

ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA OPTIMIZACION ECONOMICA DE TAJOS

Alfredo A. Hernández, Ingeniero Senior de Proyectos, Call & Nicholas, Inc.⁽¹⁾
Richard D. Call, Consultor Asociado, Call & Nicholas, Inc.

1.0 INTRODUCCION

El objetivo en la explotación de un tajo minero es recuperar la máxima cantidad de mineral con la mínima remoción de material estéril hasta el punto en que el costo incremental del movimiento de estéril iguala al valor del mineral recuperado, lo cual resulta en la optimización del beneficio económico en la vida de la mina. En general, el aumentar el ángulo de talud reduce el movimiento de estéril y/o incrementa el mineral recuperable (Figura 1). Sin embargo, a medida que se incrementa el ángulo de talud ocurre un incremento en el número y tamaño de deslizamientos en el talud y por consiguiente un incremento en el costo por inestabilidades en el mismo. Como se ve en la Figura 2, el costo por inestabilidades se incrementa más rápido que los beneficios a ángulos de talud muy altos. Por lo anterior, el beneficio neto obtenido de restar a los beneficios el costo por inestabilidades tiene un máximo. Así, el ángulo de talud al que ocurre este máximo es el ángulo óptimo para diseño ya que minar a ángulos de talud mayores o menores resultaría en un menor beneficio económico neto.

En el contexto anterior, el *diseño de taludes* es el proceso para la determinación del ángulo de talud óptimo para su uso en el diseño del tajo. El presente trabajo describe los criterios y metodología utilizados dentro del *diseño de taludes*, con énfasis en las técnicas probabilísticas de análisis, control geotécnico de taludes durante la vida de la mina y filosofía en la toma de decisiones para la selección de ángulos de diseño económicamente óptimos.

2.0 MARCO DE REFERENCIA EN EL DISEÑO DE TALUDES

2.1 Estabilidad de un Talud ⁽²⁾

Desde un punto de vista mecánico simple, la *estabilidad de un talud* es la relación entre la resistencia del material y los esfuerzos impuestos al mismo. Si el esfuerzo excede a la resistencia, el talud es inestable; por el contrario, si la resistencia excede el esfuerzo, el talud es estable. Esta relación ha sido denominada factor de seguridad y ha sido la base para los análisis

¹ Call & Nicholas, Inc., 2475 N. Coyote Drive, Tucson, AZ 85745, USA. Tel: 520-670 9774, Fax: 520-670 9251, C.E.: cni@goodnet.com

² En el contexto de este trabajo, el término *falla o falla de talud*, se refiere a una masa de roca con movimiento en el talud, o bien a un deslizamiento de material en el mismo.

de estabilidad en la ingeniería civil por muchos años, y en una cantidad considerable de análisis de estabilidad en minería. Debido a la variabilidad de los factores implicados en la estabilidad de un talud tales como las propiedades físicas de las rocas y la influencia de otros factores inciertos tales como sismos y lluvias, los esfuerzos y resistencias usados en los análisis de estabilidad no son valores únicos sino estimaciones de poblaciones estadísticas con distribuciones significativas. Por esta razón es que se usan factores de seguridad mayores a uno en los diseños de taludes. De acuerdo a esto, si bien el criterio factor de seguridad tiene algunas aplicaciones importantes, tiene la limitación de que podría llevar a evaluaciones imprecisas, si no se tiene una buena base de información y esta se maneja adecuadamente. Una alternativa para definir la estabilidad de un talud es utilizar el método de la confiabilidad, en donde la probabilidad de que un talud sea o no estable se calcula de las distribuciones estadísticas de los factores implicados en la estabilidad del talud.

Un concepto importante en el diseño de taludes en tajos es que la *inestabilidad de un talud* no necesariamente significa una *falla de talud* desde el punto de vista operacional. El significado e impacto de una *falla del talud* depende de las características y situación particular en que la falla ocurre. El que un talud inestable resulte o no en un costo importante para la operación depende del tipo de operación minera, la velocidad de movimiento, y la relación entre el material inestable y la operación minera. Históricamente se han minado exitosamente sectores en tajos con movimientos de hasta 10 cm/día. Por el contrario, unos pocos centímetros de movimiento en el área de una trituradora u otra instalación en la mina podría ser de consecuencias graves. En general, un falla de talud es operacional cuando el movimiento del mismo interrumpe la operación o causa daños en las instalaciones mineras.

2.2 Taludes en Obras Civiles vs. Taludes Mineros

El ambiente para el diseño de taludes mineros es particular, y existen diferencias importantes con el diseño de taludes en obras civiles, y esto tiene un fuerte impacto en los requerimientos y costo de la ingeniería de taludes. Muchas de las técnicas y criterios de análisis de taludes se desarrollaron originalmente para su aplicación en obras civiles mientras, como ya se dijo, el ambiente en minería es muy diferente. Por ejemplo, la caída de una roca de media tonelada en un camino de acarreo en un tajo muy posiblemente no tendría consecuencias en la seguridad y en las operaciones, mientras que la misma roca en un túnel de tren tendría consecuencias desastrosas.

En obras civiles se da un proceso de diseño, construcción y uso; es decir, el diseño se hace una sola vez y la obra debe diseñarse con un alto margen de seguridad ya que su uso será de muchos años y una falla puede ser desastrosa.

En un tajo minero, se da un proceso de optimizaciones sucesivas a medida que se tiene mas información y se documenta el comportamiento del terreno. De acuerdo a esto, en el diseño de taludes se efectúa un proceso iterativo en la vida de la mina que consiste en un diseño inicial, minado, recolección de información, rediseño. En este sentido, el diseño de taludes es un proceso similar a la estimación de reservas y la evaluación económica de la mina, procesos en los que también se hacen evaluaciones sucesivas a medida que se tiene más información. El diseño de taludes se efectúa en etapas debido a que no es práctico por tiempo y costo el obtener

toda la información necesaria en una etapa inicial. La Tabla 1 indica las funciones del diseño de taludes en las varias fases de la vida de una mina.

2.3 Seguridad

Otro aspecto importante en la estabilidad de taludes es el *control de taludes*. En un talud optimizado, deben esperarse algunas fallas de taludes; es decir, si en un tajo no se tienen algunas fallas de talud, muy posiblemente se está perdiendo la oportunidad de una optimización. Por otro lado, no es posible predecir el tiempo y localización de un deslizamiento y casi siempre en el diseño se utilizan análisis estáticos por lo que no se calculan velocidades y/o magnitud de movimientos. Por lo anterior, para tener condiciones de trabajo seguras y minimizar el impacto económico de posibles inestabilidades, es necesario establecer un programa de monitoreo de movimientos en taludes para detectar oportunamente desplazamientos peligrosos. Con un programa de control adecuado, es posible minar taludes a altos ángulos con una seguridad adecuada.

2.4 Costo de Ingeniería de Taludes

Una objeción común para desarrollar estudios de optimización de taludes es el supuesto *alto* costo de los mismos. Sin embargo, según se ha mencionado, los ángulos de talud tienen un fuerte impacto económico en la economía de un tajo minero, frecuentemente en la disminución significativa de los volúmenes de estéril a remover. Otro beneficio, principalmente en proyectos nuevos, es la detección oportuna de problemas de estabilidad mayores, que pueden representar desde interferencias a la operación hasta la pérdida de sectores significativos en la mina. Bajo estas consideraciones, el costo de la ingeniería de taludes, es relativamente bajo.

3.0 METODOLOGIA EN EL DISEÑO DE TALUDES

3.1 Geometría de Talud

Para el diseño de taludes se analizan los tres componentes mayores de la geometría de un talud minero como son: configuración de bancos, ángulo de talud entrerampas y ángulo de talud general (Figura 3). La configuración de banco está definida por la altura de banco, ángulo de la cara de banco y el ancho de banco (berma); el ángulo entrerampas es definido a su vez por la configuración de banco, y el ángulo general es definido por las secciones entrerampas separadas por caminos de acarreo o niveles de trabajo. Si las estructuras geológicas de longitud mayor no tienen la posibilidad de fallas de talud grandes y si las fracturas menores tienen longitudes cortas, entonces todos los ángulos de talud dependerán de la configuración de banco.

3.2 Sectores de Diseño

Los ángulos de talud dentro de un tajo minero están influenciados por la litología, resistencia de rocas, estructura geológica, condiciones geohidrológicas, altura y orientación del talud, morfología del mineral, y condiciones operacionales. Los sectores de diseño son áreas dentro del tajo donde estos factores son similares o tendrán un impacto similar en la estabilidad del talud. La Figura 4 es un ejemplo de sectores de diseño en un tajo minero. Los principales factores usados para definir los límites de los sectores de diseño son los siguientes:

- Límites de los dominios estructurales en el área.
- Contactos litológicos.
- Orientación del talud.

