

MURO DE GRAN ALTURA DE SUELO REFORZADO CON GEOMALLAS

Nombre del Autor:	Mayu Tincopa Heredia
Cargo e Institución:	<i>Ingeniero Geotécnico, Anddes Asociados S.A.C, Lima- Perú</i>
Correo Electrónico:	mayu.tincopa@anddes.com
Nombre del Autor:	José Daniel Ale Véliz
Cargo e Institución:	<i>Gerente de Proyectos, Anddes Asociados S.A.C, Lima- Perú</i>
Correo Electrónico:	<i>Doctorando en Ciencias de la Ingeniería - Universidad Nacional de Córdoba</i> jose.ale@anddes.com

RESUMEN

Este artículo presenta el diseño de un muro de contención de suelo reforzado con geomallas y paramento de gaviones de 18 m de altura y como parte de la estructura de una chancadora primaria en un proyecto minero.

Se debe tener en cuenta que la construcción del muro de suelo reforzado se realizará a una altitud de más de 5000 msnm, lo cual es poco usual. El diseño del muro consideró tanto análisis de seguridad al colapso (estado límite último), como la previsión de deformaciones admisibles (serviciabilidad), de acuerdo con normas internacionales. El trabajo también incluye la evaluación del comportamiento esfuerzo-deformación en 2D y 3D utilizando el método de elementos finitos, donde se ha evaluado las influencias del factor de seguridad.

En los últimos años se viene utilizando éste tipo de sistemas en el sector minero con muy buenos resultados debido a sus características y bajo costo, habiendo experiencia en obras tales como chancadoras, echaderos de tolvas, recrecimientos de diques, muros de contención, etc. Sus características técnicas y su costo en comparación con las soluciones tradicionales de muros de concreto armado, hacen de ésta solución una excelente alternativa que combina resistencia, flexibilidad, versatilidad y economía.

1. INTRODUCCIÓN

Los suelos son los materiales de construcción más abundantes y más empleados por la humanidad desde tiempos remotos. La idea de la asociación de elementos de refuerzo de suelo tuvo inicio hace millares de años. A mediados de 200 a.C. fueron construidos algunos taludes de suelos reforzados con raíces en China. En el Perú, en 1500 d.C., los Incas construyeron las veredas de suelo reforzado (mezclas de lana y arcilla), y los Chimú muros de adobe reforzados con bambú (ciudadela de Chan-Chan) hace más de 600 años en una zona de alta actividad sísmica. (Maldonado, 2010)

El uso de suelo reforzado con geomallas es una técnica de mejoramiento de la resistencia cortante del suelo, que ha sido bastante usada en todo el mundo, para varias aplicaciones de estabilidad de taludes, muros de contención, pavimentos, cimentaciones, entre otros (Cheng et al., 2008; Ale et al., 2006). En los últimos años, existe un gran desarrollo de los métodos de reducción de resistencia para análisis de estabilidad de taludes (Zienkiewicz et al., 1975; Ugai and Leshchinsky, 1995; Dawson et al 1999; Griffiths and Lane, 1999). Esta técnica es también adoptada por varios programas geotécnicos comerciales muy conocidos en elementos finitos. Los métodos de reducción de resistencia no requieren de asumir fuerzas de interdovelas y la principal ventaja es que esto se puede determinar automáticamente. Debido a la mejora del análisis en tres dimensiones (3D), se puede percibir que la estabilidad de taludes en tres dimensiones será más popular en el futuro, si las técnicas están en constante mejora. En la actualidad todavía hay una falta de investigación de los métodos 3D y sus aplicaciones bajo diferentes condiciones tridimensionales (3D).

