FS menor de 1,50.
- Para el modelo en Slide se observa que todas las excavaciones siempre tienen un FS menor de 1,50.
- Se observa que los factores de seguridad sin la inclusión del sistema son más bajos para las arenas sueltas que para las densas, tanto en la modelación con RS2 como con Slide.

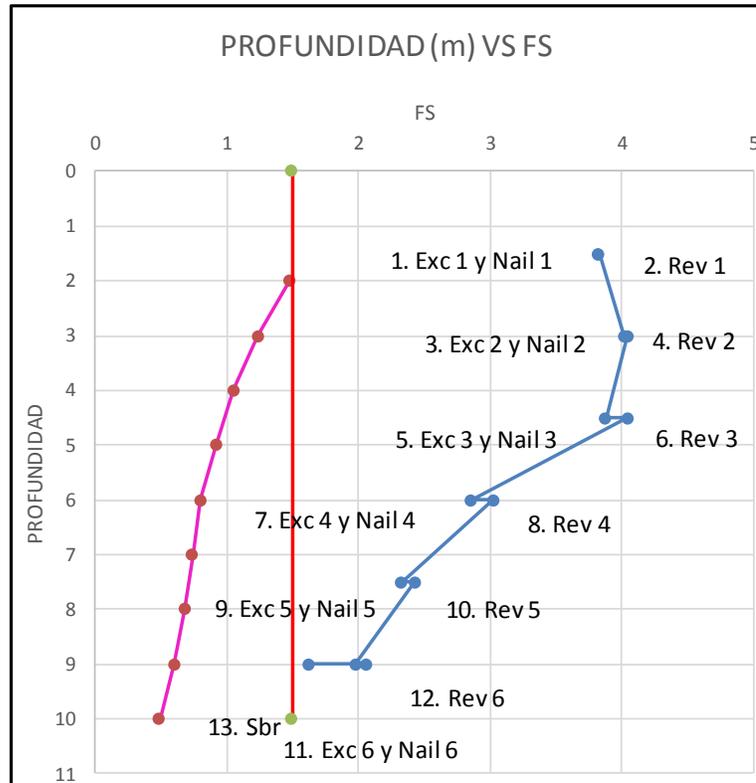
Se concluye de las anteriores gráficas que para excavaciones y taludes verticales y casi verticales sometidos a ciertas condiciones de carga estática, es imprescindible llevar a cabo el reforzamiento de los mismos mediante un sistema de **soil nailing**, ya sea utilizando un muro de **soil nail** o un refuerzo de **nails** sin revestimiento. Como se observa en la tabla 3-12, en ocasiones es posible instalar un sistema sin revestimiento para obtener factores de seguridad aceptables.

### 3.2.2 Análisis comparando modelos sin el sistema de soil nailing y modelos con el sistema

Se presenta en este numeral los resultados de las modelaciones en RS2, para las excavaciones con el sistema y sin incluir el sistema de reforzamiento.

- a) Arcillas duras RS2 sin sistema VS RS2 con sistema (1,5 x 1,5) para muro de H=9,0 m

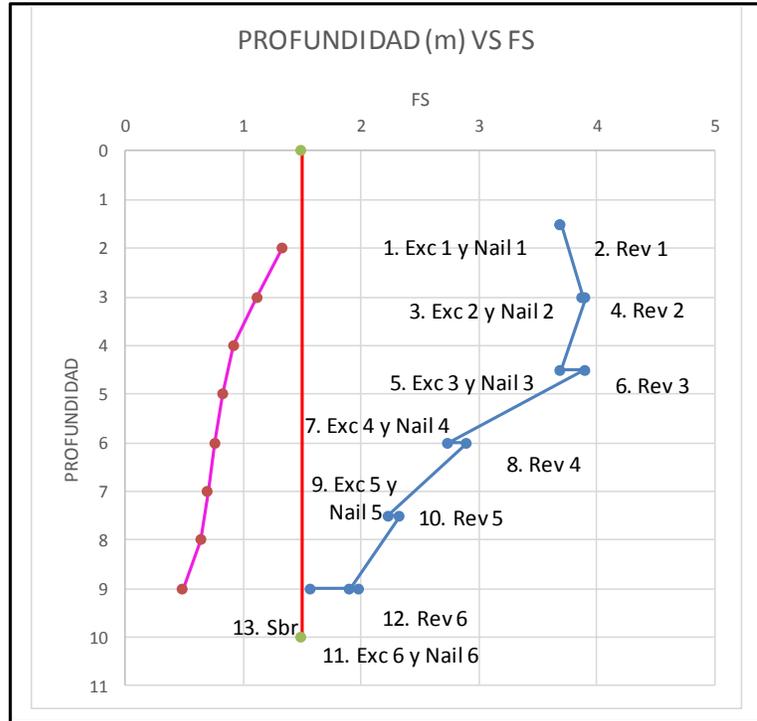
**Figura 3-13 Comparación de los resultados del factor de seguridad obtenido sin el sistema y con el sistema, para arcillas duras, mediante modelos en RS2**



En esta gráfica 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 se incluye el sistema de reforzamiento. En todas las etapas el FS está por encima de 1,50.

b) Arcillas blandas RS2 sin sistema VS RS2 con sistema (1,5 x 1,5) para muro de H=9,0 m

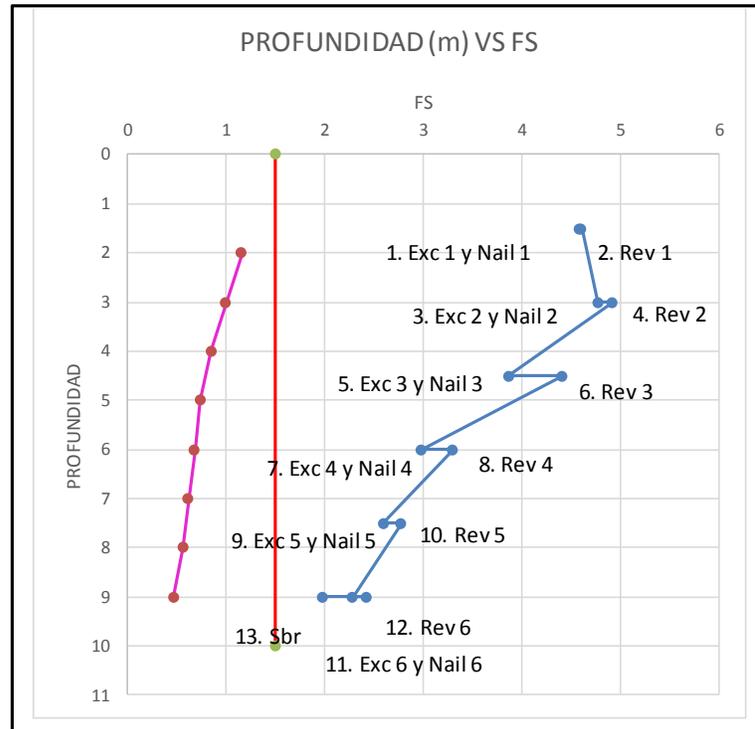
**Figura 3-14 Comparación de los resultados del factor de seguridad obtenido sin el sistema y con el sistema, para arcillas blandas, mediante modelos en RS2**



En esta gráfica 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 se incluye el sistema de reforzamiento. En todas las etapas el FS está por encima de 1,50.

c) Arenas densas RS2 sin sistema VS RS2 con sistema (1,5 x 1,5) para muro de H=9,0 m

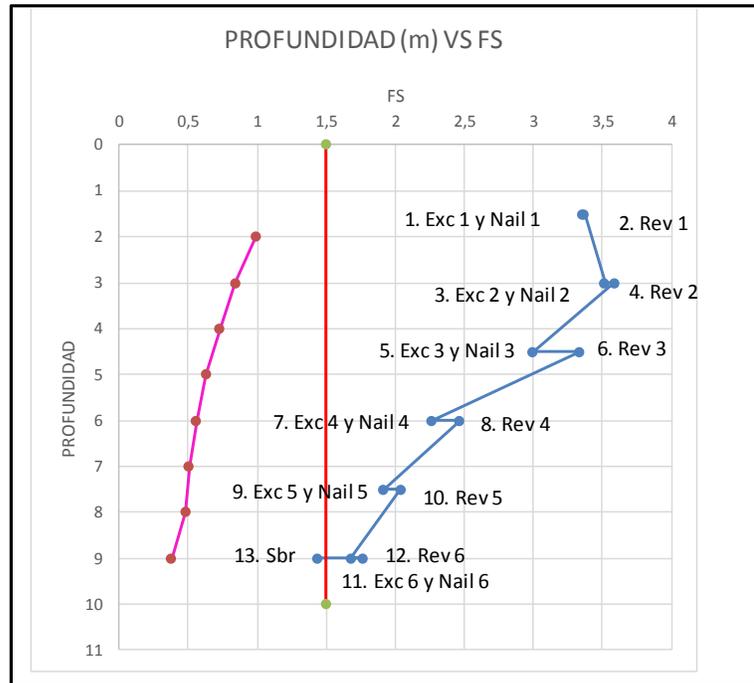
**Figura 3-15 Comparación de los resultados del factor de seguridad obtenido sin el sistema y con el sistema, para arenas densas, mediante modelos en RS2**



En esta gráfica 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 se incluye el sistema de reforzamiento. En todas las etapas el FS está por encima de 1,50.

d) Arenas sueltas RS2 sin sistema VS RS2 con sistema (1,5 x 1,5) para muro de H=9,0 m

**Figura 3-16 Comparación de los resultados del factor de seguridad obtenido sin el sistema y con el sistema, para arenas sueltas, mediante modelos en RS2**



En esta gráfica 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 se incluye el sistema de reforzamiento. En casi todas las etapas el FS está por encima de 1,50. En este caso al instalar la sobrecarga de 50 kPa el FS disminuye un poco por debajo de 1,50.

De las anteriores gráficas y los análisis realizados en diferentes alturas de muros, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Para excavaciones superiores a 2,0 m con condiciones de carga estática en el talud detrás del muro, se requiere utilizar el sistema.
- El revestimiento genera un aumento significativo del factor de seguridad global en cualquier etapa de construcción.
- En todos los casos en los que se hicieron las modelaciones, siempre se encontró que entre los 4,0 m y los 7,0 m de profundidad se presentaban reducciones significativas en el factor de seguridad global.

A continuación se presenta la tabla 3-17, donde se muestra el aumento porcentual del factor de seguridad al incluir el sistema.