La determinación de sectores de diseño, y en general el diseño de taludes es necesariamente un proceso iterativo. Para efectuar un análisis de diseño de taludes se necesita la localización y geometría de taludes, pero a su vez el ingeniero de planeación requiere ángulos de talud para diseñar la geometría del tajo. En consecuencia, un plan de tajo inicial debe realizarse usando ángulos de talud asumidos. Entonces se seleccionan sectores de diseño y se determinan ángulos de talud óptimos. Con estos ángulos, el tajo debe rediseñarse y los ángulos reevaluados en base a la nueva geometría. El proceso de diseño de tajo puede efectuarse en tiempos y costos relativamente bajos con los sistemas computarizados disponibles actualmente.

3.3 Modelos de Falla

Para realizar el análisis de estabilidad inicialmente se debe seleccionar el o los modelos numéricos de los posibles mecanismos de falla. Estos modelos son simplificaciones geométricas de los mecanismos de falla reales esperados en el talud. Sin embargo, es muy importante identificar los posibles modelos de falla en taludes en las etapas iniciales de un estudio de diseño de taludes, ya que en base a esto la recolección de datos se enfocará en la información más significativa para el estudio.

Para una masa de roca compleja, predecir y describir una geometría de falla es extremadamente difícil. En consecuencia, para estimar la respuesta esperada de la masa de roca, se utilizan modelos de falla simplificados y estimaciones estadísticas de la variabilidad de las características de la masa de roca.

Algunos modelos típicos de falla se presentan en la Figura 5 y a continuación se presenta en forma general una descripción de los diferentes modelos de falla.

Deterioro Progresivo (Ravelling)

El deterioro progresivo de bancos por la caída de rocas relativamente menores, usualmente ocurre en taludes donde la estructura geológica produce una masa de roca caracterizada por múltiples bloques que fácilmente se mueven hacia cualquier superficie libre.

Los bloques sueltos se acumulan en las bermas y, si no son removidos, pueden causar acumulaciones que desborden a las bermas de contención. Una variante de lo anterior es la ocurrencia de rocas altamente alteradas que se disgregan progresivamente al ser expuestas a la intemperie.

Existen algunos métodos analíticos y teóricos para el análisis limitado del *deterioro progresivo*, pero el enfoque práctico al problema es minimizar la cantidad de material muy deteriorado, susceptible de caer, mediante el uso de voladuras controladas en la excavación de bancos.

Falla Rotacional

El modelo de falla rotacional es usado para evaluar la estabilidad de taludes que: (1) están compuestos por material con muy baja resistencia de roca intacta y estructura geológica muy limitada o inexistente, y (2) los constituyen materiales altamente fracturados en forma irregular. En este caso se asume una superficie de falla circular o semi-circular que representa la trayectoria de la relación mínima de la relación resistencia al corte a esfuerzo cortante. El análisis de este modelo determina la posición de esta superficie crítica de falla que es una función de la geometría de talud, resistencia del material, densidades y condiciones de agua subterránea. Si se usa una simulación tipo Monte Carlo, las propiedades de los materiales se cambian para diferentes ángulos de talud y niveles piezométricos. La distribución resultante de la relación de resistencia al corte a esfuerzo cortante proporciona una estimación de la probabilidad de falla.

Bloque

El modelo de falla de bloque ocurre cuando una estructura geológica tiene un rumbo paralelo o semiparalelo al rumbo de la cara del talud y cuyo buzamineto es menor que el ángulo de talud. El análisis de bloque determina el riesgo de deslizamiento a través de estructuras de este tipo. Los factores que controlan el análisis de bloque deslizante son: (1) orientaciones de las estructuras, lo cual determina si existen estructuras cinemáticamente factibles de deslizarse; (2) longitudes de estructuras, que determina la probabilidad de tener estructuras continuas o de gran longitud; (3) espaciado de estructuras, la cual indica el número de superficies de falla potenciales en el talud; y (4) resistencia al corte de la estructura, la cual determina la probabilidad de que, si la estructura cumple los otros criterios, el talud se mueva a través de dicha estructura.

Bloque Escalonado

En una falla en bloque escalonado, al igual que en un bloque simple, el movimiento ocurre a través de estructuras subparalelas al talud. Si embargo, mientras que en un bloque deslizante el movimiento ocurre a través de una sola superficie, en el modelo de bloque escalonado se asume que la falla se debe al movimiento combinado a través de superficies de fracturas múltiples que buzanan hacia la excavación (sistema principal de fracturas) y separación a través de fracturas que son aproximadamente perpendiculares al sistema principal (sistema de

fracturas cruzadas) o bien por falla a tensión de la roca intacta que conecta las fracturas del sistema principal. El modelo de bloque escalonado es más común que el de bloque simple ya que no depende de la continuidad de las fracturas del sistema principal.

Cuña Simple

La geometría de cuña simple es el resultado de dos estructuras geológicas que se intersectan formando un prisma de material que puede moverse hacia la excavación. El peso del material combinado con presiones de poro hacen que la cuña se deslice a través de la línea de intersección de las dos estructuras. Para ser cinemáticamente factible, la línea de intersección debe quedar sin apoyo con la excavación. Esto implica que la inclinación de la línea de intersección debe ser menor que el ángulo de talud y debe estar dirigida hacia la cara del talud.

Cuña Escalonada

La cuña escalonada es similar a la cuña simple, pero en este caso las estructuras que intersectan para formar la cuña no necesitan ser continuas. Al igual que en el bloque escalonado, la combinación de sistemas de estructuras forman la superficie de falla. Una variación de este modelo es una cuña formada en un lado por una estructura plana única y en el lado opuesto por una superficie escalonada.

Vuelco de Bloques (Toppling)

Para el mecanismo de vuelco de bloques se requiere que ocurran secciones delgadas de roca de forma tabular (columnas) que buzen en dirección contraria a la cara del talud. Para que este tipo de falla sea factible, el vector del centro de gravedad de las columnas debe estar dirigido hacia afuera de sus bases. Este mecanismo ha sido propuesto como un modo primario de falla por algunos autores (Goodman, 1980; Hoek & Bray, 1981; Brown, 1981). Sin embargo, en muchos casos se ha observado que ocurre deslizamiento a través de una superficie de falla inclinada hacia el tajo y trituramiento/deformación de roca en la zona de la pata de taludes antes de que se presente el vuelco de bloques. Por esto, la deformación de la pata y generación de una superficie de falla es el mecanismo de falla primario, siendo el vuelco de bloques un mecanismo secundario que tiene implicaciones en el deterioro progresivo del talud pero que no debe ser usado como el análisis base de un diseño de taludes.

Superficie General de Falla

Cuando en el talud ocurre una estructura única, tal como una falla o un contacto litológico, o una combinación de estructuras únicas, creando una superficie potencial de falla, la estabilidad es analizada usando un modelo de superficie general de falla. En este caso, la geometría de la superficie de falla es considerada única.

3.4 Análisis Para Determinación de Taludes Optimos

El objetivo de un estudio de diseño de taludes es definir el ángulo de talud más alto posible a un nivel de estabilidad que no tendrá un impacto adverso en las operaciones. Dicho ángulo se determina realizando análisis de ingeniería a fin de evaluar la estabilidad de bancos, el ángulo de talud entrerampas y el ángulo de talud general. Esta sección presenta una descripción de los criterios y métodos para realizar estos análisis.

El diseño de taludes es un proceso iterativo, en donde la localización de caminos de acarreo frecuentemente depende de los taludes entrerampas permisibles. En consecuencia, en los estudios de diseño de taludes, se recomiendan taludes entrerampas para diseño de tajo, a menos que la estabilidad del talud general esté limitada por estructuras mayores o una masa de roca de muy baja resistencia.

La Figura 6 es una carta de flujo del proceso de diseño de taludes desde la recolección de datos necesarios hasta el diseño de mina.

Diseño de Bancos

El diseño de bancos es un caso especial del análisis geotécnico de confiabilidad. Las caras de los bancos normalmente son minadas a ángulos tan elevados como sea posible; teniendo como resultado, que la caída de rocas sueltas y rezaga sea inevitable. Por esto, es usual, y en muchos casos obligado por la ley minera, que se dejen bancos de contención en el talud del tajo a fin de retener los rodados de roca y rezaga.

La configuración de banco está gobernada por consideraciones de seguridad bajo el criterio de mantener un ancho mínimo de bermas de contención. El propósito de las bermas de contención es detener rocas que caen de bancos en niveles superiores a fin de que estas no lleguen a las áreas donde trabaja personal y equipos. Un criterio utilizado para determinar el ancho mínimo de bermas es el propuesto por Ritchie (1963) y modificado por Call & Nicholas, Inc. para su uso en tajos mineros; este criterio es:

$$\text{Ancho M\u00ednimo de Berma} = 4.6 \text{ metros} + (0.2 * \text{Altura de Banco})$$

Por ejemplo, un diseño a bancos sencillos de 15 metros de altura requerir\u00eda de un ancho m\u00ednimo de berma de 7.6 metros.

Para una altura de banco dada y el correspondiente ancho de berma, el l\u00edmite superior del \u00e1ngulo entrerampas se convierte en una funci\u00f3n del \u00e1ngulo de la cara del banco (Figura 7).

