

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS METODOLOGÍAS DE DISEÑO GEOTECNICO DE MUROS DE CONTENCION ANCLADOS

*P. Pezo Paz*¹, *S. Villalobos Cifuentes*², *F. Villalobos Jara*³

RESUMEN:

Para el diseño de estructuras de estabilización lateral se utilizan dos métodos de cálculo, uno es el método tensiones admisibles (ASD) y el segundo el método de diseño de factores de carga y resistencia (LRFD), siendo el método ASD el más utilizado en Chile, que usa valores representativos de las tensiones activas y de los parámetros de resistencia, que busca un factor de seguridad global usualmente $FS_S \geq 1,10$ y $FS_E \geq 1,50$. El Eurocódigo 7 propone el dimensionamiento de estructuras por medio del uso del método LRFD. En este trabajo se comparan el factor de seguridad en dos casos de muros de contención anclados en Concepción, analizados través de los métodos ya señalados, utilizando el método de elementos finitos (MEF) y de métodos de equilibrio limite (MEL). La utilización del método LRFD permite, sin duda, un mejor control de las variables involucradas en el proyecto, restando analizar más casos que permitan sugerir ponderaciones en proyecto de muros de contención anclados.

PALABRAS CLAVES: ASD; LRFD; Suelo Reforzados

ABSTRACT:

For the design of lateral stabilization structures, two calculation methods are used, one is the admissible stress method (ASD) and the second is the load and resistance factor design method (LRFD), with the ASD method being the most used method in Chile, which uses values representative of the active stress and the resistance parameters, which looks for a global safety factor usually $SF_S \geq 1,10$ and $SF_E \geq 1,50$. Eurocode 7 proposes the sizing of structures through the use of the LRFD method. In this work the safety factor is compared in two cases of retaining walls anchored in Concepción, analyzed through the methods already mentioned, using the finite element method (FEM) and methods of limit equilibrium (MLE). The utilization of the LRFD method allows, without doubt, a better control of the variables involved in the project, subtracting analyzing more cases that allow to suggest weights in the project of anchored retaining walls

KEYWORDS: ASD; LRFD; Reinforced Soils.

¹ Estudiante, Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, ppezop@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, SOENCO Soluciones Geotécnicas Ltda, Concepción, CHILE, svillalobos@soenco.cl

³ Profesor Informante, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, avillalobos@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los muros de contención anclados, son un tipo de estructura geotécnica de entibación que se ejecuta previamente o al mismo tiempo que la excavación. Son estructuras continuas destinadas para contener cortes de terreno verticales que no son capaces de sostenerse por sí mismos. Además, estas estructuras son utilizadas para restringir los daños y deformaciones en las edificaciones próximas a la excavación y del terreno. Estos muros son usualmente diseñados según el criterio de seguridad de los Estados Límites Últimos (ELU), que depende de los parámetros de resistencia del suelo, de la interface suelo-refuerzo y de los elementos de refuerzo.

En el mundo se han desarrollado diferentes metodologías de diseños de los elementos estructurales, en Chile se utiliza la metodología de Diseño de Tensiones Admisibles (ASD), que ha sido usado durante los pasados 100 años. El dimensionamiento de las estructuras es realizado de los valores representativos de las cargas y de las resistencias. Para un mecanismo de falla o modelo de ruptura, se busca el equilibrio entre esfuerzos resistentes y solicitantes, con un factor de seguridad global único.

Por otra parte, el método de factores de carga y de resistencia (LFRD) ha sido principalmente utilizado en Europa, aunque en Chile se ha utilizado para aceros y hormigón. La norma Eurocódigo 7 propone el uso de factores ponderados, el cual consiste básicamente en aumentar los valores actuantes y disminuir los valores resistentes.

En este trabajo se realiza una comparación entre ambos métodos de diseños, en dos casos de muros de contención anclados en la ciudad de Concepción, evaluando en condiciones estáticas y sísmicas, utilizando el Método de Equilibrio Limite (MEL), que analiza la estabilidad global de la estructura y el Método de Elementos Finitos (MEF), donde es simulado mediante modelos numéricos simples con el software comercial *Phase²*, que considera las diversas condiciones de proyecto, como la estratigrafía, procesos constructivos por etapas, consideración de la influencia de las estructuras vecinas, entre otros aspectos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Geología Local

La ciudad de Concepción, ubicado en la región del Biobío, está constituido por varias unidades geológicas, principalmente por depósitos antiguos del río Biobío (Pladb), depósitos por remoción de masa (Hrm), originado por la meteorización de rocas sedimentarias e intrusivas (Vivallos et al, 2010). También con la presencia de rocas intrusivas, como granitos, tonalitas del Batolito Costero (CPg) y de rocas sedimentarias de las Formaciones Curanilahue (Ec) y Quiriquina (Ksq) (CMM, 2004; Vivallos *et al.*, 2010)

En el sector de estudio, “Edificio Nueva Era”, ubicado en la calle Las Heras N°1550, se encuentra en la unidad geológica Pladb del mapa Geológico de Chile, Serie Geología Ambiental (Figura 1), correspondiente al Pleistoceno-Holoceno, compuesto por arenas pobremente gradadas con intercalaciones de limo de color grisáceo de compacidad media, estructura homogénea y compacidad densa.

En el proyecto “Studio Victoria”, ubicada en la calle Victoria N°400, se encuentra en la unidad geológica (Hrm) (Figura 1), correspondiente al Pleistoceno-Holoceno, compuesto por arena limosa de grano medio a fino, con material fino de color marrón oscuro, sin cementación y compacidad media.

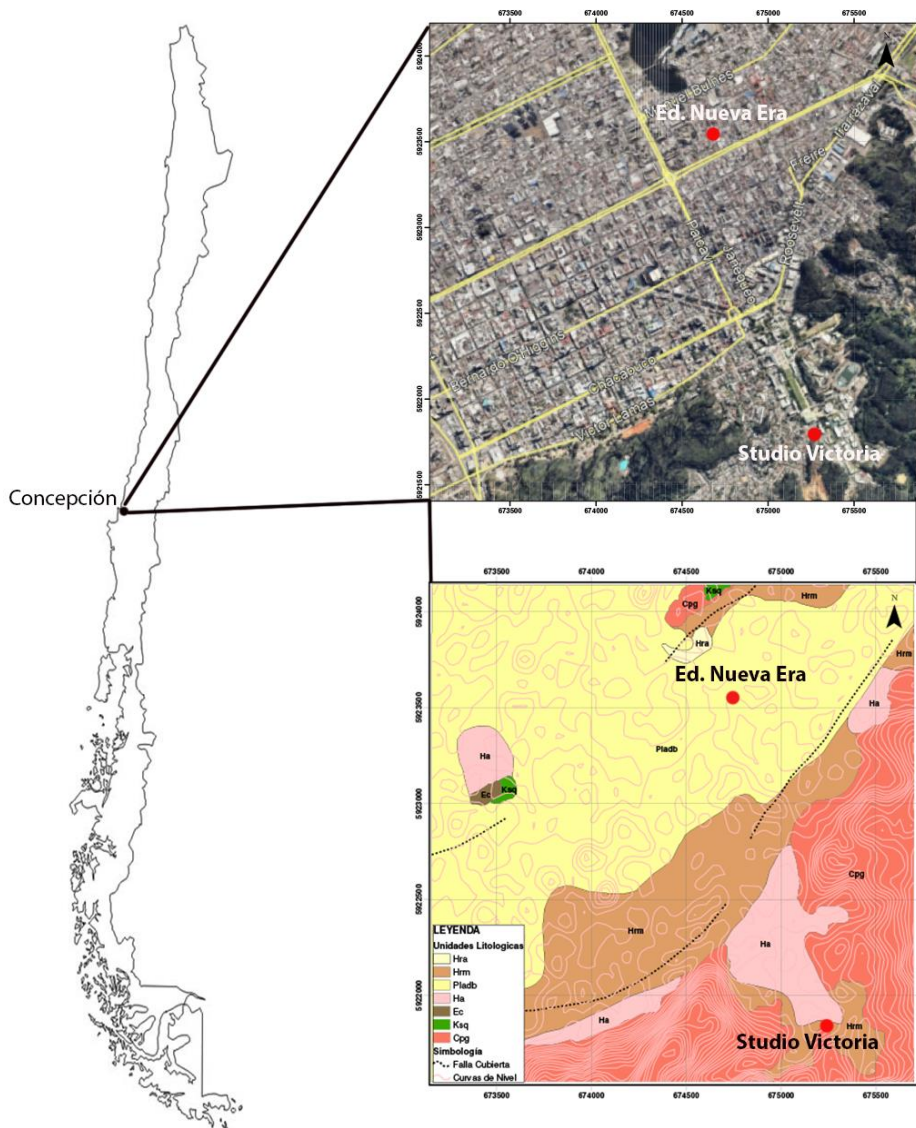


Figura 1: Ubicación y geología de la zona de estudio. Puntos rojos son las áreas de estudio (Elaboración Propia)

2.2 Modo de Falla Globales

Son referidos al desarrollo de superficies potenciales de falla que pasan a través o detrás de los anclajes. Ésta masa de suelo por lo general son trazadas como arcos o bloques y para cálculos de estabilidad se considera las fuerzas resistentes del suelo que actúan a lo largo de las superficies de falla. Si ésta superficie intercepta uno o más anclajes, contribuye a la estabilidad de la masa de suelo reforzado, por proveer de fuerzas externas adicionales que puede contribuir a la resistencia del suelo.

2.2.1 Método de Stocker

La estabilidad global es referida a una envolvente de todo el sistema, donde la superficie de deslizamiento pasa por detrás y por debajo del sistema de los anclajes, que es aplicable a muros de *soil nailing*. Es evaluada en dos dimensiones usando equilibrio límite propuesto por Stocker *et al.* (1979) (Figura 2), en el cual el deslizamiento potencial, es modelado como un área rígida y trabaja bajo el criterio de falla Mohr – Coulomb. El factor de seguridad global, se define por la suma de las fuerzas resistentes al corte desarrollado a lo largo de la superficie de falla y de las fuerzas de tracción de los anclajes ubicados detrás de la superficie de falla, dividida entre las fuerzas solicitantes que son el peso propio de las cuñas de falla, sobrecargas y el empuje activo de la cuña de falla.

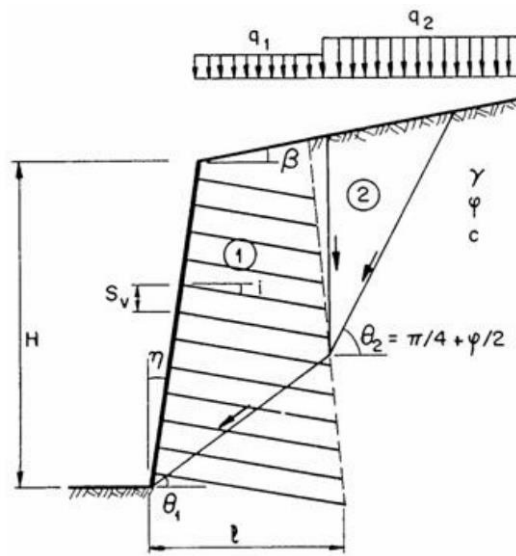


Figura 2: Superficie de falla bi-lineal, método de bloques deslizantes (Stocker *et al.*, 1979)

2.2.2 Método de Kranz (1953)

Inicialmente, Kranz (1953) analizó la estabilidad global de un muro anclado, utilizando el método de cuñas, considerando una línea de anclaje, analizando las condiciones de equilibrio de fuerzas actuantes sobre una cuña formada por el muro y por el plano de ruptura teórico que pasa por el pie del muro de contención y por el centro de la placa del anclaje. La generalización de éste método, se hizo considerando que el centro del bulbo de anclaje estaría en la misma posición del centro de la placa (Figura 3). Para múltiples líneas de anclaje fue realizada por Ranke y Ostermayer (1968)

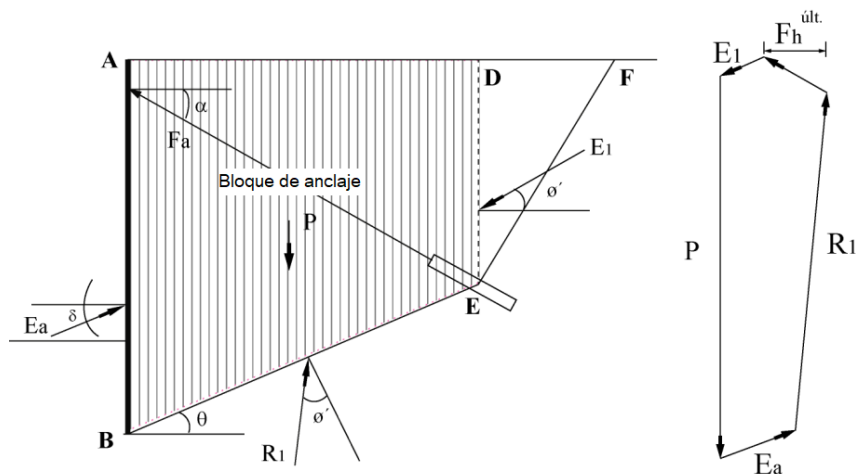


Figura 3: Diagrama de polígonos de fuerzas, método de Kranz Generalizado (Modificado de Ranke y Ostermayer, 1968).

Donde:

- P: Peso de la cuña del suelo ABDE
- Ea: Empuje activo del muro.
- E1: Resultante del empuje activo de la cuña
- R1: La reacción sobre la superficie potencial de ruptura
- δ : Ángulo de fricción suelo-muro.

ϕ' : Ángulo de fricción efectiva del suelo

θ : Ángulo de inclinación de la superficie potencial de ruptura con la horizontal

F_a : Fuerza del anclaje.

El factor de seguridad (FS), se obtiene por la razón entre la fuerza máxima de la cuña activa y del anclaje ($F_a^{últ}$), y la fuerza de trabajo requerida en los anclajes ($F_a^{trab.}$), donde el valor del factor de seguridad debe ser $\geq 1,5$.

$$FS = \frac{F_a^{últ}}{F_a^{trab.}} \quad (1)$$

Donde:

$F_a^{últ}$: Fuerza última del anclaje o carga máxima del anclaje

$F_a^{trab.}$: Carga de trabajo requerida en el anclaje

Para los casos de múltiples anclajes el proceso de cálculo posee la misma analogía utilizada para los anclajes simples. Los diversos niveles de anclajes forman más de una superficie de ruptura, por lo tanto, se analiza el FS en todas las cuñas formadas y obteniendo el menor FS entre ellos.

2.2.3 Método de Elementos Finitos

El método más utilizado para un análisis numérico tensión-deformación es el Método de los Elementos Finitos (MEF), ya que permite simular y analizar el comportamiento mecánico de una estructura (infraestructura, y suelo), manteniendo los parámetros geométricos, para casos más complejos, en el cual las simulaciones son más realistas y considera los efectos del proceso de construcción, que los otros métodos analíticos no consideran.

Los métodos de elementos finitos, es una herramienta numérica versátil porque es posible incrementar cargamentos estáticos y dinámicos, condiciones de contorno más elaboradas, diferentes modelos constitutivos, análisis temporal, etc. Además, tiene en cuenta la topografía, la estratigrafía, la influencia de las estructuras vecinas, entre otras (Brinkgreve *et al.*, 2016). Para el análisis de problemas de interacción suelo-estructura, se altera el estado de deformación y consecuentemente de la tensión, ésta puede ser analizada tanto en el contacto del muro y en el contacto del anclaje-suelo. En este sentido, se elabora un modelo numérico basado en el método de elementos finitos MEF implementado en el programa computacional comercial *Phase² v.8.0*.

La obtención del factor de seguridad (FS), puede ser calculado reduciendo progresivamente la resistencia al corte del suelo, donde el factor de reducción de esfuerzo (SFR) es un parámetro adoptado que reduce los valores de c y de $\tan\phi$ en sucesivos análisis hasta alcanzar la falla del talud, y adoptar en ese instante que SFR sea igual a FS,

3. Métodos de Diseño

Contempla dos métodos específicos de diseño, método ASD y el método LRFD. La principal diferencia entre ambos métodos, es que el método ASD considera factores de seguridad para cada uno de los mecanismos de fallas, tanto para el análisis de estabilidad interna como externa del muro, mientras que el método LRFD contempla factores de reducción y amplificación, que abarcan tanto la minoración de la resistencia. (Rochel Awad, 2007)

Sin embargo, en Chile el diseño estructural se lleva a cabo por medio del método ASD, y que a pesar de su prevalencia, en Europa se adopta el método LRFD debido a los procedimientos de diseño asociado al diseño último, el diseño plástico y el diseño al límite o el diseño de colapso.

El diseño estructural tiene que proveer una adecuada seguridad, no importa que metodología de diseño se use, por aquello nos enfocaremos en el factor de seguridad de la estructura.

3.1 Método de Tensiones Admisibles (ASD)

Éste es un método tradicional, también es llamado diseño por tensiones de trabajo, que ha sido utilizado en la ingeniería civil desde los años 1900, supone que para las combinaciones de las cargas de servicio las tensiones resultantes (sin factores de carga), no exceden las tensiones admisibles y la estructura se comporta dentro del rango elástico, de manera que se considera una relación lineal esfuerzo-deformación. (Mc Cormac y Brown, 2011)

Las tensiones admisibles de la especificación de ASD son derivadas de la idónea fuerza lograda si la estructura es sobrecargada. El diseño de cargas (Q) consiste en la estimación de las fuerzas actuales que se van a aplicar en la estructura, en relación con la resistencia nominal o tensión (R_n), mediante un FS (AASHTO, 2014)

$$Q \leq Q_{all} = \frac{R_n}{FS} \quad (2)$$

dónde, Q es el efecto de todas las cargas combinadas que actúan sobre la estructura geotécnica en un estado límite dado, también es definido como la carga de diseño; Q_{all} es la carga última de diseño o la tensión admisible del componente; R_n es la resistencia nominal del elemento o la estructura geotécnica o la capacidad última de ese componente. FS es el único factor que explica toda incertidumbre del diseño (FHWA, 2015).