**Tabla 3-17 Aumento del factor de seguridad global con la inclusión del sistema, mediante un análisis de RS2**

| <b>MATERIAL</b>  | <b>H<sub>MURO</sub> (m)</b> | <b>AUMENTO FS (%)</b> |
|------------------|-----------------------------|-----------------------|
| ARCILLAS DURAS   | 4,50                        | 190%                  |
| ARCILLAS DURAS   | 6,0                         | 175%                  |
| ARCILLAS DURAS   | 7,50                        | 175%                  |
| ARCILLAS DURAS   | 9,0                         | 160%                  |
| ARCILLAS BLANDAS | 4,50                        | 180%                  |
| ARCILLAS BLANDAS | 6,0                         | 175%                  |
| ARCILLAS BLANDAS | 7,50                        | 170%                  |
| ARCILLAS BLANDAS | 9,0                         | 150%                  |
| ARENAS DENSAS    | 4,50                        | 160%                  |
| ARENAS DENSAS    | 6,0                         | 150%                  |
| ARENAS DENSAS    | 7,50                        | 140%                  |
| ARENAS DENSAS    | 9,0                         | 130%                  |
| ARENAS SUELTAS   | 4,50                        | 170%                  |
| ARENAS SUELTAS   | 6,0                         | 160%                  |
| ARENAS SUELTAS   | 7,50                        | 150%                  |
| ARENAS SUELTAS   | 9,0                         | 140%                  |

### **3.2.3 Análisis comparando los modelos con el sistema para los tres tipos de modelaciones (RS2, Slide y SNAP-2)**

Se muestran los resultados de los factores de seguridad global para cada programa utilizado.

**Tabla 3-18 Comparación de resultados del factor de seguridad para modelos en RS2, Slide y SNAP-2, para muro de 4,50 m en arcilla dura**

H MURO: 4,5 METROS Separación: Sh=Sv=1,50 m hc=10 cm  
 MATERIAL: ARCILLA DURA  
 1. H4,5AD

| Etapa | Constr.              | RS 2           |      | SLIDE          |      | SNAP-2         |      |
|-------|----------------------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|
|       |                      | PROF. EXC. (m) | FS   | PROF. EXC. (m) | FS   | PROF. EXC. (m) | FS   |
| 1     | Exc 1 y nail 1 (1,5) | 1,5            | 3,83 | 1,5            | 3,63 | 1,5            | 3,8  |
| 2     | Revestimiento 1      | 1,5            | 3,83 | 1,5            | 3,63 | 1,5            | 3,8  |
| 3     | Exc 2 y nail 2 (3,0) | 3              | 3,99 | 3              | 3,92 | 3              | 4,07 |
| 4     | Revestimiento 2      | 3              | 4,03 | 3              | 3,92 | 3              | 4,07 |
| 5     | Exc 3 y nail 3 (4,5) | 4,5            | 3,24 | 4,5            | 1,28 | 4,5            | 4,23 |
| 6     | Revestimiento 3      | 4,5            | 3,58 | 4,5            | 2,68 | 4,5            | 4,23 |
| 7     | Sobrecarga           | 4,5            | 2,04 | 4,5            | 1,61 | 4,5            | 2,96 |

**Tabla 3-19 Comparación de resultados del factor de seguridad para modelos en RS2, Slide y SNAP-2, para muro de 6,0 m en arcilla dura**

H MURO: 6 METROS Separación: Sh=Sv=1,50 m hc= 10 cm  
 MATERIAL: ARCILLA DURA  
 1. H6AD

| Etapa | Constr.              | RS 2           |      | SLIDE          |      | SNAP-2         |      |
|-------|----------------------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|
|       |                      | PROF. EXC. (m) | FS   | PROF. EXC. (m) | FS   | PROF. EXC. (m) | FS   |
| 1     | Exc 1 y nail 1 (1,5) | 1,5            | 3,83 | 1,5            | 3,63 | 1,5            | 3,8  |
| 2     | Revestimiento 1      | 1,5            | 3,83 | 1,5            | 3,63 | 1,5            | 3,8  |
| 3     | Exc 2 y nail 2 (3,0) | 3              | 4    | 3              | 3,92 | 3              | 4,07 |
| 4     | Revestimiento 2      | 3              | 4,03 | 3              | 3,92 | 3              | 4,07 |
| 5     | Exc 3 y nail 3 (4,5) | 4,5            | 3,49 | 4,5            | 1,28 | 4,5            | 4,23 |
| 6     | Revestimiento 3      | 4,5            | 3,8  | 4,5            | 3,11 | 4,5            | 4,23 |
| 7     | Exc 4 y nail 4 (6,0) | 6              | 2,56 | 6              | 2,12 | 6              | 3,73 |
| 8     | Revestimiento 4      | 6              | 2,74 | 6              | 2,38 | 6              | 3,73 |
| 9     | Sobrecarga           | 6              | 1,85 | 6              | 1,49 | 6              | 2,79 |

**Tabla 3-20 Comparación de resultados del factor de seguridad para modelos en RS2, Slide y SNAP-2, para muro de 7,50 m en arcilla dura**

H MURO: 7.5 METROS Separación: Sh=Sv=1,50 m hc= 10 cm hc= 15 cm para Snap-2  
 MATERIAL: ARCILLA DURA  
 1. H7.5AD

| Etapa | Constr.              | RS 2           |      | SLIDE          |      | SNAP-2         |      |
|-------|----------------------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|
|       |                      | PROF. EXC. (m) | FS   | PROF. EXC. (m) | FS   | PROF. EXC. (m) | FS   |
| 1     | Exc 1 y nail 1 (1,5) | 1,5            | 3,83 | 1,5            | 3,64 | 1,5            | 3,8  |
| 2     | Revestimiento 1      | 1,5            | 3,83 | 1,5            | 3,63 | 1,5            | 3,8  |
| 3     | Exc 2 y nail 2 (3,0) | 3              | 4,01 | 3              | 3,92 | 3              | 4,07 |
| 4     | Revestimiento 2      | 3              | 4,04 | 3              | 3,92 | 3              | 4,07 |
| 5     | Exc 3 y nail 3 (4,5) | 4,5            | 3,69 | 4,5            | 1,28 | 4,5            | 4,23 |
| 6     | Revestimiento 3      | 4,5            | 3,8  | 4,5            | 3,44 | 4,5            | 4,23 |
| 7     | Exc 4 y nail 4 (6,0) | 6              | 2,72 | 6              | 2,25 | 6              | 3,73 |
| 8     | Revestimiento 4      | 6              | 2,89 | 6              | 2,54 | 6              | 3,73 |
| 9     | Exc 5 y nail 5 (7,5) | 7,5            | 2,19 | 7,5            | 0,97 | 7,5            | 2,78 |
| 10    | Revestimiento 5      | 7,5            | 2,3  | 7,5            | 2,07 | 7,5            | 2,78 |
| 11    | Sobrecarga           | 7,5            | 1,72 | 7,5            | 1,48 | 7,5            | 2,15 |

**Tabla 3-21 Comparación de resultados del factor de seguridad para modelos en RS2, Slide y SNAP-2, para muro de 9,0 m en arcilla dura**

H MURO: 9 METROS Separación: Sh=Sv=1,50 m hc= 10 cm hc= 15 cm para Snap-2  
 MATERIAL: ARCILLA DURA  
 1. H9AD

| Etapa | Constr.              | PROF. EXC.<br>(m) | RS 2 |                   | SLIDE |                   | SNAP-2 |  |
|-------|----------------------|-------------------|------|-------------------|-------|-------------------|--------|--|
|       |                      |                   | FS   | PROF. EXC.<br>(m) | FS    | PROF. EXC.<br>(m) | FS     |  |
| 1     | Exc 1 y nail 1 (1,5) | 1,5               | 3,83 | 1,5               | 3,65  | 1,5               | 3,8    |  |
| 2     | Revestimiento 1      | 1,5               | 3,83 | 1,5               | 3,65  | 1,5               | 3,8    |  |
| 3     | Exc 2 y nail 2 (3,0) | 3                 | 4,02 | 3                 | 3,92  | 3                 | 4,07   |  |
| 4     | Revestimiento 2      | 3                 | 4,05 | 3                 | 3,92  | 3                 | 4,07   |  |
| 5     | Exc 3 y nail 3 (4,5) | 4,5               | 3,88 | 4,5               | 3,72  | 4,5               | 4,23   |  |
| 6     | Revestimiento 3      | 4,5               | 4,05 | 4,5               | 4,17  | 4,5               | 4,23   |  |
| 7     | Exc 4 y nail 4 (6,0) | 6                 | 2,86 | 6                 | 1,12  | 6                 | 3,73   |  |
| 8     | Revestimiento 4      | 6                 | 3,03 | 6                 | 2,95  | 6                 | 3,73   |  |
| 9     | Exc 5 y nail 5 (7,5) | 7,5               | 2,33 | 7,5               | 0,91  | 7,5               | 2,77   |  |
| 10    | Revestimiento 5      | 7,5               | 2,43 | 7,5               | 2,38  | 7,5               | 2,77   |  |
| 11    | Exc 6 y nail 6 (9)   | 9                 | 1,98 | 9                 | 0,81  | 9                 | 2,56   |  |
| 12    | Revestimiento 6      | 9                 | 2,06 | 9                 | 1,75  | 9                 | 2,56   |  |
| 13    | Sobrecarga           | 9                 | 1,63 | 9                 | 1,5   | 9                 | 2      |  |

De las anteriores tablas y los análisis realizados en los diferentes materiales se obtienen las siguientes conclusiones:

- En general siempre se obtienen factores de seguridad más altos en SNAP-2. Esto tiene relación con la forma como el programa hace los análisis de equilibrio límite. Los círculos de falla para los cuales el programa calcula el factor de seguridad siempre tienen su centro por encima del **nail** más alto y a la izquierda del revestimiento del muro. Esto limita la búsqueda de las superficies de falla más críticas.
- El programa SNAP-2 permite verificar de forma sencilla los espesores de revestimientos mínimos requeridos, ya que se pueden revisar las cargas que el revestimiento puede resistir sin fallar, antes de hacer la corrida del programa. Esto debido a que el programa internamente ya incluye los métodos de diseño estructural del revestimiento. Para el diseño, el programa utiliza el método de esfuerzos admisibles.
- Los factores de seguridad más bajos siempre se obtienen en el programa Slide. Además en dicho programa no es fácil de modelar el revestimiento, ya que no cuenta con esta opción, por lo cual se deben definir las propiedades y geometría de un material equivalente. Para esto se deben asumir valores conservativos de cohesión y ángulo de fricción del material de revestimiento, tal y como se hizo en la presente investigación.

- El programa RS2 permite determinar los valores de deformaciones cortantes y volumétricas, desplazamientos horizontales, verticales y totales, zonas plastificadas y otros datos de interés en el análisis.
- Con las tres verificaciones, se puede concluir que los programas son confiables para modelar los sistemas de **soil nailing**. Sin embargo, en ocasiones los valores que se obtienen en Slide son demasiado conservativos, por lo que sería mejor utilizar el SNAP-2, ya que tiene varias ventajas respecto al Slide. Adicionalmente, el programa SNAP-2 es de uso libre y no requiere de una licencia para su utilización.

### 3.2.4 Análisis comparando los resultados modificando el valor de la sobrecarga en modelos RS2

Se muestran los resultados de los factores de seguridad global para cada valor de sobrecarga utilizada.

