



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**MÉTODOS PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD DE TALUDES**

**T E S I N A**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**ESPECIALISTA EN GEOTECNIA**

PRESENTA:

**ING. KAREN CITLALI RODRÍGUEZ ROBLES**

DIRECTOR DE TESINA: **M. EN I. REGINALDO JOSÉ HERNÁNDEZ ROMERO**

CIUDAD DE MÉXICO

AGOSTO 2022

## **Agradecimientos**

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

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico que me otorgó durante mi estancia académica.

Al M. en I. Reginaldo José Hernández Romero por el apoyo y la orientación que me brindo estos semestres.

Al Ing. Bardoniano Soria Castañeda, al Ing. Héctor Alfredo Legorreta Cuevas, al M. en I. Carmelino Zea Constantino y a la Ing. Araceli Angelica Sánchez Enríquez, por sus observaciones, comentarios y consejos que realizaron al escrito.

Al Ing. José Arturo Cuevas Hernández por su ayuda y comentarios en este trabajo, por haber compartido con paciencia y dedicación su conocimiento.

## **Dedicatoria**

A mis padres por seguir presentes en mi camino, por sus consejos. A mi hermana, por ser mi cómplice y mi apoyo incondicional.

A mis abuelos por seguir siendo mi ejemplo de vida.

A mis tías, porque desde donde se encuentren, siempre están apoyándome en primera fila.

A Karlita, porque sigue conmigo en todo momento.

A mis amigas, Ceci Gaytán, Karen Castro, Verónica Rodríguez, Jacqueline Salvador y Dany Salazar, porque a pesar de todo siguen estando cerca, gracias por su amistad y compañía incondicional. A Mario Torres y a David Martínez, por haber hecho esta etapa más amena.

A mi amigo Arturo Cuevas, por ser mi mejor equipo dentro y fuera de la geotecnia. Gracias por tus consejos, por tu tiempo y sobre todo por tu paciencia a lo largo de este camino.

## Resumen

Los métodos para poder estabilizar los taludes se basan en dos aspectos, en la reducción de las fuerzas actuantes o en el incremento de las fuerzas resistentes. Algunos parámetros como la naturaleza de los materiales involucrados, las condiciones geológicas, las condiciones climáticas y la influencia antropológica definen aspectos importantes que ayudan en el análisis de la estabilidad del macizo rocoso.

Para mostrar la influencia que tienen los aspectos antes mencionados. Se realizó un análisis de estabilidad en un talud de 25 m de altura. Este está en una formación de roca caliza y presenta un sistema de discontinuidades que forma una cuña en la cara del talud en el corte (corte carretero) que se desea realizar.

El primer análisis solo se consideró la geometría del talud y las condiciones geológicas y estructurales del macizo rocoso, para esta configuración el factor de seguridad (F.S.) es de 0.86. Al tener un escenario típico de inestabilidad se procede a realizar modificaciones en la geometría del talud que favorecen el aumento del factor de seguridad y la colocación de elementos mecánicos de estabilización como anclas y/o mallas.

Por último, se realizó un proceso iterativo para determinar cuál propuesta es la adecuada, contemplando principalmente los factores técnicos, económicos y geológico-estructurales. Se consideran las condiciones de altura que tiene la cuña y el abatimiento del talud. Cada propuesta tuvo diferentes configuraciones en el área de la cuña, en la capacidad que tiene el ancla, en el número de anclas necesarias, así como en el patrón de anclaje. Para la propuesta 4, la cual tiene un abatimiento de 20° y se retira carga del talud, se necesitan 33 anclas con un patrón de anclaje de 3x3 para poder cubrir el área de la cuña generada. Esta propuesta es la más adecuada, ya que se necesita un menor número de anclas, con las cuales garantiza un F.S. de 1.5. Además, de acuerdo a la litología que se tiene en el talud se propone concreto lanzado para poder retardar los procesos de alteración y erosión de la roca.

# Índice

<b>1. Introducción</b> .....	6
1.1. Planteamiento del problema .....	6
1.2. Objetivo .....	6
<b>2. Antecedentes</b> .....	6
2.1. Estabilidad de taludes .....	6
2.2. Factores que influyen en la estabilidad .....	7
2.3. Métodos de análisis de estabilidad .....	8
2.4. Métodos de estabilización .....	8
<b>3. Metodología</b> .....	24
3.1. Caso de aplicación.....	25
3.2. Tratamiento de datos .....	25
<b>4. Resultados</b> .....	27
<b>5. Conclusiones</b> .....	30
<b>6. Referencias</b> .....	31

## **1. Introducción**

### **1.1. Planteamiento del problema**

En las obras civiles se encuentran problemas relacionados principalmente con la topografía y con condiciones geológicas desfavorables, por lo que es necesario la construcción de estructuras de retención, túneles, puentes y taludes. Por tal motivo es necesario hacer una buena caracterización del comportamiento del macizo rocoso, para poder dar solución mediante métodos de mejoramiento en la estabilidad de taludes. Es por eso que un buen ejercicio de la estabilidad de taludes, es garantizar que la obra sea estable, confiable y segura, condición que se logra mediante la adecuada caracterización del sitio y su análisis aplicando métodos que puede realizarse con diversos programas de cómputo.

### **1.2. Objetivo**

Calcular el soporte necesario en un talud de un corte carretero permanente excavado en roca caliza.

## **2. Antecedentes**

### **2.1. Estabilidad de taludes**

Un talud se puede definir como cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra. El talud constituye una estructura compleja de analizar debido a que en su estudio coinciden los problemas de mecánica de suelos y mecánica de rocas, sin olvidar el papel que la geología aplicada desempeña en la formulación de cualquier criterio aceptable.

Se define como ladera al talud que se forma de manera natural. Cuando el talud es de origen antropogénico, se denomina corte.

El resultado del deslizamiento de un talud a menudo es catastrófico, con la pérdida de bienes y muchas vidas. Por otro lado, el costo de rebajar un talud para alcanzar mayor estabilidad suele ser muy grande. Es por esta razón que la estabilidad se debe asegurar.

La estabilidad es la seguridad de una masa de tierra contra la falla o movimiento. Es necesario definir criterios de estabilidad de taludes, entendiéndose como el poder decir en un instante dado cuál será la inclinación apropiada en un corte o en un terraplén; casi siempre la más apropiada será la más escarpada que se sostenga el tiempo necesario sin caerse. Es este el centro del problema y la razón del estudio.

A diferentes inclinaciones del talud corresponden diferentes masas de material térreo por mover y por lo tanto diferentes costos. Los problemas relacionados con la estabilidad de taludes naturales difieren radicalmente de los que se presentan en los taludes contruidos por el ingeniero. Las diferencias importantes están, en la naturaleza de los materiales involucrados, en todo el conjunto de las circunstancias que dependen de cómo se formó el talud y de su historia geológica, de las condiciones climáticas que predominaron a lo largo de la historia y de la influencia del hombre que ejerce en la actualidad o haya ejercido en el pasado. Esta historia y génesis de formación de taludes, la historia de esfuerzos a los que estuvieron sometidos y la influencia de condiciones climáticas o, en general, ambientales, definen aspectos importantes de las características de los suelos y las rocas, o el flujo de las aguas subterráneas a través de las rocas que forman el talud, el cual influye de manera importante en las condiciones de estabilidad.