Las recomendaciones para los factores de seguridad mínima que son usados en el diseño de muros anclados, para cada uno de los diferentes modos de falla descritos, en la NCh3206 (2010) y en la FHWA (2015) para condiciones estáticas y sísmicas (Tabla 1 y 2).

Tabla 1: Factores de seguridad mínimo recomendado para el diseño de entibaciones usando el método ASD (Modificado de NCh 3206, 2010)

Estado Limite	Condición	Símbolo	Factor de Seguridad Mínimo Recomendado, Carga Estática	Factor de Seguridad Mínimo Recomendado, Carga Sísmica
Global	Capacidad Estructural	FS_G	1,5	1,1
Global	Capacidad Geotécnica	FS_G	1,5	1,1

Tabla 2: Factores de seguridad mínimo recomendado para el diseño de muros de *soil nail* usando el método ASD (Modificado de FHWA, 2015).

Estado limite	Condición	Símbolo	Factor de Seguridad Mínimo Recomendado, Carga Estática	Factor de Seguridad Mínimo Recomendado, Carga Sísmica
Global	Estabilidad Global	FS_G	1.5	1.1
Global	Estabilidad Global (corto plazo)	FS_G	1.25-1.33	N.A
Global	Levantamiento Basal	FS_{BH}	2.0-2.5	2.3
Resistencia Geotécnica	Resistencia A La Extracción	FS_{PO}	2	1.5
Resistencia Geotécnica	Deslizamiento Lateral	FS_{LS}	1.5	1.1
Resistencia Estructural	Resistencia a la Tracción, barra (Grado 60 Y 75)	FS_T	1.8	1.35
Resistencia Estructural	Resistencia a la Tracción, barra (Grado 95 Y 150)	FS_T	2	1.5
Resistencia Estructural	Capacidad de Flexión	FS_{FF}	1.5	1.1
Resistencia Estructural	Capacidad de Corte	FS_{FP}	1.5	1.1

3.2 Método de los Factores de Carga y de Resistencia (LRFD)

Las estructuras y subestructuras de transporte se analizan y diseñan hoy en día en base a una plataforma LRFD. Este diseño, presentado por Haaijer (1983) y Kennedy (1985), se basa en los conceptos de estado límite, es decir, una estructura o parte de ella deja de cumplir su pretendida función, ya que la estructura no sólo debe ser capaz de soportar las cargas de diseño o últimas, sino también las de servicio o de trabajo, de tal forma que se cumplan los requisitos. Existen dos tipos de estado límite: los de resistencia y los de servicio. (Mc Cormac y Brown, 2011; AASHTO, 2014)

- Los estados límites de resistencia se basan en la seguridad o capacidad de carga de las estructuras e incluyen las resistencias plásticas, de fractura, de fatiga de volteo, etc.
- Los estados límites de servicio se refieren al comportamiento de las estructuras bajo cargas normales de servicio, y tienen que ver con aspectos asociados con el uso y ocupación, tales como deslizamientos, vibraciones y agrietamientos.

Los factores de carga y de resistencia fueron desarrollados a partir de la teoría de la confiabilidad en base al conocimiento estadístico actual de las cargas. Por lo general las solicitaciones del LRFD son muchos más altas que las especificaciones estándar (AASHTO, 2014; ECS, 2010).

El método LRFD emplea tanto factores de carga como de resistencia para cada elemento para tener en cuenta las incertidumbres, esta condición se expresa generalmente como:

$$\phi R_n \geq \sum_{i=1}^N \gamma_i \eta_i Q_i \quad (3)$$

Donde:

R_n : Resistencia nominal de un componente estructural seleccionado para un estado límite dado

ϕ : Factor de resistencia relacionado con R_n

Q_i : Carga genérica o efecto genérico

γ_i : Factor de carga asociado a Q_i

η_i : Factor de modificación de la carga relacionado con la ductilidad, redundancia o clasificación operativa (igual a 1.0 para los muros anclados).

i : 1... N y se refiere a las diferentes cargas/efectos en ese estado límite.

El factor de seguridad en el diseño geotécnico de muros, ha sido ampliamente desarrollado por la AASHTO y en el Eurocódigo. Está basado en la aplicación de análisis por confiabilidad, el cual consiste en determinar la probabilidad de falla teniendo en cuenta las incertidumbres relacionadas con las cargas y resistencia (ECS, 2010).

En este método, las cargas actuantes muertas y vivas se multiplican por ciertos factores de ponderación parcial (Tabla 3), que son equivalentes a factores de seguridad, y los valores resultantes se llaman cargas factorizadas. (Mc Cormac & Brown, 2011). En el enfoque de diseño 1 (DA1), la combinación 1 se aplica solo a las acciones, la combinación 2, se enfoca en las propiedades del material; el enfoque de diseño 2, los factores se aplican en las acciones y a la resistencia, y el enfoque de diseño 3 se enfoca en las acciones estructurales y a las propiedades del material.

Tabla 3: Factores de ponderación parcial de la norma Eurocódigo 7 (ECS, 2010)

Factores Parciales		DA1-1	DA1-2	DA2	DA3
Carga Permanente (A)	Desfavorable	1,35	1,00	1,35	1,00
	Favorable	1,00	1,00	1,00	1,00
Carga Variable (A)	Desfavorable	1,50	1,30	1,50	1,30
	Favorable	0,00	0,00	0,00	0,00
Parámetros Geotécnicos (M)	Cohesión efectiva c'	1,00	1,25	1,00	1,25
	Fricción efectiva $\tan(\phi)'$	1,00	1,25	1,00	1,25
	Resistencia no drenada	1,00	1,40	1,00	1,40
	Peso Específico	1,00	1,00	1,00	1,00
	Resistencia de Cizallamiento	1,00	1,25	1,00	1,25
Resistencia (R)	del Suelo	1,00	1,00	1,10	1,00
Anclajes	Fuerza en barra y cabezal	1,10	1,10	1,10	1,00
	Fuerza Cizallantes	1,10	1,10	1,10	1,00
	Fuerza Compresiva	1,10	1,10	1,10	1,00
	Fricción Unitaria	1,10	1,10	1,10	1,00
Coeficiente Sísmico		1,00	1,00	1,00	1,00

4. METODOLOGÍA

El análisis de estabilidad global por el método ASD, en varios casos su factor de seguridad es cercano a 1.5, por lo tanto, los factores de ponderación de los métodos LRFD, pueden modificar la posición de la superficie de ruptura. Por esta razón, en cada análisis de LRFD se busca una superficie de ruptura, que para una equivalencia exacta con el método ASD, debería tener un $FS=1,0$ (igualdad de tensiones solicitantes y resistentes). Las diferencias permiten comparar la practica chilena a las tendencias europeas de diseño de estructuras de suelo reforzado.

Para ello se utiliza el método de equilibrio limite mediante el software *Slide v6.0* – Rocscience (método Morgenstern-Price) y *GGU-Retain* y *GGU-Stability* (método de Kranz). También se utiliza el método de elementos finitos mediante el software *Phase² v8.0* – Rocscience.

5. CASOS DE ESTUDIO

Se presentan los casos reales escogidos para la comparación entre los métodos ASD y LRFD. Las informaciones generales de cada caso, están reunidas en la Tabla 4. Además, se evaluó la estabilidad sísmica, mediante el método pseudoestático, que considera coeficientes sísmicos horizontal, representando a las fuerzas de inercia inducidas por una sollicitación dinámica. De acuerdo de esto, la sismicidad de la zona de los proyectos (zona sísmica 3), se considera un coeficiente de aceleración sísmica para el diseño de las excavaciones de $k_h = 0,244$.

Tabla 4: Características de los casos analizados

Caso	Altura (m)	Sobrecarga (kPa)	Bolt Type	Diámetro (mm)	Fuerza Pre-tensión (MN)	S_H (m)	S_V (m)	Largo (m)	Angulo	Capacidad de tensión (MN)
1	6.04	12	Tieback	30	0.29	3.2	2.5	11.5 ⁽¹⁾	20	0.5
				45	0.32			9.5 ⁽²⁾		0.75
2	12.17	12	Fully Bonded	38	-	1.5	1.6	3.0 - 13.5	25	0.4

⁽¹⁾ Línea Superior

⁽²⁾ Línea Inferior

 S_H – Espaciamiento Horizontal

 S_V – Espaciamiento Vertical

5.1 Edificio Nueva Era

El primer caso se refiere a un sistema de entibación de tipo muro berlín anclado del proyecto “Edificio Nueva Era”, como se observa en la Figura 4, que se utilizó para estabilizar sectores aledaños a la excavación. Las características del suelo se encuentran en la Tabla 5, donde el nivel freático se detectó a una cota promedio de -5.2m, medido desde nivel de terreno natural.

Tabla 5: Parámetros geomecánicos del proyecto “Edificio Nueva Era”

Clasificación	Espesor (m)	Peso Unitario, γ_t (kN/m ³)	Angulo de Resistencia al Corte, ϕ°	Cohesión efectiva c' (kPa)	Capacidad de Fuste r_s (kPa)
SP-SM	0.0 – 2.0	18	27	0	110
SP-SM	2.0 – 5.5	18	31	0	170
SM, SP, SP-SM	5.5 – 11.0	20	32	0	250
SM, SP, SP-SM	11.0 – 20.0	20	33	0	250

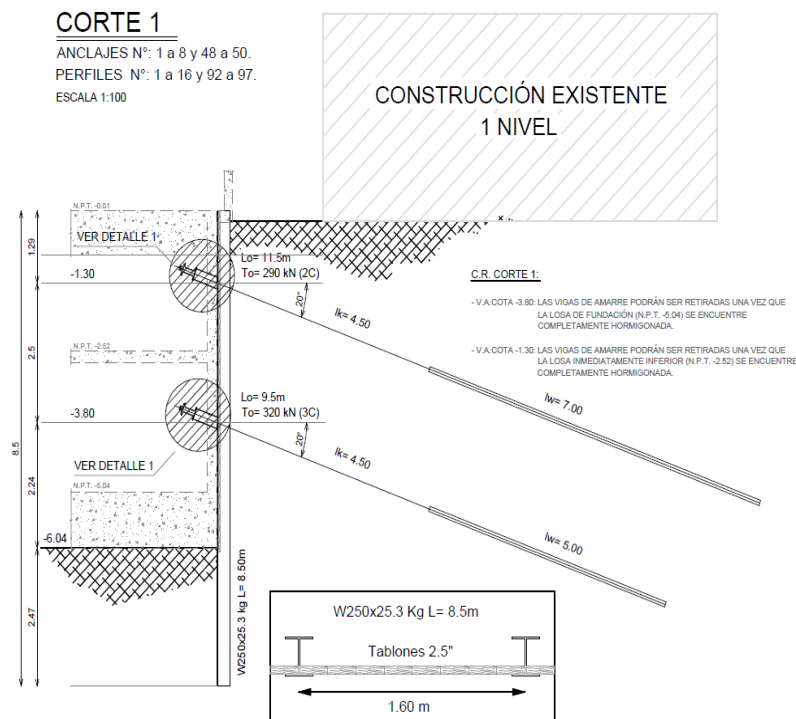


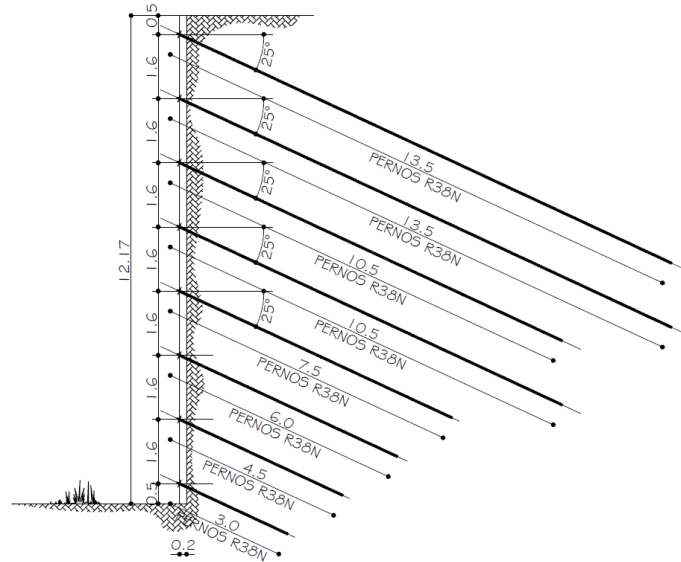
Figura 4: Corte de la disposición de los anclajes del proyecto “Edificio Nueva Era” (Lancuyen, 2018).

5.2 Studio Victoria

El segundo caso se refiere a un sistema de estabilización de tipo *soil nailing* (Figura 5) usado en el proyecto “Studio Victoria 400”, localizado en la calle Victoria de la ciudad de Concepción. Los parámetros geotécnicos utilizados para el proyecto se encuentran en las Tabla 6, el cual no se detectó nivel freático en la profundidad estudiada.

Tabla 6: Parámetros geomecánicos “Studio Victoria”

Clasificación	Espesor (m)	Peso Unitario, γ_t (kN/m ³)	Angulo de Resistencia al Corte, ϕ°	Cohesión efectiva c' (kPa)	Capacidad de Fuste r_s (kPa)
SM, ML	0.0 – 17.0	16	38	3.8	120


Figura 5: Corte de la disposición de los anclajes del proyecto “Studio Victoria” (Soenco, 2018)

6. RESULTADOS

Se muestran los principales resultados obtenidos para cada condición (estático y sísmico), con diferentes programas, utilizando el método ASD, y el método europeo propuesto por el Eurocódigo 7, LRFD.

6.1 Slide v6.0

El análisis de estabilidad de taludes, se ha realizado mediante el método de equilibrio global GLE/Morgenstern-Price, considerando superficies de deslizamiento no circulares, las que son más representativas en estos tipos de suelos. En las Figuras 7-10, se observan 25 superficies de ruptura global mínima.

Las propiedades de los materiales de la estabilización se presentan en las Tablas 5 y 6, que están expresadas en términos de resistencia de Mohr-Coulomb.

6.1.1 “Edificio Nueva Era”

En las Figuras 6 y 7, se muestra los FS del método ASD y el método LRFD enfoque de diseño DA2, con FS= 1.687 y 1.112 obtenido con la condición estática y FS=1.211 y 1.013 de la condición sísmica, respectivamente, donde esta condición muestra una amplia área de ruptura. En el Anexo 1, se muestra la superficie de ruptura de los enfoques de diseño.

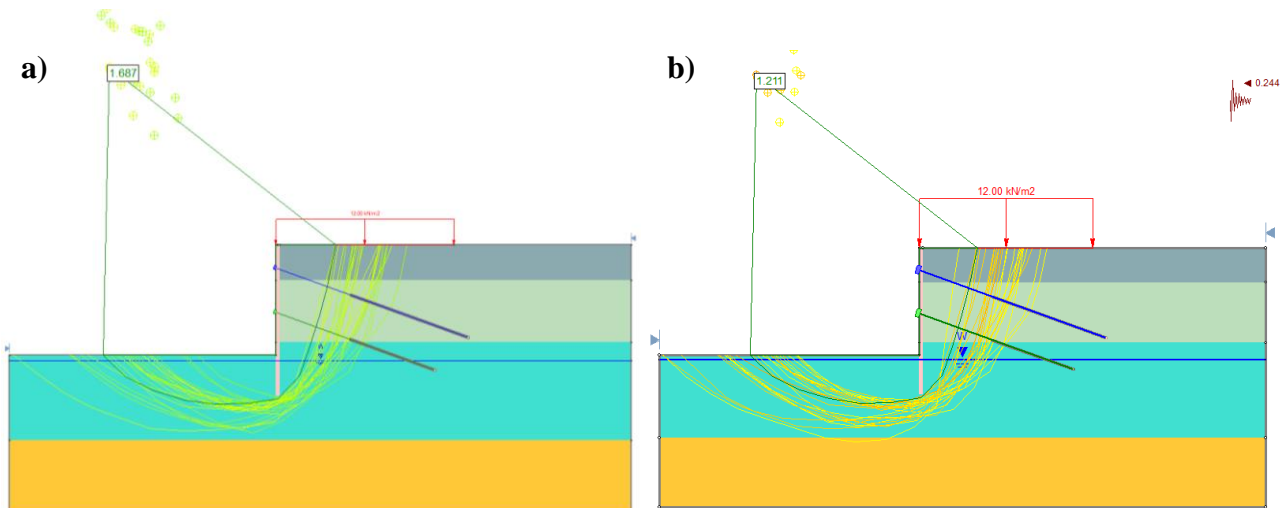


Figura 6: Ruptura obtenida para el método ASD a) Condición estática (FS=1.687) b) Condición sísmica (FS=1.370).

