



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**Análisis de estabilidad de taludes, estática y
sísmicamente con aplicación a un caso de estudio**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN GEOTECNIA

PRESENTA:

ING. ERIKA VELÁZQUEZ ALVARADO

DIRECTOR DE TESINA: **DR. HÉCTOR RAÚL AGUILAR BECERRIL**
MÉXICO, D.F. **ENERO DE 2024**

AGRADECIMIENTOS

A mi Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ingeniería, y al Programa Único de Especializaciones de Ingeniería (PUEI), por haberme formado académicamente.

A todos mis profesores de la licenciatura y en la especialidad, ya que gracias a su enseñanza pude forjarme como Ingeniera civil. Le doy gracias al Ing. Cristian Rubén Medina Guzmán por su ayuda en la realización de este trabajo, por su paciencia, consejos y dedicación de su conocimiento.

Al M. en I. Reginaldo José Hernández Romero por el apoyo y comentarios que realizo en el escrito y su sabiduría. Al Dr. Héctor Aguilar por su ayuda y por haberme compartido su conocimiento.

Y mi dedicación y agradecimiento es a mis padres, Irma y Dante y a mis tíos Guadalupe y Eduardo, que siempre me brindaron su apoyo y seguir presentes en mi camino. A mis dos hermanos Mara y Lalo que siempre me alentaron para seguir adelante. Y a toda mi familia que estuvo presente, Jorge, Tía Alejandra, entre otros.

A todos mis amigos, Andrés, Martín, Tom, Máx quienes me brindaron su amistad y compañía a lo largo de mi vida.

RESUMEN

El análisis de estabilidad de taludes está relacionado con la determinación de resistencia al esfuerzo cortante de los materiales que constituyen a un talud. Y se explica el concepto en general del Factor de Seguridad como el cociente de fuerzas resistentes, entre las fuerzas actuantes de un talud. Por lo que, se requiere el conocimiento de las condiciones geológicas y topográficas del lugar. Además, se discuten diferentes métodos de análisis con el método de equilibrio límite y el uso de software con el método de elementos finitos.

Para aplicar dichos aspectos se aplicó a un caso práctico en el sitio de Tijuana, en donde existen registros en donde el área ha ocurrido hasta 10 deslizamientos de masa del suelo en los últimos 20 años (SEDATU, 2014). Se propusieron tres cortes con diferentes geometrías para el análisis de estabilización de un talud permanente en donde se construirá un edificio de 17 niveles. Y en la zona existe la presencia de taludes producto de la excavación para la construcción. Y en ellos domina la presencia de arenas y conglomerados.

Se realizó el análisis de estabilidad para los tres cortes y, con ayuda de SLIDE 6.0 y PLAXIS 2D ULTIMATE se obtuvieron los Factores de Seguridad que fueron de 1.3 y 1.1 en caso estático y sísmico. Por lo tanto, al tener ese escenario de inestabilidad, se realizó el diseño de un sistema de anclajes y para el flujo subterráneo del sitio se introdujeron drenes al talud. Además, de acuerdo con la litología del lugar, se añadió concreto lanzado para evitar el problema de erosión.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	6
OBJETIVO GENERAL	7
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
ALCANCES	7
ANTECEDENTES.....	8
1. ESTABILIDAD A CORTO Y LARGO PLAZO	8
2. FLUJO ESTABLECIDO.....	9
3. FACTORES INFLUYENTES EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES	9
3.1.LLUVIA.....	11
3.2.EROSIÓN.....	11
3.3.SISMO	12
3.4.ASPECTOS GEOLÓGICOS	12
3.5.CARGAS EXTERNAS.....	12
3.6.EXCAVACIONES Y/O RELLENOS	13
4. MODOS DE FALLA DE ESTABILIDAD DE TALUDES	13
5. ESTABILIDAD DE TALUDES	14
5.1.FACTOR DE SEGURIDAD	14
5.2 MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE	15
MÉTODOS DE ESTABILIDAD DE TALUDES	17
6.....	17
6.1.MÉTODO SPENCER	19
6.2.MÉTODO DE JANBU.....	20
6.3 MÉTODO MORGENSTERN	21
7. MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN	21
7.1 DEFINICIÓN DE UN SISTEMA DE ANCLAJE	23
PARTES DE UN SISTEMA DE ANCLAJE.....	23
7.1.23	
8. CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE ANCLAS	24
3.1 FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE ANCLAJES	25

9.	CONCRETO LANZADO	25
10.	DRENES	26
CASO DE ESTUDIO.....		28
11.	PROBLEMÁTICA	28
12.	MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	29
13.	SISMO	30
14.	DESLIZAMIENTOS	31
15.	INSPECCIÓN DEL ÁREA DEL PROYECTO	32
CONDICIONES GENERALES DEL SITIO		33
16.	EXPLORACIÓN GEOFÍSICA	33
17.	EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA Y ENSAYES DE LABORATORIO	36
18.	SONDEOS EXPLORATORIOS	36
19.	ENSAYES DE LABORATORIO	37
20.	CARACTERIZACIÓN ESTRATIGRÁFICA.....	37
21.	MODELO GEOMECÁNICO	37
22.	ESTABILIDAD DE TALUDES	41
23.	REVISIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD	43
24.	CAPACIDAD DE CARGA DEL SISTEMA DE ANCLAJE	45
25.	REVISIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA CON ANCLAS.....	50
26.	ANÁLISIS DE ANCLAJE CON EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO	56
27.	ANÁLISIS DE CONCRETO LANZADO	60
28.	SISTEMA DE ANCLAJE.....	60
29.	ANÁLISIS DE DRENES	65
CONCLUSIONES		68
30.	BIBLIOGRAFÍA.....	72

INTRODUCCIÓN

El deslizamiento de laderas y de taludes es el movimiento cuesta abajo de una masa de suelo, rocas, escombros o combinación de estos materiales sobre una o más superficies de rotura, que sucede cuando la resistencia al esfuerzo cortante a lo largo de una superficie de falla es sobrepasada por esfuerzos cortantes en dicha superficie (González de Vallejo, 2020).

Es muy común hoy en día la ocupación de laderas urbanas, que es el producto de las prácticas humanas en cuanto al uso y forma de ocupación de superficies terrestres inclinadas donde se empiezan los asentamientos humanos. Algunos de los procesos antrópicos que desencadenan deslizamientos de ladera urbana son los cambios de la geometría de la superficie, vibraciones inducidas por el movimiento de vehículos y maquinaria pesada, los eventos sísmicos, etc., modificación de las condiciones de flujo de agua superficial y subterránea. Y estos escenarios modifican significativamente el equilibrio natural de las laderas o de los taludes.

Es por ello, que, durante muchos años, la estabilidad de taludes y laderas, así como el margen de seguridad que tienen estas estructuras geotécnicas, se han intensificado en un concepto "único" del Factor de Seguridad. Este puede variar significativamente según las diversas variables y en la determinación de los parámetros geotécnicos de los diferentes estratos que se presenten. Y hay que entender que un Factor de Seguridad bajo derivado de estudios y análisis con alto grado de confianza puede ser "más seguro" o de "menor riesgo" que una con un factor más alto derivado de estudios y análisis menos confiables.

Mediante un ejemplo de aplicación de estabilidad de taludes se presenta la metodología aplicada de "equilibrio límite" por diferentes métodos, se realiza la comparación de los resultados obtenidos entre estos y se compara con el cálculo del Factor de Seguridad aplicando los programas estudiantiles de SLIDE 6.0 y PLAXIS 2D ULTIMATE aplicando el método de elemento finito.

OBJETIVO GENERAL

Analizar estática y sísmicamente un talud (corte), aplicando procedimientos analíticos y numéricos, con objeto de identificar las diferencias y aportar recomendaciones.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir los conceptos básicos del análisis de estabilidad de taludes o laderas.
- Presentar los métodos de análisis de equilibrio límite que se utilizan para determinar la estabilidad de un talud o ladera.
- Comparar los resultados de análisis de estabilidad de taludes y laderas con los obtenidos con programas de cómputo.

ALCANCES

- Para evaluar diversas alternativas de solución para los cortes de la excavación de una cimentación, se analizarán tres propuestas con las siguientes geometrías:
 - Corte 1: Pendiente 0:0 (Vertical: Horizontal)
 - Corte 2: Pendiente 1: 0.4 (Vertical: Horizontal)
 - Corte 3: Pendiente 1: 0.7 (Vertical: Horizontal)
- Se analizarán la estabilidad de los cortes para la excavación con las condiciones estáticas y dinámicas.
- Se implementará un sistema de estabilización para ejecutar la excavación del terreno con anclajes y protección de erosión con concreto lanzado.

ANTECEDENTES

Se entiende como talud a cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal que adopta el terreno, se puede formar de manera natural (laderas) o por consecuencia de la intervención humana (cortes y terraplenes).

Las investigaciones in situ tienen como objetivo reconocer geológica y geotécnicamente el terreno, con los fines de obtener los parámetros necesarios para analizar la estabilidad de la ladera, diseñar los taludes (cortes), y definir las medidas de estabilización, entre otros.

1. ESTABILIDAD A CORTO Y LARGO PLAZO

Dadas las variaciones que pueden presentar los parámetros de resistencia de los materiales constitutivos de las laderas y taludes, en función de los factores condicionantes en diferentes etapas, es necesario realizar análisis de estabilidad para diferentes condiciones y solicitaciones. Se recomienda trabajar los análisis usando las presiones efectivas.

- **ESTABILIDAD A CORTO PLAZO:** Se realiza mediante el uso de parámetros no drenados (Pruebas CU, triaxiales consolidadas no drenadas). Debido a que la inestabilidad puede ser causada por los cambios en la carga, tal como la remoción de los materiales de la parte baja del talud o el aumento de las cargas de la parte superior (en suelos de baja permeabilidad) éstos no pueden tener el tiempo suficiente para drenar durante el tiempo en el cual ocurre el cambio de carga. En la estabilidad de corto plazo debe tenerse en cuenta que los suelos no tienen un drenaje rápido, sujetos a presiones de poros por acciones de las cargas aplicadas. En suelos de baja permeabilidad, esfuerzos totales (Manual CFE, 2017).
- **ESTABILIDAD A LARGO PLAZO:** El suelo que conforma un talud después de un tiempo, puede llegar a expandirse (con el incremento de agua) o a consolidarse (con la disminución del contenido de agua). Por lo tanto, el esfuerzo cortante se expresa en términos de esfuerzos efectivos y la presión de poro del agua se estima con la condición más desfavorable. En conclusión, para

los taludes en los cuales la causa de la falla es el aumento de la presión de poros (debida a las lluvias), el problema debe analizarse como condición drenada (Pruebas CD, de corte directo o triaxial).

2. FLUJO ESTABLECIDO

El agua es el factor que comúnmente se le asocia con las fallas de los taludes, debido a que la mayoría de los deslizamientos ocurren después de lluvias fuertes o durante el control del agua subterránea, por tanto el agua es uno de los factores más efectivos para la desestabilización de laderas y taludes.

Para las condiciones del sitio debe considerarse que la falla de un talud se rige por los esfuerzos efectivos, por lo que el análisis para todas las condiciones (drenadas o no drenadas) es necesario tomar en cuenta este concepto.

Por lo anterior, la presencia de agua en un talud genera presiones de poro que modifican esfuerzos efectivos, cambiando con ello la resistencia de esfuerzo cortante e influyendo así en la estabilidad del talud. También, debe considerarse que el agua se encuentra en condiciones hidrodinámicas que determinan su flujo, y con ello distinguir un flujo transitorio y establecido.

El flujo establecido ocurre en medios porosos, muy permeables y a corto plazo o bien a largo plazo tratándose de suelos de baja permeabilidad, como los arcillosos. Esto determina que prevalezca el flujo en suelos saturados con un flujo independiente del tiempo y en que se cumple la ecuación de continuidad.

3. FACTORES INFLUYENTES EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES

La estabilidad de un talud está determinada por factores geométricos (altura e inclinación), factores geológicos (que condicionan la presencia de planos y zonas de debilidad), factores hidrogeológicos (presencia de agua) y factores geotécnicos o relacionados con el comportamiento mecánico del terreno (resistencia y deformabilidad).

La combinación de los factores citados puede determinar la condición de rotura a lo largo de una o varias superficies, y que sea cinemáticamente posible el movimiento de un cierto volumen de masa de suelo.

La posibilidad de una falla por deslizamiento sucede cuando la resistencia al esfuerzo cortante a lo largo de una cierta superficie de falla es sobrepasada por esfuerzos cortantes actuantes en dicha superficie. El análisis de un deslizamiento requiere del conocimiento de la ubicación y forma de la falla potencial. En la siguiente tabla se muestran los factores que intervienen en la estabilidad de taludes (Manual CFE, 2017):

FACTOR	DESCRIPCIÓN
REMOCIÓN DEL SOPORTE LATERAL	<p><i>Erosión:</i> Corrientes Olas y corrientes marinas <i>Movimiento de Taludes:</i> Caídas de rocas y deslizamientos Hundimientos Fallas a gran escala que crean nuevos taludes <i>Agentes humanos:</i> Cortes, pozos y canales. Retiros de muros de contención o tablestacado Construcción de lagos artificiales, presas y la alteración de los niveles de agua.</p>
SOBRECARGA	<p><i>Causas naturales:</i> Peso de la lluvia, nieve y agua de manantiales Acumulación de material debido a antiguos deslizamientos Vegetación Presión de agua infiltrada Avalanchas y flujo de escombros del colapso <i>Agentes humanos:</i> Construcción de rellenos Amontonamiento de rocas o residuos de material Peso de estructuras Fugas de agua de alcantarillas, tuberías y depósitos.</p>
ESFUERZOS TRANSITORIOS EN EL SUELO	<p><i>Causas naturales:</i> Terremotos Truenos Fallas en taludes cercanos <i>Agentes humanos:</i> Explosiones Maquinaria que provoque Circulación de vehículos</p>
RETIRO DEL SOPORTE SUBYACENTE	<p><i>Causas naturales:</i> Material cortado por ríos u otras corrientes Erosiones subterráneas Falla de materiales subyacentes Humedecimiento, secado y la acción de las</p>

	heladas Agentes humanos: Minería Excavaciones
PRESIÓN LATERAL	Causas naturales: Acumulación de agua en grietas Congelamiento de agua en grietas Expansión de arcillas Movilización de esfuerzos residuales
PROCESOS VOLCÁNICOS	Causas naturales: Los campos de esfuerzos en las paredes de cráteres son modificados debido a expansiones o compresiones de las cámaras de magma, cambios en los niveles de lava y temblores.

Tabla 1 FACTORES DE ESTABILIDAD EN TALUDES

3.1. LLUVIA

En los largos periodos de lluvia, los taludes se ven afectados porque se saturan, ablandan y erosionan el suelo. Provocando un aumento de peso en la masa, un decremento en la resistencia del esfuerzo cortante y la erosión de la superficie expuesta. El agua entra a las grietas existentes y puede debilitar las capas subyacentes del suelo.



Ilustración 1 TALUD SOMETIDO A LLUVIA (Nota: Recuperado (Nota: Recuperado de Tesis digital. (s. f.). <http://132.248.9.195/ptd2015/agosto/0734257/Index.html>)

3.2. EROSIÓN

La erosión cambia la geometría de la pendiente, resultando en el derrumbe de la pendiente o, más adecuadamente, en un deslizamiento de tierra. Los agentes que causan este fenómeno son el agua y el viento, ocasionando la erosión continua en las pendientes naturales y artificiales.

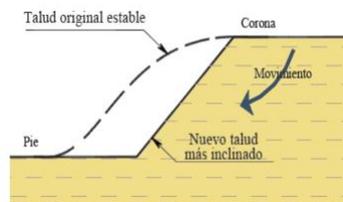


Ilustración 2 EFECTO DE LA EROSIÓN (Nota: Recuperado de Tesis digital. (s. f.). <http://132.248.9.195/ptd2015/agosto/0734257/Index.html>)

3.3. SISMO

Los sismos inducen fuerzas dinámicas a las fuerzas estáticas actuantes a las que está sometido el talud, provocando especialmente esfuerzos de cortes dinámicos que reducen la fuerza de corte, dureza y rigidez del suelo. Existe la posibilidad que la presión de poro aumente en materiales granulares provocando el fenómeno de la licuación.

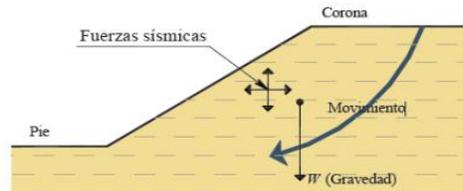


Ilustración 3 EFECTO DEL SISMO (Nota: Recuperado de Tesis digital. (s. f.). <http://132.248.9.195/ptd2015/agosto/0734257/Index.html>)

3.4. ASPECTOS GEOLÓGICOS

Algunas veces las fallas de los taludes surgen de las características geológicas no identificadas durante el levantamiento y exploración de campo, los cuales, al no ser considerados en la evaluación de estabilidad del talud, aumenta la incertidumbre del factor de seguridad calculado.

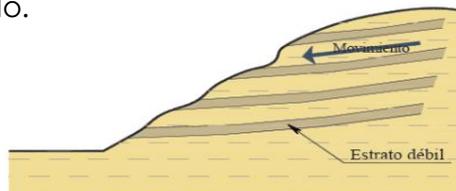


Ilustración 4 EFECTO DE LA GEOLOGÍA (Nota: Recuperado de Tesis digital. (s. f.). <http://132.248.9.195/ptd2015/agosto/0734257/Index.html>)

3.5. CARGAS EXTERNAS

Las cargas colocadas en la cima de la pendiente del talud suman a la carga gravitatoria y pueden causar fallas, si estas cargas no son controladas o tomadas en cuenta durante la evaluación de estabilidad del talud.

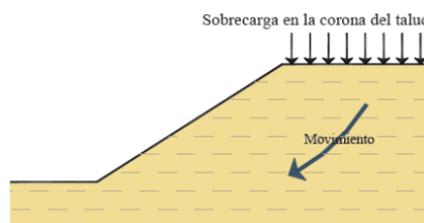


Ilustración 5 EFECTO DE CARGAS EXTERNAS (Nota: Recuperado de Tesis digital. (s. f.). <http://132.248.9.195/ptd2015/agosto/0734257/Index.html>)

3.6. EXCAVACIONES Y/O RELLENOS

Cuando ocurre una excavación, las tensiones totales se reducen y generan presiones de poro negativas en el suelo. Y con el tiempo, las presiones de poro negativas se disipan, provocando una disminución de las tensiones efectivas y, en consecuencia, disminuyendo la resistencia al corte del suelo. Es importante considerar el procedimiento constructivo al formar el talud, porque al remover el material existente en el terreno, como puede ser raíces, escombros y el suelo ocasiona deslizamientos.



Ilustración 6 FALLA POR EXCAVACIÓN (Nota: Recuperado de Tesis digital. (s. f.). <http://132.248.9.195/ptd2015/agosto/0734257/Index.html>)

4. MODOS DE FALLA DE ESTABILIDAD DE TALUDES

En los taludes pueden ocurrir movimientos bruscos que afectan a masas considerables de suelo, con superficies de falla que penetran profundamente en su cuerpo. Este fenómeno es conocido como deslizamiento de tierras. Existen dos tipos:

1. ROTACIÓN: Se define como una superficie de falla curva a lo largo de la cual ocurre el movimiento de talud; esta superficie forma una traza con el plano de papel que puede asimilarse, por facilidad y sin error mayor, a una circunferencia.

Las fallas por rotación pueden presentarse pasando la superficie de falla por el pie del talud o en su terreno de cimentación o pasando por el pie de talud, afectando al terreno en que el talud se apoya.

2. TRASLACIÓN: Estas ocurren a lo largo de superficies débiles, asimilables a un plano en el cuerpo del talud o en su terreno de cimentación. Estos planos débiles suelen ser horizontales o muy poco inclinados a la horizontal.

5. ESTABILIDAD DE TALUDES

Los cálculos de estabilidad de taludes nos sirven para volver a proyectar taludes que se han derrumbado, o bien para determinar, antes de iniciar la obra, los ángulos de talud adecuados a los requerimientos de seguridad específicos.

