

### 3. ANÁLISIS CINEMÁTICO

#### 3.1 Introducción

En el análisis de macizos rocosos, los cuales presentan sistemas de fracturamiento, se puede decir que están formados por “bloques” de roca delimitados por un sistema tridimensional de planos de discontinuidad. Se entiende por *discontinuidad* a todas aquellas estructuras (fallas, fracturas, diaclasas, estratificación, foliación, etc.), que forman dichos planos, los que comúnmente se conoce como *fábrica estructural* del macizo rocoso. Normalmente este tipo de discontinuidades son producto del tectonismo a la que fue sujeta la roca en un estado inicial de esfuerzos. Dependiendo de la orientación de éstos se tiene un patrón de fracturamiento que delimitará los bloques en cuestión.

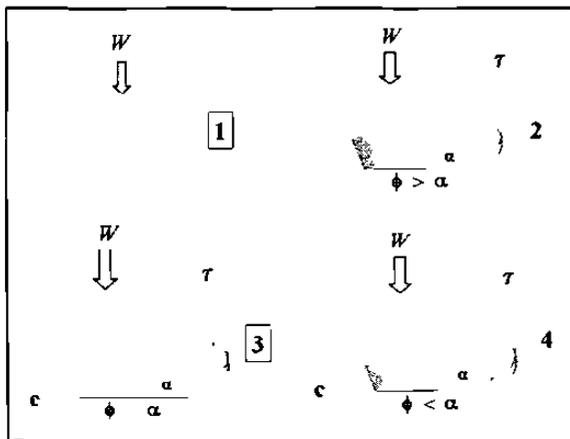
Analizar la estabilidad de un talud realizado en macizos rocosos fracturados, es parte de dos procesos. El primero es analizar la fábrica estructural del corte realizado para determinar si la orientación de las discontinuidades podría resultar en inestabilidad del talud bajo consideración, a lo cual conocemos como *orientación desfavorable* de éste con respecto a las discontinuidades. Esta determinación es realizada por medio del análisis estereográfico de la fábrica estructural que se denomina **Análisis Cinemático** (Piteau y Peckover, 1978). Ya que ha sido determinada la cinemática en la cual se tiene posibilidad de falla del talud, el segundo paso requiere un análisis de estabilidad por el método de *Equilibrio Límite* para comparar las fuerzas resistentes a la falla contra las fuerzas causantes de la falla del talud. El rango entre estos dos sistemas de fuerzas se denomina como **Factor de Seguridad FS**. En este capítulo solo se tratará el aspecto relacionado con la cinemática, y en otro capítulo posterior el análisis de equilibrio límite.

Para poder realizar el análisis tridimensional de las familias de discontinuidades, se necesita hacer este tipo de proyección en un plano bidimensional. Para tal efecto existen dos tipos de proyecciones esféricas: una es la red estereográfica de *Lambert* o *Schmidt*, y la otra es la proyección de *Wulff*. Diversos autores dentro de la Ingeniería Geológica (Goodman, 1976; Hoek y Brown, 1980; John, 1962; Piteau y Peckover, 1978) han aplicado ambas técnicas las cuales son del todo idénticas y no hay ninguna dificultad para utilizar un sistema u otro. La única limitación que existe es que al iniciar el análisis con un sistema u otro, éste deberá continuarse empleando hasta el término del proyecto (Hoek y Brown, 1980). Como convención en este trabajo de tesis se empleará la proyección estereográfica de *Lambert* o *Schmidt*.

Existen varias metodologías para analizar cinemáticamente al talud, entre ellas podemos citar la de los autores John (1968) y Panet (1969). En este trabajo se utilizará el método propuesto por Markland (1972) debido a la simplicidad de su manejo e interpretación.

### 3.1.1 Círculo de Fricción.

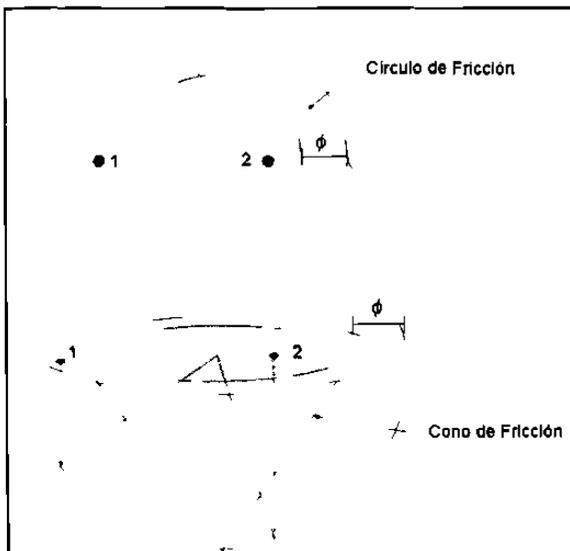
Dado que el deslizamiento de bloques se realizará dentro de los planos de discontinuidad, existen fuerzas de fricción que se oponen al movimiento. Estas fuerzas son consecuencia de la adhesión de una superficie a la otra y por la trabazón de las irregularidades en las superficies en roca. Siempre que una superficie se desliza sobre otra, la fuerza de rozamiento ejercida por cada bloque sobre el otro es paralela o tangente a las dos superficies. Es importante notar que estas fuerzas no sólo existen cuando ocurre un movimiento relativo, sino que también están presentes cuando un bloque tiende a deslizarse sobre otro, (Tippens, 1988). Si se colocan dos bloques de roca dentro de un plano horizontal se tiene una resistencia al roce de valor 0, al inclinarse dichos bloques al momento se ejercerá una resistencia al deslizamiento debido a la *fricción* entre las superficies en roce contra la tendencia al mismo producidas por el peso del bloque, conforme aumenta la inclinación del plano llegará un momento en que las fuerzas que inducen al deslizamiento serán mayores que las que se oponen y se producirá el movimiento del bloque, al ángulo máximo antes de que se induzca dicho efecto se le conoce como *ángulo de fricción* ( $\phi$ ) (Fig. 3.1).



**Fig. 3.1** Representación gráfica del ángulo de fricción. 1) Se tiene un bloque sobre otro, 2) éstos se inclinan a cierto ángulo  $\alpha$  siendo menor al ángulo de fricción  $\phi$  lo cual no induce al deslizamiento, 3) conforme se va aumentando la inclinación actúa la cohesión  $c$  oponiéndose a la fuerza de movimiento producido por el peso  $W$  del bloque superior, 4) cuando  $\alpha$  es mayor que  $\phi$  se produce el deslizamiento del bloque superior. La fuerza de deslizamiento es representada por  $\tau$ .

El concepto de cono de fricción dado por Talobre (1957), es usado para representar o determinar el ángulo entre una línea dada la dirección de una fuerza y una línea normal al plano. Combinada con el ángulo de fricción a través del plano, esta aproximación puede ser usada para evaluar gráficamente la posibilidad de deslizamiento a lo largo del plano bajo una carga activa en cualquier dirección. En el análisis estereográfico de Markland (1972) este cono se representa

mediante un círculo que se proyecta en la red estereográfica midiendo su ángulo a partir del extremo de la estereofalsilla hacia el centro del talud, dándose la definición de que aquellos planos ó líneas que se encuentran dentro del área comprendida entre dicho círculo y el extremo se encontrarán estructuralmente estables. (Fig. 3.2). La diferencia entre emplear el cono de fricción de Talobre y el círculo de fricción radica en que en el primero la representación del ángulo de fricción es mediante la normal del plano en la cual se tendrá estabilidad del bloque y esto se proyecta por medio de polos hacia el derredor del polo del círculo máximo del talud creando una elipse o envolvente, en el segundo se ubican planos y líneas que queden comprendidos dentro del área antes mencionada.



**Fig. 3.2** Representación estereográfica del cono de fricción. El ángulo de fricción  $\phi$  delimitado por la proyección del cono en el hemisferio. El punto 1 se encuentra dentro del círculo de fricción lo cual indica que se encontrará cinemáticamente estable guardando una inclinación menor a  $\phi$ ; el punto 2 siendo más inclinado, su proyección en el hemisferio se encuentra fuera del círculo lo cual crearía condiciones de inestabilidad. Estas líneas se podrían atribuir a intersecciones de planos por ejemplo.

## 2.2 Tipos de Mecanismos de Falla en Taludes y su Análisis Cinemático

Definimos como Mecanismo de Falla a los movimientos que se originan ó pudiesen originarse como falla del talud dentro del macizo rocoso. En este apartado se muestran los que se producen con más frecuencia ya que pueden sólo ser de un solo tipo ó la combinación de éstos:

### 2.2.1 Desprendimientos

Se define como *desprendimiento*, a una masa separada del talud mediante una superficie de corte normalmente pequeña y cuyo recorrido se realiza en gran parte, a través del aire (Ayala, 1984), (Fig. 3.3). Frecuentemente estas inestabilidades afectan a bloques aislados aunque también a masas rocosas originando en este caso movimientos de terreno en grandes dimensiones. Estos fenómenos suelen producirse en zonas constituidas por alternancias de rocas entre una resistente al intemperismo y otra débil.

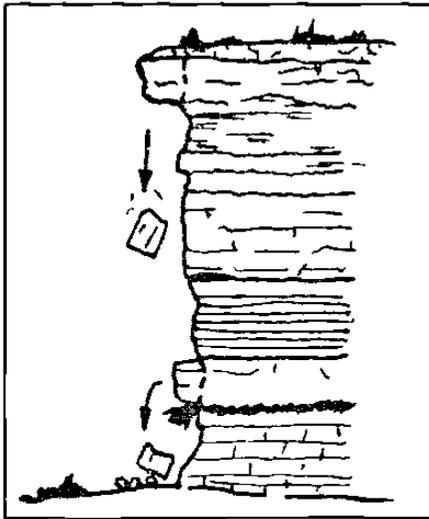


Fig. 3.3 Desprendimientos de roca debido a la alternancia de roca competente con roca débil. (Ayala, 1984).

Los mecanismos que pueden conducir a estas inestabilidades generalmente sucesivos y complementarios son la meteorización de las capas blandas, concentración de presiones en el borde de la capa resistente y su rotura por flexotracción. (Fig. 3.4). Las posibilidades de que se produzcan estas inestabilidades por *descalce* son condicionadas por una serie de factores como fracturación, orientación y echado de la estratificación, rumbo e inclinación del talud, espesor relativo de los estratos más rígidos y su resistencia, etc.