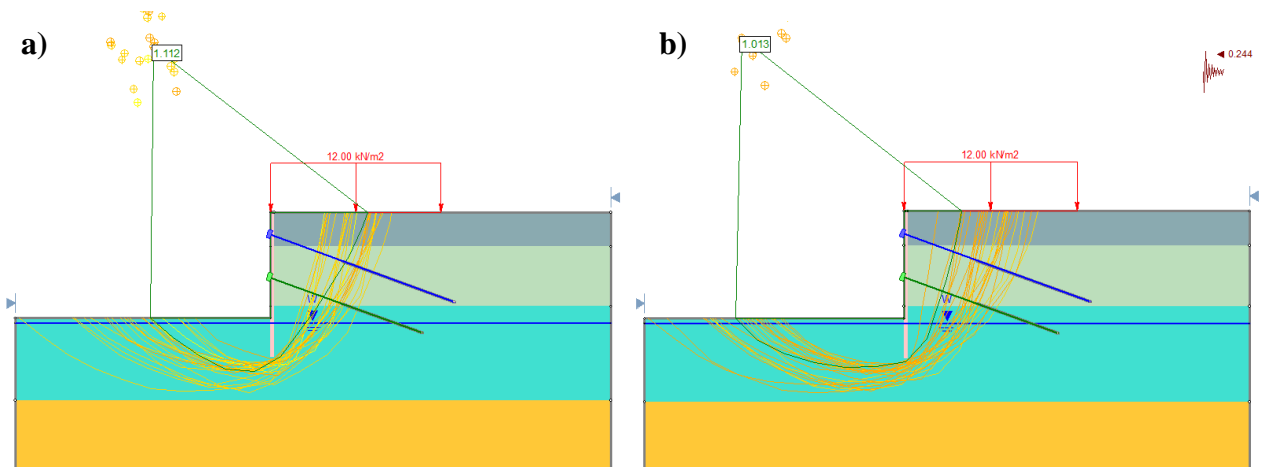


Figura 7: Ruptura obtenida para el método LRFD DA2 a) Condición estática (FS=1.112) b) Condición sísmica (FS=1.013)

En la Tabla 7, se presenta un resumen de los resultados obtenidos del FS global para el método ASD y el método LRFD, el cual el enfoque DA2 muestra una mejor aproximación a la práctica basada en el método ASD, con un FS cercano a 1.0.

Tabla 7: Resumen de los resultados de FS global obtenidos con *Slide* para el “Edificio Nueva Era”

Método	Norma	Enfoque de Diseño	FS _{ESTÁTICO}	FS _{SISMICO}
ASD	NCh 3206	-	1,687	1,211
LRFD	EC-7	DA 1-1	1,453	1,200
LRFD	EC-7	DA 1-2	1,272	0,970
LRFD	EC-7	DA 2	1,112	1,013
LRFD	EC-7	DA 3	1,175	1,019

6.1.2 “Studio Victoria”

En las Figuras 8 y 9, se muestra los FS del método ASD y el método LRFD enfoque de diseño DA2, con FS=1.756 y 1.365 obtenido con la condición estática y FS=1.335 y 1.063 de la condición sísmica, respectivamente, donde esta condición muestra una amplia área de ruptura. En el Anexo 2, se muestra la superficie de ruptura de los enfoques de diseño.

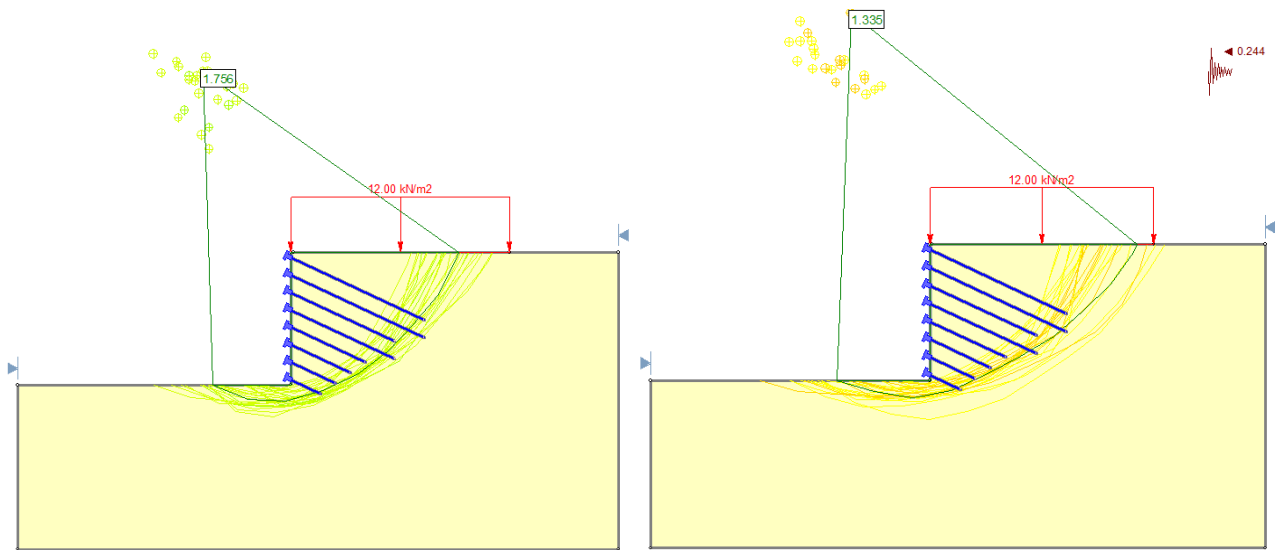


Figura 8: Ruptura obtenido para método ASD **a)** Condición estática (FS=1.756) **b)** Condición sísmica (FS=1.335).

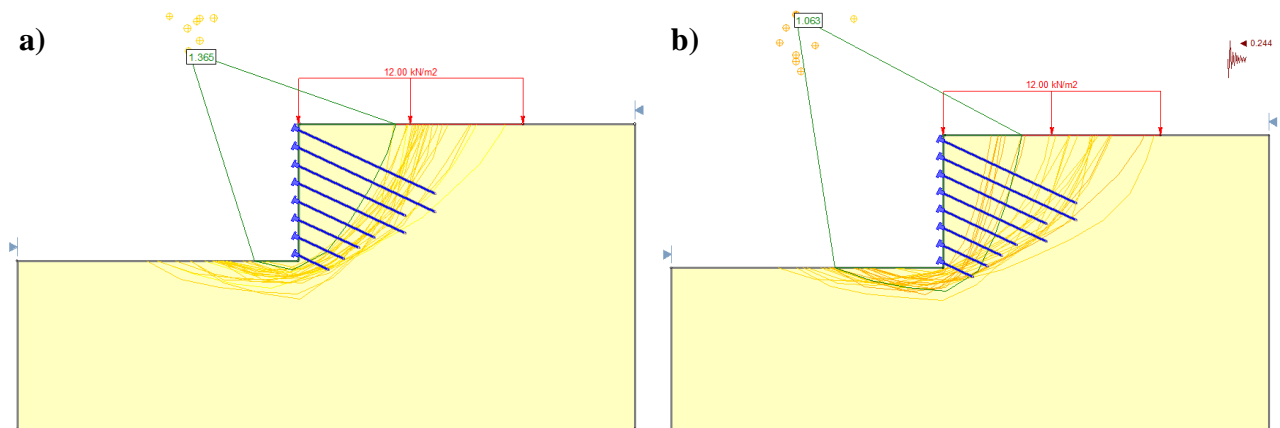


Figura 9: Ruptura obtenido para método LRFD DA2 **a)** Condición estática (FS=1.365) **b)** Condición sísmica (FS=1.063).

En la Tabla 8, se presenta un resumen de los resultados obtenidos del FS global para el método ASD y el método LRFD, para el proyecto “Studio Victoria”, el cual el enfoque DA2 muestra una mejor aproximación a la práctica basada en el método ASD, con un FS cercano a 1.0.

Tabla 8: Resumen de los resultados de FS global obtenidos con *Slide* para el “Studio Victoria”

Método	Norma	Enfoque de Diseño	FS _{ESTÁTICO}	FS _{SISMICO}
ASD	FHWA	-	1,756	1,335
LRFD	EC-7	DA 1-1	1,655	1,416
LRFD	EC-7	DA 1-2	1,395	1,065
LRFD	EC-7	DA 2	1,365	1,063
LRFD	EC-7	DA 3	1,402	1,064

6.2 Phase²

El análisis de estabilidad por el MEF fue realizado con el programa *Phase2 v8.0*, y usando la técnica de reducción de resistencia al corte (SFR). Las propiedades de los materiales se presentan en las Tablas 5 y 6, el cual están expresadas con el criterio de ruptura de Mohr-Coulomb.

6.2.1 “Edificio Nueva Era”

En las Figuras 10 y 11 se muestran los desplazamientos totales y la superficie de falla crítica, a través de la degradación progresiva de la resistencia del suelo, del conjunto suelo-anclaje, para las condiciones estáticas y sísmicas. En el Anexo 3, se muestra los desplazamientos y la superficie de falla de los enfoques de diseño.

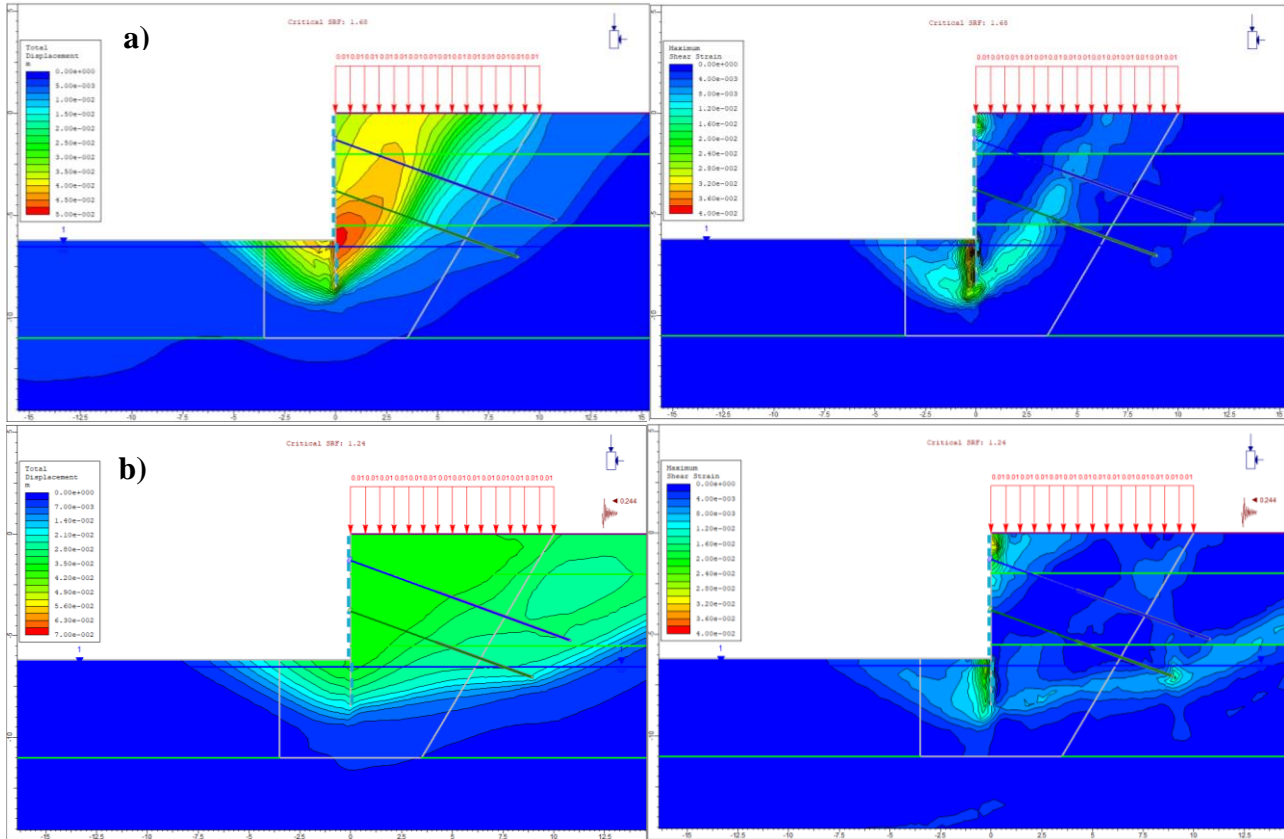
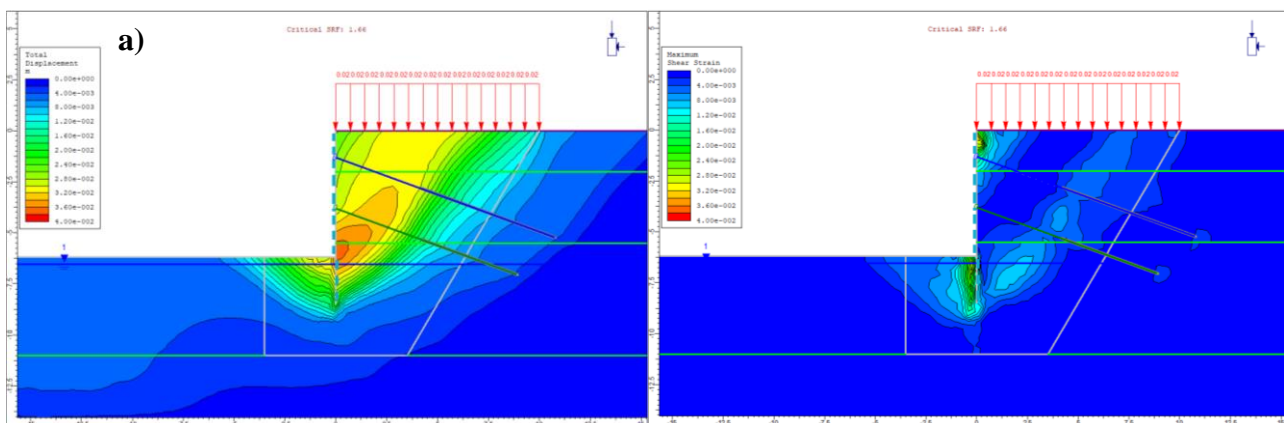


Figura 10: Desplazamientos totales (izquierda) y Superficie de falla crítica (derecha) del conjunto de suelo-anclaje, Método ASD **a)** Condición estática FS=1.68 **b)** Condición sísmica FS=1.24.



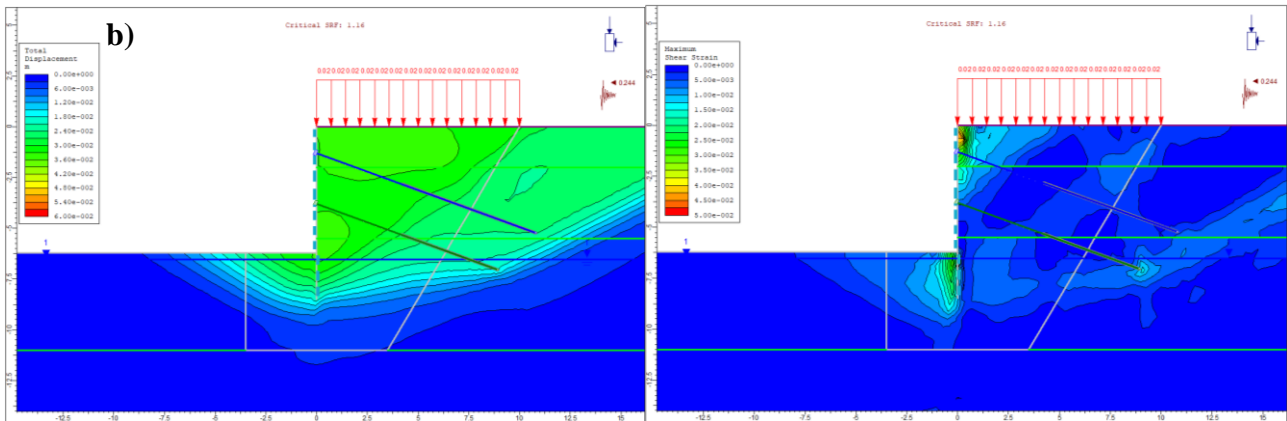


Figura 11: Desplazamientos totales (izquierda) y Superficie de falla crítica (derecha) del conjunto de suelo-anclaje, Método LRFDA2 a) Condición estática FS=1.66 b) Condición sísmica FS=1.16.

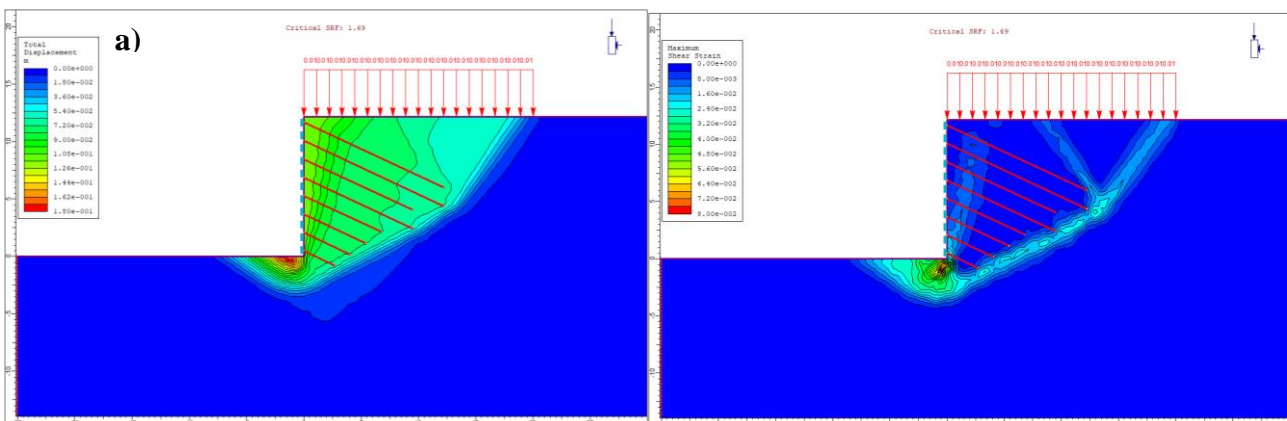
En las Figuras 10 y 11, se puede observar una concentración de deformación en la zona basal del muro (condición estática), y para la condición sísmica la deformación es similar en todo el largo del muro. Los valores de deslizamientos son altos como se muestra en la Tabla 9, con un desplazamiento máximo total para la condición estática y sísmica de 45 y 30 mm respectivamente.