5.1. FACTOR DE SEGURIDAD

Es muy común en ingeniería definir la estabilidad de un talud en términos de un Factor de Seguridad (FS), obtenido de un análisis matemático de estabilidad. El modelo debe tener en consideración los factores que afectan la estabilidad. Sin embargo, no todos los factores se pueden cuantificar para incluirlos en un modelo matemático. Por esta razón, hay situaciones en las cuales un enfoque matemático no produce resultados satisfactorios. A pesar de ello, el Factor de Seguridad permite al ingeniero contar con una herramienta útil para la toma de decisiones.

Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no se requiere sobre la relación esfuerzo– deformación. El sistema de equilibrio límite supone que, en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0.

Un valor de $FS=1$ indica que el talud se encuentra en la frontera entre la estabilidad y la inestabilidad; un valor menor a 1.0 indica que el talud es inestable mientras que un FS mayor que 1.0 indica que el talud es estable bajo las condiciones consideradas.

El Factor de Seguridad puede ser determinado por criterio de acuerdo con la experiencia, el grado de incertidumbre implícito en el cálculo del factor de seguridad y las consecuencias que provocaría la falla del talud.

La definición del factor de seguridad asume valores medios y supone que el mismo para cualquier punto a lo largo de la superficie de falla. El factor de seguridad estará relacionado con la Resistencia al esfuerzo cortante del suelo y el Esfuerzo cortante requerido para el equilibrio.

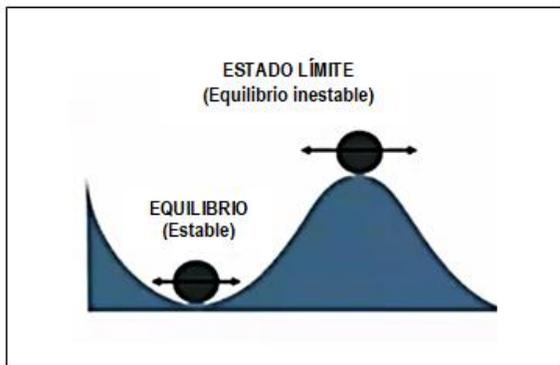
Por lo tanto, mientras más sea la incertidumbre en la magnitud y distribución espacial de la resistencia al esfuerzo cortante, mayor será la incertidumbre que se involucre en el análisis.



Ilustración 7 FACTOR DE SEGURIDAD

5.2 MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE

Ilustración 8 EQUILIBRIO LÍMITE



El método de equilibrio límite analiza el equilibrio de una masa potencialmente inestable, consiste en comparar las fuerzas de tendencia al movimiento con las fuerzas resistentes que se oponen al mismo a lo largo de una determinada superficie de rotura.

Es decir, establece que la falla se presenta a través de una superficie de rotura. La falla consiste en el deslizamiento de la masa del terreno que se encuentra en la superficie. Este método se basa en:

- La selección de una superficie teórica de rotura en el talud, esta debe ser postulada con una geometría que permita el deslizamiento.
- La resistencia se moviliza simultáneamente a lo largo de todo el plano de rotura.

A partir del criterio de “equilibrio límite” se establecen las ecuaciones del equilibrio entre las fuerzas que inducen el deslizamiento y las resistencias. Los análisis

proporcionan el valor del Factor de Seguridad del talud para la superficie analizada, referido al equilibrio entre las fuerzas que actúan.

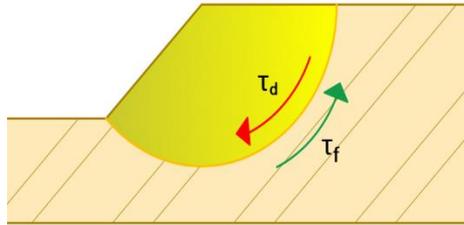


Ilustración 9 FUERZAS ACTUANTES

Se define como:

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_d} = \frac{\text{Resistencia media del suelo}}{\text{Esfuerzo cortante promedio desarrollado en la superficie potencial d de falla}}$$

$$FS = \frac{\text{Resistencia disponible en la superficie de deslizamiento}}{\text{Resistencia necesaria para el equilibrio}}$$

Existen, otros métodos de plantear el factor de seguridad, tal como el criterio de Mohr Coulomb que dice que la resistencia al cortante consta del ángulo de fricción y la cohesión.

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$$

De una manera similar, también podemos escribir:

$$\tau_d = c'_d + \sigma' \tan \phi'_d$$

Donde c'_d y ϕ'_d son, respectivamente, la cohesión eficaz y el ángulo de fricción que se desarrollan a lo largo de la superficie potencial de la falla. Por lo tanto, se obtiene:

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_d} = \frac{c' + \sigma' \tan \phi'}{c'_d + \sigma' \tan \phi'_d}$$

El valor de un factor de seguridad utilizado en cualquier situación debe ser proporcional a las incertidumbres presentes en el cálculo y las consecuencias que tendría la falla del talud. Mientras mayor sea el grado de incertidumbre en los parámetros mecánicos y las consecuencias de la falla, mayor debe ser el factor de seguridad requerido.

En algunos casos, para taludes permanentes suele adoptarse un coeficiente de seguridad mayor o igual 1.5 o 2 según la confianza que se tenga con los datos geotécnicos que intervienen en los cálculos. Y en taludes temporales suele emplearse $FS= 1.3$. Y para cargas sísmicas $FS= 1.10$.

6. MÉTODOS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Existen varios métodos para el cálculo del Factor de Seguridad por equilibrio límite, desarrollados fundamentalmente para su aplicación en taludes. Existen dos tipos de métodos: los analíticos y los numéricos. Los métodos analíticos proporcionan el coeficiente de seguridad a partir de la resolución inmediata de ecuaciones simples (método de Taylor, de Fellenius), mientras que los numéricos necesitan sistemas de ecuaciones y procesos de cálculo interactivo, se encuentran los métodos de Morgenstern y Price, de Spencer, etc.

Los métodos de equilibrio límite se clasifican en:

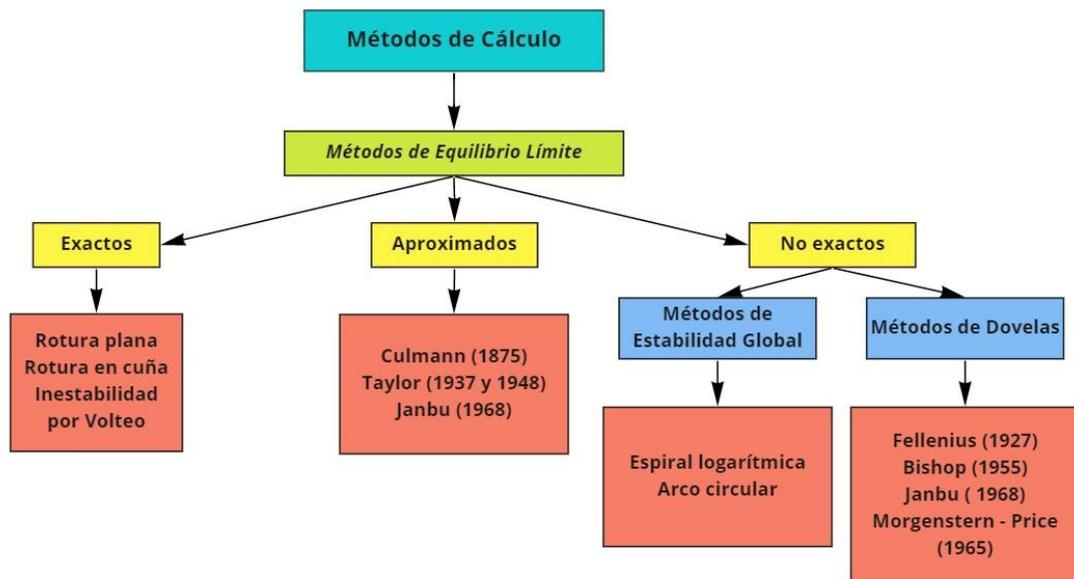


Ilustración 10 MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE

En la siguiente tabla se encuentra información sobre cada uno de los métodos existentes, cuáles son sus superficies de falla y un resumen de las características principales:

NOMBRE DEL MÉTODO	TIPO DE PLANO DE FALLA	EQUILIBRIO	CONSIDERACIONES BÁSICAS
Método de Cullman	Lineal	De fuerzas	La falla ocurre en un plano a través del pie del talud.
Método del Talud Infinito	Lineal	De fuerzas	El talud es constante y se extiende sin límites. Taludes homogéneos sin cohesión donde la estratigrafía restringe la superficie de deslizamiento a poca profundidad y paralela a la cara del talud.
Método de Cuñas	Lineal	De fuerzas	Se asume un mecanismo de deslizamiento por bloques, con fuerzas laterales de tierra.
Método de Dovelas	Arco Circular	De fuerzas	Las fuerzas laterales son iguales a en dos lados de cada dovela. Es útil en suelos no homogéneos, con parámetros c y ϕ , donde la superficie de falla se puede aproximar a un círculo. No es muy preciso cuando se llevan a cabo análisis con esfuerzos efectivos con presiones de poro elevadas.
Método de Bishop	Arco Circular	De momentos	Es provechoso en suelos no homogéneos, con parámetros c y ϕ , donde la superficie de falla se puede aproximar a un círculo. Fuerzas oblicuas en cada lado de la dovela son consideradas.
Método de Spencer	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y fuerzas	Asume que las fuerzas entre dovelas son paralelas. Satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tejas tiene una inclinación constante pero desconocida.
Método Ordinario o de Fellenius	Arco circular	De fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto la fuerza deslizada como para dovelas individuales. Muy impreciso para taludes plano con alta presión de poros. Se tienen factores de seguridad bajos.
Método de	Cualquier	De fuerzas	Puede aplicarse, en cualquier caso.

Janbú	forma de la superficie de falla		Sin embargo, al suponer la línea por donde actúan los empujes el empuje normal de la última dovela no se utiliza y por tanto, el equilibrio de momentos en esta última dovela no se satisface.
Método de Morgenstern y Price	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y fuerzas	Es un método preciso, aplicable a cualquier tipo de suelo y cualquier geometría. Es muy riguroso, tiene un procedimiento que establece el equilibrio total. Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado,
Método de Espiral Logarítmica	Espiral logarítmica	Momentos y fuerzas	Es aplicable en taludes homogéneos sin cohesión y taludes donde la superficie de falla está restringida por la estratigrafía.
Método de Elementos Finitos	Cualquier forma de la superficie de falla	Analiza esfuerzos y deformaciones	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.
Método de Lowe y Karafiath	Cualquier forma de la superficie de falla	De fuerzas	Son consideradas las fuerzas de tierra como fuerzas por agua en los lados de las dovelas.
Método de Sarma	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y fuerzas	Un procedimiento preciso aplicable a prácticamente todas las geometrías de pendiente y perfiles de suelo. Es conveniente un procedimiento de equilibrio completo para calcular el coeficiente sísmico requerido para producir un factor de seguridad. Las suposiciones de fuerza lateral son difíciles de implementar para pendientes que no sean simples.

Tabla 2 MÉTODOS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

6.1. MÉTODO SPENCER

Spencer se fundamenta en la premisa de que las fuerzas entre los cortes son paralelas, lo que implica que todas las fuerzas entre los cortes tienen la misma

inclinación. Esta inclinación se determina como una incógnita en las ecuaciones de equilibrio. El análisis se hace en términos de esfuerzos efectivos.

Se asume una superficie deslizante cilíndrica y la masa de tierra dentro de la superficie se divide en pequeñas dovelas verticales. Las fuerzas actuantes en una dovela se muestran:

El Factor de Seguridad está definido como:

$$FS = \frac{c'}{N_s \gamma_t H_s}$$

Donde:

N_s = Factor de estabilidad definido por Spencer
 c' = Cohesión con respecto al esfuerzo efectivo, en Pa
 γ_t = Peso volumétrico del suelo, en N/m^3
 H_s = Altura media de la dovela, en m

Spencer realizó gráficas para factores de estabilidad N_s de 0 a 0.12 contra un ángulo de fricción crítico ϕ'_m que varía entre 10° a 40° y un ángulo β de hasta 34° ; esta gráfica está hecha para tres relaciones de presión de poro r_u con valores de 0, 0.25 y 0.5.

6.2. MÉTODO DE JANBU

El ingeniero Nilmar Oskar Charles Janbú propuso un método de análisis en 1954 que considera diversas condiciones geotécnicas y factores de sobrecarga en la corona del talud. Este enfoque abarca elementos como el nivel freático y la presencia de grietas de tensión y está diseñado específicamente para superficies no circulares. Aunque su objetivo principal es lograr el equilibrio de fuerzas en lugar de momentos, no cumple completamente con las condiciones de equilibrio de momentos. Por esta razón, se introduce un factor de corrección F_0 empírico que se aplica al factor de seguridad (FS). El cálculo del Factor de seguridad es:

$$FS = \frac{N_0 c}{P_d}$$

N_0 = número de estabilidad que depende del ángulo de inclinación del talud
 c = es el valor promedio de la cohesión de los estratos por la superficie de falla

Y obtener el parámetro p_d :

$$Pd = \frac{\gamma H + q - \gamma_w H_w}{\mu_q \mu_w \mu_t}$$

H_w = tirante de nivel de agua fuera del talud

μ_q = Factor de ajuste de sobrecarga

μ_w = Factor de ajuste por sumersión

μ_t = Factor de ajuste por grietas de tensión de la corona

6.3 MÉTODO MORGENSTERN

Este método es con base en la presión de poro. Se asume que la presión de poro es constante a lo largo de toda la sección y es llamada distribución de presión de poro homogénea. Si existieran variaciones mínimas en la presión de poro a través de los estratos, debe tomarse un valor promedio. El Factor de Seguridad FS está definido como:

$$FS = m - (n)(r_u)$$

Donde m , n son coeficientes de estabilidad, que se determinan usando gráficas. Y el valor de la presión de poro es:

$$r_u = \frac{u}{\gamma_t h}$$

Donde:

u = presión de poro en la base de la dovela, en Pa

γ_t = Peso volumétrico del suelo, en N/m^3

h = altura de la dovela, en m

7. MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN

Cuando un talud ha sufrido rotura, o deformaciones que impliquen riesgo de inestabilidad, deben adoptarse medidas de estabilización, ya sea por razones constructivas, ambientales o económicas. Es necesario revisar los factores que influyen en el proceso de estabilización y la implementación de programas de control e instrumentación durante y después del proceso de estabilización.

Las medidas de estabilización son analizadas y establecidas durante la etapa de proyecto, sin embargo, también se pueden implementar como medidas correctivas. Para poder aplicar las medidas de estabilización, se requiere lo siguiente:

1. Las propiedades y el comportamiento geomecánico del terreno.
2. El mecanismo y tipología de las roturas, incluyendo la velocidad y dirección del movimiento y la geometría de rotura.
3. Los factores geológicos, hidrogeológicos y de otro tipo que influyan en la inestabilidad, que determinan las causas de esta y, por tanto, las medidas más adecuadas para alcanzar la estabilización, siendo de especial importancia los datos referentes a los niveles freáticos, presiones de agua y permeabilidad de los materiales.

Para ello deben de considerarse estudios geológicos e hidrogeológicos correspondientes y efectuarse las investigaciones de detalle y reconocimiento in situ. Las mediciones se hacen con inclinómetros o de puntos específicos en la superficie del talud, se usan comúnmente para monitorear y averiguar el comportamiento de taludes propensos a la inestabilidad. También, deben en tomarse en cuenta los medios económicos, materiales disponibles y la magnitud y dimensiones de la inestabilidad.

Las medidas estabilizadoras pueden consistir en:

1. Modificación de la geometría
2. Medidas de protección superficial
3. Medidas de drenaje
4. Elementos estructurales resistentes
5. Muros y elementos de contención

Existen elementos estructurales en el terreno que ayudan a aumentar la resistencia al corte. Y los anclajes son uno de estos elementos que aumentan las fuerzas tangenciales de rozamiento en la superficie de rotura. Es muy común, que cuando se realiza una excavación de un terreno o se conforma la geometría de un talud se genere un desequilibrio de una porción del terreno. Para poder solucionar este problema se emplean anclas para estabilizar y soportar estructuras sometidas a fuerzas

laterales o de levantamientos importantes, con lo cual se restringe el desplazamiento y/o giro.

La historia de las anclas comienza en 1874, Frazer utilizó por primera vez tubos de hierro forjado para reforzar los bordes de un canal. Y como se conoce actualmente, se dio hasta 1934 para el refuerzo de cortina de la presa de Cheurfas en Argelia, con la inyección de bulbos en areniscas. En la década de 1950-60 se utilizaron las anclas para estabilizar y reforzar presas, así mismo, en la ejecución de excavaciones profundas.

7.1 DEFINICIÓN DE UN SISTEMA DE ANCLAJE

Un *sistema de anclaje* es un conjunto de elementos estructurales que permiten incrementar la resistencia de dicha masa para generar su equilibrio. Es capaz de transmitir esfuerzos de tracción desde la superficie del terreno hasta una zona interior del mismo. Proporcionan una fuerza contraria al movimiento y un incremento de tensiones normales sobre la superficie de rotura. Consta básicamente de cabeza, zona libre y bulbo o zona de anclaje.

7.1. PARTES DE UN SISTEMA DE ANCLAJE

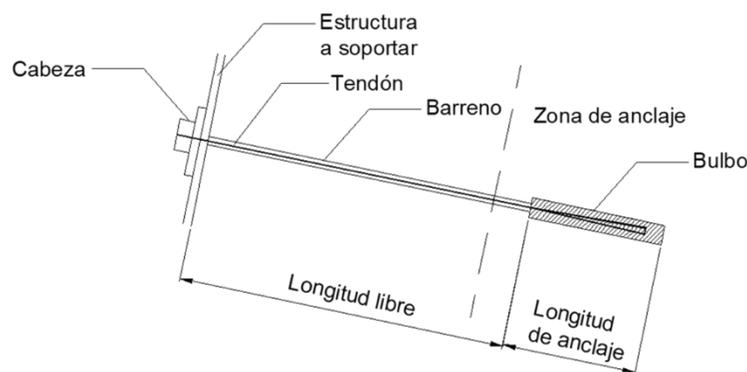


Ilustración 11 PARTES DE UN ANCLA

Tendón: Elemento estructural, generalmente de acero, encargado de generar, transmitir y transformar fuerzas de tensión y compresión del suelo. Los tendones pueden ser barras, cables o torones capaces de soportar los niveles de carga solicitados en cada proyecto.

Longitud del bulbo: Es la longitud del tendón en el fondo del barreno que se encarga de transmitir los esfuerzos del ancla del suelo circundante. Esta debe ser inyectada con lechadas a presión para lograr la transferencia de esfuerzos por adherencia.

Longitud Libre: Sección del tendón que deberá quedar aislada del terreno para permitir la libre deformación durante el tensado. Por medio de su deformabilidad elástica, se generan las fuerzas requeridas para lograr una condición de equilibrio de fuerzas en masa del suelo.

Cabeza de anclaje: Parte del tendón que va del inicio de la longitud libre hasta el final de este. Su función es la de transferir la carga del tendón por el tensado a la superficie o cara externa del talud. En esta zona se colocan dispositivos que inicialmente permitan introducir la carga del tendón y que garanticen la aplicación de la carga durante la vida útil.

8. CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE ANCLAS

Anclas Activas: Son aquellas cuyo tendón consta de cables o torones de acero que son tensados y que desarrollan su capacidad de carga desde su instalación.

Anclas Pasivas: Son aquellas que se construyen por lo general con barras o varillas de acero y realizan la transferencia de esfuerzos en el momento en el que inicia el deslizamiento de la masa inestable; mientras tanto, permanecen dentro de la masa de suelo de forma pasiva.

Anclas Permanentes: Anclajes cuya vida útil se considera superior a dos años.

Anclas Provisionales: Anclaje cuya vida útil no es superior a dos años.

Los anclajes también se pueden diferenciar considerando dos tipos de Métodos de inyección:

Método de inyección IGU (Inyección Global Única): Las anclas se inyectan una sola vez con cierta presión de inyección, generando un bulbo uniforme. La inyección se realiza a bajas presiones o a gravedad.