El \u00e1ngulo de la cara del banco, sin embargo, no es un valor \u00fanico debido a que la variabilidad que la f\u00e1brica de la roca produce una magnitud variable en el sobrerompimiento de la cara del banco. El sobrerompimiento se define como la distancia entre la cresta de dise\u00f1o del banco y la cresta real del mismo. La Figura 8 es un ejemplo de la distribuci\u00f3n de la frecuencia acumulativa de \u00e1ngulos de cara de banco medidos y \u00e1ngulos de cara de banco te\u00f3ricos. El \u00e1ngulo te\u00f3rico de la cara del banco es obtenido del an\u00e1lisis de estabilidad, asumiendo una cara de banco vertical, y es el l\u00edmite superior de \u00e1ngulos de cara de banco posibles debido a que no incluye los efectos de voladuras y rezagado. La comparaci\u00f3n de \u00e1ngulos te\u00f3ricos y medidos en muchas localidades indic\u00f3 una diferencia de 17 a 20 grados, excepto cuando la cara del banco

era controlada por una estructura geológica bien definida, tal como estratificación o foliación. En esos casos, los ángulos de cara de banco teóricos y medidos fueron los mismos.

Para una mina en operación, los ángulos de cara medidos o los ángulos teóricos ajustados pueden ser usados para el diseño. Para una nueva localidad, el ángulo de cara de talud teórico ajustado para los efectos de voladuras debe ser usado. En estos casos, deben usarse ángulos de cara de banco con un 70 a 90% de confiabilidad, ya que si se escoge el ángulo promedio de la cara de banco, esto provocaría que un 50% de las bermas de contención tuvieran menos del ancho mínimo requerido, o del ángulo de talud mínimo, lo cual resultaría en taludes de bajo ángulo innecesarios. Se recomienda que la confiabilidad de una berma de contención sea escogida en base a la caída potencial de rocas y la exposición de personal en el área. Las bermas de contención en zonas con rodados minadas con cargadores frontales deben tener una confiabilidad mayor que las bermas de contención en terreno masivo minado con palas mecánicas grandes. Un ángulo de cara de banco debe ser entonces escogido a fin de que proporcione la confiabilidad deseada. Por ejemplo, si un 80% de confiabilidad es el deseado, el ángulo de cara de banco sería el ángulo para el que el 80% de las caras de banco tengan un ángulo más elevado que el ángulo de diseño. Usando este criterio de confiabilidad, el 80% de las bermas tendrán un ancho mayor que el mínimo requerido (Figura 9).

Análisis de Taludes Entrerampas

Una vez que se ha determinado la configuración de bancos factible, el siguiente paso es determinar si el ángulo entrerampas obtenido de esta configuración de bancos es apropiado. Esto se realiza evaluando la probabilidad de fallas de bancos múltiples en el talud controladas por fallas geológicas identificadas en el talud. Específicamente, se calculan las probabilidades de falla y tonelajes de falla de deslizamientos tipo cuña y bloque en los sectores de diseño del tajo para un rango de ángulos de talud entrerampas. Lo anterior permite evaluar el riesgo de fallas de bancos múltiples para diferentes geometrías de talud.

El diseño entrerampas involucra el uso de la localización espacial, estadísticas de longitud y espaciado, y resistencia al corte de fallas geológicas individuales, con el objetivo de predecir la posibilidad de fallas de bancos múltiples de tipo cuña (intersección de dos fallas) y bloque (por una sola falla). De acuerdo a esto, la precisión del número de fallas y los tonelajes de falla dependen de la calidad de los datos de orientación, longitud, y espaciado en la información de la población de fallas geológicas en el área de estudio. La base de datos debe ser lo suficientemente grande para representar el área de estudio para todas las orientaciones de talud esperadas.

Una vez determinados los ángulos de talud con los tonelajes de falla asociados, estos datos se pueden utilizar para hacer un análisis de costo-beneficio en el que se puede determinar el ángulo de talud óptimo basado en la economía. Si no se realiza un análisis costo-beneficio completo, dos alternativas más sencillas son: (1) comparar el tonelaje de reducción de descapote (beneficio) contra el correspondiente incremento en tonelaje de falla (costo); o bien, (2) revisar las gráficas de número y tonelaje de fallas incrementales, las que es común que muestren ángulos a partir de los cuales el incremento en fallas y tonelaje es muy fuerte; en este último caso se puede asumir que el ángulo en donde empieza el incremento fuerte de inestabilidades es el máximo ángulo entrerampas factible.

En el caso del análisis costo-beneficio completo, el ángulo óptimo es al ángulo al que el costo de remover el tonelaje de falla iguala al beneficio de remover menos estéril. Si éste ángulo es más bajo que el ángulo determinado en el análisis de bancos, el ángulo determinado en el análisis entrerampas es el recomendado para diseño de tajo. Por el contrario, si el ángulo óptimo determinado del análisis entrerampas es más alto que el determinado del análisis de bancos, entonces el ángulo basado en el análisis de bancos será el recomendado.

Análisis de Talud General

Una vez que se determinan los ángulos de taludes en base a los análisis de bancos y entrerampas, se evalúa la posibilidad de que en alguna de las paredes del tajo ocurra una inestabilidad del talud general, que involucre la altura total del talud. Este análisis se realiza porque siempre existe la posibilidad de que los esfuerzos producidos por la altura total del talud pudieran exceder la resistencia de masa de roca. Si el análisis de la configuración de talud general indica un talud estable, entonces se recomienda el ángulo de talud entrerampas para diseño; si el talud general resulta inestable, es necesario reducir el ángulo de talud entrerampas o bien cambiar la geometría de la pata del talud general para lograr una configuración estable.

3.5 Probabilidad de Falla

La probabilidad de falla es una metodología de análisis utilizada casi siempre en los análisis de bancos y entrerampas, al igual que en algunos casos de análisis de talud general. A continuación se describe la metodología de este análisis.

La determinación de la probabilidad de inestabilidad en un talud depende de la medida en que se puedan cuantificar el carácter variable de los parámetros geológicos. Las características geológicas físicas tales como la longitud de discontinuidades, orientaciones, espaciados, y resistencia al corte varían dentro de la masa de roca, por lo que se utilizan distribuciones estadísticas para representar estos parámetros geológicos. La estimación de estas distribuciones estadísticas generalmente requiere de una muestra estadística adecuada, que normalmente consiste de un alto número de observaciones.

En modelos de falla controlados estructuralmente, la probabilidad de falla (P_f) para una ocurrencia aislada de un modelo de falla especificado tiene tres partes.

1. La probabilidad de que exista el echado (P_d);
2. La probabilidad de que la estructura sea suficientemente continua (P_I); y
3. La probabilidad de deslizamiento (P_s).

La probabilidad del echado (P_d) y la probabilidad de la continuidad (P_I) son calculadas a partir de distribuciones estadísticas de las estructuras geológicas.

La probabilidad de deslizamiento (P_s) es determinada mediante la probabilidad de que el esfuerzo cortante exceda la resistencia a través de la superficie de falla. Esta probabilidad es calculada a partir de la distribución de factores de seguridad generados ya sea por una simulación Monte Carlo o por la aplicación de modelos matemáticos de forma cerrada.

Usando la media y desviación estándar de la distribución de los factores de seguridad y asumiendo una distribución estándar normal, la probabilidad de deslizamiento, o el porcentaje del área total de la distribución menor de 1.0, pueden ser calculados.

La probabilidad de falla (Pf) para la ocurrencia aislada de un tipo particular de deslizamiento es la probabilidad de que el mecanismo sea viable y de que se desplace.

$$P_f = P_l * P_d * P_s$$

Puesto que más de una ocurrencia potencial de un modo especificado de falla puede ocurrir en un sector de diseño, el número esperado de fallas es la probabilidad de falla multiplicada por la probabilidad de ocurrencia de las estructuras que constituyen la geometría del deslizamiento. A pesar de que el número real de fallas que ocurrirán puede ser mayor o menor que el número esperado, este es el mejor estimado para diseño.

Utilizando el número esperado de fallas y los volúmenes de falla calculados en el análisis de estabilidad, se pueden desarrollar curvas de probabilidad de falla y volúmenes de falla esperados (Figura 10). Las curvas para todos los modos potenciales de falla pueden ser combinadas para producir una curva de volumen de falla esperado para cada sector de diseño (Figura 11).

3.6 Análisis Costo-Beneficio

El análisis costo-beneficio se realiza dentro de los análisis de taludes entrerampas. Según se mencionó en la sección de análisis entrerampas el análisis costo-beneficio puede efectuarse en forma completa a detalle, o bien solo realizar una revisión comparando tonelajes de descapote reducido contra tonelajes en falla y/o definir ángulos a partir de los cuales el incremento en fallas es drástico.