**Tabla 3-22 Comparación de resultados del factor de seguridad para modelos en RS2, modificando el valor de la sobrecarga**

| ARCILLA DURA      |                  |      |      |      |
|-------------------|------------------|------|------|------|
| H <sub>MURO</sub> | SOBRECARGA (kPa) |      |      |      |
|                   | 50               | 40   | 30   | 20   |
|                   | FSG              | FSG  | FSG  | FSG  |
| 4,5               | 2,04             | 2,25 | 2,47 | 2,75 |
| 6                 | 1,85             | 1,98 | 2,13 | 2,3  |
| 7,5               | 1,72             | 1,82 | 1,91 | 2,02 |
| 9                 | 1,63             | 1,7  | 1,78 | 1,88 |

| ARCILLA BLANDA    |                  |      |      |      |
|-------------------|------------------|------|------|------|
| H <sub>MURO</sub> | SOBRECARGA (kPa) |      |      |      |
|                   | 50               | 40   | 30   | 20   |
|                   | FSG              | FSG  | FSG  | FSG  |
| 4,5               | 1,93             | 2,15 | 2,36 | 2,63 |
| 6                 | 1,76             | 1,9  | 2,03 | 2,21 |
| 7,5               | 1,72             | 1,73 | 1,84 | 1,95 |
| 9                 | 1,63             | 1,63 | 1,71 | 1,81 |

| ARENA DENSA       |                  |      |      |      |
|-------------------|------------------|------|------|------|
| H <sub>MURO</sub> | SOBRECARGA (kPa) |      |      |      |
|                   | 50               | 40   | 30   | 20   |
|                   | FSG              | FSG  | FSG  | FSG  |
| 4,5               | 2,28             | 2,37 | 2,5  | 2,67 |
| 6                 | 2,17             | 2,25 | 2,35 | 2,48 |
| 7,5               | 2,07             | 2,16 | 2,25 | 2,36 |
| 9                 | 1,98             | 2,06 | 2,14 | 2,23 |

| ARENA SUELTA      |                  |      |      |      |
|-------------------|------------------|------|------|------|
| H <sub>MURO</sub> | SOBRECARGA (kPa) |      |      |      |
|                   | 50               | 40   | 30   | 20   |
|                   | FSG              | FSG  | FSG  | FSG  |
| 4,5               | 1,7              | 1,78 | 1,89 | 2,24 |
| 6                 | 1,59             | 1,66 | 1,74 | 1,84 |
| 7,5               | 1,51             | 1,57 | 1,65 | 1,72 |
| 9                 | 1,44             | 1,49 | 1,55 | 1,62 |

En las siguientes gráficas se presentan los factores de seguridad de diseño para los cuatro materiales y las distintas sobrecargas.

**Figura 3-17 Gráficas de los factores de seguridad para los cuatro materiales estudiados y las distintas sobrecargas**





De las anteriores gráficas y tablas, se concluye que la sobrecarga tiene una influencia significativa en el factor de seguridad global.

- La sobrecarga tiene una influencia significativa en el FS, especialmente en los muros de menor altura.
- Los desplazamientos máximos son mayores en los muros de menor altura, debido al efecto de la sobrecarga. De igual manera en estos hay un mayor número de elementos plastificados.
- En general para casi todas las alturas de muro el FS más alto siempre es el de arena densa y el más bajo es el de arena suelta.
- A medida que disminuye la sobrecarga aumenta el FS.
- La variación del FS es aproximadamente lineal con la altura del muro, especialmente en los suelos arenosos.
- En los muros de menor altura el efecto de la sobrecarga es mayor.
- La variación del FS con la profundidad es mayor en los suelos arcillosos.

### **3.3 Contribución del revestimiento temporal y permanente al sostenimiento de una excavación**

Como ya se demostró en los anteriores numerales, el revestimiento tiene una importancia fundamental en el sostenimiento de excavaciones. No obstante, se presentan en este numeral los resultados de diferentes modelos que permiten verificar la contribución del revestimiento tanto temporal como permanente a la estabilidad.

#### **3.3.1 Análisis comparando un modelo con revestimiento temporal y un modelo sin revestimiento temporal**

Se presentan los resultados para un modelo en un muro de 9,0 m en arena suelta, en el cual se comparan los resultados del factor de seguridad, deformaciones, desplazamientos, fuerzas en los *nails*, etc.

**Tabla 3-23 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          | MAX DEF CORTANTE | MAX DESPL. HORIZONTAL (m) | MAX DESPL. VERTICAL (m) | MAX DESPL. TOTAL (m) | MAX DEF. VOLUMETRIC A | FUERZA NAIL 1 (kN) | FUERZA MAX NAIL (kN) |
|--------------------------|-------------|------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|
| <b>Con revestimiento</b> | 1,44        | 0,025            | 0,00841                   | 0,00824                 | 0,0101               | 0,00131               | 28                 | 117                  |
| <b>Sin revestimiento</b> | 1,15        | 0,045            | 0,02315                   | 0,02386                 | 0,0332               | 0,00150               | 3                  | 7                    |
| <b>% de variación</b>    | <b>-20%</b> | <b>80%</b>       | <b>175%</b>               | <b>190%</b>             | <b>229%</b>          | <b>15%</b>            | <b>-89%</b>        | <b>-94%</b>          |

De la anterior tabla se puede observar la importancia que tiene el revestimiento temporal en diferentes parámetros de comportamiento del muro de *soil nail*. Para el caso puntual analizado, se observa de acuerdo a los resultados en el FS que se requiere la contribución del revestimiento.

### **3.3.2 Análisis de sensibilidad variando el espesor de revestimiento temporal de un modelo en arena suelta, mediante un análisis en SNAP-2**

Se presentan los resultados para un modelo en un muro de 9,0 m en arena suelta, en el cual se comparan los resultados de diferentes parámetros al aumentar o disminuir el espesor del revestimiento temporal.

**Tabla 3-24 Comparación de resultados de diferentes variables para un muro de 9,0 m en arena suelta con diferentes espesores de revestimiento temporal, mediante un análisis en SNAP-2**

| Parámetro   | Original | Modificado (Disminución) | %Variación | Modificado (Aumento) | %Variación |
|---|----------|--------------------------|------------|----------------------|------------|
| Espesor del revestimiento (mm)                            | 100      | 50                       | -50%       | 200                  | 100%       |
| Fza en Cabeza nail (kN)                                   | 47       | 23                       | -51%       | 71                   | 50%        |
| Resistencia admisible en la cabeza del nail               | 46       | 22                       | -52%       | 70                   | 52%        |
| Resistencia del concreto al punzonamiento (kN)            | 167      | 70                       | -58%       | 292                  | 75%        |
| Resistencia disponible a la flexión en la cabeza (kN)     | 46       | 22                       | -52%       | 70                   | 52%        |
| Resistencia disponible al punzonamiento en la cabeza (kN) | 141      | 55                       | -61%       | 268                  | 90%        |
| Factor de seguridad en etapas intermedias (etapa 9)       | 2,24     | 1,94                     | -13%       | 2,14                 | -4,5%      |
| Factor de seguridad en la etapa final                     | 1,81     | 1,81                     | 0%         | 1,81                 | 0%         |

De la anterior tabla se concluye que el espesor del revestimiento temporal tiene importancia en el comportamiento general del sistema, mas no en el factor de seguridad global. El programa SNAP-2 permite verificar todos los parámetros de

resistencia del revestimiento y de los **nails** antes de realizar la corrida, de tal manera que estos se puedan modificar.

### 3.3.3 Análisis de sensibilidad incluyendo el revestimiento definitivo de un modelo en arena suelta, mediante un análisis en SNAP-2

Se presentan los resultados para un modelo en un muro de 9,0 m en arena suelta, en el cual se comparan los resultados de los diferentes parámetros al incluir el revestimiento definitivo.

**Tabla 3-25 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 |
|---|------------------------------|------------------------------|----------------|
| Fza Cabeza nail (kN)                                      | 47                           | 47                           | 0%             |
| Resistencia admisible en la cabeza del nail               | 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%             |

De la anterior tabla, se puede concluir que el revestimiento definitivo no tiene incidencia en el comportamiento del sistema. Este revestimiento se instala para prolongar la vida útil del mismo y proteger los diferentes componentes de la corrosión, cambios de temperatura y todo tipo de condiciones ambientales variables en el largo plazo. 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 el mismo. De igual manera el terreno transmite

carga en la parte posterior del revestimiento temporal, que generan momentos flexionantes.

### 3.3.4 Análisis comparativo de cortante y momento en el revestimiento de los modelos, para análisis en RS2 y SNAP-2

Se presentan los resultados para los modelos en los muros desde 4,50 m hasta 9,0 m en los cuatro materiales estudiados.

**Tabla 3-26 Comparación de resultados de valores máximos de cortante y momento para todos los muros, mediante análisis en SNAP-2 y RS2**

| MATERIAL          | H <sub>MURO</sub><br>(m) | Cortante<br>(N)<br>SNAP2 | Cortante<br>(N)<br>RS2 | Momento<br>(N-m)<br>SNAP2 | Momento<br>(N-m)<br>RS2 |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|
| ARCILLA<br>DURA   | 4,50                     | 7397                     | -37792                 | 1831                      | -9498                   |
| ARCILLA<br>DURA   | 6,0                      | 9862                     | -41033                 | 2441                      | -9063                   |
| ARCILLA<br>DURA   | 7,50                     | 12328                    | -41740                 | 3051                      | -9090                   |
| ARCILLA<br>DURA   | 9,0                      | 14793                    | -49963                 | 3661                      | -12158                  |
| ARCILLA<br>BLANDA | 4,50                     | 7236                     | -37261                 | 1791                      | -9380                   |
| ARCILLA<br>BLANDA | 6,0                      | 9648                     | -42644                 | 2388                      | -9872                   |
| ARCILLA<br>BLANDA | 7,50                     | 12060                    | -44396                 | 2985                      | -10049                  |
| ARCILLA<br>BLANDA | 9,0                      | 14472                    | -52537                 | 3582                      | -13064                  |
| ARENA<br>DENSA    | 4,50                     | 4023                     | -38606                 | 996                       | -9948                   |
| ARENA<br>DENSA    | 6,0                      | 5365                     | -47249                 | 1328                      | -11559                  |
| ARENA<br>DENSA    | 7,50                     | 6706                     | -48414                 | 1660                      | -11572                  |
| ARENA<br>DENSA    | 9,0                      | 8047                     | -57538                 | 1992                      | -14487                  |

|                 |      |       |        |      |        |
|-----------------|------|-------|--------|------|--------|
| ARENA<br>SUELTA | 4,50 | 6742  | -38265 | 1669 | -10051 |
| ARENA<br>SUELTA | 6,0  | 8990  | -49587 | 2225 | -12572 |
| ARENA<br>SUELTA | 7,50 | 11237 | -52450 | 2781 | -12833 |
| ARENA<br>SUELTA | 9,0  | 13485 | -60265 | 3337 | -15585 |

Como se observa de la anterior tabla, los valores obtenidos por elementos finitos son muy distintos de los valores obtenidos por SNAP-2. Además de esto también se encontró que a diferencia de los modelos en SNAP-2, en los modelos de RS2 el factor de seguridad a flexión en el concreto en todos los casos estaba por debajo de 1,50 o incluso por debajo de 1,0, por lo que en estos análisis se requiere utilizar un revestimiento de mayor espesor. También se encontró en la mayoría de casos que las fuerzas de tensión más grandes que afectan el revestimiento se localizan en el *nail* más bajo. Se encontró también en los análisis con RS2 que entre más rígido es el revestimiento, las fuerzas de tensión son mayores. Para analizar esta condición se hizo un análisis de sensibilidad del revestimiento, modificando diferentes parámetros en RS2. El resultado del análisis se presenta en la siguiente tabla.