Sistema de Inyección ISR (Inyección Repetitiva Selectiva): Este método consiste en la inyección de puntos seleccionados con repetidas ocasiones. Se efectúa a través de tubos de manguito, separados no más de un metro. Esta inyección debe hacerse, generalmente, más de dos veces y en manguitos seleccionados. Mejoran la capacidad del bulbo de anclaje al permitir realizar inyecciones de zonas concretas del mismo.

3.1 FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE ANCLAJES

Su funcionamiento estará determinado en gran medida por las deformaciones elásticas que se generan durante el tensado del tendón. Estas deformaciones tratarán de recuperarse una vez que la tensión sea bloqueada por los dispositivos de anclaje (bulbos). Después los esfuerzos de compresión generados incrementan los esfuerzos normales sobre la superficie de falla favoreciendo a las fuerzas que se oponen al deslizamiento del bloque.

9. CONCRETO LANZADO

El concreto lanzado es una mezcla de cemento Portland, agregados pétreos, agua, aditivos y fibras en algunas ocasiones, que, mediante la fuerza controlada de aire a presión a través de una boquilla, se proyecta sobre una superficie a fin de obtener una capa de recubrimiento compacta, homogénea y resistente, para proteger superficies de roca o suelo contra la erosión, proveer soporte temporal o definitivo de una excavación y proteger zonas con alto fracturación. Los procesos de aplicación de concreto lanzado son en vía seca y vía húmeda.

El concreto lanzado se refuerza principalmente para reducir grietas ocasionadas por el propio fraguado del concreto, pero también para proveerlo de ductilidad y dureza. Existen algunos sistemas típicos usados como refuerzo, como son:

- Malla electrosoldada: Es una malla de acero típicamente con aberturas de 4 pulgadas, que es adosada a la cara del talud antes de aplicar el concreto lanzado; estas mallas tienen los siguientes puntos desfavorables:
 - El tiempo necesario para colocar la malla a la distancia correcta.
 - La dificultad para prevenir los vacíos formados detrás de la malla.

- El revenimiento relativamente alto causado por la vibración de la malla cuando el concreto lanzado se golpea.
- Refuerzo con fibras: El uso de estas permite el control del agrietamiento por retracción plástica y de secado, o por esfuerzos térmicos. El tipo de fibras pueden ser metálicas o sintéticas (donde un componente importante es el propileno y el polietileno).

El concreto lanzado también previene de infiltración de lluvia. Al impedir la infiltración de lluvias, la succión (presión de poros negativas) en suelos parcialmente saturados se mantiene y se previene el aumento de presiones de poro positivas.

10. DRENES

Tiene como objetivo disminuir el nivel freático mediante la evacuación del agua que se encuentra en el interior del talud; esta es una solución muy efectiva frente a los problemas de inestabilidad. Este tipo de drenaje se realiza mediante la colocación de drenes horizontales y pozos de alivio.

- Drenes Horizontales: Son tubos plásticos ranurados de diámetro pequeño, que se instalan en orificios previamente realizados en suelo o roca, usualmente con ángulos por encima de la horizontal.

Los drenes horizontales son instalados en un talud para:

- Reducir el agua en la masa térrea del talud.
- Aliviar la presión de poro.
- Aprovechar o liberar el agua subterránea de acuíferos que pudieran afectar la estabilidad del talud.

Los drenes horizontales deben ser diseñados para flujos muy variables en condiciones geológicas particulares, especialmente en deslizamientos de tierra donde los suelos se han sido entremezclados y están agrietados. Para hacer más eficiente el drenado, se necesita un número considerable de drenes.

Para la instalación de drenes se ocupa un equipo ligero rotatorio o a persecución con martinete en el frente (down the hole), que permita obtener perforaciones horizontales con diámetros de sesenta y cinco (75) a ciento cincuenta (150) milímetros, en suelo o en roca.

Los drenes no son totalmente horizontales (son 5% al 20% de pendiente con respecto a la horizontal) para que el agua pueda fluir por gravedad hacia el exterior donde usualmente se recolecta y conduce hacia un desagüe o cauce de agua. La longitud de drenaje depende de las necesidades del drenaje.

CASO DE ESTUDIO

11. PROBLEMÁTICA

En la Ciudad de Tijuana existen varios acontecimientos históricos de deslizamientos de laderas, algunos de ellos ocasionaron que más de 420 viviendas fueran destruidas con severos daños en toda la infraestructura de la colonia. Y a consecuencia de ello, existen fugas de agua en los sistemas de drenaje.

Con base en estadísticas, en el área urbana de Tijuana ocurren, como promedio, 2.29 deslizamientos por año, lo que equivale a un periodo de retorno de aproximadamente menos de cinco meses. Y con un rango de frecuencias de 46 eventos en 20 años. Por lo tanto, existe un riesgo de deslizamiento de laderas que causan la pérdida de vida o lesiones, así como daños a la propiedad.



Ilustración 12 UBICACIÓN DEL PROYECTO

El área de estudio es un fraccionamiento ubicado en el centro del área urbana de Tijuana en el que ocupa un área de aproximadamente 4,500 m². La estructura proyectada considera una torre compuesta por planta baja y 17 niveles, además de un penthouse y azotea. Así mismo, la estructura acompaña con un cuerpo bajo en el resto del área, formado por una planta baja y tres niveles superiores, destinado a uso comercial y para amenidades.

De acuerdo con el análisis y evaluación del sitio se presentan patologías geotécnicas y geológicas que evidencian inestabilidad del terreno y alertan sobre la posibilidad de que ocurran deslizamientos.

12. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El Municipio de Tijuana está ubicado en el extremo nororiental del Estado de Baja California, con una superficie de 1,237.86 km². Limita al norte con el Condado de San Diego, California, Estados Unidos, al oeste con el Océano Pacífico, al sur con el Municipio de Rosarito y Playa Ensenada (SEDATU, 2014).

Tijuana se localiza sobre depósitos sedimentarios pobremente consolidados donde son comunes los movimientos de ladera que corresponden a una combinación de factores geológicos y antropogénicos. Estos deslizamientos de ladera pueden ser inducidos por las lluvias, terremotos u otros fenómenos naturales.

La geología de Tijuana se describe por la Formación del Rosarito Beach que está formada por derrames basálticos y brechas que tienen interestratificadas arena con matriz de lodo, tobas, arenas tobáceas, calizas y conglomerados. Con base en su distribución fueron formados por depósitos fluviales y lacustres. Durante el Plio-Pleistoceno, en los alrededores de Tijuana, se deposita la formación de San Diego sobre las tobas de Rosarito Beach. Está constituida por arenas finas en la base, arenas y conglomerados en la cima. La sobreyace discordantemente la Formación Lindavista del Pleistoceno-Reciente formada por areniscas y conglomerados (SEDATU, 2014).

La ciudad de Tijuana está edificada principalmente sobre el Cerro Colorado y el Cerro de la Abeja, contrastan por su origen volcánico. Existen rocas volcánicas que son visibles en el extremo suroeste, cerca de la colindancia con el Municipio de Playas de Rosarito. Las características del sitio cambian con el tiempo y el espacio, por lo que la distribución de materiales no será la misma, pero es importante estar consciente de los riesgos geotécnicos.

A continuación, se muestra la estratigrafía de la zona urbana de Tijuana, Baja California:

EDAD	LITOLOGÍA (OESTE)	ESPESOR (m)	EDAD	LITOLOGÍA (ESTE)	ESPESOR (m)
Reciente	Depósitos de terraza: Areniscas fosilíferas sin consolidar.	Sin determinar	Reciente	Aluvión: Arena, limo, arcilla y conglomerado	Variable
Pleistoceno	Fm. Lindavista: Terrazas de areniscas y conglomerado	0 - 46	Pleistoceno	Depósitos de terraza: Areniscas y limolitas de escasa compactación.	Sin determinar
Plioceno	Fm. San Diego: Conglomerados y areniscas color marrón, fosilíferas.	200	Plioceno	Fm. San Diego: Arenisca y Conglomerado color café	90
Mioceno-Plioceno	Fm. Rosarito Beach: Basaltos, tobas interestratificadas, areniscas, brechas y calizas.	>1155	Mioceno	Fm. Rosarito Beach: Alternancia de basalto y arenisca. Localmente ceniza y tobas.	200-250
Eoceno	Indiferenciada: Areniscas	Sin determinar (50 metros expuestos)	Eoceno	Fm. Buenos Aires: Arenisca, Lodolita, arenosa y lutita. Conglomerado. Fm. Delicias: Areniscas fosilífera y Lodolita.	
Cretácico	Fm. Rosario: Areniscas y Lutitas	Sin determinar	Cretácico	Fm. Rosario: Arenisca y lodolita. Fm. Redonda: Conglomerado.	
Jurásico	Fm. Santiago Peak: Rocas metavolcánicas y metasedimentarias	Sin determinar			

Tabla 3 ESTRATIGRAFÍA TIJUANA

Los suelos del municipio de Tijuana presentan espesores diversos, dependiendo de su disposición topográfica.

13. SISMO

El municipio de Tijuana se encuentra dentro de la llamada zona de cizalla del sur de California, asociada a la interacción de las placas tectónicas del Pacífico y

Norteamérica. Esta zona se caracteriza por tener una elevada actividad sísmica, que tienen un significativo movimiento relativo (~5 cm/año) concentrada desde el eje San Andrés – Golfo de California, hasta la plataforma continental del Pacífico. Y cabe recalcar que el riesgo sísmico es alto debido a los factores topográficos y litológicos presentes en el sitio. Algunos trabajos de investigación han señalado que el potencial de ocurrencia de un sismo de magnitud importante (mayor a magnitud 6.0) y va en aumento. En los últimos diez años el historial de sismos de mayor magnitud han sido los siguientes:

FECHA Y HORA	LOCALIZACIÓN	PROFUNDIDAD [KM]	MAGNITUD
14/12/2012	257 km al SUROESTE DE PLAYAS DE ROSARITO, BC.	15.9	6.4
21/03/2014	101 km al SURESTE DE SAN FELIPE, BC.	17.1	5.6
06/03/2020	85 km al NOROESTE de SAN FELIPE, BC.	8.3	5.6
22/11/2022	41 km al SURESTE de VICENTE GUERRERO, BC.	10.0	6.2

Tabla 4 SISMOS TIJUANA

14. DESLIZAMIENTOS

Los deslizamientos en la Ciudad de Tijuana corresponden a variables factores como las laderas naturales, que con frecuencia no son planas, se enfrentan a los problemas de inestabilidad, cuando la combinación de altura, inclinación del talud y propiedades de esfuerzo cortante son tales que las fuerzas o momentos motores alcanzan las fuerzas o momentos resistentes. Además, por el debilitamiento de materiales, la presencia de agua y la estructura geológica. Y son acelerados por actividades del desarrollo urbano o por una eventual ocurrencia del sismo. Algunos de los deslizamientos históricos de Tijuana son:

COLONIA	DELEGACIÓN	TIPO DE MOVIMIENTO	ESTADO DEL MOVIMIENTO	DAÑOS
Cumbres del Rubí	San Antonio de los Buenos	Deslizamiento Rotacional	Activo	79 viviendas con pérdida total
Laderas de Monterrey	San Antonio de los Buenos	Deslizamiento Rotacional	Activo	21 viviendas con pérdidas

				totales y 4 vialidades secundarias
Defensores de B.C.	Mesa de Otay	Deslizamiento Rotacional	Activo	60 viviendas en riesgo, en caso de nuevo movimiento
Camino verde	Sánchez Taboada	Deslizamiento Rotacional	Inactivo	71 viviendas con pérdidas totales

Tabla 5 DESLIZAMIENTOS TIJUANA

15. INSPECCIÓN DEL ÁREA DEL PROYECTO

El terreno de interés presenta una topografía irregular, alcanzando ligeramente superior a las 14.0 [m]. De acuerdo con información obtenida de imágenes satelitales, anteriormente en el sitio del proyecto se encontraban estructuras aparentemente ligeras de uso hotelero, ubicadas sobre plataformas de diferentes niveles. Estas construcciones fueron demolidas y actualmente el predio se encuentra desocupado. En planta es prácticamente rectangular, con dimensiones en sus lados que se ubican entre 59.0 y 66 m.

En la zona es muy común la presencia de arenas y conglomerados, principalmente poco compactos. Mineralógicamente parecen estar compuestos principalmente por cuarzos y fedelpastos, y aparecen algunas grietas rellenas por materiales precipitados.

Las colindancias del predio de interés presentan las siguientes características:

- Al este se encontraron sobre las banquetas viguetas hincadas, posiblemente asociadas a un antiguo sistema de contención.
- Al sur se encuentra un terreno baldío y un local comercial.
- Al oeste se encuentran terrenos desocupados y estructuras ligeras de uso predominantemente habitacional.
- Al sur se encuentra un local comercial y algunas estructuras ligeras de uso habitacional.

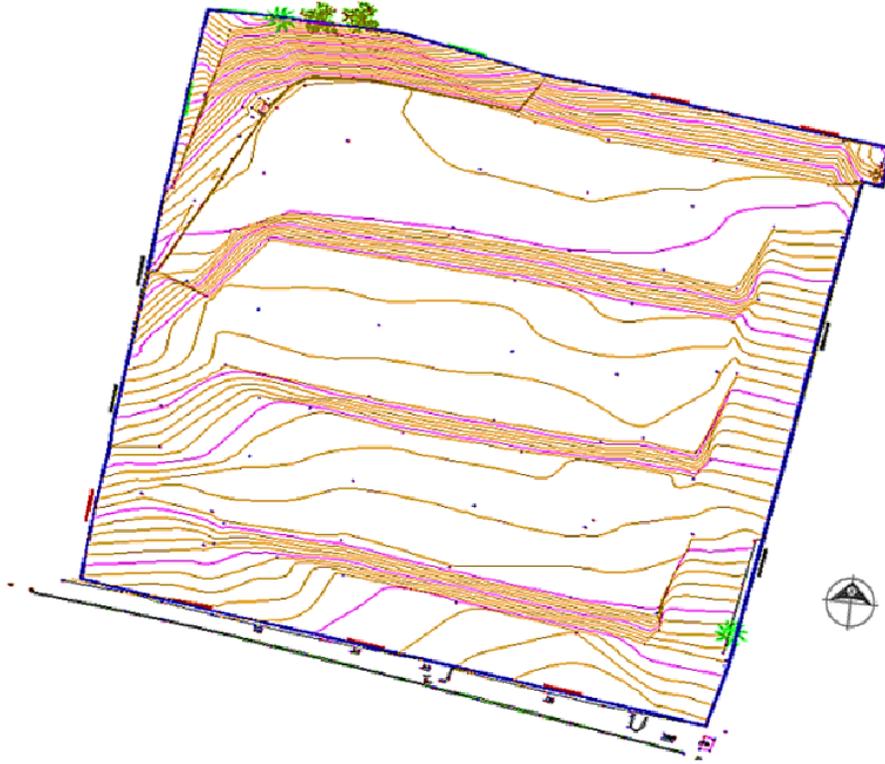


Ilustración 13 TOPOGRAFÍA PROYECTO

CONDICIONES GENERALES DEL SITIO

16. EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

El período dominante de vibración del terreno se estableció mediante el análisis de registros capturados durante la prueba dinámica de Vibración Ambiental (VA), esta es una herramienta de gran utilidad para estimar la respuesta del sitio. La metodología consiste en la técnica de cocientes espectrales Horizontales/Verticales que registra el ruido natural en un sitio mediante el uso de sensores triaxiales. Y para obtener las propiedades dinámicas del subsuelo, se ejecutó un ensayo Down Hole para determinar la variación de velocidad de propagación de ondas con la profundidad.

Con base en los datos de los espectros de Fourier, se obtuvo la razón espectral entre las componentes horizontales y verticales de un mismo registro, para determinar las frecuencias dominantes de la vibración del terreno. En estos cocientes se han determinado las frecuencias dominantes de vibración que corresponden con los siguientes periodos:

	FRECUENCIA [Hz]	PERIODO [s]
0	0.42	2.38
1	6.2	0.16

Tabla 6 PERIODOS Y FRECUENCIAS

En la siguiente figura se muestran los resultados obtenidos al aplicar la técnica de H/V para el punto monitoreado en el sitio.

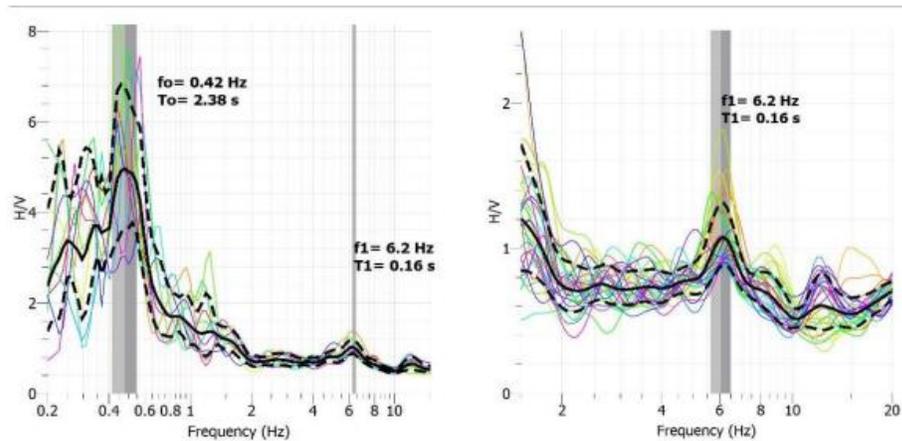


Ilustración 14 PRUEBA DINAMICA VIBRACIÓN AMBIENTAL

Adicionalmente, el espectro de diseño obtenido en el estudio realizado:

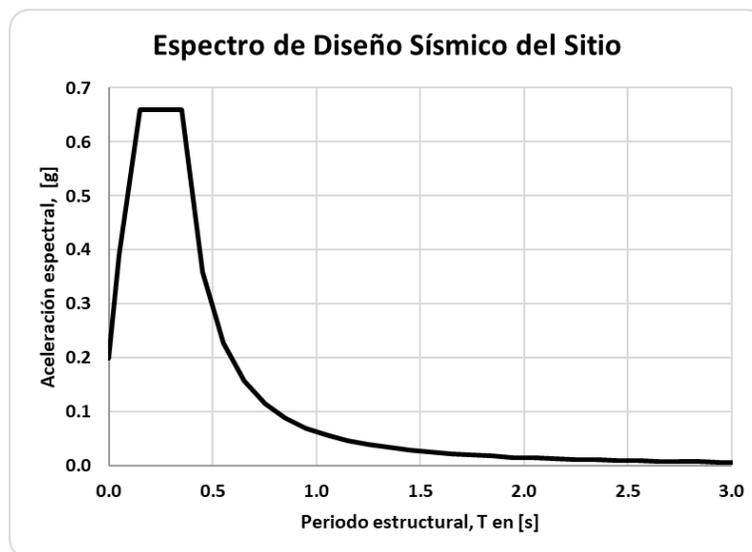


Ilustración 15 ESPECTRO DE DISEÑO

Los parámetros que definen la forma del espectro de diseño de campo libre elástico ($Q=1$) para estructuras de Grupo B, con un 5% de amortiguamiento estructural, son las siguientes:

a_0 (g)	c (g)	T_a (s)	T_b (s)	T_c (s)	r	k
0.20	0.66	0.12	0.35	2.25	0.75	0.75

Tabla 7 PARÁMETROS SISMICOS

Donde a_0 es el coeficiente de aceleración del terreno, c es el coeficiente sísmico y T es el período natural de interés; T_a y T_b son dos períodos característicos que delimitan la meseta y r es un exponente que define la parte curva del espectro de diseño.

En la siguiente figura (Ilustración 16) se muestra el espectro de diseño y la zona C de acuerdo con la Zonificación sísmica para la República Mexicana (PRODISIS, 2015).