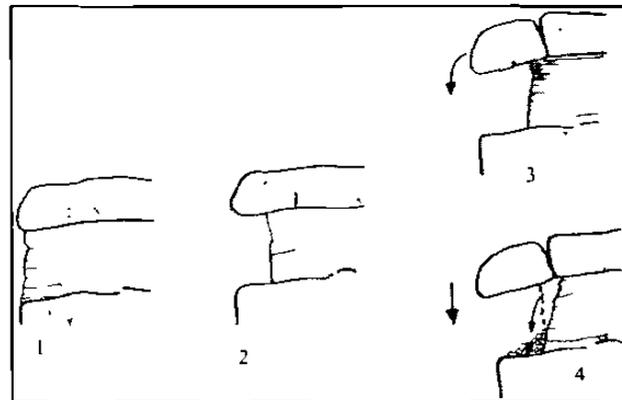


Fig. 3.4 Fases del mecanismo de desprendimiento: 1) Serie alternante, 2) Diferente grado de meteorización y erosión, 3) Basculamiento del estrato superior, 4) Rotura en el pie del bloque. (Ayala, 1984).

Existe una gran variedad de formas resultantes de los mecanismos que originan la inestabilidad. El mecanismo consiste en que la capa débil de la alternancia comienza a descalzar a la capa competente suprayacente por acción del intemperismo. Cuando progresa el descalce se produce una concentración de presiones en el borde de la roca débil subyacente. Si la roca que constituye la capa suprayacente es poco resistente, puede aparecer una rotura de la misma por

flexotracción con basculamiento de bloque. Si la capa es competente y está individualizada en bloques por fracturamiento tectónico también se produce un desprendimiento debido a la excentricidad del peso. Los fragmentos originados por los desprendimientos presentan recorridos varios, pudiendo caer libremente, saltar o rodar, dependiendo de la geometría del talud. (Fig. 3.5).

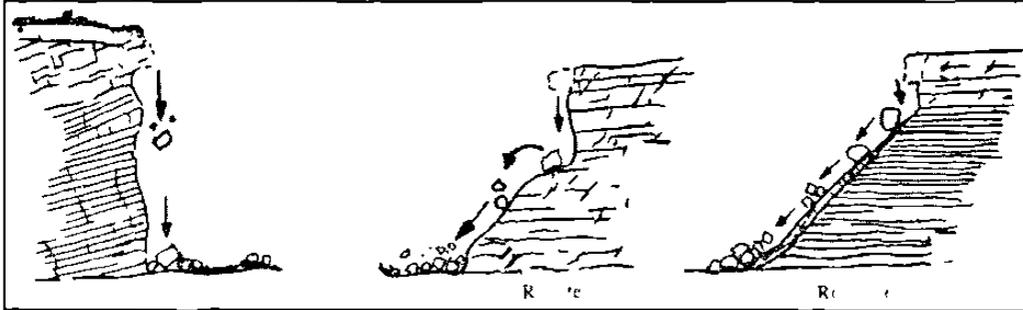


Fig. 3.5 Diferentes trayectorias que pueden alcanzar los bloques de roca desprendidos en su desplazamiento por el talud. (Ayala, 1984).

Según el mecanismo que produzca los desprendimientos, la velocidad con que se desarrolla varía. Una vez originada la grieta de tracción, suele desarrollarse de forma rápida afectando a los materiales que han quedado formando cornisas o voladizos.

### 2.2.2 Deslizamiento Planar

Ocurre cuando una discontinuidad geológica, como la estratificación, buza en forma paralela hacia la cara del talud y su echado es mucho mayor que el ángulo de fricción (Fig. 3.6). Este mecanismo es analizado como un problema en dos dimensiones. Discontinuidades adicionales pueden delimitar la extensión lateral del bloque deslizado, las cuales no contribuyen a la inestabilidad del macizo. El tamaño del deslizamiento puede ser desde algunos metros cúbicos hasta deslizamientos en gran escala que involucran laderas de montañas.

Las condiciones estructurales para que ocurra una falla del talud se resumen a continuación (Turner y Schuster, 1996):

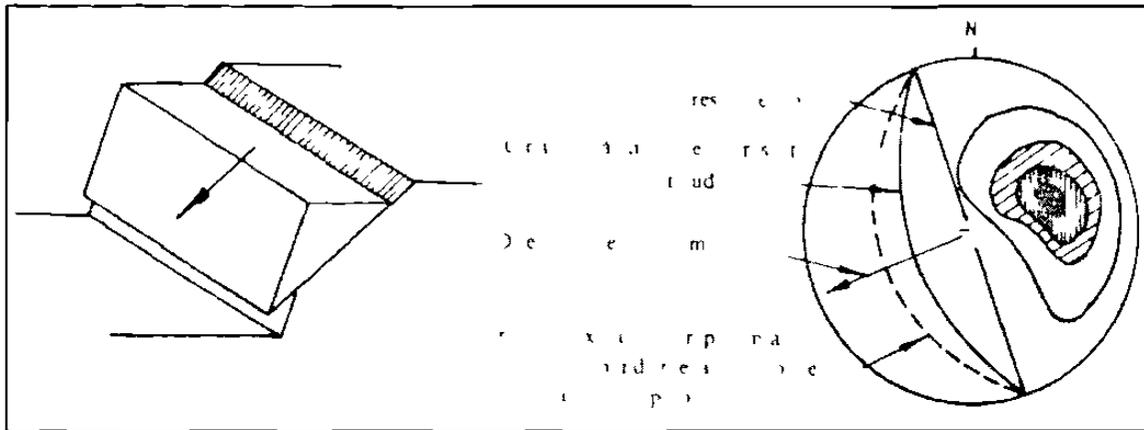


Fig. 3.6 Disposición de las discontinuidades con respecto al talud para deslizamiento planar. (Hock y Bray, 1981).

1. El rumbo de la discontinuidad planar debe de estar  $20^\circ$  dentro del rumbo de la cara del talud, en ambas direcciones:  $\alpha_p = \alpha_f \pm 20^\circ$  (3a-1).
2. El echado de la discontinuidad planar debe ser menor que el echado de la cara del talud, además de inclinarse hacia dicha cara.  $\psi_p < \psi_f$  (3a-2).
3. El echado de la discontinuidad debe ser mayor que el ángulo de fricción de la superficie de deslizamiento.  $\psi_p > \phi_p$  (3a-3).

Donde:

- $\alpha_f$  Dirección del echado de la cara del talud.
- $\alpha_p$  Dirección del echado del plano.
- $\psi_f$  Echado del talud.
- $\psi_p$  Echado del plano.
- $\phi_p$  Ángulo de Fricción.

La Fig. 3.7 ilustra estas tres condiciones, que pueden ser evaluadas mediante el análisis estereográfico.

### 2.2.3 Fallamiento en Cuña

El fallamiento en cuña ocurre cuando un bloque de roca se desliza a través de la intersección de al menos dos discontinuidades, las cuales buzcan hacia la cara del talud en un ángulo oblicuo hacia la cara del corte, formando un bloque en forma de cuña (Fig. 3.8). Comúnmente, estas cuñas de roca son expuestas por excavaciones que descubren la línea de intersección que corresponde al eje del deslizamiento, precipitando el movimiento del bloque en uno u otro plano de discontinuidad.

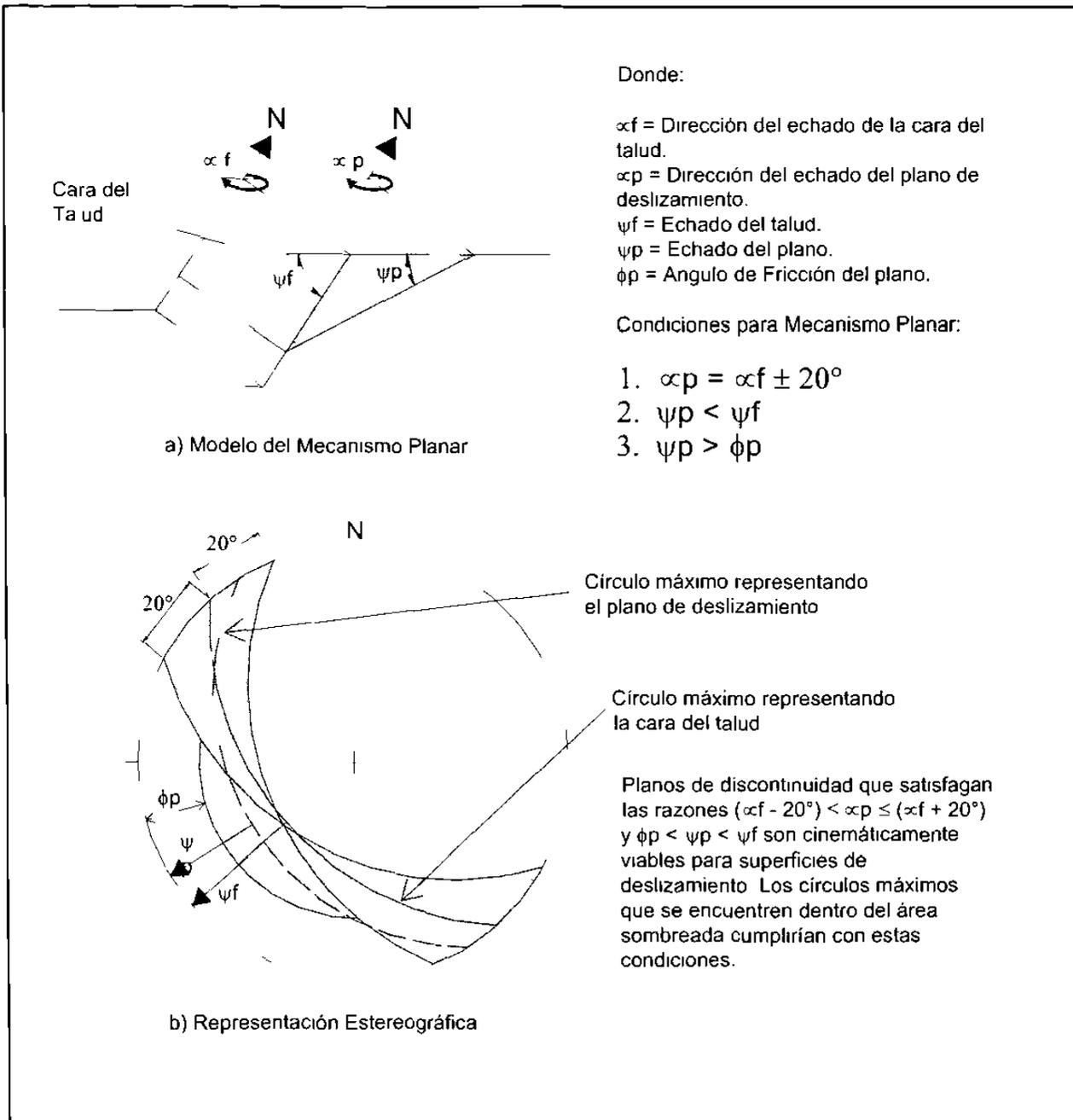


Fig. 3.7 Análisis Cinemático para Mecanismo de Falla tipo Planar.

