

Regression Models and Response Surfaces to Assess the External Stability of Soil Nailing Walls

Modelos de regresión y superficies de respuesta para evaluar la estabilidad externa de muros de Soil Nailing

S. Villalobos ^{1*}, ** <https://orcid.org/0000-0003-1945-2237>

* Universidad Católica de la Santísima Concepción – Concepción, CHILE

** SOENCO Geotecnia Ltda - Talcahuano, CHILE

Fecha de Recepción: 23/03/2021

Fecha de Aceptación: 22/07/2021

PAG 251-267

Abstract

Due to its fast and economical execution, the geotechnical solution known as soil nailing walls is widely used for the stabilization of slopes and ground excavations. At the design stage, verification of the external stability of the soil nailing wall is one of the most important acceptability criteria. The main objective of this work is to evaluate the external stability of soil nailing walls, considering the variability influence of their height and the geomechanical parameters of the soil in-situ. The probabilistic 2k factorial design methodology has been applied to generate 32 experiments. A vertical soil nailing wall, with variable height, under pseudo-static load conditions, and executed in residual soil from granitic rock has been used as a prototype model. Based on the analysis of the observations of the 32 experiments, three regression models have been developed, which can be used to predict the value of the factors of safety with arbitrary realizations. Furthermore, the observations show that the factors that most influence the external stability of soil nailing walls are the height of the wall, the cohesion and the friction angle of the soil in-situ.

Keywords: Soil nailing wall, external stability, factor of safety, experimental design, response surface

Resumen

Debido a su rápida y económica ejecución, la solución geotécnica conocida como muros de soil nailing se utiliza ampliamente para la estabilización de taludes y excavaciones del terreno. En la etapa de diseño, la verificación de la estabilidad externa del muro de soil nailing es uno de los criterios de aceptabilidad más importantes. El principal objetivo de este trabajo es evaluar la estabilidad externa de muros de soil nailing, considerando la influencia de la variabilidad de su altura y los parámetros geomecánicos del suelo in-situ. La metodología probabilística de diseño factorial 2^k ha sido aplicada para generar 32 experimentos. Un muro de soil nailing vertical, con altura variable, bajo condiciones de carga pseudo-estática, y ejecutado en suelo residual de roca granítica ha sido utilizado como modelo prototipo. Basándose en el análisis de las observaciones de los 32 experimentos, se han desarrollado tres modelos de regresión, los que pueden ser usados para predecir el valor de los factores de seguridad con realizaciones arbitrarias. Además, las observaciones muestran que los factores que más influencia tienen sobre la estabilidad externa de muros de soil nailing son la altura del muro, la cohesión y el ángulo de fricción del suelo in-situ.

Palabras clave: Muro de soil nailing, estabilidad externa, factor de seguridad, diseño experimental, superficie de respuesta

1. Introducción

El soil nailing es una técnica de estabilización in-situ, cuyo principio fundamental es reforzar el suelo mediante inclusiones pasivas resistentes a la tracción. Con la ejecución del soil nailing se forma una estructura de muro gravedad equivalente, con mayor resistencia al corte en comparación con el suelo original in-situ (Juran et al., 1990). Debido a su rápida ejecución y bajos costos, los muros de soil nailing han sido utilizados en ingeniería civil durante más de cinco décadas (Lazarte et al., 2015). Por lo general, se ha utilizado para estabilizar taludes naturales, cortes de excavaciones urbanas, cortes de carreteras, fundaciones, estribos de puentes y excavaciones subterráneas (Bruce y Jewell, 1986); (Juran, 1987); (Briaud y Lim, 1990); (Alston, 1991); (Gu et al., 2014); (Lazarte et al., 2015).

En términos de estados límite últimos, el diseño geotécnico de los muros de soil nailing debe cumplir tres requerimientos principales: estabilidad externa, interna y del revestimiento. En términos de estabilidad externa, los siguientes modos de falla generalmente se consideran en el análisis: modo de falla global, modo de falla por deslizamiento (i.e. corte al largo de la base) y modo de falla por capacidad de soporte (i.e. levantamiento basal en suelos con baja resistencia al corte, particularmente suelos blandos) (Zevgolis y Daffas, 2018).

¹ Autor de correspondencia:

Universidad Católica de la Santísima Concepción –
Concepción, CHILE
E-mail: svillalobos.ic@gmail.com



Comúnmente, existen incertidumbres relacionadas a los parámetros de diseño en muros de soil nailing para evaluar su estabilidad externa (Gässler y Gudehus, 1983); (Lazarte et al., 2003b); (Lazarte et al., 2011); (Babu y Singh, 2009); (Lin y Liu, 2017), (Lin et al., 2017). La falla externa puede ocurrir incluso si el factor de seguridad calculado es mayor que el mínimo de conformidad con los códigos de diseño de los diferentes países. Por lo tanto, es importante realizar análisis sobre la estabilidad externa de muros de soil nailing que consideren la variabilidad de los parámetros de diseño. En este sentido, debido a que el comportamiento de los muros de soil nailing es significativamente afectado por la compleja naturaleza de la interacción entre sus componentes principales (condiciones de carga y elementos de refuerzo), así como también la incertidumbre inducida por la variabilidad de los parámetros geomecánicos del suelo in-situ, se hace necesario que métodos probabilísticos sean aplicados para evaluar la estabilidad de muros de soil nailing.

En este trabajo, ha sido desarrollado un diseño de experimental usando en conjunto métodos de equilibrio límite y diseño factorial 2^k . Posteriormente, basándose en los resultados, han sido propuestos tres modelos de regresión, para predecir los valores de: (i) el factor de seguridad global, (ii) el factor de seguridad por deslizamiento, y (iii) el factor de seguridad por capacidad de soporte. Finalmente, han sido identificados los parámetros de diseño que mayor influencia tienen sobre la estabilidad externa de muros de soil nailing.

2. Estabilidad de Muros de Soil Nailing

En el esquema de la (Figura 1) se muestran los distintos modos de falla que pueden tener los muros de soil nailing frente a condiciones de inestabilidad. El diseño geotécnico de muros de soil nailing debe garantizar la seguridad y confiabilidad frente a los distintos modos de falla. En términos generales, los modos de falla de los muros de soil nailing pueden ser clasificados en tres grupos: modos de falla externa, modos de falla interna y modos de falla del revestimiento (Lazarte et al., 2003a) (Lazarte et al., 2011),(Lazarte et al., 2015). En este estudio se desarrolla un análisis de los modos de falla externa.

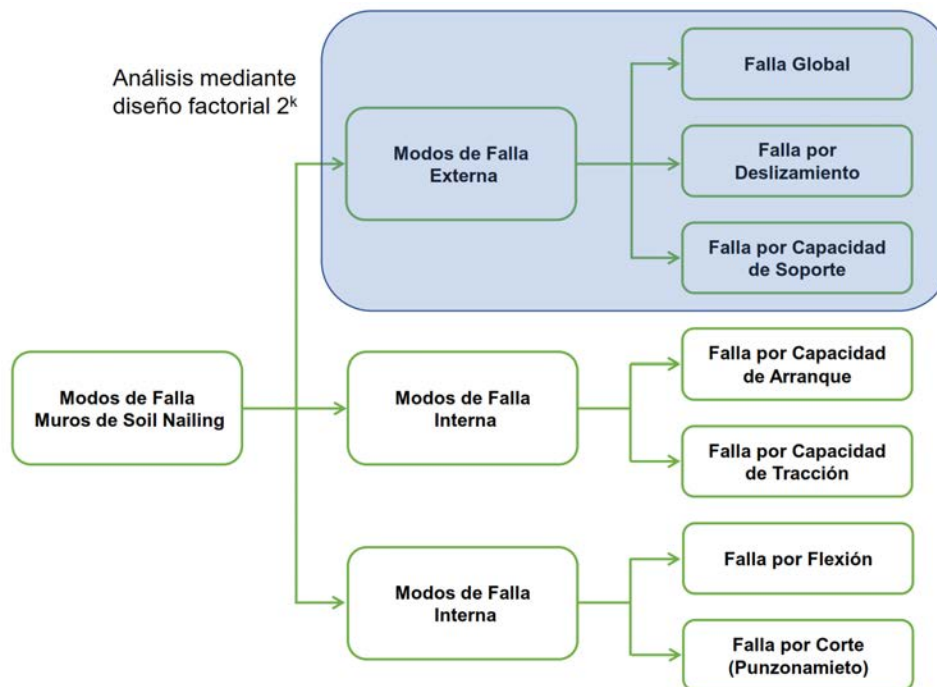


Figura 1. Modos de falla en muros de soil nailing adaptado de (Lazarte et al., 2015)



Los modos de falla externa se refieren a fallas por la estabilidad global, deslizamiento y capacidad de soporte del muro de soil nailing. La estabilidad global se refiere a la pérdida de la estabilidad general de la masa de suelo reforzada, que puede ocurrir cuando las cargas totales superan las resistencias proporcionadas por el suelo a lo largo de la superficie de falla crítica y por los nails que se extienden a través de ella. La estabilidad al deslizamiento se refiere al movimiento horizontal de toda la masa de suelo reforzada a lo largo de su base. La estabilidad por capacidad de soporte se refiere a la falla que puede ocurrir cuando el muro de soil nailing se construye sobre suelos con baja resistencia al corte. La (Figura 2) muestra los potenciales modos de falla externa que pueden tener los muros de soil nailing bajo condiciones de inestabilidad.

