

34  
2EJ



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"USO DE PROYECCIONES ESTEREOGRAFICAS  
PARA EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES  
EN MACIZOS ROCOSOS"

FALLA DE ORIGEN

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A :**

**GUILLERMO CANO ZAVALA**

DIRECTOR DE TESIS:  
M.I. AGUSTIN DEMENEGHI COLINA



MEXICO, D. F.

1995



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-200/94

Señor  
**GUILLERMO CANO ZAVALA**  
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **M.I. AGUSTIN DEMENEGHI COLINA**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

**"USO DE PROYECCIONES ESTEREOGRAFICAS PARA EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN MACIZOS ROCOSOS"**

- I. ANTECEDENTES**
- II. PRINCIPIOS DE LAS PROYECCIONES ESTEREOGRAFICAS**
- III. PROYECCION ESTEREOGRAFICA DE LINEAS**
- IV. PROYECCION ESTEREOGRAFICA DE PLANOS**
- V. ANALISIS DE ESTABILIDAD DE CUÑAS APOYADAS EN DOS PLANOS DE FALLA**
- VI. ANALISIS DE ESTABILIDAD DE CUÑAS APOYADAS EN TRES PLANOS DE FALLA**
- VII. ANALISIS COMPARATIVO DEL METODO GRAFICO CON OTRO METODO**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, a 11 de enero de 1995.  
EL DIRECTOR.

ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

H. JMCS/RCR\*nl

A mis padres :

**Blanca Rosa y Guillermo**

Con cariño , por el amor y apoyo que siempre me han brindado .

A mis hermanas :

**Blanca Rosa  
Norma Laura  
Fca. Elizabeth  
Sandra Lorena  
Ma. Angélica  
Claudia Leonor**

Deseando que logren alcanzar sus metas .

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** :

Por haberme permitido culminar una de las etapas más importantes de mi vida .

A la **Facultad de Ingeniería** :

Por brindarme la oportunidad de formarme en el ámbito profesional .

Al M.I. **Agustín Demenéggi Colina** :

Por su orientación , comentarios y apoyo en la elaboración de este trabajo .

## ÍNDICE

	PAG.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1 . ANTECEDENTES</b>	
1.1 Representación de planos en dibujos isométricos .	1
1.2 Términos geológicos .	2
1.3 Construcción de redes estereográficas .	8
1.4 Usos variados .	10
1.5 Representación gráfica de datos y mediciones de campo .	14
1.6 Errores en la obtención de datos de campo .	18
<b>2 . PRINCIPIOS DE LAS PROYECCIONES ESTEREOGRÁFICAS</b>	
2.1 Propiedades de las proyecciones estereográficas .	20
2.2 Proyección de áreas iguales .	23
2.3 Proyección de ángulos iguales .	25
<b>3 . PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA DE LÍNEAS</b>	
3.1 Proyección de una línea .	33
3.2 Obtención del ángulo entre dos líneas .	33
3.3 Proyección de un cono a una línea dada .	36
3.4 Vectores .	43
3.5 Evaluación de fuerzas en una cuña de roca deslizable .	43
<b>4 . PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA DE PLANOS</b>	
4.1 Proyección estereográfica de un plano y su polo .	46
4.2 Representación de un plano por un gran círculo .	46
4.3 Obtención del rumbo y el echado de la línea de intersección de dos planos.	50
4.4 Deslizamiento de una cuña por un plano friccionante .	56
4.4.1 Orientación de la fuerza reactiva en un plano de falla.	56
4.4.2 Estabilidad de una cuña con una fuerza de subpresión actuando.	60
4.4.3 Procedimiento gráfico para determinar la dirección del vector resultante.	63

4.4.4 Determinación del factor de seguridad de una cuña cuando actúa un vector resultante .	66
4.4.5 Mínima fuerza para causar la falla .	69
<b>5 . ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE CUÑAS APOYADAS EN DOS PLANOS DE FALLA</b>	
5.1 Deslizamiento de una cuña por dos planos .	72
5.2 Fuerzas reactivas en los planos de falla .	75
5.3 Método para localizar el límite entre las zonas estables e inestables .	75
5.4 Mínima fuerza para causar el deslizamiento de una cuña .	78
5.5 Factor de seguridad y mínima fuerza para estabilizar una cuña .	80
<b>6 . ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE CUÑAS APOYADAS EN TRES PLANOS DE FALLA</b>	
6.1 Deslizamiento de una cuña por tres planos .	86
6.2 Modos de falla de una cuña limitada por tres planos .	89
6.3 Factor de seguridad por rotación de una cuña por un plano .	92
<b>7 . ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MÉTODO GRÁFICO CON OTRO MÉTODO</b>	
7.1 Principios .	99
7.2 Análisis bidimensional .	104
7.2.1 Factor de seguridad .	104
7.2.2 Estabilidad de taludes rocosos .	105
7.3 Análisis tridimensional .	106
7.3.1 Propiedades geométricas de la cuña de deslizamiento .	108
7.3.2 Cálculo del volumen de una cuña deslizable .	109
7.3.3 Deslizamiento de una cuña por un plano .	111
7.3.4 Deslizamiento de una cuña por dos planos .	112
7.4 Cálculo del factor de seguridad por deslizamiento de una cuña usando el método vectorial .	117
7.5 Cálculo del factor de seguridad por deslizamiento de una cuña por medio del método estereográfico .	122

**CONCLUSIONES Y COMENTARIOS** 128

**BIBLIOGRAFÍA** 132



## **INTRODUCCIÓN**

El objetivo de este trabajo es dar las bases del método estereográfico para el análisis de estabilidad de taludes y comparar este método con algún otro existente para conocer su confiabilidad .

Esta tesis consta de siete capítulos , en los primeros seis capítulos se desarrolla los principios para el análisis de estabilidad de taludes por medio del método estereográfico , para concluir en el último capítulo con un ejemplo para comparar este método gráfico con otro método . El método vectorial que aquí se explica es solo en forma simple y resumida para que se pueda comprender el ejemplo mostrado . A continuación se presenta una breve explicación de cada uno de los capítulos :

En el capítulo 1 se dan los antecedentes del método estereográfico , la representación gráfica de datos geológicos de problemas geotécnicos que facilita su interpretación y reduce al mínimo las confusiones . Para poder representar a un plano basta con conocer su inclinación con respecto a la horizontal o echado , y su orientación con respecto al norte o rumbo , o también puede definirse por la dirección del echado y el echado de dicho plano .

En el capítulo 2 se presentan las propiedades de las proyecciones estereográficas, los principios de la representación de líneas y planos en el espacio, mediante la intersección de dicha línea o plano con una superficie esférica. Para una representación más clara se usa la proyección bidimensional de esta esfera. Existen dos tipos de proyecciones para generar redes polares y meridionales, que son las proyecciones de áreas iguales y de ángulos iguales.

En el capítulo 3 se explica la proyección de líneas en el espacio usando la proyección de ángulos iguales; también trata la construcción de conos friccionantes usados en el análisis de estabilidad de taludes; este análisis se divide en dos partes: primero se calcula la orientación de la máxima reacción resistente en la falla y después se determina la orientación de la resultante de fuerzas actuantes en la cuña. La representación de estas fuerzas en la estereorred nos puede indicar si la cuña es o no estable.

El capítulo 4 explica la proyección de planos en el espacio representados en cualquiera de los hemisferios de una esfera. También se analiza la estabilidad de una cuña deslizable por un solo plano de falla, estudiando los diferentes tipos de fuerzas que pueden actuar sobre la cuña, como son la subpresión del agua y fuerzas externas.

En el capítulo 5 se estudia el deslizamiento de una cuña por dos planos de falla , mediante el uso de la estereorred se representa cada plano de falla y las fuerzas que actúan en la cuña , haciendo posible definir las zonas de estabilidad e inestabilidad. En este capítulo se analizan dos posibilidades : una que la cuña se deslice por un solo plano y otra que la cuña se deslice por la línea de intersección de los planos de falla .

En el capítulo 6 se analiza la estabilidad de una cuña por tres planos de falla , dependiendo de la orientación de las fuerzas actuantes en la cuña ; el deslizamiento puede ocurrir por cualquiera de los tres planos , por la línea de intersección de dos planos o separarse de los tres planos . También se estudia el factor de seguridad en contra de rotación de la cuña por un plano de falla , conociendo el punto de aplicación de las fuerzas involucradas en dicho plano .

En el capítulo 7 se hace la comparación del método estereográfico y el método vectorial , se explican las bases de este último , el análisis bidimensional , el análisis tridimensional y el factor de seguridad por deslizamiento de una cuña , tanto por un plano como por dos planos de falla . Para poder comparar los métodos se plantea un ejemplo , el cual será resuelto por ambos métodos y se compararan los resultados .

## **CAPÍTULO I**

### **ANTECEDENTES**



## **1.1 REPRESENTACIÓN DE PLANOS EN DIBUJOS ISOMÉTRICOS**

Al visualizar mentalmente problemas estructurales representados en proyecciones estereográficas se pueden perder aspectos muy importantes cuando el ingeniero trabaja sobre diseños de excavaciones subterráneas realizadas por geólogos , ya que estos representan los datos de tal forma que los ingenieros no los comprenden con claridad . Estos problemas pueden ser resueltos cuando se emplean dibujos isométricos de los planos estructurales en estudio , para así poder representar los datos geológicos en forma más accesible .

Los ingenieros geotécnicos familiarizados con las computadoras para el análisis de planos , prefieren usar la dirección del echado más que el rumbo para definir la orientación de los planos . Si la dirección del echado y el echado de un plano son presentados como 000/00 , no se puede incurrir en errores sobre la orientación y la inclinación del plano , siendo más fácil el procesamiento de datos geológicos por medio de computadoras .

Los dibujos bidimensionales son inadecuados para representar estructuras subterráneas importantes consistentes en un conjunto geométrico muy complejo de excavaciones interconectadas en diferentes direcciones , niveles y con túneles de dimensiones diversas , por lo cual personas no familiarizadas con los detalles de diseño no captan la idea con facilidad , por lo que el uso de maquetas tridimensionales son más útiles .

## 1.2 TÉRMINOS GEOLÓGICOS .

Un plano inclinado puede ser definido por su inclinación respecto a la horizontal o echado y por su orientación respecto al norte , llamado rumbo o por la dirección del echado y el echado del plano . El rumbo puede definirse como la línea recta que intersecta al plano de la junta con un plano horizontal . El echado es la línea recta que es perpendicular a la línea de rumbo sobre el plano de la junta . El ángulo del echado , es el formado por la línea horizontal y la línea del echado y va de  $0^{\circ}$  a  $90^{\circ}$  medida de la línea horizontal a la línea de echado . La fig. 1.1 muestra lo antes explicado .

El rumbo de un plano es usado comúnmente por los geólogos para definir la orientación de un plano , por lo cual es necesario definir la dirección en la que se echa un plano . Los geólogos usan convenciones para poder definir claramente al echado y el rumbo , pero siempre se debe cuidar poner notas explicativas de esas normas para poder hacerlas comprensibles para otros profesionistas .

La fig. 1.2 muestra las normas utilizadas en la proyección estereográfica sobre el hemisferio inferior de la esfera de referencia con relación al rumbo , el echado y la dirección del echado .

La proyección estereográfica de líneas y planos simplifican la solución de los problemas en los que se involucra la orientación relativa de las líneas y planos en el espacio . En mecánica de rocas , las proyecciones estereográficas son muy usadas para el análisis de la estabilidad de excavaciones .

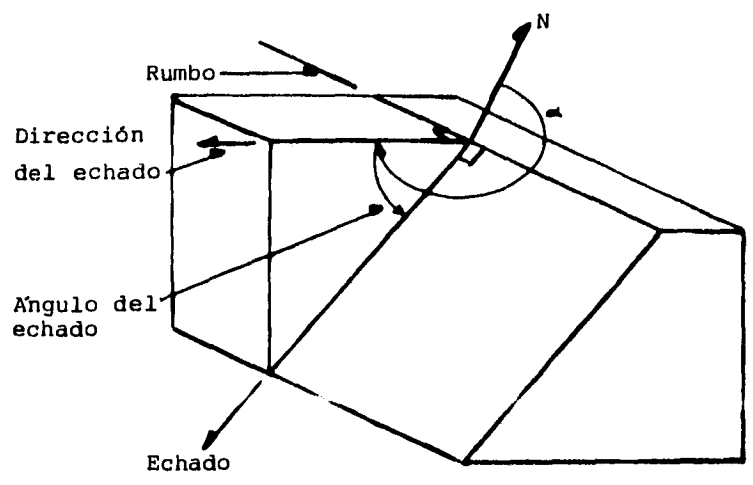


Figura 1.1

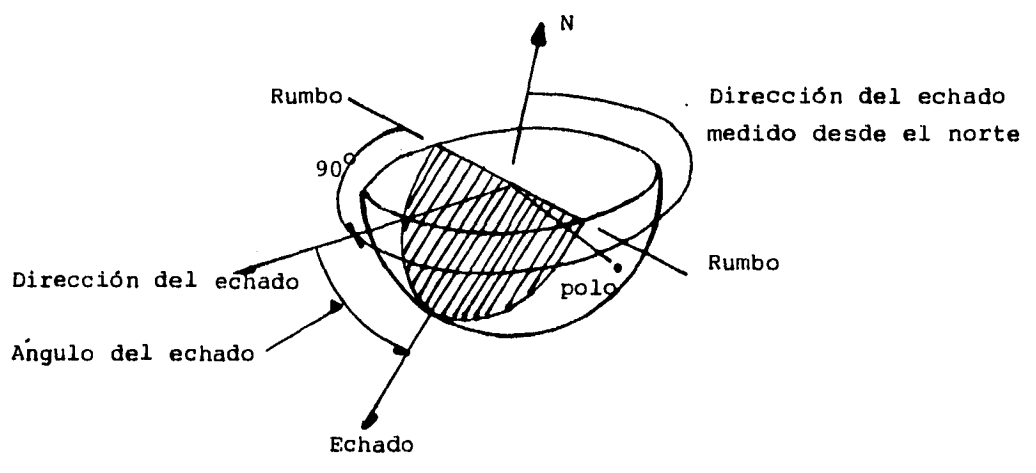


Figura 1.2

En muchas publicaciones de geología estructural , cristalografía y mecánica de rocas muestran construcciones y procedimientos disponibles para usar las proyecciones estereográficas .

La fig. 1.3a muestra la proyección estereográfica de una línea , la cual pasa por el centro de la esfera de referencia y perfora a la esfera en el hemisferio inferior en el punto P y en -P en el hemisferio superior . En todas las aplicaciones deben apegarse a la convención de que una línea o un plano proyectado deben contener al centro de la esfera de referencia . El plano horizontal que pasa por O es llamado plano de proyección , una perpendicular al plano de proyección perfora a la parte superior de la esfera de referencia en el punto F llamado foco para la proyección del hemisferio inferior :

La proyección estereográfica consiste en proyectar una línea o punto de la superficie de la esfera de referencia desde la perspectiva del punto , llamado foco, a una proyección plana horizontal . Para encontrar la proyección estereográfica de cualquier línea que pasa por O se debe encontrar el punto donde esta línea perfora a la superficie de la esfera de referencia , construyendo una línea recta entre el punto perforado y F , encontrando después el punto donde la línea cruce al plano de proyección .

En la fig. 1.3a la línea OP perfora a la esfera de referencia en el punto P y la línea PF cruza al plano de proyección en el punto p . Para poder proyectar a la línea O-P se procede de forma similar a lo realizado para la línea OP , la línea O-P perfora al hemisferio superior de la esfera de referencia en el punto -P , proyectando al punto -p en el plano de proyección .



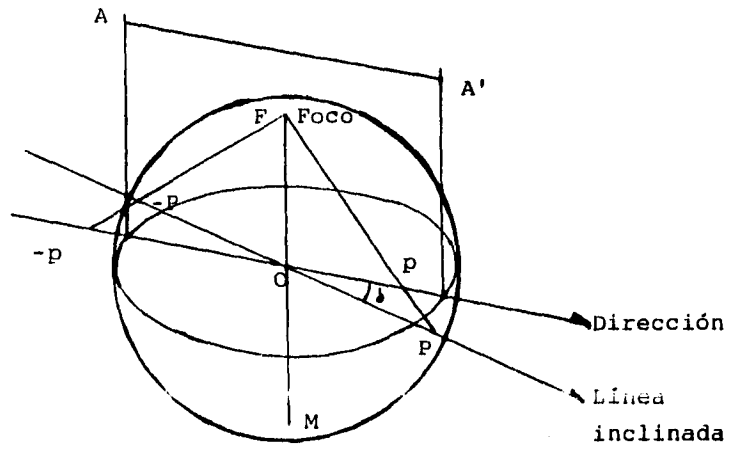


Figura 1.3a

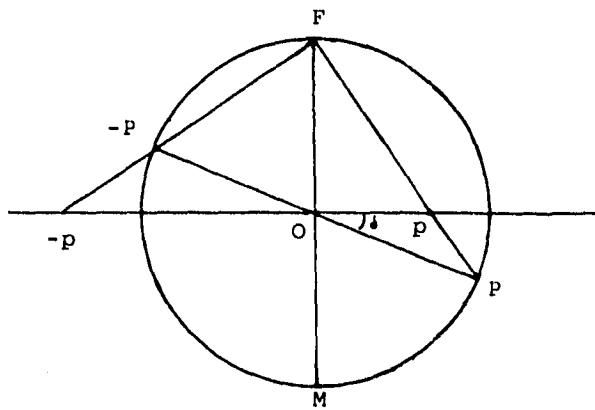


Figura 1.3b

La fig. 1.3b muestra una sección vertical de la esfera de referencia conteniendo a la línea OP . Esta es una visualización en el espacio de la relación existente entre la línea y su proyección.

La construcción mostrada en la fig. 1.3b puede ser usada para localizar la proyección estereográfica de la línea , pero una traza más precisa se logra con el uso de estereorredes como se muestra posteriormente .

La proyección estereográfica de un plano consiste en localizar el lugar conectado por la proyección estereográfica de todas las líneas contenidas en dicho plano . Cualquier plano proyectado debe contener al centro de la esfera de referencia , perforando a la superficie de esta esfera en un gran círculo .

En la fig. 1.4 se muestra el plano horizontal perforando a la esfera de referencia por el gran círculo SMT , estos puntos están inmobilizados por la proyección de F . Puntos dentro de este círculo , cuando son proyectados desde F en la parte superior de la esfera de referencia , pertenecen al hemisferio inferior ; otros puntos fuera de este círculo pertenecen al hemisferio superior . En esta figura también se muestra un plano inclinado pasando por O e intersectando a la esfera de referencia por el gran círculo SDT . La línea OS y la opuesta OT representan al rumbo del plano inclinado . La línea OD es el vector echado del plano inclinado , su proyección es el punto d . Otras líneas en el plano son OA , OB , OC , etc y su proyecciones a , b , c , etc . Esta serie de rectas proyectadas definen al arco TdS mostrado , al trazar este arco se determina la proyección estereográfica del plano. Como quiera que se vea , el camino más conveniente para proyectar el plano es trazar una familia de grandes círculos proporcionados en una estereorred .

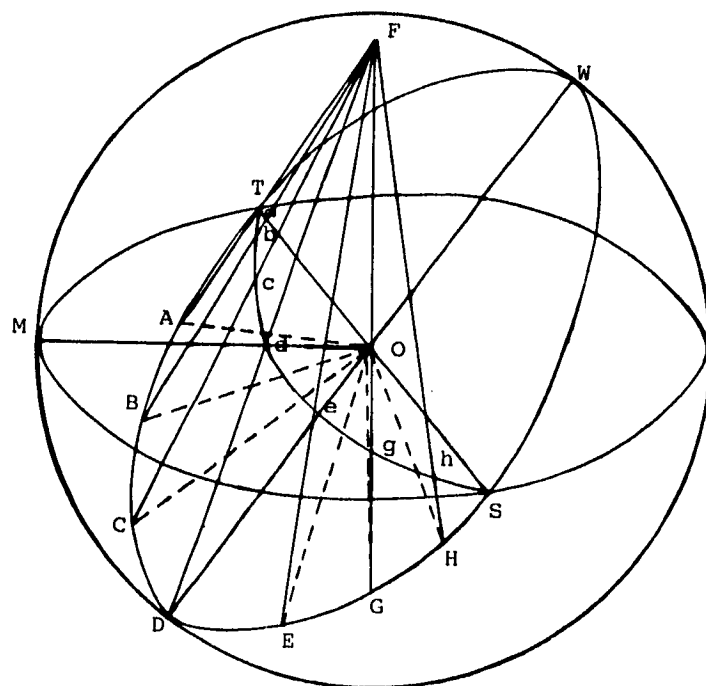


Figura 1.4

La fig. 1.7 muestra una estereorred , la cual presenta una serie de grandes círculos de planos teniendo una intersección común y echados con incrementos de 2 grados. Estos grandes círculos parecen líneas de longitud de un globo terráqueo. Una familia de círculos pequeños son también proporcionados , cada lugar representa la línea construida a un ángulo constante con la línea de intersección de los grandes círculos . Los círculos pequeños , que parecen líneas de latitud en un mapa de la tierra , gradúan a los grandes círculos .