Ilustración 16 ESPECTRO DE DISEÑO (PRODISIS 2015)

17. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA Y ENSAYES DE LABORATORIO

Los trabajos de campo constituyen el inicio geotécnico en el cual se requiere conocer la estratigrafía y las propiedades mecánicas de los suelos. Esta información se obtuvo con la exploración geológica de la zona de interés, se programaron los siguientes trabajos:

- Tres Sondeos Exploratorios (SE), aplicando la técnica de Penetración Estándar (SPT).
- Extracción de muestras con tubo tipo California en los sondeos SE1 y SE2.
- Instalación de un Tubo de Observación del Nivel de Aguas Freáticas en el sondeo SE3

Con las siguientes profundidades:

Sondeo Exploratorio	Profundidad máxima [m]
SE1	35.40
SE2	35.40
SE3	20.40

Tabla 8 SONDEOS

18. SONDEOS EXPLORATORIOS

Los Sondeos Exploratorios se ejecutaron aplicando principalmente la prueba de SPT (Sondeo de Penetración Estándar) que consiste en hincar un penetrómetro, mediante golpes de un martinete, en cuatro tramos de 15 cm cada uno. Con base en lo establecido en la norma ASTM-D1586, alcanzando una profundidad máxima de investigación de 35.40 m. Este ensaye permite extraer muestras alteradas para definir la estratigrafía del sitio. El martinete tiene una altura de caída de 76 cm con una masa de 63.5 kg.

Posteriormente en cada avance, se lavó la perforación con una broca tricónica hasta la profundidad máxima alcanzada para eliminar el azolve, haciendo circular el lodo bentónico para garantizar la estabilidad de las paredes del barreno. El penetrómetro empleado corresponde a un tubo de acero.

Durante la ejecución de estos sondeos se obtuvieron muestras alteradas del subsuelo de forma continua en toda la profundidad explorada que fueron llevadas al

laboratorio para conocer las propiedades índices, como son la granulometría, plasticidad y contenido de agua.

19. ENSAYES DE LABORATORIO

Las muestras recuperadas en el trabajo de exploración fueron clasificadas de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y se determinaron las siguientes propiedades:

- Contenido de Agua (Norma ASTM D2216)
- Contenido de finos por lavado (Norma ASTM D1140)

Además de las propiedades mecánicas con las siguientes pruebas:

- Compresión Triaxial tipo Consolidada – No drenada (TX-CU, ASTM D4767)
- Corte directo (ASTM D3080).

20. CARACTERIZACIÓN ESTRATIGRÁFICA

Con base en la información recopilada, en conjunto con los trabajos de exploración geotécnica y ensayos de laboratorio, se estableció la estratigrafía para el SE2 que es la que se ocupará para la realización de este proyecto.

Interpretación estratigráfica SE2

Depósito de Talud (0.0 a 16.20 [m]) Se tiene una capa conformada por arena limosa de color café claro. Está caracterizada por un número de golpes de SPT entre 25 y 50. El contenido de finos es de entre 40 y 60%.

Areniscas y conglomerados (16.20 a 35.40 [m]) Son arenas de café claro con un contenido de agua de 20% en promedio, con un pico superior al 100% en 22.50 [m].

El Nivel Freático se obtuvo con el monitoreo del tubo de observación que se encontró a una profundidad de 16 [m].

21. MODELO GEOMECÁNICO

Con base en la estratigrafía detectada mediante el sondeo SE2 se definió el modelo geotécnico. Debido a que no se tenían los suficientes datos en las pruebas de

laboratorio se ocuparon correlaciones. Fueron indispensables el número de golpes y con ayuda de ecuaciones para arenas, por ejemplo, Meyerhof y Terzaghi para obtener el ángulo de fricción interna.

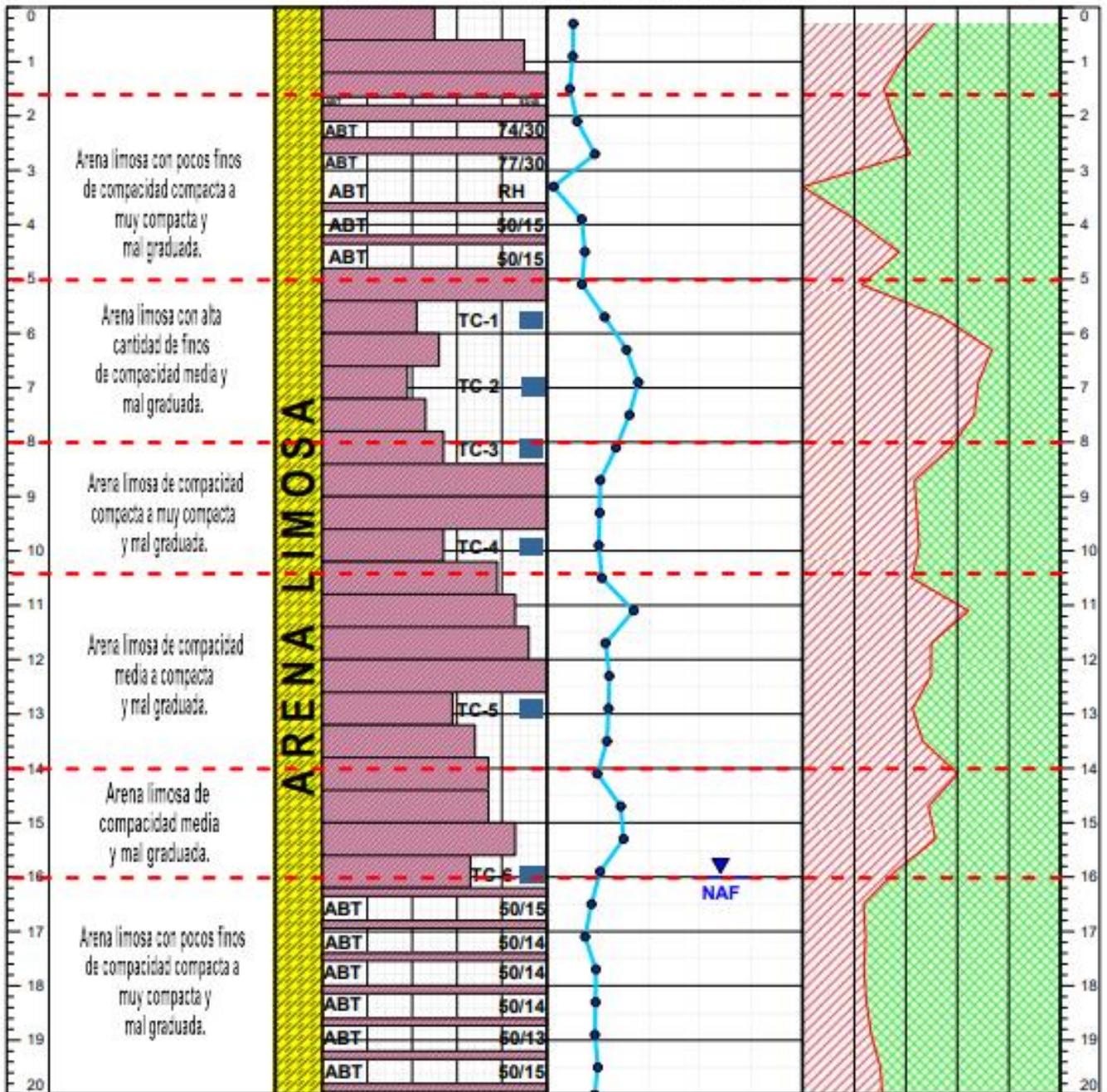
Se dividió en los siguientes estratos con las siguientes características

PROPIEDADES DEL MODELO GEOTÉCNICO

ESTRATOS	PROFUNDIDAD [m]		ESPESOR	γ	γ sat	COHESIÓN	ϕ	E	RELACIÓN
	de	a	m	KN/m3	KN/m3	KN/m2	°	KN/m2	POISSON
1	0	1.6	1.6	16.78	17.73	13.72	33.5	34833	0.366
2	1.6	3.25	1.65	18.99	19.94	15.68	35.5	33500	0.335
3	3.25	5	1.75	19.50	20.45	15.68	34.5	27643	0.445
4	5	8	3	19.31	20.26	30.00	30.5	19375	0.618
5	8	10	2	18.01	18.96	25.48	34.4	27875	0.445
6	10	14	4	19.49	20.44	25.48	34.4	32500	0.336
7	14	16	2	18.73	19.68	25.48	34.4	32500	0.336
8	16	35	19	19.63	20.58	25.48	35.5	32500	0.336

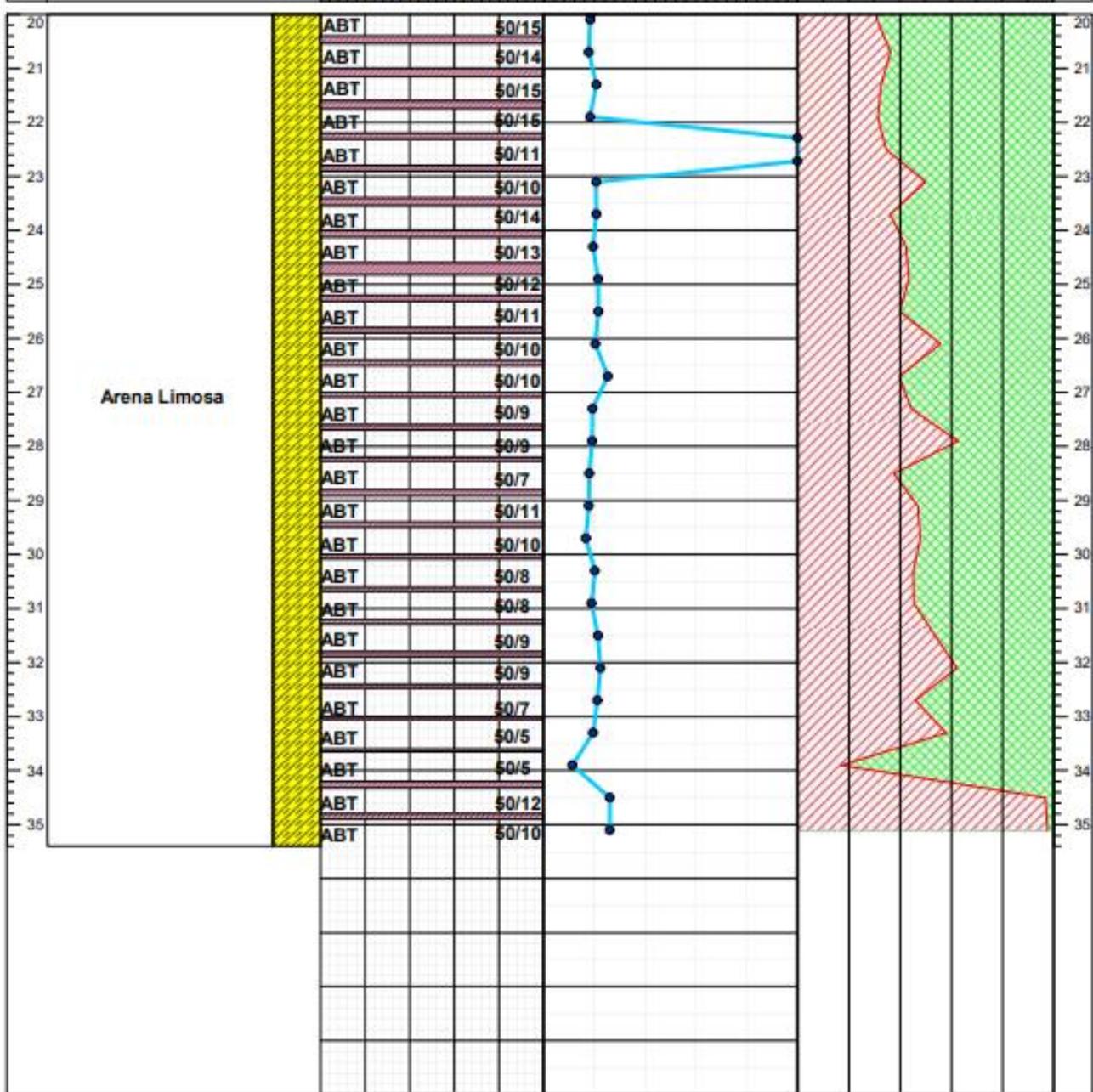
Tabla 9 PROPIEDADES GEOTECNICAS

	Proyecto: Tijuana	Profundidad Explorada: 35.40 m	Sondeo: SE-2
	Coordenadas UTM: 11N : 497,858 m E : 3,597,099 m N	Universidad Nacional Autónoma de México	
			Profundidad NAF: 16.00 m
			Elevación: 92.0 m



SIMBOLOGÍA			ABREVIATURAS					
	Relleno		Arena		Limo con arena	PH = Peso de Herramienta	LL = Límite líquido	NAF = Nivel de aguas freáticas
	Arcilla		Grava		Arena arcillosa	TC = Tubo California	LP = Límite plástico	ABT = Avance con broca tricónica
	Limo		Arcilla arenosa		Arena limosa	F = Porcentaje de finos	A = Porcentaje de arenas	

	Proyecto: Tijuana	Profundidad Explorada: 35.40 m	Sondeo: SE-2
	Coordenadas UTM: 11N ; 497,858 m E ; 3,597,099 m N	Universidad Nacional Autónoma de México	Profundidad NAF: 16.00 m
			Elevación: 92.0 m



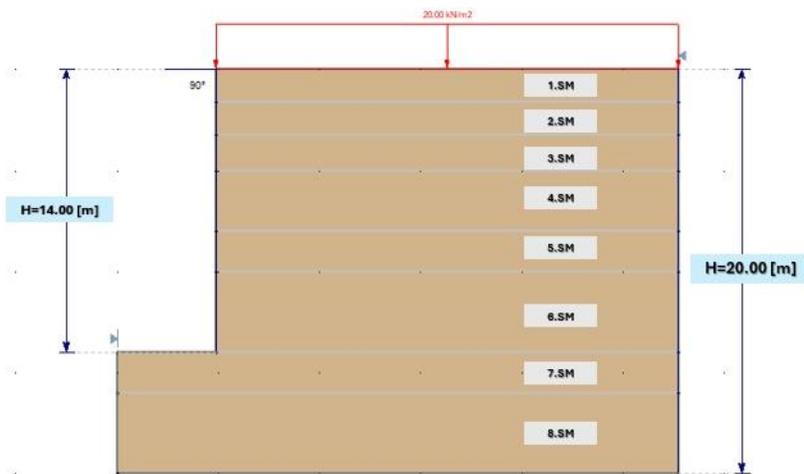
SIMBOLOGÍA				ABREVIATURAS			
	Relleno		Arena		Limo con arena	PH =	Peso de Herramienta
	Arcilla		Grava		Arena arcillosa	TS =	Tubo Shelby
	Limo		Arcilla arenosa		Arena limosa	F =	Porcentaje de finos
						LL =	Límite líquido
						LP =	Límite plástico
						NAF =	Nivel de aguas freáticas
						ABT =	Avance con broca tricónica
						A =	Porcentaje de arenas
						CA =	Muestreador California

Ilustración 17 PERFIL ESTRATIGRÁFICO S2

22. ESTABILIDAD DE TALUDES

De acuerdo con las características del proyecto y de las condiciones topográficas del predio, se requiere de una excavación con cortes con alturas variables entre 1.0 y 14.0 [m]. Por ello, para garantizar las condiciones de seguridad de los propios cortes, así como de las estructuras y vialidades colindantes se realizaron los análisis de estabilidad correspondientes. Se realizaron tres cortes para determinar la estabilidad del talud con las siguientes geometrías:

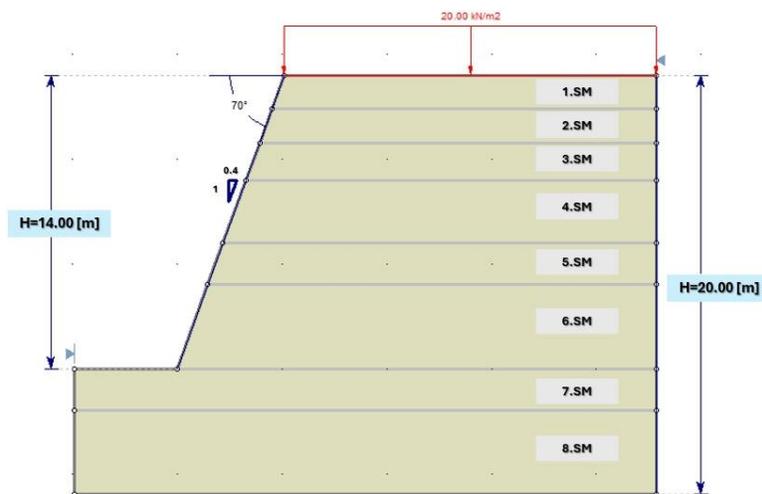
- TALUD VERTICAL AL LÍMITE DEL PREDIO



Pendiente 0:0 (Vertical: Horizontal)

Ilustración 18 CORTE 1

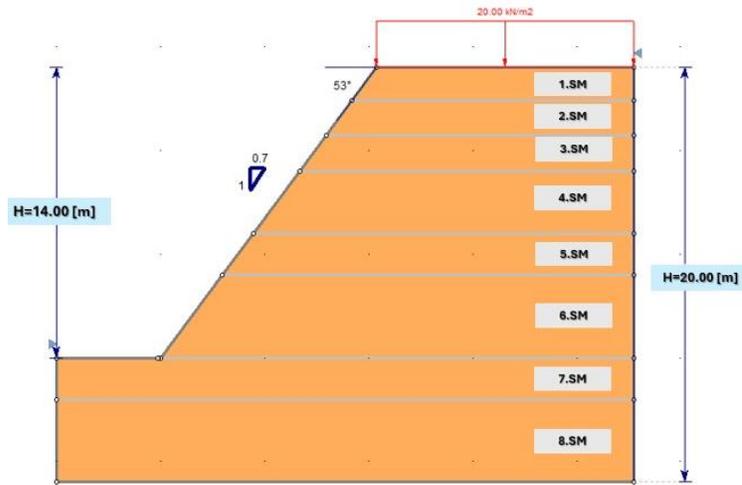
- TALUD CON PENDIENTE EN EL LÍMITE DEL PREDIO



Pendiente 1:0.4 (Vertical: Horizontal)

Ilustración 19 CORTE 2

- TALUD CON PENDIENTE ANTES DEL LÍMITE DEL PREDIO



Pendiente 1: 0.7 (Vertical: Horizontal)
Ilustración 20 CORTE 3

23. REVISIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD

De acuerdo con el proyecto arquitectónico, se analizaron diferentes inclinaciones de taludes, en esta colindancia se mantendrán los taludes de manera temporal. Por lo tanto, es recomendable que los Factores de Seguridad sean por lo menos $FS = 1.3$ y 1.1 en condiciones estáticas y accidentales.

- El corte 1, se trata de un talud sin pendiente que consta de una altura de 14 [m] que se encuentra al límite del predio.
- El corte 2, consta de una altura de 14 [m] con una proporción de pendiente 0.4:1 (horiz-vertical) al límite del predio.
- El corte 3, será un talud con proporción 0.7:1 (horiz-vert) con una altura de 14[m], pero por la pendiente se necesita un relleno de suelo – cemento para garantizar su estabilidad.

Existen diversas medidas o técnicas preventivas contra la falla de taludes como se desarrolló anteriormente. Es de suma importancia la observación y monitoreo de su comportamiento, así como del manejo o atenuación de las presiones hidráulicas del suelo. Las opciones que se consideraron en el proyecto, además de las medidas de estabilidad al reducir la altura y la pendiente del talud, será la introducción de anclajes que fue la segunda opción que ayudan en reducir los efectos de la gravedad e incrementar los esfuerzos cortantes resistentes en la superficie de falla. Y para combatir el deslizamiento del suelo por el problema de la erosión que provoca la pérdida del material (suelo) y generando seguida una falla de cortante. La medida preventiva que se considera fue el lanzamiento de concreto lanzado y el uso de drenes para reducir el nivel del agua del suelo del talud.

Para análisis la estabilidad se utilizó el software SLIDE 6.0 con licencia estudiantil, que es un programa desarrollado por Rocscience que se emplea para evaluar la estabilidad de taludes en dos dimensiones. Se basa en el uso de métodos de equilibrio límite para realizar los cálculos necesarios en el análisis de estabilidad. Se pueden analizar todo tipo de suelos y rocas de taludes, terraplenes y muros de contención.

Se analizaron los taludes ampliando la zona estudiada, tanto en su profundidad y en su anchura, evitando que las condiciones de frontera pudieran afectar el análisis.