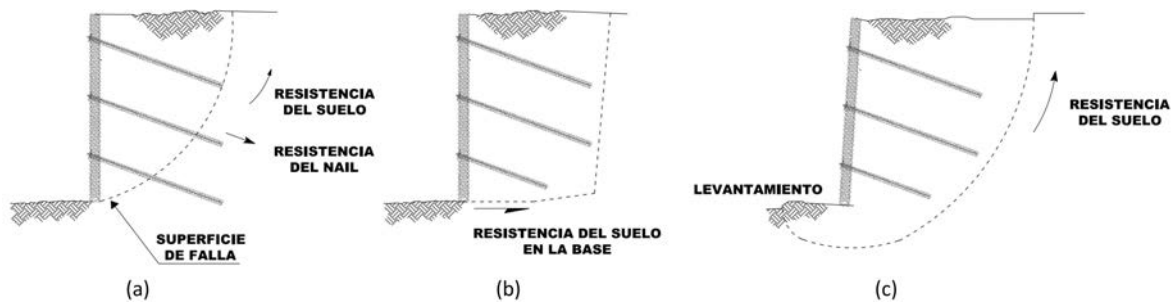


Figura 2. Modos de falla externa en muros de soil nailing: (a) global, (b) deslizamiento, y (c) capacidad de soporte (adaptado de Lazarte et al., 2015)

Actualmente, el diseño geotécnico de muros de soil nailing se basa en el método de diseño por tensiones admisibles (o *ASD: Allowable Stress Design*) (Lazarte et al., 2003a, 2011, 2015), donde los factores de seguridad están designados para controlar los niveles de seguridad de una estructura contra varios modos potenciales de falla. El factor de seguridad se define como la relación entre la resistencia general de un sistema y las cargas totales que el sistema tiene que soportar.

Los métodos de equilibrio límite, tal como es el caso de la aproximación mediante una superficie de deslizamiento bilineal o bloques deslizantes (Gässler y Gudehus, 1981), pueden modelar de buena forma el potencial mecanismo de falla generado en muros de soil nailing. Sin embargo, el uso de este tipo de modelos para estudiar los aspectos de estabilidad externa de muros de soil nailing, debe considerar la importante influencia de la variabilidad de los parámetros geomecánicos del suelo *in-situ*, tales como, peso unitario, cohesión, ángulo de fricción interna y resistencia de arranque, así como adicionalmente la altura del muro de soil nailing. Para cuantificar la influencia de la variabilidad de estos factores sobre la estabilidad externa de muros de soil nailing, ha sido desarrollado un diseño de experimental usando en conjunto métodos de equilibrio límite y diseño factorial 2^k , lo cual es discutido con detalles en las siguientes secciones.

3. Metodología

3.1. Diseño Factorial 2^k

El diseño factorial ha sido ampliamente utilizado en experimentos que involucran varios factores, donde es necesario investigar los efectos conjuntos de los factores sobre una variable de respuesta. Por efectos conjuntos de los factores, generalmente nos referimos a los principales efectos e interacciones entre los distintos factores que intervienen en la respuesta. Un caso especial de diseño factorial es aquel en el que cada uno de los factores k de interés tiene sólo dos niveles. Debido a que cada réplica de dicho diseño tiene exactamente 2 ensayos experimentales, este diseño generalmente se denominan diseño factorial 2^k . Una réplica completa de este tipo de diseño experimental requiere $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observaciones. (Montgomery, 2001), (Myers y Montgomery, 2002), (Myers et al., 2016) discuten y analizan en detalle este tipo de diseño experimental.

El diseño factorial 2^k proporciona un número pequeño de experimentos, con el cual puede ser estudiada la influencia de k factores sobre una respuesta. En el presente estudio, tal como se mencionó anteriormente, han sido considerados cinco factores para el diseño experimental, es decir, $k = 5$. Por lo tanto, el análisis queda restringido al método de diseño factorial 2^5 .



3.2. Modelos de Equilibrio Límite

Para demostrar la aplicación de la metodología propuesta, es usado un muro de soil nailing vertical. La (Figura 3) muestra la geometría completa del muro de soil nailing. Debido a que el foco de este trabajo es estudiar la influencia de la variabilidad de los parámetros geomecánicos del suelo residual in-situ (producto de la meteorización y posterior descomposición de roca granítica) y la altura del muro de soil nailing, todos los demás parámetros involucrados en el análisis de estabilidad externa han sido considerados de forma determinística, y son indicados en la (Tabla 1). Es así como, la altura del muro de soil nailing, el peso unitario, la cohesión, el ángulo de fricción interna y la resistencia de arranque del suelo in-situ han sido considerados de forma probabilística.

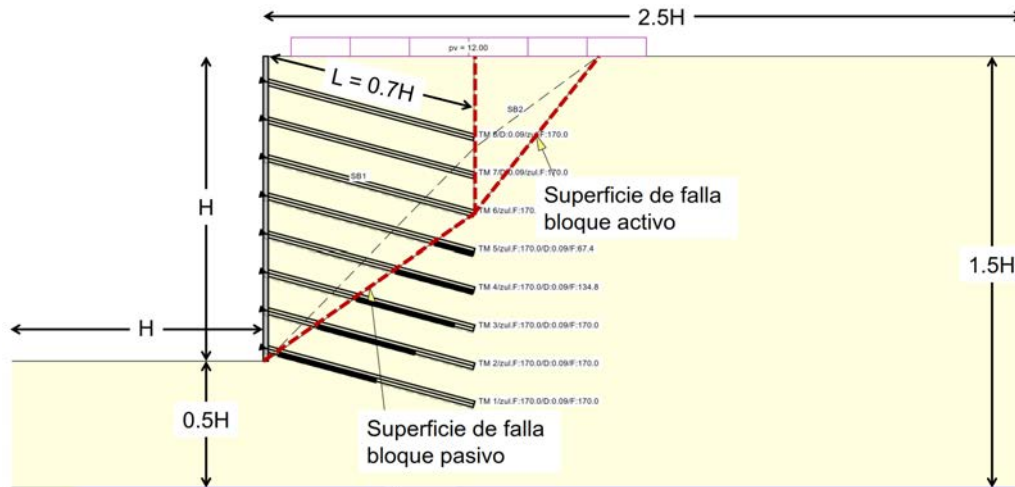


Figura 3. Geometría global del muro de soil nailing y el mecanismo de falla

Tabla 1. Parámetros determinísticos del muro de soil nailing usados en los modelos de equilibrio límite

Parámetro	Valor
Coefficiente de aceleración horizontal, k_h [-]	0.20
Sobrecarga, q [kPa]	12
Longitud de los nails, L [m]	$0.70H$
Diámetro de los nails, D [mm]	90
Inclinación de los nails, α [°]	-15
Resistencia de los nails, T_{adm} [kN]	170
Espaciamiento entre nails, S [m]	1.50
Inclinación, β [°]	90
Espesor revestimiento, e [cm]	20
Resistencia hormigón revestimiento, f'_c [MPa]	25
Resistencia malla revestimiento, F_y [MPa]	500

La metodología propuesta puede ser desarrollada con un rango de métodos de equilibrio límite. Para demostrar su aplicación, ha sido desarrollada usando una geometría simple (muro de soil nailing vertical), sometida a una condición de carga pseudo-estática, modelada usando el software GGU-Stability (GGU, 2016). Este software comercial puede modelar el muro de soil nailing mediante el método de bloques deslizantes, cuya consideración principal es que el mecanismo de falla es generado por la interacción de dos bloques, uno pasivo y otro activo. (Villalobos et al., 2013), (Villalobos et al., 2018) han estudiado la idoneidad del uso de este método para evaluar la estabilidad de muros de soil nailing bajo condición de carga pseudo-estática en suelos residuales de roca granítica.



Los parámetros determinísticos usados en todos los modelos de equilibrio límite, incluyendo el coeficiente de aceleración horizontal máxima del terreno, la sobrecarga en el coronamiento, la inclinación del muro de soil nailing, el diámetro, longitud, resistencia, inclinación y espaciamento ($S_H = S_V$, i.e. espaciamento horizontal igual al espaciamento vertical) de los nails, y el tipo de revestimiento, son resumidos en la Tabla 1. El software GGU-Stability automáticamente define el número de potenciales superficies de deslizamiento, y arroja como resultados los valores de los factores de seguridad externa mínimos (i.e. fallas: global, deslizamiento y capacidad de soporte).