## **2.2. Factores que influyen en la estabilidad**

El incremento en los esfuerzos actuantes o la disminución de resistencia al esfuerzo cortante del suelo provoca la falla de un talud. Estos parámetros se toman en cuenta en el análisis de estabilidad de taludes y en el diseño de los métodos de estabilidad. Esta variación es causada por efectos naturales y actividades humanas. Los principales factores que afectan la estabilidad de un talud son:

- Aspectos geológicos
- Cargas externas
- Sismos
- Excavaciones y/o rellenos
- Erosión
- Lluvia

### **2.3. Métodos de análisis de estabilidad**

El análisis de estabilidad de taludes, tiene como objetivo verificar la seguridad de una masa de roca contra la falla o el deslizamiento. Los deslizamientos se producen en taludes compuestos de cualquier tipo de suelo, relleno y rocas. Las causas que producen los deslizamientos pueden ser planos de debilidad en el macizo rocoso, socavones en taludes, saturación del terreno por lluvias, construcciones de taludes en ángulos muy pronunciados, sismos o sobrecarga en la pared superior del talud.

Un análisis de estabilidad puede realizarse mediante un modelo analítico o numérico, el cual determina condiciones de equilibrio límite o el movimiento de una masa potencialmente inestable.

Los métodos para el análisis de la estabilidad de taludes se pueden agrupar en:

- Métodos de equilibrio límite
- Métodos de equilibrio fuerza
- Métodos numéricos

### **2.4. Métodos de estabilización**

Los métodos para la estabilización de taludes se basan en dos aspectos, en la reducción de las fuerzas actuantes o el incremento de las fuerzas resistentes.

Para la reducción de las fuerzas actuantes se realiza la remoción de roca inestable la cual consiste en remover la roca potencialmente inestable para realizar un mejoramiento del talud.

En muchos casos se requiere reducir las fuerzas desestabilizadoras en un talud lo que obligaría a realizar excavaciones de magnitud desproporcionada e incluso problemática por las necesidades de espacio que requieren. Para estos casos se puede recurrir a la construcción de elementos que contrarresten los empujes del terreno.

Los elementos de contención pueden ser:

- Pantallas de pilotes y micropilotes.

Los cuales se describen a continuación.

### Pantallas

Cuando los deslizamientos potenciales son demasiado profundos se necesitará la construcción de pantallas, mediante las que se introduce en el terreno una alineación continua, de elementos resistentes que mejoran su resistencia en la superficie de rotura y se prolongan una cierta longitud en el terreno estable, no deslizado, se ubican a pie de talud o aprovechando una superficie más o menos plana (berma), en función de la geometría del deslizamiento. Las pantallas pueden ser de elementos hincados o fabricados in situ. En el caso de los macizos rocosos los elementos hincados no resultan apropiados, mientras que se emplean mayormente las pantallas construidas con elementos de hormigón.

Las pantallas se pueden dividir en:

- Pantallas de pilotes: Son sondeos que se realizan a pie de talud con diámetros entre 0.5 y 2 m (González de Vallejo, 2020). En estas se introduce la armadura correspondiente y posteriormente el hormigón, convenientemente vibrado. Una vez conformada la línea de pilotes, se unen todos en cabeza mediante una viga de atado.
- Pantallas de micropilotes: Su principio es el mismo que las pantallas de pilotes, pero con elementos estructurales de menor diámetro (15 cm). Su longitud puede alcanzar los 20 m. Una vez hecha la perforación, se introduce un tubo metálico que se rellena de hormigón, Una vez fraguados los micropilotes se excava el terreno superior y se construye la viga atado

Para los refuerzos de taludes, se trata de sistemas que incrementan, de diferente forma, la resistencia del macizo rocoso. Los principales son:

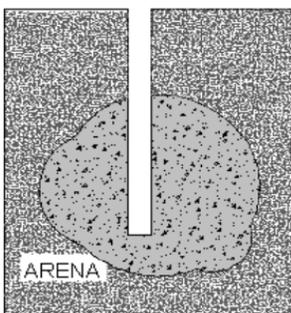
- Inyección
- Cosido con micropilotes
- Anclajes

### Inyección

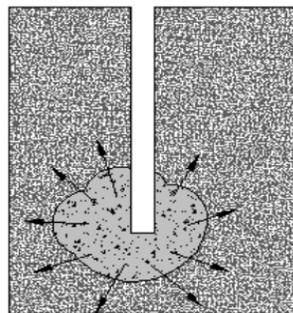
Es un procedimiento que permite reforzar los macizos rocosos, principalmente cuando existe una fracturación adecuada. Se realiza con taladros en los que se inyecta un producto, que depende del tipo de terreno, y al introducirse entre las fracturas y solidificarse le confiere una disminución de su permeabilidad y un aumento en su cohesión y fricción, dando mayor estabilidad a las construcciones que se realicen en él. Se utiliza con el objetivo de mejorar las características de resistencia, deformabilidad e impermeabilidad del terreno.

Durante el proceso de inyección, la permeabilidad del terreno, las características del fluido y el tipo particular de la inyección son aspectos técnicos que se deben cuidar (Fig. 1). En el caso de los macizos rocosos la inyección que se emplea es la de fracturación, en la que la lechada penetra por las fracturas ya existentes y desarrolla nuevas fracturas, rellenándolas.

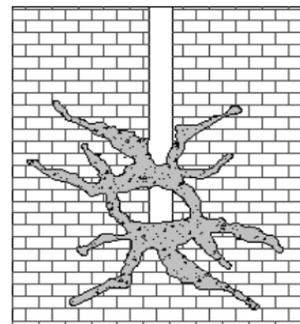
A- IMPREGNACIÓN



B- COMPACTACIÓN



C- FRACTURACIÓN



*Fig. 1 Diferentes tipos de inyección en el terreno.*

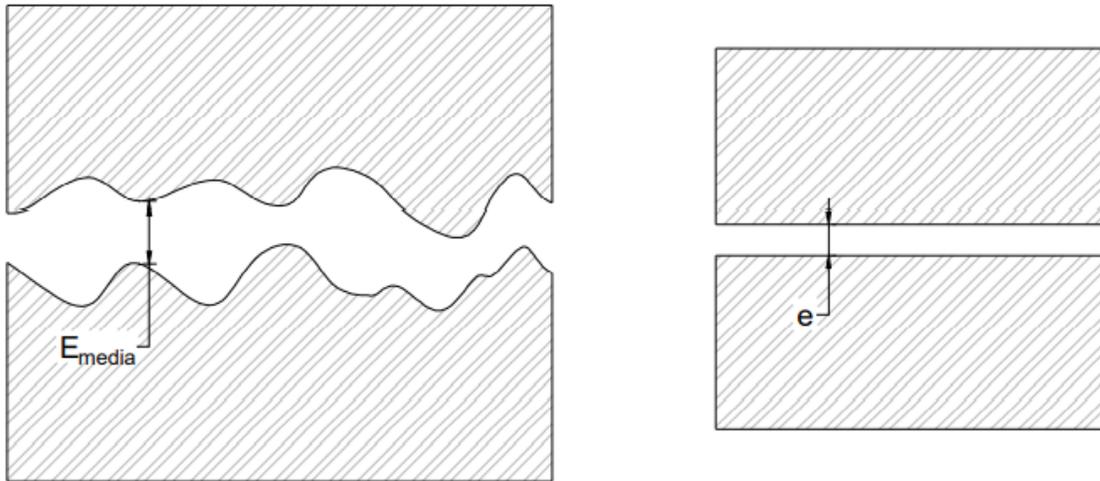


Fig. 2 Apertura eficaz o equivalente (Barton, 2004)

La penetración de la lechada depende de las características del terreno y de la presión de inyección, y será mayor cuanto más poros y fisuras existan en el macizo rocoso. Para ello resulta interesante la apertura de las discontinuidades (Fig. 2), debiendo diferenciarse entre apertura real ( $E_{media}$ ) y la apertura eficaz o equivalente ( $e$ ) la cual resulta menor debido al efecto de rugosidad.