En este cálculo se consideraron las propiedades del modelo geotécnico con las siguientes condiciones:

- Análisis de estabilidad sin sistema de estabilidad
- Análisis de estabilidad con anclas

Se considera una sobrecarga de 20 [KN/m²]. Mediante el código de cómputo, se obtuvieron los siguientes Factores de Seguridad usando los métodos propuestos de Spencer, Janbú y Morgenstern.

FACTORES DE SEGURIDAD			
MODELO	MÉTODO	ESTÁTICO	SISMICO
CORTE 1	SPENCER	0.854	0.717
	JANBÚ	0.867	0.688
	MORGENSTERN	0.857	0.719
CORTE 2	SPENCER	1.104	0.926
	JANBÚ	1.069	0.835
	MORGENSTERN	1.106	0.904
CORTE 3	SPENCER	1.398	1.140
	JANBÚ	1.370	1.145
	MORGENSTERN	1.399	1.130

Ilustración 21 FACTORES DE SEGURIDAD SLIDE

Es recomendable que los Factores de Seguridad en taludes sean por lo menos FS= 1.3 y 1.1 en condiciones estáticas y sísmicas, respectivamente. Dado que los Factores de Seguridad obtenidos no satisfacen los márgenes establecidos, se tendrán que implementar una solución que garantice la estabilidad de los cortes y de las estructuras colindantes en función de las características del proyecto y la disponibilidad de los espacios.

Cuando se lleva a cabo una excavación en el terreno o se ajusta la forma de un talud, se produce un desequilibrio en la masa del suelo, lo que, a su vez, puede dar lugar a un posible deslizamiento de una parte o bloque del terreno. Un sistema de anclaje se refiere a un conjunto de componentes estructurales diseñados para aumentar la resistencia de esa masa de suelo y restaurar su equilibrio. Este sistema consiste principalmente en tendones de acero que se colocan en la masa de suelo

mediante perforaciones que son inyectadas a presión para lograr la transmisión de cargas entre el tendón y el suelo.

24. CAPACIDAD DE CARGA DEL SISTEMA DE ANCLAJE

La revisión de la capacidad de carga del sistema de anclaje se llevó a cabo a partir de la determinación de la fuerza resistente de cada ancla por el método de LPC del criterio de Bustamante (1985), para ello se ocuparon los siguientes mecanismos de falla:

1. Propuesta de las dimensiones del bulbo del ancla.

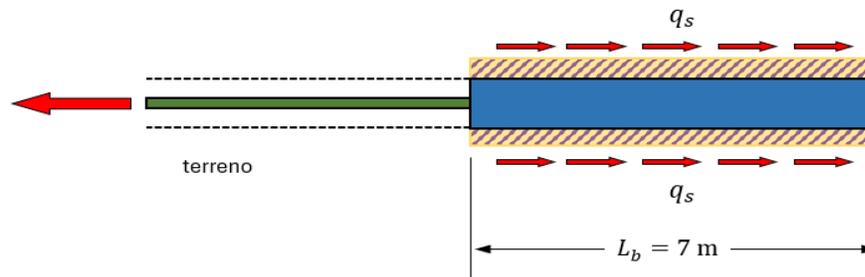


Ilustración 22 BULBO DEL ANCLAJE

- Bulbo de 4" (0.102 m) de diámetro.
- Longitud de 7 metros.
- Inyección IRS

- **Falla en el contacto bulbo – terreno**

La resistencia en la interfaz bulbo – terreno se determinó a través de la capacidad última sobre la superficie de falla, de la siguiente manera:

$$T_f = \pi D_s L_b q_s$$

donde:

T_f = Capacidad última

D_s = Diámetro incrementado de bulbo que en este caso es de 102 mm

L_b = Longitud del bulbo, igual a 7 m

q_s = Fricción lateral en el contacto – bulbo terreno.

con:

$$D_s = \alpha D_b$$

donde:

D_b = Diámetro teórico del bulbo

α = Coeficiente de incremento en función del tipo de material y método de inyección

Dadas las condiciones de resistencia del terreno se toma en cuenta para arenas limosas con el coeficiente α igual a 1.45. Con ello la capacidad de carga última del anclaje por adherencia en el contacto bulbo – terreno es:

$$D_s = (1.45)(0.102 [m]) = 0.148[m]$$

Para el cálculo de resistencia en el contacto bulbo – terreno se ocupa una grafica en donde las abscisas se tiene una presión límite del suelo, está presión se obtiene de los parámetros de número de golpes corregido con la prueba de penetración estándar SPT. Donde la curva SG-1 es para el procedimiento de inyección ISR.

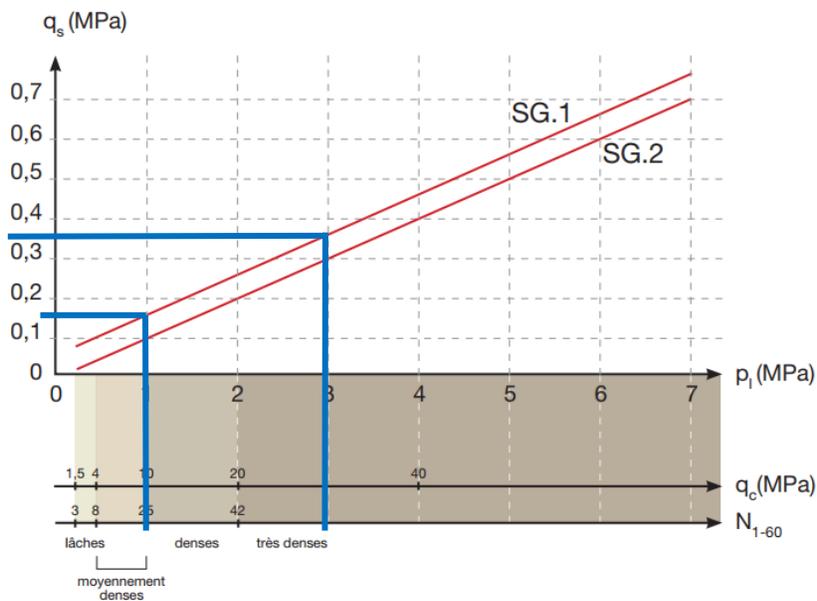


Ilustración 23 Gráfica de Resistencia bulbo - terreno

En la descripción del estrato 4, se indica que la arena arcillosa se encuentra en un estado semicompacto, por lo que su resistencia corresponde con el valor de $q_s \cong 0.15 MPa$. Y para los estratos 5 y 6 la arena arcillosa se encuentra en un estado compacto, por lo que su resistencia corresponde al valor de $q_s \cong 0.35 MPa$.

Para el anclaje 1:

$$T_{f1} = \pi(0.148)(7)(0.15) = 0.488[MN] = 488[KN]$$

Bajo las condiciones del terreno y la geometría del bulbo, la resistencia en el contacto bulbo terreno es:

$$T_{f1} = 488[KN]$$

Para los anclajes 2 y 3:

$$T_{f1} = \pi(0.148)(7)(0.35) = 1.139[MN] = 1139[KN]$$

Bajo las condiciones del terreno y la geometría del bulbo, la resistencia en el contacto bulbo terreno es:

$$T_{f1,2} = 1139[KN]$$

- **Determinación de la fuerza de tensado del ancla**

Se considera que la fuerza de tensado F_T debe ser del orden del 75% para anclajes temporales de la resistencia bulbo – terreno.

$$F_T = 0.6T_f$$

Para el anclaje 1:

$$F_T = 0.6(488 [KN]) = 292.8 [KN]$$

Para este caso se propone una fuerza de tensado de 300 [KN].

Para los anclajes 2 Y 3:

$$F_T = 0.6(1139 [KN]) = 683.4 [KN]$$

Para este caso se propone una fuerza de tensado de 700 [KN].

- **Tipo de acero del cable para el ancla**

Considerando que los tendones de las anclas tienen las siguientes características:

- Esfuerzo de fluencia de: $f_y = 1570 [MPa]$
- Área de la sección de acero es: $A_s = 140 mm^2$

La fuerza resistente de un cable se calcula como:

$$T_R = 0.6A_s f_y = 0.6 \left(140 mm^2 \times \frac{1m^2}{(1,000 mm)^2} \right) (1570 MPa) = 0.132 [MN] = 132 \left[\frac{KN}{CABLE} \right]$$

El número de cables se determina como:

Para el anclaje 1:

$$\text{No. Cables} = \frac{\text{fuerza de tensado}}{\text{resistencia del cable}} = \frac{F_T}{T_R} = \frac{300 \text{ [KN]}}{132 \left[\frac{\text{KN}}{\text{CABLE}} \right]} = 2.27 \approx 3 \text{ CABLES}$$

Para los anclajes 2 y 3:

$$\text{No. Cables} = \frac{\text{fuerza de tensado}}{\text{resistencia del cable}} = \frac{F_T}{T_R} = \frac{700 \text{ [KN]}}{132 \left[\frac{\text{KN}}{\text{CABLE}} \right]} = 5.3 \approx 6 \text{ CABLES}$$

- **Revisión de la fuerza resistente a tensión para el arreglo de cables propuesto.**

Para el anclaje 1:

En este caso se requieren 2 torones con diámetros de 0.6”:

$$\begin{aligned} T_c &= 0.6nAsfy = 0.6(3 \text{ cables}) \left(140 \text{ mm}^2 \times \frac{1 \text{ m}^2}{(1,000 \text{ mm})^2} \right) (1570 \text{ MPa}) = 0.396 \text{ [MN]} \\ &= 396 \left[\frac{\text{KN}}{\text{CABLE}} \right] \end{aligned}$$

Para el anclaje 2:

En este caso se requieren 5 torones con diámetros de 0.6”:

$$\begin{aligned} T_c &= 0.6nAsfy = 0.6(6 \text{ cables}) \left(140 \text{ mm}^2 \times \frac{1 \text{ m}^2}{(1,000 \text{ mm})^2} \right) (1570 \text{ MPa}) = 0.528 \text{ [MN]} \\ &= 528 \left[\frac{\text{KN}}{\text{CABLE}} \right] \end{aligned}$$

- **Revisión de la fuerza resistente a tensión para el arreglo de cables propuesto.**

La fuerza de anclaje de cada elemento será la menor de entre la resistencia en el contacto bulbo – terreno y la resistencia de los torones.

Para el anclaje 1:

$$F_a = \text{mín} (T_f, T_c) = \text{mín} (488 \text{ [KN]}, 396 \text{ [KN]}) = 396 \text{ [KN]}$$

Para los anclajes 2 Y 3:

$$Fa = \text{mín}(Tf, Tc) = \text{mín}(1139 [KN], 792 [KN]) = 792 [KN]$$

En este caso la separación horizontal es de 3.0 m

$$R_j = \frac{396[KN]}{3 [m]} = \mathbf{132 \left[\frac{KN}{m} \right]}, R_j = \frac{792[KN]}{3 [m]} = \mathbf{264 \left[\frac{KN}{m} \right]}$$

25. REVISIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA CON ANCLAS

Para el corte 1:

Con base en la información del proyecto proporcionada, el análisis de estabilidad se desarrolló tomando en cuenta lo siguiente:

- Sobrecarga de 20 KN/m²
- Número de niveles de anclas: 3
- Longitud del bulbo: 7m
- Diámetro del bulbo: 102 mm

Los resultados del análisis de estabilidad con el modelo geotécnico establecido es el siguiente:

Corte sin sistema de anclajes:

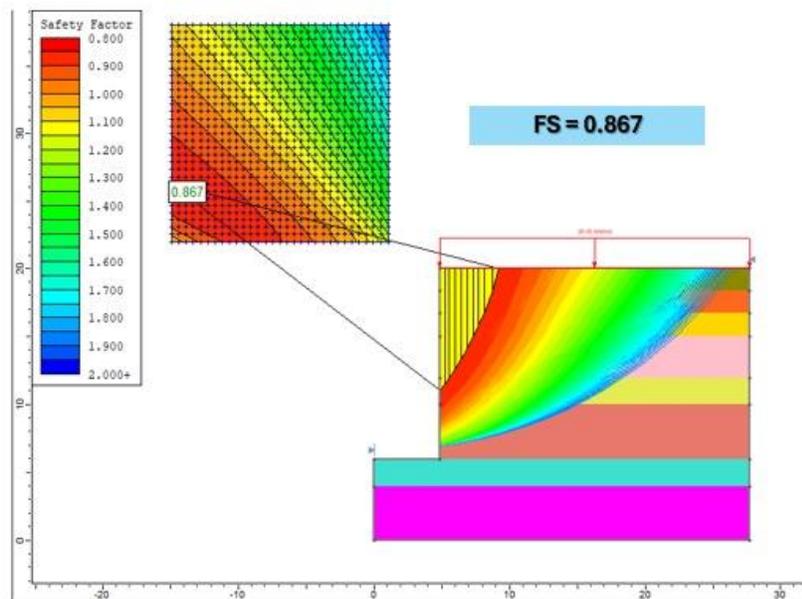


Ilustración 24 SLIDE SIN SISTEMA DE ANCLAJE

A partir de la superficie de falla más afectada obtenida en el análisis del talud sin sistema de anclaje. Como se observa, la superficie de falla ocurre en el cuerpo del corte a una altura de 14[m] de profundidad con el FS de 0.867.

Y con base en, superficie de falla obtenida en el análisis de la excavación sin sistema de anclaje, se realizó el cálculo de la estabilidad del talud con el sistema de estabilización con anclas.

Dibujando el círculo de falla:

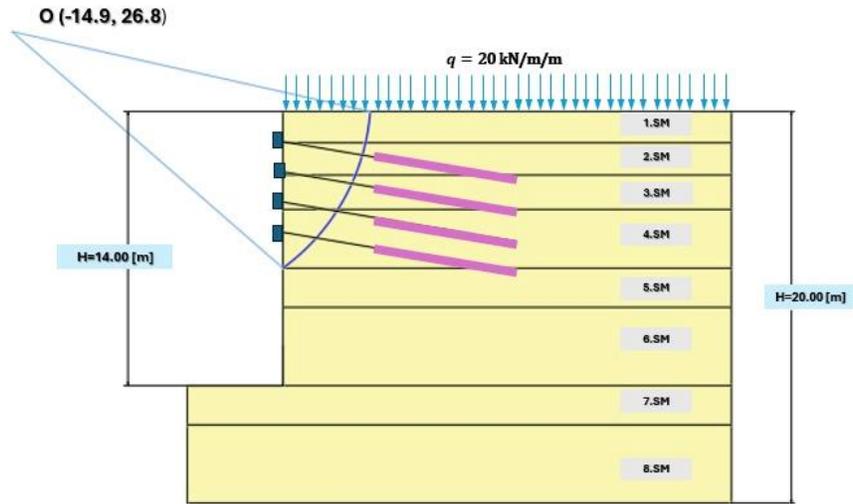
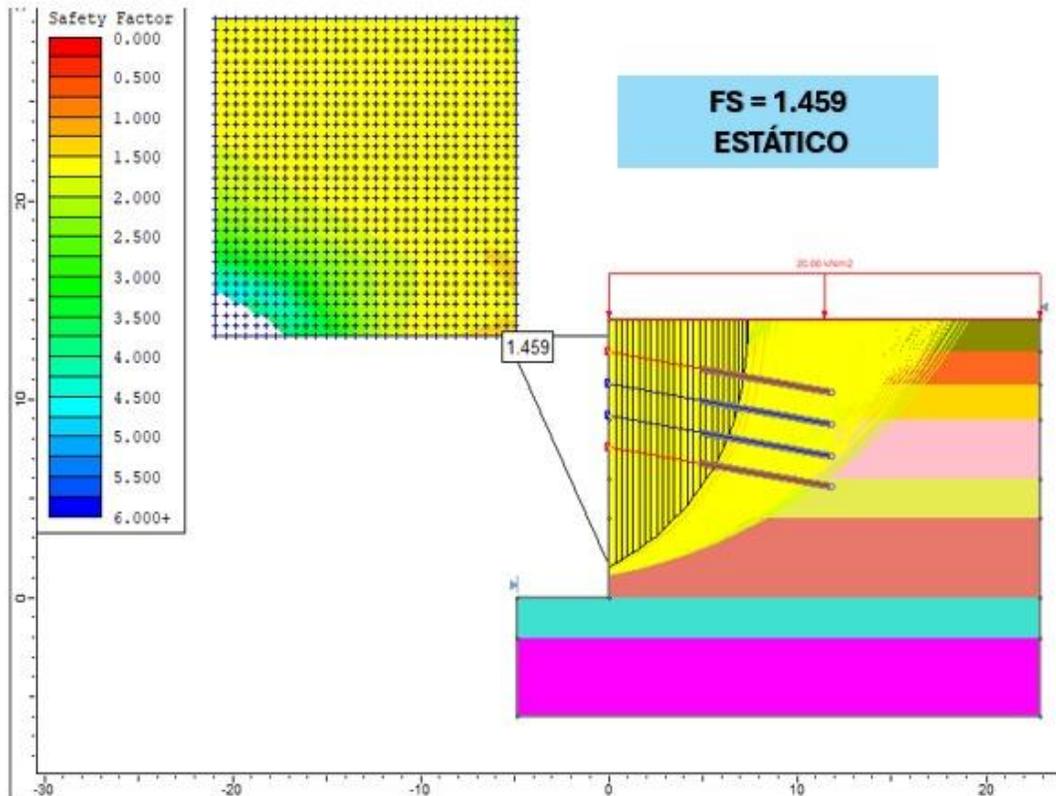


Ilustración 25 CÍRCULO DE FALLA

Las anclas incrementan el Factor de Seguridad hasta un valor de 1.746, que se considera adecuado para un talud temporal.