3.3. Diseño Factorial 2⁵

La (Tabla 2) resume la distribución asignada a cada parámetro probabilístico y sus momentos estadísticos. En esta tabla H representa la altura del muro de soil nailing, G , C , F y R , el peso unitario, la cohesión, el ángulo de fricción interna y la resistencia del arranque del suelo residual in-situ, respectivamente. Cabe mencionar, que en términos generales, los parámetros H y G representan parte de las cargas actuando sobre el muro de soil nailing; mientras que C , F y R son parte de la resistencia del muro de soil nailing. Notar que los valores relativos, máximo y mínimo de cada factor o parámetro de interés han sido estimados mediante la siguiente expresión (Equation 1):

$$x_{i \max/\min} = \mu_{xi} \pm 1.65\sigma_{xi} \quad (1)$$

donde, μ_{xi} y σ_{xi} son la media y desviación estándar del parámetro de interés i . La selección de los valores característicos de los parámetros geomecánicos (δ , c , ϕ , y r_s) está basada en un intervalo de confianza del 95% (Orr, 2000). Estos valores están basados en el supuesto que los parámetros geomecánicos del suelo residual in-situ siguen una distribución Normal, y que los valores relativos de límite superior (máximo) e inferior (mínimo) tienen probabilidades del 5% y 95% de ser excedidos, respectivamente. Además, los valores de σ_{xi} considerados para los parámetros geomecánicos, han sido corroborados basándose en los valores de COV reportados en la literatura técnica (Phoon y Kulhawy, 1999); (Duncan, 2000).

Tabla 2. Momentos estadísticos y parámetros probabilísticos para diseño factorial 2⁵

Parámetro	Designación	Distribución	m	s	x_{min}	x_{max}
Altura, H [m]	H	-	-	-	3.0	12.0
Peso unitario, δ [kN/m ³]	G	Normal	18.5	1.1	16.7	20.3
Cohesión, c [kPa]	C	Normal	10	3.2	4.2	15.8
Angulo de fricción interna, ϕ [°]	F	Normal	32	2	28.7	35.3
Resistencia de arranque, r_s [kPa]	R	Normal	150	45	75.8	224.3

El diseño experimental considera el efecto de cinco factores en un proceso que es llamado diseño factorial 2⁵, y con esto son generadas 32 combinaciones distintas del muro de soil nailing. La (Tabla 3) resume las combinaciones definidas para cada realización del muro de soil nailing, basándose en los valores relativos máximo y mínimo de cada factor de interés. La realización #1 representa la combinación del valor relativo mínimo estimado para cada factor, mientras la realización #32 representa la combinación del valor relativo máximo estimado para cada factor. Las otras 30 realizaciones son generadas basándose en combinaciones de valores relativos máximos y mínimos de cada factor. Con la generación de estas 32 realizaciones es posible identificar los factores de interés más importantes dentro del proceso de diseño.



Tabla 3. Diseño factorial 2^5 codificado y factores de seguridad calculados

Realización	<i>H</i>	<i>G</i>	<i>C</i>	<i>F</i>	<i>R</i>	FS_G	FS_D	FS_{CS}
1	-	-	-	-	-	0.80	2.35	2.05
2	+	-	-	-	-	0.64	2.06	1.31
3	-	+	-	-	-	0.72	2.23	1.80
4	+	+	-	-	-	0.57	2.01	1.24
5	-	-	+	-	-	1.51	3.33	4.91
6	+	-	+	-	-	0.85	3.04	2.80
7	-	-	-	+	-	0.96	3.19	5.40
8	+	-	-	+	-	0.81	3.41	5.17
9	-	-	-	-	+	1.24	2.35	2.05
10	+	-	-	-	+	0.94	2.06	1.31
11	-	+	+	-	-	1.36	3.22	4.39
12	+	+	+	-	-	0.75	2.87	2.52
13	-	+	-	+	-	0.87	3.22	5.27
14	+	+	-	+	-	0.72	3.34	5.00
15	-	+	-	-	+	1.09	2.23	1.80
16	+	+	-	-	+	0.84	2.02	1.24
17	-	-	+	+	-	1.70	4.03	10.14
18	+	-	+	+	-	1.02	3.89	6.97
19	-	-	+	-	+	1.81	3.33	4.91
20	+	-	+	-	+	1.15	3.04	2.80
21	-	-	-	+	+	1.52	3.19	5.40
22	+	-	-	+	+	1.19	3.41	5.17
23	-	+	+	+	-	1.51	3.94	9.28
24	+	+	+	+	-	0.90	3.84	6.70
25	-	-	+	+	+	2.10	4.03	10.14
26	+	+	+	-	+	1.01	2.87	2.52
27	-	+	+	-	+	1.71	3.22	4.39
28	+	+	-	+	+	1.06	3.34	5.00
29	-	+	-	+	+	1.34	3.22	5.27
30	+	-	+	+	+	1.40	3.89	6.97
31	-	+	+	+	+	1.99	3.94	9.28
32	+	+	+	+	+	1.24	3.84	6.70

4. Resultados

Como ha sido mencionado anteriormente, los factores de seguridad por falla global (FS_G), por deslizamiento (FS_D) y por capacidad de soporte (FS_{CS}), son el criterio de aceptabilidad para evaluar la estabilidad externa de muros de soil nailing. En vista de la importancia de este criterio, a continuación, son analizados los principales resultados de este trabajo.

4.1 Factores de Seguridad

Las tres últimas columnas de la (Tabla 3) indican los valores de factores de seguridad obtenidos de cada realización del muro de soil nailing mediante el método de bloques deslizantes. Para la combinación #4, en la cual todos los factores de interés, excepto *H* y *G*, tienen el valor relativo mínimo, se ha obtenido el menor valor de todos los factores de seguridad; mientras que para la combinación #25, en la cual todos los factores de interés, excepto *H* y *G*, tienen el valor relativo máximo, se ha obtenido el mayor valor de todos los factores de seguridad. La influencia de la altura sobre la estabilidad del muro de soil nailing puede ser observada como un factor significativo en el análisis. Las (Figura 4) y (Figura 5) muestran los mecanismos de falla obtenidos para los muros de soil nailing, considerando experimentos de mínima y máxima altura, respectivamente. La Fig. 4a muestra el



mecanismo de falla para la combinación #25, que es justamente donde se han obtenido los mayores valores de factores de seguridad, con valores relativos máximos de C , F y R , exceptuando H y G , es decir, con los máximos valores de resistencia y mínimos valores de solicitación; mientras que la (Figura 5a) muestra el mecanismo de falla para la combinación #4, donde se han obtenido los menores valores de factores de seguridad, con valores relativos mínimos de C , F y R , exceptuando H y G , es decir, con los mínimos valores de resistencia y máximos valores de solicitación. La (Figura 4b) muestra el mecanismo de falla para la combinación #1, donde se han considerado valores relativos mínimos de todos los factores de interés, es decir, de resistencia y solicitación; mientras que la Fig. 5b muestra el mecanismo de falla para la combinación #32, donde se han considerado valores relativos máximos de todos los factores de interés, es decir, de resistencia y solicitación.