### **1.3 CONSTRUCCIÓN DE REDES ESTEREOGRÁFICAS .**

La construcción de los grandes círculos para definir la estereorred es mostrado en la fig. 1.5 . En la circunferencia de este círculo se marcan puntos cada  $20^\circ$  a partir de la parte superior del círculo hasta acabar con  $180^\circ$  , después se une cada punto con la marca de  $180^\circ$  con una línea , el punto donde esta línea cruza al eje horizontal del círculo define el centro de los grandes círculos.

La fig. 1.6 muestra el trazo de los círculos pequeños , a partir de la línea horizontal se marcan unos puntos alrededor de la circunferencia del círculo cada  $10^\circ$  hasta llegar a los  $90^\circ$  , después se trazan unas líneas tangentes a este círculo en cada marca hasta que tocan el eje vertical del círculo y cada punto en el eje vertical es el centro de cada círculo pequeño .

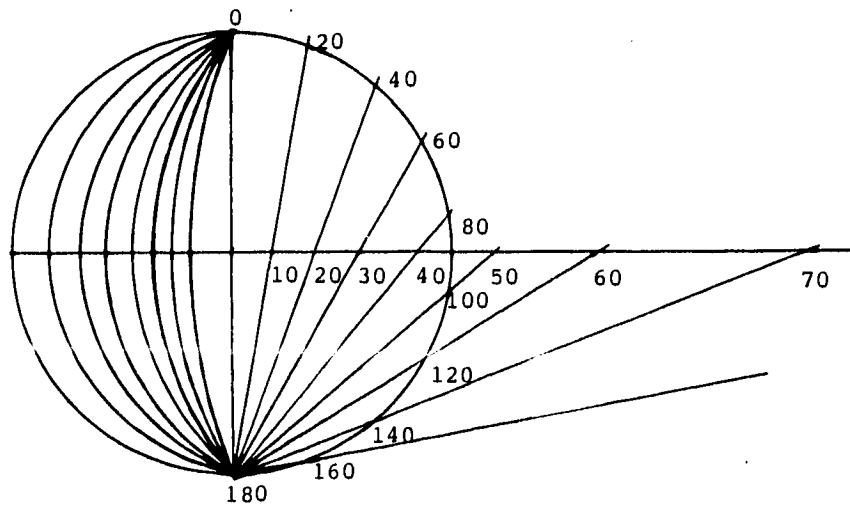


Figura 1.5

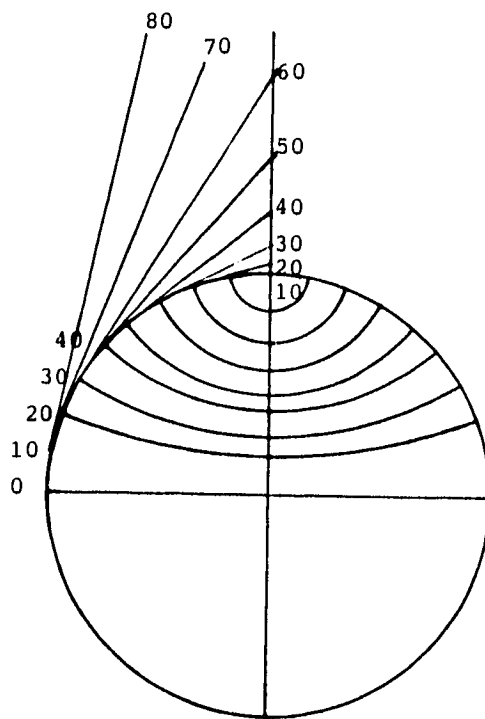


Figura 1.6

En las figuras 1.7 y 1.8 se muestran redes meridionales y polares, las cuales son usadas en mecánica de rocas para el estudio de planos geológicos y el análisis de datos geológicos estructurales . En la práctica se debe tener cuidado que al reproducir estas redes no se deformen por el efecto del fotocopiado para no incurrir en resultados erróneos debidos a la falta de precisión .

En la fig. 1.9 se muestra una red de conteo que puede ser auxiliar a la red polar. En la práctica conviene usar esta red superponiendo hojas transparentes , cuidando siempre que no exista distorsiones en la red .

#### **1.4 USOS VARIADOS .**

En empresas de consultoria especializadas en el procesamiento de grandes volúmenes de información sobre datos geológicos estructurales se han auxiliado grandemente de las computadoras . La técnica usada es la coordenada del polo sobre la superficie de la esfera de referencia para eliminar así la distorsión debida a cualquier proyección , la cual reduce esta superficie esférica a un plano bidimensional . También se puede usar para representar a los planos la norma descrita en la sección 1.1 que nos dice que la dirección del echado y el echado pueden escribirse como  $000/00$  , respectivamente , para un procesamiento en las computadoras más rápido .

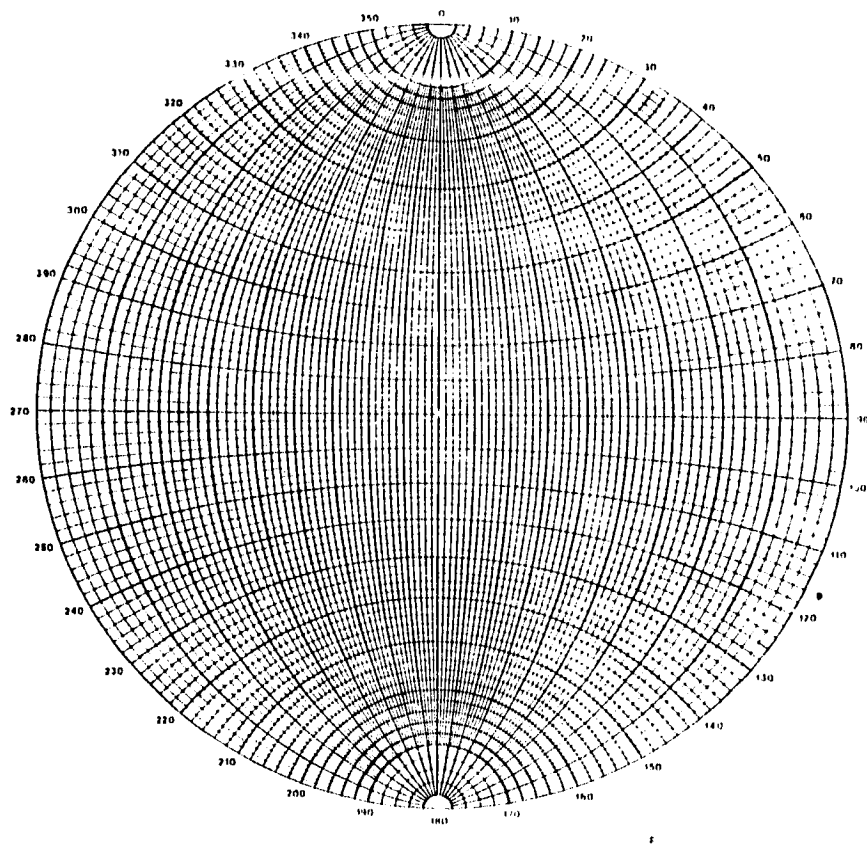


Figura 1.7

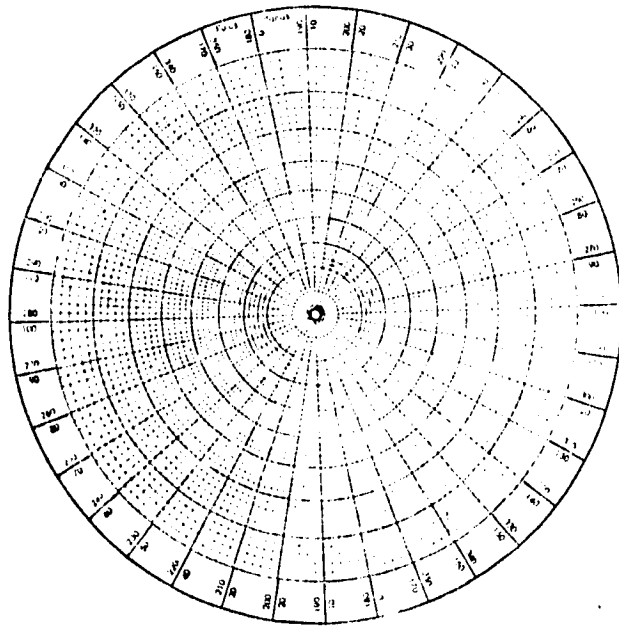


Figura 1.8



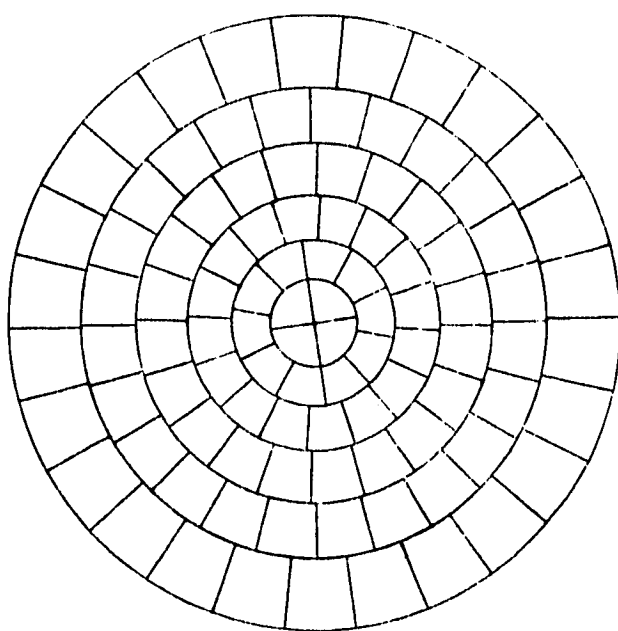


Figura 1.9

### 1.5 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE DATOS Y MEDICIONES DE CAMPO.

Al vaciar los resultados de las mediciones de campo de direcciones de echado y echado o el rumbo y el echado, es más conveniente usar los polos de los planos más que trabajar con grandes círculos, ya que los primeros se pueden proyectar directamente sobre una red polar. Para trazar el polo de un plano sobre la red polar, el cual está definido por su dirección del echado y el echado, se siguen los siguientes pasos: El valor de la dirección del echado es buscado en la escala marcada sobre la circunferencia de la red polar para localizar la dirección del polo y se mide el valor del echado a partir del centro de la red, sobre la línea definida por la dirección del echado se marca la dirección del polo.

Para realizar lo anterior no es necesario rotar la red lo que permite marcar los polos de diferentes planos con gran facilidad. No es recomendable trasladar directamente los datos a la red sin antes escribirlos en un registro ya que estos datos pueden ser usados posteriormente para aclaraciones o estudios posteriores.

La fig. 1.10 muestra el vaciado de 351 polos marcados directamente en la red polar a partir de una serie de datos de campo. Se han usado diferentes símbolos para marcar diferentes aspectos geológicos, lo anterior es usado cuando se tienen diferentes características geológicas y es necesario aislar grupos o aspectos individuales. En la fig. 1.10 la estabilidad de una excavación subterránea puede depender de la única falla marcada por lo que es necesario diferenciar este punto de los 350 polos restantes. Para el caso mostrado los planos tienen características de estratificación y de fisuras similares y el análisis de los polos es como si fuera una sola población.

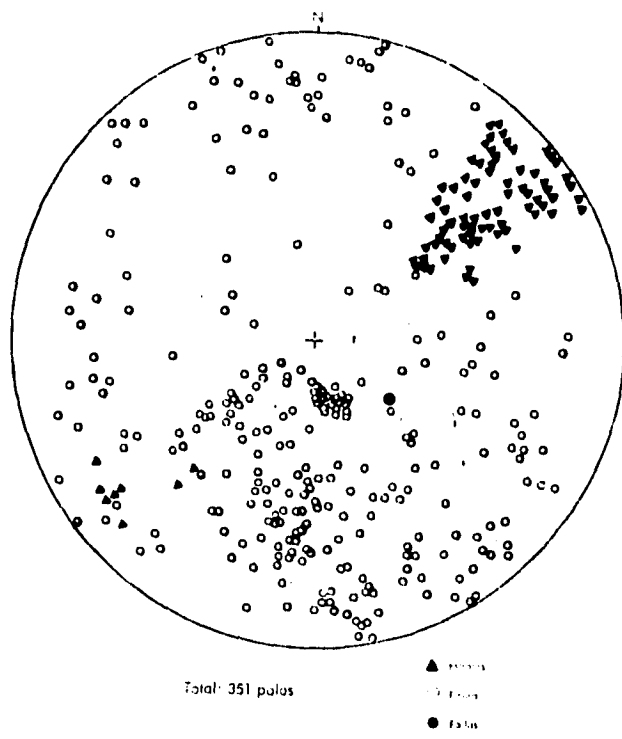


Figura 1.10

El primer paso para el análisis es contar el número de polos sobre la red de conteo estando fija y contar los polos que caen en cada una de las celdas de conteo , anotando su número en el centro de cada celda . Para el caso mostrado en la figura la falla se examinará por separado . Una vez definido los conjuntos de polos se calculan los porcentajes que le corresponden a cada celda de la red de conteo , para este caso los porcentajes están anotados en la fig. 1.11 .

Después se gira la red de conteo para centrar los grupos de polos más densos en las celdas de conteo y se localizan las concentraciones con máximos porcentajes. Con rotaciones menores se pueden definir las curvas de menor porcentaje alrededor de las concentraciones mayores de polos . También se pueden trazar grandes círculos que representan los aspectos estructurales de mayor importancia , girando el papel de dibujo hasta que el polo de cada plano , representado por el centro de cada concentración de polos cae en el eje este-oeste de la red estereográfica y se dibuja el gran círculo correspondiente a esa concentración de polos .

Además del método de las proyecciones estereográficas para determinar la configuración de los polos se puede usar el método de proyección de áreas iguales, muy usada por geólogos por pensar que las distorsiones propias de proyecciones estereográficas causaban grandes errores cuando era utilizadas para la configuración de polos . Cuando en realidad si ambos métodos son usados para delinear las curvas de porcentajes la precisión no importa tanto .

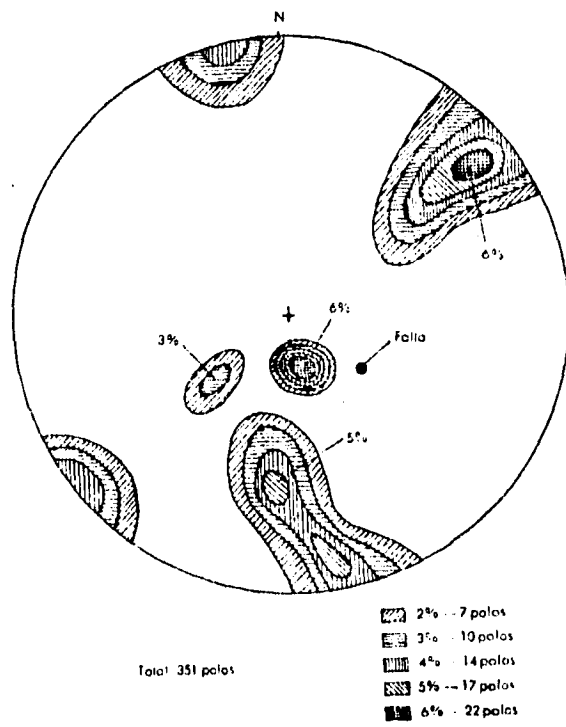


Figura 1.11

## 1.6 ERRORES EN LA OBTENCIÓN DE DATOS DE CAMPO .

Las fuentes de error más comunes en la recolección de datos son:

El primer error consiste en la obtención de la dirección del frente que se cartografía con respecto a la orientación de los aspectos estructurales en el macizo rocoso . Si el levantamiento es solo en un túnel se corre el riesgo de no encontrar en la exploración algún accidente geológico y aparezca sorpresivamente en el frente de la excavación más grande en el mismo túnel . Un método para reducir este error al mínimo es realizar levantamientos en túneles que van en diferentes direcciones o complementar el levantamiento del túnel con barrenaciones en ángulo recto a la dirección del túnel , así la mayor parte de los accidentes geológicos quedarán expuestos y se reducirá considerablemente el peligro de encontrar accidentes imprevistos .

El segundo tipo de error en la investigación de las fisuras es la inclusión en el vaciado de los polos de los diferentes dominios estructurales , lo cual provoca que en el levantamiento del túnel , los geólogos pasen de una serie de condiciones a otra y al trabajar con poca visibilidad puede provocar que se pase por alto esta transición , a menos que el geólogo realice un reconocimiento previo estableciendo los límites de cada dominio estructural . Es muy importante que polos que representen fenómenos estructurales de un mismo dominio queden representados en una misma red estereográfica .

## **CAPÍTULO II**

### **PRINCIPIOS DE LAS PROYECCIONES ESTEREOGRÁFICAS**



## 2.1 PROPIEDADES DE LAS PROYECCIONES ESTEREOGRÁFICAS .

La orientación de planos y líneas en el espacio pueden ser representadas por la intersección de dichos planos o líneas con la superficie esférica de referencia . La fig. 2.1 muestra la intersección de un plano con la esfera de referencia representada por un gran círculo . La línea OP se proyecta en el punto P' dentro del plano horizontal , mediante una línea que va desde P hasta U . La línea OR se proyecta de forma similar en el punto R' .

Para representar estos planos más claramente , se usa la representación bidimensional de la proyección esférica . Se utilizan diferentes tipos de proyecciones para transferir los grandes círculos y puntos de la superficie esférica al plano ecuatorial de la esfera . En la fig. 2.2 se muestra una esfera a la cual le falta una cuarta parte , con las redes meridianas y polares proyectadas sobre los frentes vertical y horizontal respectivamente . Existen dos tipos de proyecciones para generar redes meridionales y polares que son las proyecciones de ángulos iguales y de áreas iguales .