Corte con sistema de anclaje:



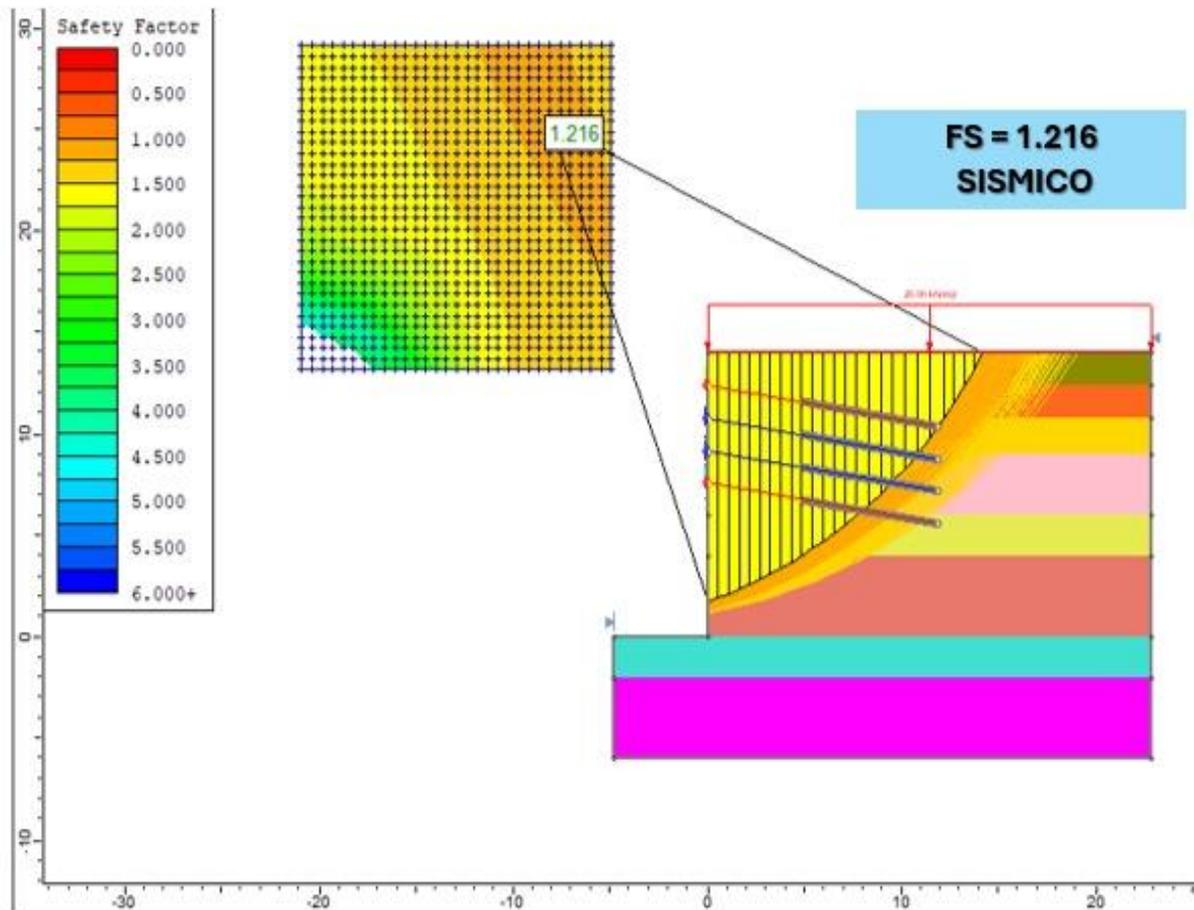


Ilustración 26 SLIDE CON SISTEMA DE ANCLAJE

Para el corte 2:

Con base en la información del proyecto proporcionada, el análisis de estabilidad se desarrolló tomando en cuenta lo siguiente:

- Sobrecarga de 20 KN/m²
- Número de niveles de anclas: 3
- Longitud del bulbo: 7 m
- Diámetro del bulbo: 102 mm

Los resultados del análisis de estabilidad con el modelo geotécnico establecido es el siguiente:

Corte sin sistema de anclajes:

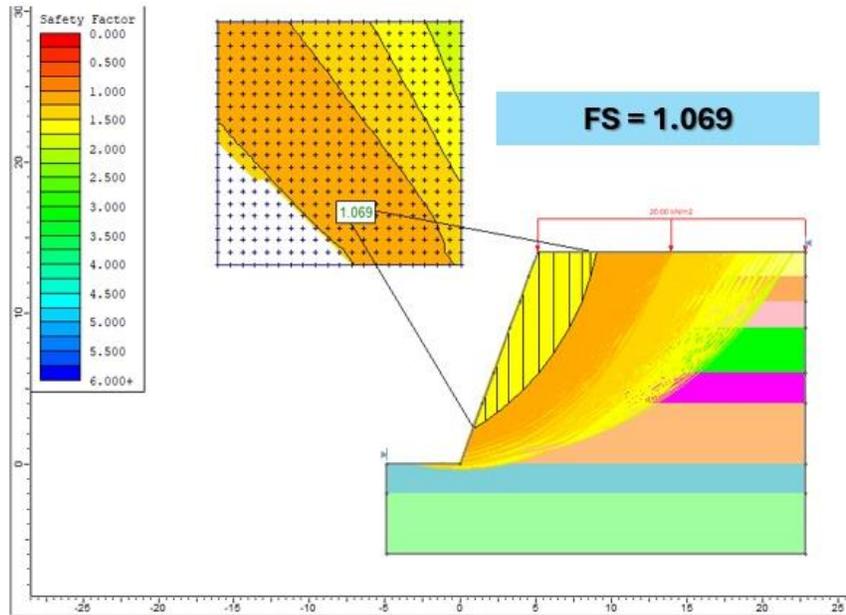


Ilustración 27 SLIDE SIN SISTEMA DE ANCLAJE

Dibujando el círculo de falla:

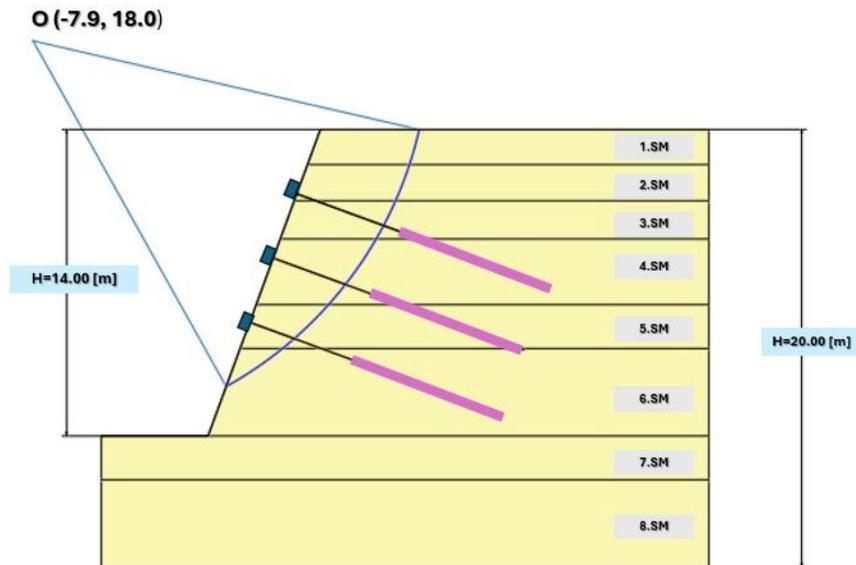


Ilustración 28 CÍRCULO DE FALLA, CORTE 2

A partir de la superficie de falla más afectada con el FS de 1.069 se realizó el diseño de las anclas. Con el sistema de estabilización se logró subir el Factor de Seguridad a 1.546 por lo que se vuelve estable el talud.

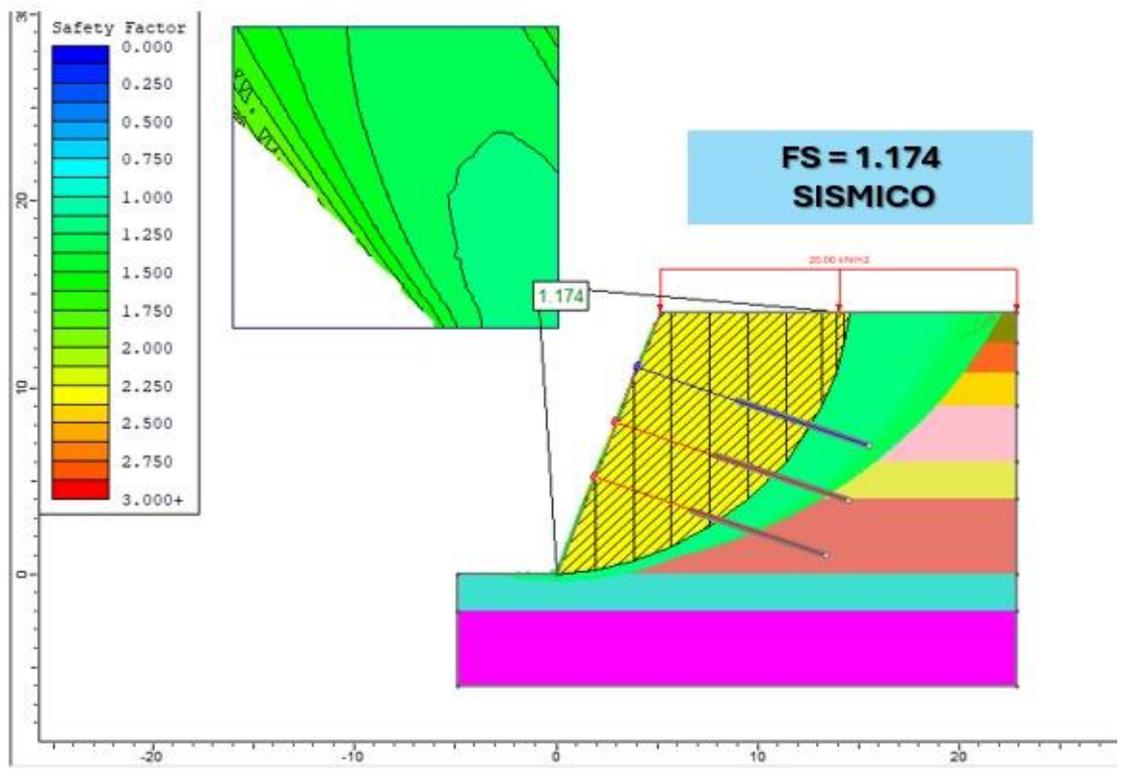
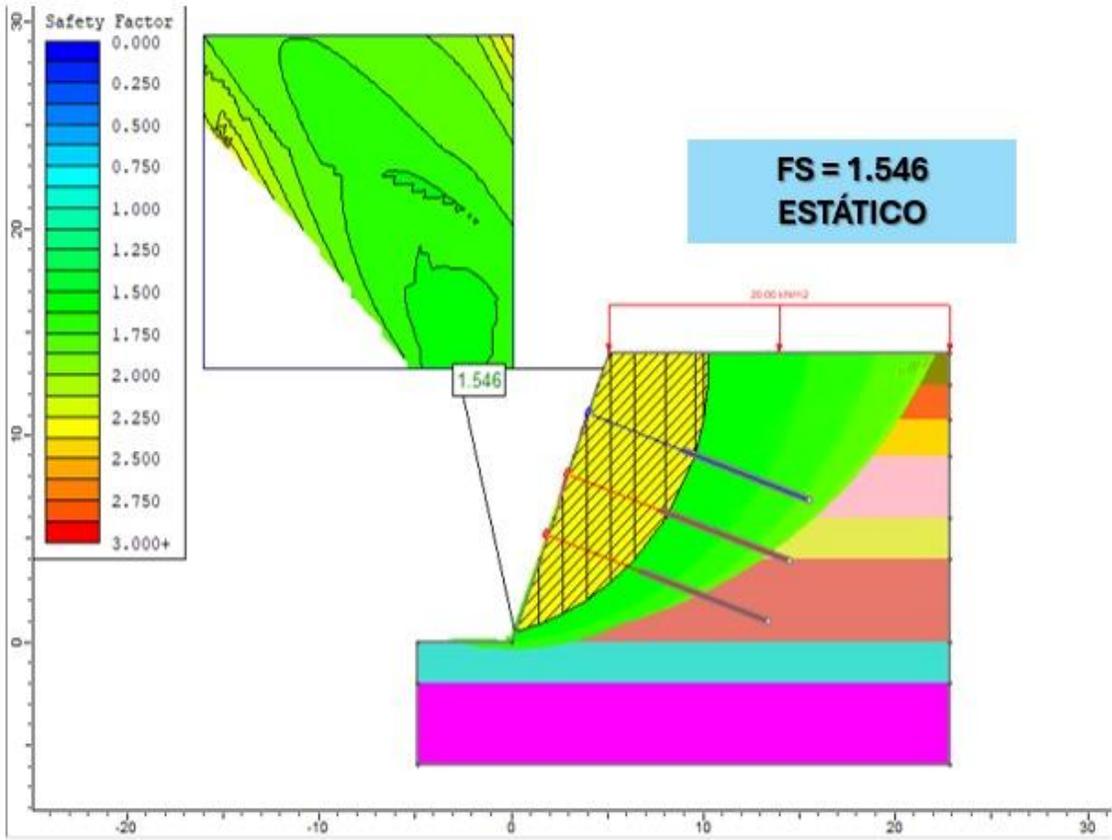


Ilustración 29 SLIDE CON SISTEMA DE ANCLAJE

MODELO	FACTORES DE SEGURIDAD CON ANCLAS	
	ESTÁTICO	SISMICO
CORTE 1	1.459	1.216
CORTE 2	1.548	1.174

Tabla 10 FACTORES DE SEGURIDAD SLIDE ANCLAJES

De acuerdo con los resultados obtenidos de los modelos y su análisis con el programa SLIDE, el sistema de anclaje es estable.

26. ANÁLISIS DE ANCLAJE CON EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO

Se realizó la revisión de la estabilidad de la excavación con un modelo numérico utilizando el Método de Elementos Finitos mediante el programa de PLAXIS 2D ULTIMATE, de manera que se simularon las etapas de excavación de los taludes con las diferentes variaciones hidrológicas con respecto a las propiedades índice y mecánicas del suelo. De manera que sea posible evaluar sistemas de contención y la excavación siguiendo el procedimiento constructivo establecido en el proyecto.

Cabe destacar que esta metodología de cálculo permite considerar todos los elementos que intervienen en la estabilidad de la excavación (terreno, estructuras de contención, proceso constructivo, etc.) para determinar su posible comportamiento durante las diferentes etapas de la construcción.

En el modelo numérico se consideró la estratigrafía del suelo con sus respectivas propiedades de resistencia y deformabilidad obtenidas con el Estudio de Mecánica de Suelos, los elementos de sistemas de anclaje, así como la geometría y características establecidas en el proyecto.

Se llevó a cabo un análisis de Factor de Seguridad estático y dinámico de PLAXIS para comparar los resultados con SLIDE sin ningún tipo de tratamiento.

MODELO	FACTORES DE SEGURIDAD	
	ESTÁTICO	SISMICO
CORTE 1	0.461	0.441
CORTE 2	0.983	0.705
CORTE 3	1.326	1.121

Tabla 11 FACTORES DE SEGURIDAD PLAXIS

Con el fin de presentar el comportamiento de las distintos estratos del terreno durante el procedimiento de excavación, se utilizó un análisis Plane Strain y por el modelo constitutivo de Mohr Coulomb.

- Simulación de siete etapas de excavación a cada 2 [m]:

Para el corte 1:

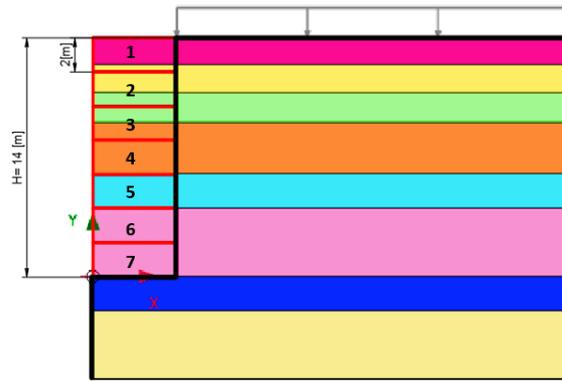


Ilustración 30 EXCAVACIÓN 1

En el talud vertical se observó que la segunda parte de la excavación a una profundidad de 4[m] ya no era estable, por lo tanto, podría sufrir un deslizamiento, es decir, ocurre un rompimiento de equilibrio de una porción del material que compone el talud y se desliza por la acción de la gravedad. Y se obtuvo una deformación total de 3.24[cm].

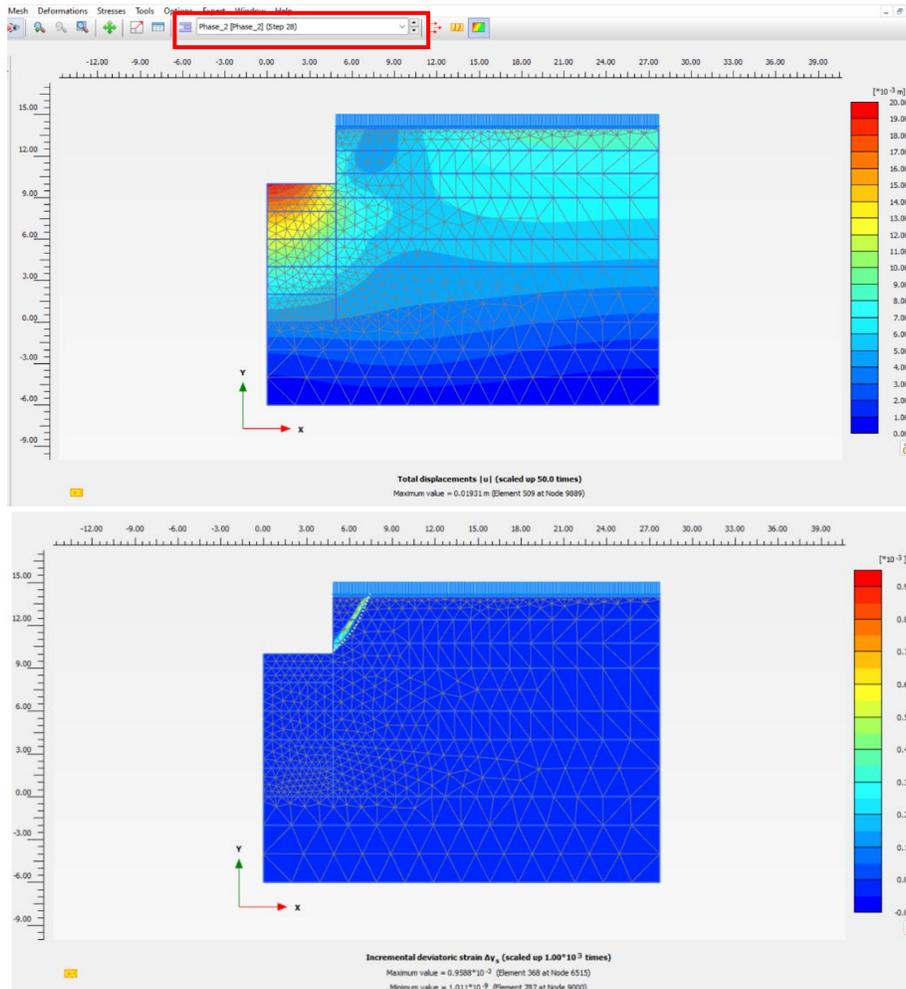


Ilustración 31 EXCAVACIÓN PLAXIS 1

Para el corte 2:

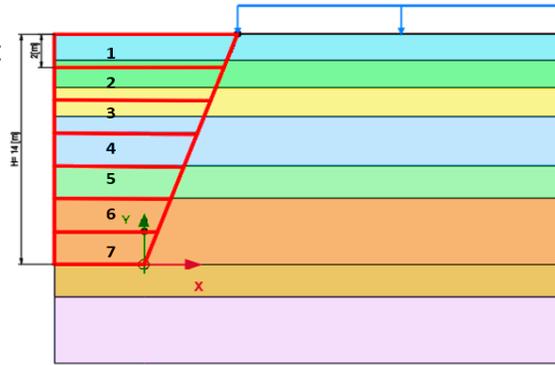


Ilustración 32 EXCAVACIÓN 2

En la segunda geometría se realizó la presentación de la excavación sin ningún tipo de tratamiento y se observó que el material es inestable hasta la distancia de 12 [m] del talud. Por lo tanto, se necesita un elemento de contención. Los resultados obtenidos demuestran que las paredes de la excavación se deforman plásticamente, presentando un desplazamiento alrededor de cm. Los puntos de color rojo representan las zonas donde el material alcanzó su resistencia máxima.

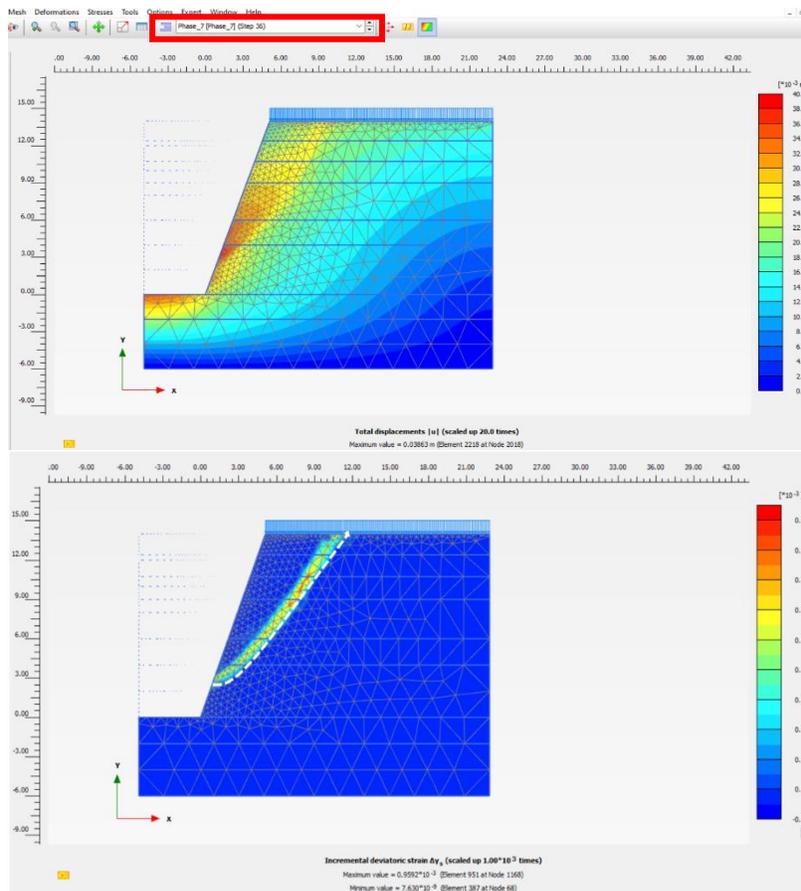


Ilustración 33 EXCAVACIÓN PLAXIS 2

Para el corte 3:

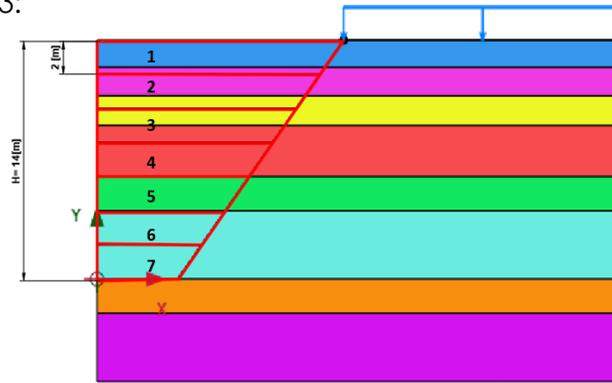


Ilustración 34 EXCAVACIÓN 3

En esta etapa evaluando las deformaciones y esfuerzos en la masa por efecto de la descarga debida al retiro de material. Las etapas concluyeron satisfactoriamente a una profundidad de 14 [m], aunque si existen desplazamientos totales de 4.91 [cm].