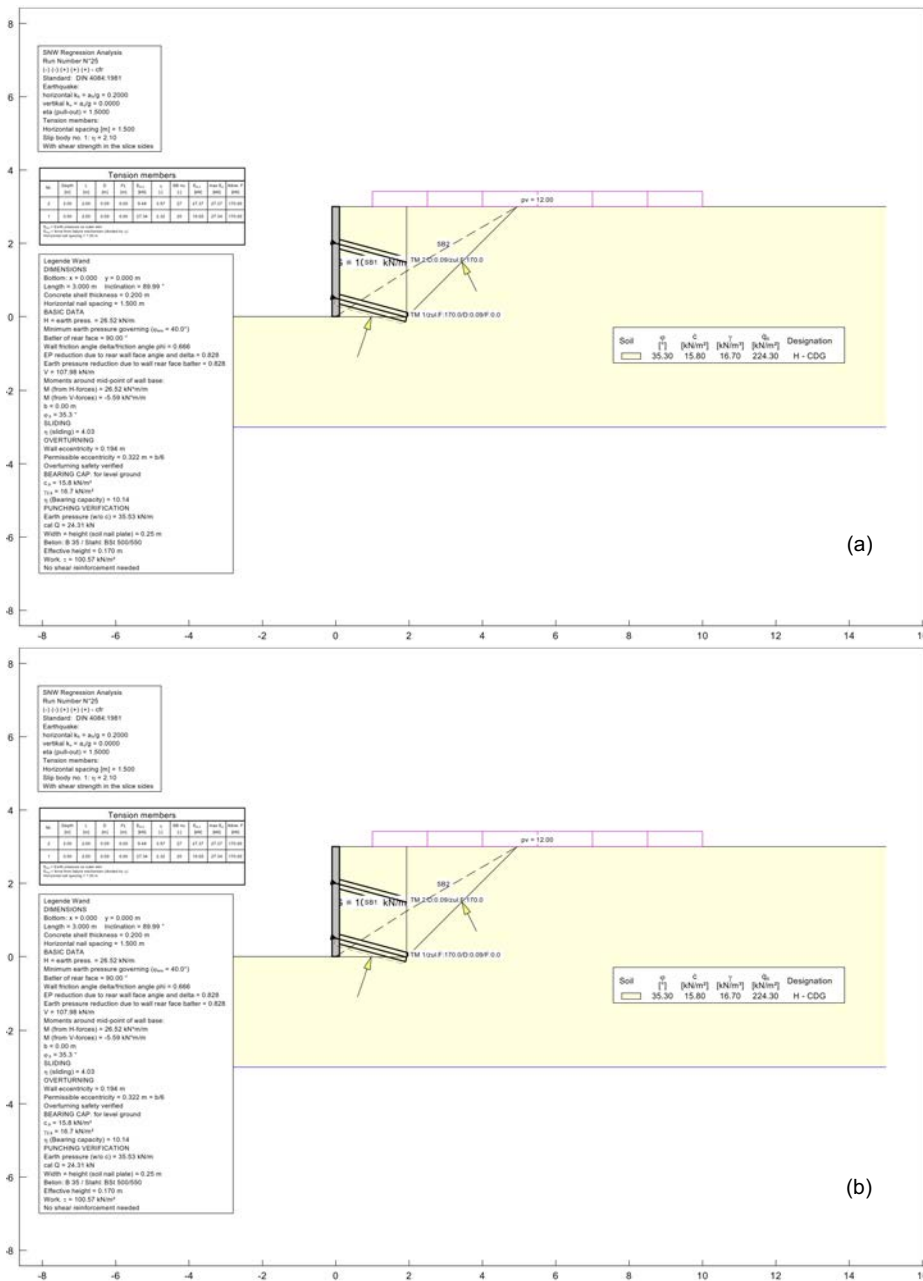


Figura 4. Mecanismos de falla: (a) combinación #25, mayores valores de FS, con (-)(-)(+)(+)(+), (b) combinación #1, con (-)(-)(-)(-)(-)



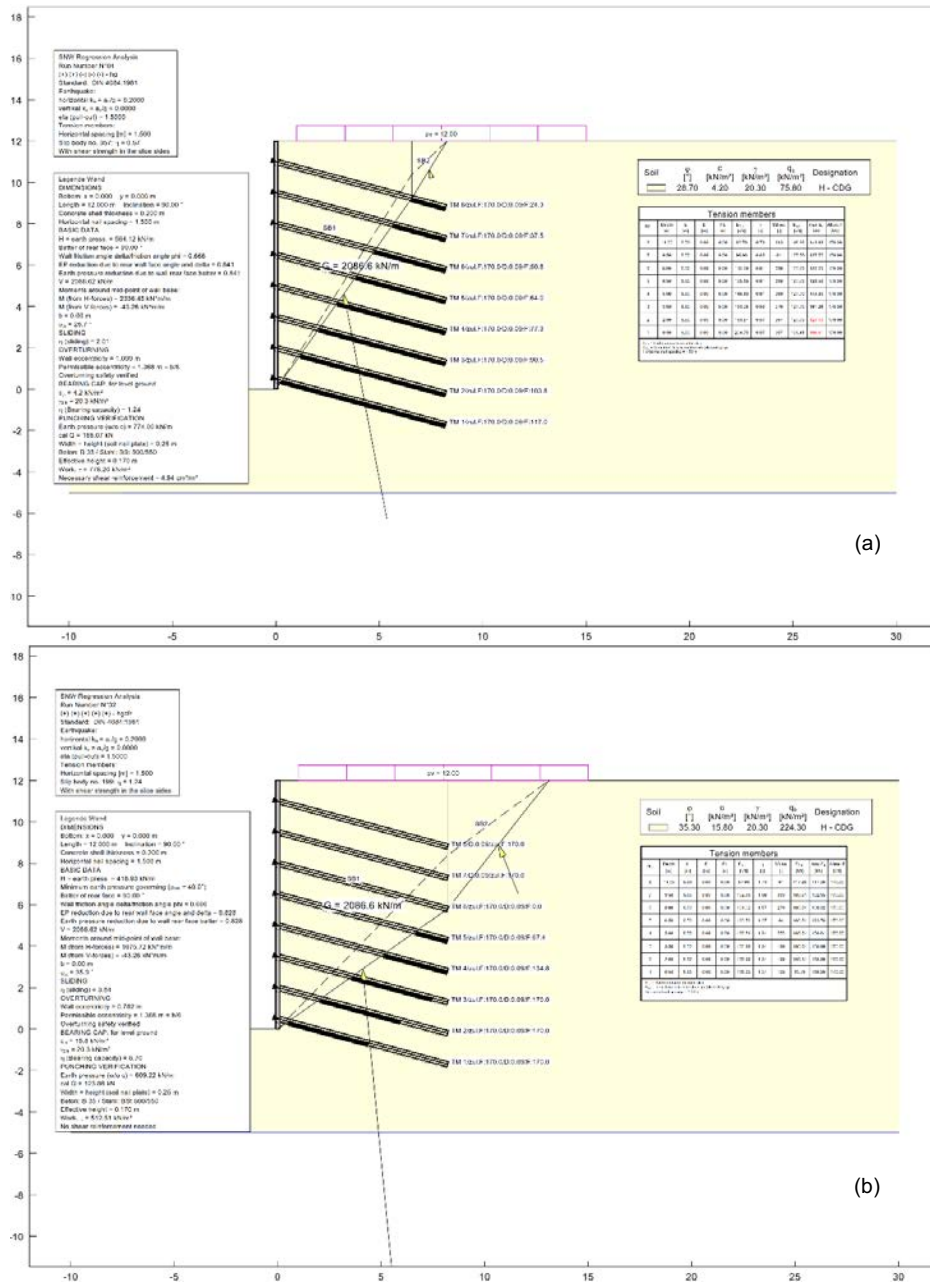


Figura 5. Mecanismos de falla: (a) combinación #4, menores valores de F_0 , con (+)(+)(-)(-), (b) combinación #32, con (+)(+)(+)(+)

4.2 Análisis de Sensibilidad y ANOVA

Para identificar cuáles son los factores de interés que tienen una mayor influencia sobre la estabilidad externa de muros de soil nailing, ha sido desarrollado el análisis de sensibilidad y ANOVA del proceso, determinando la suma de cuadrados, el efecto estimado, la suma de mínimos cuadrados, y los valores F_0 y p , de los cinco factores de interés evaluados y sus interacciones dobles (Tabla 4) (Tabla 5) (Tabla 6). En este estudio, ha sido considerado un nivel de importancia $\alpha = 0.05$, lo cual ha sido sugerido por (Montgomery, 2001), (Myers y Montgomery, 2002), (Myers et al., 2016).

Para cada fuente de variabilidad o factor de interés, el valor de F_0 (parámetro estadístico de Fisher) ha sido usado para evaluar el nivel de importancia de cada factor de interés dentro del proceso. El valor F_0 ha sido calculado por la división de la suma de cuadrados de cada factor de interés por el error de la suma de cuadrados. Luego, el valor de F_0 es comparado con el valor F (obtenido del test-F) de cada factor de interés. Si F_0 es mayor que



F , la hipótesis nula del diseño es rechazada, y el correspondiente factor de interés es identificado como una fuente importante de variabilidad. Además, si el correspondiente valor p de cada factor de interés es menor que el nivel de importancia considerado ($\alpha = 0.05$), la hipótesis nula es rechazada y el factor de interés es identificado como de alta importancia.