La apertura eficaz de las juntas puede estimarse a partir de ensayos de permeabilidad tipo Lugeon. De acuerdo a Barton (2002) se tiene que:

$$e \approx \sqrt{6 * L * S * 10^{-8}}$$

Donde:

$e$  = Apertura eficaz o equivalente [mm]

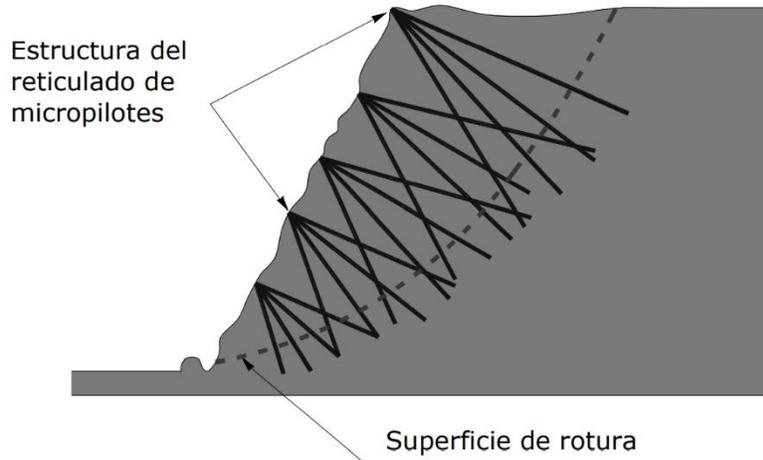
$L$  = Resultado del ensayo Lugeon

$S$  = Espaciamiento medio de las discontinuidades [mm]

### Cosido con micropilotes

Este tipo de refuerzo no es muy frecuente en macizos rocosos debido a su elevado costo. Estos consisten en fijar la zona inestable al macizo rocoso sano

mediante micropilotes. En la Fig. 3 se muestra el uso de este tipo de elementos para prevenir un deslizamiento rotacional.



*Fig. 3 Cosido de un deslizamiento con micropilotes (González de Vallejo, 2002)*

### Anclajes

Los anclajes son elementos capaces de oponerse al deslizamiento y proporcionar una tensión normal a la superficie de rotura potencial, aumentando su resistencia al desplazamiento por fricción o por dilatación. Los anclajes son de acero y, por su mayor flexibilidad, pueden alcanzar longitudes de hasta 30 m o más.

Se denomina perno o bulón a una pieza, de dos a seis metros de longitud, introducida dentro de un taladro perforado y pueden ser de los siguientes materiales:

Existen dos tipos de anclajes:

- Anclaje activo: Introduce un efecto compresivo en el interior del terreno inducido por pretensado durante su colocación, y se encuentra siempre en carga. Son los más utilizados para el refuerzo de taludes. Por lo general se utilizan anclajes activos pretensados con tensiones de trabajo del orden de hasta un 60% de su carga nominal.

- Anclaje pasivo: Entra en carga si el macizo rocoso experimenta deformaciones después de su colocación y no introduce ninguna tensión en el terreno. No tiene zonas libres.

Las anclas constan de tres partes fundamentales:

- Zona de anclaje: Es el tramo en el que el anclaje se fija a las paredes de la perforación (Fig. 4). Se denomina puntual cuando la zona se concentra exclusivamente en el fondo del barreno, mientras que si se distribuye total o parcialmente a lo largo de su longitud se tiene un anclaje repartido en cuyo caso no se puede tensar. El sistema de fijación, puede ser mecánico, por fricción o por inyección (de mortero o de resina).
- Zona libre: Es el tramo comprendido entre la zona de anclaje y la zona de cabeza. Este tramo sólo existe en los anclajes parcialmente repartidos y en los puntuales, en los que se aísla la barra o cable respecto al terreno envolviéndolo en una camisa de PVC o metálica, que permite que se deformen libremente al tensarse.
- Cabeza: Es la parte externa del anclaje, mediante la que se fija el extremo del bulón o el cable al talud. Generalmente tiene una placa de reparto (placa cuadrada de acero, con lado del orden del doble del diámetro de perforación), un sistema de fijación (una tuerca roscada para los bulones o un sistema cuña-contracuña para los cables). En el caso de los anclajes activos, se suele colocar también un bloque de apoyo, que normalmente es de hormigón.

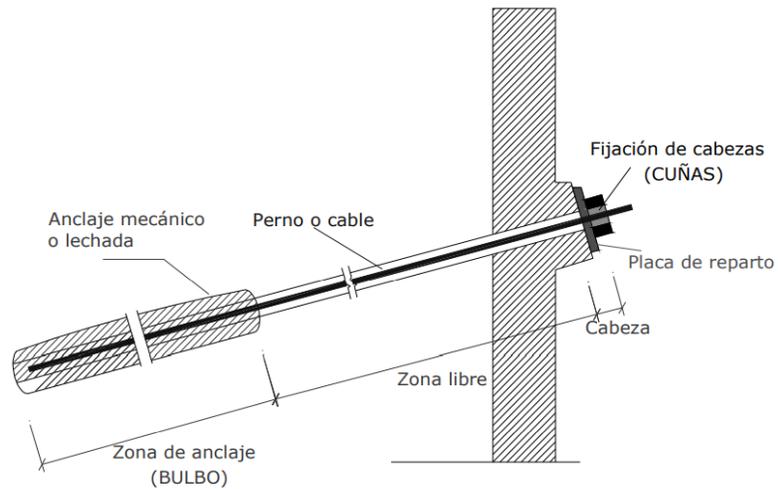


Fig. 4 Elementos de un anclaje (ministerio de Fomento, 2001)

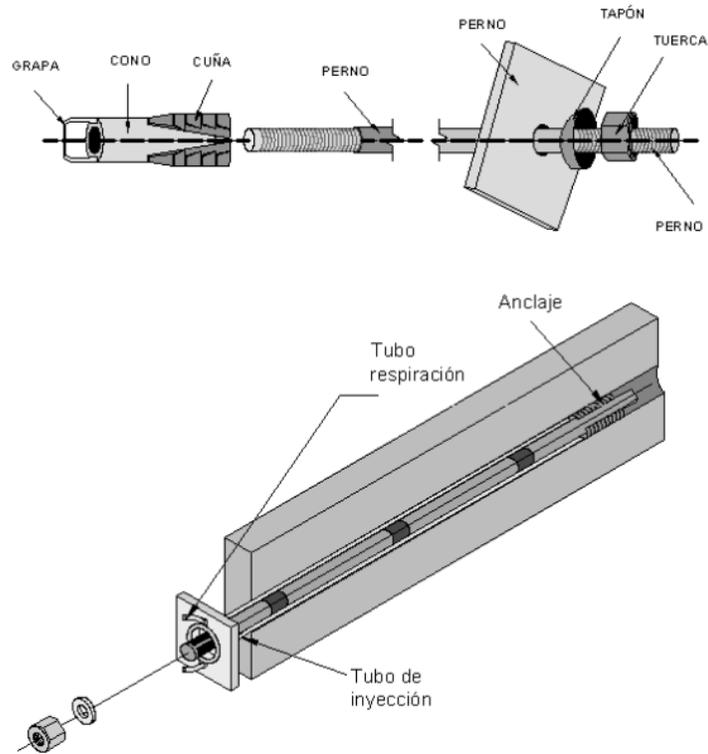


Fig. 5 Perno de anclaje puntual mecánico (Hoek & Brown, 1980).