**Tabla 3-27 Análisis de sensibilidad mediante el programa RS2 para determinar causas de la diferencia con SNAP-2 en la fuerzas en el revestimiento**

| MATERIAL       | H <sub>muro</sub> (m) | ESPESOR (cm) SNAP-2 | FS <sub>Revestimiento</sub> | FS <sub>Revestimiento PARA REVEST CONTINUO</sub> | FS <sub>Revestimiento PARA REVEST 15 cm</sub> | FS <sub>Revestimiento PARA REVEST CONTINUO 15 cm</sub> | FALLA                  |
|----------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|--|---|--|------------------------|
| ARCILLA DURA   | 4,5                   | 10                  | < 1,50                      |  |   |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARCILLA DURA   | 6                     | 10                  | < 1,50                      |  |   |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARCILLA DURA   | 7,5                   | 15                  | < 1,50                      |  |   |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARCILLA DURA   | 9                     | 15                  | < 1,50                      | < 1,50   |   | < 1,50   | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARCILLA BLANDA | 4,5                   | 10                  | < 1,50                      |  |   |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARCILLA BLANDA | 6                     | 10                  | < 1,50                      |  |   |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARCILLA BLANDA | 7,5                   | 15                  | < 1,50                      |  |   |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARCILLA BLANDA | 9                     | 15                  | < 1,50                      |  |   |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARENA DENSA    | 4,5                   | 10                  | < 1,50                      |  |   |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARENA DENSA    | 6                     | 10                  | < 1,50                      |  |   |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARENA DENSA    | 7,5                   | 10                  | < 1,50                      |  |   |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARENA DENSA    | 9                     | 10                  | < 1,50                      | < 1,50   |   | < 1,50   | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARENA SUELTA   | 4,5                   | 10                  |                             |  |   |  |                        |
| ARENA SUELTA   | 6                     | 10                  |                             |  |   |  |                        |
| ARENA SUELTA   | 7,5                   | 15                  |                             |  |   |  |                        |
| ARENA SUELTA   | 9                     | 16                  | < 1,50                      | < 1,50   | < 1,50  | < 1,50   | FLEXION EN EL CONCRETO |

| MATERIAL       | H <sub>muro</sub> (m) | ESPESOR (cm) SNAP-2 | FS <sub>Revestimiento</sub> | FS <sub>Revestimiento PARA REVEST CONTINUO 15 cm Espaciamiento fuera del plano 1,50 m</sub> | FS <sub>Revestimiento PARA REVEST CONTINUO 15 cm Espaciamiento fuera del plano 1,0 (original) m y aumento refuerzo malla</sub> | FS <sub>Revestimiento PARA REVEST CONTINUO 15 cm Espaciamiento fuera del plano 1,50 m y aumento refuerzo malla</sub> | FALLA                  |
|----------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|---|--|--|------------------------|
| ARCILLA DURA   | 4,5                   | 10                  | < 1,50                      |   |  |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARCILLA DURA   | 6                     | 10                  | < 1,50                      |   |  |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARCILLA DURA   | 7,5                   | 15                  | < 1,50                      |   |  |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARCILLA DURA   | 9                     | 15                  | < 1,50                      |   |  |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARCILLA BLANDA | 4,5                   | 10                  | < 1,50                      |   |  |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARCILLA BLANDA | 6                     | 10                  | < 1,50                      |   |  |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARCILLA BLANDA | 7,5                   | 15                  | < 1,50                      |   |  |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARCILLA BLANDA | 9                     | 15                  | < 1,50                      |   |  |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARENA DENSA    | 4,5                   | 10                  | < 1,50                      |   |  |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARENA DENSA    | 6                     | 10                  | < 1,50                      |   |  |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARENA DENSA    | 7,5                   | 10                  | < 1,50                      |   |  |  | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARENA DENSA    | 9                     | 10                  | < 1,50                      | < 1,50  | < 1,50   | < 1,50   | FLEXION EN EL CONCRETO |
| ARENA SUELTA   | 4,5                   | 10                  |                             |   |  |  |                        |
| ARENA SUELTA   | 6                     | 10                  |                             |   |  |  |                        |
| ARENA SUELTA   | 7,5                   | 15                  |                             |   |  |  |                        |
| ARENA SUELTA   | 9                     | 16                  | < 1,50                      |   |  |  | FLEXION EN EL CONCRETO |

En los anteriores análisis se realizaron diferentes variaciones a los modelos, para verificar si había cambios sustanciales en las fuerzas de los *nails*, y por ende en las fuerzas sobre el revestimiento. Las siguientes son las modificaciones:

- Tipo de revestimiento: En los modelos originales el revestimiento es por etapas, sin embargo en este análisis se colocó revestimiento continuo, para modelar un revestimiento con continuidad estructural.
- Aumento del espesor del revestimiento: Para todos los modelos se aumentó el espesor del revestimiento a 15 cm.

- Se aumentó el espaciamiento fuera del plano: Se aumentó a 1,50 m. Sin embargo, las fuerzas en los **nails** no disminuyeron de forma significativa.
- Se aumentó el refuerzo en la malla: Al aumentar la rigidez en el revestimiento, aumentaron las fuerzas en los **nails**.
- Se modificó el diámetro del **nail**: Al disminuir el diámetro del **nail**, disminuyeron las fuerzas en los **nails** y por tanto en el revestimiento. Sin embargo, el factor de seguridad global también disminuyó de forma significativa.

A pesar de este análisis, no fue posible establecer la causa de las diferencias de los resultados en las fuerzas de los **nails** y el factor de seguridad en el concreto del revestimiento. No obstante estos resultados, en la tabla 3-30 se presenta la metodología de diseño estructural que permite verificar la resistencia del revestimiento a fuerzas cortantes y punzonamiento.

### 3.3.5 Análisis comparativo de fuerzas de tensión en la cabeza del nail para diferentes sobrecargas

Estos resultados son importantes porque permiten observar el efecto de la sobrecarga en el revestimiento.

**Tabla 3-28 Comparación de resultados de fuerzas en la cabeza de los nails para diferentes sobrecargas, mediante un análisis en RS2**

| ARCILLA DURA      |                  |     |     |     |
|-------------------|------------------|-----|-----|-----|
| H <sub>MURO</sub> | SOBRECARGA (kPa) |     |     |     |
|                   | 50               | 40  | 30  | 20  |
|                   | FZA              | FZA | FZA | FZA |
| 4,5               | 74               | 67  | 62  | 56  |
| 6                 | 77               | 74  | 68  | 62  |
| 7,5               | 82               | 75  | 70  | 67  |
| 9                 | 97               | 92  | 86  | 83  |