Cuando se realiza un análisis de costo-beneficio completo, el ángulo de talud óptimo económico se determina calculando el costo incremental de fallas de talud y el beneficio incremental por aumento del ángulo de talud (Figura 2). Si el beneficio incremental es mayor que el costo incremental, es costeable aumentar el ángulo de talud. Una vez que el costo excede el beneficio incremental, se hace incosteable incrementar el ángulo de talud. En general, el beneficio incremental decrece y el costo incremental crece con el aumento del ángulo de talud. En la Figura 2, el ángulo al que las dos curvas se cruzan es el económicamente óptimo.

El costo de fallas de talud se determina asignando modelos de costo a los volúmenes de fallas esperados y posibles respuestas mineras. El beneficio es el valor de mercado del mineral recuperable menos los costos de minado y beneficio. Los modelos de costo y el análisis de costo-beneficio se discuten a mayor detalle por Kim (1977).

Un análisis más sofisticado es correr una simulación Monte Carlo de los planes de minado secuenciados, aplicando las probabilidades de falla a fin de incluir los costos por fallas de talud en el análisis de flujo de efectivo. De esta forma, se pueden incluir el efecto de fallas en taludes de fases intermedias y el costo del dinero en el tiempo. Este tipo de análisis fué desarrollado para el *Pit Slope Manual* de CANMET (Kim, 1977).

3.7 Criterio Para Seleccion de Angulos de Talud Para Diseño

Dependiendo de la geología, el ángulo de talud para diseño de tajo en un sector dado puede ser controlado por los resultados analíticos de cualquiera de los tres segmentos de la geometría del talud, como son: bancos, talud entrerampas, o talud general. El análisis de estos tres componentes del talud asegura que el ángulo de talud recomendado es adecuado para la configuración real del talud en el tajo. En otras palabras, el ángulo más bajo determinado del análisis de los tres componentes de la geometría del tajo define el límite del diseño de taludes y es el ángulo que se recomienda.

Por otro lado, el análisis utilizando el criterio de probabilidad de falla, proporciona una metodología mediante la cual los riesgos y costos de falla pueden ser comparados con los beneficios correspondientes para cualquier diseño de tajo definiendo así un diseño optimizado. Por el contrario, un criterio de factor de seguridad no considera un riesgo significativo ni prevee un costo por fallas. Este aspecto conservador es solo aparente y puede llevar a evaluaciones imprecisas, como lo evidencian un número considerable de fallas mayores en taludes supuestamente *seguros*.

El hecho de que un talud se diseñe con un cierto riesgo de falla no debe verse como una falta de consideración de la seguridad. Casi cualquier opción de minado viable tiene alguna probabilidad de falla, y es mejor conocer el nivel de riesgo y tomar medidas para el manejo del mismo.

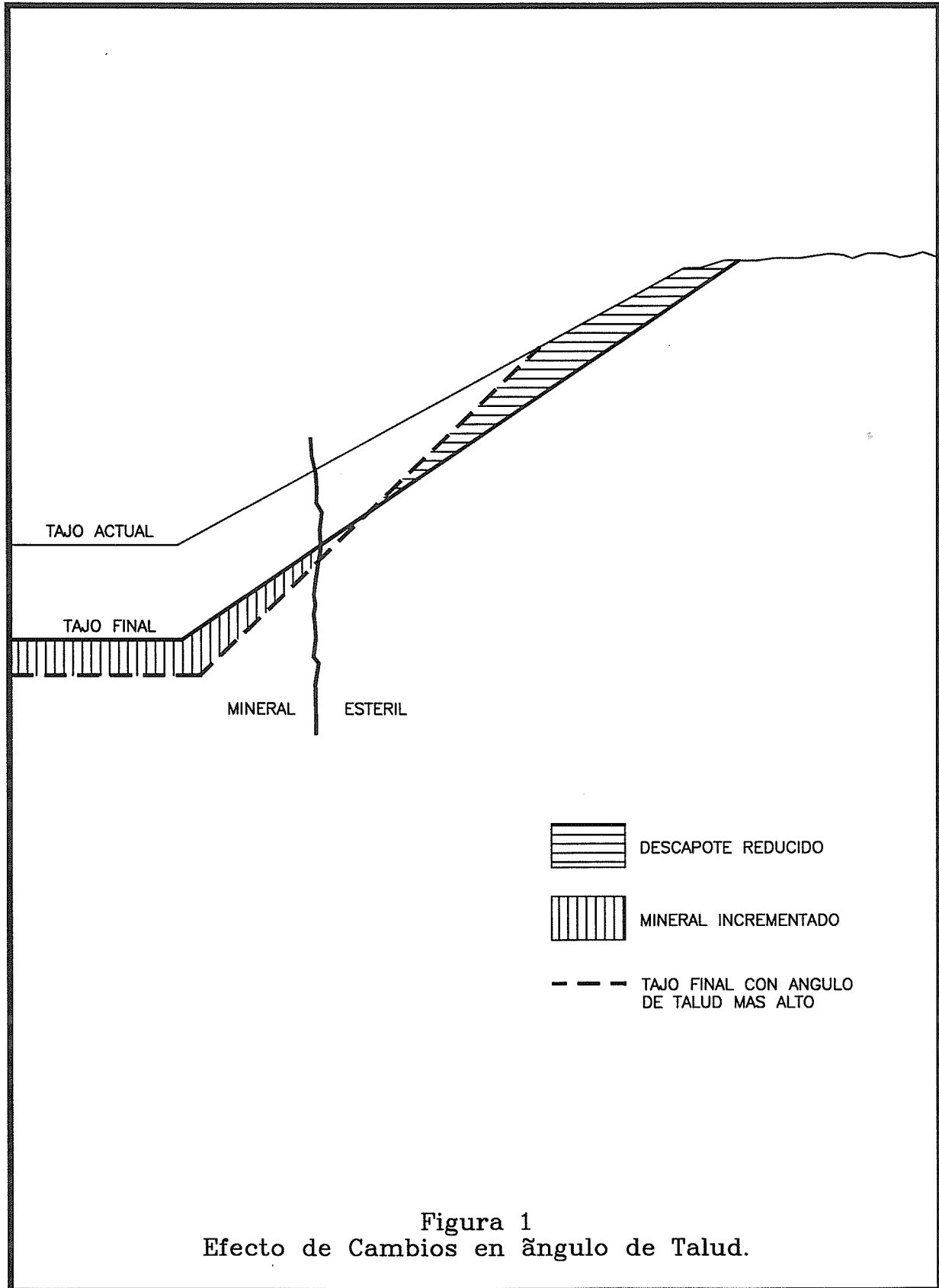
TABLA 1

DISEÑO DE TALUDES EN LAS FASES DE LA VIDA DE UNA MINA

ETAPA DE LA MINA	FUNCION DEL DISEÑO DE TALUDES
Exploración	Proporcionar ángulos de talud estimados para planes de tajo tentativos.
Viabilidad	Definir ángulos de diseño óptimos.
Diseño de Mina	Actualizar ángulos de diseño en base a datos recolectados desde la etapa de viabilidad.
Operación	Revisar ángulos en base a resultados de operación. Monitoreo y medidas correctivas.
Final de Vida de la Mina	Diseño de proyectos de recuperación máxima final de mineral. Rehabilitación área de la mina.

REFERENCIAS

- Call, R. D., 1982, "Monitoring Pit Slope Behavior", *Proceedings 3rd International Conference on Stability in Surface Mining*, SME-AIME, New York, pp. 229-248.
- Call, R. D., Savely, J. P., and Nicholas, D. E., 1976, "Estimation of Joint Set Characteristics from Surface Mapping Data". *Proceedings 17th US Symposium on Rock Mechanics*, Utah Engineering Experiment Station, University of Utah, Salt Lake City, pp. 2 B2-1 to 2 B2-9.
- Coates, D. F., 1981, "Rock Slopes", *Rock Mechanics Principles*, CANMET, Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada, pp. 6-1 to 6-75.
- Coates, D. F., ed., 1977, *Pit Slope Manual*, CANMET Report 77-5, CANMET, Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada, 126 pp.
- Evans, C.L., 1989, "The Design of Catch Bench Geometry in Surface Mines to Control Rockfall", M.Sc. thesis, University of Arizona, Tucson, 160 pp
- Harr, M. E., 1984, "Reliability-Based Design in Civil Engineering", *20th Annual Henry M. Shaw Lecture Series in Civil Engineering*, School of Engineering, North Carolina State University, Raleigh, Apr., 68 pp.
- Hoek, E., and Bray, J. W., 1974, *Rock Slope Engineering*, rev. 3rd. ed., Institution of Mining and Metallurgy, London, 358 pp.
- Kim, Y. C., et al., 1977. "Financial Computer Programs," *Pit Slope Manual Supplement 5-3*, CANMET Report 77-6, CANMET, Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada, 184 pp.
- Ritchie, A. M., 1963, "The Evaluation of Rockfill and Its Control", *Highway Record*, Vol. 17, pp. 13-28.