Tabla 9: Resumen de los resultados obtenidos del software Phase² del “Edificio Nueva Era

Método	Norma	Enfoque de Diseño	FS _{ESTÁTICO}	FS _{SISMICO}	Desp.máx Estático (mm)	Desp.máx Sísmico (mm)
ASD	NCh 3206	-	1,68	1,24	45	32
LRFDA	EC-7	DA 1-1	1,66	1,16	32	30
LRFDA	EC-7	DA 1-2	1,24	0,82	24	32.4
LRFDA	EC-7	DA 2	1,66	1,16	32	29
LRFDA	EC-7	DA3	1,55	0,94	40	30

6.2.2 “Studio Victoria”

En las Figuras 12 al 13 se muestran los desplazamientos totales y la superficie de falla crítica a resistencia del suelo, para las condiciones estáticas y sísmicas del conjunto suelo-anclaje de los métodos ASD y LRFDA. En el Anexo 4, se muestra los desplazamientos y la superficie de falla de los enfoques de diseño.



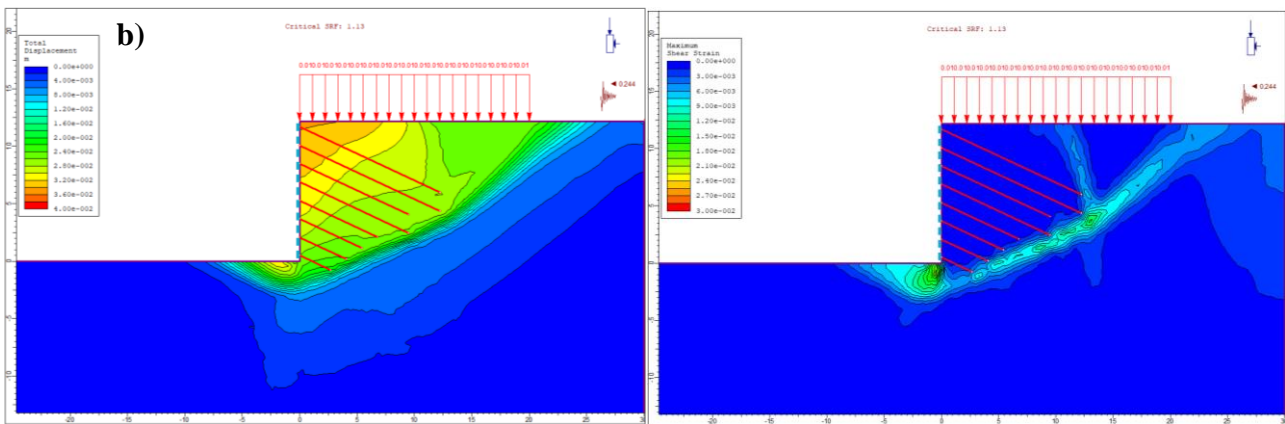


Figura 12: Desplazamientos totales (izquierda) y Superficie de falla crítica (derecha) del conjunto de suelo-anclaje, Método ASD **a)** Condición estático FS=1.69 **b)** Condición sísmica FS=1.13.

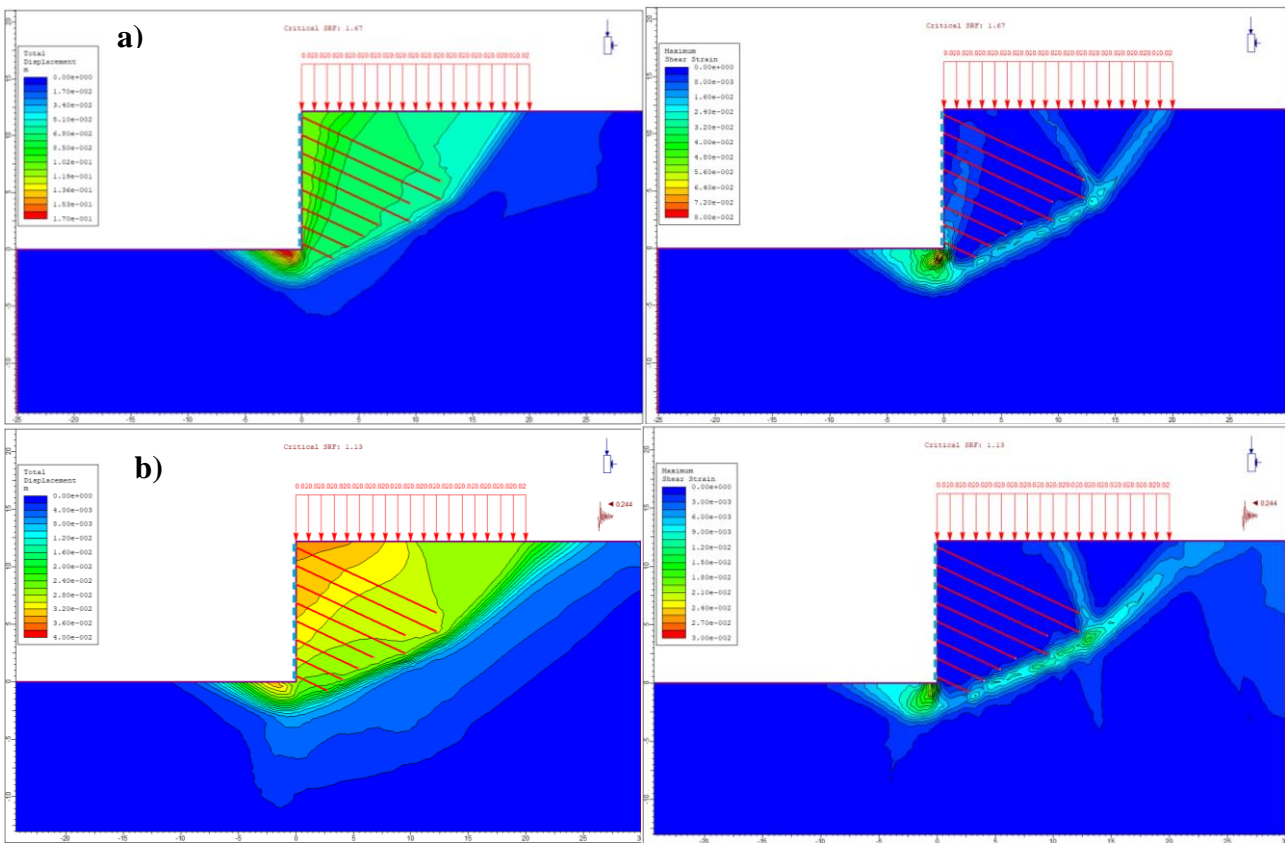


Figura 13: Desplazamientos totales (izquierda) y Superficie de falla crítica (derecha) del conjunto de suelo-anclaje, Método LRFD DA2 **a)** Condición estático FS=1.67 **b)** Condición sísmica FS=1.13.

En ambas Figuras, se observan la distribución de las deformaciones máximas y mínimas del suelo, con una concentración de deformación en la zona basal (condición estática) y en la zona de la corona (condición sísmica). Los valores de desplazamiento son altos como se muestra en la Tabla 10, con un desplazamiento máximo total para la condición estática y sísmica de 180 y 85.9 mm respectivamente, para el método ASD y enfoque de diseño DA3

Tabla 10: Resumen de los resultados obtenidos del software Phase² del “Studio Victoria”.

Método	Norma	Enfoque de Diseño	FS _{ESTÁTICO}	FS _{SÍSMICO}	Despl. máx Estático (mm)	Despl. máx Sísmico (mm)
ASD	FHWA	-	1,69	1,13	180	81,6
LRFD	EC-7	DA 1-1	1,67	1,13	173	83,8
LRFD	EC-7	DA 1-2	1,26	0,85	167	84,6
LRFD	EC-7	DA 2	1,67	1,13	173	83,8
LRFD	EC-7	DA3	1,26	0,85	167	85,9

6.3 GGU-Retain y GGU-Stability

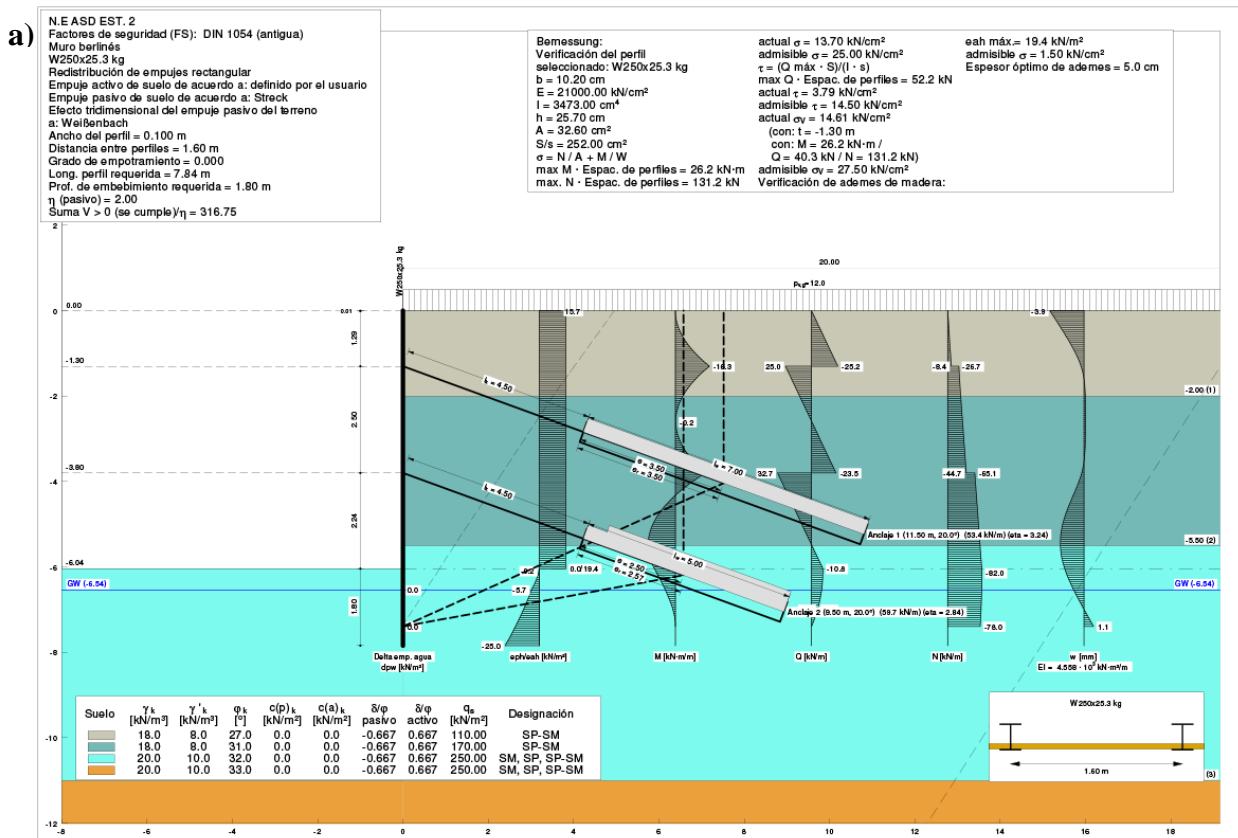
Se utilizan dos softwares para la verificación del diseño, ya que el *GGU-Retain*, evalúa los sistemas de entibaciones como muro berlines, tablaestaca, entre otros; y el *GGU-Stability* evalúa la estabilidad de taludes y de muros de contención como el *soil nailing*.

El *GGU-Retain*, el cual se basa en las recomendaciones de la EAB (2008). Este programa modela el sistema de entibación mediante el método de equilibrio límite utilizando el método de Kranz (1953) o también llamado método de bloques. El software *GGU-Stability*, evalúa el sistema de contención anclado, y al igual que el *GGU-Retain*, se basa en las recomendaciones de la EAB (2008).

Estos programas evalúan los factores de seguridad globales y parciales, donde la norma DIN 1054 (2010), que adopta el Enfoque de proyecto 2 y determina los valores de los coeficientes parciales, tanto de mayoración y efecto de acciones, como de minoración de resistencias.

6.3.1 “Edificio Nueva Era”

En las Figuras 14 y 15 se muestra los empujes estimados en el suelo, el primer grafico muestra los empujes activos debido a los estratos de suelo y a la sobrecarga de 12kPa de la estructura y basal 2 kPa, y el empuje pasivo de reacción. La segunda distribución corresponde a los momentos flectores la tercera y cuarta son las de corte y de carga axial o normal, con estos valores se calcula la armadura del muro para resistir tanto la tracción como la compresión y el corte. Por último, las deformaciones con valor máximo de 20 - 25 mm.



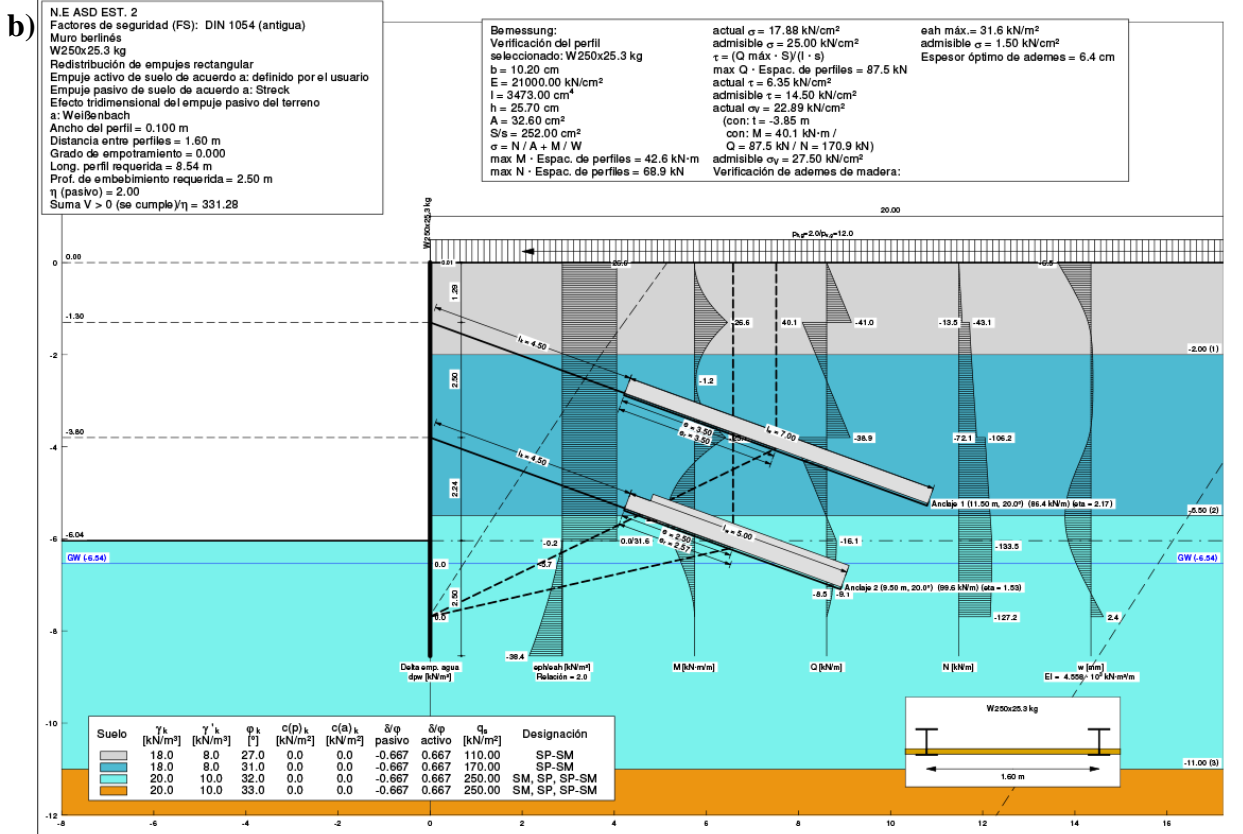
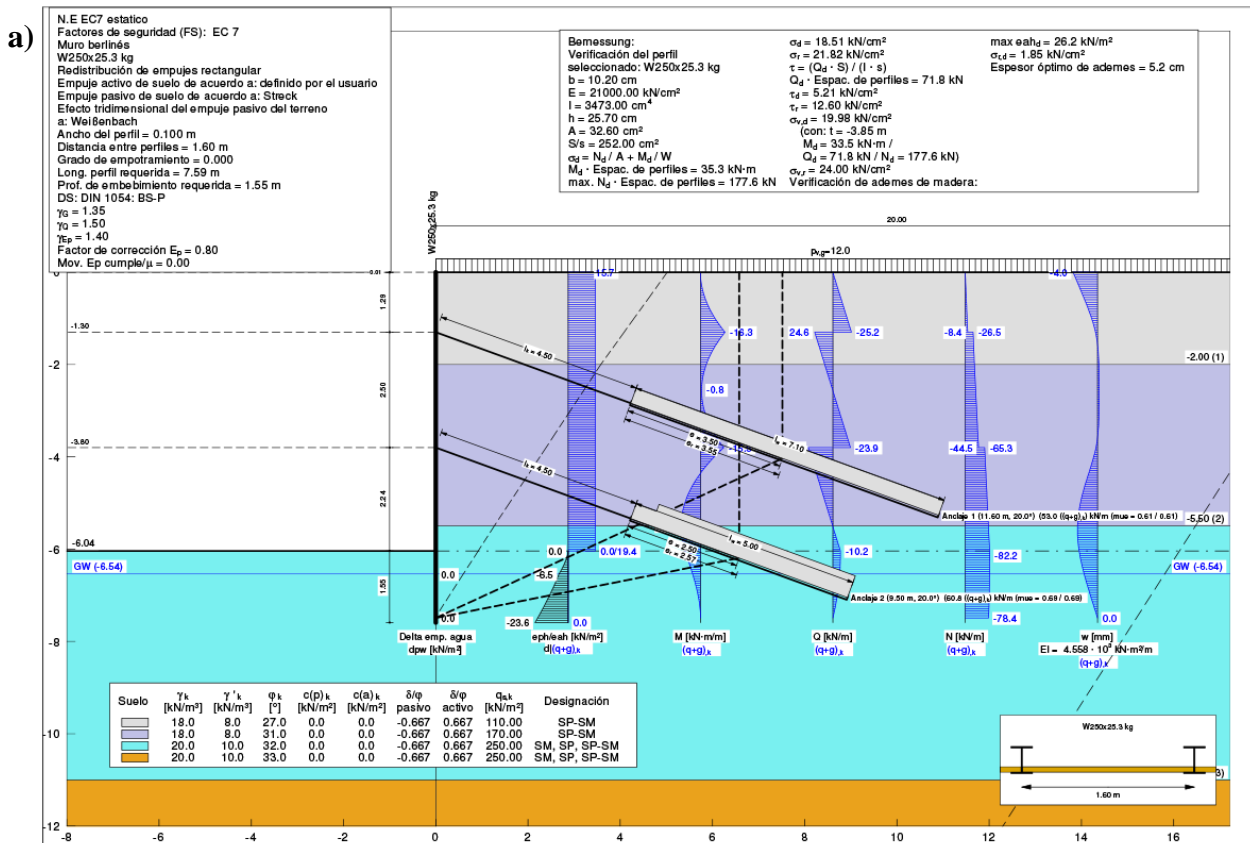


Figura 14: Calculo de muro berlines, método ASD a) Condición estático b) Condición sísmica.