Tabla 4. Análisis de sensibilidad y ANOVA para FS_C

Factor	Efecto Estimado	Coef. de Regresión	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Mínimos Cuadrados	F_0	p
H	-0.44625	0.00553	1.59311	1	1.59311	2641.43005	0.00000
G	-0.12250	0.00393	0.12005	1	0.12005	199.04663	0.00000
C	0.41875	0.07770	1.40281	1	1.40281	2325.90674	0.00000
F	0.20875	0.03582	0.34861	1	0.34861	578.01036	0.00000
R	0.37125	0.00097	1.10261	1	1.10261	1828.16580	0.00000
HG	0.00875	0.00054	0.00061	1	0.00061	1.01554	0.32858
HC	-0.22500	-0.00431	0.40500	1	0.40500	671.50259	0.00000
HF	-0.01000	-0.00034	0.00080	1	0.00080	1.32642	0.26636
HR	-0.05000	-0.00007	0.02000	1	0.02000	33.16062	0.00003
GC	-0.01125	-0.00054	0.00101	1	0.00101	1.67876	0.21347
GF	-0.01125	-0.00095	0.00101	1	0.00101	1.67876	0.21347
GR	-0.01125	-0.00004	0.00101	1	0.00101	1.67876	0.21347
CF	0.00500	0.00013	0.00020	1	0.00020	0.33161	0.57273
CR	-0.02000	-0.00002	0.00320	1	0.00320	5.30570	0.03501
FR	0.04750	0.00009	0.01805	1	0.01805	29.92746	0.00005
Error	-	-	0.009650	16	0.000603	-	-
Total	-	-	5.027750	31	-	-	-

Tabla 5. Análisis de sensibilidad y ANOVA para FS_D

Factor	Efecto Estimado	Coef. de Regresión	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Mínimos Cuadrados	F_0	p
H	-0.13125	-0.15879	0.13781	1	0.13781	62.88770	0.00000
G	-0.07875	-0.09732	0.04961	1	0.04961	22.63957	0.00021
C	0.79375	0.23714	5.04031	1	5.04031	2300.03565	0.00000
F	0.96875	0.09624	7.50781	1	7.50781	3426.02496	0.00000
R	0.00000	0.00000	0.00000	1	0.00000	0.00000	1.00000
HG	-0.00625	-0.00039	0.00031	1	0.00031	0.14260	0.71067
HC	-0.08875	-0.00170	0.06301	1	0.06301	28.75437	0.00006
HF	0.15625	0.00526	0.19531	1	0.19531	89.12656	0.00000
HR	0.00000	0.00000	0.00000	1	0.00000	0.00000	1.00000
GC	-0.02625	-0.00126	0.00551	1	0.00551	2.51551	0.13229
GF	0.03375	0.00284	0.00911	1	0.00911	4.15829	0.05830
GR	0.00000	0.00000	0.00000	1	0.00000	0.00000	1.00000
CF	-0.15875	-0.00415	0.20161	1	0.20161	92.00143	0.00000
CR	0.00000	0.00000	0.00000	1	0.00000	0.00000	1.00000
FR	0.00000	0.00000	0.00000	1	0.00000	0.00000	1.00000
Error	-	-	0.03506	16	0.002191	-	-
Total	-	-	13.24549	31	-	-	-



Tabla 6. Análisis de sensibilidad y ANOVA para FS_{CS}

Factor	Efecto Estimado	Coef. de Regresión	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Mínimos Cuadrados	F_0	p
<i>H</i>	-1.44125	0.0219	16.6176	1	16.6176	281.905	0.000000
<i>G</i>	-0.31875	0.0381	0.8128	1	0.8128	13.789	0.001889
<i>C</i>	2.55875	0.0870	52.3776	1	52.3776	888.544	0.000000
<i>F</i>	4.11375	0.5827	135.3835	1	135.3835	2296.673	0.000000
<i>R</i>	0.00000	0.0000	0.0000	1	0.0000	0.000	1.000000
<i>HG</i>	0.12125	0.0075	0.1176	1	0.1176	1.995	0.176954
<i>HC</i>	-0.99125	-0.0190	7.8606	1	7.8606	133.349	0.000000
<i>HF</i>	-0.12125	-0.0041	0.1176	1	0.1176	1.995	0.176954
<i>HR</i>	0.00000	0.0000	0.0000	1	0.0000	0.000	1.000000
<i>GC</i>	-0.16375	-0.0078	0.2145	1	0.2145	3.639	0.074553
<i>GF</i>	-0.03875	-0.0033	0.0120	1	0.0120	0.204	0.657744
<i>GR</i>	0.00000	0.0000	0.0000	1	0.0000	0.000	1.000000
<i>CF</i>	0.50375	0.0132	2.0301	1	2.0301	34.439	0.000024
<i>CR</i>	0.00000	0.0000	0.0000	1	0.0000	0.000	1.000000
<i>FR</i>	0.00000	0.0000	0.0000	1	0.0000	0.000	1.000000
Error	-	-	0.9432	16	0.0589	-	-
Total	-	-	216.4872	31	-	-	-

4.3 Modelos de Regresión y Superficies de Respuesta

Las (Ecuación 2) (Ecuación 3) (Ecuación 4) usan los coeficientes de regresión del modelo de interacción lineal de dos factores (tercera columna de las (Tabla 4) (Tabla 5) (Tabla 6)), y establecen una relación matemática simple para cada modelo de predicción de los factores de seguridad. Estas funciones han sido usadas para construir las superficies de respuesta, las que pueden ser usadas para predecir los valores de los factores de seguridad para distintas realizaciones arbitrarias, basándose en la variabilidad de los parámetros geomecánicos del suelo residual in-situ y la altura del muro de soil nailing. Estas funciones son de la siguiente forma:

$$FS_G = -0.299 + 0.00553 \cdot H + 0.00393 \cdot G + 0.0777 \cdot C + 0.0358 \cdot F + 0.000970 \cdot R - 0.00431 \cdot H \cdot C - 0.0000748 \cdot H \cdot R + 0.0000969 \cdot F \cdot R \quad (2)$$

$$FS_D = -0.159 \cdot H + 0.237 \cdot C + 0.0962 \cdot F - 0.00415 \cdot CF \quad (3)$$

$$FS_{CS} = -9.164 + 0.0219 \cdot H + 0.0870 \cdot C + 0.5827 \cdot F - 0.911 \cdot H \cdot C \quad (4)$$

Las superficies de respuesta pueden ser representadas como gráficas tridimensionales que muestran el valor de los factores de seguridad versus la variación de otros dos factores de entrada, mantenido constante un valor medio de todos los otros factores. Las superficies de respuesta indican el rango de factores de seguridad en la región de interés. Además, teniendo la superficie de respuesta, la combinación de los factores de entrada que alcanzan los valores máximo y mínimo, es decir, los escenarios mejor y peor, respectivamente, pueden ser rápidamente identificados, incluso aun cuando estos no hayan sido realizados en un modelo de equilibrio límite.



Las gráficas de las (Figura 6) (Figura 7) (Figura 8) muestran las superficies de respuesta obtenidas para los modelos de predicción lineal, con interacción entre dos factores de interés. Para el FS_G los cinco factores de interés son de importancia individual, mientras que sólo la interacción doble entre la altura y la cohesión, la altura y la resistencia de arranque, la cohesión y la resistencia de arranque, y el ángulo de fricción y la resistencia de arranque, son de importancia. Para el FS_D todos los factores de interés, excepto la resistencia de arranque, son de importancia individual, mientras que sólo la interacción doble entre la altura y la cohesión, la altura y el ángulo de fricción, y la cohesión y el ángulo de fricción, son de importancia. Finalmente, para el FS_{CS} , de la misma forma que para FS_D , todos los factores de interés, excepto la resistencia de arranque, son de importancia individual, y sólo la interacción doble entre la altura y la cohesión, y la cohesión y el ángulo de fricción, son de importancia.