La mayoría de los problemas de estabilidad de taludes se dan en tres dimensiones (3D); pocas son las situaciones donde estos se dan en dos dimensiones (2D) que representa una condición de estado plano de deformaciones. En la práctica los análisis de taludes en dos dimensiones (2D) son los más aceptados, ya que los valores de factor de seguridad calculados son menores comparados con los valores de factor de seguridad de los análisis tridimensionales (3D). Si esta comparación se realiza en estructuras convencionales de contención, los muros reforzados son los que ofrecen mayores ventajas: menor costo de construcción especialmente en muros altos; mayor flexibilidad que los muros de concreto armado o de gravedad por lo que son muy apropiados para áreas sísmicamente activas.

2. OBJETIVOS

Los principales objetivos del presente trabajo se han dividido en:

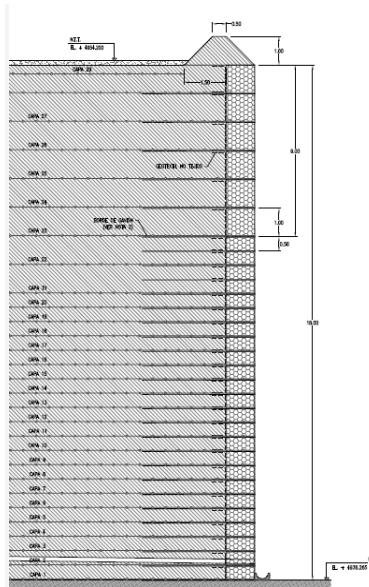
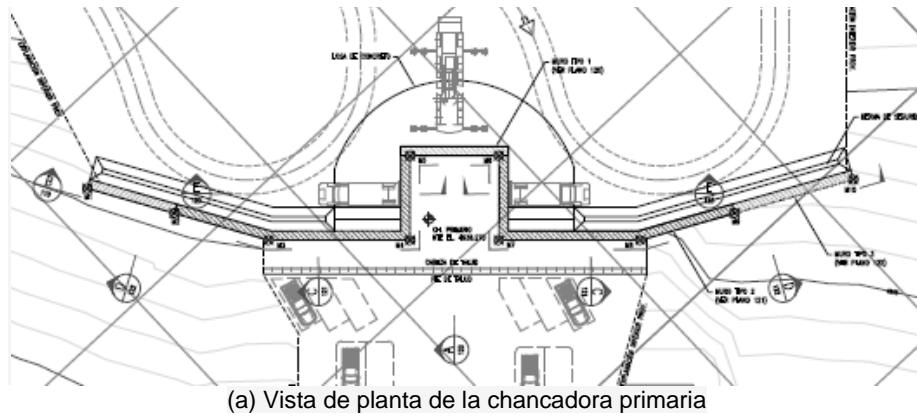
2.1 Objetivos generales

- Estudiar la estabilidad y el mecanismo de falla de taludes reforzados con geomallas, de manera bidimensional vertical (2D) y tridimensional (3D).
- Evaluar el efecto del confinamiento lateral en taludes reforzados con geomallas, tomado en cuenta en el análisis tridimensional (3D), y que es ignorado en el análisis bidimensional vertical (2D).

2.2 Objetivos específicos

- Realizar una comparación del factor de seguridad entre el análisis de estabilidad bidimensional vertical (2D) y tridimensional (3D) teniendo en cuenta las mismas condiciones (geométricas y geotécnicas), y empleando el método de reducción de resistencia (Phi-c reducción).
- Observar la influencia del nivel de discretización de la malla de elementos finitos en la obtención del factor de seguridad, para los análisis bidimensionales vertical (2D) y tridimensional (3D).
- Caracterizar los parámetros de resistencia involucrados para el modelo geotécnico analizado, a partir de los resultados de ensayos de compresión triaxial.

En todas las actividades mencionadas como objetivos específicos, se ha usado como caso de aplicación el análisis de un muro de contención de suelo reforzado de una chancadora primaria. Ver Figura 1 (a) y 1 (b).