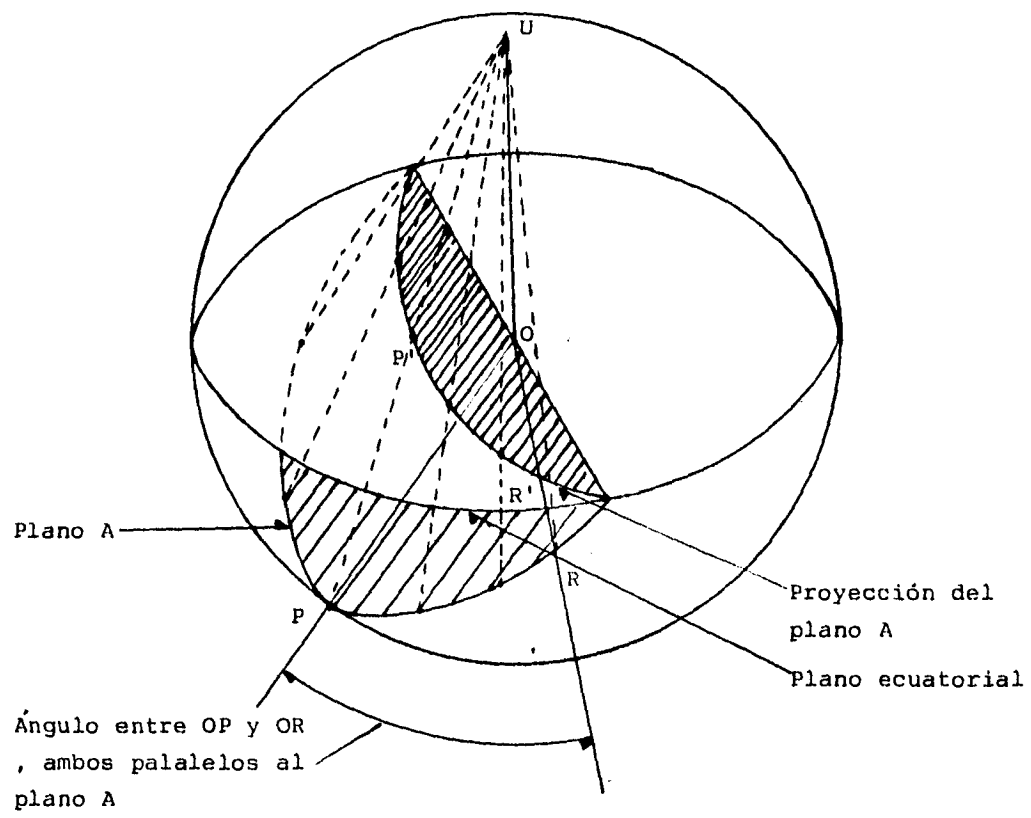


Figura 2.1

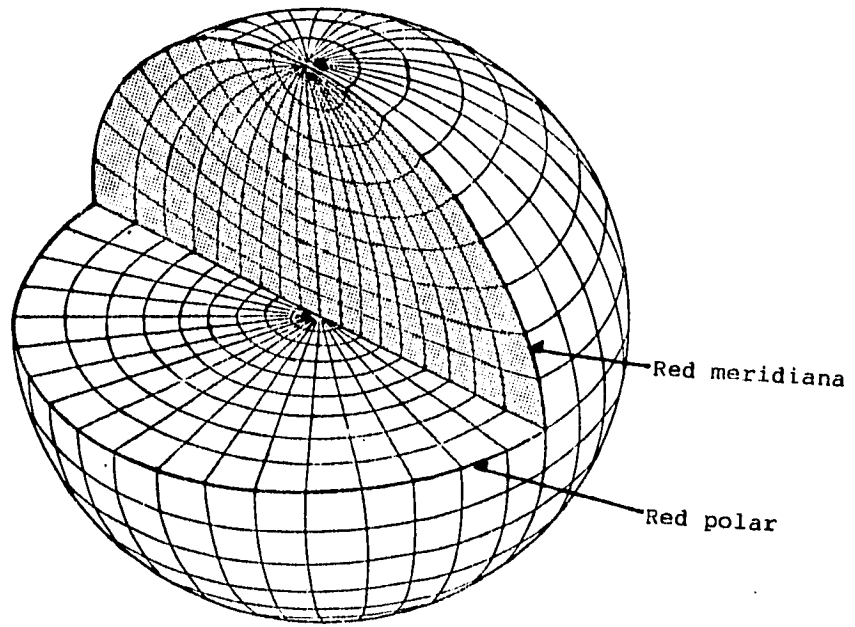


Figura 2.2

## **2.2 PROYECCIÓN DE ÁREAS IGUALES .**

La proyección de áreas iguales ,es conocida también como la proyección de Lambert o de Schmidt , se puede producir por el método mostrado en la fig. 2.3, en el cual el punto A sobre la superficie de la esfera se proyecta en el punto B trasladándolo con un arco centrado en el punto de contacto de la esfera con un plano horizontal sobre el cual la esfera descansa . Si se repite esto por varios puntos localizados por la intersección del círculo con longitudes y latitudes de igual espaciamiento sobre la esfera , se obtiene una red de áreas iguales .

En la proyección de áreas iguales , la proyección de grandes círculos de la esfera a el plano ecuatorial , resultan distorsionados por el arco del círculo , por lo tanto, no es recomendable usar este tipo de proyección para el análisis de estabilidad como en el caso de la proyección de ángulos iguales .

Este tipo de proyección se usa cuando se tiene información estadística compleja de la orientación y frecuencia de líneas y planos . Por lo que puede usarse para trazar y evaluar datos de campo , mapas de campo y otras discontinuidades geológicas .

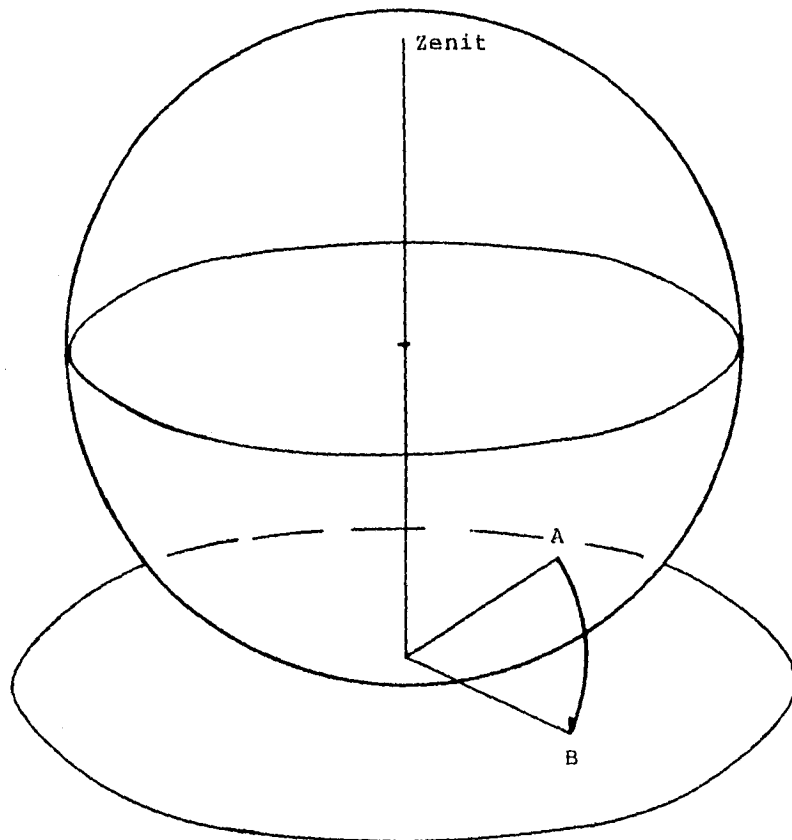


Figura 2.3

### 2.3 PROYECCIÓN DE ÁNGULOS IGUALES .

La proyección de ángulos iguales , también es llamada proyección estereográfica o de Wulff . Un método para obtener este tipo de proyección es mostrada en la fig. 2.4 , el punto A sobre la superficie de la esfera define al punto C , en el plano horizontal que pasa por el centro de la esfera , mediante una línea que va desde A hasta el zenit de la esfera , el zenit es el punto donde una línea vertical que pasa por el centro perfora a la esfera .

Este tipo de proyección es muy usada por su simplicidad en el trazo de proyecciones . Un gran círculo en la esfera se traza como un arco de círculo en el plano ecuatorial de la esfera . El representar los rumbos y echados de gran cantidad de discontinuidades geológicas también puede ser relativamente fácil representarlos como puntos en un plano .

Ambos tipos de proyecciones se usan para analizar datos geológicos estructurales. Los geólogos prefieren usar la proyección de áreas iguales porque permite interpretar información estadística de datos geológicos . Los ingenieros prefieren la proyección de ángulos iguales , porque las construcciones geométricas necesarias para dar solución a los problemas de ingeniería son más precisas y fáciles de lograr con este tipo de proyección . Las ventajas y desventajas entre los dos tipos de proyecciones se compensan cuando se utilizan para dar una solución total a un problema , más que para analizar una parte del problema .Por lo que es conveniente indicar en todos los diagramas el tipo de proyección usada .

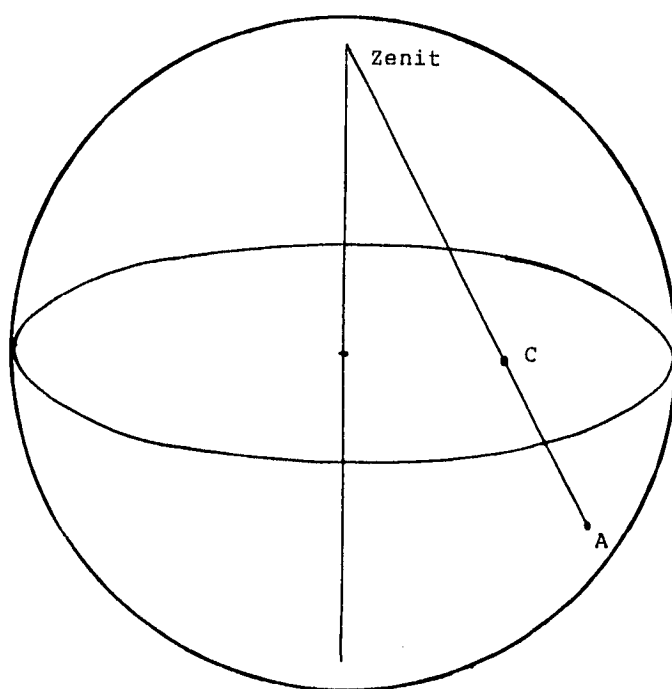


Figura 2.4

La proyección de un plano vertical es una línea recta continua al origen del plano ecuatorial . Un plano horizontal puede proyectarse como una línea de meridiano con un radio igual al radio de la esfera , con el mismo origen .

Una red meridiana obtenida de una proyección de ángulos iguales es mostrada en la fig. 2.5 . Las líneas de meridiano van del polo norte al polo sur representando grandes círculos . La inclinación de esos planos es mostrada en el eje E-W de la red . Cada meridiano es dividido en  $180^\circ$  por líneas de latitudes E-W, estas últimas trazadas como arcos de círculos en la estereorred .

Los meridianos para los planos verticales se representan como líneas rectas en el trazo , mientras los meridianos de los planos echados deben trazarse como arcos de círculo . Para poder representar un plano con otro rumbo que no sea N-S, la estereorred de la fig. 2.5 debe ser girada hasta que el eje N-S coincida con la dirección del rumbo del plano deseado. El meridiano puede ser trazado en la estereorred midiendo el echado sobre el eje E-W desde la parte externa hacia el centro

En la fig. 2.6 se muestra para modo de ejemplo un gran círculo que representa al plano A proyectado , con un rumbo de N-S y un echado de  $40^\circ$  W , trazado como una línea de meridiano . El polo del plano A está localizado a  $90^\circ$  del plano . Líneas paralelas al plano A son trazadas en la estereorred como puntos en esta línea de meridiano . El ángulo entre las líneas OP y OR es de  $100^\circ$  y es encontrado contando las líneas de latitudes entre los puntos P' y R'.

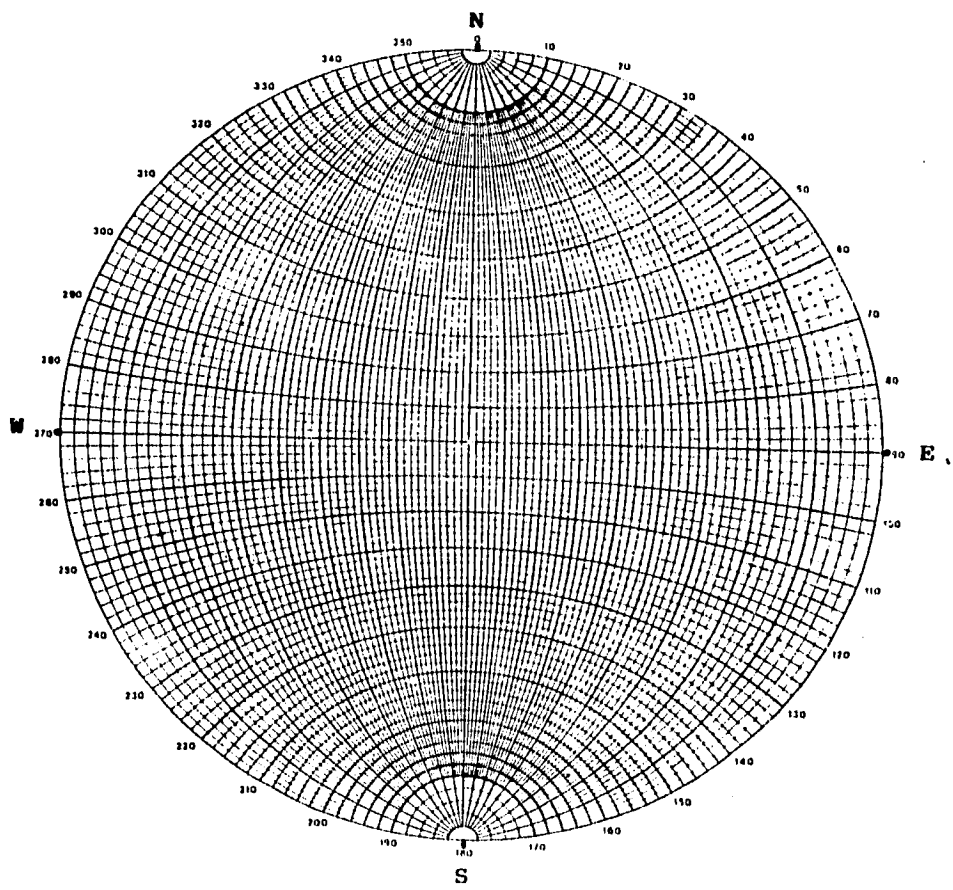


Figura 2.5



Plano A :  
 Rumbo N-S Echado W  $40^{\circ}$   
 R' : N  $42^{\circ}$  W E.  $29^{\circ}$   
 P' : S  $24^{\circ}$  W E.  $19^{\circ}$

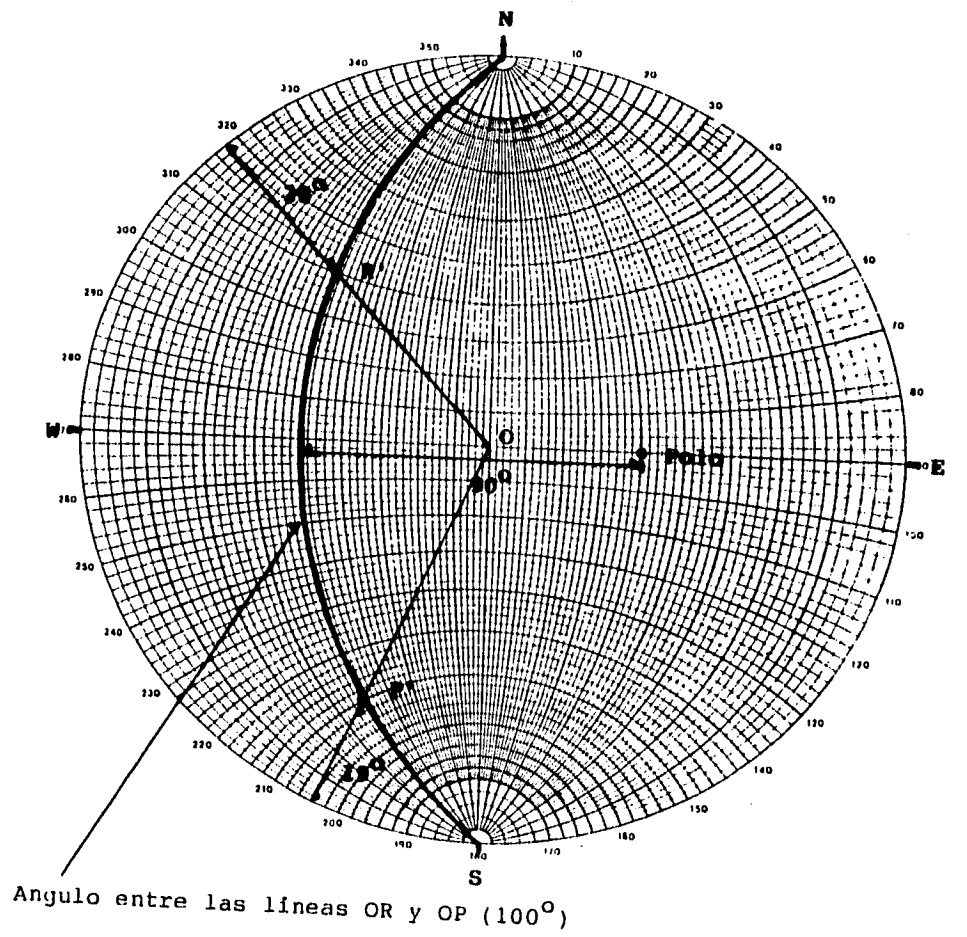


Figura 2.6

En la fig. 2.7 se muestra un plano vertical con un rumbo N 30° E y una dirección del echado de 120 °, por lo anterior, el ángulo del echado es de 90°. Para trazarse se miden 30° desde el norte hacia el este de la estereorred y en este punto se marca el rumbo del plano. Después se traza una línea desde este punto, cruzando al centro de la estereorred, a otro punto diametralmente opuesto, quedando el plano finalmente trazado.

La fig. 2.8 muestra la proyección de un plano horizontal con un rumbo N 90° E, por lo tanto, su echado es de 0°. Su trazo es como sigue: Se busca el rumbo en la circunferencia de la estereorred y se traza la línea del rumbo, después se dibuja un círculo con un radio igual al radio de la estereorred, el cual representa al plano horizontal.

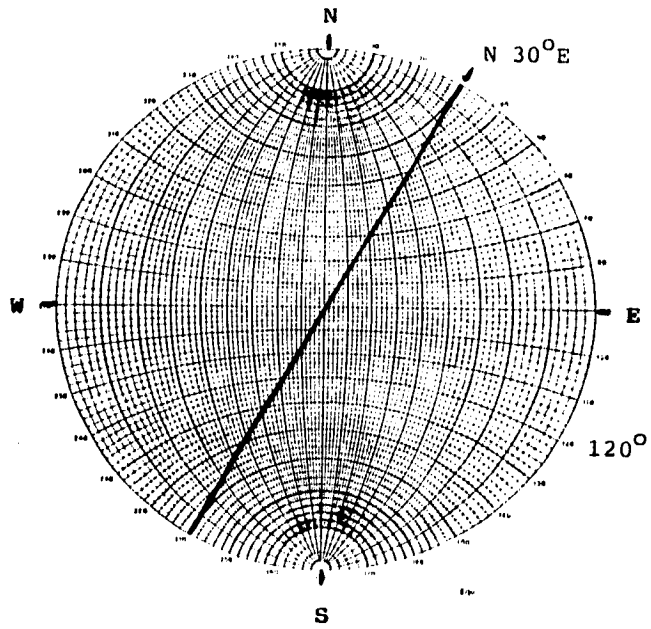


Figura 2.7

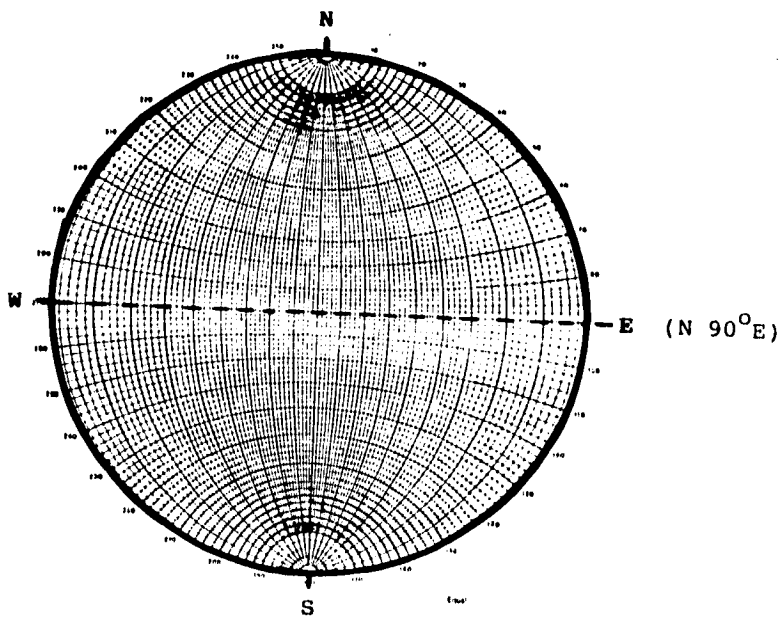


Figura 2.8

## **CAPÍTULO III**

### **PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA DE LÍNEAS**



### 3.1 PROYECCIÓN DE UNA LÍNEA .

Las figs. 3.1a y 3.1b muestran a la línea 1 inclinada con un ángulo vertical de  $40^\circ$  debajo de la horizontal hacia el N  $30^\circ$  E , trazada en el hemisferio inferior de la proyección estereográfica . La línea debe de pasar por el centro de la esfera de referencia . Si la posición del foco es asumida en la esfera de referencia , la proyección estereográfica es un punto dentro del círculo horizontal . Las letras L.H.(hemisferio inferior) en el trazo deben indicar que se ha seleccionado ese hemisferio .

La fig. 3.1a muestra el trazo superpuesto a la estereorred , el norte ha sido marcado . Una línea horizontal llevada al N  $30^\circ$  E tiene que ser proyectada marcando un punto a  $30^\circ$  desde el norte hacia el este en el círculo horizontal . En la fig. 3.1b el trazo ha sido girado hasta que el punto marcado coincida con el eje este-oeste de la estereorred y desde la parte externa del círculo se miden los  $40^\circ$ .