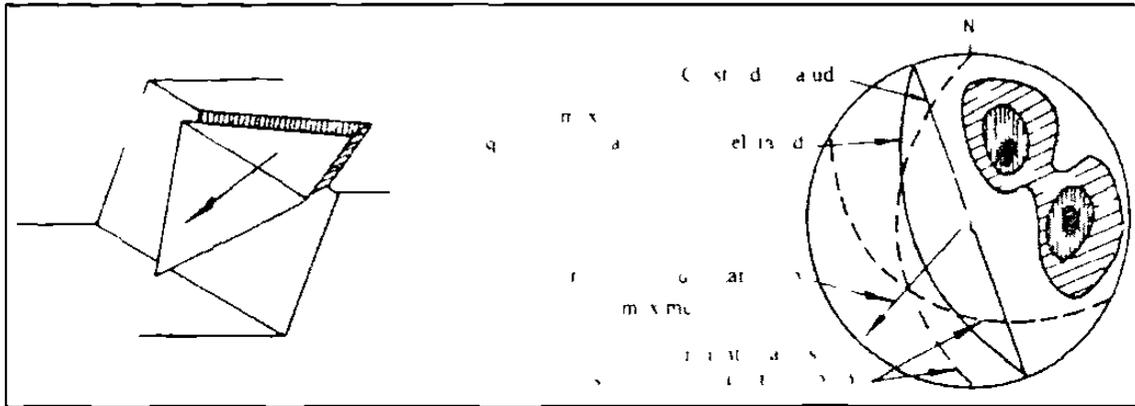


Fig. 3.8 Orientación de las familias de discontinuidades respecto al talud para fallamientos en cuña. (Hoek y Bray, 1981).

Dependiendo del rango entre la resistencia al corte pico y residual, el fallamiento de la cuña puede ocurrir rápidamente, entre segundos y minutos, o en un rango mayor de días o pocos meses. El tamaño del fallamiento en cuña puede ser desde algunos metros cúbicos hasta deslizamientos mayores los cuales tienen un potencial de destrucción de gran escala.

La formación y la ocurrencia de la falla en cuña dependen primeramente de la litología y la estructura del macizo rocoso. Rocas con juntas ortogonales bien definidas ó clivajes en adición a una estratificación ó foliación inclinada, generalmente son situaciones favorables para este mecanismo de falla. Lutitas, limolitas en estratos delgados, arcillas, calizas y litologías en capas, tienden a ser más propensas a desarrollar cuñas que otro tipo de rocas. No obstante, la litología no es un factor que influya en su formación (Piteau, 1972).

Las condiciones estructurales necesarias para el fallamiento en cuña se enlistan a continuación (Fig. 3.9.):

1. El rumbo de la línea de intersección debe ser aproximadamente igual a la dirección del echado de la cara del talud.  $\alpha_i = \alpha_f \pm$  (debe aflorar hacia la cara del talud) (3b-1).
2. La inmersión de la línea de intersección debe ser menor que el echado de la cara del talud. Bajo esta condición, se dice que la línea de intersección aflora en dirección hacia la cara del talud.  $\psi_i < \psi_f$  (3b-2).
3. La inmersión de la línea de intersección debe ser mayor que el ángulo de fricción del ó los planos de deslizamiento. Si los ángulos de fricción para ambos planos son marcadamente diferentes, un ángulo promedio de ellos puede ser aplicable.  $\phi < \psi_i$  (3b-3).

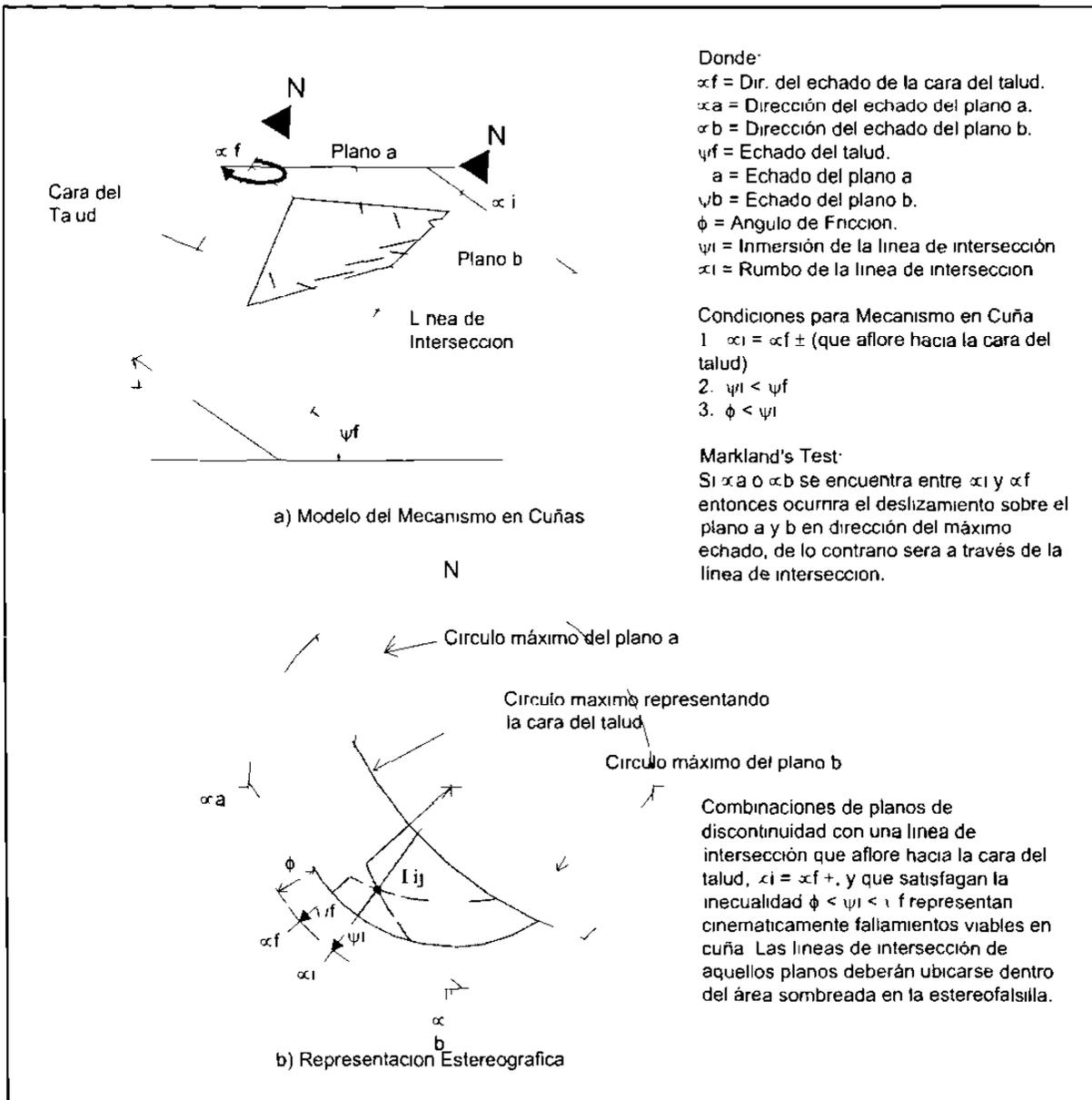


Fig. 3.9 Análisis Cinemático para Fallamientos en Cuña.

El análisis cinemático está gobernado por la orientación de la línea de intersección de los planos que delimitan a la cuña. Este análisis denominado *Markland's Test* (Hoek-Bray, 1981) determina si el deslizamiento puede ocurrir, y en caso de ser así, si este ocurrirá en un solo plano ó ambos, ó con movimiento en dirección de la línea de intersección. El postulado indica lo siguiente: Si  $\alpha a$  ó  $\alpha b$  están entre  $\alpha i$  y  $\alpha f$ , entonces el deslizamiento ocurre sobre el plano que tenga el valor más alto de echado (3b-4).

Donde:

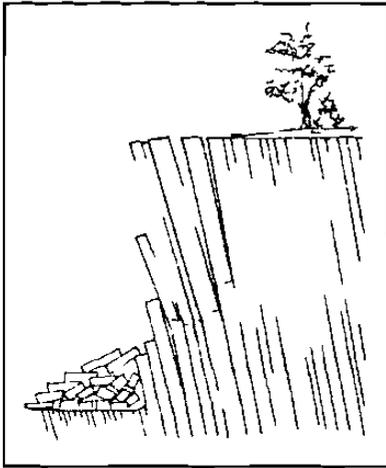
- $\alpha_f$  Dirección del echado de la cara del talud.
- $\psi_f$  Echado del talud.
- $\phi$  Angulo de Fricción.
- $\psi_l$  Inmersión de la línea de intersección.
- $\alpha_l$  Dirección del echado de la línea de intersección
- $\alpha_a$  Dirección del echado del plano a.
- $\alpha_b$  Dirección del echado del plano b.

Como el modelo representa una forma tridimensional, no se asume la extensión lateral como un requisito. El análisis estereográfico puede también determinar si el deslizamiento ocurrirá en ambos planos formadores de la cuña ó en uno solo.

#### 2.2.4 Vuelco (*toppling*)

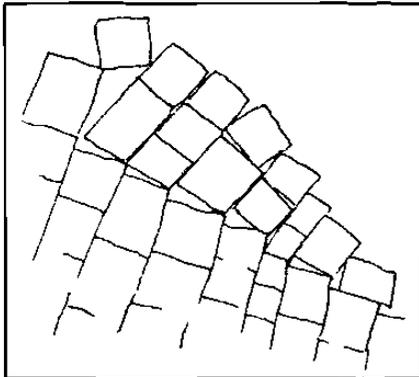
Estos movimientos implican una rotación de unidades con forma de columna o bloque sobre una base, bajo la acción de la gravedad y fuerzas ejercidas por unidades adyacentes o por inclusión de agua en las discontinuidades. Este tipo de movimientos puede culminar en otros tipos como desprendimientos, deslizamientos, etc., dependiendo de los aspectos geológicos del material involucrado según la distribución de las discontinuidades. Los vuelcos se pueden considerar exclusivamente de medios rocosos, condicionados por la disposición estructural de los estratos hacia el interior del talud y un sistema de discontinuidades bien desarrollado. Existen variedades de este mecanismo como:

***Vuelco por flexión ó pandeo:*** se desarrolla bajo un mecanismo compuesto por flexiones pseudocontinuas del material, individualizado en columnas, debido a una serie de movimientos acumulados a lo largo de las discontinuidades. Cuando se desencadena el movimiento, por transmisión de la carga en el pie del talud, el mecanismo progresa hacia el interior del macizo rocoso, originando grietas de tracción (Fig. 3.10.).