3. REDUCCIÓN DE RESISTENCIA (PHI-C REDUCTION)

El método de reducción de la resistencia (Brinkgreve y Bakker, 1991) o comúnmente llamado “*Phi-c reduction*”, es una opción que se encuentra disponible en PLAXIS para el cálculo de factores de seguridad, y consiste en reducir progresivamente los parámetros geotécnicos de resistencia $\tan \phi$ y c del suelo hasta producir la falla. La resistencia de las interfaces refuerzo-suelo también es reducida de la misma manera. La resistencia de los elementos estructurales como placas y anclajes no es modificada en este método.

Los cálculos del método “*Phi-c reduction*” utilizan el procedimiento denominado número de pasos de avance de carga (*Load advancement number of steps*). Para definir el valor de los parámetro de resistencia en cada paso del análisis, se utiliza el multiplicador total (ΣMsf) como se muestra en la Ecuación [1].

$$\sum Msf = \frac{\tan \phi_{\text{entrada}}}{\tan \phi_{\text{reducidos}}} = \frac{c_{\text{entrada}}}{c_{\text{reducidos}}} \quad [1]$$

Los parámetros de resistencia con subíndice 'entrada' hacen referencia a las propiedades de entrada de los materiales, mientras que los parámetros con subíndice 'reducidos' son los valores reducidos utilizados en el análisis. Al inicio del cálculo ΣMsf tiene un valor de 1.0, lo que significa que no existe reducción. El multiplicador incremental (Msf) se utiliza para especificar el incremento de la reducción de la resistencia correspondiente al primer paso de cálculo. Este incremento se fija por defecto en 0.1. Los parámetros de resistencia se reducen sucesivamente hasta completar el número total de pasos adicionales (*Additional steps*) fijados en 30 (por defecto), aunque pueden llegar hasta un máximo de 1000, si fuese necesario. Se debe comprobarse que al final de la totalidad de los pasos se ha llegado a la falla completamente desarrollada, caso contrario, se debe continuar el cálculo con número mayor de pasos adicionales. Si se llega a la falla, el factor de seguridad viene dado por la Ecuación [2].

$$FS = \frac{\text{Resistencia disponible}}{\text{Resistencia en ruptura}} = \text{Valor de } \sum Msf \text{ en rotura} \quad [2]$$

Cuando se usa el método “*Phi-c reduction*” en combinación con modelos avanzados de suelos, estos se comportarán como un modelo de Mohr-Coulomb estándar, ya que se excluye la dependencia de la rigidez con el estado tensional y así como el endurecimiento, esto se debe a que durante el cálculo de un paso la rigidez del suelo permanece constante y corresponde a la del estado tensional existente al final del paso anterior.

4. CONSIDERACIONES DEL DISEÑO GEOTÉCNICO

4.1 Propiedades de los materiales

Fueron obtenidas a partir de la evaluación técnica de campo, de las características técnicas de los refuerzos, de correlaciones existentes y de ensayos de laboratorio, estos últimos realizados en muestras representativas de cada uno de los materiales involucrados en los diferentes análisis geotécnicos. La descripción y detalle de las propiedades mecánicas utilizadas se presentan en la Tabla 1. A continuación se presenta un breve resumen de la estimación de los parámetros de los materiales involucrados en el análisis numérico.

Tabla 1. Resumen de propiedades mecánicas

Propiedades	Peso específico (γ) kN/m ³	Ángulo de fricción (ϕ') °	Cohesión (c') kPa	Módulo de elasticidad (Eref) kN/m ²	Coeficiente de Poisson (ν)	Deformación volumétrica (Ψ^*) °
Relleno Estructural	20	38	5	6,00E+4	0,35	8
Terramesh	18	40	50	1,20E+5	0,35	10
Fundación	20	35	15	1,00E+5	0,30	5

* $\Psi = \Phi - 30$ y si $\Phi < 30 \rightarrow \Psi = 0$

4.1.1 Relleno estructural

Se clasifica como GC en el sistema SUCS, y se considera que tiene compactación controlada al 95% de la máxima densidad seca del proctor estándar. El ensayo de compresión triaxial realizado en condición consolidada no drenada (CU), arroja una cohesión de 5 kPa y un ángulo de fricción de 39,8°, en términos de esfuerzos efectivos. Sin embargo, se ha empleado en los análisis un ángulo de fricción de 38° y cohesión igual a 5 kPa (Anddes 2011).