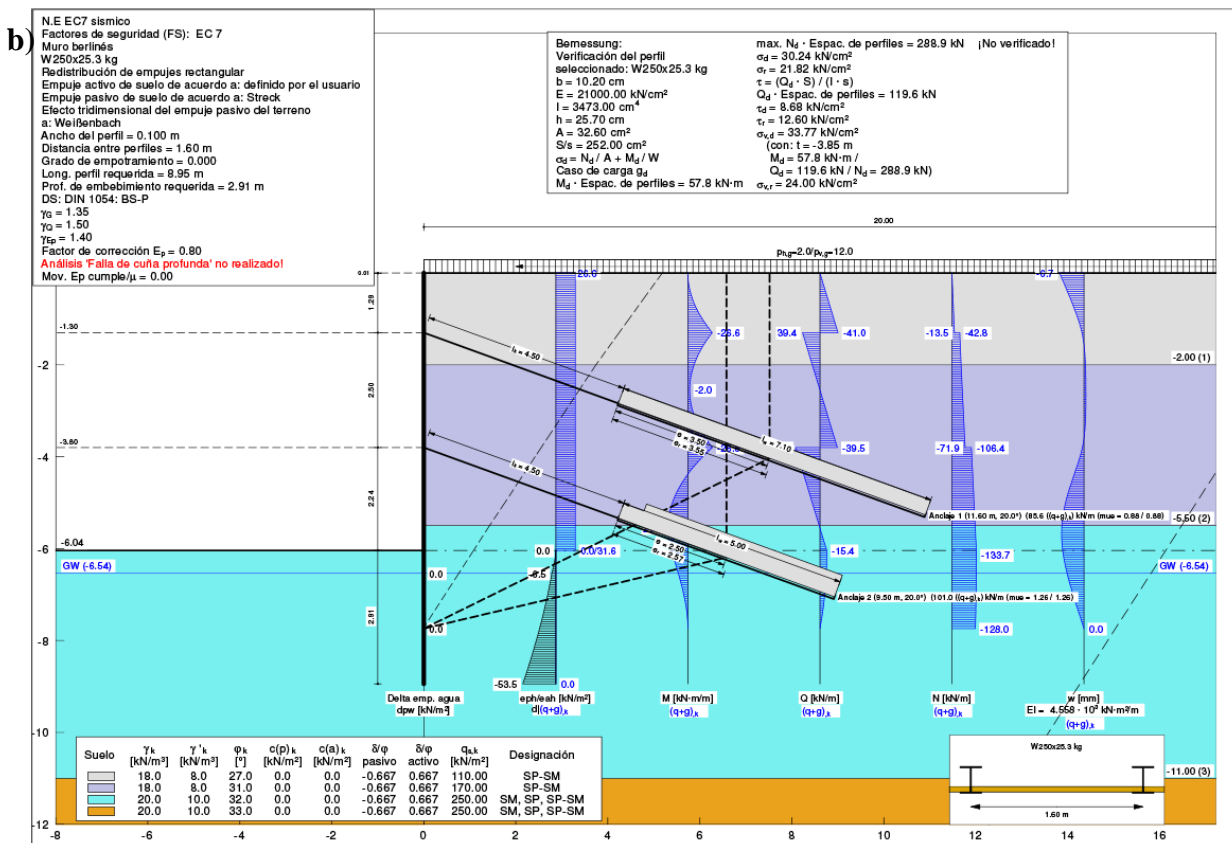


Figura 15: Calculo de muro berlínés, método LRFD a) Condición estático b) Condición sísmica.

Para la Figura 14, para el método ASD, la estructura se mantiene estable, con un desplazamiento máximo de 6,7 mm para la condición sísmica, donde la Fuerza Normal máxima de diseño (N) es 213,59 kN.

En la Figura 15, para el método LRFD, la condición estática se mantiene estable con un desplazamiento máximo de 4,3 mm y para la condición sísmica, el desplazamiento máximo es de 6,7mm. En el último caso existe falla de cuña, por lo tanto, hay que rediseñar las longitudes de los anclajes y no se puede realizar la verificación de la dimensión de los ademes de madera, ya que la tensión de fluencia es menor a la del diseño.

6.3.2 “Studio Victoria”

En las 16 y 17 se muestra la salida del software GGU-Stability mediante el método de deslizamiento vertical de cuñas, ya que, al existir estructuras de refuerzos, se deberá analizar con un sistema de falla progresiva de deslizamiento. En este análisis se consideró una aceleración sísmica iguala 0.244g, una sobrecarga de 12kPa y 3 elementos de extracción en el sistema.

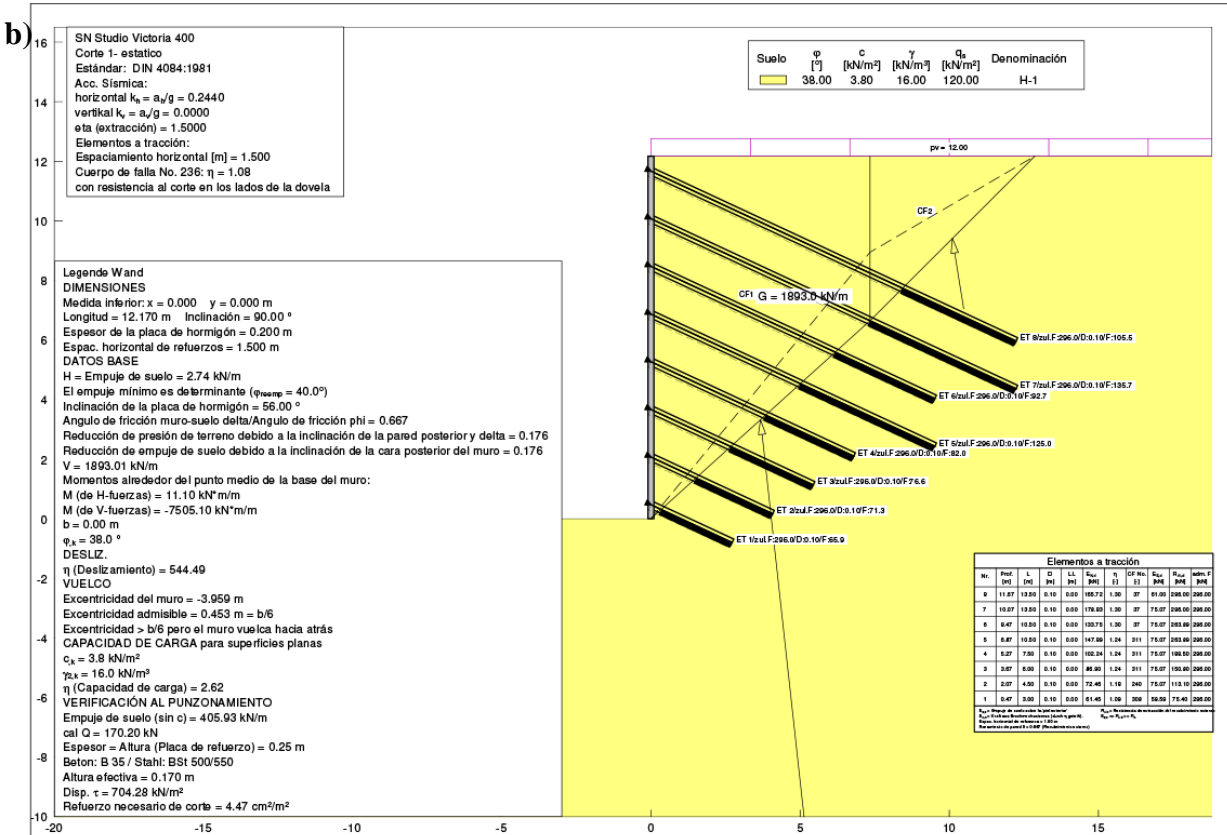
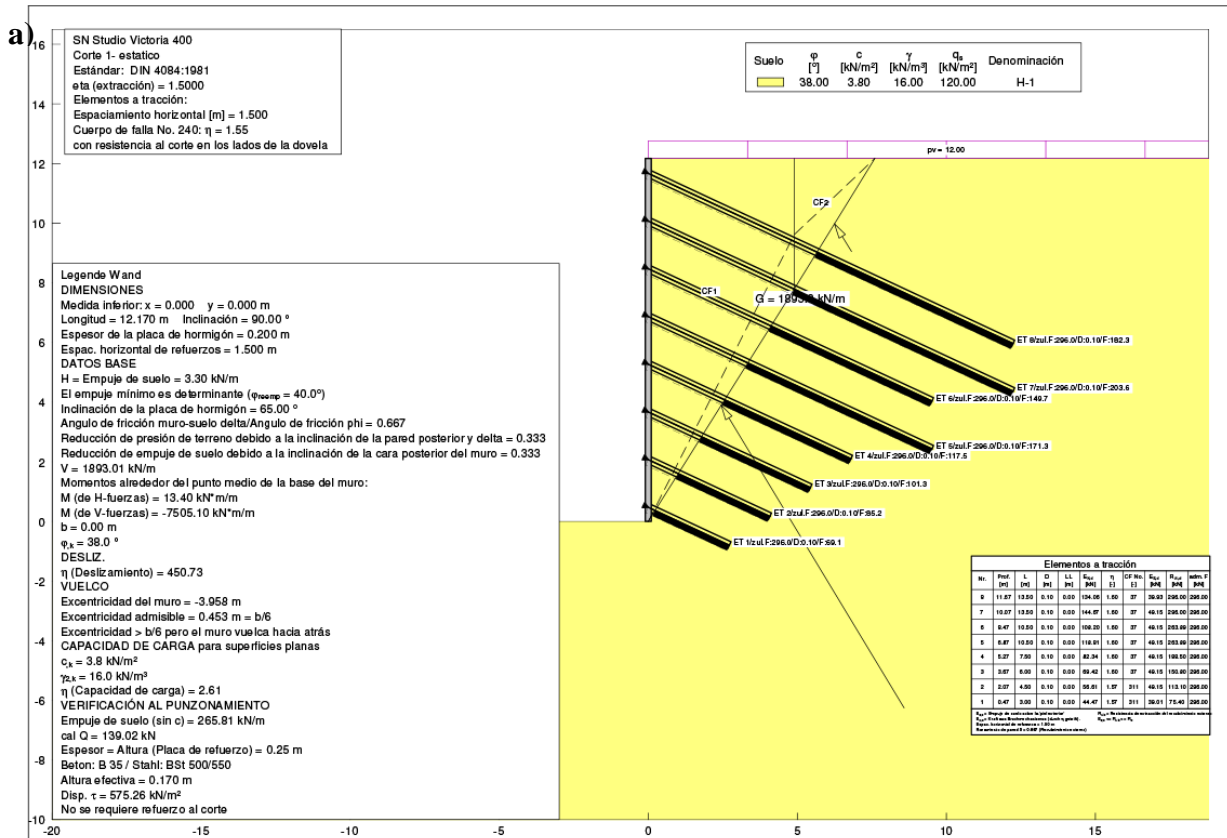


Figura 16: Calculo de Soil Nailing, método ASD a) Condición estático b) Condición sísmica.

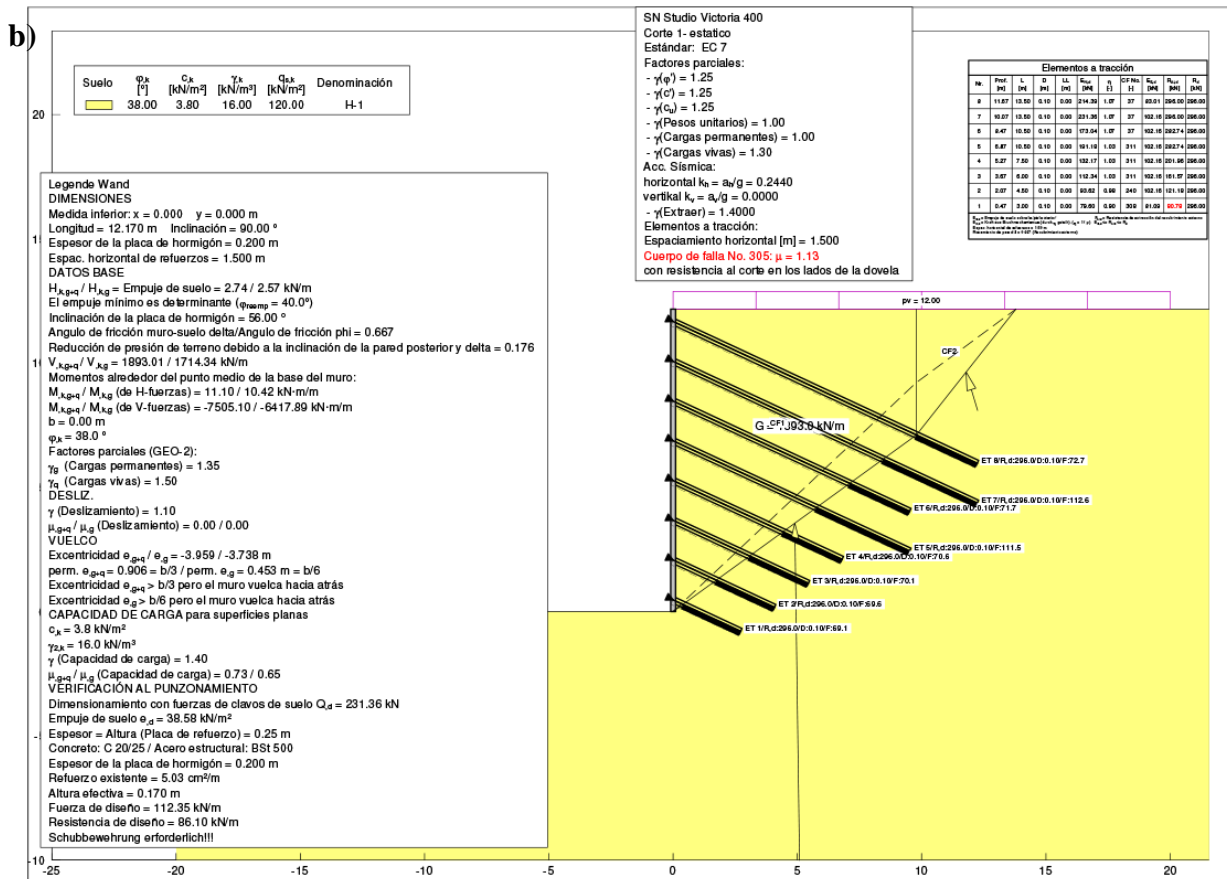
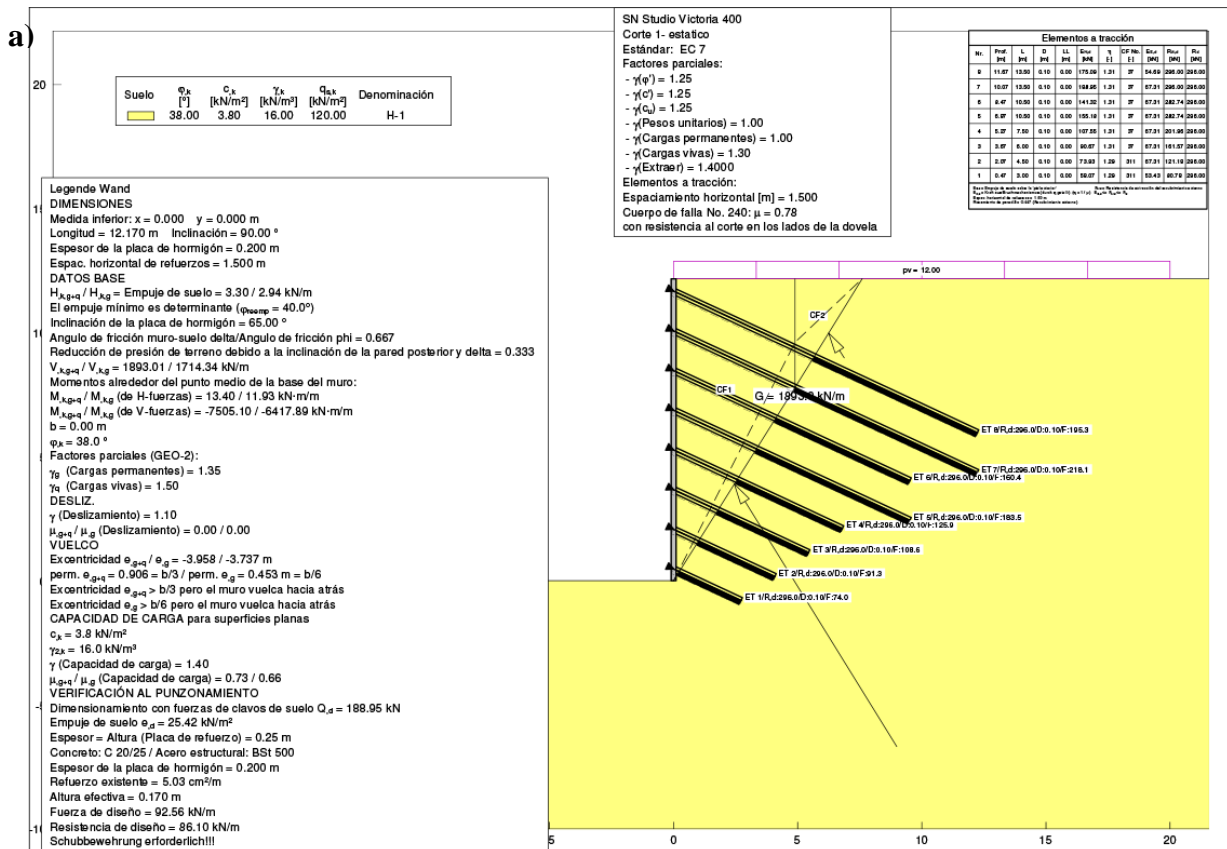


Figura 17: Calculo de Soil Nailing, método LRFD a) Condición estático b) Condición sísmica.