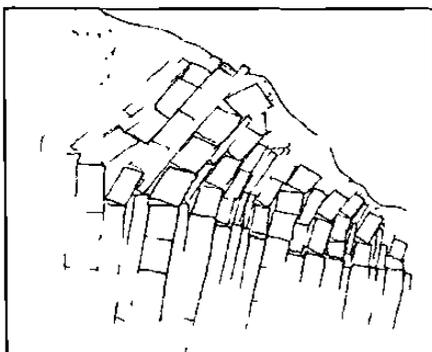
**Fig. 3.10** Vuelco por pandeo o flexión. Característico de este mecanismo es el fracturamiento de las capas en la base del talud con una separación de éstas anterior al desprendimiento. (Hoek-Bray, 1981).

**Vuelco de bloques:** es característico de aquellos macizos rocosos que tienen sistemas de discontinuidades ortogonales, dando lugar a una geometría de columnas divididas en bloques. El empuje sobre los bloques inferiores origina su desplazamiento y una vez producido, el movimiento progresa hacia la parte superior del talud. Cuando las columnas menos esbeltas son desplazadas hacia fuera del talud, por carga que efectúan las ya giradas, se reinicia el proceso (Fig. 3.11).



**Fig. 3.11** Vuelco en bloques. (Hoek-Bray, 1981).

**Vuelco Mixto:** es un caso que participa de las características de los dos anteriormente descritos. Se produce cuando los bloques son alargados, debido a flexiones en el pie del talud e intermovimientos relativos de las distintas unidades.



**Fig. 3.12** Vuelco mixto. (Hoek-Bray, 1981).

La figura 3.13 indica los parámetros que definen un modelo analítico para vuelcos utilizando la proyección estereográfica. Una nota particular es la presencia de una superficie base escalonada formada por fracturamiento entre las columnas.

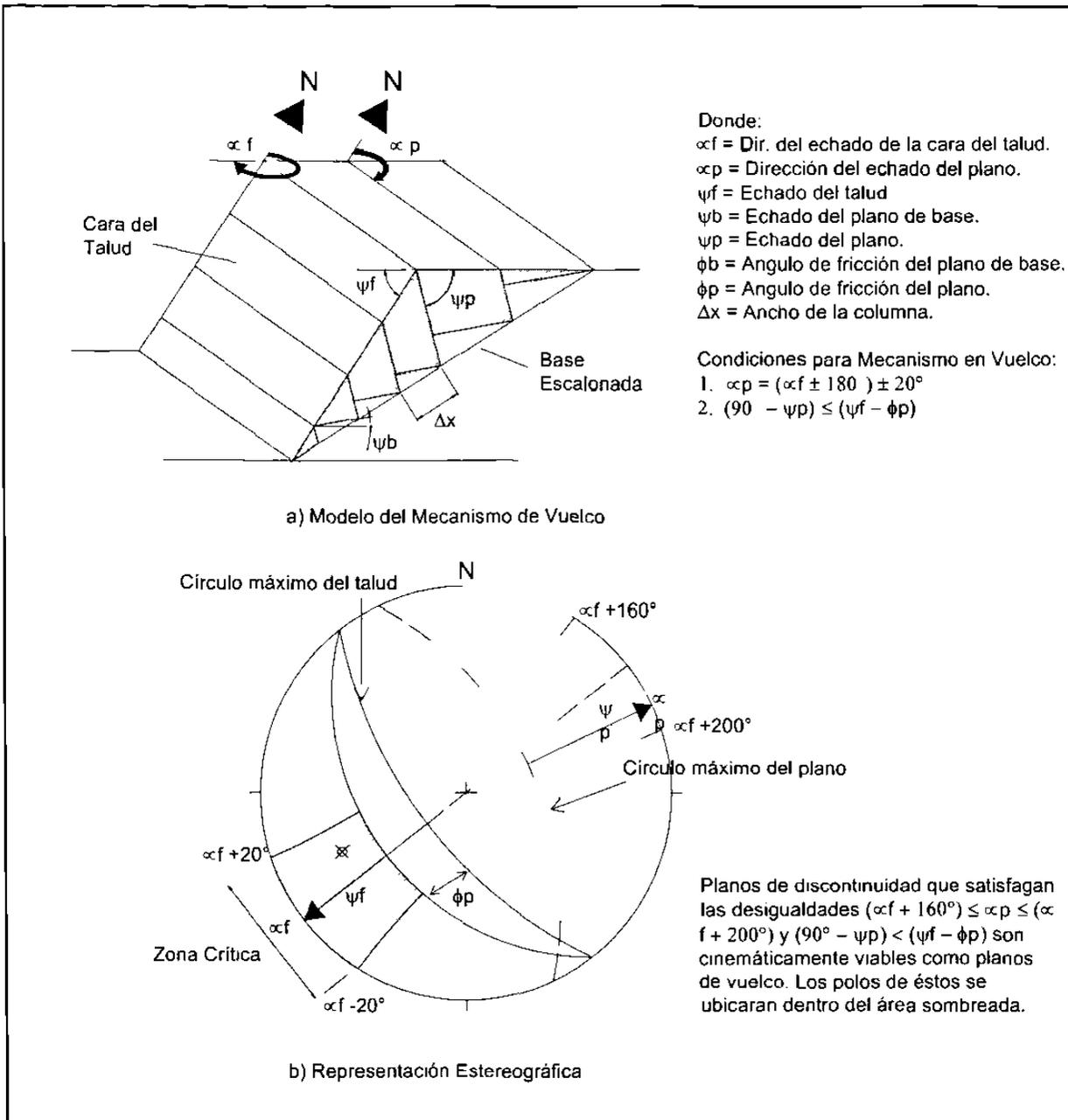


Fig. 3.13 Análisis Cinemático del Mecanismo de Falla por Vuelco.

Las condiciones necesarias para este mecanismo se enlistan a continuación:

1. El rumbo de las capas debe ser aproximadamente paralelo al del talud. Diferencias en estas orientaciones de entre 15-30° han sido citadas entre varios autores, pero por consistencia entre otros modelos de mecanismos de falla, un valor de 20° es apropiado.
2. El echado de las capas debe tender hacia el interior del talud. Usando el convenio de dirección del echado, las condiciones 1 y 2 se pueden fijar como sigue: la dirección del echado de las capas, entre la dirección de la cara del talud debe de ser entre 160° y 200°.  $\alpha_p = (\alpha_f \pm 180^\circ) \pm 20^\circ$  (3c-1).
3. En orden para que el deslizamiento intercapas ocurra, el polo del círculo máximo de la discontinuidad a volcarse debe tener una inmersión menor que la inclinación de la cara del talud menor que el ángulo de fricción. Esta condición puede ser formulada como sigue:  $(90 - \Psi_p) = (\Psi_f - \phi_p)$  (3c-2).

Donde:

- $\Psi_p$  – Echado de las capas (planos)  
 $\Psi_f$  – Echado de la cara del talud, y  
 $\phi_p$  – Ángulo de fricción a través de los planos.  
 $\alpha_p$  – Dirección del echado del plano.  
 $\alpha_f$  – Dirección del echado del talud.

### 2.3 Análisis Cinemático de los Taludes en el Área de Estudio

Dentro del trazo de la Carretera “Rumbo Nuevo”, en lo que corresponde al área de interés para este trabajo, se seleccionaron seis taludes que representan condiciones de inestabilidad. Cabe recalcar que estos se ubican dentro de litologías completamente diferentes, con excepción de aquellas que se ubican en las mismas formaciones geológicas. De acuerdo al estudio geológico – estructural realizado, esta región se encuentra dentro de un anticlinal con rumbo NNE – SSW, teniendo diferentes patrones de fracturamiento debido a la tectónica que originó esta estructura. La causa de la inestabilidad esta regida por dicho diaclasamiento al igual que la orientación de la estratificación con respecto a los taludes. Como población para el análisis estereográfico, se tomaron los datos estructurales anteriormente descritos.

### 2.3.1 Talud #1

Se ubica dentro de la Formación Zuloaga (Fig. 3.14), que litológicamente corresponde a una caliza micrítica con espesores masivos de 40 cm hasta 1.8 m. El talud tiene una altura aproximada de 10 m con un ángulo de inclinación de  $72^\circ$ . Se ubica en la parte Este de la carretera, en el Km 26+780 y tiene una longitud de 35 m. Tiene una trayectoria cóncava hacia la parte de la carpeta asfáltica. Presenta planos de diaclasas *hk0*, delimitadas verticalmente por los planos de estratificación al igual que juntas estilolíticas. Se observa la exposición de la línea de intersección entre estas juntas. De acuerdo a los espesores de los estratos, en este caso los bloques formados son de tamaño de unos cuantos metros cúbicos. Dentro de los planos de las diaclasas se pueden observar algunas líneas que no son más que signos de disolución de la caliza. Los planos de estratificación presentan superficies “cone in cone” con rellenos de arcilla, pero esta condición no contribuye a la estabilidad. Este talud falla en forma de caídos dentro de la clasificación de los movimientos en masa.