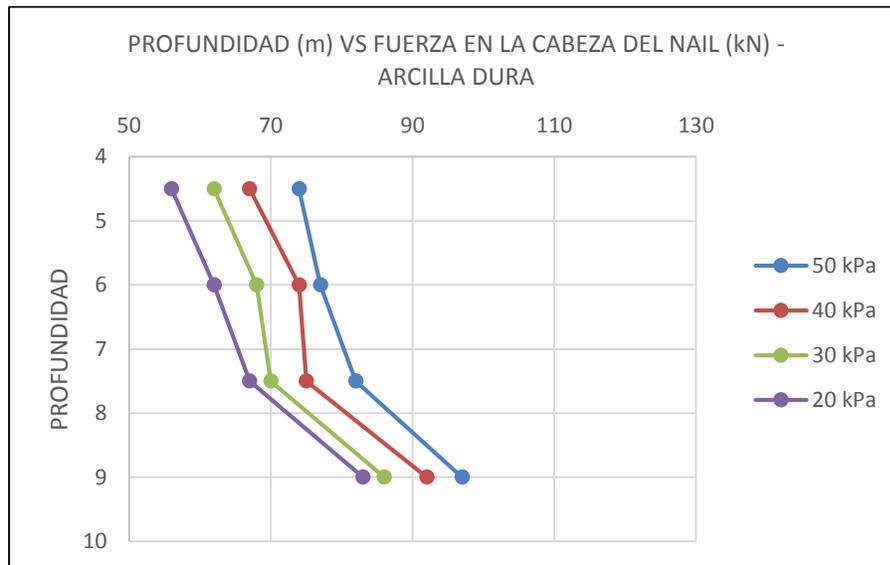
  

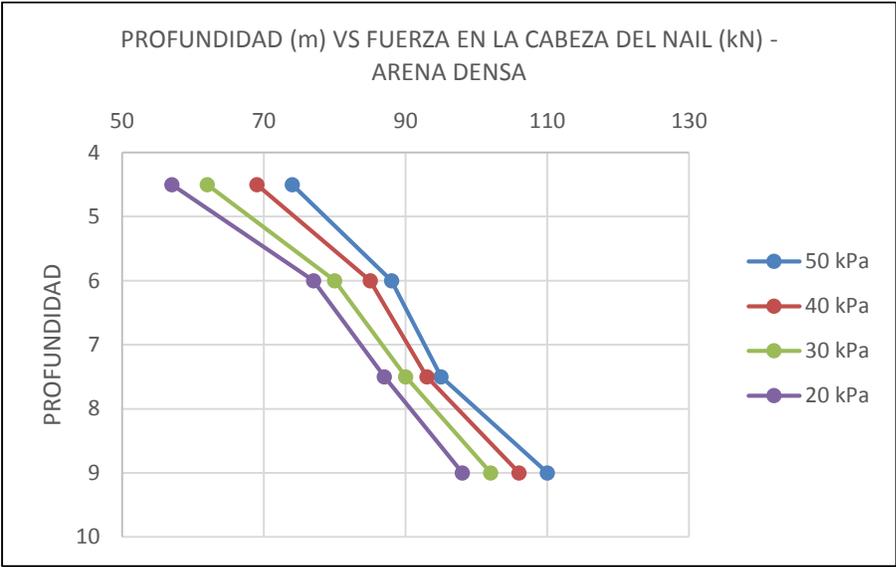
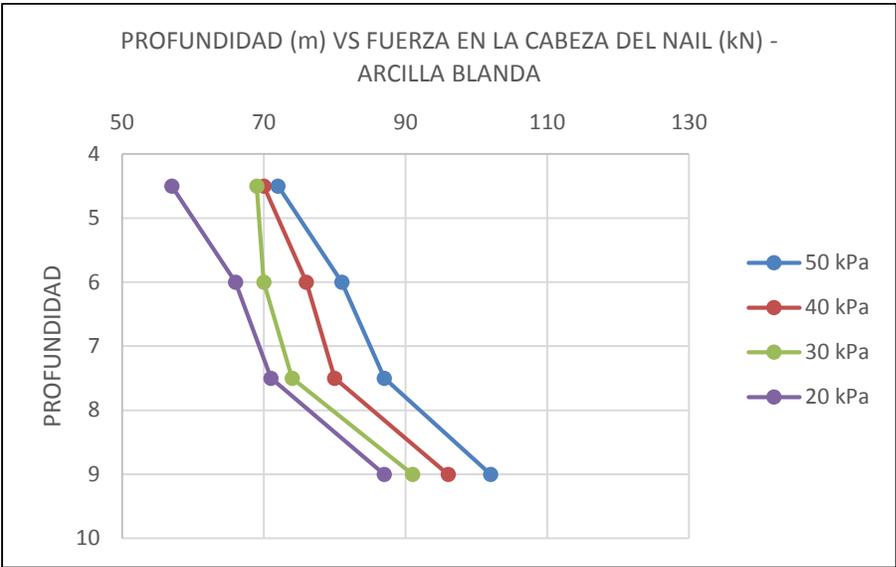
| ARCILLA BLANDA    |                  |     |     |     |
|-------------------|------------------|-----|-----|-----|
| H <sub>MURO</sub> | SOBRECARGA (kPa) |     |     |     |
|                   | 50               | 40  | 30  | 20  |
|                   | FZA              | FZA | FZA | FZA |
| 4,5               | 72               | 70  | 69  | 57  |
| 6                 | 81               | 76  | 70  | 66  |
| 7,5               | 87               | 80  | 74  | 71  |
| 9                 | 102              | 96  | 91  | 87  |

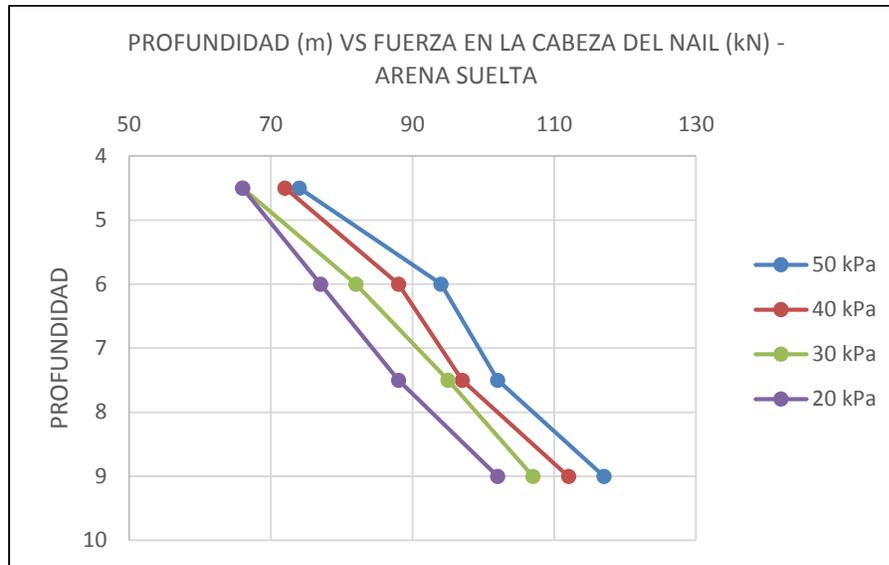
| ARENA DENSA       |                  |     |     |     |
|-------------------|------------------|-----|-----|-----|
| H <sub>MURO</sub> | SOBRECARGA (kPa) |     |     |     |
|                   | 50               | 40  | 30  | 20  |
|                   | FZA              | FZA | FZA | FZA |
| 4,5               | 74               | 69  | 62  | 57  |
| 6                 | 88               | 85  | 80  | 77  |
| 7,5               | 95               | 93  | 90  | 87  |
| 9                 | 110              | 106 | 102 | 98  |

| ARENA SUELTA      |                  |     |     |     |
|-------------------|------------------|-----|-----|-----|
| H <sub>MURO</sub> | SOBRECARGA (kPa) |     |     |     |
|                   | 50               | 40  | 30  | 20  |
|                   | FZA              | FZA | FZA | FZA |
| 4,5               | 74               | 72  | 66  | 66  |
| 6                 | 94               | 88  | 82  | 77  |
| 7,5               | 102              | 97  | 95  | 88  |
| 9                 | 117              | 112 | 107 | 102 |

**Figura 3-18 Gráficas de las fuerzas en la cabeza del nail para diferentes sobrecargas, mediante un análisis en RS2**







De las anteriores tablas se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Las fuerzas de cortante y momento flexionante sobre el revestimiento, están directamente relacionadas con la sobrecarga.
- Las máximas fuerzas en la cabeza del **nail** siempre están en las arenas, pero especialmente en la arena suelta.
- Las fuerzas en la cabeza del **nail** son mayores en los muros de mayor altura. Esto indica que tanto la sobrecarga como la presión de tierras tienen influencia sobre dichas fuerzas.

### 3.3.6 Diseño del revestimiento

A continuación se presentan las tablas de diseño del revestimiento de acuerdo a los resultados del SNAP-2.

**Tabla 3-29 Tabla de diseño de revestimiento, mediante un análisis en SNAP-2**

| MATERIAL       | H <sub>muro</sub> (m) | ESPESOR hc por diseño (cm) | ESPESOR hc por NSR-10 (cm) | Concreto f'c (kPa) | Malla Electrosoldada |                        |          | Varillas de refuerzo (2 en cada sentido) |                     |          |
|----------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|----------------------|------------------------|----------|--|---------------------|----------|
|                |                       |                            |                            |                    | Tipo                 | Espaciamiento y grafil | fy (MPa) | Longitud (m)                             | Diámetro (Pulgadas) | fy (MPa) |
| ARCILLA DURA   | 4,5                   | 10                         | 15                         | 28000              | Q-8                  | 15X15 cm φ=8,5 mm      | 414      | 1,6                                      | 3/8"                | 414      |
| ARCILLA DURA   | 6                     | 10                         | 15                         | 28000              | Q-8                  | 15X15 cm φ=8,5 mm      | 414      | 1,6                                      | 3/8"                | 414      |
| ARCILLA DURA   | 7,5                   | 15                         | 15                         | 28000              | Q-8                  | 15X15 cm φ=8,5 mm      | 414      | 1,6                                      | 3/8"                | 414      |
| ARCILLA DURA   | 9                     | 15                         | 15                         | 28000              | Q-8                  | 15X15 cm φ=8,5 mm      | 414      | 1,6                                      | 3/8"                | 414      |
| ARCILLA BLANDA | 4,5                   | 10                         | 15                         | 28000              | Q-8                  | 15X15 cm φ=8,5 mm      | 414      | 1,6                                      | 3/8"                | 414      |
| ARCILLA BLANDA | 6                     | 10                         | 15                         | 28000              | Q-8                  | 15X15 cm φ=8,5 mm      | 414      | 1,6                                      | 3/8"                | 414      |
| ARCILLA BLANDA | 7,5                   | 15                         | 15                         | 28000              | Q-8                  | 15X15 cm φ=8,5 mm      | 414      | 1,6                                      | 3/8"                | 414      |
| ARCILLA BLANDA | 9                     | 15                         | 15                         | 28000              | Q-8                  | 15X15 cm φ=8,5 mm      | 414      | 1,6                                      | 3/8"                | 414      |
| ARENA DENSA    | 4,5                   | 10                         | 15                         | 28000              | Q-8                  | 15X15 cm φ=8,5 mm      | 414      | 1,6                                      | 3/8"                | 414      |
| ARENA DENSA    | 6                     | 10                         | 15                         | 28000              | Q-8                  | 15X15 cm φ=8,5 mm      | 414      | 1,6                                      | 3/8"                | 414      |
| ARENA DENSA    | 7,5                   | 10                         | 15                         | 28000              | Q-8                  | 15X15 cm φ=8,5 mm      | 414      | 1,6                                      | 3/8"                | 414      |
| ARENA DENSA    | 9                     | 10                         | 15                         | 28000              | Q-8                  | 15X15 cm φ=8,5 mm      | 414      | 1,6                                      | 3/8"                | 414      |
| ARENA SUELTA   | 4,5                   | 10                         | 15                         | 28000              | Q-8                  | 15X15 cm φ=8,5 mm      | 414      | 1,6                                      | 3/8"                | 414      |
| ARENA SUELTA   | 6                     | 10                         | 15                         | 28000              | Q-8                  | 15X15 cm φ=8,5 mm      | 414      | 1,6                                      | 3/8"                | 414      |
| ARENA SUELTA   | 7,5                   | 15                         | 15                         | 28000              | Q-8                  | 15X15 cm φ=8,5 mm      | 414      | 1,6                                      | 3/8"                | 414      |
| ARENA SUELTA   | 9                     | 16                         | 16                         | 28000              | Q-8                  | 15X15 cm φ=8,5 mm      | 414      | 1,6                                      | 3/8"                | 414      |

A continuación se presenta un ejemplo de diseño a partir de los datos obtenidos en el programa RS2:

**Tabla 3-30 Ejemplo de diseño de revestimiento mediante procedimiento de análisis estructural a partir de los datos obtenidos mediante el programa RS2**

Materiales

- Revestimiento (concreto 28 MPa)
- Acero (414 Mpa)

Geometría

B: Base Revestimiento = 1,50 metros  
 L: Longitud Revestimiento = 1,50 metros  
 hc: Espesor revestimiento = 0,16 metros  
 B<sub>PL</sub> Base Placa de Apoyo = 0,20 metros

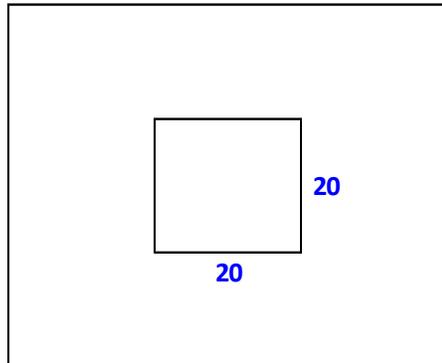
La fuerza cortante máxima y el momento máximo sobre el revestimiento son obtenidos del programa de elementos finitos RS2.