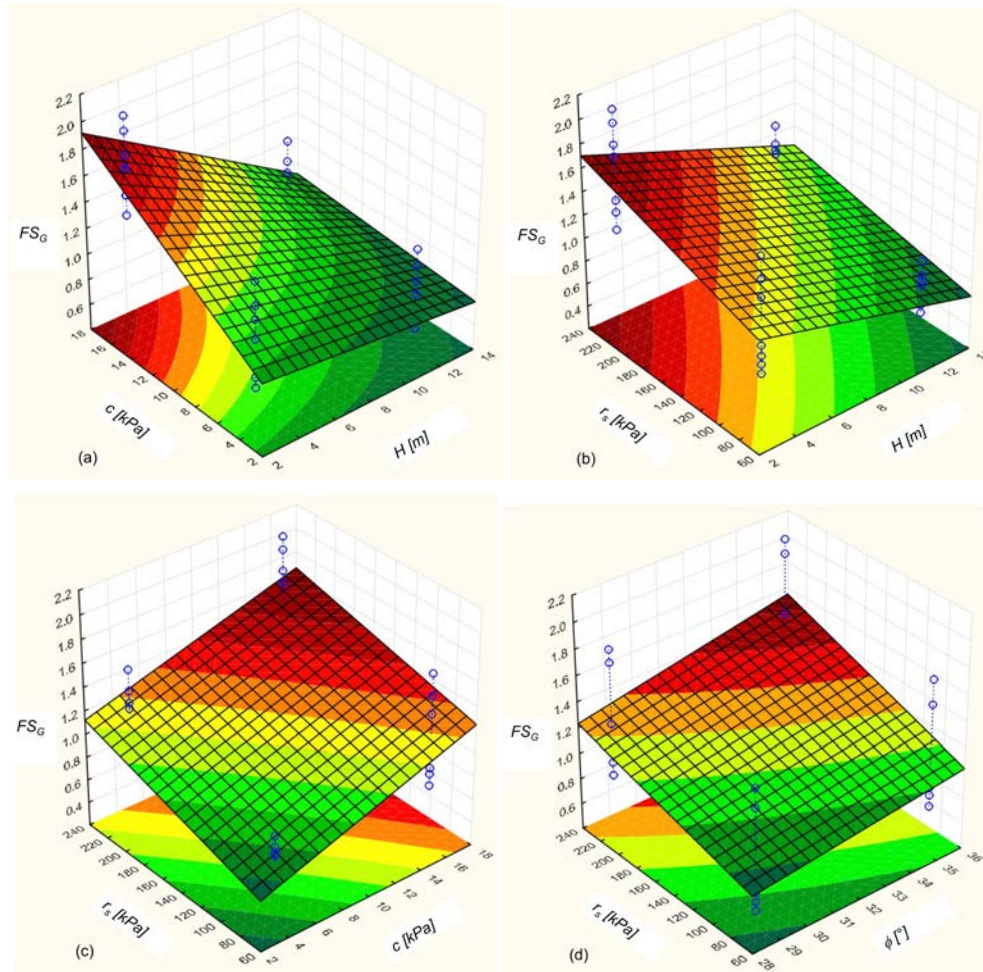


Figura 6. Superficies de respuesta para FS_G , interacción: (a) $H - C$, (b) $H - R$, (c) $C - R$, (d) $F - R$



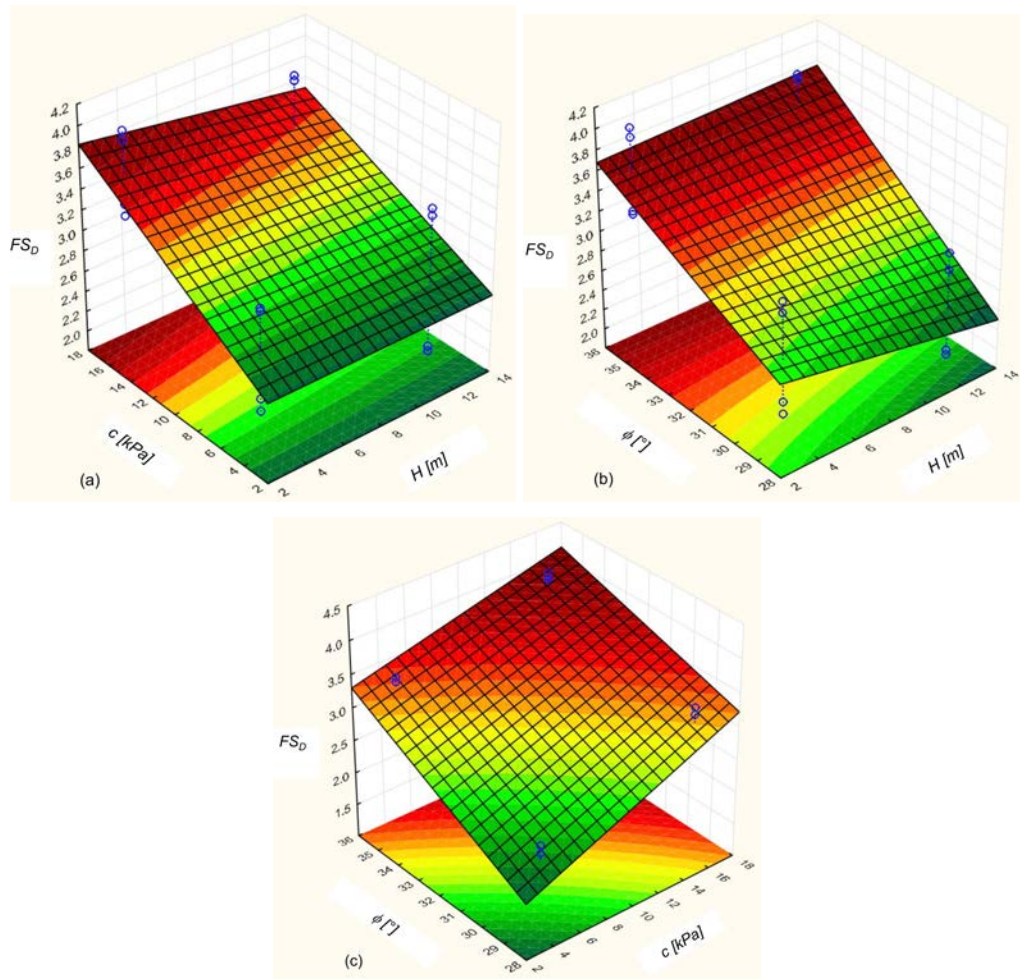


Figura 7. Superficies de respuesta para FS_D , interacción: (a) $H - C$, (b) $H - F$, (c) $C - F$

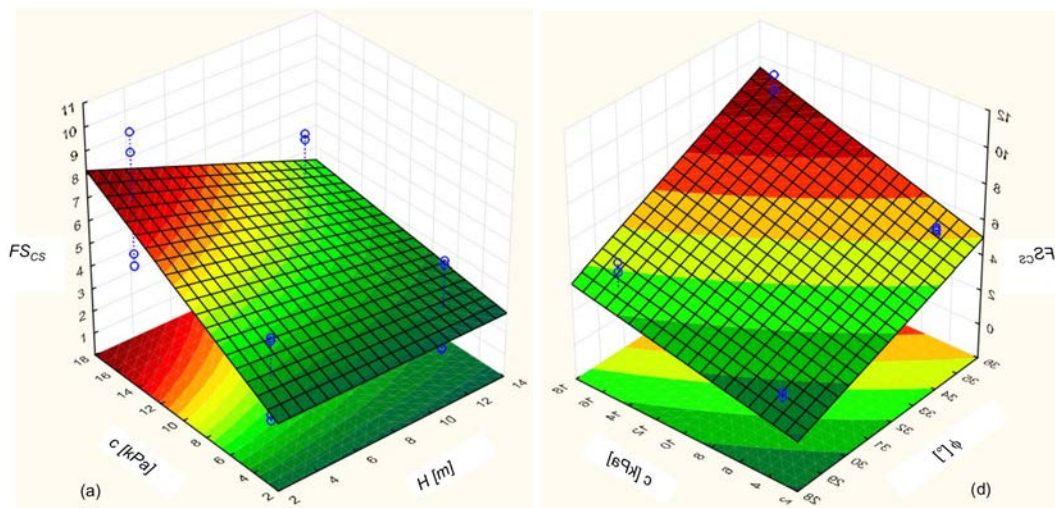


Figura 8. Superficies de respuesta para FS_{CS} , interacción: (a) $H - C$, (b) $C - F$

4.4 Efecto de la Altura

La disminución del valor de los factores de seguridad se ve reflejado con el aumento de la altura del muro de soil nailing, y viceversa. Esto es observado en la (Tabla 3), donde con $H (-)$ se obtienen los mayores valores de los factores de seguridad, mientras que con $H (+)$ se obtienen los menores valores de los factores de seguridad. Además, el valor del efecto estimado (Tabla 4) (Tabla 5) (Tabla 6) de la altura en todos los casos es negativo, es decir, aumenta la inestabilidad externa del muro de soil nailing. Para el caso de FS_D se tiene el menor valor de efecto estimado ($EE_D = -0.13125$), mientras que para el caso de FS_{CS} se tiene el mayor valor de efecto estimado ($EE_{CS} = -1.44125$), lo cual muestra que el FS_{CS} es el que se ve más afectado por el aumento de la altura del muro de soil nailing.

Las (Figura 6a) (Figura 6b), (Figura 7a) (Figura 7b) y (Figura 8a) muestran las superficies de respuesta donde el valor de los factores de seguridad está en función de la altura del muro de soil nailing. Para todos los casos de interacción doble, excepto para la interacción $H-F$ de FS_D , se puede observar el efecto negativo de la altura del sobre el valor de los factores de seguridad.

4.5 Efecto de los Parámetros Geomecánicos

El aumento del valor de los factores de seguridad se ve reflejado con el aumento de la cohesión, el ángulo de fricción interna y la resistencia de arranque del suelo residual *in-situ*, y viceversa. Esto es observado en la (Tabla 3), donde con $C (+)$, $F (+)$ y $R (+)$ se obtienen los mayores valores de los factores de seguridad, mientras que con $C (-)$, $F (-)$ y $R (-)$ se obtienen los menores valores de los factores de seguridad. Además, el valor del efecto estimado de C , F y R (Tabla 4) (Tabla 5) (Tabla 6) en todos los casos es positivo, es decir, aumentan la estabilidad externa del muro de soil nailing. Los resultados de análisis de sensibilidad y ANOVA (Tabla 4) (Tabla 5) (Tabla 6) muestran que la interacción entre el peso unitario del suelo residual *in-situ* (G) y los demás factores de interés no es de alta importancia.