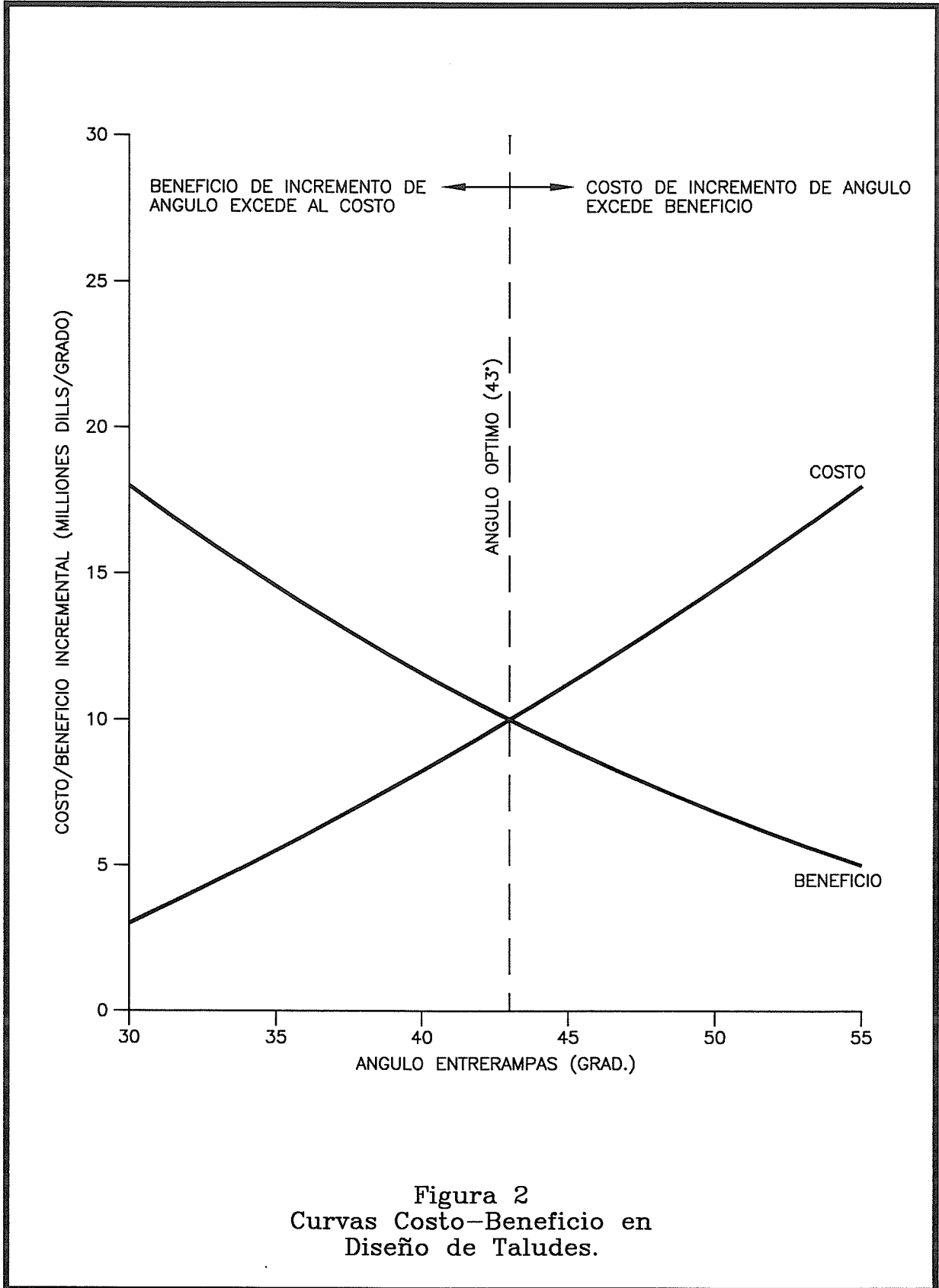


Figura 2
Curvas Costo-Beneficio en
Diseño de Taludes.

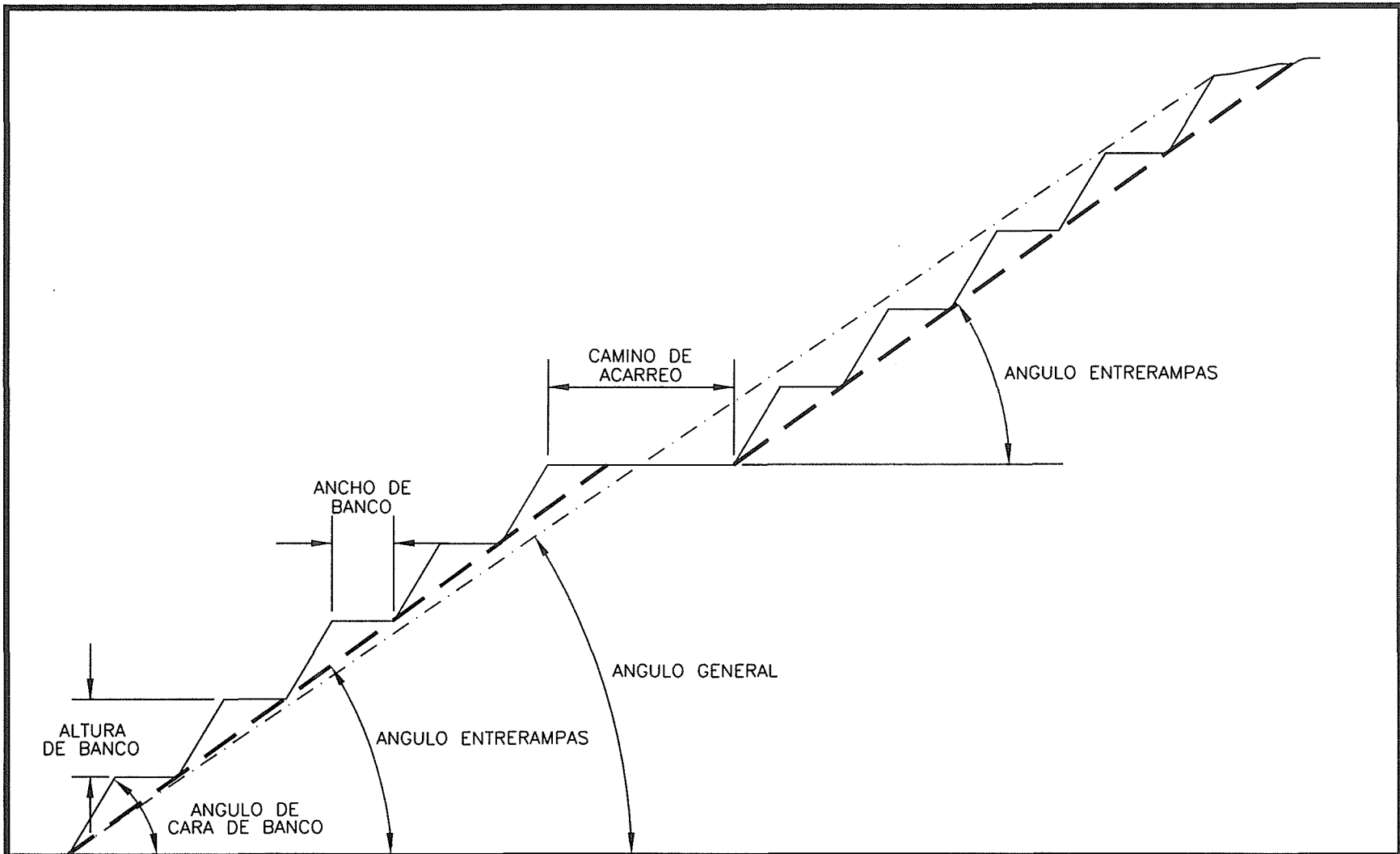


Figura 3
 Definición de Angulos de Talud de Banco
 Entrerampas y General.