Tabla 8. Tipos de anclajes (Brandy & Brown, 1994).			
Tipo de anclaje	Descripción	Ventajas	Desventajas
Anclaje puntual mecánico	<p>Su extremo interior se fija al terreno firme mediante un elemento que se expande mecánicamente. El extremo exterior se fija al frente del talud mediante una placa de apoyo o de reparto. Predominan los anclajes activos, aunque también se usan en anclajes pasivos. Exigen una roca competente en profundidad (zona de anclaje) y en la superficie (placa de apoyo) pero no en la parte central.</p> <p>La tensión se obtiene roscando contra la placa de apoyo. Posteriormente se puede realizar una inyección, mediante un tubo desde la boca del taladro, que protege al bulón de la corrosión</p>	<p>Puesta en tensión inmediata.</p> <p>Aplicación de una fuerza activa.</p> <p>Capacidad de deformación en fase elástica con una respuesta mecánica proporcional a la deformación.</p> <p>Son muy útiles cuando se permite deformaciones del terreno, lo que exige una longitud libre apreciable.</p>	<p>Frecuente aflojamiento de la placa en cabeza con pérdida de la tensión.</p> <p>Riesgo de corrosión.</p> <p>Fuerte concentración de tensiones.</p> <p>El agarre resulta problemático, por lo que hay que probar sistemáticamente el anclaje de cada bulón.</p>
Anclaje mediante inyección	<p>Se pueden conseguir tanto anclajes puntuales (creando un bulbo de anclaje) como repartido (totales o parciales)</p>	<p>Uso posible en rocas fracturadas.</p> <p>No se necesita una placa de anclaje en cabeza y el bulón sigue en servicio pese a roturas en superficie y/o voladuras.</p> <p>Menor alargamiento, que conserva los estratos unidos y contienen la dilatación.</p> <p>Ausencia de corrosión y pérdidas de resistencia</p>	<p>Menor alargamiento (que puede producir roturas si se abre una junta).</p> <p>Requieren algún tiempo de fraguado.</p> <p>Consolidación parcial.</p> <p>“Dedo de guante” (el bulón o cable queda englobado en el tubo de plástico del cartucho de resina), responsable de que la barra no se adhiera al terreno.</p>

		<p>con el tiempo.</p> <p>La inyección tiene resistencia al corte del mismo orden de la roca y rellena las fisuras abiertas próximas al bulón.</p> <p>Tiempo de fraguado de resina muy bajo.</p>	
--	--	---	--

### Anclajes repartidos

Se debe considerar que no es suficiente el contacto a lo largo de la totalidad de la longitud de la barra o cables para lograr un sostenimiento eficaz, porque lo que realmente da validez al sistema es el anclaje en la roca estable situada por detrás del plano de rotura. Este tipo de anclajes exige una roca medianamente competente en toda su longitud.

La problemática del sostenimiento de la roca puede ser muy variada, en una visión muy somera se puede clasificar la roca en varios tipos, según sus características frente al uso de anclajes se muestra en la siguiente tabla:

Tipo de macizo rocoso	Anclaje recomendado	Recomendaciones
Macizo rocoso estratificado y/o laminado en el que predomina una orientación de planos de discontinuidad (ej. Esquistos, pizarras).	Son adecuados los anclajes cementado a lo largo del ancla o por partes (anclaje repartido) y los anclajes puntuales.	En este tipo de roca la rotura es progresiva, capa por capa, con gran fragmentación. La función del anclaje es mantener unidad, y resistiendo conjuntamente, un gran número de capas. Puede convenir una cierta tensión para mantener, o aumentar, la resistencia al corte de las juntas.
Macizo rocoso sano, dividido en bloques de volumen similar y relativamente grandes.	Son apropiados prácticamente todos los tipos de anclajes, que deben estar anclados en la roca	La inestabilidad se produce en estas rocas por desajuste de los bloques más superficiales que

	sana.	van cayendo uno a uno. La función del anclaje es aplicar a los bloques fuerzas activas o pasivas suficientes para asegurar su estabilidad. El cálculo debe tener en cuenta la geometría de los bloques y las propiedades de las juntas.
Macizo rocoso fragmentado en pequeños bloques, con separaciones entre juntas de más de 30 cm y menos de 1m	El tipo de anclaje más eficaz es el de anclaje repartido.	El anclaje sólo no es suficiente para prevenir el desajuste de los bloques y debe complementarse con tratamientos superficiales como mallas metálicas, chapas, gunitado o combinaciones de ellos.
Macizo rocoso de baja resistencia y poco arcilloso	Sólo son adecuados los anclajes de tipo repartido	En anclaje es posible si la roca es homogénea. Debe cuidarse mucho la calidad de la unión a lo largo del anclaje ya que la adherencia unitaria no será grande. Las resistencias al arrancamiento serán menores en otros tipos de roca.
Macizo rocoso arcilloso y poco resistente como margas arcillosas, lutitas y carbón.	El anclaje deberá usarse con precaución. Nunca como medio principal de sostenimientos.	Suele ser el anclaje de tipo repartido cuando tiene más de un 25% de su longitud en este tipo de roca.
Macizo rocoso con juntas llenas de arcillas y/o con zonas tectonizadas.	Si no existe roca sana el anclaje no es adecuado.	En general el anclaje debe atravesar esas zonas para anclarse en roca sana interior.
Macizo rocoso constituido por rocas expansivas o con minerales arcillosos expansivos.	Los anclajes suelen ser inútiles.	Los anclajes de tipo repartido son inadecuados.

### Diseño de anclajes

Los anclajes deben diseñarse de forma que los elementos o estructuras anclados alcancen los factores de seguridad mínimos requeridos de la tabla

Para el diseño será necesario definir los siguientes parámetros del anclaje:

- Carga nominal
- Diámetro de perforación
- Longitud de anclaje
- Longitud libre
- Longitud de empotramiento

Diámetro de perforación ( $D_p$ ): Los anclajes de perforación mínimos para anclajes permanentes (inyección única) se muestran en la tabla 10. Portillo Rubio (2003) propone que el diámetro de perforación este entre 1.6 y 2.5 veces el diámetro del anclaje.

Tabla 10. Diámetros mínimos de perforación para anclajes		
Anclajes de cable		
Nº de Cables	Diámetro mínimo de la entubación [mm]	Diámetro mínimo de la perforación no entubada [mm]
2 a 4	133	105
5 a 7	152	125
7 a 12	178	140
Anclaje de barra		
$\Phi \leq 25$	114	85
$25 < \Phi \leq 40$	133	105

Longitud de anclaje ( $L_a$ ): Arrancamiento del bulbo: La longitud de anclaje debe ser la superficie como para impedir que por efecto de la carga nominal en el anclaje se produzca el arrancamiento del terreno que rodea al bulbo y el fallo del anclaje.

Se parte de que exista equilibrio entre la carga mayorada del anclaje y la resistencia minorada del contacto anclaje-terreno. Esta resistencia se supone distribuida homogéneamente sobre la superficie del anclaje. Así se tiene:

$$L_A = \frac{T * \gamma_l * \gamma_t}{\pi * D_p * \tau_{\text{última}}}$$

Donde  $\tau_{\text{última}}$  representa la resistencia del arrancamiento entre el anclaje y la roca, también se denomina adherencia admisible del bulbo. Para determinar esta resistencia existen reglas empíricas. La más utilizada es estimarla en un 10% de la resistencia a la compresión simple de la roca (Littlejohn,1977). La tabla 11 muestra una serie de valores orientativos:

Tabla 11. Valores orientativos de la resistencia al arrancamiento (Littlejohn y Bruce, 1976).	
Tipo de rocas	Resistencia medida al arrancamiento, $\tau_{\text{última}} [MPa]$
Rocas ígneas intrusivas	1.5 – 5.7
Rocas calcáreas	1.0 a 4.8
Areniscas	0.7 a 2.2
Rocas arcillosas	0.17 a 0.83

Para definir la longitud de anclaje debe tenerse en cuenta los factores de seguridad de la tabla 12. Las categorías C1, C2 y C3 representan anclajes temporales con niveles de riesgo crecientes y las C4, C5 y C6 anclajes permanentes.