Las (Figura 6a), (Figura 6c), (Figura 7a), (Figura 7c) y (Figura 8a) (Figura 8b) muestran las superficies de respuesta donde el valor de los factores de seguridad está en función de la cohesión del suelo residual *in-situ*. Para todos los casos de interacción doble, se puede observar el efecto positivo de la cohesión sobre el valor de los factores de seguridad. Las (Figura 6d), (Figura 7b) y (Figura 8b) muestran las superficies de respuesta donde el valor de los factores de seguridad está en función del ángulo de fricción del suelo residual *in-situ*. Para todos los casos de interacción doble, se puede observar el efecto positivo del ángulo de fricción sobre el valor de los factores de seguridad. Las (Figura 6b) (Figura 6d) muestran las superficies de respuesta donde el valor de FS_C está en función de la resistencia de arranque del suelo residual *in-situ*. Para todos los casos de interacción doble, se puede observar el efecto positivo de la resistencia de arranque sobre el valor de FS_C . Para los casos de FS_D y FS_{CS} se tiene un efecto estimado nulo de la resistencia de arranque del suelo residual *in-situ*.

4.6 Factores de Seguridad Estimados

La (Figura 9) muestra las gráficas de los factores de seguridad observados versus los factores de seguridad estimados mediante los modelos de regresión estadística dados por las (Ecuación 2) (Ecuación 3) (Ecuación 4), para las 32 realizaciones de modelos de equilibrio límite. De estas gráficas se observa que en todos los casos los modelos de regresión pueden predecir de buena forma el valor de los factores de seguridad, teniendo una bondad de ajuste adecuada en todos los casos ($R^2 > 0.99$).



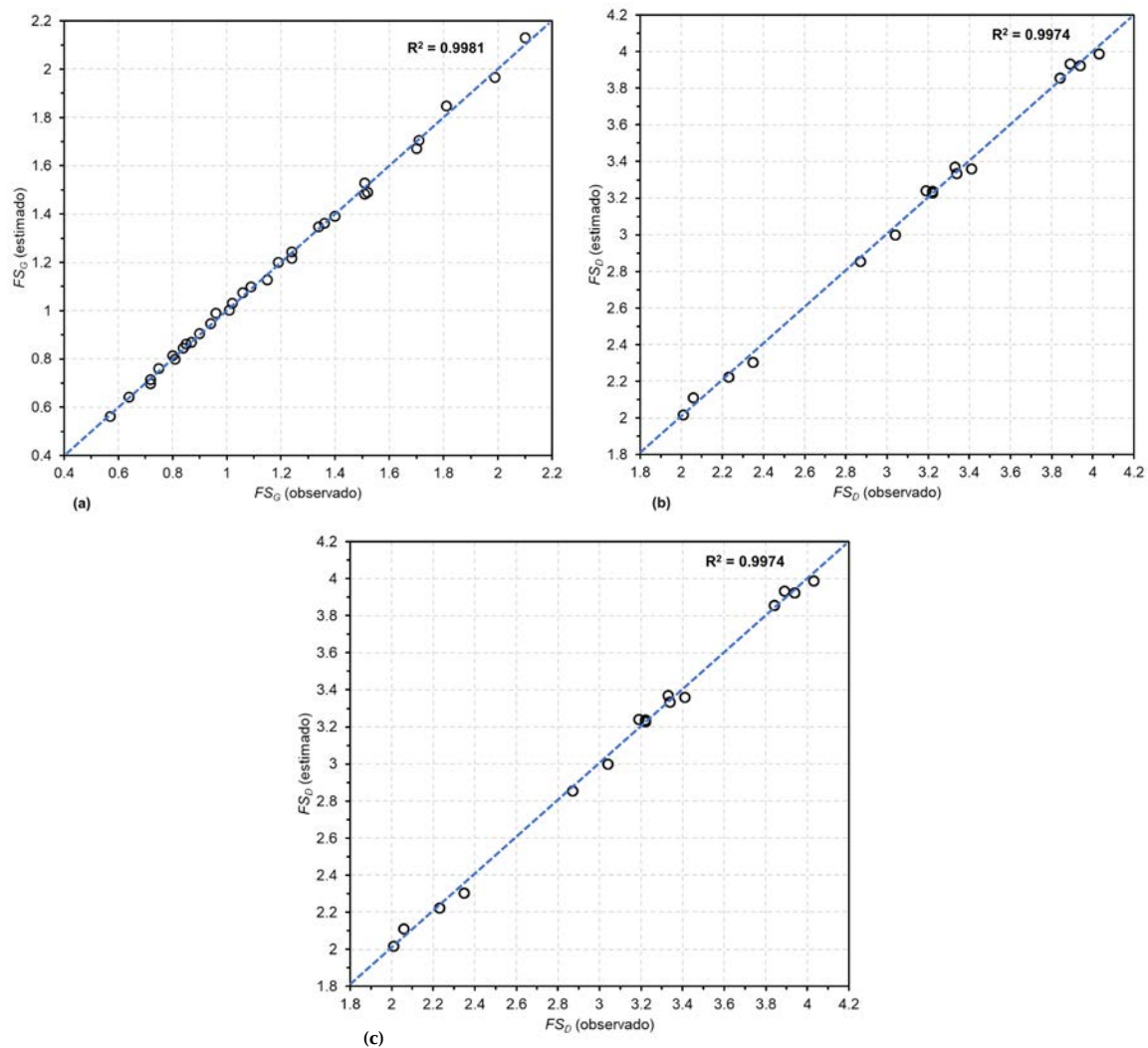


Figura 9. Factores de seguridad observados (modelos de equilibrio límite) versus estimados (modelos de regresión estadísticos) para las 32 realizaciones: (a) global, (b) deslizamiento, y (c) capacidad de soporte

5. Casos de estudio

Los modelos desarrollados en este documento se utilizaron para determinar los valores de los factores de seguridad de otras referencias de muros de soil nailing realizados anteriormente y con suficiente información para permitir los cálculos. Se seleccionaron como casos de estudio cuatro investigaciones previas que tenían la información correspondiente a altura de muro de soil nailing vertical y parámetros geomecánicos del suelo in-situ. La (Tabla 7) presenta los detalles de los cuatro casos de estudio. Para los cuatro casos estudiados se han calculado los factores de seguridad usando el software GGU-Stability y se han comparado con los estimados mediante los modelos de regresión propuestos.



Tabla 7. Casos de estudio usados para validar los modelos propuestos

Caso	Referencia	Parámetros	FS (calculado)	FS (estimado)	Error absoluto
(1)	Villalobos et al. (2013)	H = 8 m $\delta = 18.5$ kN/m ³ c = 10 kPa $\phi = 30^\circ$ $r_s = 200$ kPa	$FS_G = 1.32$ $FS_D = 4.00$ $FS_{CS} = 7.80$	$FS_G = 1.52$ $FS_D = 4.01$ $FS_{CS} = 7.70$	$DFS_G = 15,15\%$ $DFS_D = 0.25\%$ $DFS_{CS} = 1.28\%$
(2)	Gareh (2015)	H = 10 m $\delta = 20$ kN/m ³ c = 5 kPa $\phi = 32^\circ$ $r_s = 150$ kPa	$FS_G = 1.36$ $FS_D = 3.66$ $FS_{CS} = 9.10$	$FS_G = 1.30$ $FS_D = 3.70$ $FS_{CS} = 9.00$	$DFS_G = 4.41\%$ $DFS_D = 4.00\%$ $DFS_{CS} = 1.10\%$
(3)	Potgieter y Jacobsz (2019)	H = 8.5 m $\delta = 19$ kN/m ³ c = 3 kPa $\phi = 36^\circ$ $r_s = 109$ kPa	$FS_G = 1.51$ $FS_D = 4.11$ $FS_{CS} = 11.13$	$FS_G = 1.34$ $FS_D = 3.99$ $FS_{CS} = 11.62$	$DFS_G = 11,25\%$ $DFS_D = 2.92\%$ $DFS_{CS} = 4.40\%$
(4)	Peña et al. (2020)	H = 12.5 m $\delta = 18.5$ kN/m ³ c = 15 kPa $\phi = 38^\circ$ $r_s = 180$ kPa	$FS_G = 1.50$ $FS_D = 5.50$ $FS_{CS} = 10.20$	$FS_G = 1.73$ $FS_D = 5.36$ $FS_{CS} = 10.76$	$DFS_G = 15.33\%$ $DFS_D = 2.54\%$ $DFS_{CS} = 5.49\%$

De la (Figura 10) y en general, se puede ver que, para los cuatro casos de estudio, los modelos propuestos estimaron valores de factores de seguridad acordes con los calculados mediante el software GGU-Stability. Complementando los análisis con la Tabla 7 y para todos los resultados, el rango de error absoluto obtenido fue de 0.25 a 15.33 % (para FS_D y FS_G , respectivamente). En el 50% de los valores de factores de seguridad estimados, el modelo propuesto calculó un valor inferior al calculado. Considerando el número de variables involucradas y la baja variación de los resultados obtenidos, se concluye que el modelo propuesto predice satisfactoriamente el valor de los factores de seguridad que verifican la estabilidad externa de muros de soil nailing.