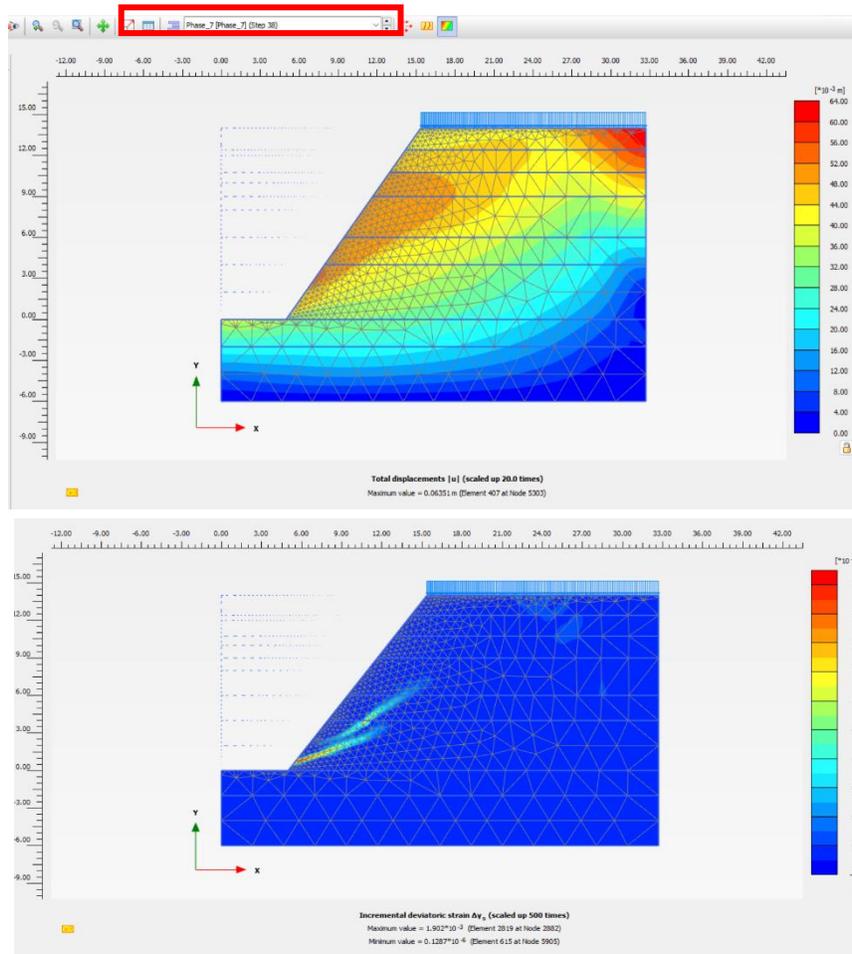


Ilustración 35 EXCAVACIÓN PLAXIS 3

27. ANÁLISIS DE CONCRETO LANZADO

Definiendo una medida preventiva contra la falla de la estabilidad de los taludes se propuso utilizar concreto lanzado que es una mezcla de agua-cemento rociada sobre el suelo que brinda una cubierta resistente que previene erosión por desgaste o infiltración la lluvia. Se considero una capa de 10 centímetros de espesor. La capa formada es resistente, un poco dúctil y relativamente impermeable, lo que proveerá de resistencia a la erosión en la superficie del talud.

Para su modelación se utilizó un elemento tipo placa (plate) con las propiedades mecánicas correspondientes con una especificación de resistencia $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$.

PARÁMETRO DE ANÁLISIS PARA EL CONCRETO LANZADO				
$f'c$ [kg/cm ²]	d [m]	EA [KN/m]	ν	El [KN-m ² /m]
250	0.10	2200000	0.2	1833

Tabla 12 TABLA DE CONCRETO LANZADO

28. SISTEMA DE ANCLAJE

El anclaje propuesto y refuerzo temporal fueron anclas temporales de tensión (activas).

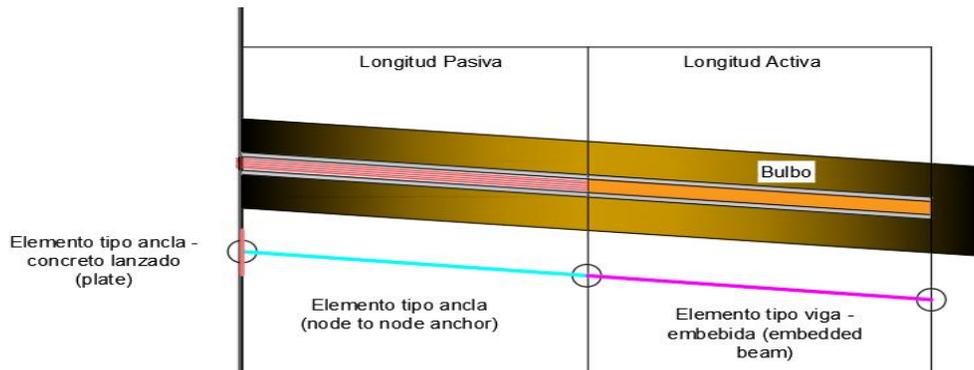


Ilustración 36 ANCLAJE PROPUESTO

En el modelo numérico, las anclas se simularon mediante dos tipos de elementos. Por una parte, el bulbo se modeló con un elemento tipo viga-embebida (embedded beam), mientras que el cable se simula como un elemento tipo ancla (Node to – node anchor).

Las etapas de análisis en el modelo numérico se ajustaron al procedimiento de excavación establecido en el proyecto.

- Colocación del elemento tipo placa (concreto lanzado) y activación de la sobrecarga de 20 [KN/m²]
- Excavación por etapas hasta 0.2 [m] por debajo de cada línea de anclaje.
- Se repiten los pasos hasta alcanzar el nivel máximo de excavación

PARÁMETROS PARA LA MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE ANCLAS		
PROPIEDADES DEL BULBO	D [mm]	0.102
	Lb[m]	7
	E [KN/m ²]	18670000
	Sh[m]	3
	Tskin [KN/m]	132 y 264
PROPIEDADES DEL CABLE	Sh[m]	3
	EA [KN]	73500

Ilustración 37 MODELACIÓN DE ANCLAJES

Para el corte 1:

Durante el proceso de excavación utilizando concreto lanzado, se analizó que, hasta la quinta etapa, a 10 metros de profundidad, es adecuado emplear este tratamiento. Se determinó que el desplazamiento incremental sería de 0.1366×10^{-3} metros, observándose el mecanismo de falla correspondiente. Esto resalta la importancia de adherirse estrictamente al procedimiento constructivo y seguir meticulosamente las etapas de excavación.

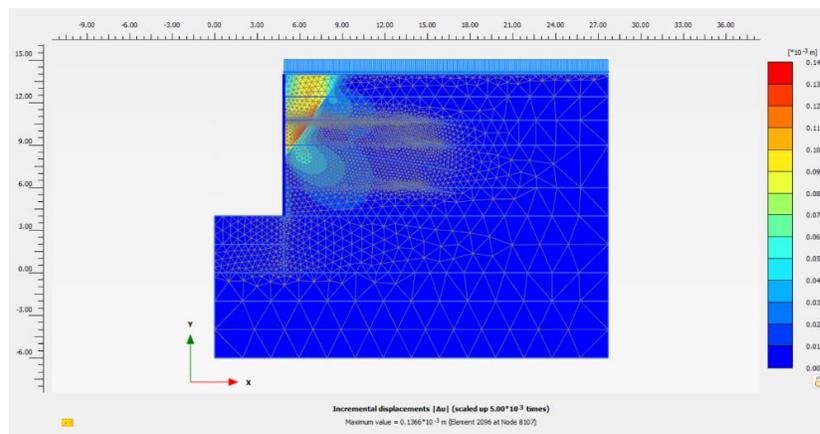


Ilustración 38 EXCAVACIÓN CON CONCRETO LANZADO

Con base en el sistema de anclaje diseñado, se registró un desplazamiento total de 6.138 cm hacia el interior de la excavación. El Factor de Seguridad estático es de 1.374 y el dinámico de 1.101, lo que indica que cumple con los requisitos para un talud temporal.

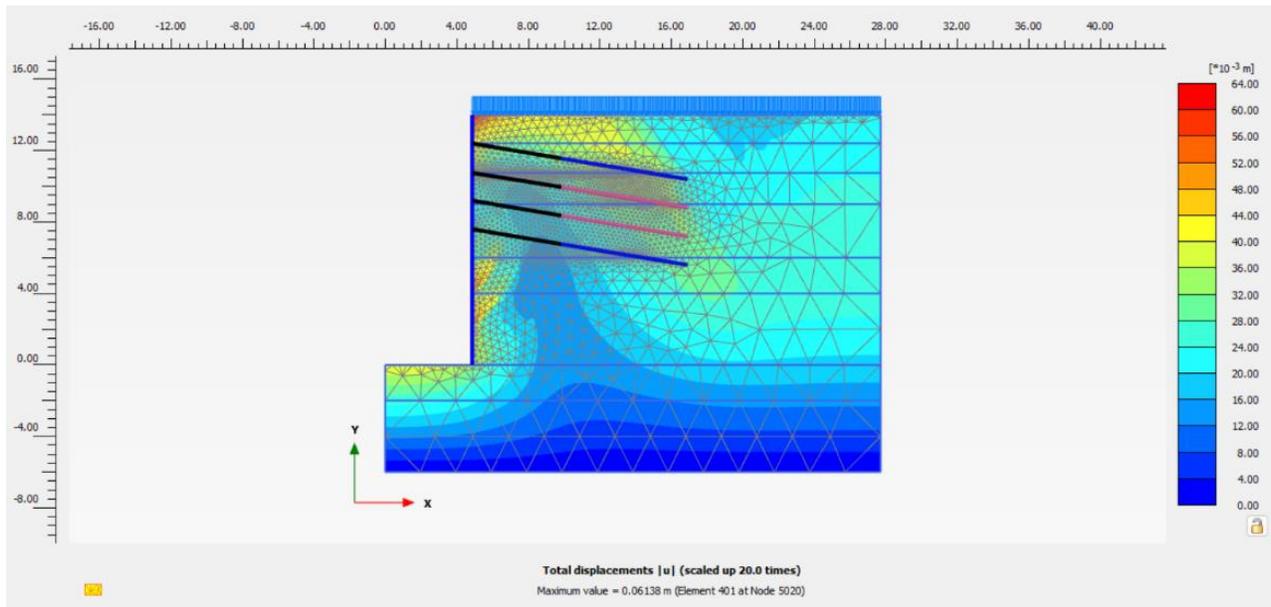


Ilustración 39 DESPLAZAMIENTOS CON ANCLAJES EN PLAXIS

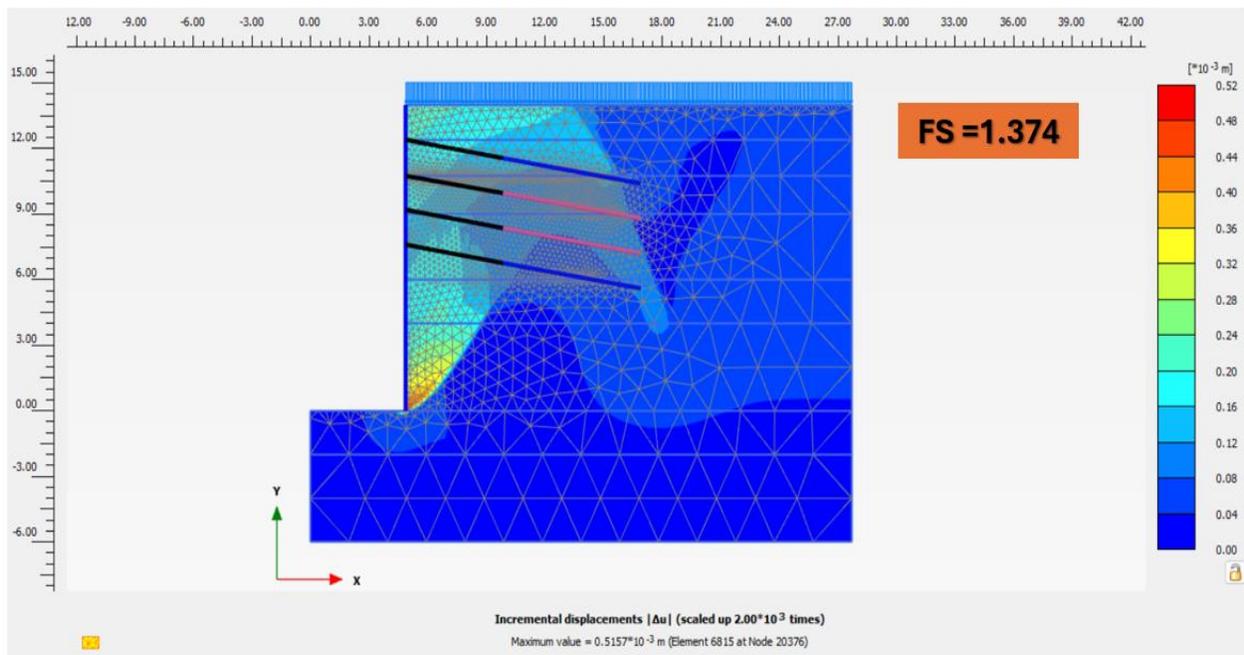


Ilustración 40 DESPLAZAMIENTOS CON ANCLAJES EN PLAXIS

Para el corte 2:

En el proceso de excavación utilizando concreto lanzado, se analizó que, hasta la sexta etapa, a 12 metros de profundidad, es adecuado emplear este tratamiento. Se determinó que el desplazamiento incremental sería de 1.784×10^{-3} metros, observándose el mecanismo de falla correspondiente. Esto resalta la importancia de adherirse estrictamente al procedimiento constructivo y seguir meticulosamente las etapas de excavación.

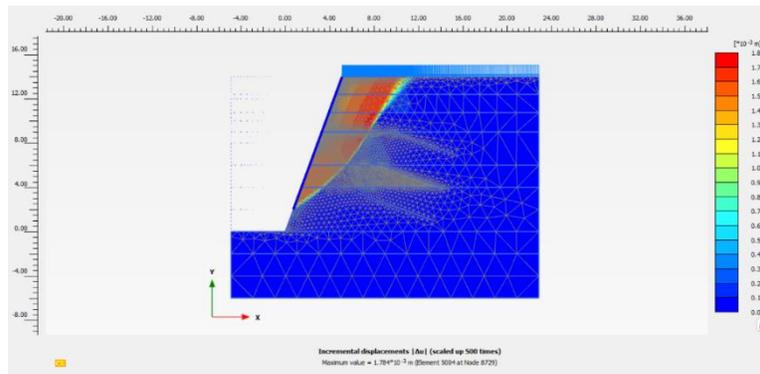


Ilustración 41 EXCAVACIÓN CON CONCRETO LANZADO

Al realizar el análisis con esta geometría utilizando el sistema de anclaje, se observó que se obtiene un Factor de Seguridad estático de 1.382 y uno dinámico de 1.246, cumpliendo así con el factor requerido para un talud temporal. La utilización de ambos métodos de estabilización resultó en un desplazamiento total de cm.

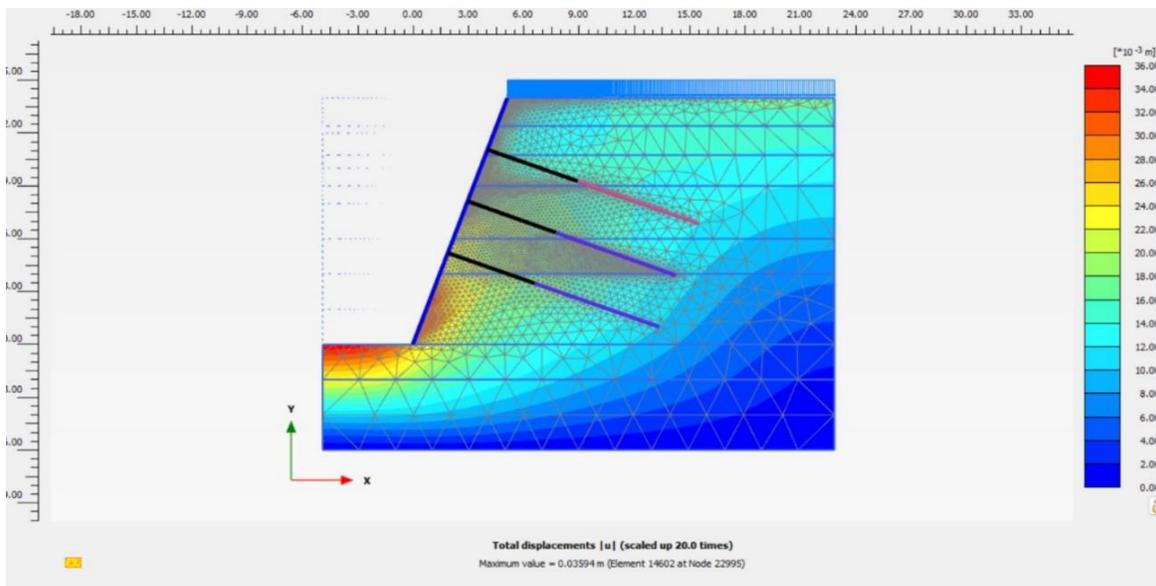


Ilustración 42 DESPLAZAMIENTOS CON ANCLAJES EN PLAXIS

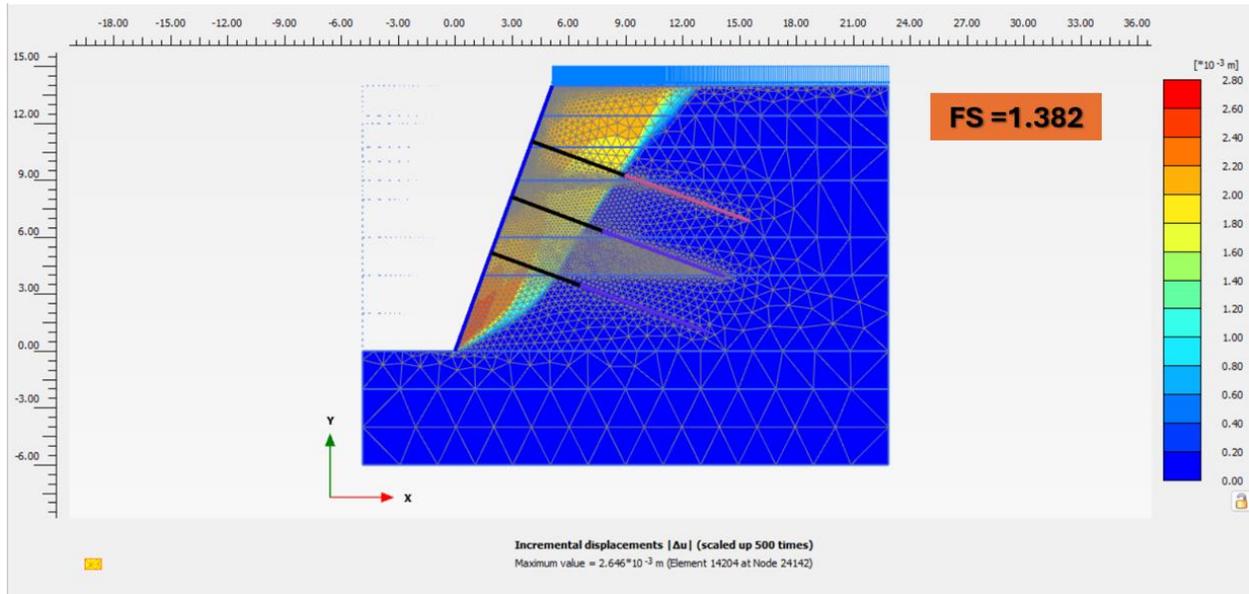


Ilustración 43 DESPLAZAMIENTOS CON ANCLAJES EN PLAXIS

Con los resultados obtenidos del modelo numérico se asume que el comportamiento del sistema de anclaje proyectado es estable para soportar las cargas laterales durante el proceso de excavación.