Tabla 12. Factores de seguridad recomendados						
	Categoría del anclaje					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Factor de mayoración de cargas ( $\gamma_l$ )	1.4	1.5	1.8	1.6	1.8	2.0
Factor de minoración de resistencia del terreno ( $\gamma_t$ )	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5

Longitud libre ( $L_L$ ): No aplican las reglas para dimensionar la longitud libre. Pero por recomendación, no debe ser inferior a 5m y que al menos 1m se encuentre por detrás de la superficie de rotura, en la roca estable (Portillo Rubio, 2003).

Longitud de empotramiento ( $L_E$ ): La longitud de empotramiento se define como:

$$L_E = L_A + \frac{L_L}{2}$$

Esta longitud no debe ser inferior a una longitud mínima que se puede determinar, en función del tipo de roca y de sí se trata de un anclaje único o de una línea de anclajes, cómo se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Fórmulas empíricas para determinar la longitud de empotramiento mínima (Hanna,1982).		
Tipo de roca	Un anclaje	Línea de Anclaje
Roca homogénea	$\sqrt{\frac{F_S * T}{4.44 * \tau}}$	$\frac{F_S * T}{2.83 * S * \tau}$
Roca fisurada irregular	$\sqrt[3]{\frac{3 * F_S * T}{\gamma * \pi * \tan^2 \phi}}$	$\sqrt{\frac{F_S * T}{\gamma * S * \tan \phi}}$
Roca fisurada sumergida irregular	$\sqrt[3]{\frac{3 * F_S * T}{(\gamma - 1) * \pi * \tan^2 \phi}}$	$\sqrt{\frac{F_S * T}{(\gamma - 1) * S * \tan \phi}}$

Donde:

$F_S$  = Factor de seguridad comprendido entre 2 y 3

$T$  = Carga nominal del anclaje [ton]

$\tau$  = resistencia al corte de la roca [MPa]

$\phi$  = Fricción [°]

$\gamma$  = Peso específico [ $t/m^3$ ]

$S$  = Espaciamiento medio entre anclajes de una misma línea [m]

Sección del cable de acero ( $S_A$ ): La selección del cable o barra del anclaje se dimensiona, cuando éste activo, a partir de la resistencia a la tracción del acero (Portillo Rubio, 2003): y se calcula:

$$S_A = \frac{\gamma_y * T * \gamma_l}{0.9 * f_{\gamma_s}}$$

Donde:

$T$  = Carga del anclaje

$\gamma_l$  = Coeficiente de mayoración de la carga [1.4 a 2]

$f_{\gamma_s}$  = Límite elástico del acero

$\gamma_y$  = Coeficiente de minoración de la resistencia del acero  $\approx 1.15$

$S_A$  = Sección del cable de acero

Los límites elásticos de los aceros empleados en los anclajes varían entre 800 y 1100 MPa para bulones pasivos y entre 1800 y 2000 MPa para los cables

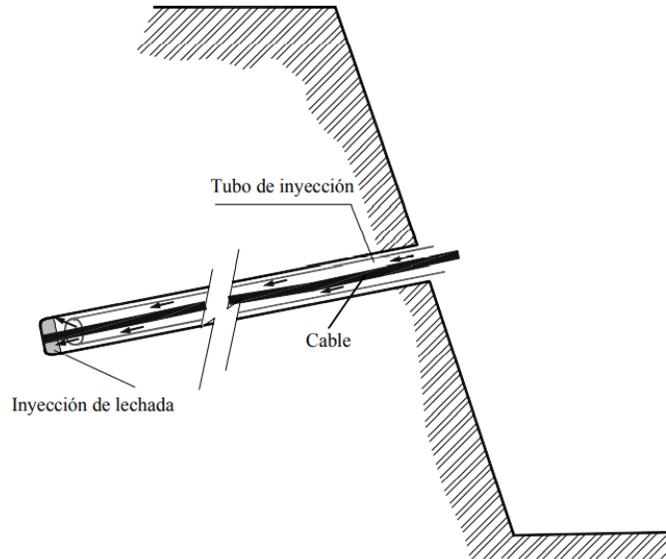
pretensados. Cuando el anclaje es pasivo debe comprobarse que no se produzca su rotura por cortante.

### Instalación de anclajes

La colocación de anclajes puede automatizarse casi completamente. La obra se desarrolla en las siguientes fases:

- Se perfora el barreno con el diámetro y la profundidad necesarios. Se debe comprobar el estado de fracturación del macizo rocoso en la zona de anclaje y si es necesario, realizar inyecciones de sellado. Esta comprobación puede realizarse observando los testigos de la perforación, mediante un sondeoscopio con una cámara de video especial para su uso en sondeos o mediante una cámara de ultrasonido.
- Se introduce el cable de acero en el barreno.
- La longitud introducida se monitoriza digitalmente, lo que permite cortar el cable cuando se alcanza la longitud deseada. El corte se realiza mediante un cortador hidráulico y simultáneamente se sujeta en su extremo inferior, para evitar deslizamientos
- Se bombea el mortero en el barreno mediante una tubería flexible, alrededor del cable (Fig. 6), siempre de abajo hacia arriba, en las zonas del anclaje previstas.
- Si es necesario se construye un bloque de apoyo para la placa de reparto.
- Después de 24 horas tras la inyección de la lechada, se procede al tensado del cable con un gato hidráulico hasta la carga de servicio. Este proceso de carga se realiza en cuatro tramos. Es frecuente superar la carga de servicio de un 20 % para después descargar el cable, lo que permite

aprobar la resistencia del anclaje. El tiempo de fraguado se reduce considerablemente si se utilizan resinas en lugar de morteros.



*Fig. 6 Inyección de la lechada*

### Vigas de atado de anclajes

En los taludes es muy frecuente construir una viga de atado, e hormigón armado, para solidarizar unos anclajes a otros y repartir mejor la fuerza de los anclajes sobre la roca. Las vigas permiten un reparto más solidario de esfuerzos, evitando que algunos anclajes se sobrecarguen mientras otros trabajan a bajo rendimiento. Además, se mejora la seguridad del refuerzo, ya que, si aun así algún anclaje trabajase por encima de su tensión límite y se produce su rotura, el bloque anclado no siempre se desprenderá. Si el anclaje esta arriostado a otros, cuando falla, los anclajes solidarios reparten la carga extra entre sí y puede que no se produzca el desprendimiento del bloque.

Cuando los bloques son de grandes dimensiones, sujetos por varios anclajes, la viga de atado minimiza el riesgo de que se produzca un efecto de fallo en cadena.

Cuando se rompe un anclaje, los adyacentes absorben prácticamente la totalidad de la carga extra correspondiente al anclaje fallido.

La progresión de este efecto origina el fallo sucesivo en los anclajes y la estabilización del talud. La viga de atado permite un reparto de carga entre todos los anclajes arriostrados (no solo los adyacentes), por lo que la sobre carga sobre cada anclaje debida a su anclaje fallido es mucho menor.

### Anclaje de elementos de contención

Un uso muy extendido de los elementos de anclaje es la fijación de los elementos de contención (muros o pantallas) al macizo rocoso. De esta forma se contrarrestan en parte los empujes activos del terreno sobre la estructura y por tanto se mejora su estabilidad a deslizamiento y vuelco. Es fundamental que el anclaje se realice en roca suficientemente resistente. Este tipo de aprovechamiento de los anclajes se muestra en la Fig. 7.