### 3.2 OBTENCIÓN DEL ÁNGULO ENTRE DOS LÍNEAS .

Una línea 2 metida  $20^\circ$  al N  $20^\circ$  W , es trazada en la fig.3.1c , con la línea 1 previamente trazada . La línea 2 es añadida a la traza usando la misma secuencia de pasos que los usados para la línea 1 . Para medir el ángulo entre la línea 1 y la línea 2 , es necesario determinar el plano común a ambas líneas , ya que ambas líneas pasan por el centro de la esfera de referencia .

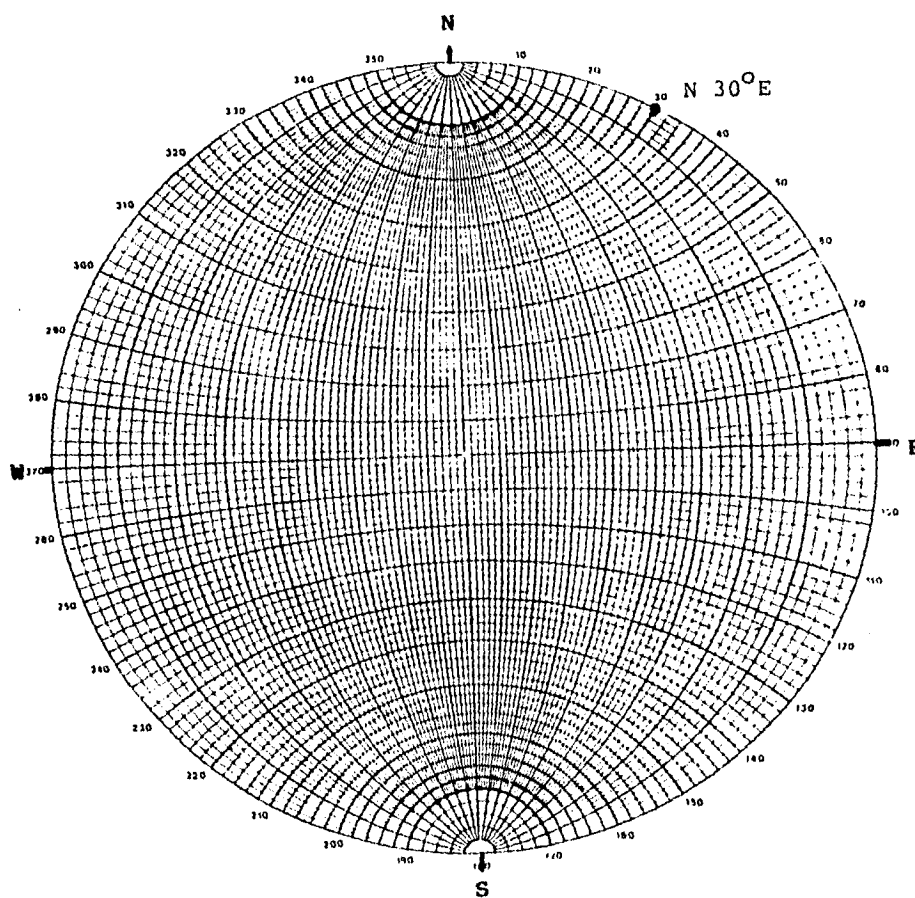


Figura 3.1a

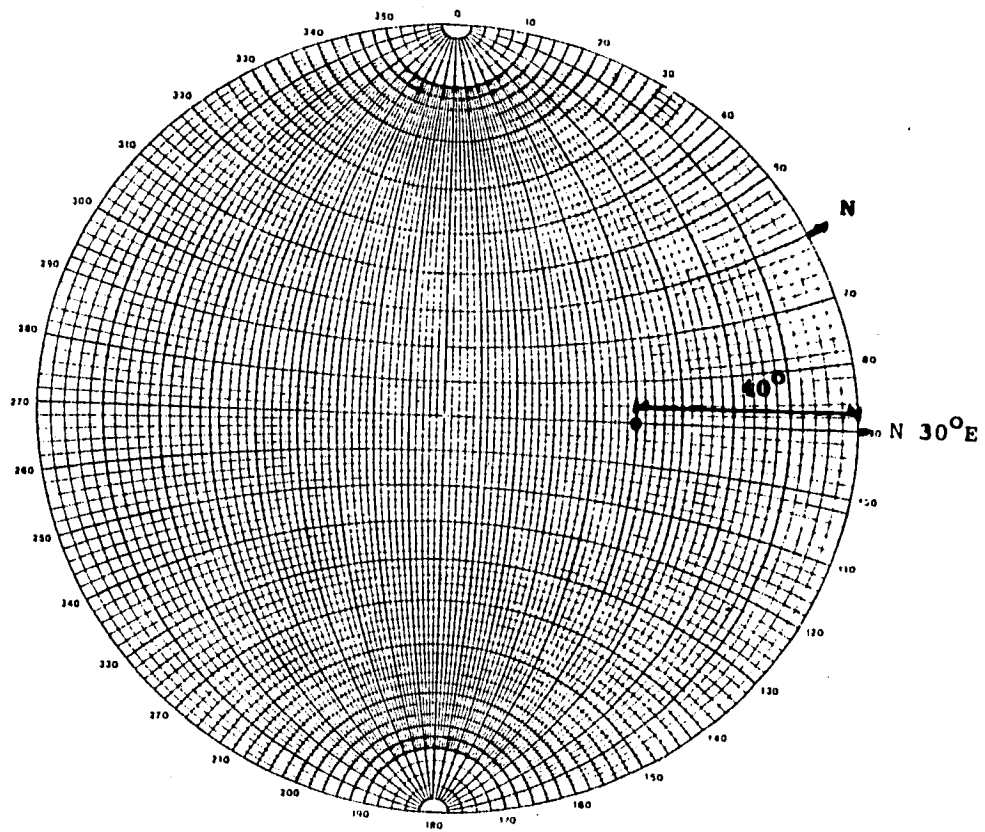


Figura 3.1b

Para encontrar este ángulo hay que girar el trazo hasta que ambos puntos coincidan en un mismo gran círculo , como se muestra en la fig. 3.1d . El ángulo entre las líneas 1 y 2 es medido contando las intersecciones con los círculos pequeños , este ángulo es de  $41^\circ$  . La dirección del echado del plano común a las líneas 1 y 2 es indicado en la fig. 3.1d , se obtiene girando lo trazado hasta la posición antes mencionada y contando los grados en la parte externa de la estereorred hasta llegar al norte previamente marcado , la dirección del echado es de  $N 45^\circ E$  . La fig. 3.1e muestra la traza final de esta serie de pasos .

### **3.3 PROYECCIÓN DE UN CONO A UNA LÍNEA DADA .**

La posición de líneas con un ángulo constante a una cierta línea es un cono circular con vértices al centro de la esfera de referencia , este cono proyectado como un pequeño círculo es un círculo verdadero , que puede dibujarse con un compás , una forma de dibujarlo es mostrada en la fig. 3.2a .

Para el trazo de líneas a  $45^\circ$  , se tomara la normal de un plano medido  $20^\circ$  hacia el  $N 40^\circ W$  , mostrado en la fig. 3.2a en el punto n , primero se alinea este punto con el eje este-oeste de la estereorred . Dos líneas en el punto son trazadas contando  $45^\circ$  a partir de n en cada dirección . En la fig. 3.2b , la distancia entre estos dos puntos es dividida en dos partes para encontrar el centro del círculo . Notando que la normal del plano , n , no coincide con el centro del círculo , el círculo es dibujado desde el centro usando un compás . La traza final de estos pasos es mostrada en la fig. 3.2c .