MODELO	FACTORES DE SEGURIDAD CON ANCLAS	
	ESTÁTICO	SISMICO
CORTE 1	1.374	1.101
CORTE 2	1.382	1.246

Tabla 13 FACTORES DE SEGURIDAD CON ANCLAS CON PLAXIS

29. ANÁLISIS DE DRENES

Para considerar la falla de un talud o una ladera debemos considerar los esfuerzos efectivos, para cualquier tiempo y para todas las condiciones (drenadas o no drenadas). Por lo tanto, hay que considerar la presencia de agua en un talud que genera presiones de poro que modifican la presencia de dichos esfuerzos efectivos, cambiando con ello la resistencia del esfuerzo cortante ocasionando la inestabilidad del talud. También, hay que considerar que el agua se encuentra en condiciones hidrodinámicas que para este proyecto será de flujo establecido. Drenar un talud es un método común para estabilizar el terreno y es más efectivo cuando las condiciones geológicas del sitio son de alta conductividad hidráulica como se presenta en dicho caso de estudio.

Los drenes servirán para dar mayor estabilidad al talud, tendrán la función de ser un sistema de subdrenaje, que consiste en tuberías, ranuradas e insertadas transversalmente en los cortes para aliviar la presión de poro. La instalación de los drenes de penetración se hará de acuerdo de la ubicación indicada en el proyecto. Y la tubería se colocará con la ayuda del equipo de perforación, ya sea con equipo ligero rotatorio o a percusión con martinete en el frente (down the hole). Los tubos utilizados serán de cloruro de polivinilo (PVC) forradas de geotextil plástico.

El modelo numérico de los drenes se simuló mediante un elemento creador de drenaje (create drain). Y con base en la información del proyecto proporcionada, el análisis se desarrolló tomando en cuenta lo siguiente:

- Drenes con 12[m] de longitud
- Perforación de 10 [cm] de diámetro
- Inclinación ascendente de 8°

Las lluvias intensas y prolongadas con frecuencia son causa de la inestabilidad en los taludes y en el caso de estudio es de suma importancia por las tuberías descompuestas y, por lo tanto, filtración del agua. Esto ocasiona el aumento de peso y de manera significativa la reducción de los esfuerzos efectivos en la potencial superficie de falla, con lo que se reducen los esfuerzos efectivos, y con ello, la resistencia al esfuerzo cortante de los materiales.

Para la simulación de una lluvia a un mediano plazo se consideró un análisis con un Nivel Freático de 2[m]. Las etapas de análisis en el modelo numérico se ajustaron al procedimiento de excavación establecido en el proyecto con las siguientes etapas:

- Colocación del elemento tipo placa (concreto lanzado) y activación de la sobrecarga de 20 [KN/m²]
- Excavación por etapas hasta 0.2 [m] por debajo de cada línea de anclaje considerando las condiciones de flujo de agua y los parámetros de permeabilidad.
- Posterior la activación de las anclas que se le aplica una tensión de 300 [KN] y 700[KN] para la activación de los drenes.

Se repiten los pasos hasta alcanzar el nivel máximo de excavación.

A partir del modelo en el programa PLAXIS 2D ULTIMATE, se observó que el talud a través de las fuerzas de filtración genera un momento motor que lo desestabiliza, por lo que se obtuvo un Factor de Seguridad de 1.104, por lo que fue necesario ocupar drenes.

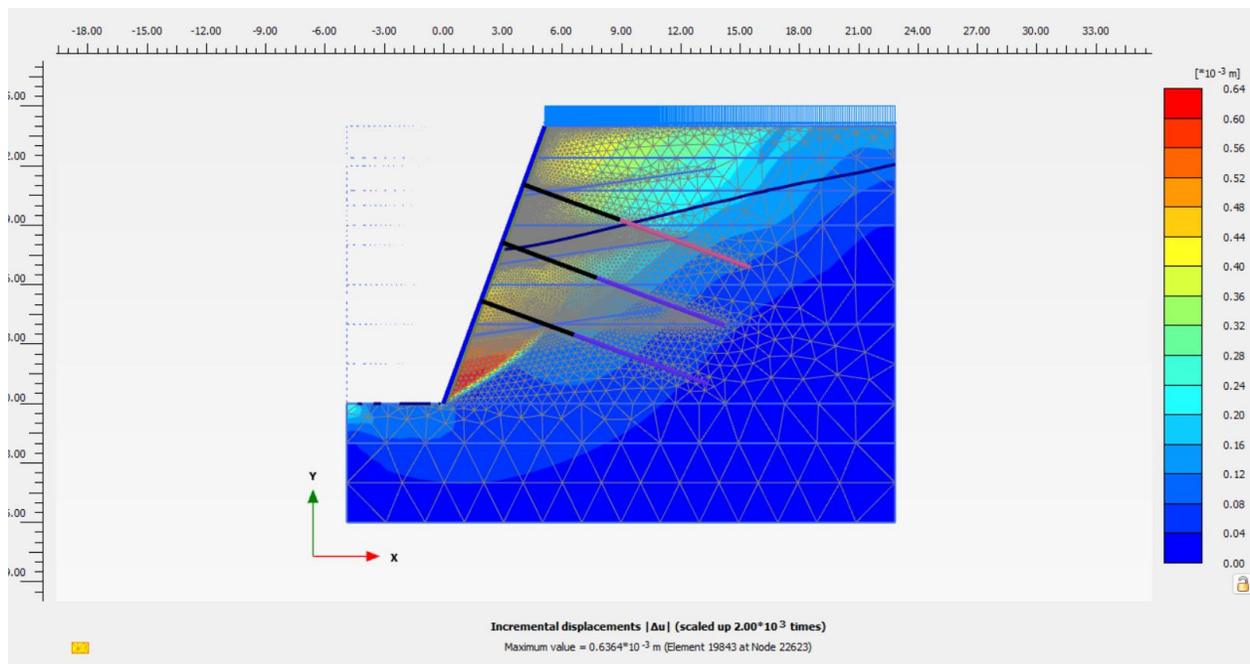


Ilustración 44 CORTE 2 CON FLUJO DE AGUA

Después de la instalación de los drenes, se observó que el Factor de Seguridad aumentó a 1.391, por lo tanto, se asume que los elementos de estabilidad y de estabilización son adecuados para el procedimiento constructivo propuesto y se considera que la obra es estable.

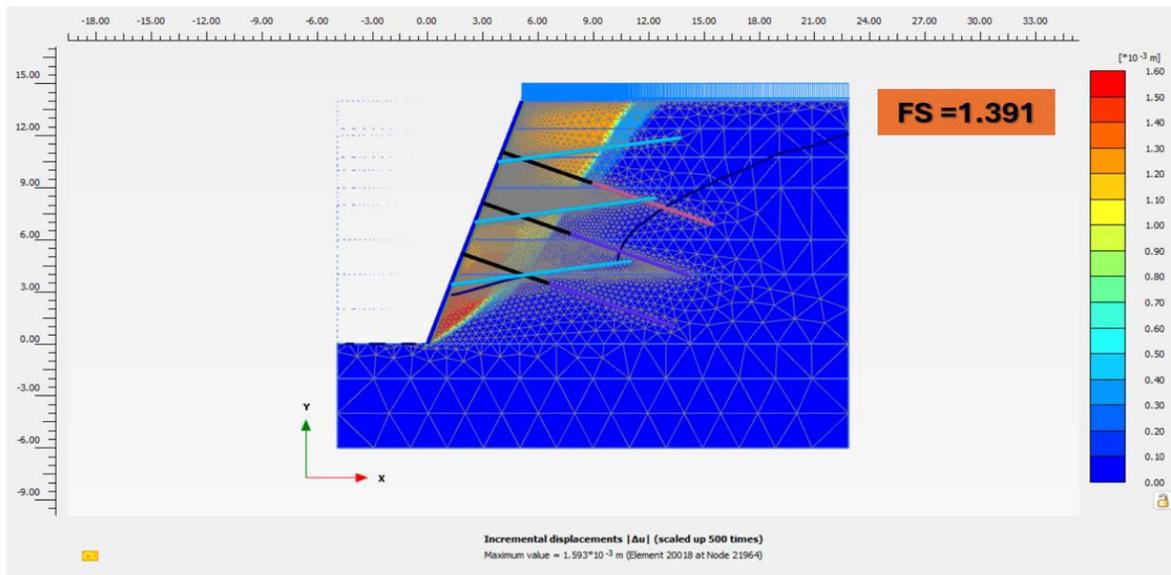


Ilustración 45 CORTE 2 CON DRENES

En la imagen siguiente del talud se muestran las flechas de red de flujo y cómo actúan conforme a la excavación.

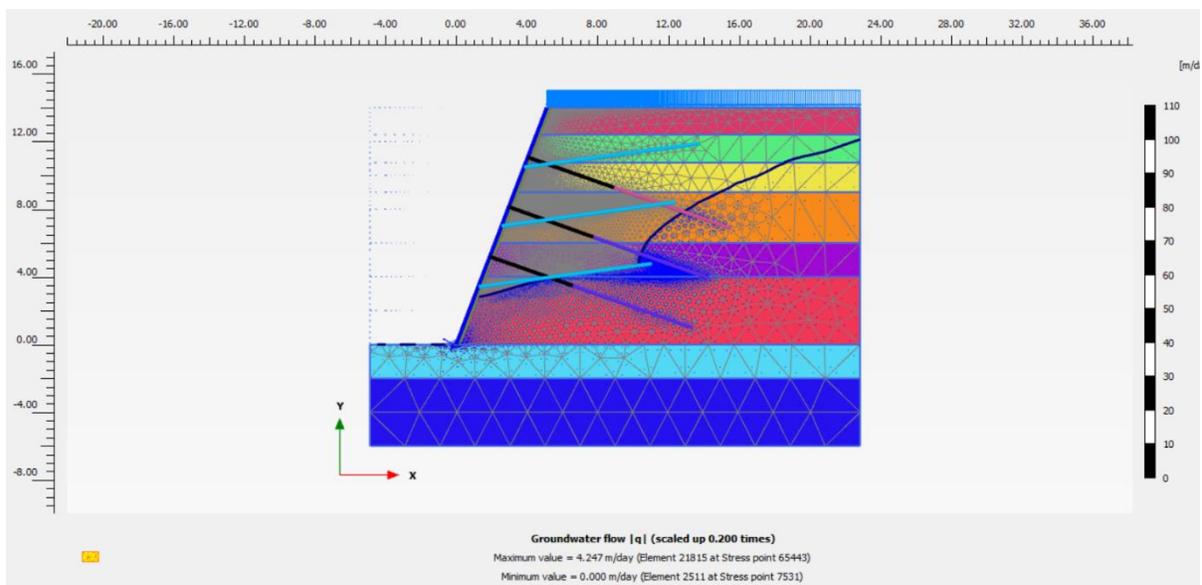


Ilustración 46 CORTE 2 RED DE FLUJO

Los Factores de Seguridad obtenidos con los drenes se representan en la siguiente tabla y se puede confirmar que el sistema de estabilidad del corte 2 es estable.

MODELO	FACTORES DE SEGURIDAD CON DRENES	
	ESTÁTICO	SISMICO
CORTE 2	1.391	1.172

Tabla 14 FACTORES DE SEGURIDAD CON DRENES

CONCLUSIONES

Tras realizar un análisis exhaustivo de la estabilidad de los taludes en el área de estudio, se determinó que los taludes presentan un Factor de Seguridad inadecuado bajo las condiciones de cargas actuales. Por lo tanto, se identificó el área afectada y se propusieron tres cortes geométricos del talud, revisando la estratigrafía del suelo y la presencia de agua que podría comprometer la estabilidad en el futuro. Por ello, se decidió realizar un análisis de estabilidad con anclajes y drenes. Las causas de inestabilidad se identificaron en las condiciones geotécnicas y en eventos naturales sísmicos, ya que se trata de un área potencial con altas magnitudes de daño.

Los Factores de Seguridad de los tres taludes fueron los siguientes:

- Sin ningún tipo de estabilidad se observan en la Tabla 15.

PROGRAMA SLIDE

MODELO	MÉTODO	FACTORES DE SEGURIDAD	
		ESTÁTICO	SISMICO
CORTE 1	SPENCER	0.854	0.717
	JANBÚ	0.867	0.688
	MORGENSTERN	0.857	0.719
CORTE 2	SPENCER	1.104	0.926
	JANBÚ	1.069	0.835
	MORGENSTERN	1.106	0.904
CORTE 3	SPENCER	1.398	1.140
	JANBÚ	1.370	1.145
	MORGENSTERN	1.399	1.130

Tabla 15 FACTORES DE SEGURIDAD SIN ANCLAJES (SLIDE)

Los métodos de Spencer, Janbú y Morgenstern son tres enfoques diferentes pero relacionados para el análisis de estabilidad de taludes. El método de Spencer es un enfoque de tipo de plano de arco circular en donde asume que todas las dovelas son paralelas, además de ser gráfico y analítico. El segundo método de Janbú puede utilizarse, en cualquier caso. Y es de gran utilidad sus gráficas que facilitan el análisis de estabilidad en esfuerzos totales. Y, por último, el método de Morgenstern que es un método muy preciso, aplicable para cualquier tipo de suelo y cualquier geometría.

Con respecto a los cortes de los taludes podemos decir que los Factores de Seguridad no cumplen con los números establecidos. A consecuencia de ello, los taludes podrían sufrir un deslizamiento que sucede cuando la resistencia al esfuerzo cortante a lo largo de cierta superficie de falla es sobrepasada por los esfuerzos cortantes, por lo tanto, se necesitó la utilización de un sistema de estabilización (anclajes).

PROGRAMA PLAXIS

MODELO	FACTORES DE SEGURIDAD	
	ESTÁTICO	SISMICO
CORTE 1	0.461	0.441
CORTE 2	0.983	0.705
CORTE 3	1.326	1.121

Tabla 16 FACTORES DE SEGURIDAD SIN ANCLAJES (PLAXIS 2D)

Con el programa PLAXIS 2D ULTIMATE que considera el procedimiento de Phi-c reduction que consiste en reducir progresivamente los parámetros de resistencia $\tan \phi$ y c del suelo hasta que se produce la rotura de la estructura. Sin embargo, podemos observar en la Tabla 16 que los tres cortes de los taludes no cumplen con los Factores de Seguridad establecidos de 1.3 Y 1.1 para el caso estático y sísmico.

Tanto PLAXIS como SLIDE son programas de softwares que ofrecen herramientas y capacidades específicas para aborda la estabilidad de taludes. Sin embargo, debido a los enfoques y características ligeramente diferentes los Factores de Seguridad pueden variar. El PLAXIS que es un programa de elementos finitos que considera las deformaciones en todas las etapas de análisis. Y SLIDE un software que utiliza métodos de equilibrio limite.

- Estabilidad con anclajes

Con base en los cortes, se decidió realizar el análisis de los primeros dos cortes (1 y 2), porque con la geometría descrita se encuentran en el límite del predio, por lo que no necesitan rellenos de suelo – cemento.

PROGRAMA SLIDE

MODELO	FACTORES DE SEGURIDAD CON ANCLAS	
	ESTÁTICO	SISMICO
CORTE 1	1.459	1.216
CORTE 2	1.548	1.174

Tabla 17 FACTORES DE SEGURIDAD CON ANCLAJES (SLIDE)

PROGRAMA PLAXIS

MODELO	FACTORES DE SEGURIDAD CON ANCLAS	
	ESTÁTICO	SISMICO
CORTE 1	1.374	1.101
CORTE 2	1.382	1.246

Tabla 18 FACTORES DE SEGURIDAD CON ANCLAJES (PLAXIS 2D)

De acuerdo con las propuestas para el análisis de taludes se tiene que el corte 2 con una pendiente de 0.4:1 (horiz-vert) es el talud que cumple con los Factores de Seguridad establecidos. Y a partir de la falla obtenida sin el sistema de estabilización, se realizó el cálculo del diseño de anclas. Y se observó que el Factor de Seguridad aumento a 1.382, que se considera adecuado dado el carácter temporal del talud. Para el corte 1 se descartó, ya que, aunque cumplió con el factor de seguridad admisible, se consideró que sería la opción más económica el corte 2, ya que solo requeriría 3 anclas en lugar de 4. Además, se debe tener en cuenta que, con el programa PLAXIS, se integró el procedimiento constructivo añadiendo concreto lanzado para evitar la erosión del talud.

Estabilidad con anclajes y drenes

Debido a la trayectoria de agua subterránea obtenida en la exploración geofísica y a la simulación de lluvia, se consideró la idea de instalar drenes al Corte 2 que ya se encuentra estable con el sistema de anclaje. Y los Factores de Seguridad se cumplieron.

MODELO	FACTORES DE SEGURIDAD CON DRENES	
	ESTÁTICO	SISMICO
CORTE 2	1.391	1.172

Tabla 19 FACTORES DE SEGURIDAD CON ANCLAJES Y DRENES (PLAXIS 2D)

Algunas recomendaciones con respecto al procedimiento constructivo son las siguientes:

Para la perforación se utilizarán barrenos de 10 cm de diámetro con un equipo neumático y lodo bentónico. Después, se procederá a introducir los torones de refuerzo. Y el espacio entre la perforación y el acero se llenará con una lechada de agua – cemento. Las anclas se colocarán con un espaciamiento de 3 x 3 en sentido horizontal y vertical. El diámetro del torón es de 102 mm (0.4 de pulgada).

Las anclas se complementarán con una cubierta de concreto lanzado que además de evitar el intemperismo del suelo, formará una membrana trabajando a compresión que confinará la masa del suelo. La cubierta tendrá un espesor de 10.0 cm y una resistencia de 250 kg/cm². Y se realizara el postensado con la resistencia de diseño. Para alcanzar la resistencia, se recomienda utilizar un acelerante de fraguado.

Con la finalidad de verificar el comportamiento de la excavación y la estabilidad de los taludes se deberá de implementar un programa de instrumentación. Pueden ser de ayuda los inclinómetros y piezómetros para auscultar la inestabilidad del talud.

30. BIBLIOGRAFÍA

- Ferrer, M., & Gonzalez de Vallejo, L. (2012). Geological Engineering. CRC Press.
- JUÁREZ B., E. (2001). Mecánica de suelos. Tomo I. México: Limusa.
- JUÁREZ B., E. (2011). Mecánica de suelos. Tomo II. México: Limusa.
- Manual de Diseño de Obras Civiles (2017). Comisión Federal de Electricidad. México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- BUDHU M. (2007). Soil mechanics and foundations. New York: J. Wiley.
- de Tijuana, D. 2014 V. F. N. de E. P. N. de O. 402004pp003128 M., & Norte, B. C. (s/f). Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Tijuana 2014. Gob.mx. Recuperado el 9 de enero de 2024, de <https://implan.tijuana.gob.mx/pdf/atlas/ATLAS%20TIJUANA%202014.pdf>
- Tesis digital. (s. f.-b). <http://132.248.9.195/ptd2015/agosto/0734257/Index.html>
- Los softwares utilizados de PLAXIS 2D ULTIMATE y SLIDE son de licencias estudiantiles otorgadas por la Facultad de Ingeniería, UNAM.