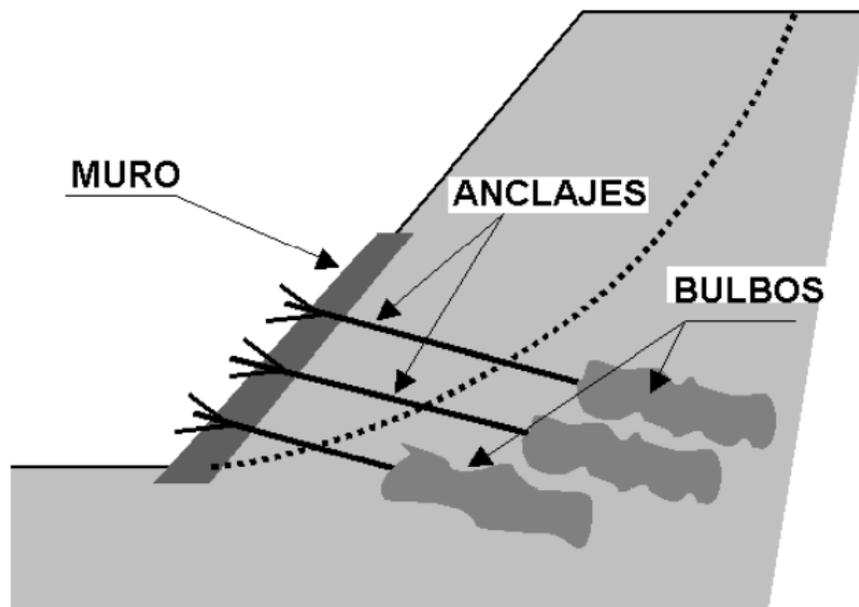


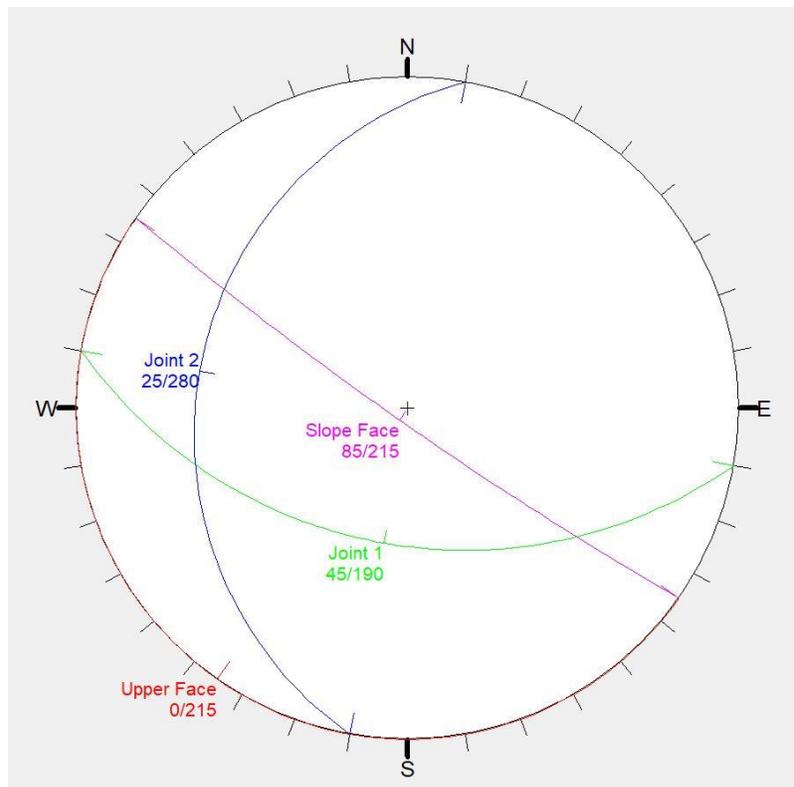
Fig. 7 Anclaje de muro

### 3. Metodología

#### SWedge

Es una herramienta de análisis rápida y fácil de usar para evaluar la geometría y la estabilidad de las cuñas superficiales en taludes. El programa ofrece una amplia gama de opciones de análisis que incluyen: análisis determinista, probabilístico, de combinaciones, de sensibilidad y de persistencia.

Las cuñas son el resultado de la intersección de dos planos de discontinuidades, formando bloques tetraédricos. Este tipo de rotura se produce generalmente en macizos rocosos resistentes con una clara definición en sus discontinuidades. En la Fig. 8 se puede observar la proyección estereográfica del talud, el deslizamiento de la cuña ocurrirá en la línea de intersección de los planos de discontinuidades.



Para el presente trabajo, se utilizó el análisis determinista. Porque los parámetros que se conocen son la resistencia del macizo rocoso, las características geológico-estructurales y la clasificación geomecánica del macizo.

### 3.1. Caso de aplicación

Calcular el soporte necesario en un talud de 25 m de altura excavado en roca caliza, es una roca sedimentaria, tiene una composición de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), generalmente calcita, lo cual la hace susceptible a meteorización. El talud tiene un sistema de discontinuidades con dos familias de fallas que generan una cuña. Se consideran los siguientes datos:

	Dip	Dip direction	c	$\Phi^\circ$
Talud	85	215		
Berma	0	215		
Sistema 1	45	190	0	15
Sistema 2	25	280	0	20

### 3.2. Tratamiento de datos

De acuerdo a los datos establecidos en el programa Swedge de la paquetería de Rocscience, se calculó un F.S. de 0.86 (Fig. 9) este cálculo es sin soporte y menor a 1, por lo tanto, la cuña es inestable porque se desliza hacia la cara del talud.

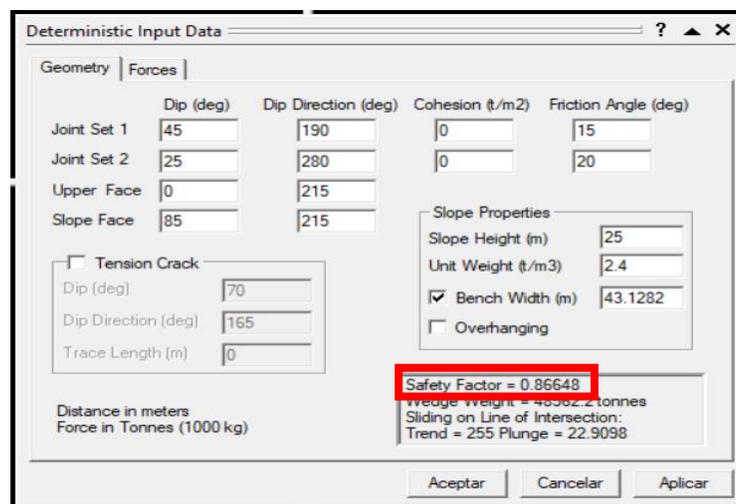


Fig. 9 Cuadro de datos del programa Swedge en donde se muestra el F.S. en el cuadro rojo. Elaboración propia.

Para definir el patrón, dirección, inclinación y longitud de anclaje óptimos para garantizar un F.S. = 1.5. Se considera el uso de anclaje pasivo de acero con  $f_y = 4200 \frac{Kg}{cm^2}$  de  $1 \frac{1}{2}$  de diámetro.