Tabla 11: Tabla de resumen de los Factores de Seguridad con el programa *GGU-Stability* proyecto “Studio Victoria”

Factor de Seguridad	ASD		LRFD	
	Estático	Sísmico	Estático	Sísmico
Global FS_G	1,55	1,08	0,78	1,13
Contra deslizamientos FS_{LS}	450,73	544,49	0	0
Capacidad de Soporte del Suelo FS_{BH}	2,61	2,62	0,66	0,65

Para la Figura 16, la estructura, en ambas condiciones tiene un factor de seguridad global de $FS_G=1,55$ y $1,08$ (Tabla 11), se mantiene estable con respecto al FHWA (2015). Además, se verifica la seguridad frente al deslizamiento y capacidad de soporte del suelo, en la cual son estables para ambas condiciones.

En la Figura 17, en comparación al método ASD, el factor de seguridad global debe ser $FS_G \leq 1$, por lo tanto, se verifica que las fuerzas actuantes hayan de ser menores a las fuerzas resistentes. En la condición estática se mantiene estable con un factor de seguridad es $FS_G=0.78$ (Tabla 9), y para la condición sísmica las fuerzas actuantes son mayores que las resistentes, ya que tiene un factor de seguridad $FS_G=1.13$. También se verifico la seguridad al deslizamiento y a la capacidad de soporte, donde es estable para ambas condiciones.

7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el método LRFD, para el método de elementos finitos y el método de equilibrio limite mediante GLE/Morgenstern-Price, el factor de seguridad, cuando es $\geq 1,0$ la resistencia del conjunto suelo-anclaje es mayor que la solicitante, por lo tanto es estable, y mientras se acerca al 1,0 el comportamiento es similar al método ASD; cuando el $FS < 1,0$, la solicitante es mayor que la resistente, por ende, el conjunto es inestable. Para el caso del programa *GGU-Stability* el comportamiento es al revés, falla cuando $FS > 1,0$ y es estable cuando $FS \leq 1,0$.

Para el caso “Edificio Nueva era” al evaluar el método de elementos finitos, a través del método LRFD, los valores del enfoque de diseño DA2 son iguales al enfoque de diseño DA1-1, esto debido a que en el programa, el terreno no se puede minorizar por el factor ponderado de la resistencia del suelo ($\gamma_R=1,10$). En el caso “Studio Victoria”, es algo similar, ya que los valores obtenidos de los enfoques de diseño DA1-1 y DA1-2, son iguales al enfoque de diseño DA2 y DA3 respectivamente, ya que los valores de entrada en el programa se usaron las características estructurales del perno, y los factores parciales minorizan la resistencia del conjunto suelo-anclaje.

Comparando los valores de FS obtenidos entre el MEL mediante GLE/Morgenstern-Price y el MEF, observado de la Figura 18, para ambas condiciones, se puede observar una tendencia de disminución del FS para el Enfoque de diseño DA1-2. Para la condición estática, en el caso del “Edificio Nueva Era”, los parámetros del MEF aumentan con respecto al MEL, lo mismo ocurre para la condición sísmica. En el caso de “Studio Victoria”, los FS obtenidos con el MEF son similares, aunque con aumento y disminución en los últimos enfoques de diseño, para la condición sísmica los valores del MEL son más altos que los del MEF.

Se puede inferir que los valores de FS para la condición estático son estables, para ambos métodos, ya que cumple con lo establecido en la norma NCh3206 y FHWA, y el $FS \geq 1,0$. En cambio, para la condición sísmica, para el método LRFD, los enfoques de diseño que suelen tener un $FS < 1,0$ son el DA1-2 y DA3 (Figura 18).

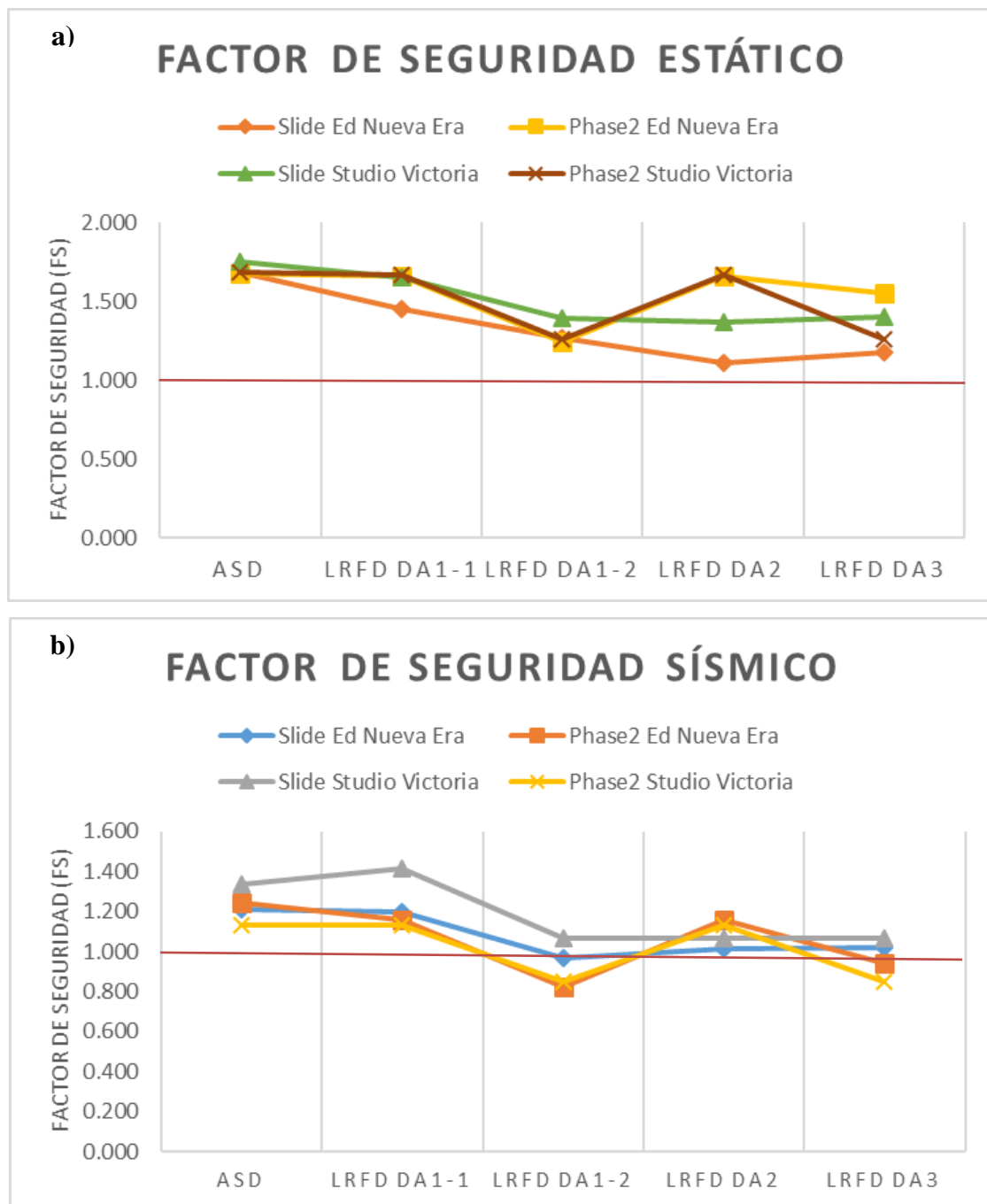


Figura 18: Factor de Seguridad de las metodologías de diseño, con el MEL y MEF

a) Condición Estática **b)** Condición Sísmica

Las superficies de fallas, para el “Edificio Nueva Era”, en la condición estática son similares entre los programas *Slide* y *Phase²*, sin embargo, para la condición sísmica, el MEF, la falla resulta ser más profunda (Figura 19a). En el proyecto “Studio Victoria”, la superficie de falla, para ambas condiciones resulta ser similares entre el MEL y el MEF (Figura 19b), sin embargo, para el estudio de equilibrio límite con el programa *GGU-Stability* la superficie de falla tiene menor área.

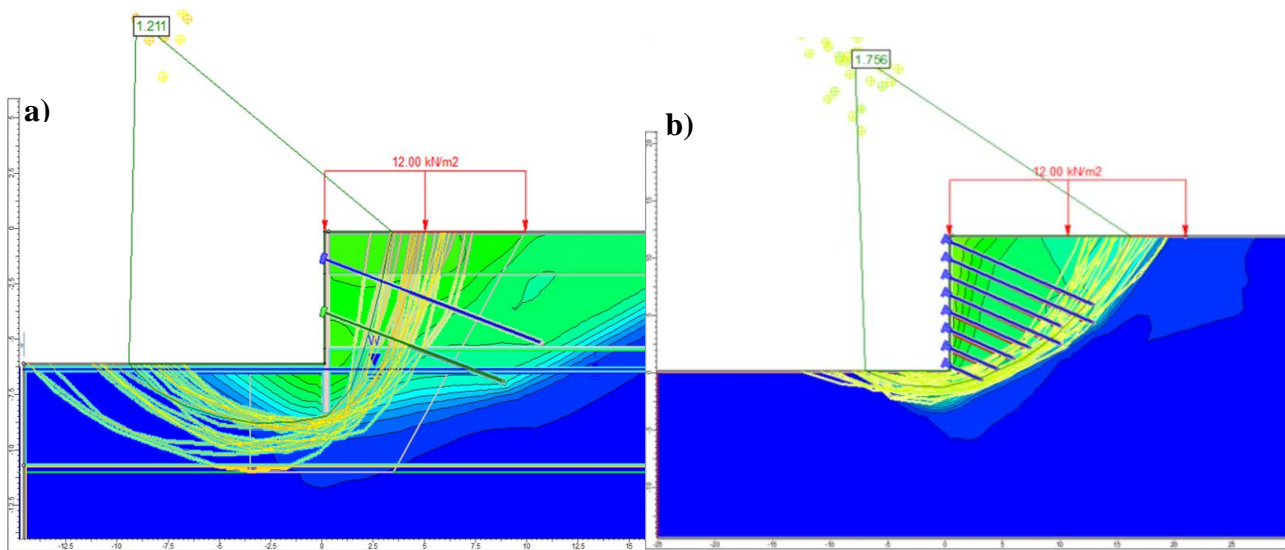


Figura 19: Comparación de los métodos de Equilibrio Limite y Elementos Finitos **a)** “Edificio Nueva Era” condición sísmica **b)** “Studio Victoria” condición estática.

En el programa *GGU-Retain*, en la condición estática, para el método ASD del “Edificio Nueva Era” se requiere una profundidad de embetimiento del perfil de 1,80 m, en cambio, para el método LRFD se requiere una profundidad de 1,55m, vale decir, que es más conservador el diseño. Para la condición sísmica, para el método ASD, se requiere una profundidad de embetimiento del perfil de 2,50 m y por el método LRFD el diseño falla por cuña, los anclajes y perfiles no soportan la carga.

8. CONCLUSIÓN

A pesar de que existen varios métodos, la superficie real de ruptura no puede ser calculada con exactitud, la ruptura ocurre generalmente por innumerables combinaciones de eventos desfavorables. Una superficie de ruptura prevista por cualquiera de los análisis no es necesariamente la superficie de falla, pero refleja una combinación de eventos desfavorables.

Los resultados del factor de seguridad del análisis de estabilidad global por el método de equilibrio limite, con el programa *Slide* (Rocscience) y *GGU-Stability*, para ambas condiciones, la excavación se mantiene estable. En el caso del *GGU-Retain*, es inestable para el método LRFD condición sísmica, por lo tanto rediseñar el proyecto, aumentando los anclajes, disminuir el espaciado de los perfiles y/o utilizar un perfil con mayor dimensión.

En el análisis de estabilidad global con el método de elementos finitos, el factor de seguridad es variable para el método LRFD, por la entrada de los parámetros en el programa *Phase²*, ya que en el programa no están incorporados los enfoques de diseño, y podría existir ciertos errores, por no incluir los factores de ponderación descritos en el eurocódigo7. Por lo que se recomienda utilizar otro programa para la verificación de la estabilidad.

La utilización del MEL con el programa *Slide* es simple, el cual no puede representar las deformaciones y/o desplazamientos de fallas del suelo. En comparación con el MEF, que tiene mayor ventaja, porque genera automáticamente durante el proceso de reducción de resistencia la superficie de falla crítica, sin que sea necesario predeterminarla al iniciar el proceso de cálculo.

El factor de seguridad para el método ASD, se mantiene estable para ambas condiciones, como se ve reflejado en los resultados obtenidos con los programas. El método LRFD para la condición estática, para ciertos enfoques de diseño, la resistencia es más alta que la solicitante, por lo tanto, más conservador con respecto al diseño. En la condición sísmica, los factores de seguridad tienden a ser más inestable.

La utilización del método LRFD es más racional tras las numerosas variables involucradas en el proyecto. La comparación de normas internacionales muestra, que aún está en curso la calibración de los valores de los coeficientes parciales, donde cada país podría tener su propia variable.

9. AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, a las personas que facilitaron la labor de la investigación, por esto agradezco al ing. Sergio Villalobos, profesor guía, por haberme orientado en cada etapa de este proyecto. Al Dr. Felipe Villalobos, profesor informante, quien apporto su conocimiento para realizar un proyecto más completo. Agradecer principalmente a mis padres Sandra y Luis, quienes con su amor incondicional me brindaron el apoyo y ánimo que necesitaba. A mis hermanos Natalia y Diego, que con sus palabras de aliento pude seguir adelante con este proyecto. A mi sobrino hermoso Benjamín que con su alegría y entrega de amor, me dio la energía necesaria para terminar este proyecto. A mis mejores amigos, María José, Paz Daniela, Matías y Germán, que siempre estuvieron cuando los necesitaba. Por último, dar gracias a todas las personas que estuvieron y están presente en mi vida, familiares, compañeros, profesores, que me hicieron la persona que soy hoy en día.

10. REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).** (2014). "Especificaciones AASHTO para el diseño de puentes por el método LRFD". Segunda Edición.
- Brinkgreve, B.J., Kumarswamy, S and Swolfs. V.M.** (2016a). PLAXIS 3D, reference manual, Plaxis v.8.0. A. A. Balkema Publishers, 437 p.
- Centro de Investigación Minero Metalúrgico (CMM).** (2004). Diagnóstico Geo-Ambiental de Concepción y Talcahuano.
- DIN 1054.** (2010). Subsoil – Verification of the safety of earthworks and foundations – Supplementary rules to DIN EN 1997-1, Beuth Verlag, Berlin.
- EAB** (2008). Recommendations on Excavations. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., 2nd edition. Ernst & Sohn.
- European Committee for Standardization (ECS)** (2010). EN 1997 Eurocode 7 – Geotechnical Design – Part. 1: General Rules
- Federal Highway Administration (FHWA)** (2015). "Ground anchors and anchored systems". Geotechnical Engineering circular No 4. U.S Department of transportation. Federal Highway Administration., 8th edition. Ernst & Sohn.
- GGU-RETAIN** (2017). Analysis and design of sheet pile walls, soldier pile walls, in-situ concrete walls, CMG walls and combined sheet pile walls. Versión 8.0
- GGU-STABILITY** (2018). Slope Stability Analysis and Analysis of Soil Nailing and Reinforced Earth walls to DIN 4084 and EC7. Versión 11.0.
- Haaijer, G.** (1983) "Limit States Design- A Tool for Reducing the Complexity of Steel Structures". *AISC National Engineering Conference*, March 1983.
- Instituto Nacional de Normalizacion, NCh 3206** (2010) Geotecnia – Excavaciones, entibaciones y socialzados – Requisitos. Instituto Nacional de Normalización, Chile, 2009.
- Kennedy, D.J.L.** (1985). "North American Limit States Design," *Proceedings the 1985 International Engineering Symposium on Structural Steel. Chicago: American Institute of Steel Construction, May 1985.*
- Kranz, E.** (1953). "Über verankerung von spundwänden". Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, Alemania.
- Lancuyen** (2018). Proyecto de Entibación Edificio Nueva Era. Muro berlinés. Informe Interno, Concepción
- Mc Cormac, J., and Brown, R.** (2011). "Diseño de Concreto Reforzado". México D.F.: Alfaomega Grupo Editorial S.A.
- Ranke, A. and Ostermayer, H.** (1968). "Beitrag zur stabilitatsuntersuchung mehrfach verankerter baugrubemumschlie". *Die Bautechnik, Alemania*, 45 (10): 341-350.
- Rochel Awad, R.** (2007). Hormigón Reforzado. Medellin: Universidad EAFIT.