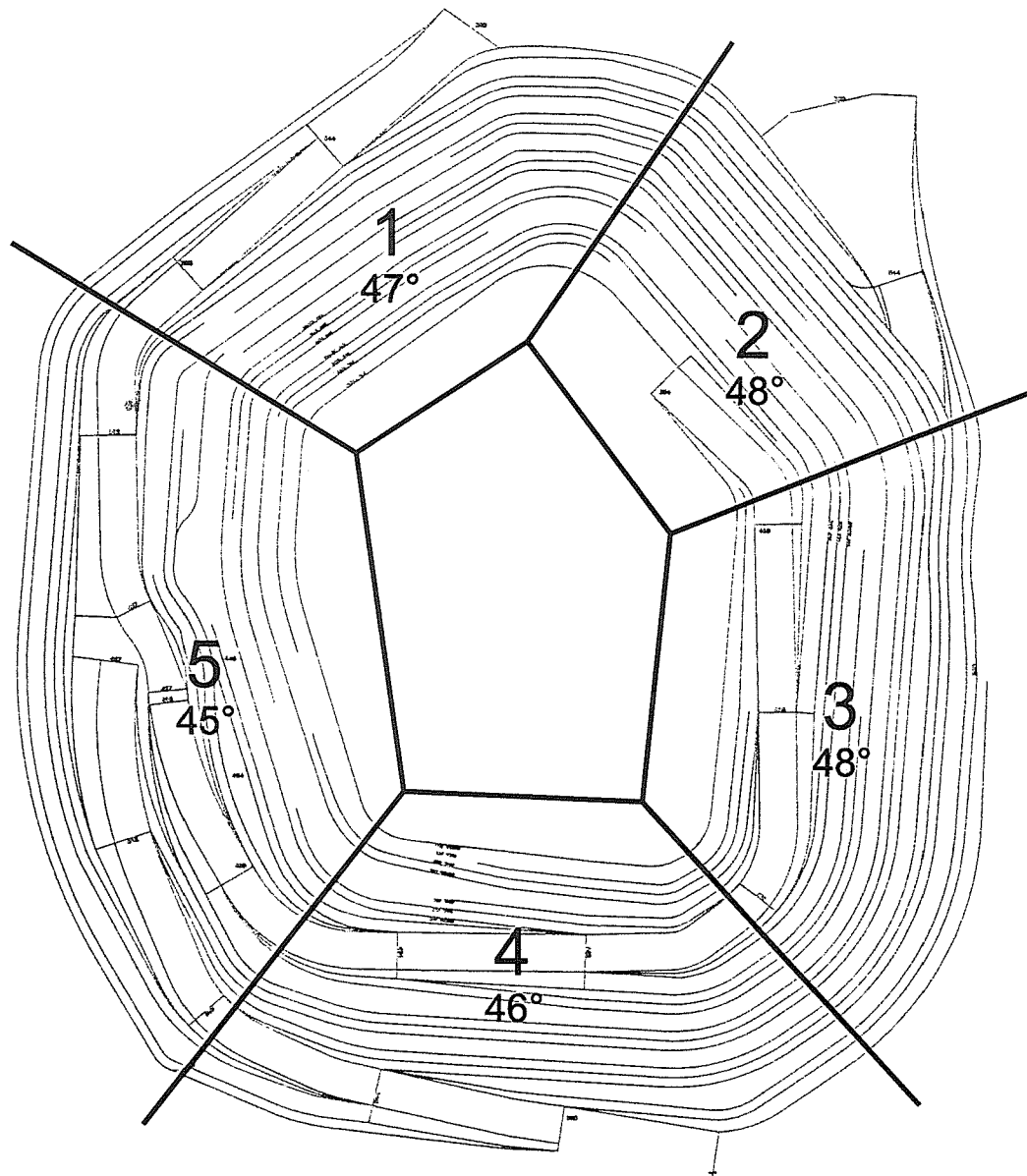
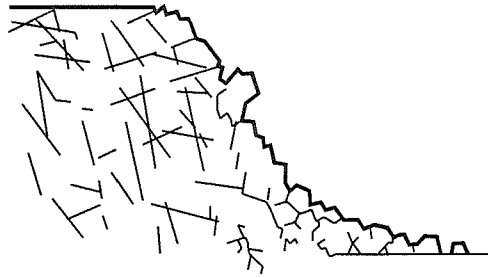
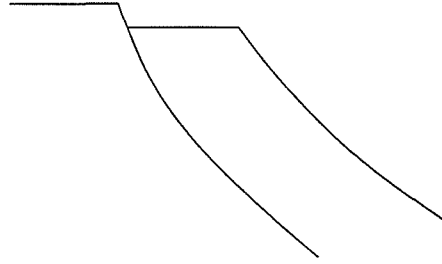


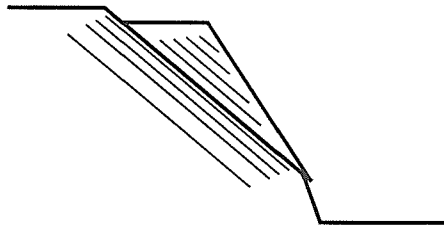
Figura 4
Ejemplo de Sectores de Diseño y
Angulos Entrerampas Recomendados.



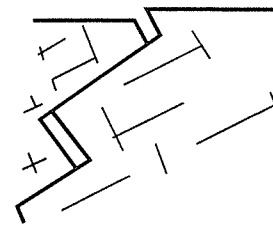
DEGRADACION PROGRESIVA



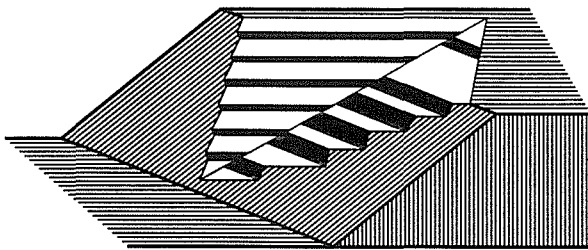
FALLA ROTACIONAL



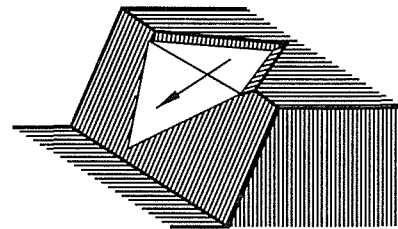
BLOQUE DESLIZANTE



BLOQUE ESCALONADO



CUÑA ESCALONADA



CUÑA SIMPLE

Figura 5
Modelos Tipicos de Falla de Taludes.

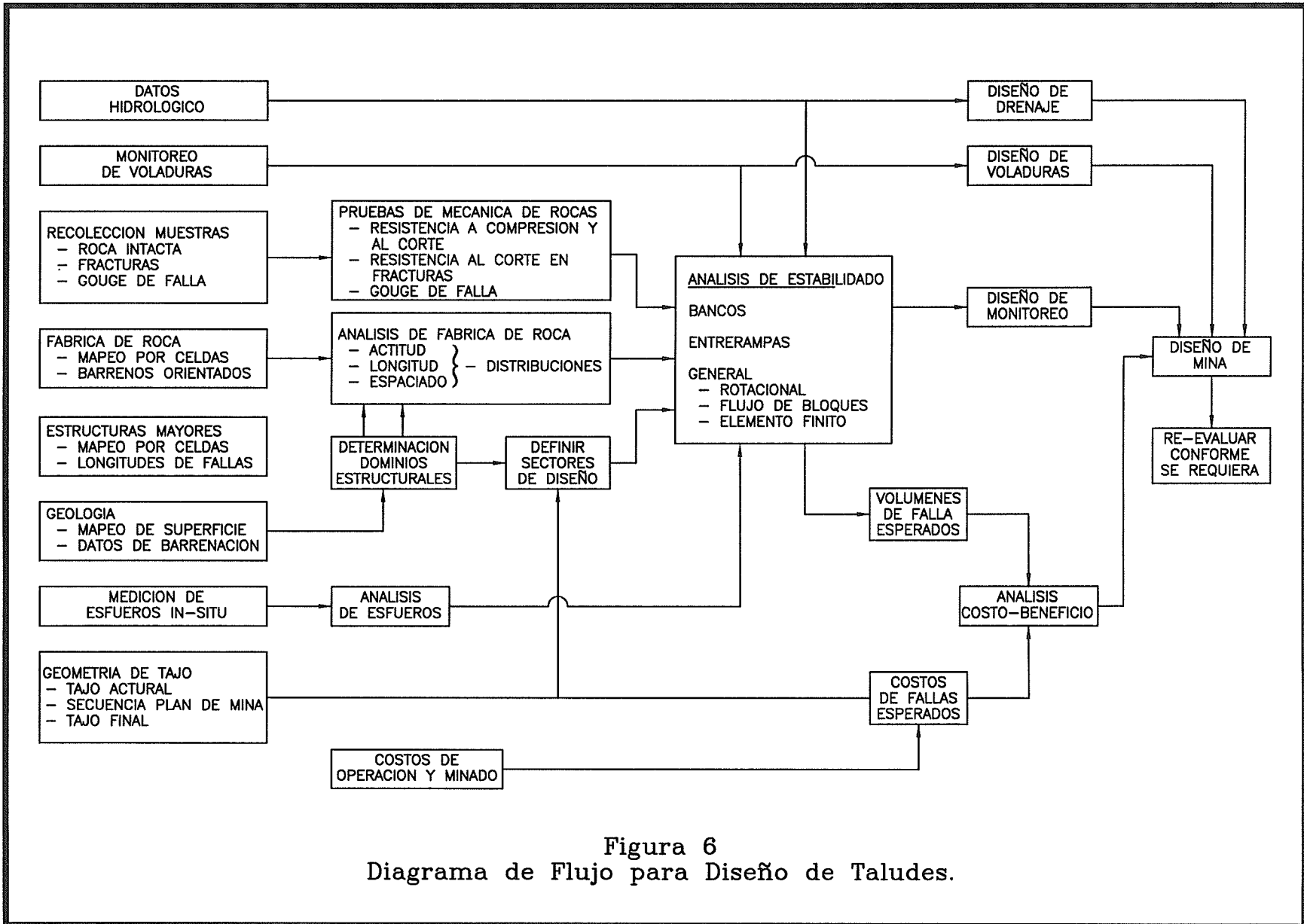
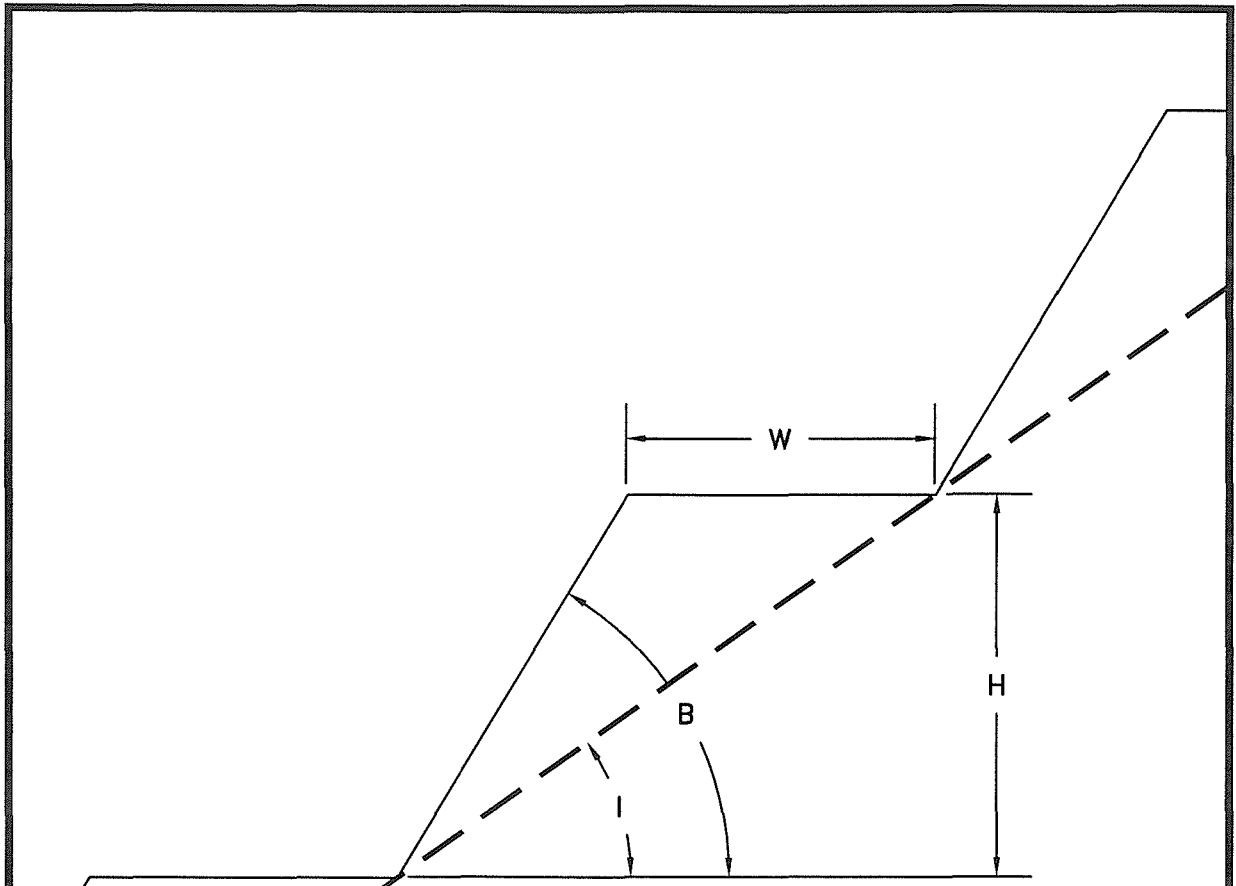