V<sub>u</sub>= 63 kN (obtenido por elementos finitos)  
 V<sub>u</sub>= 6.422 kg  
 B: Base Revestimiento = 1,50 metros= 150 cm  
 L: Longitud Revestimiento = 1,50 metros= 150 cm

Análisis para cortante simple:

$$\phi * v_c = \phi * 1,064 * b_o * d * (f_c)^{1/2}$$

$\phi * v_c$  = Contribución del concreto a la resistencia al esfuerzo cortante



hc= espesor predimensionado revestimiento

$$\phi = 0,85 \quad hc = 16 \text{ cm}$$

$$b_o = 2 * ((b+b') + (h+b')) \text{ cm}$$

$$B_{PL} = 20 \text{ cm}$$

Dimensiones placa de apoyo

$$L_{PL} = 20 \text{ cm}$$

$$b' = 8 \text{ cm} \quad f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$$

$$b_o = 112 \text{ cm} \quad \phi = 0,85$$

$$\phi * v_c = 27.119 \text{ kg}$$

**Cumple para cortante**

$$d > 6 * v_u / (B * \phi * (f_c)^{1/2}) \quad d > 18,06 \text{ cm}$$

Análisis para punzonamiento:

$$d > (((h+b)/4)^2 + Pu / (\phi * f'c^{1/2})) - (h+b)/4$$

$$d > 13,48 \text{ cm}$$

Espesor revestimiento (hc) = 16 cm

**El espesor seleccionado cumple para punzonamiento**

Espesor revestimiento (hc) = 0,16 m

Mu = 20,74 kN-m (obtebido por elementos finitos)

Mu = 2.114 kg-m

Mu = 211.417 kg-cm

**Mu=Momento último**

Mu = 211,42 Ton-cm

$$Ru = Mu / (b1 * d^2)$$

recubrimiento = 7 cm

h'c = 9 cm

h'c: Espesor revestimiento - recubrimiento

Ru = 0,01740

luego:  $\rho = 0,005$

Entonces:  $A_s = \rho * b * d$

$A_s = 6,75 \text{ cm}^2$

$A_s = 4,50 \text{ cm}^2/\text{ml}$

**Usar malla Q-9: grafil de 7,5 mm y espaciamiento 10 cm x 10 cm ó**

**Usar doble malla Q-6: grafil de 6,5 mm y espaciamiento 15 cm x 15 cm**

Como se observa, los resultados obtenidos con el programa RS2 dan una cuantía de refuerzo 16% mayor que la obtenida con el programa SNAP-2, debido a que las cargas que se obtienen son mayores.

### **3.4 Resumen de modelaciones**

A continuación se presenta una tabla con todas las modelaciones que se realizaron:

**Tabla 3-31 Resumen de modelaciones**

| <b>MODELACIONES 1.0 X 1.0</b>                     |                                  |                     |                     |                                 |                     |
|---|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------|
| <b>Arcilla dura</b>                               |                                  |                     | <b>Arena densa</b>  |                                 |                     |
| Programa  | Altura de muros                  | Cantidad de modelos | Programa            | Altura de muros                 | Cantidad de modelos |
| RS2   | Muros entre 2 y 10 m de altura   | 103                 | RS2                 | Muros entre 2 y 10 m de altura  | 106                 |
| SLIDE   |                                  | 117                 | SLIDE               |                                 | 126                 |
| SNAP2   |                                  | 16                  | SNAP2               |                                 | 7                   |
| <b>Arcilla blanda</b>                             |                                  |                     | <b>Arena suelta</b> |                                 |                     |
| Programa  | Altura de muros                  | Cantidad de modelos | Programa            | Altura de muros                 | Cantidad de modelos |
| RS2   | Muros entre 2 y 10 m de altura   | 113                 | RS2                 | Muros entre 2 y 10 m de altura  | 134                 |
| SLIDE   |                                  | 139                 | SLIDE               |                                 | 141                 |
| SNAP2   |                                  | 7                   | SNAP2               |                                 | 8                   |
| <b>MODELACIONES 1.5 X 1.5</b>                     |                                  |                     |                     |                                 |                     |
| <b>Arcilla dura</b>                               |                                  |                     | <b>Arena densa</b>  |                                 |                     |
| Programa  | Altura de muros                  | Cantidad de modelos | Programa            | Altura de muros                 | Cantidad de modelos |
| RS2   | Muros entre 4,5 y 9 m de altura  | 49                  | RS2                 | Muros entre 4,5 y 9 m de altura | 49                  |
| SLIDE   |                                  | 53                  | SLIDE               |                                 | 49                  |
| SNAP2   |                                  | 9                   | SNAP2               |                                 | 4                   |
| <b>Arcilla blanda</b>                             |                                  |                     | <b>Arena suelta</b> |                                 |                     |
| Programa  | Altura de muros                  | Cantidad de modelos | Programa            | Altura de muros                 | Cantidad de modelos |
| RS2   | Muros entre 4,5 y 9 m de altura  | 49                  | RS2                 | Muros entre 4,5 y 9 m de altura | 49                  |
| SLIDE   |                                  | 57                  | SLIDE               |                                 | 51                  |
| SNAP2   |                                  | 6                   | SNAP2               |                                 | 4                   |
| <b>MODELACIONES 2.0 X 2.0</b>                     |                                  |                     |                     |                                 |                     |
| <b>Arcilla dura</b>                               |                                  |                     | <b>Arena densa</b>  |                                 |                     |
| Programa  | Altura de muros                  | Cantidad de modelos | Programa            | Altura de muros                 | Cantidad de modelos |
| RS2   | Muros entre 4 y 10 m de altura   | 39                  | RS2                 | Muros entre 4 y 10 m de altura  | 39                  |
| SLIDE   |                                  | 39                  | SLIDE               |                                 | 39                  |
| SNAP2   |                                  | 5                   | SNAP2               |                                 | 4                   |
| <b>Arcilla blanda</b>                             |                                  |                     | <b>Arena suelta</b> |                                 |                     |
| Programa  | Altura de muros                  | Cantidad de modelos | Programa            | Altura de muros                 | Cantidad de modelos |
| RS2   | Muros entre 4 y 10 m de altura   | 39                  | RS2                 | Muros entre 4 y 10 m de altura  | 39                  |
| SLIDE   |                                  | 39                  | SLIDE               |                                 | 29                  |
| SNAP2   |                                  | 4                   | SNAP2               |                                 | 4                   |
| <b>MODELACIONES PARA ANALISIS DE SENSIBILIDAD</b> |                                  |                     |                     |                                 |                     |
| Programa  | Altura de muros                  | Cantidad de modelos |                     |                                 |                     |
| RS2   | Para diferentes alturas de muros | 94                  |                     |                                 |                     |
| SLIDE   |                                  | 23                  |                     |                                 |                     |
| SNAP2   |                                  | 19                  |                     |                                 |                     |
| <b>MODELACIONES SIN REFUERZO 1.0 x 1.0</b>        |                                  |                     |                     |                                 |                     |
| <b>Arcilla dura</b>                               |                                  |                     | <b>Arena densa</b>  |                                 |                     |
| Programa  | Altura de muros                  | Cantidad de modelos | Programa            | Altura de muros                 | Cantidad de modelos |
| RS2   | Muros entre 4 y 10 m de altura   | 9                   | RS2                 | Muros entre 4 y 10 m de altura  | 9                   |
| SLIDE   |                                  | 9                   | SLIDE               |                                 | 9                   |
| <b>Arcilla blanda</b>                             |                                  |                     | <b>Arena suelta</b> |                                 |                     |
| Programa  | Altura de muros                  | Cantidad de modelos | Programa            | Altura de muros                 | Cantidad de modelos |
| RS2   | Muros entre 4 y 10 m de altura   | 9                   | RS2                 | Muros entre 4 y 10 m de altura  | 9                   |
| SLIDE   |                                  | 9                   | SLIDE               |                                 | 9                   |
| <b>MODELACIONES EN RS2</b>                        |                                  |                     |                     |                                 | <b>938</b>          |
| <b>MODELACIONES EN SLIDE</b>                      |                                  |                     |                     |                                 | <b>938</b>          |
| <b>MODELACIONES EN SNAP-2</b>                     |                                  |                     |                     |                                 | <b>97</b>           |
| <b>TOTAL DE MODELACIONES</b>                      |                                  |                     |                     |                                 | <b>1973</b>         |

## 4 CONCLUSIONES

### 4.1 Influencia de los diferentes factores que se involucran en el diseño sobre el comportamiento de un sistema de soil nailing

- La rigidez del suelo, la cual depende de los parámetros de resistencia  $c$  y  $\phi$  tiene una influencia significativa sobre el factor de seguridad y el esquema de diseño del sistema de **soil nailing**. Entre mayores son los valores de los parámetros de resistencia, se requieren menores cantidades de **nails** y se obtienen mayores factores de seguridad.
- La longitud de los **nails** tiene una influencia significativa sobre el factor de seguridad global. Se encontró a partir de modelos en RS2 que a mayor longitud, mayor factor de seguridad. En general, se obtuvo en los modelos que para un aumento del 100% en la longitud del **nail**, el factor de seguridad global podía aumentar alrededor de un 25 a 29%.
- No obstante en los modelos de equilibrio límite en SNAP-2, esta influencia es menor, ya que en la mayoría de los modelos la superficie potencial de falla no intersectaba los **nails** en su totalidad, sino los más bajos, por lo que la influencia de la longitud no era tan visible.
- La adherencia tiene una influencia significativa en el factor de seguridad cuando la superficie potencial de falla intersecta los **nails**. Como en general se obtuvieron factores de seguridad altos en los modelos de equilibrio límite con SNAP-2, no fue necesario aumentar de forma drástica estas longitudes y por lo tanto casi siempre la superficie potencial de falla pasaba por fuera de la mayor parte de la zona reforzada. No obstante en etapas intermedias de construcción donde la superficie potencial de falla sí intersecta todos los **nails**, se pudo observar que el cambio en el valor de adherencia aumentaba de forma significativa el factor de seguridad. Como ejemplo se muestra la tabla 3-5, en la que se observa que para una disminución del 30% en el parámetro de adherencia, se genera una disminución del 8% en el factor de seguridad en una etapa intermedia de construcción.
- También se observó que el valor de adherencia tiene una influencia significativa en las fuerzas máximas de tensión en los **nails**, mas no en las fuerzas en la cabeza del **nail**.

- Se encontró que en los modelos de equilibrio límite en Slide la adherencia tiene una influencia significativa cuando el revestimiento es más rígido. Es decir, para un revestimiento muy rígido, al aumentar la adherencia, siempre aumenta el factor de seguridad hasta un valor límite. Esto es porque la superficie de falla que se genera siempre está alejada de la cara de la excavación, es decir no se presenta una falla del revestimiento. Sin embargo, para un revestimiento menos rígido, al aumentar la adherencia hasta un cierto valor límite, el factor de seguridad también aumenta, pero cuando se pasa de ese valor límite las fuerzas sobre el revestimiento se hacen muy grandes y este falla, generando una superficie de falla cerca a la cara de la excavación. Es por este motivo que aunque se aumente la adherencia el factor de seguridad disminuye.
- En los modelos realizados en RS2 no se toma en cuenta el parámetro de adherencia, ya que este se tiene en cuenta en el ángulo de fricción.
- Los cambios en el diámetro de la perforación no tienen una influencia significativa en las variaciones del factor de seguridad en los modelos de equilibrio límite elaborados en SNAP-2. Esto se evidencia en la tabla 3-7, en la cual se muestra que para una variación del 100% en el diámetro de la perforación, no hay cambio en el factor de seguridad global. Esto se debe a que la superficie potencial de falla no intersecta la mayoría de los *nails* y por tanto la mayor parte del suelo reforzado queda ubicado dentro de la zona activa.