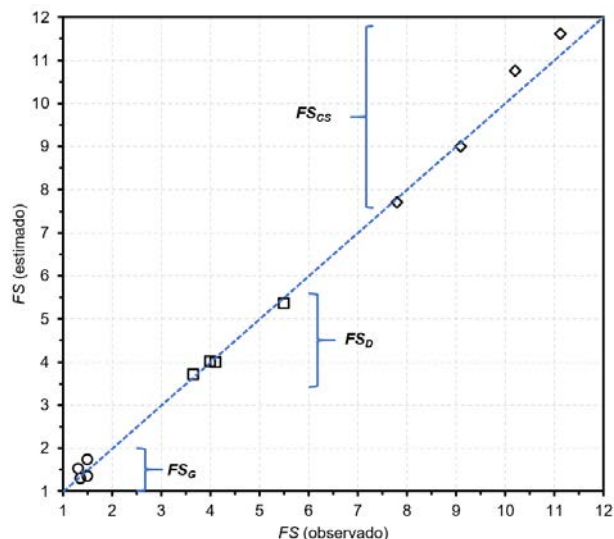


Figura 10. Comparación de los factores de seguridad calculados y los estimados mediante los modelos de regresión propuestos



6. Conclusiones

En este artículo ha sido evaluada la estabilidad externa de muros de soil nailing en suelos residuales de roca granítica bajo condición de carga pseudo-estática. Es conocido que existe una fuente de incertidumbre debido a la variabilidad de los factores que intervienen en el análisis, tales como la altura del muro de soil nailing y los parámetros geomecánicos del suelo *in-situ*. Por lo tanto, una evaluación de la estabilidad externa de muros de soil nailing mediante métodos determinísticos no es lo suficientemente clara para resolver el problema. De esta manera, en el presente estudio se ha evaluado la estabilidad externa de muros de soil nailing usando un método probabilístico que considera la variabilidad de cinco factores de interés que intervienen en el análisis.

Un diseño factorial 2^5 ha sido desarrollado para evaluar la influencia que tienen la altura del muro de soil nailing y los parámetros geomecánicos del suelo *in-situ* (δ , c , Φ y r_s), sobre los tres modos de falla externa (global, deslizamiento y capacidad de soporte), considerados comúnmente como criterio de aceptabilidad en este tipo de proyectos geotécnicos.

El modelo lineal con interacción doble proporciona un arreglo adecuado para los datos obtenidos. Con la generación de 32 realizaciones ha sido posible identificar los factores de interés que tienen mayor influencia sobre la estabilidad externa de muros de soil nailing. De especial interés ha sido la generación de superficies de respuesta o modelos predictivos que describen la respuesta de salida (*i.e.* factores de seguridad) para cualquier combinación arbitraria con parámetros de entrada distintos (altura del muro de soil nailing y parámetros geomecánicos del suelo *in-situ*).

Los factores de interés que tienen mayor influencia sobre la estabilidad externa de muros de soil nailing son la altura, en conjunto con la cohesión y el ángulo de fricción del suelo *in-situ*. Sólo para el caso del FS_G la resistencia de arranque del suelo *in-situ* es un factor de alta influencia sobre la respuesta. Las interacciones entre la altura, la cohesión, el ángulo de fricción y la resistencia de arranque del suelo *in-situ*, controlan significativamente la estabilidad externa de muros de soil nailing.

5. Referencias

- Alston, C. (1991)** Construction of a geogrid- and geocomposite-faced soil-nailed slope reinforcement project in Eastern Canada. Transportation Research Record 1330: 87-95.
- Babu, G.L.S.; Singh, V.P. (2009)** Deformation and stability regression models for soil nail walls. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering 162(4): 213-223.
- Briaud, J.L.; Lim, Y. (1997)** Soil-nailed wall under piled bridge abutment: simulation and guidelines. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(11): 1043-1050.
- Bruce, D.A.; Jewell, R.A. (1986)** Soil nailing: application and practice—part 1. Ground engineering, 19(8), pp 10-15
- Duncan, J.M. (2000)** Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 126 (4): 307-316.
- Gareh, S. (2015)** Parametric assessment of soil-nailing retaining structures in cohesive and cohesionless soils. Measurements 73: 341-351.
- Gässler, G.; Gudehus, G. (1981)** Soil nailing – some aspects of a new technique. In Proceedings of the 10th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden. Balkema, Rotterdam, the Netherlands, vol. 3, pp. 665-670.
- Gässler, G.; Gudehus, G. (1983)** Anchored walls – model tests and statistical design. In Proceedings of the 8th European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Finland, pp. 491-670.
- GGU-Stability (2016)** Slope Stability Analysis and Analysis of Soil Nailing and Reinforced Earth Walls. Civilserve GmbH, Braunschweig, Germany.
- Gu, H.; Yang, M.; Liu, K. (2014)** Experimental study on failure modes of composite structure with scattered row piles and soil nailing. ASCE Tunneling and Underground Construction GSP 242.
- Juran, I. (1987)** Nailed-soil retaining structures: design and practice. Transportation Research Record (1119):139-150.
- Juran, I.; Baudrand, G.; Farrag, K.; Elias, V. (1990)** Design of soil nailed retaining structures. In: Lambe PC, Hansen LA, editors. Design and performance of earth retaining structures - proceedings of a conference (Geotechnical Special Publication 25). Ithaca, NY, USA: ASCE.
- Lazarte, C.A.; Elias, V.; Espinoza, D.; Sabatini, P.J. (2003a)** Federal Highway Administration (FHWA) Geotechnical engineering circular No. 7 soil nail walls—Reference manual. Report FHWA0-IF-03-017, FHWA, Washington, DC.
- Lazarte, C.A.; Baecher, G.B.; Whitiam, J.L. (2003b)** New directions in LRFD for soil nailing design and specifications. LSD: International Workshop on Limit State Design in Geotechnical Engineering Practice, MIT, U.S.
- Lazarte, C.A. (2015)** Proposed Specifications for LRFD Soil-Nailing Design and Construction. NCHRP Report 701.
- Lazarte, C.A.; Robinson, H.; Gómez, J.E.; Baxter, A.; Cadden, A.; Berg, R. (2015)** Federal Highway Administration (FHWA) Geotechnical engineering circular No. 7 soil nail walls—Reference manual. Report FHWA-NHI-14-007, FHWA, Washington, DC.
- Lin, P.; Liu, J. (2017)** Analysis of resistance factors for LFRD of soil nail walls against external stability failures. Acta Geotechnica 12:157-169.
- Lin, P.; Liu, J.; Yuan, X.X. (2017)** Reliability analysis of soil nail walls against external failures in layered ground. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 143(1).
- Myers, R.H.; Montgomery, D.C. (2002)** Response surface methodology – process and product optimization using designed experiments. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.

ENGLISH VERSION.....

- Myers, R.H.; Montgomery, D.C.; Anderson-Cook, C.M.** (2016) Response surface methodology – process and product optimization using designed experiments. Fourth Ed. John Wiley & Sons.
- Montgomery, D.C.** (2001) Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons.
- Peña, M.A.; Villalobos, S.A.; Villalobos, F.A.** (2020) 2D Numerical evaluation of a vertical soil nail wall. Australian Geomechanics Journal 55: 39-48.
- Phoon, K.K.; Kulhawy, F.H.** (1999) Characterization of geotechnical variability. Canadian Geotechnical Journal 36 (4): 612-624.
- Potgieter, J.T.; Jacobsz, S.W.** (2019) Comparing the factors of safety from finite element and limit equilibrium analyses in lateral support design. Journal of the South African Institution of Civil Engineering 61 (4): 29-41.
- Villalobos, S.A.; Oróstegui, P.L.; Villalobos, F.A.** (2013) Re-assessing a soil nailing design in heavily weathered granite after a strong earthquake. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 72(2): 203-212.
- Villalobos, F.A.; Villalobos, S.A.; Oróstegui, P.L.** (2018) Observations from a parametric study of the seismic design of soil nailing. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Ground Improvement 171 (2): 112-122.
- Zevgolis, I.E.; Daffas, Z.A.** (2018) System reliability assessment of soil nail walls. Computers and Geotechnics 98: 232-242.