Figura 6
Diagrama de Flujo para Diseño de Taludes.



- I = Angulo Entrerampas
- B = Angulos Cara de Banco
- H = Altura de Banco
- W = Ancho de Banco
- $W = H \left(\frac{1}{\tan I} - \frac{1}{\tan B} \right)$

Ancho de Banco Recomendado Promedio
 $W = 4.6 + 0.2H$ (metros)

Angulo Talud Entrerampas
 $I = \tan^{-1} \left(\frac{H}{W + H \cot B} \right)$

Figura 7
 Relacion Entre Angulos Entrerampas y
 de Cara de Banco

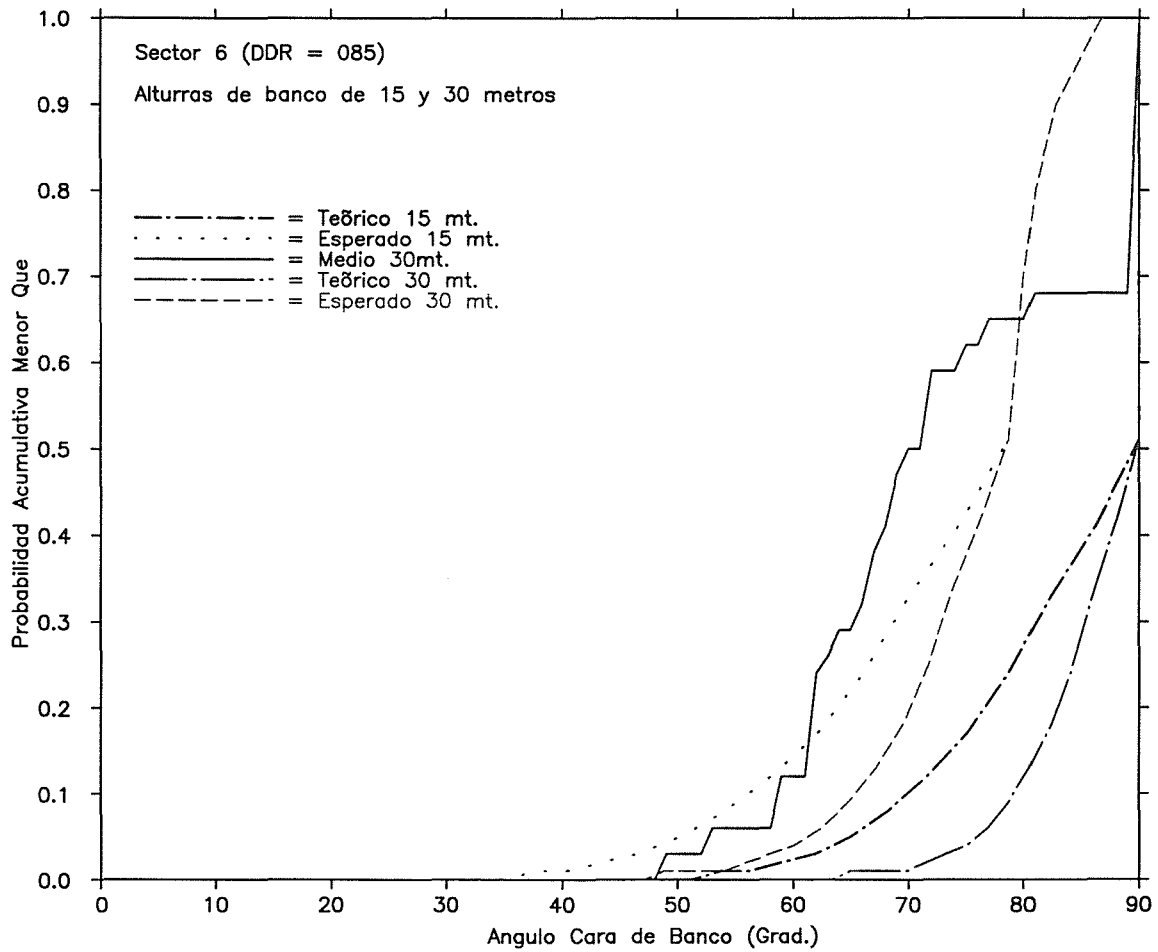


Figura 8
 Distribucion de Angulos de Cara de Banco
 Teórico, Esperado y Medido.