De acuerdo al análisis cinemático (Fig. 3.15), los planos J2 y J3 se intersectan dando la viabilidad de formar una cuña, el otro plano J1 que corresponde a la estratificación delimita la dimensión vertical de estas. Las condiciones estructurales que debe obedecer el talud para confirmar la viabilidad de falla, enlistadas anteriormente, se analizan a continuación:

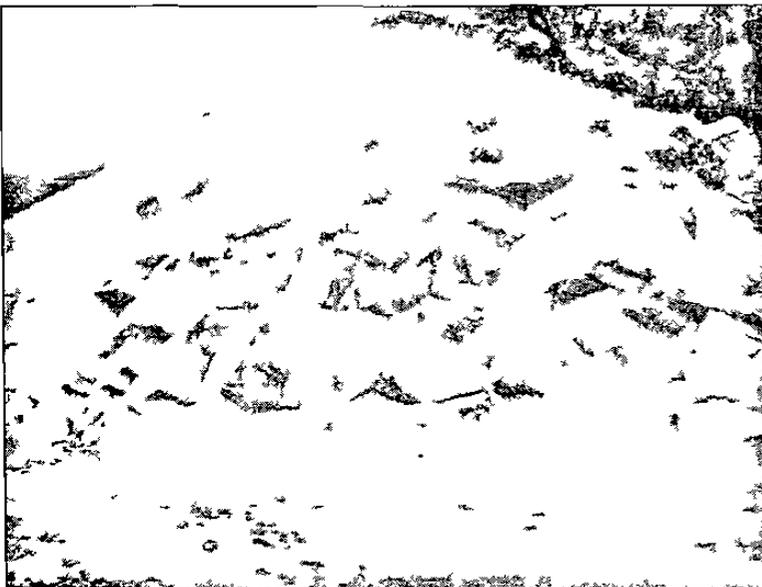


Fig. 3.14 Aspecto general del Talud #1.  
Ubicación Km. 26+890. Vista hacia el SW.

**Valores**

Talud TL = 061 72

J1(SS) = 257 36

J2 = 088 67

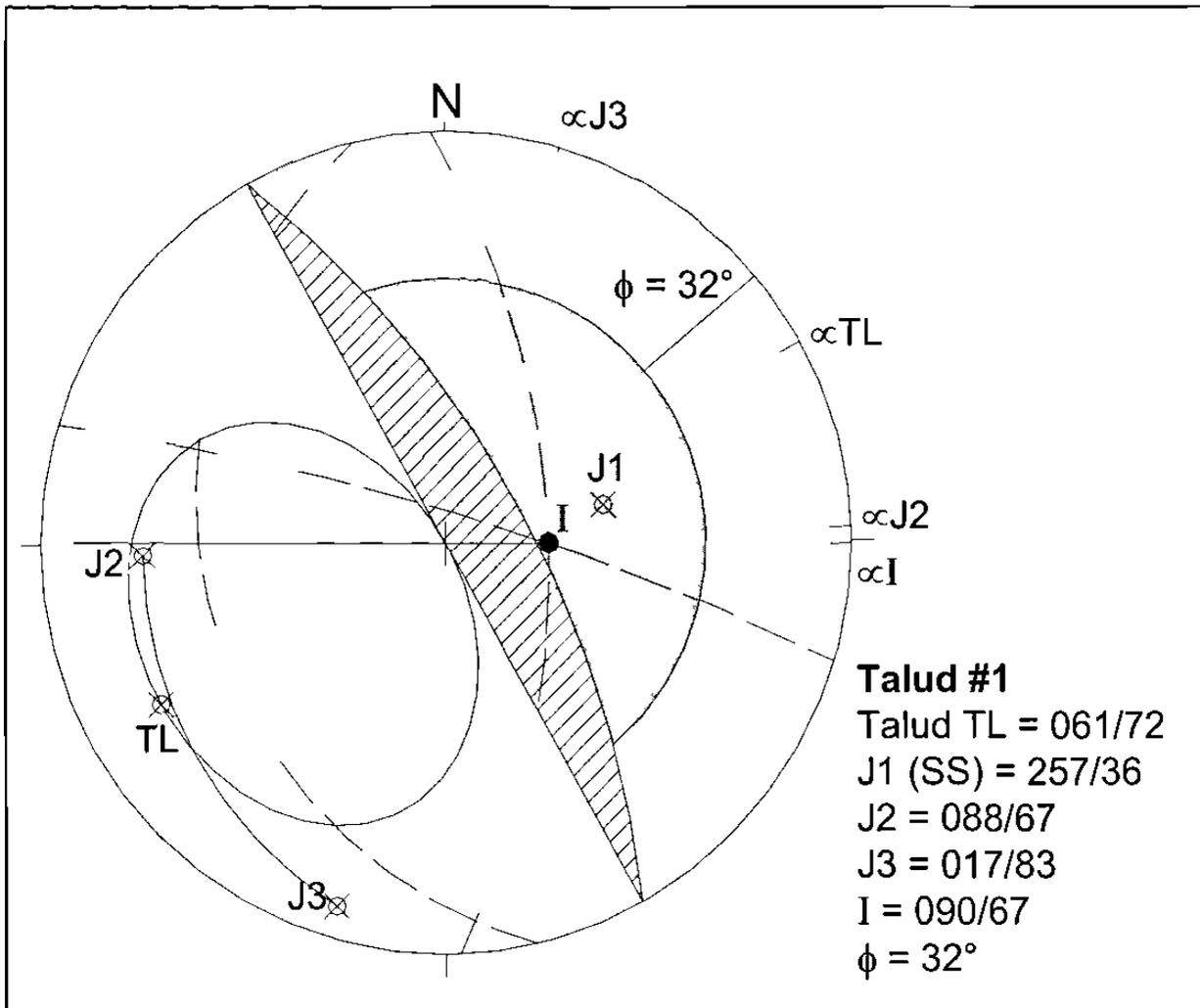
J3 = 017 83

 $\phi = 32^\circ$ **Donde:** $\alpha_f =$  Dirección del echado de la cara del talud. $\alpha_a =$  Dirección del echado del plano a. $\alpha_b =$  Dirección del echado del plano b. $\psi_f =$  Echado del talud. $\psi_a =$  Echado del plano a. $\psi_b =$  Echado del plano b. $\phi =$  Angulo de Fricción. $\psi_i =$  Inmersión de la línea de intersección. $\alpha_i =$  Rumbo de la línea de intersección.**Valores Talud actual:** $\alpha_{TL} = 061^\circ$  $\alpha_{J2} = 088^\circ$  $\alpha_{J3} = 017^\circ$  $\psi_{TL} = 72^\circ$  $\psi_{J2} = 67^\circ$  $\psi_{J3} = 83^\circ$  $\phi = 32^\circ$  $\psi_i = 67^\circ$  $\alpha_i = 090^\circ$ **Condiciones para viabilidad de falla**1.  $\alpha_i - \alpha_f \pm$  (que la línea de intersección aflora hacia la cara del talud). (3b-1)2.  $\psi_i < \psi_f$  (3b-2)3.  $\phi < \psi_i$  (3b-3)1.  $90^\circ \cong 72^\circ$  (Si aflora hacia la cara del talud, según muestra el estereograma).2.  $67^\circ < 72^\circ$ 3.  $32^\circ < 67^\circ$ 

En las tres condiciones, cumple con la cinética necesaria para que se produzca el mecanismo.

**Markland's Test**Si  $\alpha_a$  ó  $\alpha_b$  están entre  $\alpha_i$  y  $\alpha_f$ , entonces el deslizamiento ocurre sobre el plano que tenga el valor más alto de echado. (3b-4).

En los azimutes de las direcciones de los echados de los planos, solo encontramos que  $J2 = 088^\circ$  se encuentra dentro de  $\alpha_{TL} = 061^\circ$  y  $\alpha_i = 090^\circ$ . Cumpliendo con el postulado de Markland, se espera que la cuña deslizará por el plano J3 que es el que tiene el mayor valor del echado  $\psi_{J3} = 83^\circ$ .



**Fig. 3.15** Análisis Cinemático del Talud #1. La línea de intersección de los planos J1 y J2 se encuentra dentro del área sombreada, región que se considera como crítica por la potencialidad del deslizamiento de la cuña formada por los planos. La línea proyectada desde el punto de intersección que cruza por el centro de la red, no intersecciona el círculo máximo dentro de los polos de los planos, lo cual indica que el deslizamiento se realizará a través de J3 por ser el del valor más alto de buzamiento.

### 2.3.2. Talud #2

Este talud se ubica en el Km. 29+080 hacia el lado Sur de la carretera, dentro de la Formación Tamaulipas Inferior que corresponde a una caliza micrítica en estratos muy masivos desde 50 cm hasta 2.5 m. La altura del talud es de aproximadamente 16 m con una longitud de 40 m con una inclinación casi vertical de  $85^\circ$  (Fig. 3.16). La cresta del talud sigue la morfología natural del terreno. La trayectoria es en línea recta, sin ningún cambio de rumbo de la cara del talud. La estratificación tiene una dirección de echado hacia la cara del talud, los bloques son delimitados por fracturas tipo *bc* junto con la intersección de *hk0*. No se observa ningún tipo de relleno en las juntas mientras que interestratificada se observa calcita en espesores de 5 mm con signos de baja alteración

y disolución. Dentro de la estratificación se identifican estilolitas. Durante el reconocimiento del área no se observó ningún signo de deslizamiento.



**Fig. 3.16** Aspecto general del Talud #2. Se aprecia notablemente el sistema de fracturamiento ortogonal con respecto a la estratificación. Ubicación Km 29+080. Vista hacia el W.

El análisis cinemático (Fig. 3.17) demuestra que se tiene un mecanismo de vuelco, debido a la presencia de los polos de los planos J3 y J4 dentro del área crítica para dicho evento. Como el análisis de la viabilidad se realiza sólo para un plano, el procedimiento se hará para cada familia. De acuerdo a las condiciones estructurales que se deben de presentar, el análisis queda de la siguiente forma:

**Valores:** Talud TL = 323/85, J1(SS) = 316/25, J2 = 080/76, J3 = 152/75, J4 = 161/82,  $\phi_p = 32^\circ$ .

**Donde:**

$\alpha_f$  = Dirección del echado de la cara del talud.  
 $\alpha_p$  = Dirección del echado del plano.  
 $\alpha_p$  = Dirección del echado del plano.  
 $\psi_f$  = Echado del talud.  
 $\psi_p$  = Echado del plano.  
 $\psi_p$  = Echado del plano.  
 $\phi_p$  = Angulo de Fricción del plano.

**Valores Talud actual:**

$\alpha_{TL} = 323^\circ$   
 $\alpha_{J3} = 152^\circ$   
 $\alpha_{J4} = 161^\circ$   
 $\psi_{TL} = 85^\circ$   
 $\psi_{J3} = 75^\circ$   
 $\psi_{J4} = 82^\circ$   
 $\phi_p = 35^\circ$

**Condiciones para viabilidad de falla**

1.  $\alpha_p - (\alpha_f \pm 180^\circ) \pm 20^\circ$  (3c-1)

2.  $(90^\circ - \psi_p) \leq (\psi_f - \phi_p)$  (3c-2)

1.  $152 = (323 - 180)$   
 $152 = 143 (\pm 20^\circ)$ . Familia J3

2.  $(90 - 75) \leq (85 - 35)$   
 $15 \leq 50$ .