El cálculo de la adherencia roca-mortero se realizó con la siguiente fórmula:

$$L_A \geq \frac{T}{u\tau_{bm}} = \frac{A_s f_{yd}}{\pi \phi \tau_{bm}}$$

Donde:

$$T = \text{Fuerza de anclaje [Ton]}$$

$$T = A_s * F_y$$

Donde:

$$F_y = \text{del acero} \rightarrow 4200 \left[ \frac{Kg}{cm^2} \right]$$

$$A_s = \text{Área de la sección circular de la varilla [cm}^2]$$

$$f_{yd} = \text{Factor de mayoración}$$

$$\phi = \text{Diámetro de la varilla [cm]}$$

$$\tau_{bm} = \text{Resistencia} \left[ \frac{Kg}{cm^2} \right]$$

Para un anclaje de  $1 \frac{1}{2}$ " (3.81 cm) se tiene que la longitud de adherencia es:

$$L_A = \frac{(11.4 * 4200) * (1.5)}{(\pi) * (3.81) * (20)}$$

$$L_A = 300 \text{ cm} = 3.0 \text{ m}$$

Para definir el patrón de anclaje, se calculó primero el número de anclas, esto fue con la siguiente formula:

$$\text{No. anclas} = \frac{\text{Fuerza de anclaje pasivo para estabilizar la cuña [Ton]}}{\text{Capacidad de trabajo que tiene el ancla [Ton]}}$$

El patrón de anclaje se calcula con:

$$\text{Patrón de anclaje} = \frac{\text{No. de anclas necesarias}}{\text{Superficie expuesta de la cuña}}$$

#### 4. Resultados

Como se puede observar la Fig. 9 el F. S. es menor a 1, por lo que se sugieren cuatro propuestas para el análisis de la estabilidad del talud. Se tiene como inclinación inicial un ángulo de 85° y se recomienda abatir el talud 20° para cambiar las dimensiones de la cuña.

A continuación, en la tabla 15 se muestran los parámetros estructurales y diferentes características de las propuestas de trabajo. Se consideran las condiciones de altura del talud, propuesta 1 y 3 con carga. Mientras que en la propuesta 2 y 4 se presenta una menor altura, sin carga. Las propuestas 1 y 2, presentan una inclinación de 85° con respecto a la horizontal. En las propuestas 3 y 4 se genera el abatimiento de 20°.

Tabla 15. Parámetros para las diferentes propuestas.				
Parámetros	Propuestas			
	1	2	3	4
Dip [°]	85	85	65	65
Altura Talud [m]	25	21	25	21
Área Cuña [m <sup>2</sup> ]	654.5	434	501.5	343
Capacidad [Ton]	3536	1975	2154	1203
No. De anclas	98	55	60	33
Patrón de anclaje	3x3	3x3	3x3	3x3

En la Fig. 10 se ilustran la geometría de la propuesta 1, que son las características iniciales del talud. Mientras que en la Fig. 11 se muestran las dimensiones de la propuesta 4, en donde se tiene un abatimiento de 20° y una reducción de la altura del talud de 4 metros.

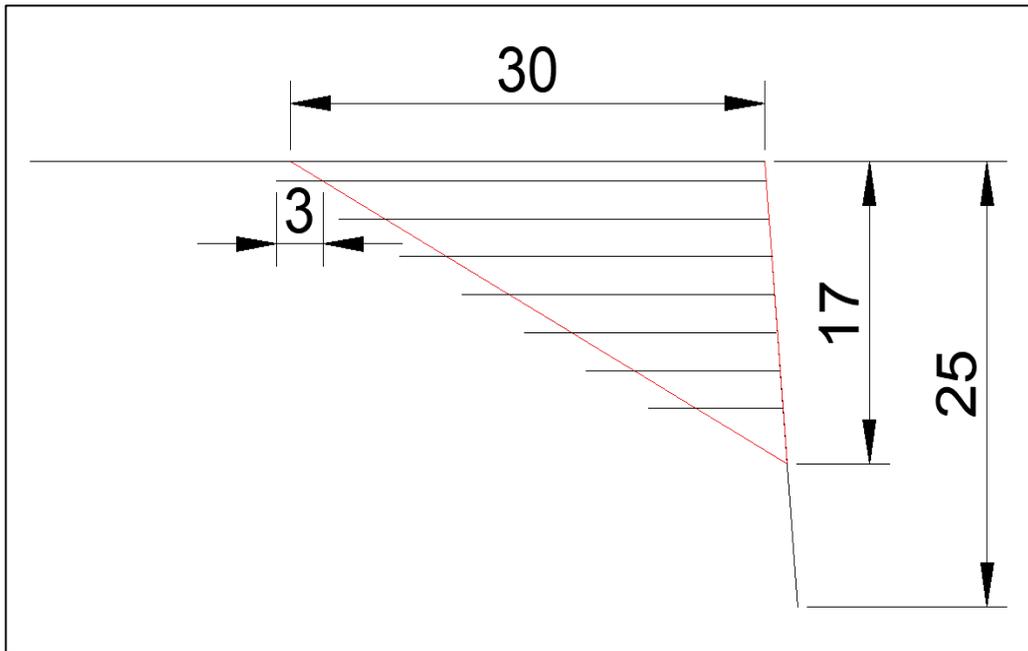
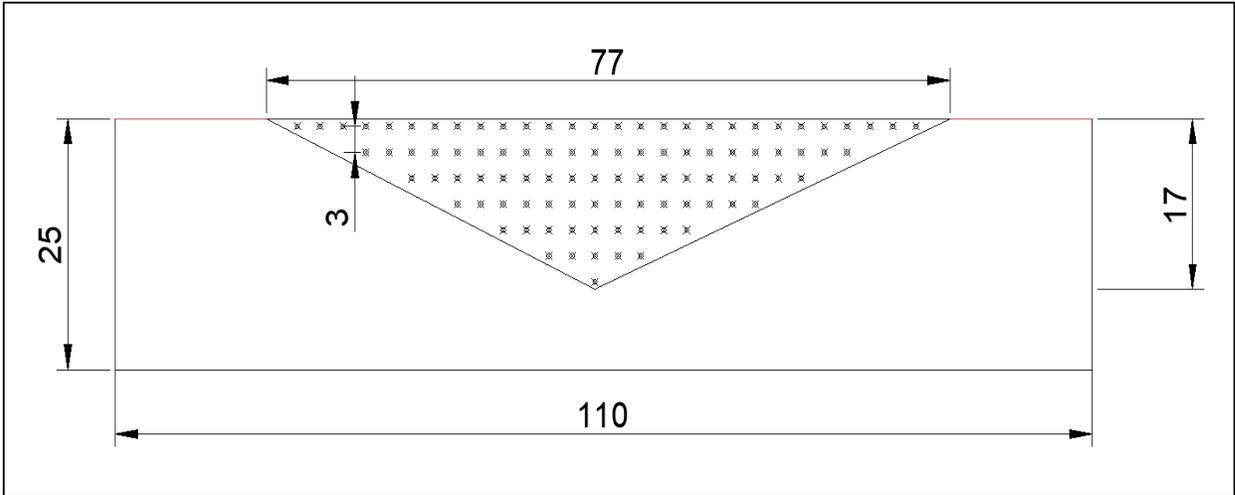


Fig. 10 Dimensiones del talud en metros. Propuesta 1, cara frontal (superior) y lateral (inferior).