No obstante, los resultados en los modelos en RS2 sí muestran diferencias sustanciales. Se hicieron dos grupos de modelaciones, uno para un muro de 9 m de altura en arena suelta y otro para un muro de 6 m en arcilla dura. En ambos casos se encontró que en la medida en que aumenta el diámetro de la perforación, es decir, la lechada, el factor de seguridad disminuye. Se analizaron aspectos tales como cambios en los desplazamientos, fuerzas en los *nails*, momentos y cortantes en el revestimiento, etc. En las tablas 3-8 y 3-9 se presentan los resultados de los análisis. De manera general se encontró que a medida que se aumenta el diámetro de la lechada, disminuye el factor de seguridad. Sin embargo, esta influencia es mucho mayor para el muro de arena suelta de 9 m que para el muro de arcilla dura de 6 m. También se encontró que a medida que se aumenta el diámetro de la

lechada, disminuyen los desplazamientos y por lo tanto las fuerzas en los **nails** y los momentos y cortantes sobre el revestimiento.

La explicación a estos resultados radica en la forma como el programa realiza la modelación de los **nails**. El **nail** es tomado como una placa de un ancho igual a 1 m (**out-of-plane spacing** = 1,0 m en el modelo RS2) en la dirección perpendicular al plano de deformaciones. Para poder modelar correctamente los cambios en el diámetro, también deben modificarse las rigideces equivalentes en la placa continua que simula el **nail**. A medida que aumenta el diámetro del **nail**, disminuye la rigidez equivalente, ya que está aumentando el área de la lechada, pero el área de acero permanece constante. Como el **nail** es modelado como una placa continua con un ancho fijo de 1,0 m, el área de contacto suelo-**nail** permanece constante así se aumenta el diámetro del **nail**.

- El diámetro de la varilla del **nail** no tiene una influencia significativa en el factor de seguridad global en los modelos en SNAP-2. Sin embargo, en los modelos en RS2 sí aumenta el factor de seguridad. Se observó que para un aumento del 100% en el diámetro de la varilla, aumenta el factor de seguridad un 6%, y para un aumento del 200%, el factor de seguridad aumenta un 7%. No obstante, los cambios más significativos se dan en las fuerzas de tensión máximas y en las fuerzas sobre el revestimiento. Por ejemplo para un aumento del diámetro de la varilla del 100%, es decir de 25,4 mm a 50,8 mm, se presenta una variación de la fuerza cortante máxima en el revestimiento de 60 kN a 72 kN, es decir un aumento del 20%. Para un aumento del 200%, es decir de 25,4 mm a 76,2 mm, se presenta un aumento en las fuerzas cortantes máximas de 60 kN a 75 kN, es decir, un aumento del 25%. En cuanto a los momentos flexionantes, para un aumento del 100% en el diámetro del nail, el momento flexionante aumenta de 17 kN-m a 22 kN-m, es decir un aumento del 29%. Para un aumento del 200% aumenta de 17 kN-m a 22 kN-m, es decir, aumenta un 29%. Esto se debe a que hay una mayor rigidez de los **nails**.
- El revestimiento es el elemento que tiene la mayor influencia en la estabilidad del sistema en los suelos arenosos. Obviamente también influye significativamente en las arcillas, pero en el caso de estas, es posible en

ocasiones, prescindir del mismo, si estas tienen suficiente rigidez, como se muestra en la tabla 3-12.

- Los parámetros que más influencia tienen en el comportamiento del sistema son el ángulo de fricción (que está relacionado con la adherencia) y la presencia del revestimiento. Como se observa en la tabla 3-13, el ángulo de fricción tiene una mayor incidencia en el factor de seguridad que la cohesión. Esto parte de la definición del factor de reducción de resistencia (SRF) dada en el numeral 2.6.2.1. También se encontró que hay una relación directa entre las propiedades de resistencia al corte y el factor de seguridad. Los factores de seguridad más altos eran los de la arena densa, luego las arcillas duras, después las arcillas blandas y por último las arenas sueltas.
- Se observó en los modelos en RS2 que las fuerzas en la cabeza de los **nails** son mayores en los suelos arenosos, que son los que tienen un mayor ángulo de fricción, independientemente del factor de seguridad. Sin embargo en los modelos de equilibrio límite el comportamiento fue distinto, ya que las fuerzas máximas en la cabeza de los **nails** se daban en las arcillas y las fuerzas de tensión máximas se daban en las arenas densas y las arcillas duras.
- Otro aspecto importante que se analizó fue la influencia de la sobrecarga sobre el factor de seguridad global y las fuerzas sobre el revestimiento.
- También se encontró que a mayor profundidad la sobrecarga tiene una influencia mucho menor en las fuerzas en los **nails**.
- Se encontró que la longitud del **nail** tiene una influencia muy importante sobre el factor de seguridad y las fuerzas en la cabeza del **nail**, pero menos importante en las fuerzas máximas en los **nails** (ver tabla 3-16).

#### 4.2 Contribución del sistema de soil nailing en la estabilidad de un talud

- A partir de modelos en Slide y RS2, se encontró que sin la implementación del sistema todas las excavaciones tienen factores de seguridad inferiores a 1,50.
- Sin la inclusión del sistema de **soil nailing**, los factores de seguridad son muy similares en arcillas duras y blandas.
- Sin la inclusión del sistema de **soil nailing**, los factores de seguridad son menores en las arenas sueltas que en las arenas densas. Esto debido a que el ángulo de fricción es mayor en las arenas densas.

- Se concluye que para excavaciones y taludes verticales y casi verticales sometidos a ciertas condiciones de carga estática, es imprescindible llevar a cabo el reforzamiento de los mismos mediante un sistema de **soil nailing**, ya sea utilizando un muro de **soil nail** o un refuerzo de **nails** sin revestimiento.
- Para excavaciones superiores a 2,0 m con condiciones de carga estática en el talud detrás del muro, se requiere utilizar el sistema.
- El revestimiento genera un aumento significativo del factor de seguridad global en cualquier etapa de construcción.
- En todos los casos en los que se hicieron las modelaciones, siempre se encontró que entre los 4,0 m y los 7,0 m de profundidad se presentaban reducciones significativas en el factor de seguridad global.
- La inclusión del sistema de **soil nailing** aumenta el factor de seguridad en un corte o un talud vertical entre un 130% y un 190% para los suelos arenosos y arcillosos analizados en la presente investigación.
- En general siempre se obtuvieron factores de seguridad más altos con el programa SNAP-2 y los más bajos con el programa Slide. En el caso del programa SNAP-2 los círculos de falla para los cuales el programa calcula el factor de seguridad siempre tienen su centro por encima del **nail** más alto y a la izquierda del revestimiento del muro. Esto limita la búsqueda de las superficies de falla más críticas. En el programa Slide no es fácil de modelar el revestimiento, ya que no cuenta con esta opción, por lo cual se deben definir las propiedades y geometría de un material equivalente. Para esto se deben asumir valores conservativos de cohesión y ángulo de fricción del material de revestimiento, tal y como se hizo en la presente investigación. No obstante, al realizar las modelaciones con RS2 se obtuvieron valores intermedios entre los programas de equilibrio límite, lo cual indica que dichos programas son confiables.
- La sobrecarga tiene una influencia significativa en el FS, especialmente en los muros de menor altura.
- Los desplazamientos máximos son mayores en los muros de menor altura, debido al efecto de la sobrecarga. De igual manera en estos hay un mayor número de elementos plastificados.

- En general para casi todas las alturas de muro el FS más alto siempre es el de arena densa y el más bajo es el de arena suelta.
- A medida que disminuye la sobrecarga aumenta el FS.
- La variación del FS es aproximadamente lineal con la altura del muro, especialmente en los suelos arenosos.
- En los muros de menor altura el efecto de la sobrecarga es mayor.
- La variación del FS con la profundidad es mayor en los suelos arcillosos.
- Para los cuatro suelos estudiados, se debe utilizar un esquema de **nails** con espaciamiento horizontal y vertical de 1,50 m, **nails** con varilla de 25,4 mm de diámetro y diámetro de perforación de 100 mm.

#### 4.3 Contribución del revestimiento temporal y permanente al sostenimiento de una excavación

- La inclusión del revestimiento aumenta los factores de seguridad, disminuye los desplazamientos de forma significativa, disminuye las deformaciones en cualquier material, esquema o altura de muro.
- La inclusión del revestimiento aumenta las fuerzas en los **nails**.
- La variación en el espesor del revestimiento temporal tiene influencia significativa en las variables de comportamiento del sistema tales como fuerzas en la cabeza del **nail**, resistencia admisible en la cabeza, resistencia al punzonamiento, resistencia a la flexión. No obstante, se observó en los análisis con SNAP-2 que no tiene influencia en el factor de seguridad global.
- El revestimiento definitivo no tiene incidencia en el comportamiento del sistema. Este revestimiento se instala para prolongar la vida útil del mismo y proteger los diferentes componentes de la corrosión, cambios de temperatura y todo tipo de condiciones ambientales variables en el largo plazo. 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 el mismo. De igual manera el terreno transmite carga en la parte posterior del revestimiento temporal, que generan momentos flexionantes.

- Los valores de cortante y momento que se obtuvieron por el método de elementos finitos fueron mayores a los que se obtuvieron con el programa SNAP-2.
- Las fuerzas de cortante y momento flexionante sobre el revestimiento están directamente relacionadas con la sobrecarga.
- Las máximas fuerzas en la cabeza del **nail** siempre están en las arenas, pero especialmente en la arena suelta.
- Las fuerzas en la cabeza del **nail** son mayores en los muros de mayor altura. Esto indica que tanto la sobrecarga como la presión de tierras tienen influencia sobre dichas fuerzas.
- Hay dos métodos para diseñar el revestimiento. Si se utiliza el programa SNAP-2, el programa directamente hace los cálculos a través de las opciones establecidas previamente. Solo se deben incluir las características del refuerzo y en la opción de refuerzo, se revisan los factores de seguridad antes de proceder a correr el programa (ver tabla 3-29). Si el diseño se hace por RS2, se pueden introducir los datos en el programa y luego que se obtienen los datos de fuerzas cortantes y momentos en el revestimiento y se verifica la cuantía de refuerzo (ver tabla 3-30). En este caso se obtuvo una diferencia del 16% en la cuantía de refuerzo entre los dos métodos de diseño, lo cual no necesariamente indica que uno de los métodos esté mal, solo indica que en los dos métodos se parte de premisas diferentes. Es lógico que se presenten diferencias, ya que en el método de equilibrio límite los valores de fuerzas cortantes y momentos flexionantes son menores que en el método de elementos finitos.