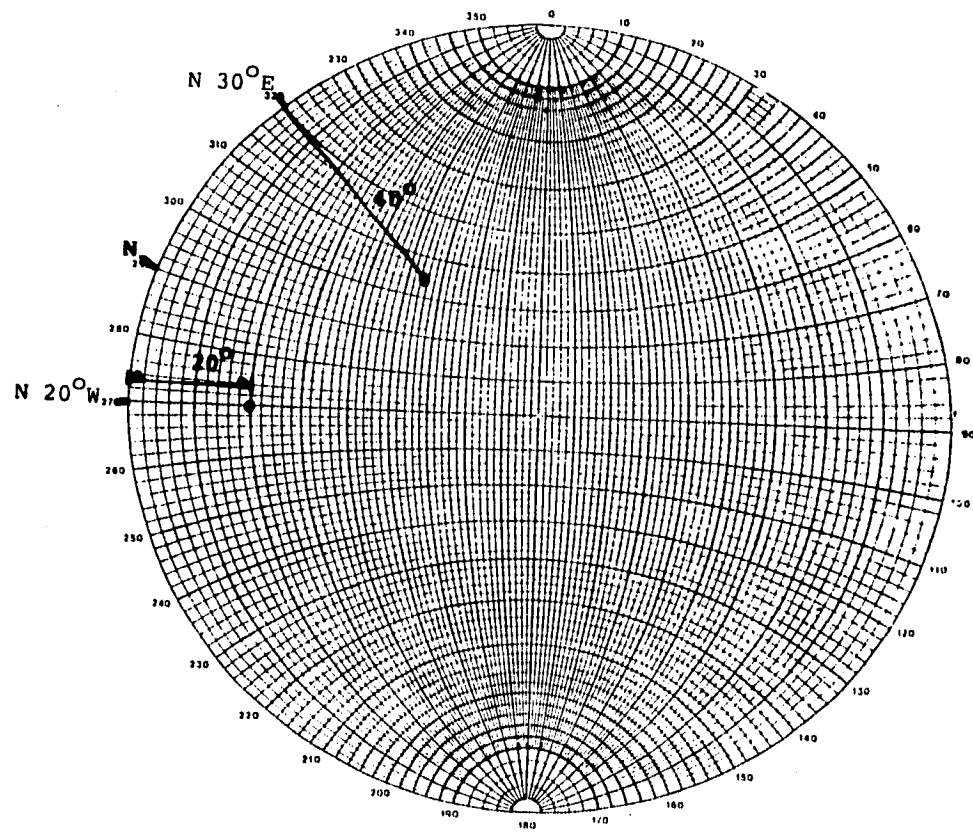


Figura 3.1c

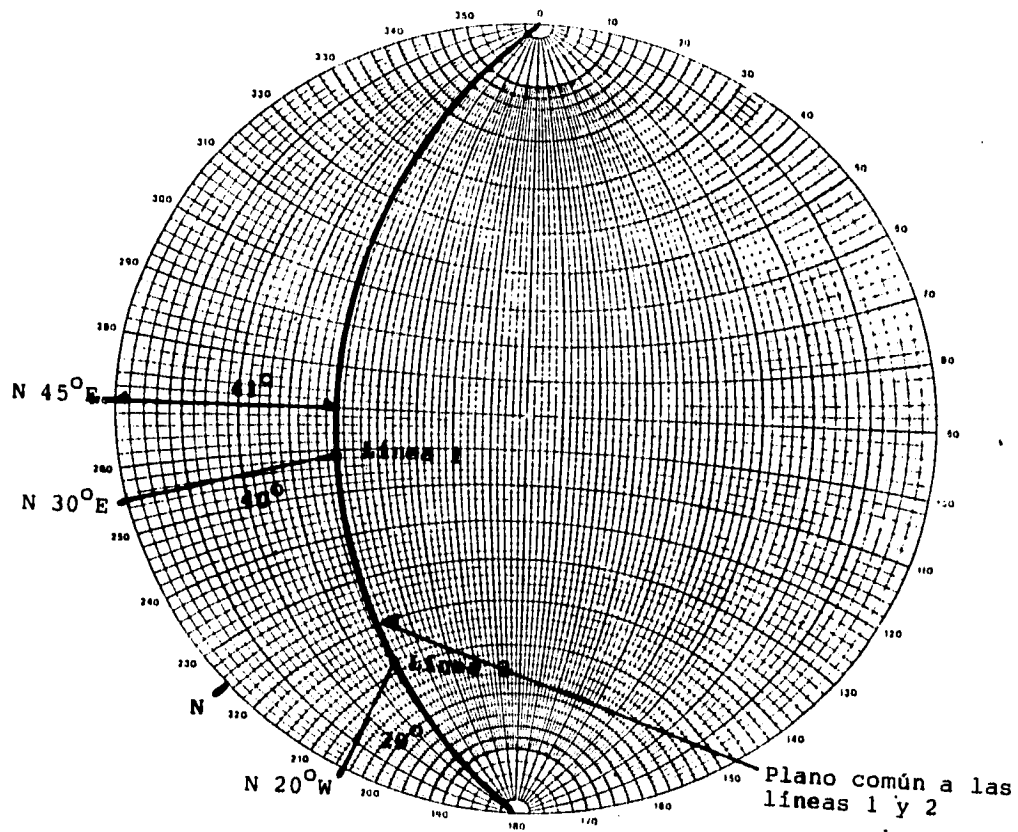


Figura 3.1d

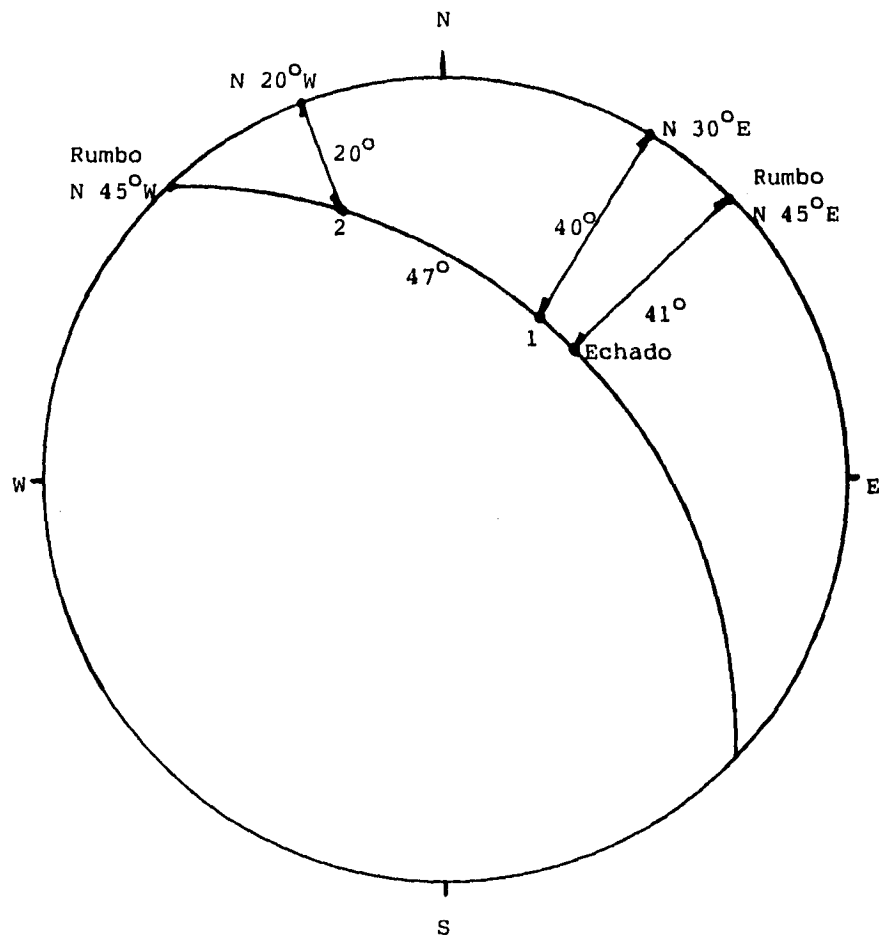


Figura 3.1e

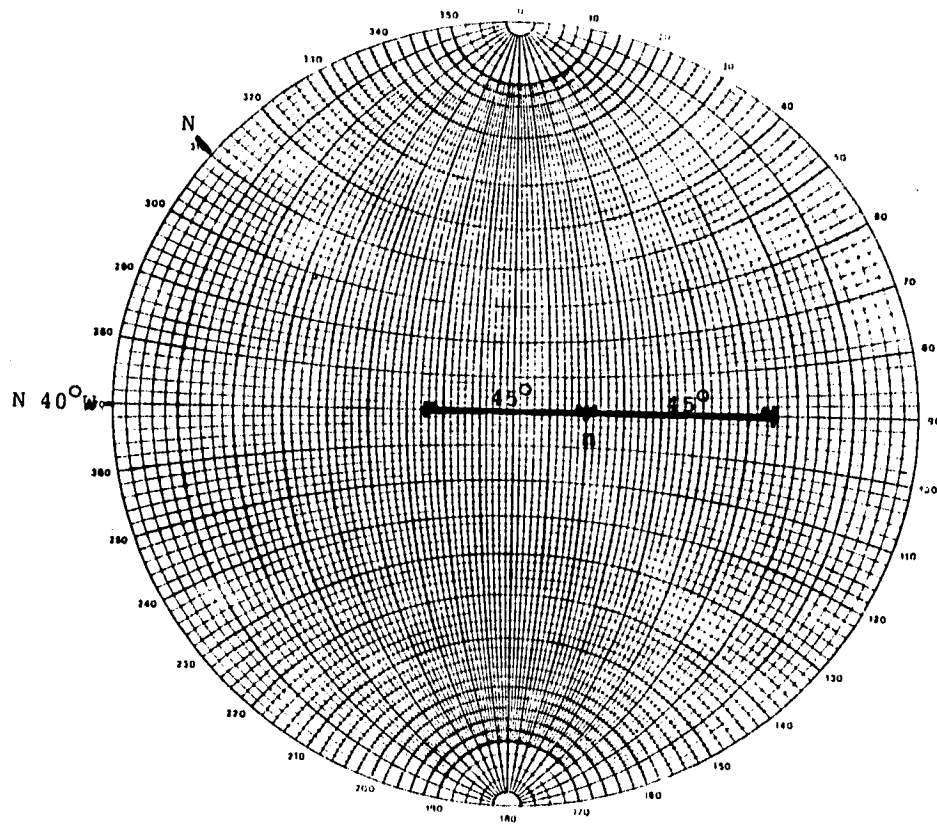


Figura 3.2a

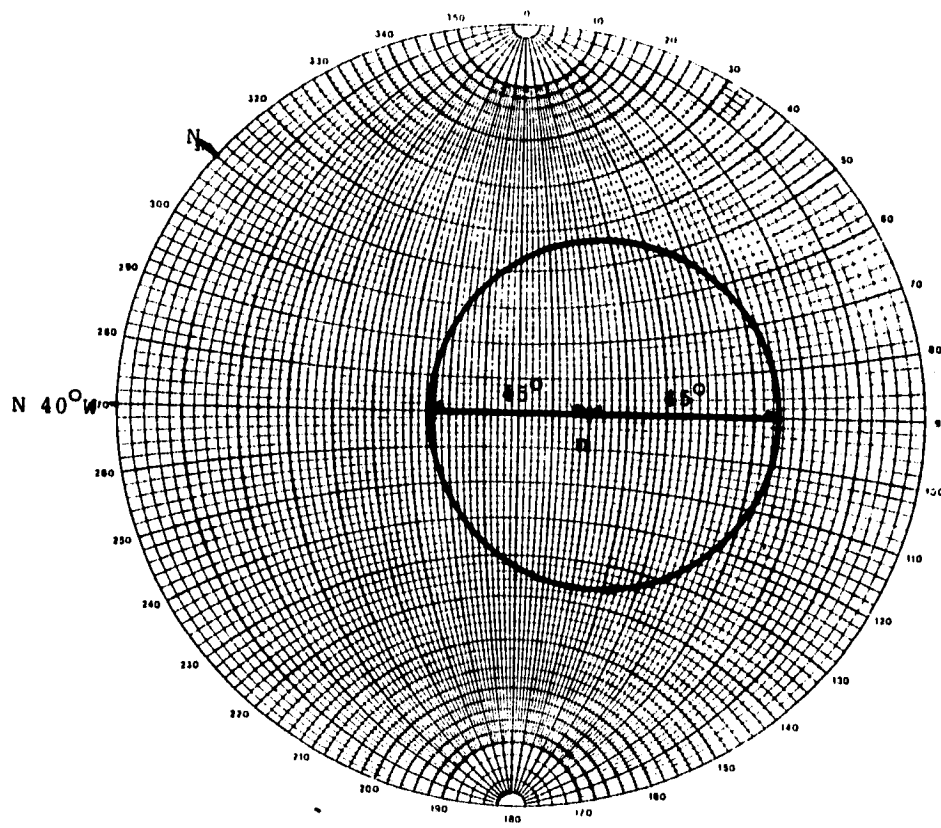


Figura 3.2b

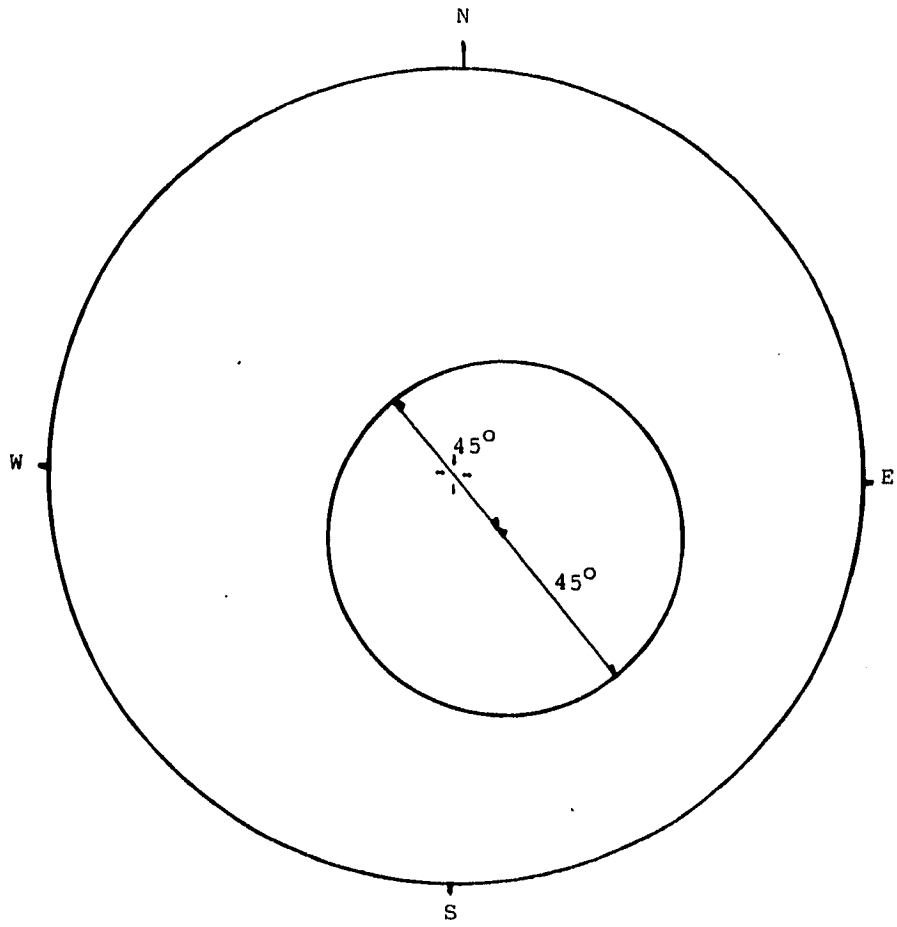


Figura 3.2c

### **3.4 VECTORES .**

Problemas de estabilidad de declives y de rocas pueden involucrar la manipulación de vectores , si la dirección de un vector puede ser mostrada como un punto en la proyección estereográfica , su construcción puede ser aplicada para análisis de estabilidad . En estudios de geología estructural los vectores no son usados comúnmente y un punto en un hemisferio puede ser reemplazado por su opuesto en el otro hemisferio .

No es difícil trabajar con ambos hemisferios , el único requerimiento es que se indique cual hemisferio es cual cuando se hacen los trazos , marcando con L.H. al hemisferio inferior y con U.H. al hemisferio superior . Ambos hemisferios pueden ser mostrados en un mismo dibujo pero solamente un hemisferio puede ser localizado dentro del círculo horizontal .

### **3.5 EVALUACIÓN DE FUERZAS EN UNA CUÑA DE ROCA DESLIZABLE .**

Las estereorredes pueden ser usadas para evaluar la estabilidad de cuñas tridimensionales de roca descansando en planos friccionantes resistentes . Un método similar al de las gráficas de polígonos de fuerzas bidimensionales es usado para la suma de fuerzas , sin embargo , solamente la orientación y no la magnitud de las fuerzas es determinado directamente de la estereorred .

El análisis de estabilidad esta dividido en dos partes :

Una parte es la orientación de la máxima reacción resistente en la falla potencial trazada en la estereorred , para deslizamientos a través de un solo plano la máxima reacción debe ser orientada a  $\phi$  grados de la normal al plano . Zonas de estabilidad e inestabilidad están localizadas en el contorno de la estereorred , estrictamente debe ser considerada la orientación de las reacciones en el plano potencial de deslizamiento .

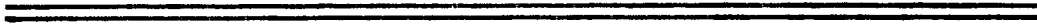
La segunda parte involucra la determinación de la orientación de la resultante de las fuerzas actuantes en la cuña , estas fuerzas pueden incluir el peso de la cuña como fuente de aceleración de las fuerzas , la subpresión del agua en los planos de falla y el manejo de fuerzas de estructuras sobre la cuña pueden constituir otras fuentes . La adición gráfica de vectores es usada en conjunción con la estereorred para determinar la orientación del vector fuerza resultante . Si la orientación de la resultante se inclina en la zona de estabilidad de la estereorred la cuña es estable . Si la resultante cae afuera de la zona de estabilidad la cuña es inestable .

El método de la estereorred no es siempre rápido y simple para evaluar la estabilidad de cuñas , porque es tal la variedad de fuerzas involucradas para causar la falla o asegurar la estabilidad , que visualizar claramente en una estereorred este conjunto de fuerzas puede ser confuso , por lo que es mejor usar métodos analíticos para evitar errores visuales .



## **CAPÍTULO IV**

### **PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA DE PLANOS**



#### **4.1 PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA DE UN PLANO Y SU POLO .**

Imagínese una esfera en el espacio y centrada sobre un plano inclinado , la intersección del plano y la esfera forman un gran círculo , como se muestra en la fig. 4.1 . Una recta perpendicular al plano inclinado que pasa por el centro de la esfera , perfora a la esfera en dos puntos diametralmente opuestos , permitiendo definir los polos del gran círculo que representa al plano .

Por lo anterior , toda información representada en cualquiera de los hemisferios aparece en el contrario , por lo que se necesita presentar un solo hemisferio para la representación de datos de geología estructural . En geología se emplea comúnmente el hemisferio inferior .

La fig. 4.2 muestra una manera de representar el gran círculo y el polo de un plano y la fig. 4.3 muestra la traza final de esta serie de pasos en proyecciones estereográficas . La orientación e inclinación de un plano quedan definidos solamente por su gran círculo o su polo , un ejemplo de lo explicado se desarrolla en el próximo punto .

#### **4.2 REPRESENTACIÓN DE UN PLANO POR UN GRAN CÍRCULO .**

Un plano definido por su dirección del echado de  $130^{\circ}$  y un echado de  $50^{\circ}$  , o por su rumbo NE  $40^{\circ}$  y un echado de  $50^{\circ}$  SE . Queda representado por un gran círculo construido de la siguiente forma:

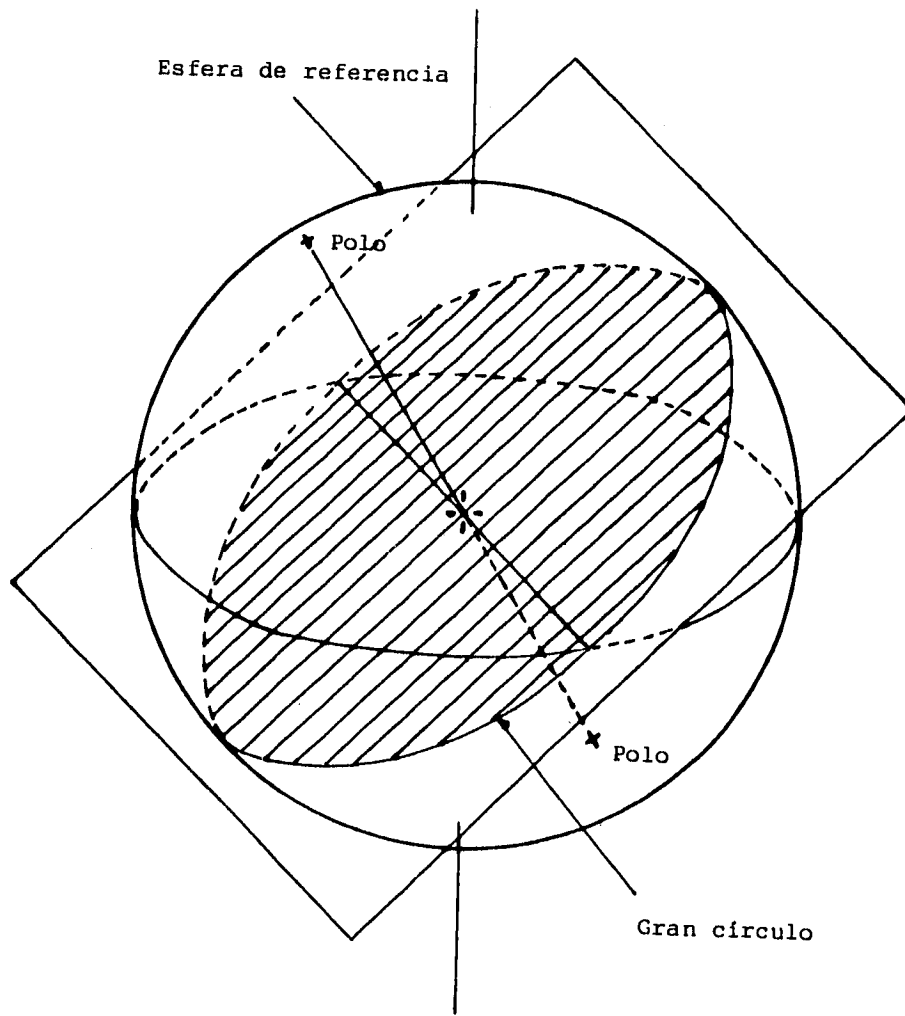


Figura 4.1

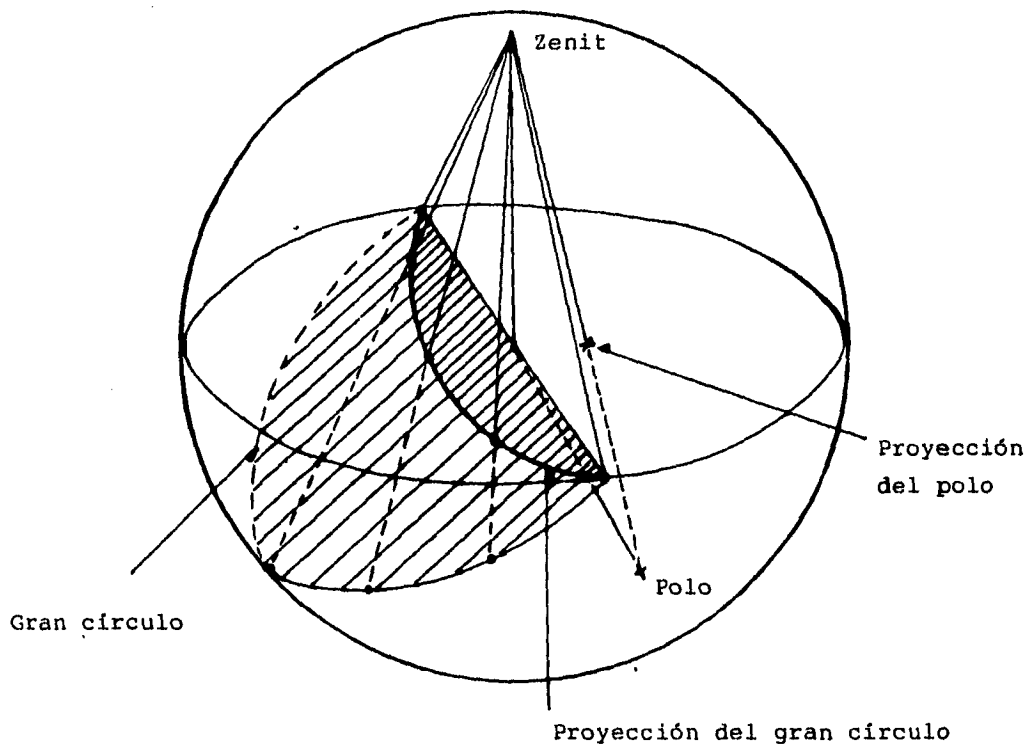


Figura 4.2

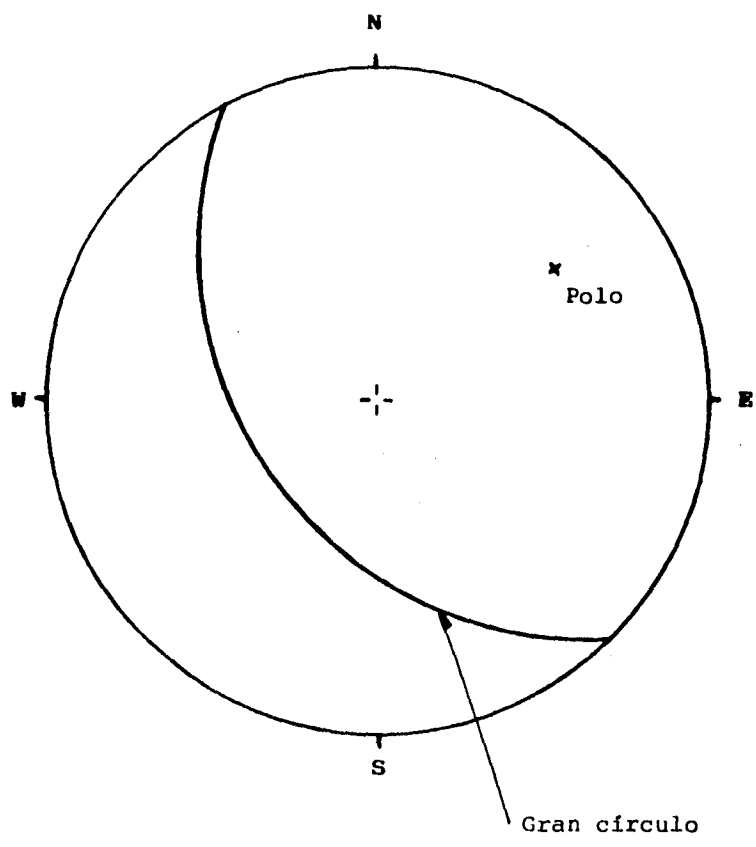


Figura 4.3

Primero se coloca un papel de dibujo centrado sobre una red meridiana , marcando el norte y la circunferencia de la red .Después se mide  $130^{\circ}$  desde el norte en el sentido de las manecillas del reloj , contando las divisiones en la circunferencia de la red y marcando este punto sobre el papel de dibujo . Otra forma es medir  $40^{\circ}$  y marcar la línea de rumbo . Ambas alternativas son mostradas en la fig. 4.4 .

Una vez marcado el rumbo , se gira el papel hasta que la marca de los  $40^{\circ}$  quede sobre el eje norte-sur , o bien , girando la marca de los  $130^{\circ}$  hasta que esta caiga en el eje este-oeste . Después se cuentan  $50^{\circ}$  sobre el eje este-oeste , desde la parte externa de la red hacia el centro y a los  $50^{\circ}$  de traza el gran círculo.

El polo del plano puede encontrarse , contando  $90^{\circ}$  a partir del gran círculo trazado y en la posición antes señalada , como se muestra en la fig. 4.5 . El norte marcado en el papel de dibujo se debe alinear con el norte de la red , quedando la proyección estereográfica del plano y su polo finalmente trazada .

### **4.3 OBTENCIÓN DEL RUMBO Y EL ECHADO DE LA LÍNEA DE INTERSECCIÓN DE DOS PLANOS .**

Un plano 2 con un rumbo N  $50^{\circ}$  E , es trazado como un punto a  $50^{\circ}$  medidos desde el norte hacia el este en el círculo horizontal , como se muestra en la fig. 4.6a . Después se gira lo trazado hasta que el punto que representa al vector rumbo coincida con el norte del círculo horizontal y el vector echado con un ángulo de  $20^{\circ}$  a el N  $40^{\circ}$  W es marcado en la fig. 4.6b .

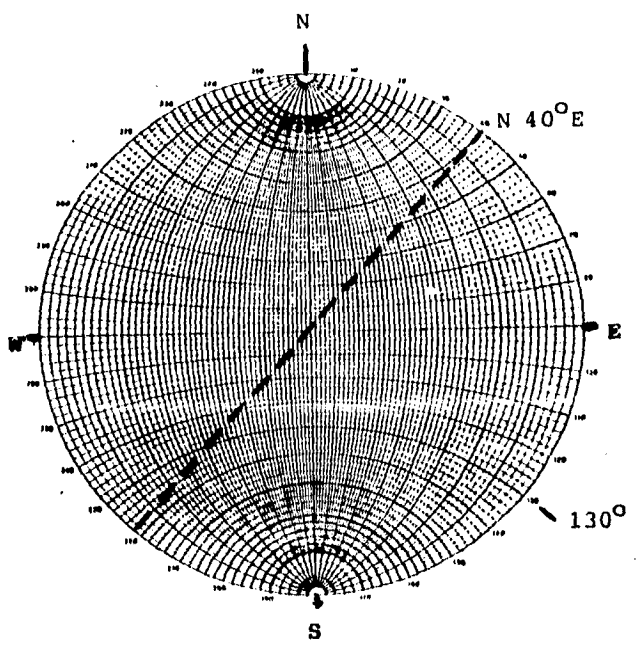


Figura 4.4

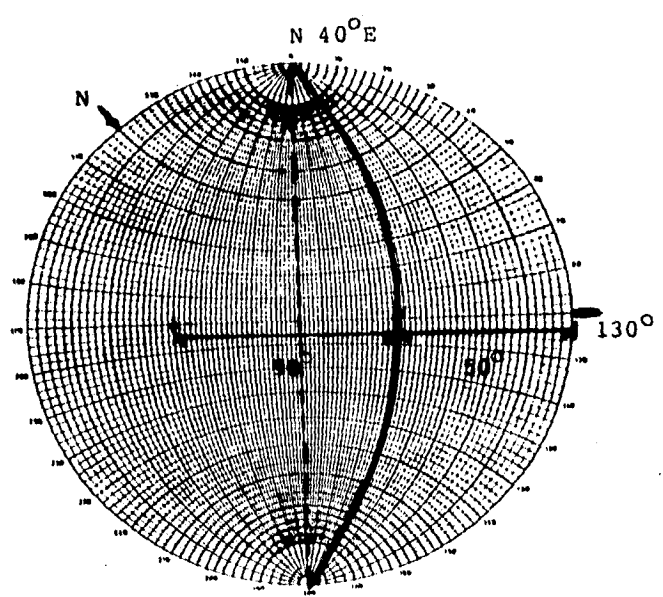


Figura 4.5

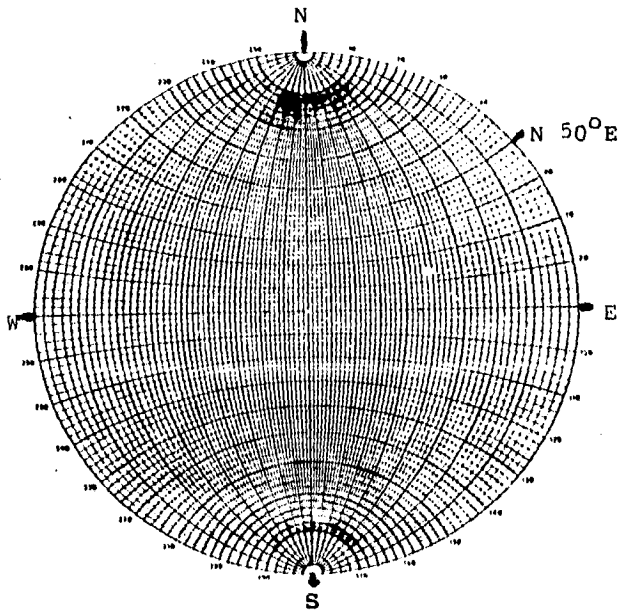


Figura 4.6a

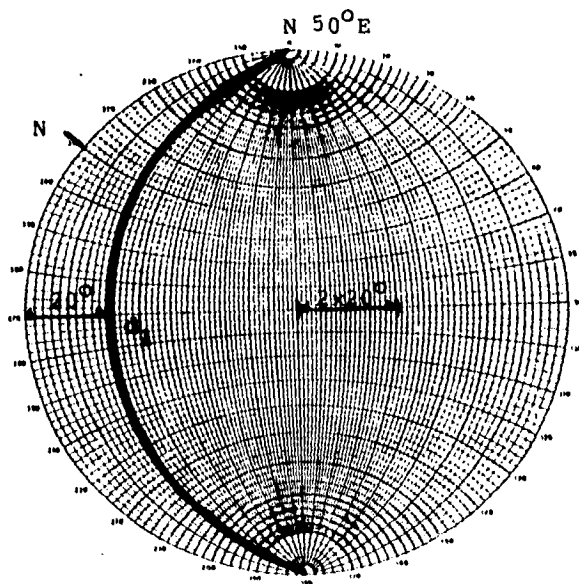


Figura 4.6b



Ahora se traza un gran círculo común a los vectores echado y rumbo . Para incrementar la exactitud , se pueden trazar los grandes círculos con un compás . Para el vector echado con un ángulo de  $20^\circ$  , el centro de este gran círculo esta localizado a  $40^\circ$  contados desde el centro de la red , como se muestra en la fig. 4.6b .