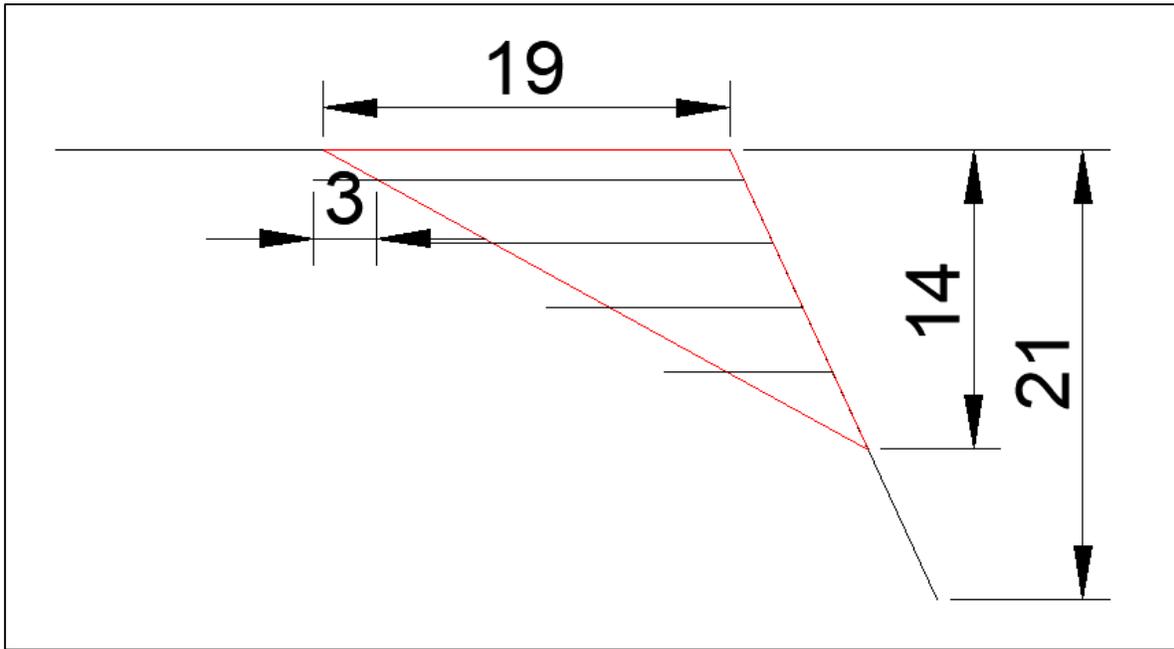
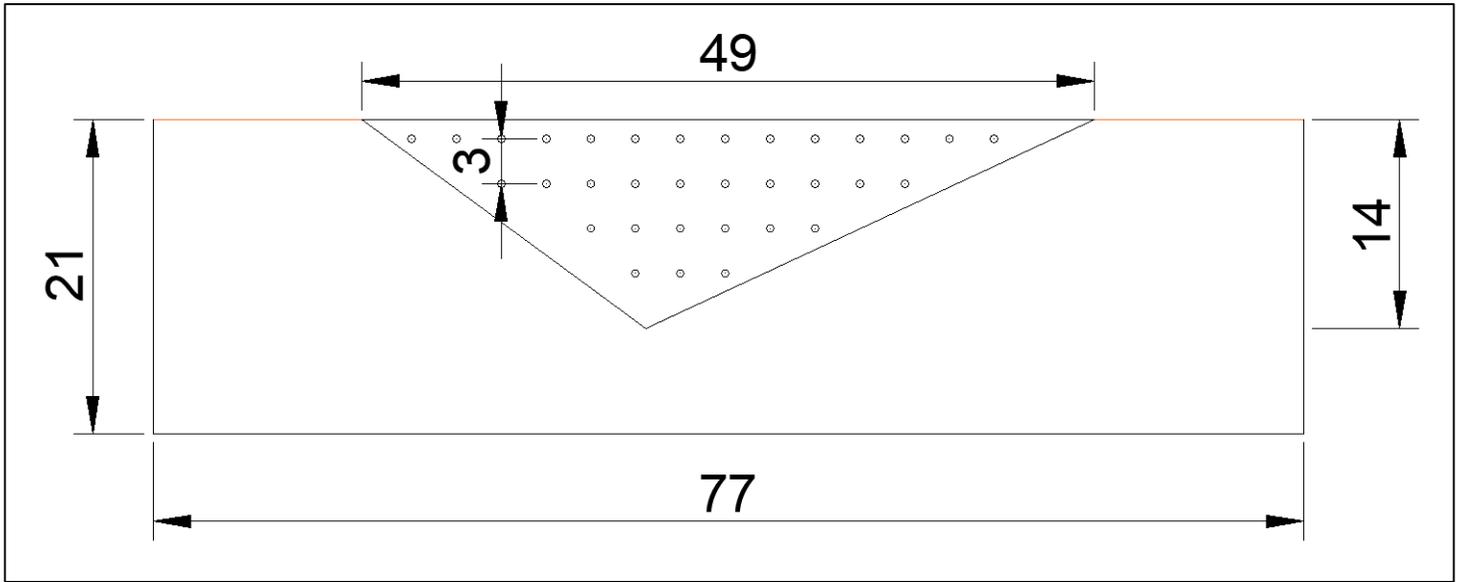


Fig. 11 Dimensiones del talud en metros. Propuesta 4, cara frontal (superior) y lateral (inferior).

## 5. Conclusiones

De acuerdo a las propuestas para el análisis de la estabilidad del talud se tiene que la propuesta 4, se presenta en la tabla 15 con color verde, es la opción más adecuada. La altura de la cuña disminuyó a 14 m, el talud tiene un abatimiento de 20°. El soporte necesario para asegurar un F.S. de 1.5, es implementar un sistema de anclaje, el cual consta de 33 anclas, están colocadas en el área que abarca la cuña (Fig. 11), entre ellas tienen una separación horizontal y vertical de 3 m.

Debido a que la litología de este caso es una caliza, un tipo de roca que por su composición ( $\text{CaCO}_2$ ) se altera fácil y rápido, se propone proteger el talud mediante concreto lanzado para retardar el proceso de alteración y erosión.

El programa Swedge es una herramienta clave para mostrar un análisis determinístico. Es el primer acercamiento para realizar un análisis de la estabilidad de taludes, ya que proporciona un entorno gráfico integrado para una entrada de rápida y una fácil visualización de modelos de 3D.

La típica aplicación de los cables y anclas, es prevenir el deslizamiento de bloques o cuñas, en discontinuidades que salen de la cara del talud. Es importante notar que la función de estos elementos de soporte es modificar las fuerzas normales y tangenciales que actúan en los planos de deslizamiento. (Tabla 9). Las anclas como los cables pueden ser totalmente cementados y no tensionados o un anclaje puntual y tensionados. Los cables garantizan preservar las fuerzas intergranulares del macizo rocoso

Se propone un anclaje pasivo por su bajo costo y su rápida instalación comparado con el anclaje activo. Y las condiciones lo permiten (no se ha registrado un movimiento previo de la cuña).

## Referencias Bibliográficas

Abramson, L. W. (2002). Slope stability and stabilization methods. Mex York: J. Wiley. De Matteis A. (2003). Tema: Estabilidad de taludes. En Geología y geotecnia (1-40). Universidad Nacional de Rosario: Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura.

Barton, N. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel desing. In. J. Rock Mech. & Min. Sci. Vol. 39, pp. 185-216.

Budhu, M. (2000), Soil mechanics and foundations. Capítulo 11. Slope stability. Pág 522-553.

Cunha, R. P. (2018). Tipos de estructuras de retención para proyectos de taludes: Alternativas, ventajas, anclajes, cálculo y diseños tipo en taludes rocosos. Universidad de Brasília (Pós-Graduacao em Geotecnia), 2do curso internacional de estabilidad de taludes y laderas naturales, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. Ciudad de México.

Daméghi, A. (2015), Anclas de tensión. Apuntes de Mecánica de suelos. Universidad Nacional Autónoma de México. Pág. 1-19.

Díaz-Rodríguez, J. A. (2018). Estabilidad de taludes. Apuntes de la clase de Mecánica de suelos teórica. Programa de maestría y doctorado en ingeniería civil-geotecnia. Universidad Nacional Autónoma de México.

Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). Soil strength and slope stability. John Wiley & Sons.

ETAL, G. D. V. L. I. Ingeniería Geológica/Luis i. González de Vallejo...(letal) (no. ta705. i56 2006.).

Medel, A., (2020). Estabilidad de taludes con sistema de anclaje (Tesis maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Portillo Rubio, E. (2003). Ingeniería del Terreno. IngeoTer, vol. 2, Capítulo 4; Estabilización de taludes mediante anclajes. Ed. Carlos López Jimeno. Madrid.

Ramírez Oyanguren, P., & Alejano Monge, L. R. (2004). Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes.

Wyllie, D. C., & Mah, C. (2004). Rock slope engineering. CRC Press.