1.  $161 = (323 - 180)$   
 $161 = 143 (\pm 20^\circ)$ . Familia J4

2.  $(90 - 82) \leq (85 - 35)$   
 $8 < 50$ .

Ambos planos cumplen con las condiciones para considerarlos para vuelco potencial.

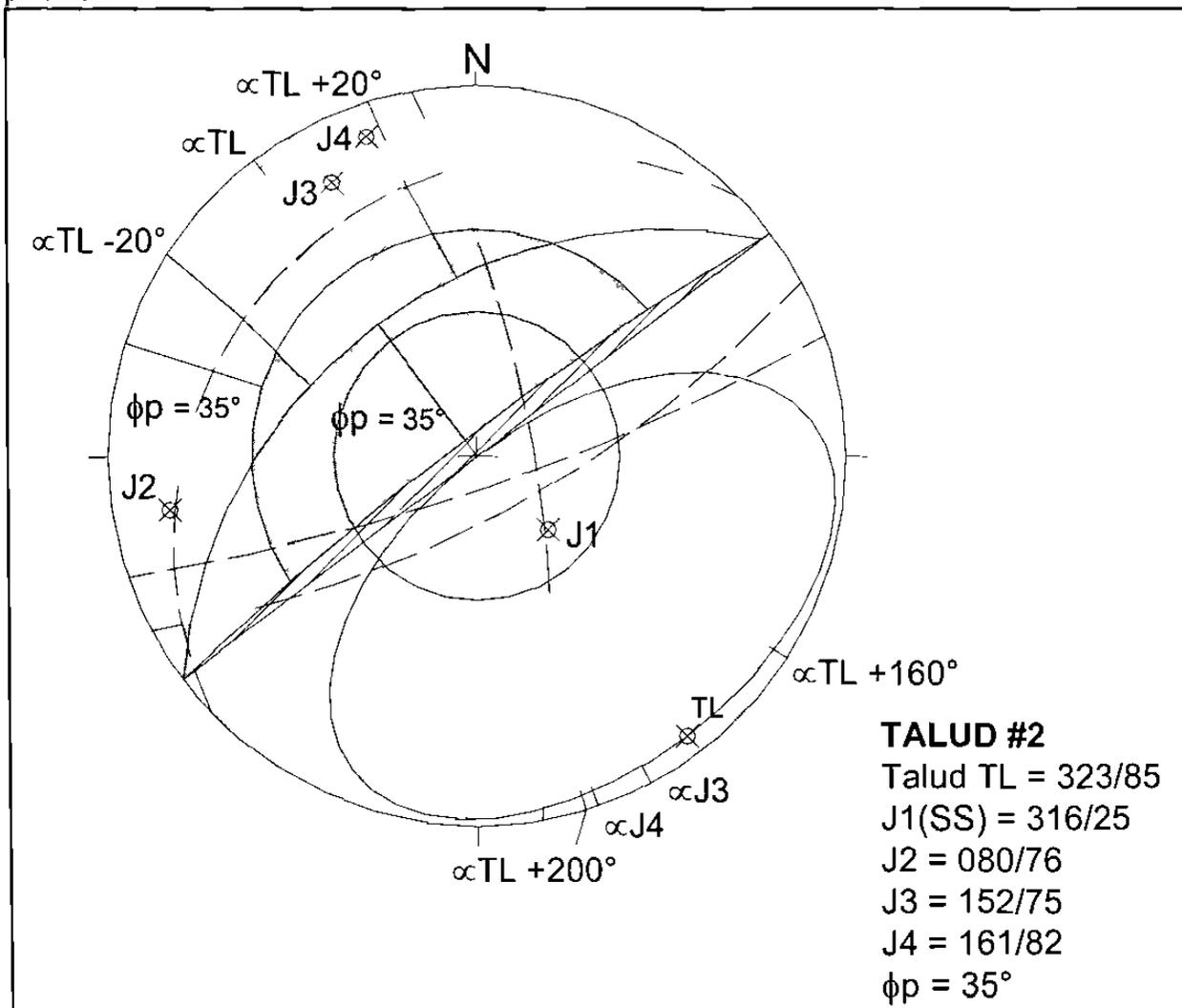


Fig. 3.17 Analisis cinemático del Talud #2. Los polos de los planos J3 y J4 se encuentran dentro del área achurada que representa mecanismo potencial de vuelco para dichos planos. El plano J1 se encuentra dentro del área sombreada que representa el mismo ángulo de fricción para mecanismo planar, señalándola como potencial superficie de deslizamiento al ubicarse su polo dentro de la envolvente de Markland-Talobre, pero estable al ubicarse también dentro del Cono de Fricción.

### 2.3.3. Talud #3

Contiguo al Talud #2, este se ubica en la zona de transición entre las Formaciones Tamaulipas Inferior, Otates y Tamaulipas Superior, en el Km 29+360 (Fig. 3.18). Se presenta una litología poco heterogénea: mientras que para las Formaciones Tamaulipas se cuenta con calizas micríticas con espesores masivos de entre 40 y 2.5 m, Otates comprende una intercalación de margas, calizas arcillosas y lutitas. La altura del talud es de 15 m con una longitud de 60 m. En la corona del talud encontramos coluvión con un espesor de 10 m, que en su cima conserva la morfología natural del terreno. La estratificación tiene una dirección de estratificación con respecto a la carretera favorable, con pocos grados de inclinación hacia el sentido de trazo. Tenemos fracturamiento tipo ac y hk0, que delimitan bloques en forma tetraedral que se deslizan por los planos de estratificación. La inestabilidad radica en que el corte fue hecho casi vertical teniendo sobre roca competente material con propiedades poco resistentes fácilmente intemperizable. El ángulo que guarda con respecto a la cara del talud es de entre  $60^\circ - 75^\circ$ , lo que incrementa la posibilidad de falla en el talud.



Fig. 3.18 Aspecto general del Talud #3. Se expone en esta fotografía, el mecanismo de falla correspondiente a cuña, de la cual aflora en forma notable la línea de intersección de los planos que delimitan dicho bloque, indicada en la gráfica por la flecha. Ubicación 29+360. Vista hacia el SE.

El análisis cinemático (Fig. 3.19) revela una intersección de los planos J1 que corresponde a la estratificación y J2, con un valor de la línea de intersección 334/13, resultando un mecanismo potencial del tipo cuña. La solución de las desigualdades como condicionantes de este tipo de deslizamiento se enlista a continuación:

**Valores**

Talud TL = 313 85

J1(SS) = 260 36

J2 = 054 50

J3 = 127 72

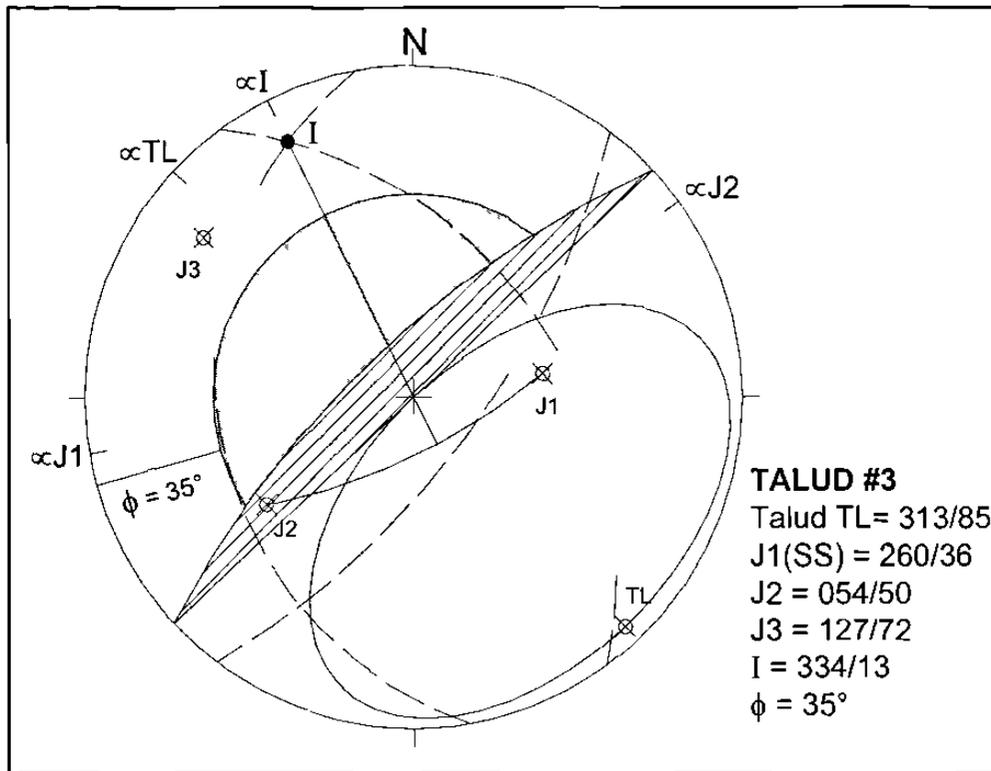
 $\phi = 35^\circ$ **Donde:** $\alpha_f$  – Dirección del echado de la cara del talud. $\alpha_a$  = Dirección del echado del plano a. $\alpha_b$  = Dirección del echado del plano b. $\psi_f$  = Echado del talud. $\psi_a$  = Echado del plano a. $\psi_b$  = Echado del plano b. $\phi$  = Angulo de Fricción. $\psi_i$  = Inmersión de la línea de intersección. $\alpha_i$  = Rumbo de la línea de intersección.**Valores Talud actual:** $\alpha_{TL} = 313^\circ$  $\alpha_{J1} = 260^\circ$  $\alpha_{J2} = 054^\circ$  $\psi_{TL} = 85^\circ$  $\psi_{J1} = 36^\circ$  $\psi_{J2} = 50^\circ$  $\phi = 35^\circ$  $\psi_i = 13^\circ$  $\alpha_i = 334^\circ$ **Condiciones para viabilidad de falla**1.  $\alpha_i = \alpha_f \pm$  (que la línea de intersección aflora hacia la cara del talud). (3b-1)2.  $\psi_i < \psi_f$  (3b-2)3.  $\phi < \psi_i$  (3b-3)1.  $334^\circ \cong 313^\circ$  (Si aflora hacia la cara del talud, según muestra el estereograma).2.  $13^\circ < 85^\circ$ 3.  $35^\circ > 13^\circ$ 

No se cumple la condición no. 3 ya que el ángulo de fricción es mayor que la inmersión de la línea de intersección, aunque no se puede descartar que el mecanismo es potencial.