Para trazar la proyección estereográfica del plano 3 con un rumbo de NW  $60^\circ$  y un echado de  $45^\circ$  hacia el S  $30^\circ$  W , se sigue la misma secuencia de pasos que los usados para el plano 2 , como se muestra en la fig. 4.6c . El punto donde los dos grandes círculos se intersectan , se nombra I , que es la línea de intersección del plano 1 con el plano 2 . Lo metido de I es leído de la estereorred , girando lo trazado hasta que el punto I coincida con eje este-oeste . En esta posición se puede medir el ángulo vertical de I contando el número de grandes círculos entre I y la horizontal , como se muestra en la fig. 4.6d . Este ángulo es de  $16^\circ$  hacia el N  $77^\circ$  W . La fig. 4.6e muestra el trazo final de esta serie de pasos.

El camino más conveniente para encontrar la línea de intersección de dos planos es cuando estos son representados por sus normales . Si una línea puede identificar a la normal de un plano representando así a dicho plano , entonces en lugar de un gran círculo un plano puede ser representado por medio de un solo punto . Para encontrar la línea de intersección de dos planos trazados por sus normales ,  $n_1$  y  $n_2$ , el método mostrado en la fig. 4.7 puede ser usado .

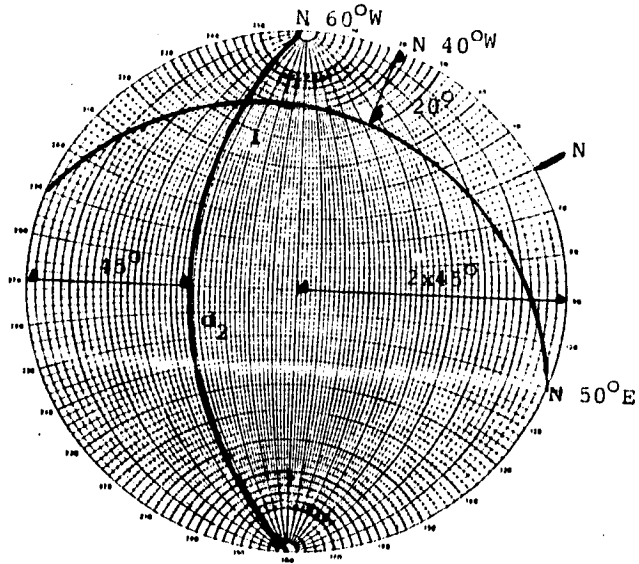


Figura 4.6c

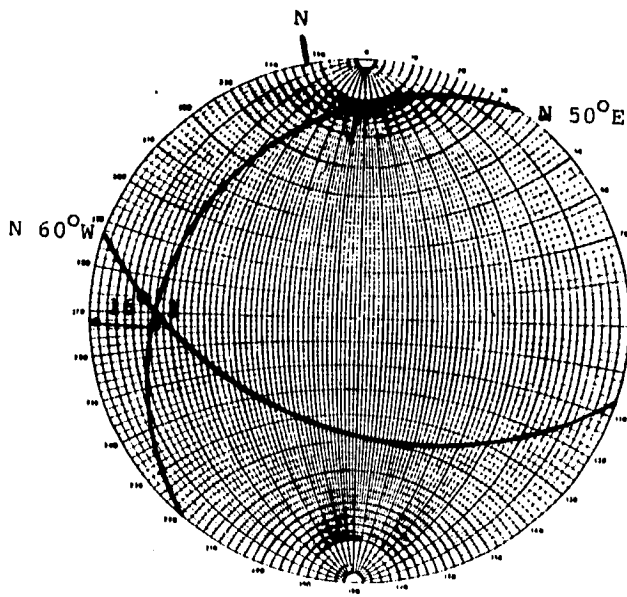


Figura 4.6d

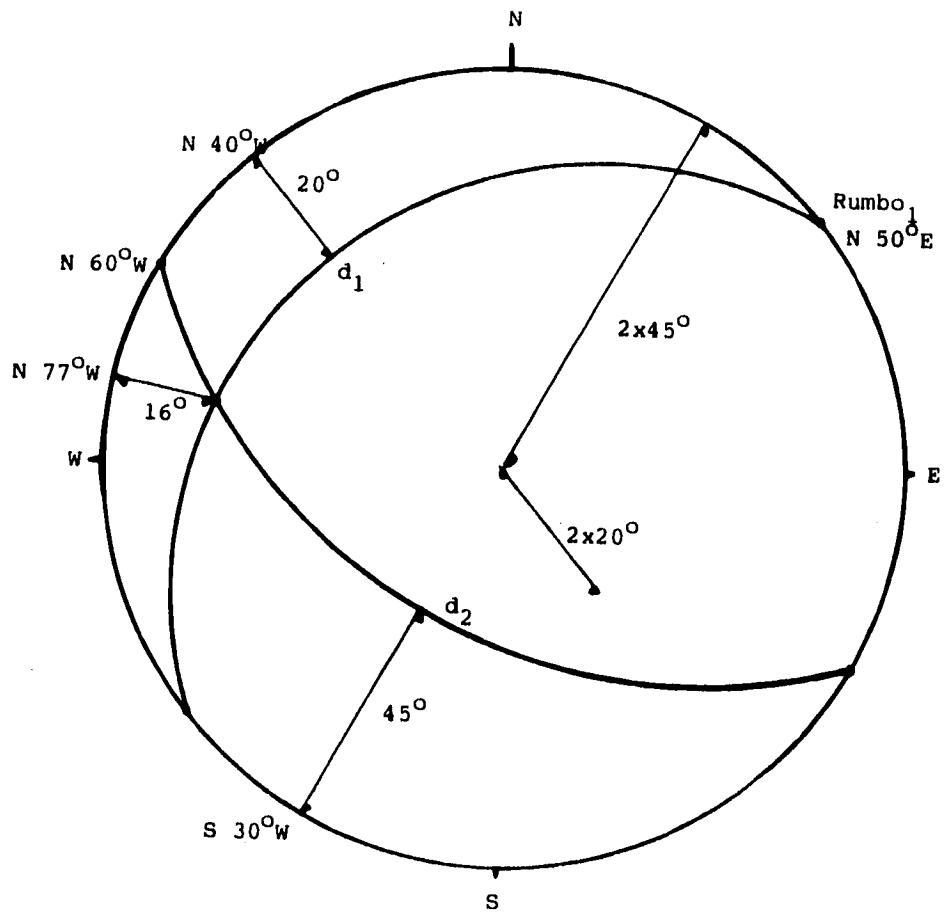


Figura 4.6e

En esta figura , la proyección de los planos del ejemplo de la fig. 4.6 deben trazarse en un papel limpio . La normal al plano 1 es trazada en la fig. 4.7a alineando el vector echado del plano 1 con el eje este-oeste de la estereorred y midiendo  $90^\circ$  desde el gran círculo , representado a la normal por un punto . La normal al plano 2 es trazada de forma similar en la fig. 4.7b .

En la fig. 4.7c las dos normales son alineadas a un gran círculo común , girando lo trazado . La normal a este gran círculo es I y es mostrada en la fig. 4.7c . La fig. 4.7d muestra la traza final de estos pasos . Remarcando que no fue necesario dibujar los grandes círculos de los planos 1 y 2 para encontrar el punto I .

#### **4.4 DESLIZAMIENTO DE UNA CUÑA POR UN PLANO FRICCIONANTE .**

El caso más simple para ilustrar el uso de estereorredes en el análisis de estabilidad de taludes , es el deslizamiento por un solo plano . Aunque la solución de problemas bidimensionales es más simple usando un polígono bidimensional de fuerzas .

##### 4.4.1 Orientación de la fuerza reactiva en un plano de falla .

La fuerza reactiva en una falla ,  $R_L$  , sumatoria de la fuerza normal  $N$  y la máxima fuerza cortante  $S$  , tiene una inclinación igual al ángulo de fricción  $\phi$  , medida a partir de la normal al plano .

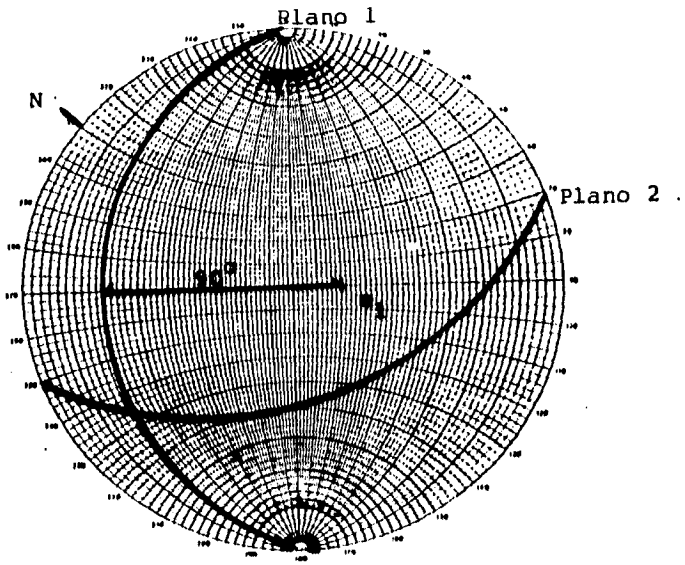


Figura 4.7a

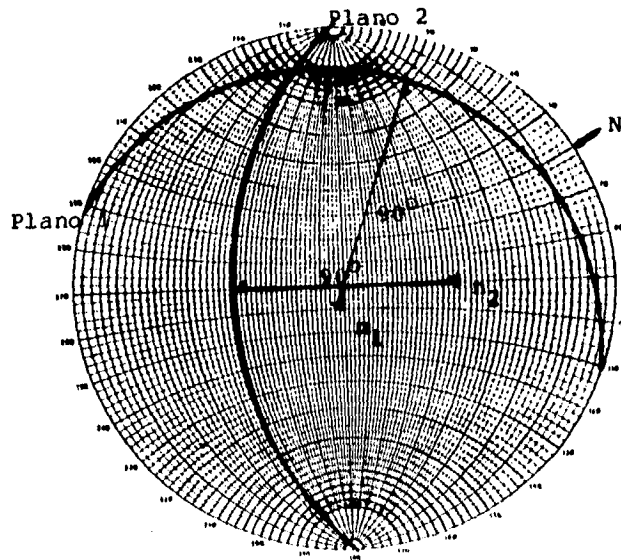


Figura 4.7b

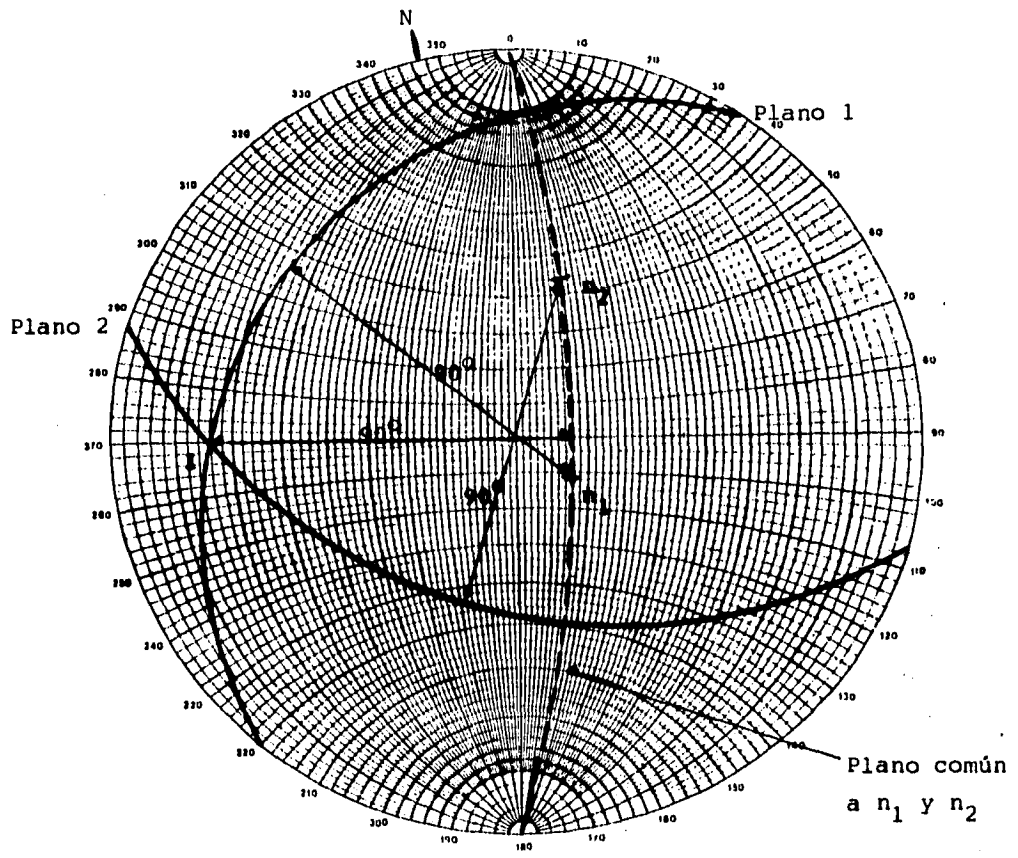


Figura 4.7c

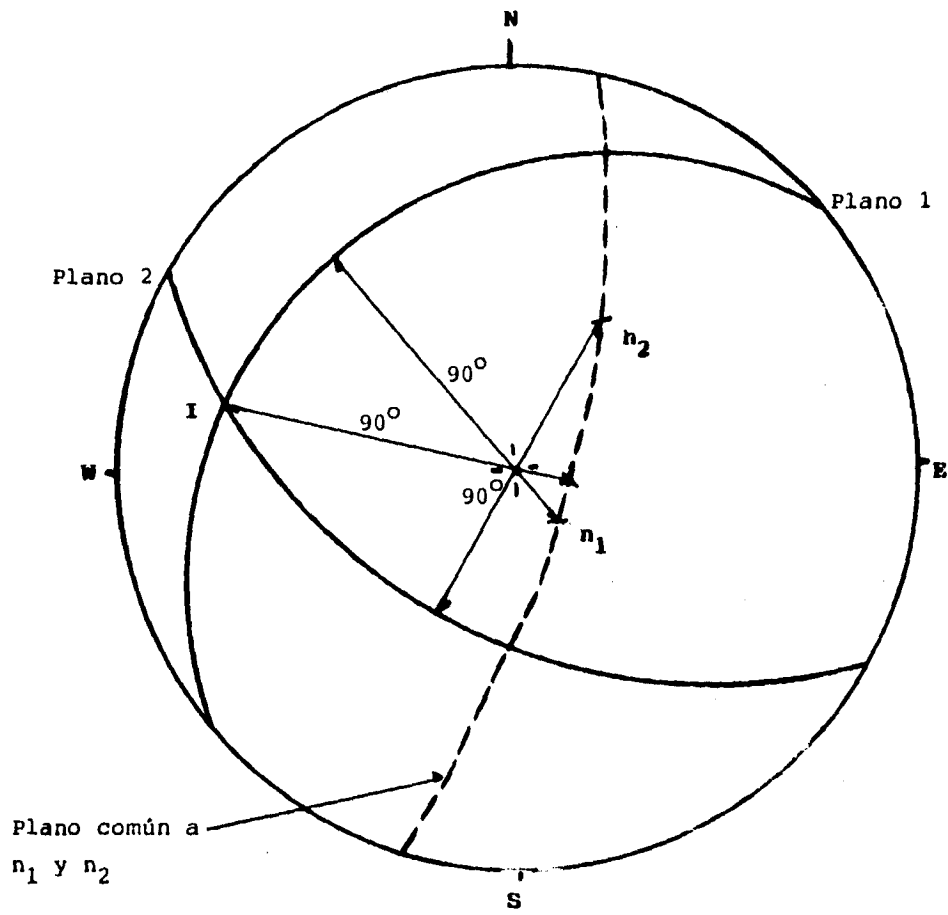


Figura 4.7d

Si la tendencia del deslizamiento es hacia abajo del echado , entonces  $S$  y  $R_L$  actúan como se muestra en la fig. 4.8a . Un cono friccionante puede ser dibujado para mostrar la posible orientación de  $R_L$  deslizando .

Las caras del cono son orientadas a  $\phi$  grados de la normal , como se ilustra en la fig. 4.8a . Si la resultante del vector manejado ,  $R$  , actúa en un ángulo menor que  $\phi$  , entonces el deslizamiento puede no ocurrir . Cuando  $R$  es mayor a  $R_L$  el deslizamiento se ha iniciado .

Un cono friccionante puede trazarse como un círculo en una estereorred , como el mostrado en la fig. 4.8c . La posición de la fuerza normal esta localizada en el polo del plano . El círculo friccionante puede entonces dibujarse marcando  $40^\circ$  desde  $N$  en dos direcciones diametralmente opuestas. Notando que  $N$  no esta en el centro del círculo formado por el cono friccionante .

#### 4.4.2 Estabilidad de una cuña con una fuerza de subpresión actuando .

Aparentemente la cuña con un peso  $W$  no debe deslizar sobre el plano de falla , por que  $\phi$  tiene un valor de  $40^\circ$  y el ángulo de inclinación es de  $30^\circ$  . Esto también se muestra en la fig. 4.8c , en donde el vector peso  $W$  , cae dentro del cono friccionante .

Si la subpresión del agua actúa en el plano de falla , la estabilidad de la cuña puede peligrar . El vector subpresión ,  $U$  , actúa normal al plano de falla , como se muestra en la fig. 4.8a .