4.1.2 Suelo residual

Proviene de la alteración de una roca volcánica (andesita) argilizada, fracturada. El ensayo de compresión triaxial realizado en este material en condición consolidada no drenada (CU), da como resultado una cohesión de 15 kPa y un ángulo de fricción de 35,1°, en términos de esfuerzos efectivos. Se ha empleado en los análisis un ángulo de fricción de 35° y cohesión igual a 15 kPa (Anddes 2011).

4.1.3 Geomallas uniaxiales

Las propiedades mecánicas de los refuerzos de geomallas uniaxiales son presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de rigidez axial de las geomallas uniaxiales

Tipo de Geomalla	EA*
	(kN/m)
WG200	2000
WG150	1500
WG90	900
Terramesh	250

*valores estimados al 2% de deformación

Largo del Refuerzo (m)= 12,00

Espaciamiento Vertical (m) = 0,50 y 1,00

Los valores de rigidez axial son determinados a partir de diagramas en los que se representa la elongación de la geomalla en función de la fuerza aplicada en dirección longitudinal. En la norma ASTM D6637 se describe el procedimiento del ensayo. La rigidez axial es la relación entre la fuerza axial por unidad de anchura y la deformación axial ($\Delta l/l$, en donde Δl es la elongación y l es la longitud), dicha relación se muestra en la Ecuación [3].

$$EA = \frac{F}{\frac{\Delta l}{L}} \quad [3]$$

El paramento frontal de los elementos Terramesh® que conforman los muros de suelo reforzado, serán colocados sin generar escalonamiento, con lo cual se tiene un muro completamente vertical. La vista en planta se muestra en la Figura 1 (a) y la sección de análisis donde se muestran los detalles del refuerzo se muestra en la Figura 1 (b).

5. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL MURO DE SUELO REFORZADO EN 2D Y 3D

Los análisis de estabilidad de taludes fueron realizados como parte del diseño del muro de suelo reforzado para la sección crítica. Se utilizó el método de reducción de resistencia (Phi-c reduction) mediante el programa de cómputo Plaxis 2D y Plaxis 3D Tunnel. Los análisis de estabilidad consideran parámetros de resistencia en términos de esfuerzos efectivos de los suelos.

5.1 Metodología de Análisis

Se utilizó los programas de cómputo Plaxis 2D versión 8.2 y Plaxis 3D Tunnel® versión 1.2, desarrollados para análisis numéricos bajo la metodología de elementos finitos. Estos programas de cómputo permiten al usuario realizar los siguientes cálculos:

- Análisis de la estructura por etapas de construcción.
- Análisis de la estructura mediante esfuerzo y deformación.
- Calculo del factor de seguridad por el método de reducción de resistencia (Phi-c reduction).

- Definir la densidad de la malla de elementos finitos para el cálculo.

La metodología aplicada para el cálculo de estabilidad de los muros de suelo reforzado con geomallas ha sido considerando el manual de la FHWA NHI-00-43 "Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes" y el método de diseño de la "American Association of State Highway and Transportation Officials" (AASHTO).

5.1.1 Criterio de Diseño

Los factores de seguridad considerados en el presente análisis cumplen:

- Mínimo factor de seguridad estabilidad interna del muro en condiciones estáticas igual a 1,5.

5.1.2 Condiciones Analizadas

Se han tomado en cuenta las siguientes condiciones para el análisis:

- Condiciones más críticas representadas por la sección de mayor pendiente y mayor altura del muro (Figura 1 (b)).
- Se considera la existencia de una superficie de falla del tipo no circular en la evaluación de la estabilidad interna a través del relleno estructural.
- Se evalúan los resultados obtenidos tanto en factor de seguridad, como en desplazamientos, bajo distintos niveles de discretización o densidad de la malla de elementos finitos; esta densidad varía de 0,39 a 4,14 elementos por unidad de volumen, que corresponde a un malla muy grueso a muy fino, respectivamente. Se realiza esta operación en los análisis bidimensionales (2D) y en los tridimensionales (3D).
- Se evalúa la influencia del parámetro "cohesión" aparente en el paramento frontal (Terramesh).