- RS2** (2015). Finite element analysis for excavations and slopes software. Version 8.0, Rocscience Inc., Toronto
- Slide2** (2002). 2D Limit Equilibrium Slope Stability for Soil and Rock Slopes. Version 6.0, Rocscience Inc., Toronto.
- SOENCO Soluciones Geotécnicas** (2018). Proyecto Edificio Studio Victoria. Muro Soil nailing. Informe Interno, Concepción
- Stocker, M. F., Korber, G. W., Gassler, G. and Gudehus, G.** (1979). Soil nailing. *Proc. Int. Conf. On Reinforcement*, pp. 469 – 474.
- Vivallos, J., Ramírez, P. y Fonseca, A.** (2010). Microzonificación sísmica de la ciudad de Concepción.

ANEXO 1

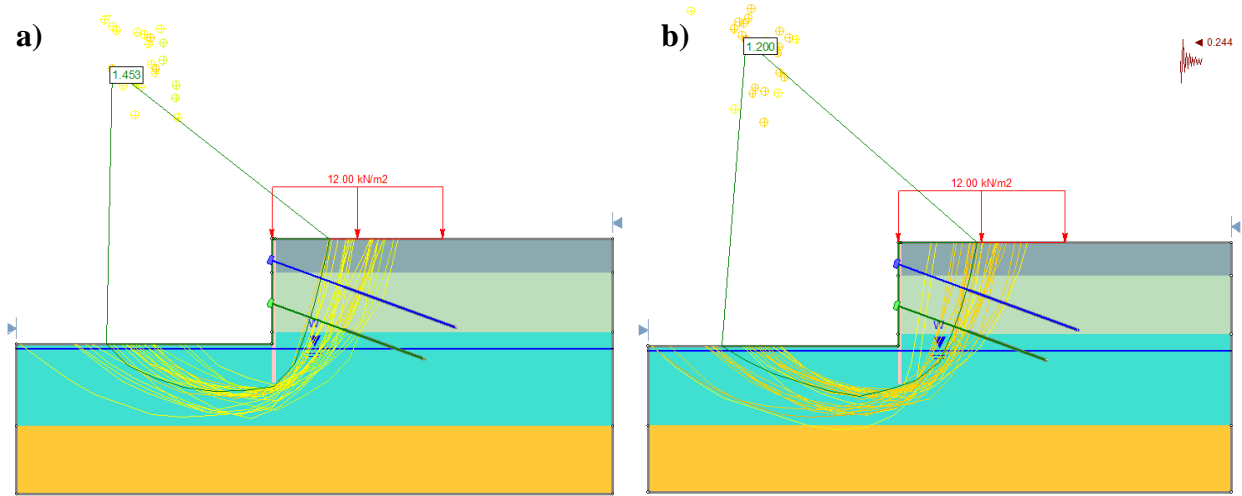


Figura 1: Ruptura obtenido para el método LRFD DA1-1 a) Condición estática (FS=1.453) b) Condición sísmica (FS=1.200).

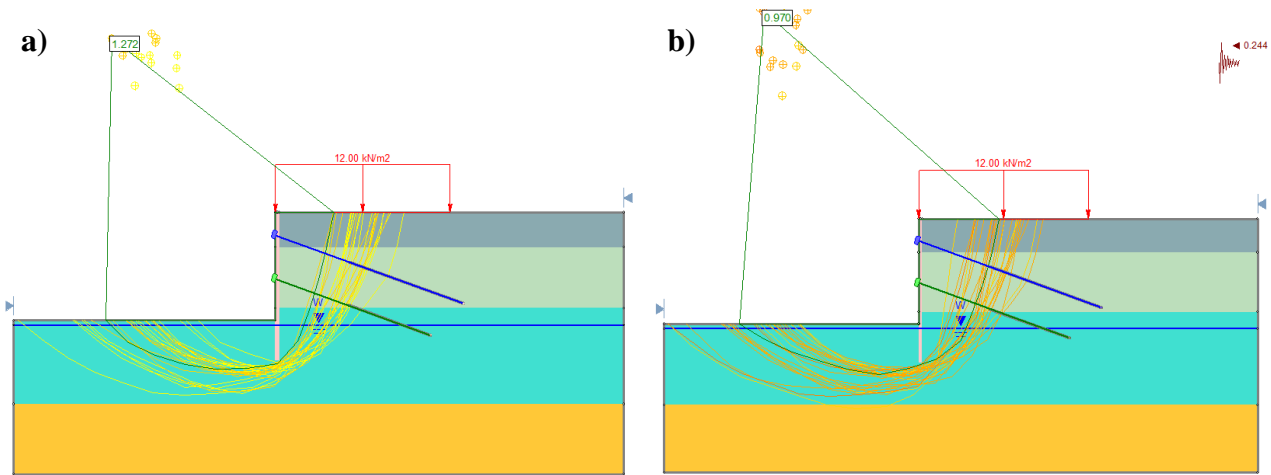


Figura 2: Ruptura obtenido para el método LRFD DA1-2 a) Condición estática (FS=1.272) b) Condición Sísmica (FS=0.97).

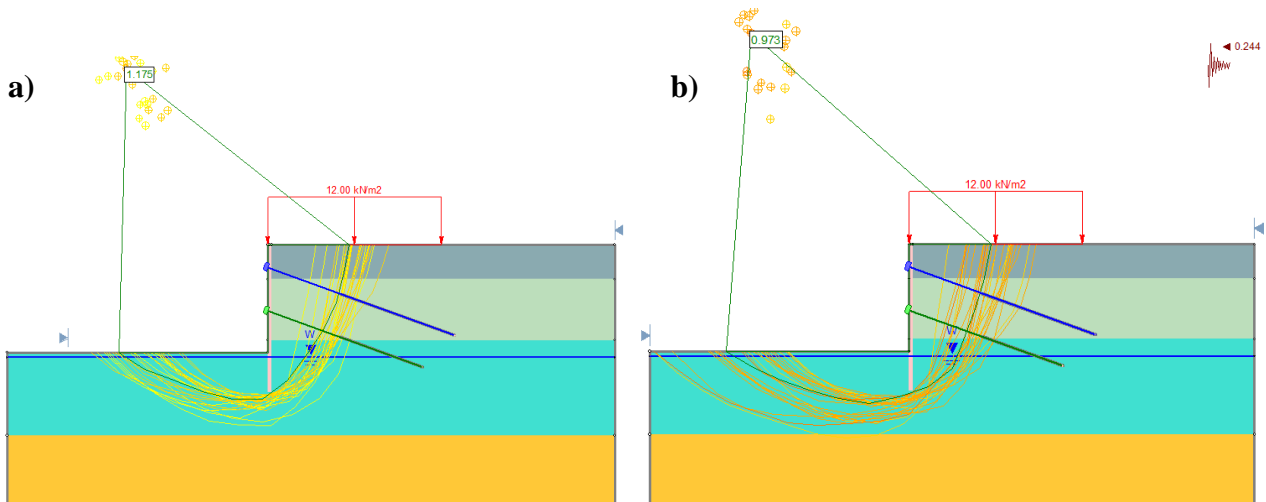


Figura 3: Ruptura obtenido para el método LRFD DA3 a) Condición estática (FS=1.175) b) Condición sísmica (FS=1.019).

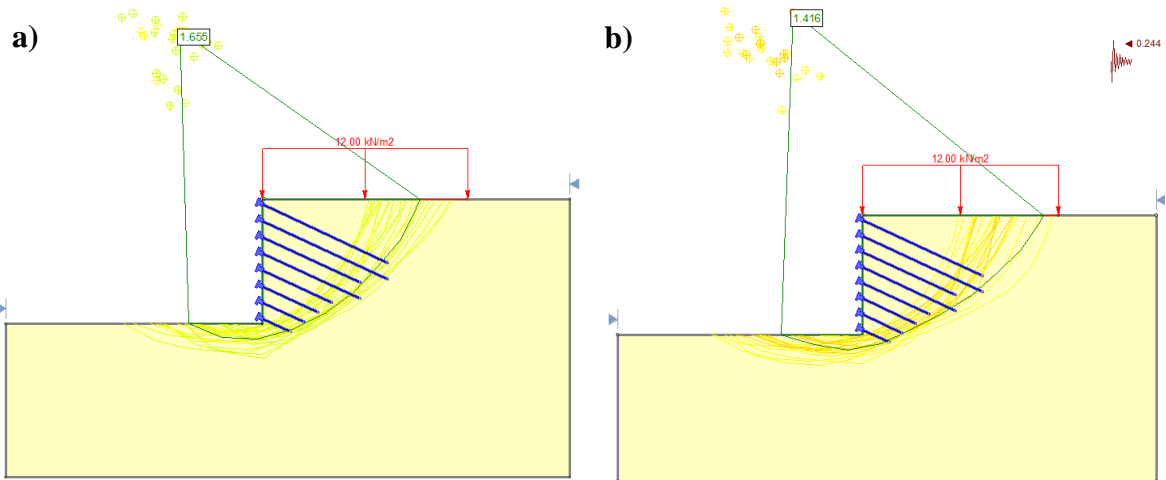
ANEXO 2


Figura 1: Ruptura obtenido para el método LRFD DA1-1 **a)** Condición estática (FS=1.655) **b)** Condición sísmica (FS=1.416).

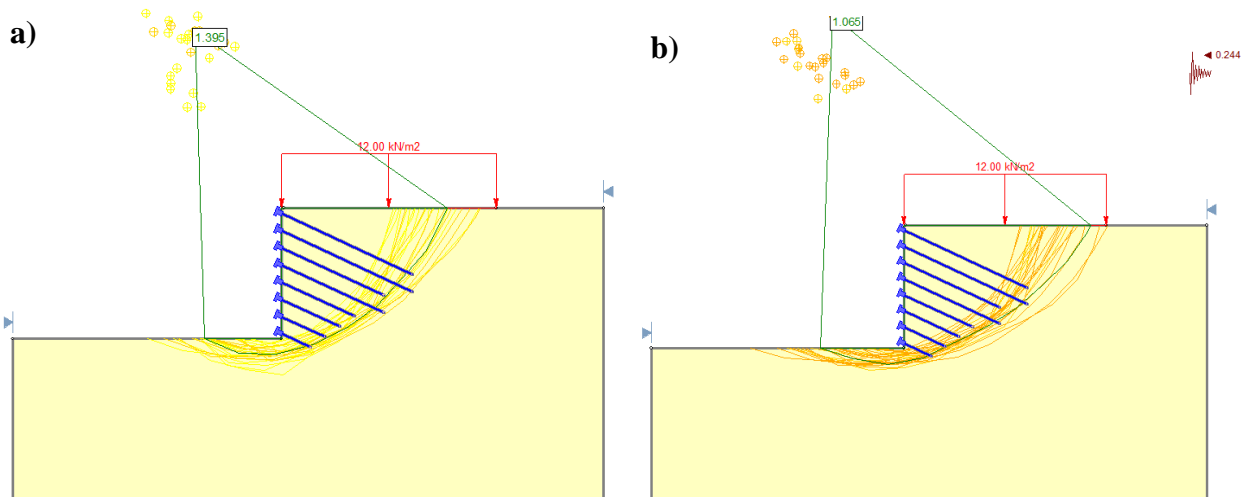


Figura 2: Ruptura obtenido para el método LRFD DA1-2 **a)** Condición estática (FS=1.687) **b)** Condición sísmica (FS=1.370).

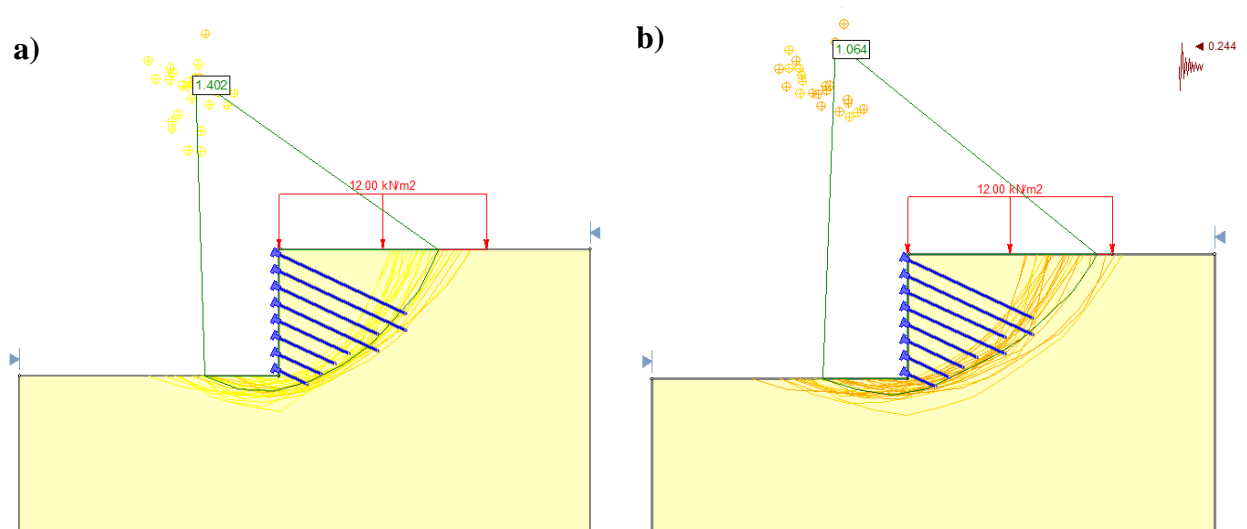


Figura 3: Ruptura obtenido para el método LRFD DA3 **a)** Condición estática (FS=1.402) **b)** Condición sísmica (FS=1.064).

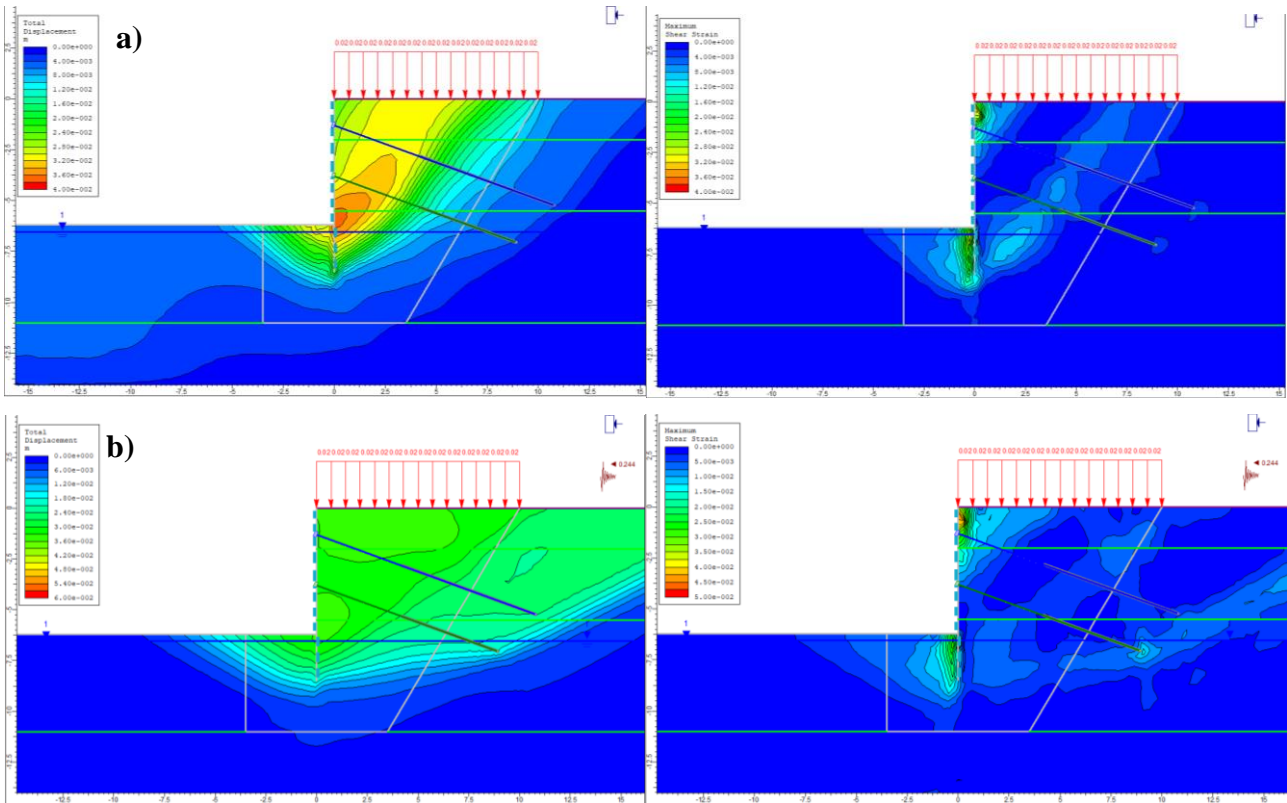
ANEXO 3


Figura 1: Desplazamientos totales (izquierda) y Superficie de falla crítica (derecha) del conjunto de suelo-anclaje, Método LRFD DA1-1 **a)** Condición estática FS=1.66 **b)** Condición sísmica FS=1.16.