**Markland's Test**

Si  $\alpha_a$  ó  $\alpha_b$  están entre  $\alpha_i$  y  $\alpha_f$ , entonces el deslizamiento ocurre sobre el plano que tenga el valor más alto de echado. (3b-4).

De acuerdo al análisis estereográfico, las direcciones del echado de las familias J1 y J3 se encuentran fuera del ángulo formado por  $\alpha_i$  y  $\alpha_{TL}$ , lo cual indica que la cuña deslizará sobre la línea de intersección.



**Fig. 3.19** Análisis cinemático del Talud #3. La línea de intersección I formada por los planos J1 y J2 se encuentra dentro del área del círculo de fricción, lo cual se puede interpretar que cinemáticamente no es posible su deslizamiento. La intersección de línea proyectada desde el punto I con el círculo máximo dentro de los polos de los planos, se ubica dentro de la envolvente de Markland confirmando la potencialidad de deslizamiento.

### 2.3.4 Talud #4

Ubicándose dentro de la Formación Tamaulipas Superior en el Km 29+850, compuesto litológicamente por calizas micríticas de espesores masivos de 50 cm – 1.5 m (Fig. 3.20). El talud tiene una longitud de 200 m con una altura aproximada de 15 m, la cara del talud muestra una inclinación casi vertical de  $81^\circ$ . La roca presenta dos sistemas de diaclasamiento tipo *hk0* con sus planos conjugados. Algunas diaclasas son lisas sin contener ningún tipo de relleno y muy escasas contiene rellenos de arcilla alterada. Dentro de los estratos se observan estilolitas paralelas a los planos de estratificación. En la parte media del talud se observa carstificación al igual que una falla inversa con un pliegue.

El análisis cinemático (Fig. 3.21) revela la intersección de los planos J3 y J5 favorables para la formación de bloques en cuña, teniendo como valores de la línea de deslizamiento 304/76. Las juntas J2 y J4 siendo conjugadas de las anteriores, también forman cuñas sólo que la dirección de deslizamiento es inverso respecto hacia la dirección de la cara del talud. Las condiciones para analizar el mecanismo potencial se muestra a continuación:



**Fig. 3.20** Aspecto general del Talud #4. Ubicación Km 31+280. Vista hacia el SW.

### Valores

Talud TL = 309/81

J1(SS) = 265/30

J2 = 156/81

J3 = 340/78

J4 = 085/77

J5 = 256/80

I = 304/76

$\phi = 34^\circ$

### Donde:

$\alpha_f$  = Dirección del echado de la cara del talud.

$\alpha_a$  = Dirección del echado del plano a.

$\alpha_b$  = Dirección del echado del plano b.

$\psi_f$  = Echado del talud.

$\psi_a$  = Echado del plano a.

$\psi_b$  = Echado del plano b.

$\phi$  = Angulo de Fricción.

$\psi_i$  = Inmersión de la línea de intersección.

$\alpha_i$  = Rumbo de la línea de intersección.

### Valores Talud actual:

$\alpha_{TL} = 309^\circ$

$\alpha_{J3} = 340^\circ$

$\alpha_{J5} = 256^\circ$

$\psi_{TL} = 81^\circ$

$\psi_{J3} = 78^\circ$

$\psi_{J5} = 80^\circ$

$\phi = 34^\circ$

$\psi_I = 76^\circ$

$\alpha_I = 304^\circ$

### Condiciones para viabilidad de falla

1.  $\alpha_i = \alpha_f \pm$  (que la línea de intersección aflore hacia la cara del talud). (3b-1)

2.  $\psi_i < \psi_f$  (3b-2)

3.  $\phi < \psi_i$  (3b-3)

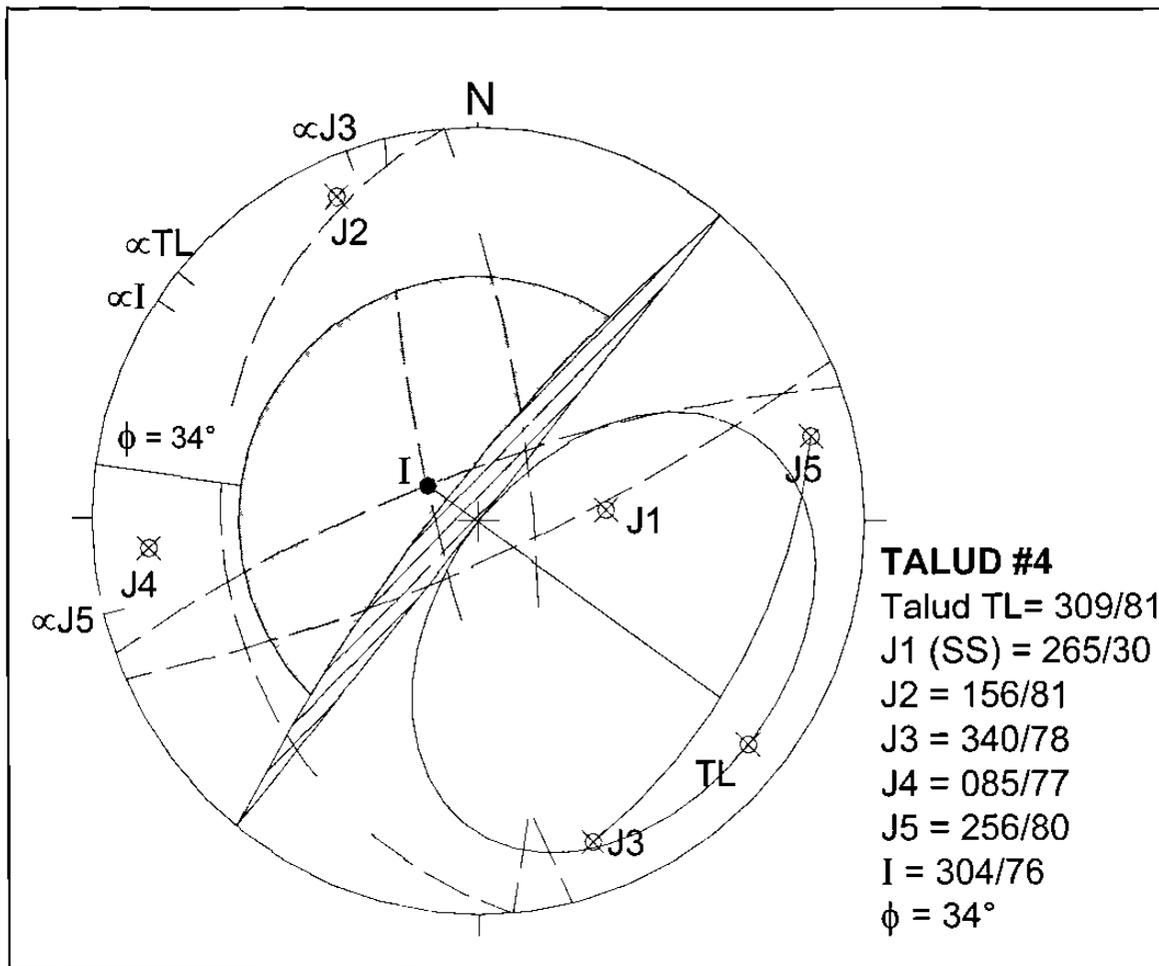
1.  $304^\circ \cong 309^\circ$  (Si aflora hacia la cara del talud, según muestra el estereograma).
2.  $76^\circ < 81^\circ$
3.  $34^\circ < 76^\circ$

En ambas tres, cumple con las condiciones necesarias para que se produzca el mecanismo.

**Markland's Test**

Si  $\alpha_a$  ó  $\alpha_b$  están entre  $\alpha_i$  y  $\alpha_f$ , entonces el deslizamiento ocurre sobre el plano que tenga el valor más alto de echado. (3b-4)

En las direcciones de los echados de las juntas, observamos que J3 y J5 se encuentran fuera del ángulo comprendido entre  $\alpha_I$  y  $\alpha_{TL}$ , lo cual indica que el deslizamiento ocurrirá a través de la línea de intersección de los planos.



**Fig. 3.21.** Análisis cinemático del Talud #4. La línea de intersección I formada por los planos J3 y J5 se ubica dentro de la zona sombreada que representa la viabilidad para deslizamiento de cuñas. La intersección de la línea proyectada desde el punto I con el círculo máximo dentro de los polos de los planos, se ubica dentro de la envolvente de Markland lo cual indica deslizamiento a través de la línea de intersección de la cuña. El polo de J1 también se ubica dentro de dicha envolvente, pero es estable por fricción al ubicarse su plano dentro del círculo de fricción.

### 2.3.5 Talud #5

En el Km 31+280 teniendo una extensión hasta 31+600, se encuentra este talud cortando rocas de la Formación San Felipe que consiste de calizas arcillosas en estratos medianos y delgados de entre 30 y 60 cm con intercalaciones de arcillas blandas y lutitas (Fig. 3.22). Las dimensiones de éste son de una longitud convexa de 320 m con una altura promedio de 23 m, con una dirección de echado de la cara del talud de  $280^\circ$  y una inclinación de  $70^\circ$ . Los bloques de roca están delimitados por planos tipo  $hk0$  que dan una forma de cuña inversa.



Fig. 3.22. Aspecto general del Talud #5. Ubicación Km 31+300. Vista hacia el S.

El análisis cinemático (Fig. 3.23) muestra que la junta J1 que representa a la estratificación, se encuentra dentro de las zonas críticas, tanto fuera del círculo de fricción del plano como en las zonas  $\pm 20^\circ$  del rumbo del talud, para considerarla como deslizamiento planar sobre esta misma. Las condiciones para que deba de cumplir cinemáticamente con las condiciones antes descritas, se muestran a continuación:

#### Valores

Talud TL = 280/70

J1(SS) = 271/46

J2 = 154 86

J3 = 089/73

$\phi_p = 30^\circ$

#### Donde:

$\alpha_f$  = Dirección del echado de la cara del talud.

$\alpha_p$  = Dirección del echado del plano.

$\psi_f$  = Echado del talud.

#### Valores Talud actual:

$\alpha_{TL} = 280^\circ$

$\alpha_{J1} = 271^\circ$

$\psi_{TL} = 70^\circ$

$\psi_p$  = Echado del plano.  
 $\phi_p$  = Angulo de Fricción.