5.1.3 Resultados Obtenidos

La Tabla 3 presenta la comparación de los resultados de los análisis de variación de la cohesión aparente en el paramento frontal. Se observa que no existe influencia de la cohesión aparente del paramento. Se observa además, que el factor de seguridad tridimensional (3D) es mayor en 10% comparado con el factor de seguridad bidimensional (2D).

Tabla 3. Variación de la cohesión en el paramento frontal

Factor de Seguridad	Cohesión (c)			
	50	100	150	200
FS _{2D}	1,68	1,68	1,68	1,68
FS _{3D} [*]	1,80	1,81	1,81	1,80

*profundidad lateral de análisis igual a 20 m.

En las Figuras 2 y 3 se aprecia que la concentración de esfuerzos cortantes se genera de forma no circular y en los extremos de las geomallas, se observa también que tanto en 2D como en 3D son similares.

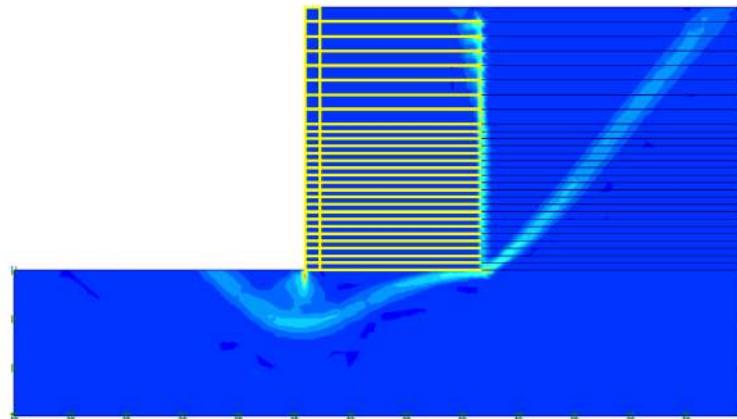


Figura 2. Incremento de deformación de corte en 2D.

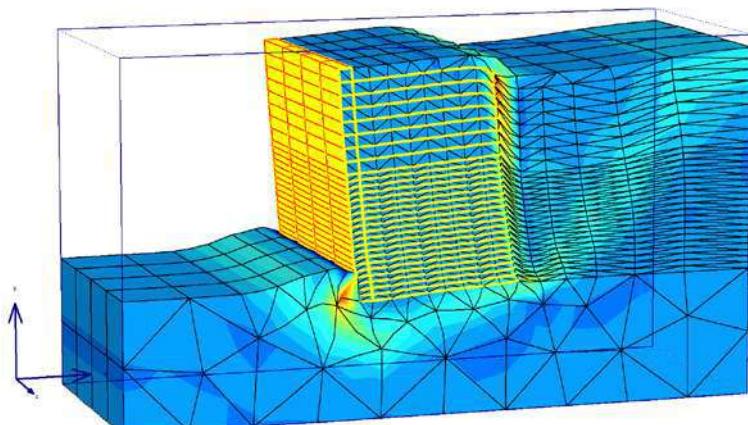


Figura 3. Incremento de deformación de corte en 3D

En la Tabla 4 se presentan los factores de seguridad con respecto al nivel de discretización o densidad de malla de elementos finitos usados en el cálculo. Se observa que existe una diferencia significativa entre el mallado muy grueso y el mallado muy fino.