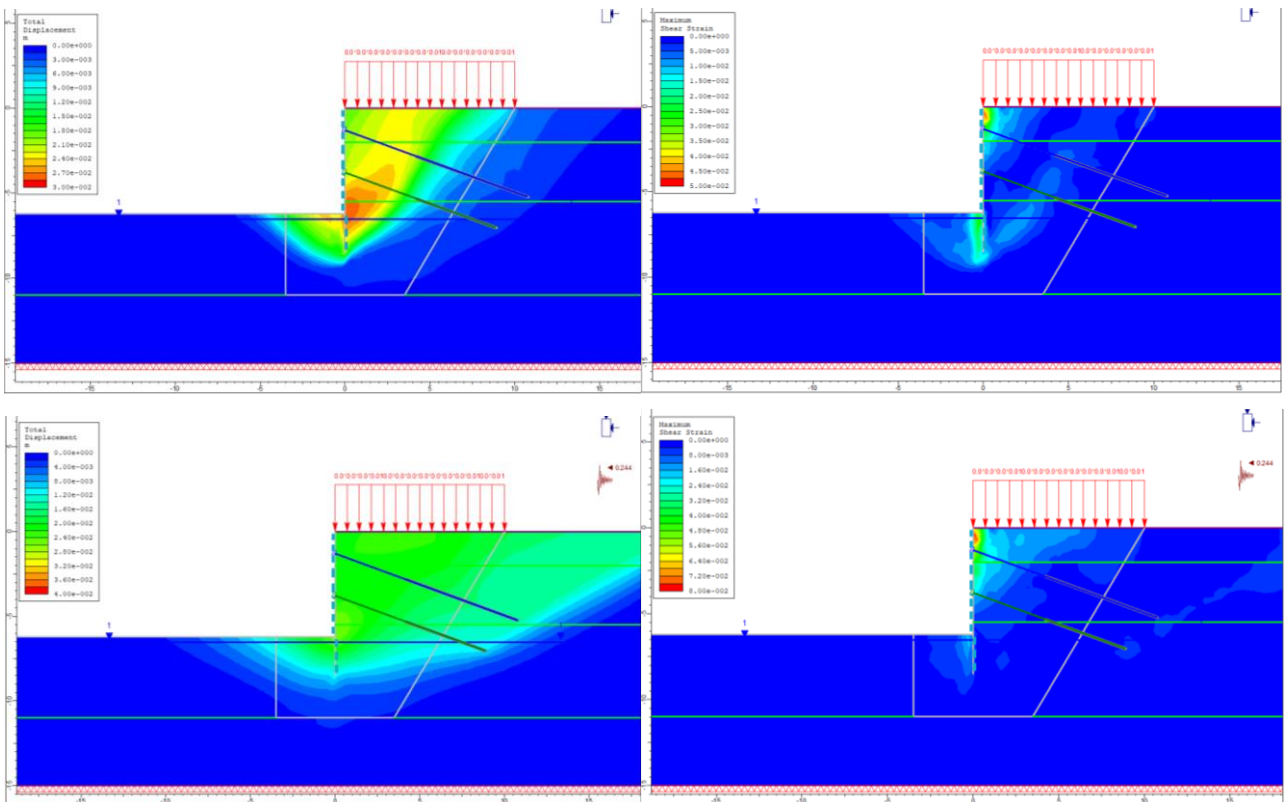


Figura 2: Desplazamientos totales (izquierda) y Superficie de falla crítica (derecha) del conjunto de suelo-anclaje, Método LRFD DA1-2 **a)** Condición estática FS=1.24 **b)** Condición sísmica FS=0.82.

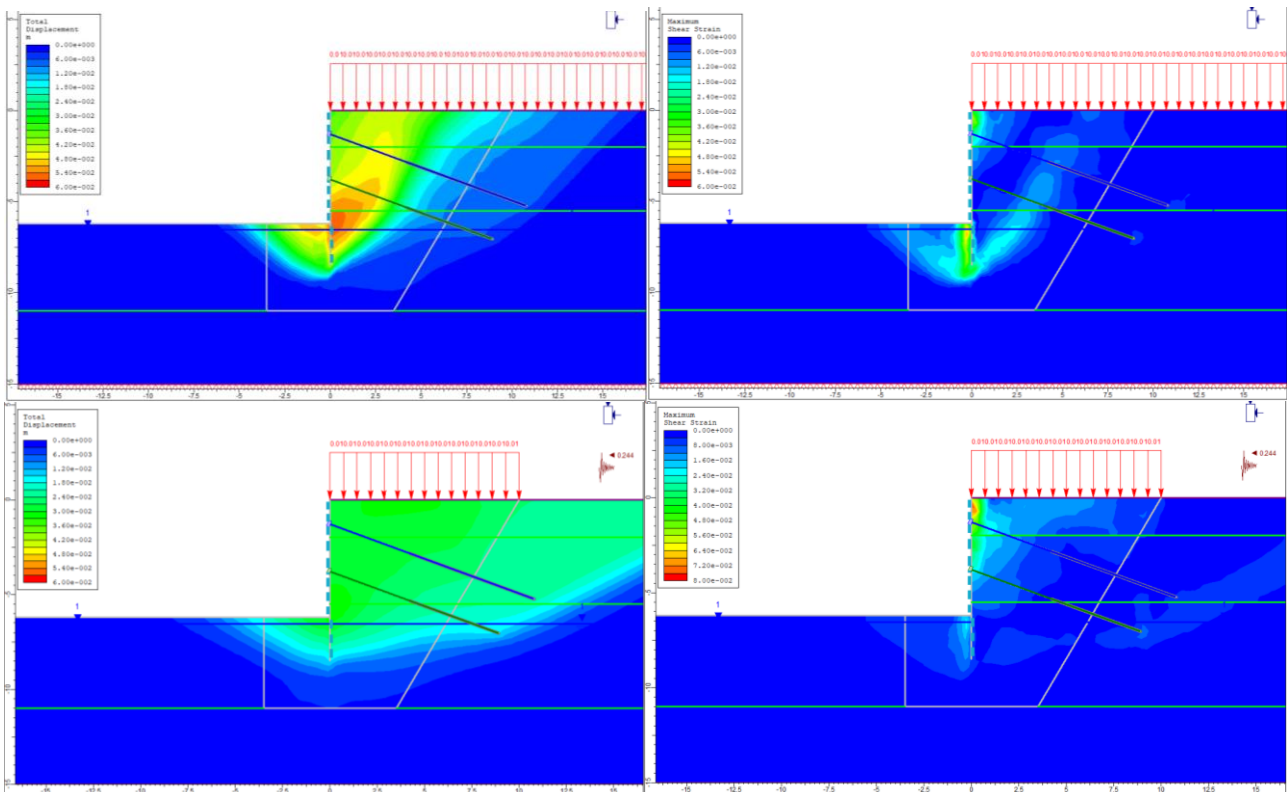


Figura 3: Desplazamientos totales (izquierda) y Superficie de falla crítica (derecha) del conjunto de suelo-anclaje, Método LRFD DA3 a) Condición estática FS=1.55 b) Condición sísmica FS=0.94.

ANEXO 4

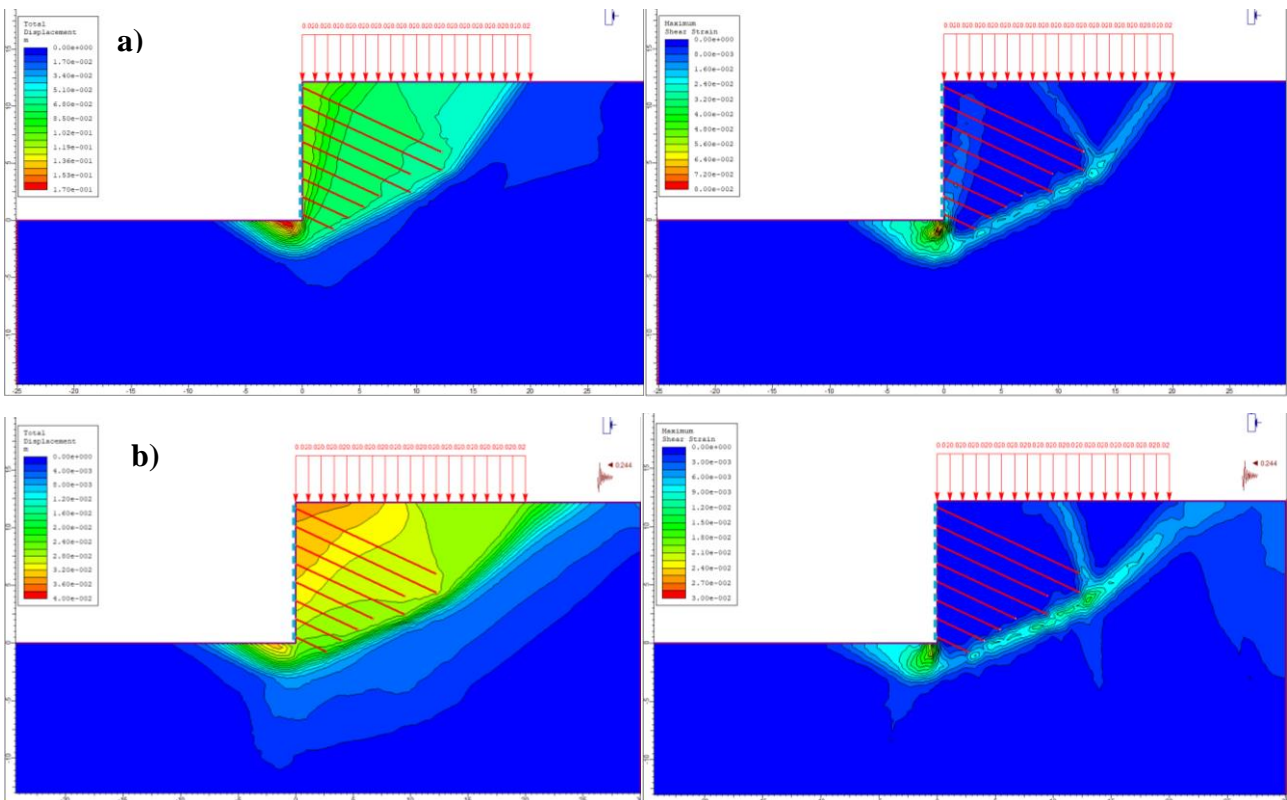


Figura 1: Desplazamientos totales (izquierda) y Superficie de falla crítica (derecha) del conjunto de suelo-anclaje, Método LRFD DA1-1 a) Condición estático FS=1.67 b) Condición sísmica FS=1.13.

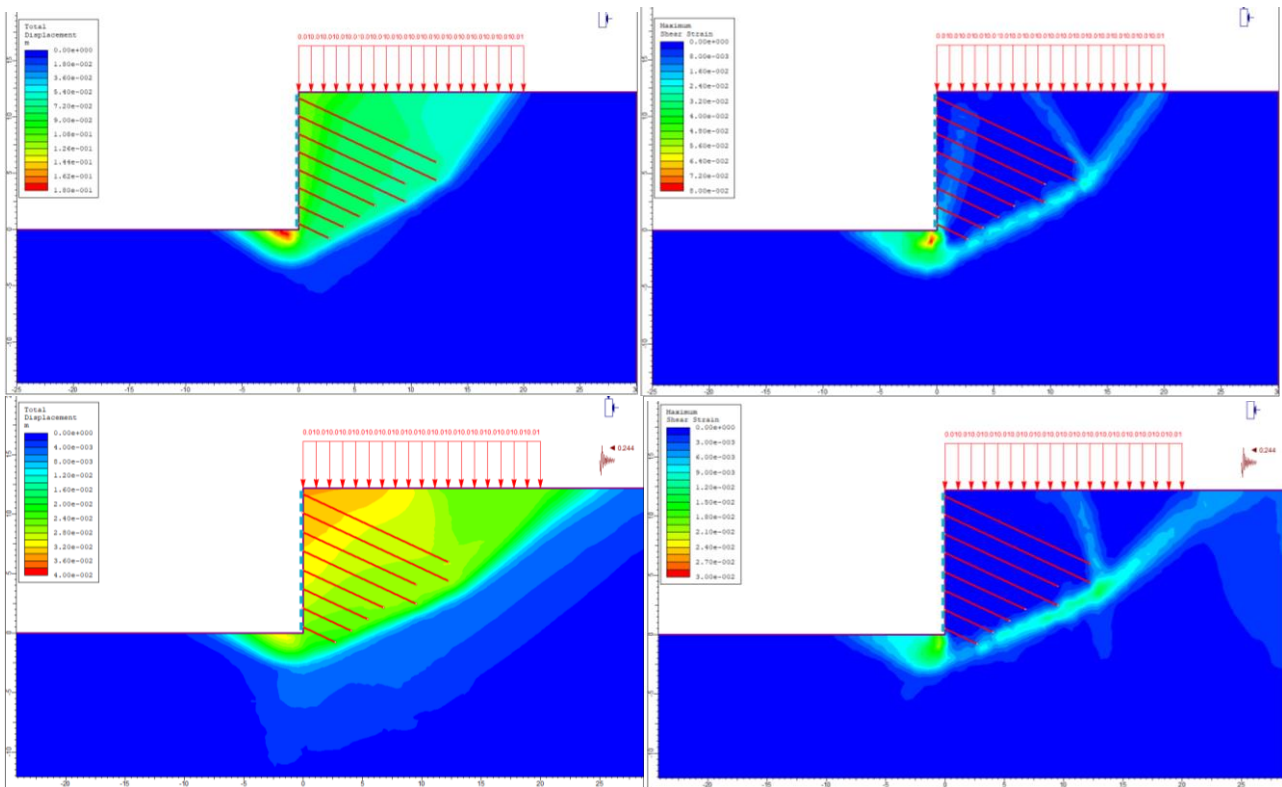


Figura 2: Desplazamientos totales (izquierda) y Superficie de falla crítica (derecha) del conjunto de suelo-anclaje, Método LRFD DA1-2 **a)** Condición estático FS=1.26 **b)** Condición sísmica FS=0.85.

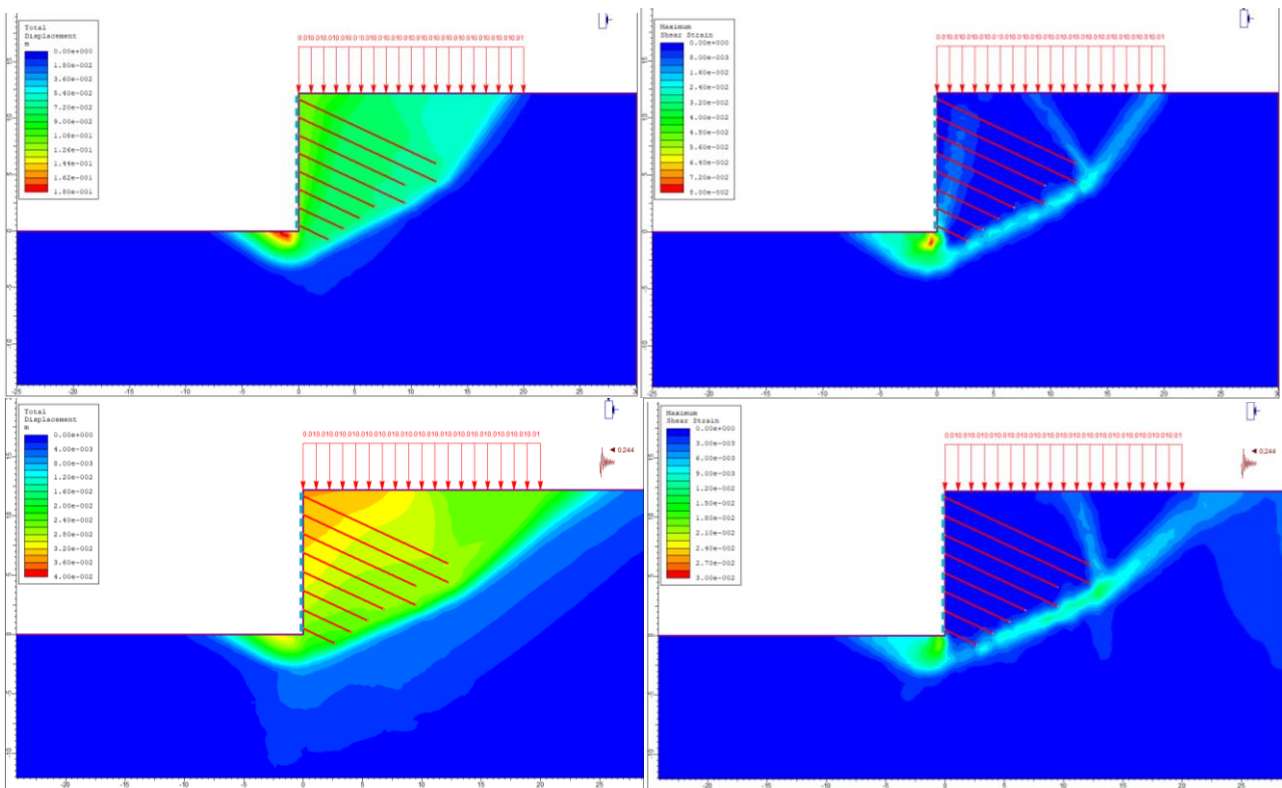


Figura 3: Desplazamientos totales (izquierda) y Superficie de falla crítica (derecha) del conjunto de suelo-anclaje, Método LRFD DA3 **a)** Condición estático FS=1.26 **b)** Condición sísmica FS=0.85.