$\psi_{J1} = 46^\circ$   
 $\phi_p = 30^\circ$

**Condiciones cinemáticas para el Mecanismo Planar:**

- 1.  $\alpha_p - \alpha_f \pm 20^\circ$  (3a-1)
- 2.  $\psi_p < \psi_f$  (3a-2)
- 3.  $\psi_p > \phi_p$  (3a-3)

- 1.  $271 = 280 \pm 20^\circ$
- 2.  $46 < 70$
- 3.  $46 > 30$

Las tres condiciones se cumplen para considerar al plano J1 como potencial para el deslizamiento planar.

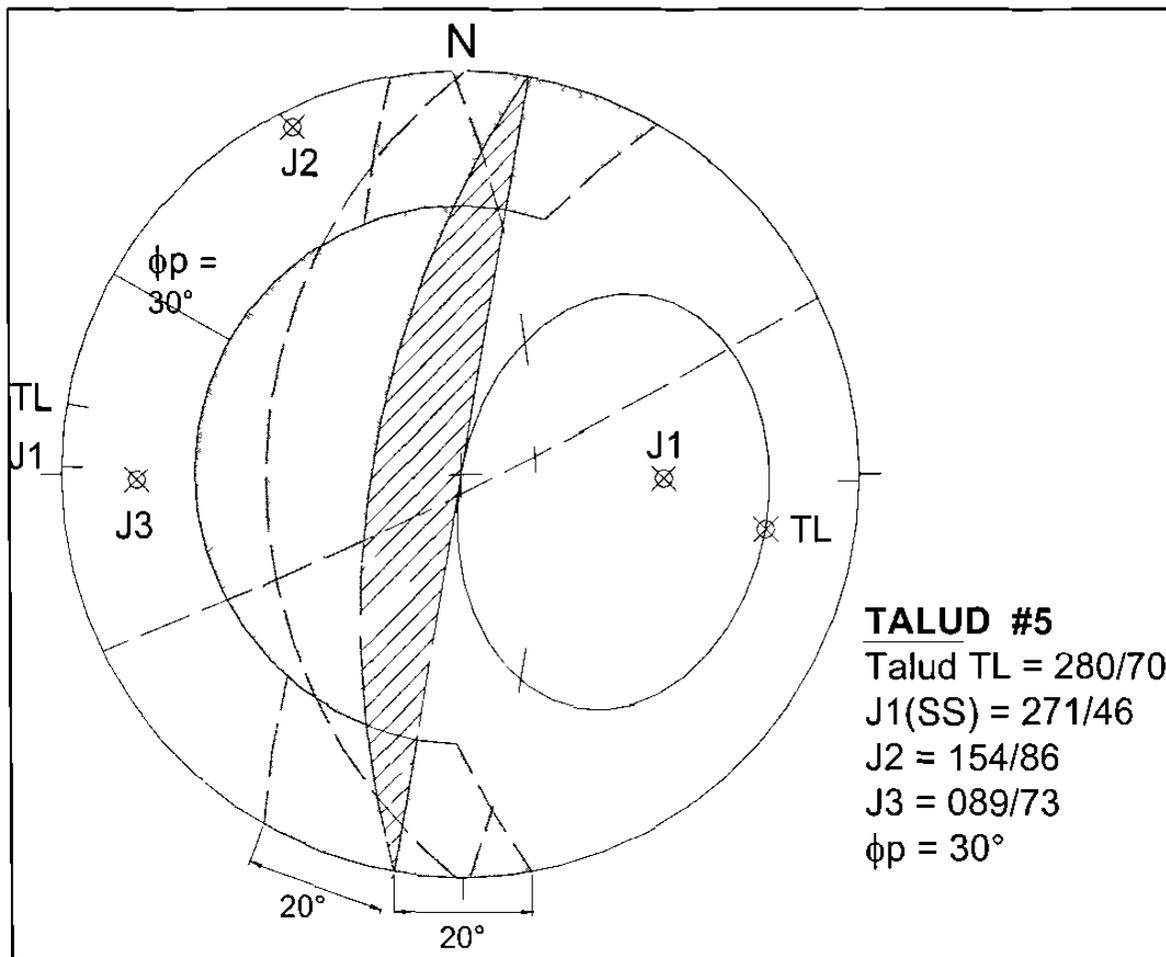


Fig. 3.23 Análisis cinemático del Talud #5. El círculo máximo de J1 se ubica dentro de la zona delimitada  $\pm 20^\circ$  y fuera del círculo de fricción  $\phi_p$ , lo cual indica la potencialidad para fallamiento tipo planar. Esto se comprueba al quedar el polo de este plano dentro de la envolvente de Markland.

### 2.3.6. Talud #6

Se ubica contiguo al talud anterior, en el Km 31+770 – 32+000, dentro de la misma Formación San Felipe (Fig. 3.24). Aquí las dimensiones del talud son de una longitud de 220 m con una altura promedio de 20 m y una dirección del echado de la cara del talud de  $280^\circ 40'$ .

El mecanismo potencial de falla de acuerdo al análisis cinemático (Fig. 3.25) es planar, sobre el plano de estratificación que tiene una dirección  $267^\circ/27'$ , el cual se ubica dentro del círculo de fricción de  $30^\circ$ , indica que cinemáticamente no es posible su falla porque  $\phi > \psi_p$ . Analizando las condiciones estructurales que deben presentarse, se deduce lo siguiente:



Fig. 3.24. Aspecto general del Talud #6. Ubicación Km 31+770. Vista hacia el S.

#### Valores

Talud TL = 280/40

J1(SS) = 267/27

J2 = 093/76

J3 = 046/79

$\phi_p = 30^\circ$

#### Donde:

$\alpha_f$  = Dirección del echado de la cara del talud.

$\alpha_p$  = Dirección del echado del plano.

$\psi_f$  = Echado del talud.

$\psi_p$  = Echado del plano.

$\phi_p$  = Angulo de Fricción.

#### Valores Talud actual:

$\alpha_{TL} = 280^\circ$

$\alpha_{J1} = 267^\circ$

$\psi_{TL} = 40^\circ$

$\psi_{J1} = 27^\circ$

$\phi_p = 30^\circ$

**Condiciones cinemáticas para el Mecanismo Planar:**

1.  $\alpha_p = \alpha_f \pm 20^\circ$  (3a-1)
2.  $\psi_p < \psi_f$  (3a-2)
3.  $\psi_p > \phi_p$  (3a-3)

1.  $267 = 280 \pm 20^\circ$
2.  $27 < 40$
3.  $27 < 30$

En la condición no. 3, el ángulo de fricción del plano es mayor que su echado lo cual indica que cinemáticamente no es posible su deslizamiento, aunque no se puede descartar que el mecanismo esta presente ya que las otras condiciones si se cumplen.

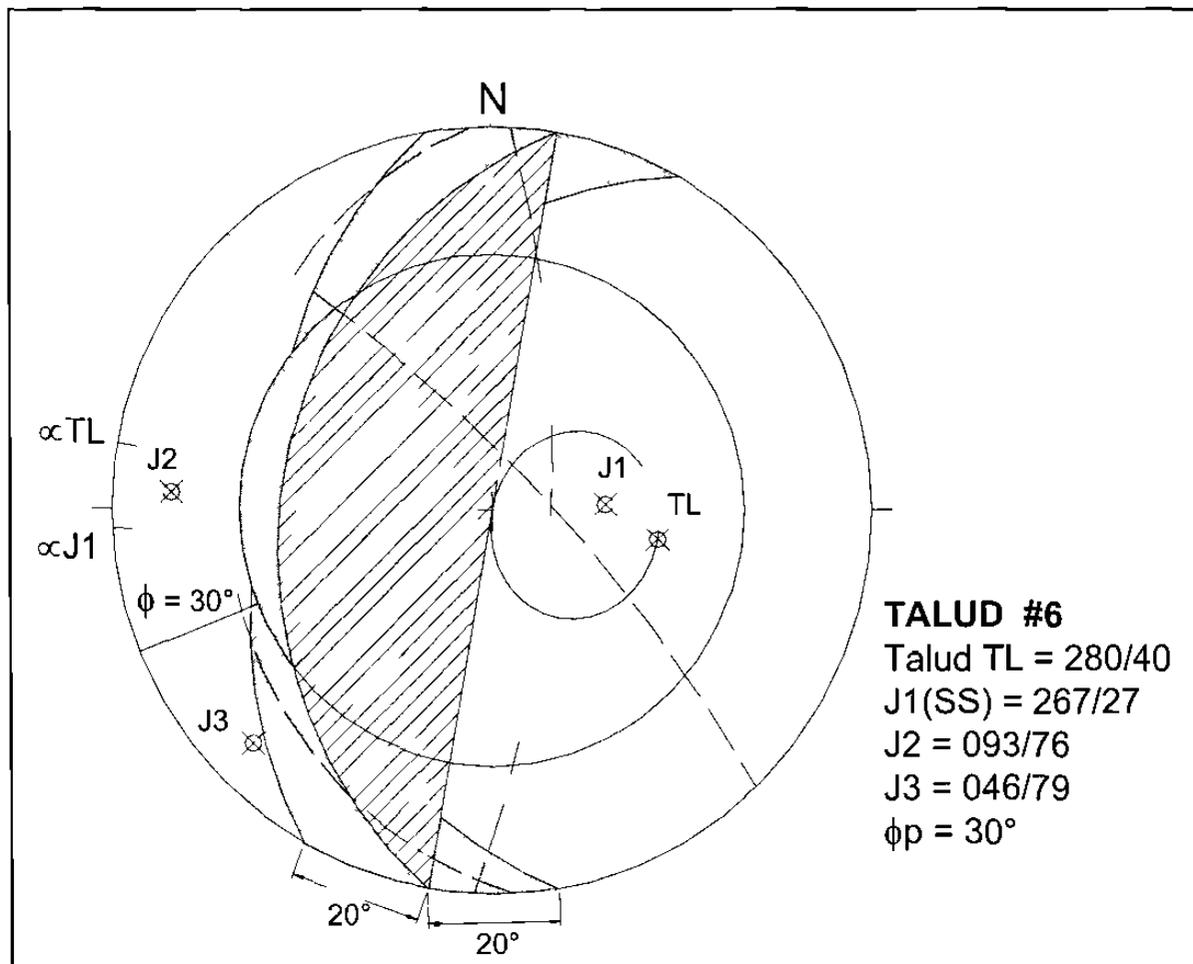


Fig. 3.25. Análisis cinemático del Talud #6. El polo del plano J1 se ubica dentro de la envolvente de Markland indicando condiciones cinemáticas para su deslizamiento. El círculo máximo de este mismo plano se encuentra dentro del círculo de fricción  $\phi_p$ , presentando estabilidad por fricción.