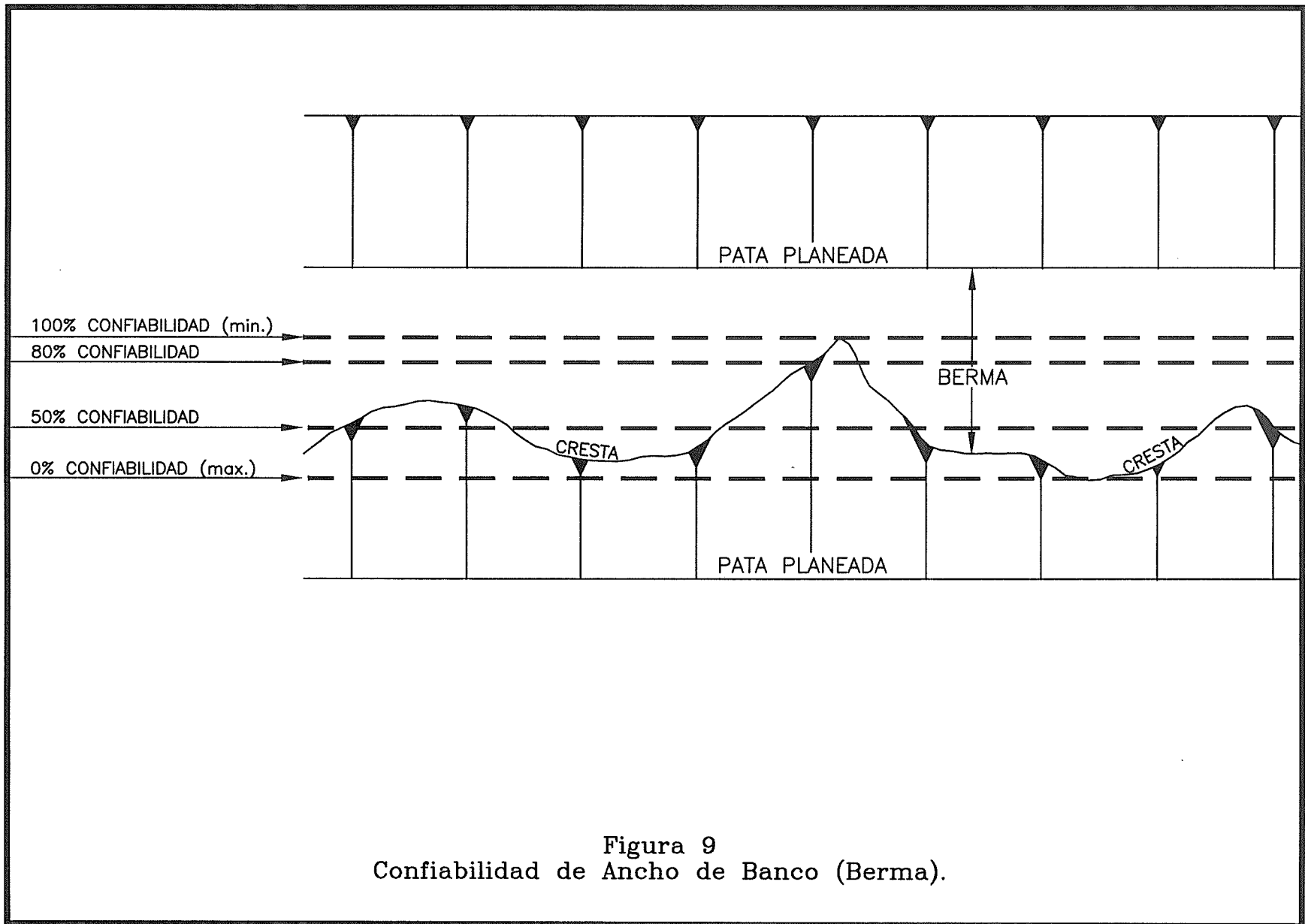


Figura 9
 Confiabilidad de Ancho de Banco (Berma).

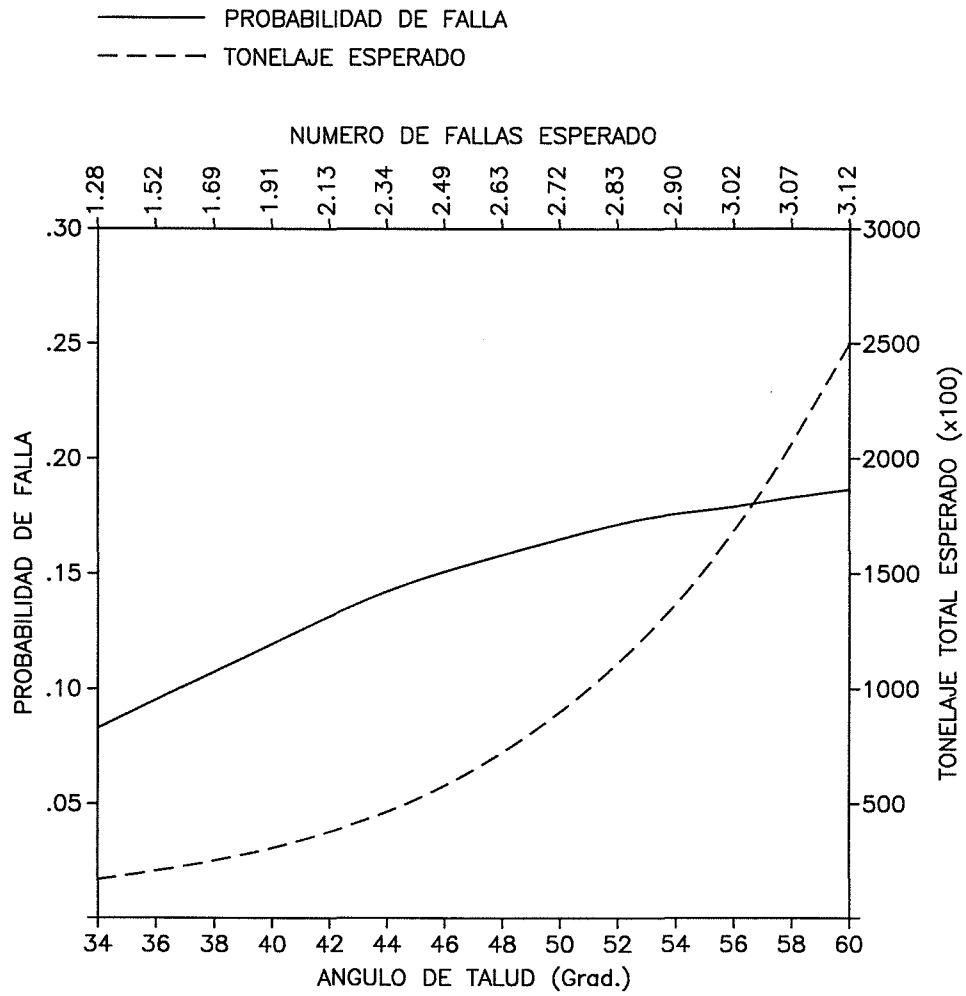


Figura 10
 Numero Esperado de Fallas y
 Tonelajes Asociados, Sector H.

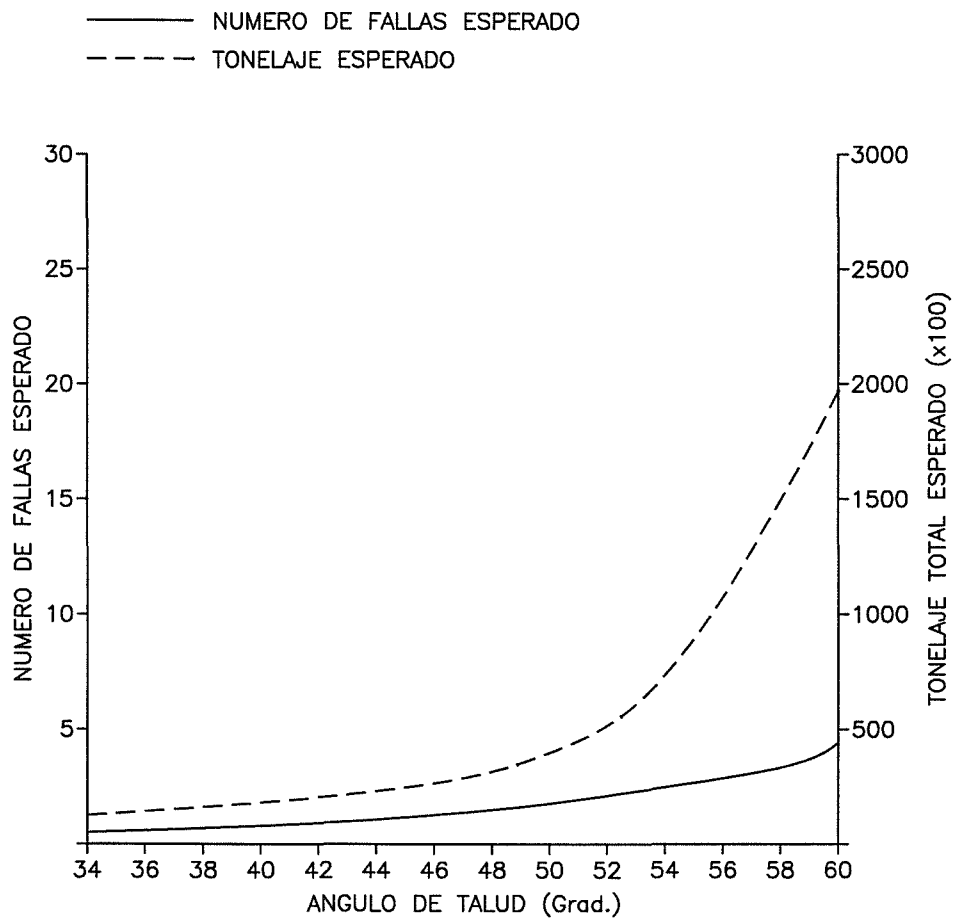


Figura 11
 Compositos de Modos de Falla, Numero de Fallas y
 Tonelajes de Falla.