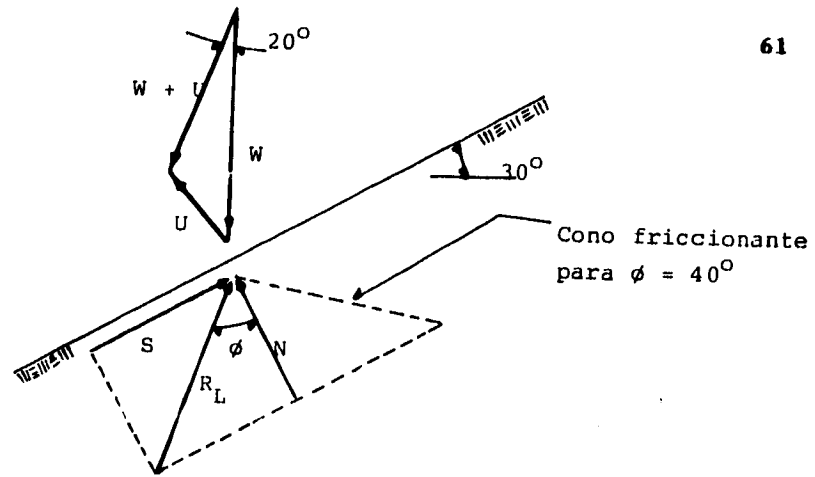


Figura 4.8a

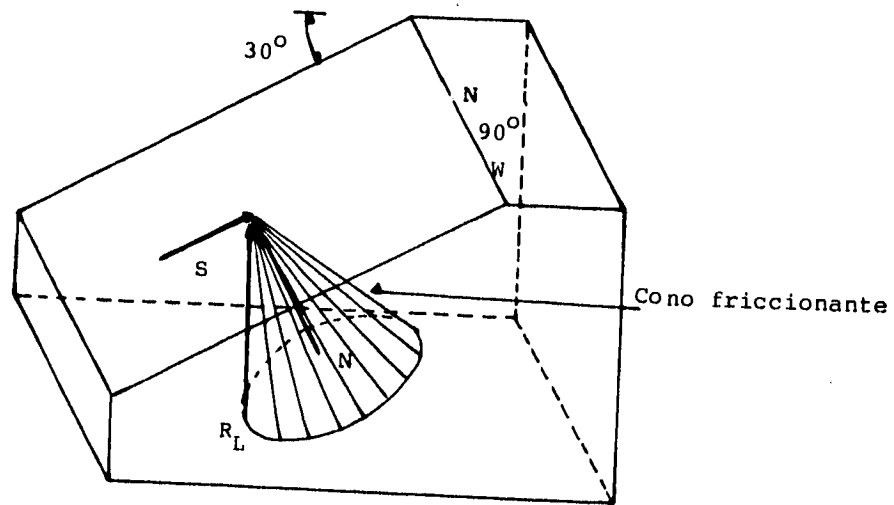


Figura 4.8b

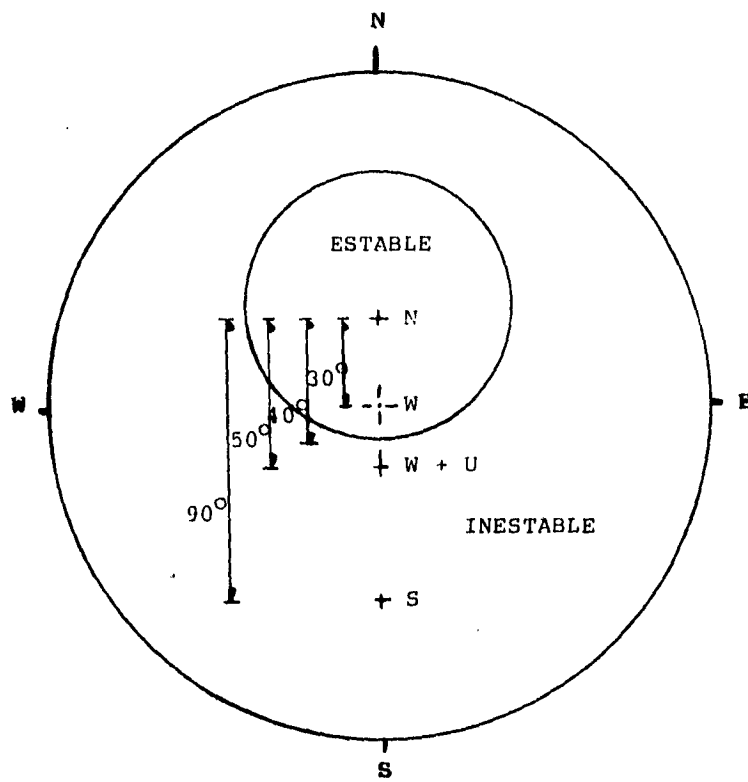


Figura 4.8c

## FACTOR DE SEGURIDAD

1. Debido al peso W :

$$\text{F.S.} = \tan 40^\circ / \tan 30^\circ = 1.45$$

2. Debido a W + U :

$$\text{F.S.} = \tan 40^\circ / \tan 50^\circ = 0.71$$

El vector resultante ,  $R = W + U$  , puede determinarse dibujando a escala los dos vectores en la fig. 4.8a , siendo posible medir el ángulo de la resultante . Para este caso , la magnitud de  $U$  es dada como  $0.44W$  y por lo tanto el ángulo de la resultante desde la vertical es  $20^\circ$  .  $R$  esta localizado  $10^\circ$  afuera del cono friccionante , en la zona de inestabilidad .

El factor de seguridad para los casos donde la fuerza de subpresión esta o no actuando , es mostrada en la fig. 4.8c . La tangente del ángulo entre la normal y el vector resultante es el denominador para ambos casos .

#### 4.4.3 Procedimiento gráfico para determinar la dirección del vector resultante .

La sumatoria de una serie de vectores no puede ser usada en la proyección estereográfica , porque este método no muestra las magnitudes de las fuerzas . Sin embargo , la orientación del vector resultante puede determinarse usando la proyección estereográfica combinada con gráficas de vectores al mismo tiempo . Tres vectores ,  $W$  y  $U$  del ejemplo anterior y uno adicional  $A$  , son ilustrados en la fig. 4.9 .

La gráfica de adición de vectores es mostrada en la fig. 4.10 como se describió en el ejemplo pasado , los vectores  $W$  y  $U$  son añadidos gráficamente para poder determinar la orientación de  $W + U$  , que esta a  $20^\circ$  de la vertical , como se muestra en la fig. 4.10a .

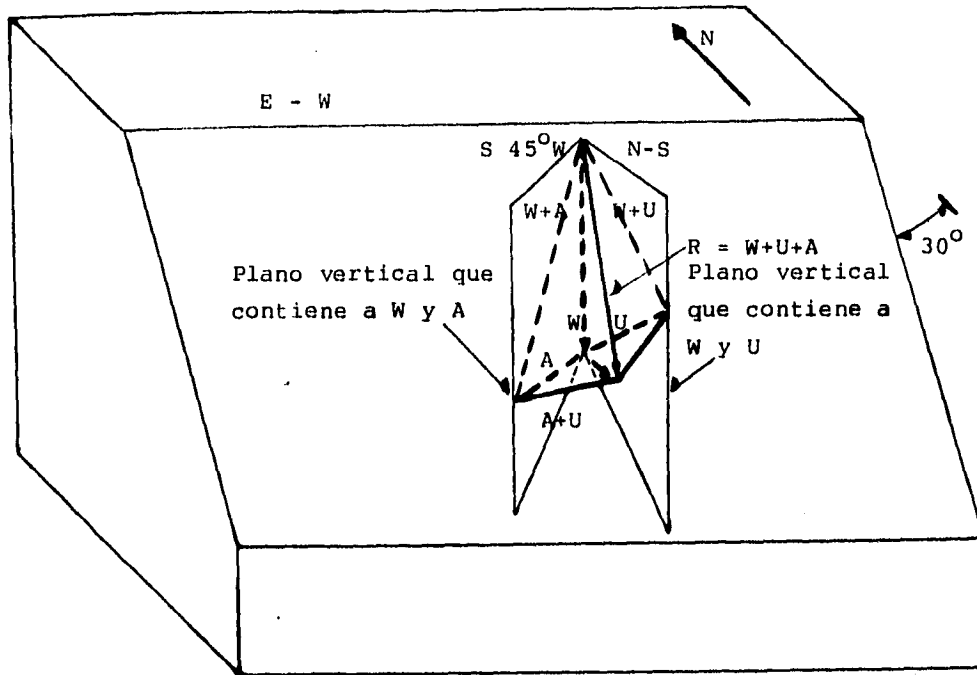


Figura 4.9

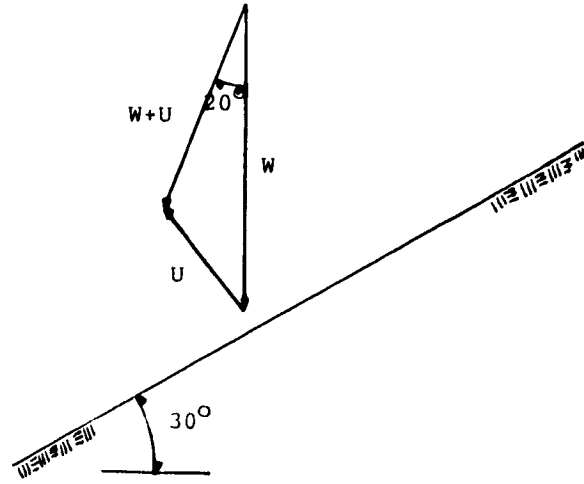


Figura 4.10a

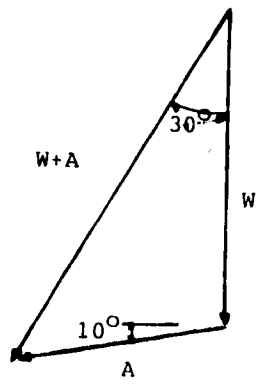


Figura 4.10b

Los vectores  $W$  y  $A$  son añadidos , el vector  $A$  tiene una magnitud de  $0.6W$  y una inclinación de  $10^\circ$  al  $N 40^\circ W$  ,  $W + A$  esta orientado a  $30^\circ$  de la vertical como lo indica la fig. 4.10b .

Una vez que los vectores son trazados , la orientación del vector resultante,  $R = W + U + A$  , puede encontrarse solamente con el uso de estereorredes . Esto se realiza encontrando la línea de intersección de dos planos , un plano que contiene a  $W + A$  y  $U$  , y el otro que contiene a  $W + U$  y  $A$  , como se ilustra en la fig. 4.10c .

La intersección de los dos planos es el vector resultante ,  $R = W + U + A$  . En la estereorred de la figura 4.10c , un gran círculo es dibujado por  $W + A$  y  $U$  , otro gran círculo es dibujado por  $W + U$  y  $A$  . Los dos grandes círculos se intersectan en  $R = W + U + A$  permitiendo así determinar el echado de  $42^\circ$  desde la horizontal en una dirección de  $S 32^\circ W$  .

#### 4.4.4 Determinación del factor de seguridad de una cuña cuando actúa un vector resultante .

En la fig. 4.11 el vector resultante ,  $R = W + U + A$  , puede ser combinado con el diagrama del cono friccionante . La dirección del deslizamiento puede ser en la dirección de la fuerza cortante  $S$  , deslizando por una línea inclinada  $25^\circ$  en una dirección  $S 27^\circ W$  . Señalando que esta dirección no es la misma que la dirección  $S 32^\circ W$  del vector resultante  $R$  .

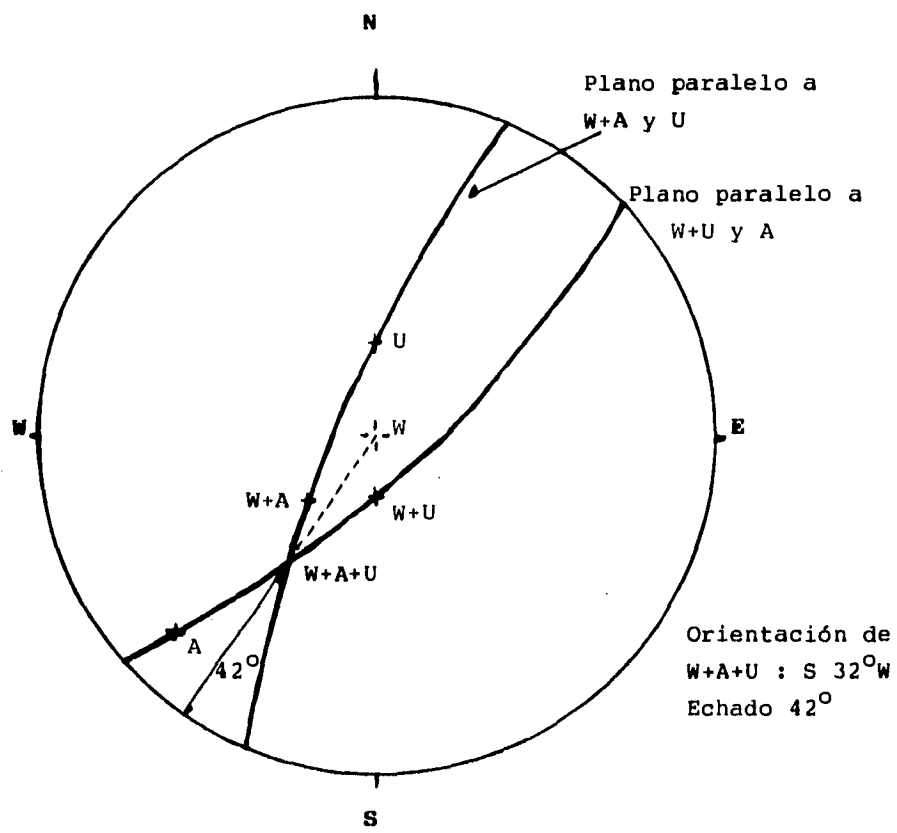
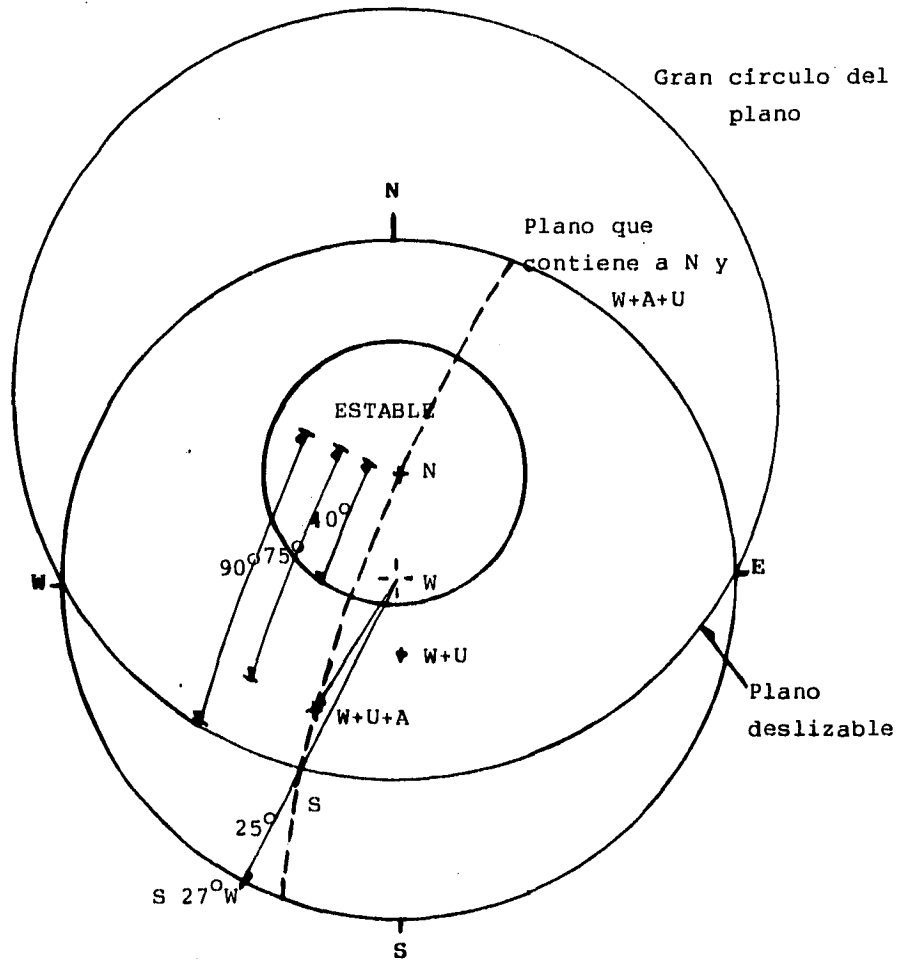


Figura 4.10c



$$F.S. = \tan 40^\circ / \tan 75^\circ = 0.22$$

Figura 4.11



El factor de seguridad es calculado por las distancias angulares de este gran círculo. Desde N hasta  $R_L$ , el ángulo es de  $40^\circ$ , mientras el ángulo entre N y R es de  $75^\circ$ . El factor de seguridad es :

$$F.S. = \text{Tan}40^\circ / \text{Tan}75^\circ = 0.22$$

#### 4.4.5 Mínima fuerza para causar la falla .

La orientación de la mínima fuerza NW , requerida para causar la falla en la cuña, puede ser determinada desde la estereorred . Para determinar la magnitud de la mínima fuerza , una gráfica auxiliar como la mostrada en la fig. 4.12a es necesaria.

Para el plano inclinado  $30^\circ$  mostrado en la fig. 4.8a , la cuña es estable bajo su propio peso W . Para reducir el factor de seguridad a uno , el ángulo entre el vector peso W y la fuerza reactiva  $R_L$  debe cerrar . Este ángulo es de  $10^\circ$  y produce que las fuerzas actuantes causen el deslizamiento directamente abajo del echado, hacia el sur . Cualquier otra dirección de deslizamiento puede causar un incremento en el ángulo entre  $R_L$  y W y un aumento del valor de la fuerza NW .

La mínima fuerza NW debe estar dirigida a  $10^\circ$  hacia arriba siendo normal a  $R_L$ , como lo ilustra la fig. 4.12b . La mínima fuerza puede ser casi horizontal para el caso de deslizamiento de una cuña cargada solo por su propio peso , en donde el factor de seguridad es cercano a uno .

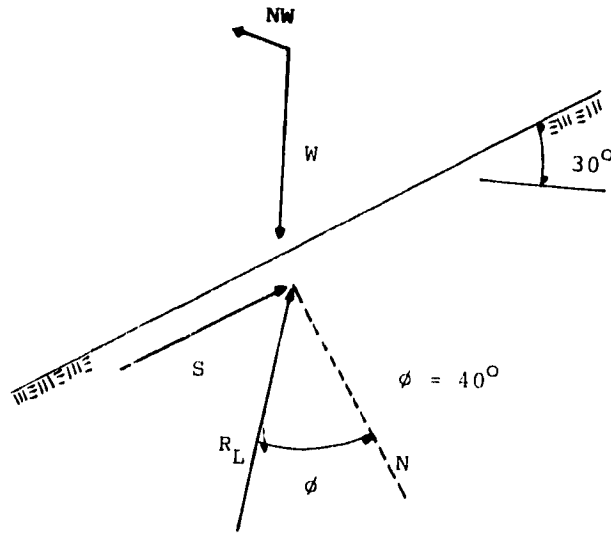


Figura 4.12a

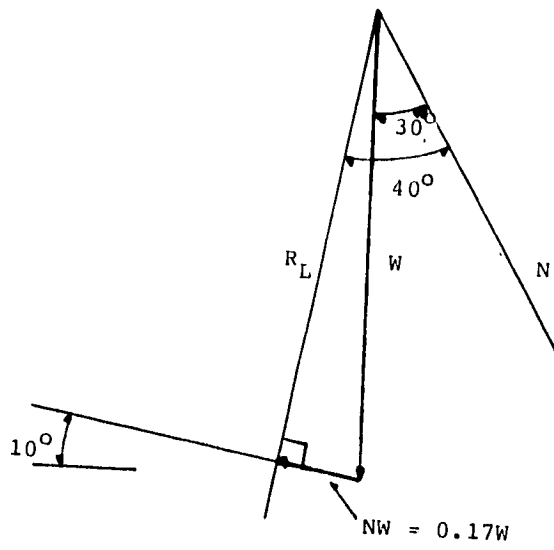
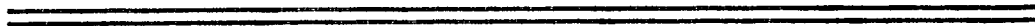


Figura 4.12b

## **CAPÍTULO V**

### **ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE CUÑAS APOYADAS EN DOS PLANOS DE FALLA**



### **5.1 DESLIZAMIENTO DE UNA CUÑA POR DOS PLANOS .**

Los modos de falla de una cuña a través de dos planos puede ser rápidamente determinada con el uso de la estereorred . La orientación de las fuerzas involucradas determinan si la falla es a lo largo de la línea de intersección de ambos planos o el deslizamiento es por un solo plano o separando a la cuña de ambos planos . Para mostrar más claramente este tipo de deslizamiento se resolverá un ejemplo .

La orientación de la línea de intersección de dos planos potenciales de falla es determinada usando la estereorred como se ilustra en la fig. 5.1 . Los grandes círculos para los dos planos son dibujados en la estereorred y la intersección es determinada como se describió en el capítulo anterior . Para el ejemplo mostrado en la fig. 5.1 , la línea de intersección está orientada al S 27° W y a 40° abajo de la horizontal .

En la fig. 5.2 el diagrama representa a los dos planos , mostrando su línea de intersección y los conos friccionantes de cada plano . Por conveniencia , los conos friccionantes son mostrados arriba del plano de falla .