Las conclusiones obtenidas solo son aplicables a los cuatro materiales estudiados en la presente investigación.

## **5 RECOMENDACIONES**

### **5.1 Recomendaciones constructivas**

Con el fin de evitar problemas técnicos y modificaciones significativas entre los diseños y la obras se presentan a continuación las recomendaciones generales que se deben seguir para una correcta construcción.

- Las etapas de construcción deben corresponder con las mismas etapas de diseño establecidas en el presente documento y en las buenas prácticas de ingeniería que se utilizan en los métodos de soil nailing a nivel mundial.
- Se debe dar continuidad estructural al revestimiento, por lo que es necesario que los refuerzos se traslapen como mínimo 20 cm.
- Es indispensable realizar pruebas de arrancamiento para verificar que los análisis realizados corresponden con los materiales en los que se está construyendo. Una vez se realizan las pruebas, se debe revisar el modelo y de ser necesario, modificarlo.
- Se debe tener un estricto control de calidad de los materiales que se utilizan, verificando que cumplen con los estándares mínimos exigidos.
- Es obligatorio en uso de los centralizadores, esto con el fin de lograr el recubrimiento mínimo de los nails.
- Se deben realizar pruebas químicas sobre los suelos para verificar el potencial de corrosión sobre el sistema.
- Se debe verificar en campo la idoneidad del suelo para el sistema del soil nailing de acuerdo a lo establecido en este documento y los documentos de referencia.
- Si se van a utilizar materiales distintos a los utilizados en este documento se debe revisar el diseño.
- Las conclusiones de este documento solo son aplicables a los materiales estudiados.

### **5.2 Futuras investigaciones**

A partir del presente trabajo de grado se pueden adelantar las siguientes investigaciones:

- Realización de modelos a escala real en suelos de la Sabana de Bogotá con características similares a los utilizados para la investigación.

- Realizar ensayos de adherencia en suelos de la Sabana de Bogotá con características similares a los utilizados para la investigación a fin de correlacionarlos con las demás características geomecánicas que tienen incidencia en el comportamiento de los sistemas de **soil nailing**.
- Realizar modelos con elementos finitos 3D para comparar con los resultados de 2D obtenidos en la presente investigación.
- Realizar monitoreo e instrumentación en aplicaciones en sectores de prueba piloto para proyectos en donde se estén ejecutando obras con sistemas de **soil nailing**.
- Realizar modelos a escala real con revestimientos de materiales distintos al concreto.
- Realizar modelos a escala real con materiales de **nail** distintos de acero y lechada de cemento.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

1. AASHTO LRFD BRIDGE, Design Specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
2. Andrew, R., Hume, H., Hansen, S., Arndt, B., Macklin, P., Rock, A., Zhang, R. Snap (Soil Nail Analysis Program) User's Manual. Department of Transportation Federal Highway Administration. Denver, 2010.
3. Banerjee, S., Finney, A., Wentworth, T., Bahiradhan, M. Evaluation of Design Methodologies For Soil Nailed Walls, Volume 1, WA-RD-371.1. Washington State Department of Transportation. Washington, 1998.
4. Banerjee, S., Finney, A., Wentworth, T., Bahiradhan, M. Evaluation of Design Methodologies For Soil Nailed Walls, Volume 2 Distribution of Axial Forces in Soil Nails Based on Interpretation of Measured Strains, WA-RD-371.1. Washington State Department of Transportation. Washington, 1998.
5. Barbat, H., Canet, J. Estructuras Sometidas a Acciones Sísmicas. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Barcelona, 1994.
6. Barbosa, E. Consideraciones Geotécnicas Sobre Análisis de Excavaciones Soportadas. Primer Seminario de Geotecnia. Universidad de la Salle. Bogotá, 1994.
7. Barry, D., Siel, P. Snap-2 (Soil Nail Analysis Program) User's Manual. Department of Transportation Federal Highway Administration. Lakewood, 2014.
8. Brinkgreve., R. Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application. Geotechnical Special Publication No. 128. Soil Constitutive Models. Evaluation, Selection and Calibration. Austin (Texas), January 24-26, 2005.
9. Bruce, D., Jewell, R. Soil Nailing: Application and Practice.
10. BS 8006-2:2011 Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils Part 2: Soil Nail Design.
11. Byrne, R., Cotton, D., Porterfield, J., Wolschlag, C., Ueblacker, G. Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Wall Publication FHWA-SA-96-069R. Department of Transportation Federal Highway Administration. Washington, 1998.
12. Byrne, R., Cotton, D., Porterfield, J. Soil Nail Field Inspectors Manual – Soil Nail Walls FHWA-SA-93-068. Department of Transportation Federal Highway Administration. Washington, 1994.
13. Cheuk, C., Ng, C., Sun, H. Numerical Experiments of Soil Nails in Loose Fill Slopes Subjected to Rainfall Infiltration Effects, 2005.
14. Clayton, C., Woods, R., Bond, A., Milititsky, J. Earth Pressure and Earth-Retaining Structures. 3ra. Edición. CRC Press Taylor & Francis. Boca Ratón, 2013.
15. Clouterre Project. French National Research Project Clouterre. Soil Nailing Recommendations 1991 Publication FHWA-SA-93-026. Department of Transportation Federal Highway Administration. Washington, 1991.
16. Das, B. Fundamentals of Soil Dynamics. Editorial Elsevier. USA, 1983.
17. Durán, J. Apuntes Sobre Investigación del Suelo. Curso de Investigación del Suelo, Maestría en Ingeniería Civil, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, 2013.
18. Elias, V., Cristopher, B., Berg, R. Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines FHWA-NHI-00-043. Department of Transportation Federal Highway Administration. Washington, 2001.
19. Elias, V., Fishman, K., Cristopher, B., Berg, R. Corrosion/Degradation of Soil Reinforcements for Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes FHWA-NHI-09-087. Department of Transportation Federal Highway Administration. Washington, 2009.

20. European Standard EN 14490:2010. Execution of Special Geotechnical Works: Soil Nailing, 2010.
21. Fan, C., Luo, J. Numerical Study on the Optimun Layout of Soil-Nailed Slopes. Taiwan, 2007.
22. Gelfenbein et al. A Masonry Wall and Slide Repair Using Soil Nails and Rock Dowels. 2003.
23. Gens, A., Potts, D. Modelos Elasto-Plásticos de Estado Crítico Para Análisis Numéricos de Problemas Geotécnicos. I – Formulación Básica y Principales Modificaciones.
24. Geoguide 7 Guide to Soil Nail Design and Construction. Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department. Gobierno de Hong Kong. Hong Kong.
25. González, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. Ingeniería Geológica. Pearson Prentice Hall. Madrid, 2004.
26. Harahap, I., Nanak, W. Evaluation of Dominant Mode of Failure of Soil Nail System Using Analytical Hierarchy Process. Malasia.
27. Ishihara., K. Soil Behavior in Earthquake Geotechnics. Oxford University Press. New York, 1996.
28. Lade, P. Overview of constitutive models for soils. Geotechnical Special Publication No. 128, Austin (Texas), January 24-26, 2005
29. Lambe, T., Whitman, R. Mecánica de Suelos. Editorial Limusa. México, D.F., 1994.
30. Lazarte, C., Elías, V., Espinoza, D., Sabatini, P. Geotechnical Engineering Circular No. 7 Soil Nail Walls Publication FHWA-IF-03-017. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Washington, 2003.
31. Lazarte, C. et al. Geotechnical Engineering Circular No. 7 Soil Nail Walls Reference Manual Publication FHWA-NHI-14-007. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Washington, 2015.
32. Lazarte, C. Proposed Specifications for LRFD Soil Nails Design and Construction NCHRP Report 701. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration and American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, 2011.
33. Moya, J. Sistemas de Contención con Suelo Empernado. Segundo Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras. Bogotá, 1993.
34. Potts, D., Zdravkovic, L. Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Application. Thomas Telford. Londres, 2001.
35. Pratap, V., Sivakumar, L. 2D Numerical Simulations of Soil Nail Walls, 2009.
36. Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente NSR-10. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. 2010. Bogotá.
37. Rodríguez, C. Carlos Eduardo. Apuntes de clase. Curso de Métodos de Análisis en Geotecnia, Maestría en Ingeniería Civil, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, 2014.
38. Rodríguez, C. Carlos Eduardo. Apuntes de clase. Curso de Comportamiento del Suelo, Maestría en Ingeniería Civil, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, 2014
39. Ruiz, M., González, S. Geología Aplicada a la Ingeniería Civil. Editorial Limusa. México. 2006.
40. Sabatini, P., Bachus, R., Mayne, P., Schnider, J., Zettler, T. Geotechnical Engineering Circular No. 5: Evaluation of Soil and Rock Properties FHWA-IF-02-034. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Washington, 2002.

41. Sanvitale, N., Simonini, P., Bisson, A., Cola, S. Role of the Facing of the Behavior of Soil-Nailed Slopes Under Surcharge Loading. Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering – University of Padova – Italy, 2013.
42. Shiu, Y., Chang, G., Cheung, W. Review of Limit Equilibrium Methods for Soil Nail Design. Departamento de Ingeniería Civil y Desarrollo, Oficina de Ingeniería Geotécnica, Gobierno de Hong Kong. Hong Kong, 2006.
43. Singla, S. Demonstration Project 103: Design & Construction Monitoring of Soil Nail Walls, Project Summary Report FHWA-IF-99-026. Department of Transportation Federal Highway Administration. Washington, 1999.
44. Sivakumar, B., Pratap, V. Simulation of Soil Nail Structures Using Plaxis 2D. Instituto Indio de Ciencia. Karnataka, India.
45. Su, L., Yin, J., Zhou, W. Influences of Overburden Pressure and Soil Dilation on Soil Nail Pull-Out Resistance. Hong Kong, 2010.
46. Suarez, J. Deslizamientos Volumen 2 Técnicas de Remediación. División de Publicaciones UIS. Bucaramanga, 2009.
47. Zhou, W., Yin, J. A Simple Mathematical Model for Soil Nail and Soil Interaction Analysis. Universidad Politécnica de Hong Kong. Hong Kong, 2007.
48. Zhou, Y., Cheuk, C., Tham, L. Numerical Model of Soil Nail in Loose Fill Slope Under Surcharge Loading. Universidad de Hong Kong. Hong Kong, 2009.
49. Zhou, Y., Cheuk, C., Tahm, L. An Embedded Bond-Slip Model for Finite Element Modelling of Soil Nail Interaction. Universidad de Hong Kong. Hong Kong, 2009.

**ANEXOS (SE ADJUNTA MEDIO MAGNÉTICO)**