Tabla 4. Resultados del Análisis de Estabilidad del Muro de Suelo Reforzado 2D

Densidad de la malla de elementos finitos	Elementos por unidad de volumen	Factor de seguridad	Tiempo total de cálculo (min)
Muy gruesa	0,39	1,73	1,10
Gruesa	0,60	1,70	1,40
Media	0,98	1,68	2,45
Fina	2,08	1,67	5,35
Muy fina	4,14	1,65	9,35

En la Tabla 5, se presentan los resultados de los factores de seguridad con respecto a la densidad de malla de elementos finitos usados para el cálculo, se observa que existe un incremento poco significativo.

Tabla 5. Resultados del Análisis de Estabilidad del Muro de Suelo Reforzado 3D

Densidad de la malla de elementos finitos	Factor de seguridad	Tiempo total de cálculo (min)
Muy gruesa	1,87	3,35
Gruesa	1,83	6,70
Media	1,80	15,30

Se puede observar en los resultados obtenidos de los análisis, que los valores de factor de seguridad son mayores que los mínimos recomendados en los criterios de diseño (ítem 5.1.1) propuestos en este análisis para condición estática.

6. CONCLUSIONES

El tipo de falla en los análisis de estabilidad del muro es del tipo no circular, generando una mayor concentración de esfuerzos en la zona inferior del paramento frontal. El efecto de confinamiento lateral en el factor de seguridad es favorable, como se observa en la comparación de los análisis de estabilidad 3D y 2D.

La influencia de realizar un análisis con densidades de mallado desde muy fina a muy gruesa, repercute en el factor de seguridad. Sin embargo, se concluye que el realizar un análisis con densidad de mallado media (0,98 elementos por unidad de volumen, en este caso en particular) nos proporciona una variación en el factor de seguridad de aproximadamente 2%, en comparación al 5% obtenido con densidad de mallado muy gruesa (ambos casos comparados con el factor de seguridad obtenido con una densidad de mallado muy fina), logrando de esta manera un modelamiento equilibrado sin necesidad de discretizar demasiado el mallado.

El paramento frontal no influye de manera predominante en el cálculo del factor de seguridad, es por ello que en la Tabla 5.1 se muestra los resultados bajo distintos valores de cohesión del suelo, obteniendo poca variación del factor de seguridad.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍCA

- Ale, J. y Huamán, C. (2006). "Métodos de Estabilización de Taludes Mediante Estructuras de Suelo Reforzado"; Tesis de Grado de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería.
- Anddes Asociados, S.A.C., (2011). "Ingeniería de Detalle Muros de Suelo Reforzado Sistema Terramesh" Informe Técnico preparado por la Mina Arasí S.A.C.
- Arslan, H. (2005). "Finite Element Study of Soil Structure Interface Problem"; The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Volume 10 - Bundle C.
- ASTM D 6637. Standard Test Method for Determining Tensile geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pensilvania, EE.UU.
- Brinkgreve, R.B.J. (2004). "Manual de Referencia Plaxis Version 8", Delft University of Technology & Plaxis b.v., Países Bajos
- Brinkgreve, R.B.J. and Bakker, H.L. (1991). Non-linear finite element analysis of safety factors. Proc. 7th Int. Conf. on Comp. Methods and Advances in Geomechanics, Cairns, Australia, 1117-1122.
- Cheng, Y.M. y Lau, C.K. (2008). "Slope Stability Analysis and Stabilization", 1st edition, Routledge, New York, USA.
- Dawson, E. M., Roth, W. H., and Drescher, A. (1999). Slope Stability analysis by strength reduction. Geotechnique, 49(6), 835 -840
- Maldonado, E. (2010). "Análisis de Estabilidad de Muro de Relaves Reforzado con Geosintéticos usando FLAC", GEOSPERU 2010, Lima, Perú.
- Matsui, T. y San, K.C. (1992). "Finite Element Slope Stability Analysis by Shear Strength Reduction Technique", Soils and Foundations, Volume 32, N° 1, pp. 59-70.
- Sivakumar Babu, G. L., Pratap Singh, V. (2009). "Simulation of Soil Nail Structures using Plaxis 2D"; Plaxis Bulletin, Spring Issue.