Plano 1 : Rumbo NE  $54^{\circ}$  , Echado SE  $62^{\circ}$  ,  $\phi = 20^{\circ}$

Plano 2 : Rumbo NW  $4^{\circ}$  , Echado SW  $59^{\circ}$  ,  $\phi = 40^{\circ}$

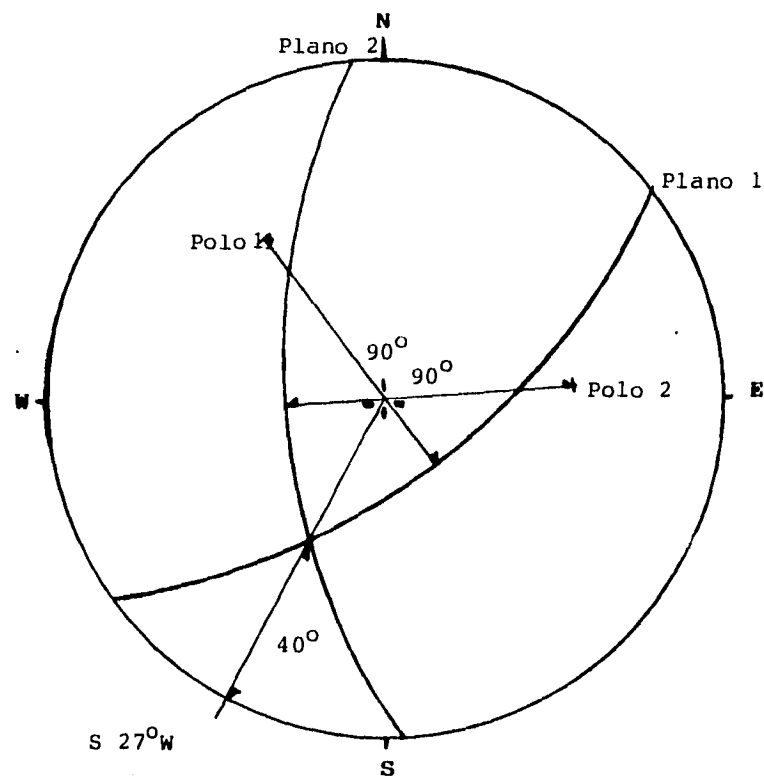


Figura 5.1

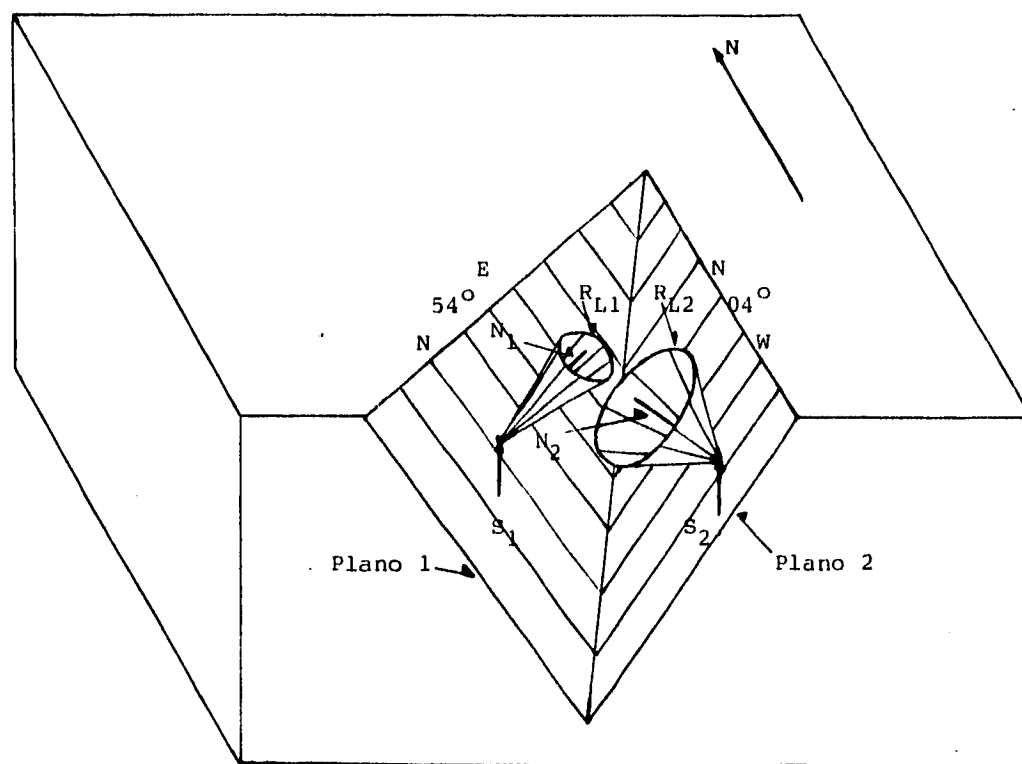


Figura 5.2

## **5.2 FUERZAS REACTIVAS EN LOS PLANOS DE FALLA .**

Las zonas de estabilidad e inestabilidad están separadas en la estereorred de la fig. 5.3 por los límites de las fuerzas reactivas ,  $R_{L1}$  y  $R_{L2}$  . La zona de inestabilidad incluye zonas de deslizamiento abajo y arriba de la intersección , deslizando en un solo plano y levantando a la cuña de los planos . Para el caso de deslizamiento solo por el plano 1 , la orientación de  $R_{L1}$  es definida por el cono friccionante en el plano 1 .

Para el caso de deslizamiento por la línea de intersección de los planos 1 y 2 , la resultante  $R_{L1} + R_{L2}$  separa las zonas de estabilidad e inestabilidad . El límite entre el deslizamiento por la intersección de los dos planos y el deslizamiento por el plano 1 es un gran círculo que representa a un plano normal a el plano 1 y paralelo a la línea de intersección de ambos planos .

## **5.3 MÉTODO PARA LOCALIZAR EL LÍMITE ENTRE LAS ZONAS ESTABLES E INESTABLES .**

Para el caso de deslizamiento a lo largo de la línea de intersección , la localización de la resultante ,  $R_{L1} + R_{L2}$  , debe ser determinada alrededor del contorno de la zona de estabilidad y de inestabilidad .

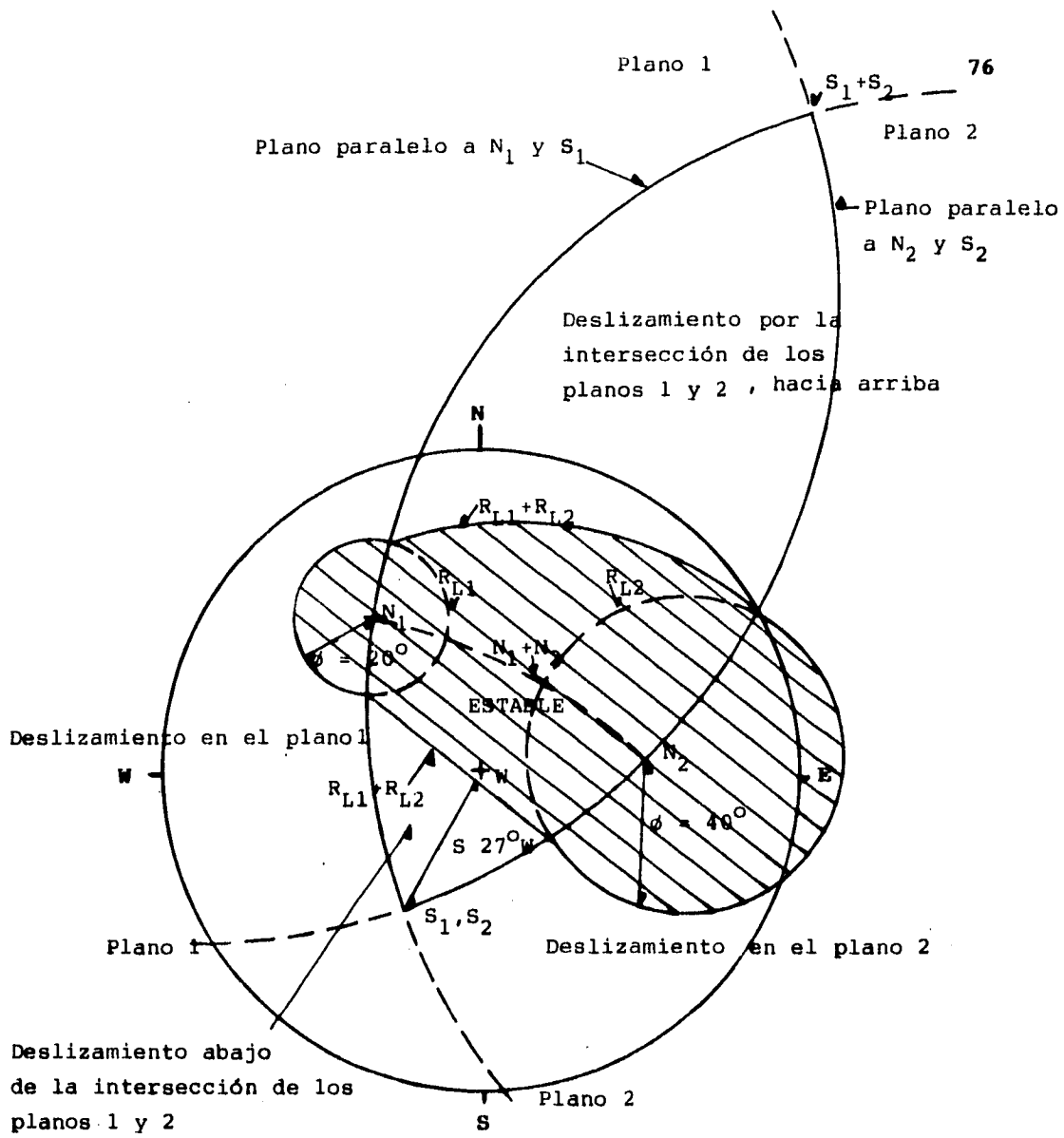


Figura 5.3



Las fuerzas cortantes de los planos 1 y 2 deben actuar en la dirección del deslizamiento , aunque para este caso es paralelo a la línea de intersección y por lo tanto , las fuerzas cortantes  $S_1$  y  $S_2$  , deben trazarse en la estereorred en el mismo punto formando la línea de intersección , como lo muestra la fig. 5.3 .

La dirección de la fuerza reactiva a cada plano es conocida , solo la dirección de sus componentes , las fuerzas cortantes y normales al plano son fijadas . La fuerza reactiva  $R_{L1}$  debe actuar dentro del plano en el que  $N_1$  y  $S_2$  actúan . Por lo tanto , la dirección de la fuerza reactiva  $R_{L1}$  puede localizarse dibujando un gran círculo por  $N_1$  y  $S_1$  , donde el círculo intersecta al cono friccionante del plano 1 . De forma similar  $R_{L2}$  es localizada .

Si  $R_{L1}$  y  $R_{L2}$  son sumadas , la resultante ,  $R_{L1} + R_{L2}$  , actúa en el plano paralelo a  $R_{L1}$  y  $R_{L2}$  . Este plano está localizado en la estereorred de la fig. 5.3 dibujando un gran círculo que pase por  $R_{L1}$  y  $R_{L2}$  . La orientación de un vector resultante actuante afuera de la zona de estabilidad delineada por  $R_{L1} + R_{L2}$  , puede provocar el deslizamiento por la intersección de los dos planos .

En la fig. 5.3 el vector peso  $W$  esta localizado en la zona de estabilidad . Para provocar el deslizamiento solo se necesita una pequeña fuerza dirigida hacia el sur para mover el vector peso afuera de la zona de estabilidad y así provocar el deslizamiento por la línea de intersección de los dos planos .

#### 5.4 MÍNIMA FUERZA PARA CAUSAR EL DESLIZAMIENTO DE UNA CUÑA.

La mínima fuerza NW requerida para provocar el deslizamiento puede ser determinada por medios análogos a los usados para determinar la mínima fuerza para provocar el deslizamiento por un solo plano. Para cerrar el polígono de fuerzas y poder obtener un factor de seguridad unitario, una fuerza debe ser añadida para conectar el vector peso  $W$  con el plano de las reacciones,  $R_{L1} + R_{L2}$ . La mínima fuerza debe actuar normal a este plano como se muestra en la fig. 5.4b.

La orientación de la mínima fuerza puede ser obtenida desde la estereorred de la fig. 5.4a y su magnitud puede ser determinada con la construcción gráfica de un polígono de fuerzas como la ilustrada en la fig. 5.4b. En esta figura el mínimo ángulo entre  $W$  y  $R_{L1} + R_{L2}$ , que debe cerrar para tener un factor de seguridad igual a uno, es de  $4^\circ$ .

Hay que señalar que el echado de la mínima fuerza,  $SW 40^\circ$  no es el mismo rumbo que el de la línea de intersección,  $SW 27^\circ$ . En general, la mínima fuerza NW no debe orientarse a lo largo del rumbo de la línea de intersección de la cuña cuando solamente actúa su propio peso y el ángulo de fricción de los planos es igual.

Es muy probable que la diferencia en magnitud entre la mínima fuerza NW y su proyección horizontal, esta última paralela al rumbo de la línea de intersección, pueda ser pequeña.

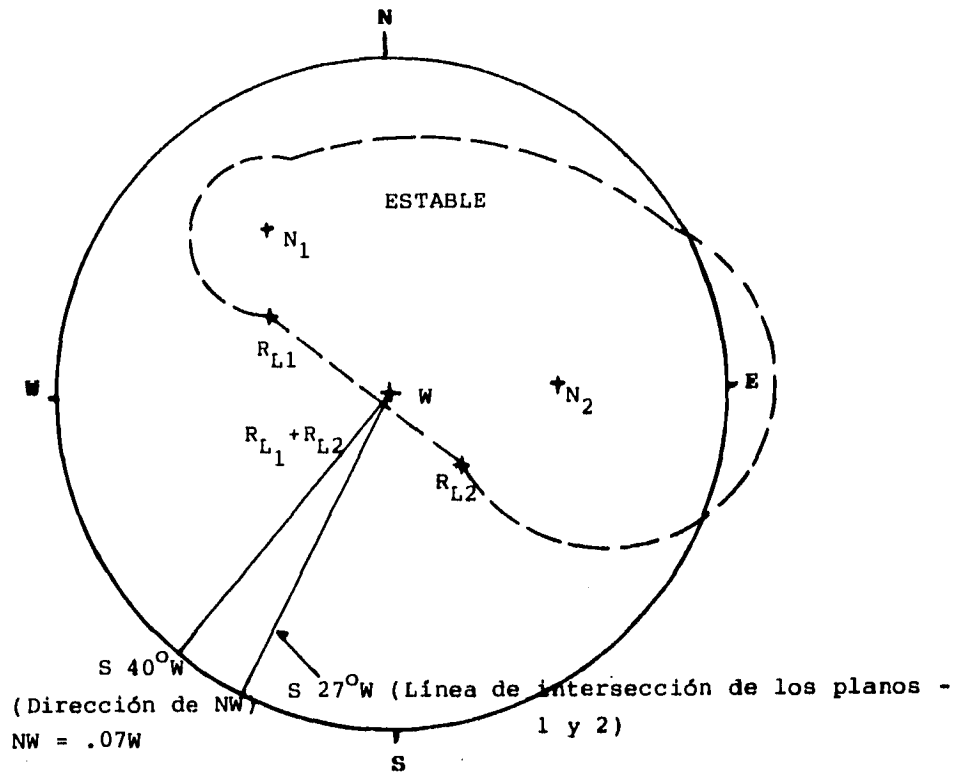


Figura 5.4a

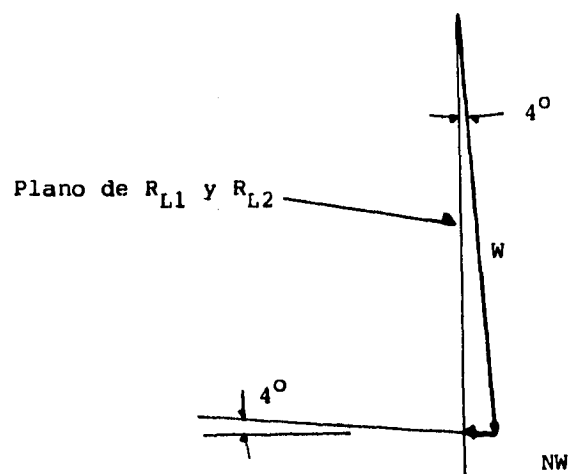


Figura 5.4b

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

### 5.5 FACTOR DE SEGURIDAD Y MÍNIMA FUERZA PARA ESTABILIZAR UNA CUÑA .

Dos casos son ilustrados en la fig. 5.5 , en el caso 1 en la cuña actúa una fuerza **D** causando el deslizamiento por un solo plano y el caso 2 en la cuña actúa una fuerza **B** causando un deslizamiento a lo largo de la línea de intersección de los planos 1 y 2 .

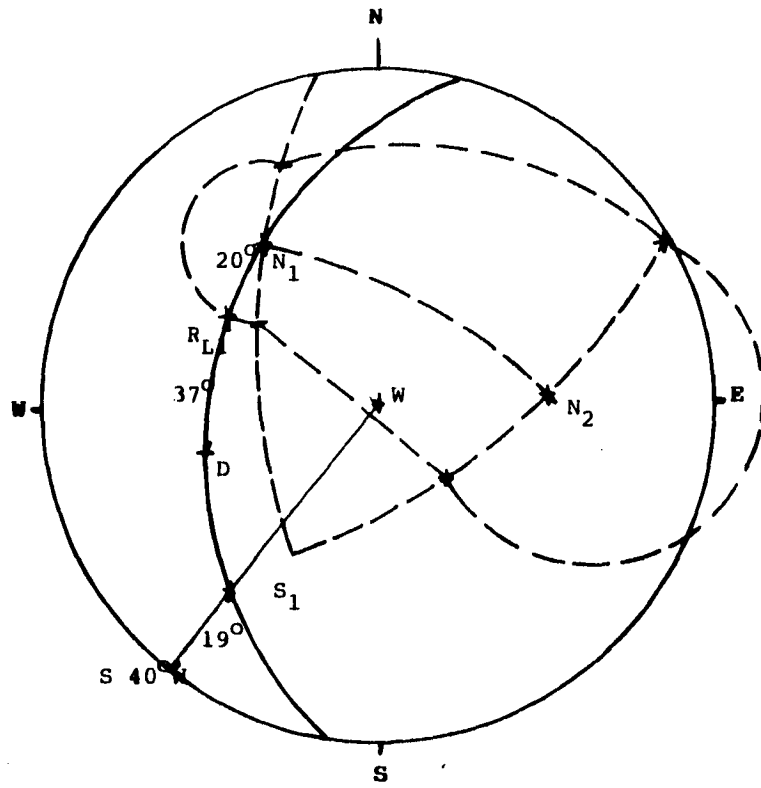
Caso 1 : En la cuña actúa una fuerza **D** , produciendo el deslizamiento por un solo plano . En este caso , la orientación de la fuerza normal  $N_1$  al plano 1 y la fuerza **D** son conocidos, mientras la orientación de la fuerza cortante  $S_1$  y la reacción  $R_{L1}$  en el plano 1 son las incógnitas .  $S_1$  y  $R_{L1}$  son conocidos al actuar dentro del plano de  $N_1$  y **D**, su posición se obtiene dibujando un gran círculo por  $N_1$  y **D** , líneas continuas en la fig. 5.5a , localizando a  $S_1$  a  $90^\circ$  de  $N_1$  y localizando a  $R_{L1}$  a  $\phi^\circ$  de  $N_1$  , alrededor del gran círculo . En el ejemplo mostrado , el ángulo entre  $N_1$  y  $R_{L1}$  es de  $\phi = 20^\circ$  y el ángulo entre  $R_{L1}$  y **D** es de  $37^\circ$  . Por lo tanto , el factor de seguridad es de :

$$F.S. = (\text{Sumatoria de fuerzas resistentes}) / (\text{Sumatoria de fuerzas actuantes})$$

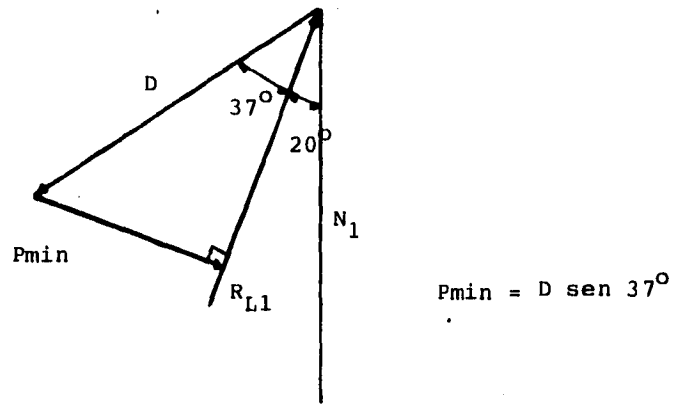
$$F.S. = \text{Tan}20^\circ / \text{Tan}(20^\circ+37^\circ)$$

$$F.S. = 0.24$$

El deslizamiento debe ocurrir en dirección de la fuerza cortante  $S_1$  , para este caso inclinada  $19^\circ$  en una dirección S  $40^\circ$  W , en el plano 1 .



CASO 1 : Deslizamiento por el plano 1



$$P_{min} = D \operatorname{sen} 37^\circ$$

Figura 5.5a

La magnitud de la mínima fuerza  $P$  requerida para cerrar el ángulo de  $37^\circ$  entre  $R_{L1}$  y  $D$ , e incrementar el factor de seguridad a uno, puede ser determinada de la construcción gráfica de la fig. 5.5a. Si la magnitud de  $D$  es conocida la mínima fuerza es :

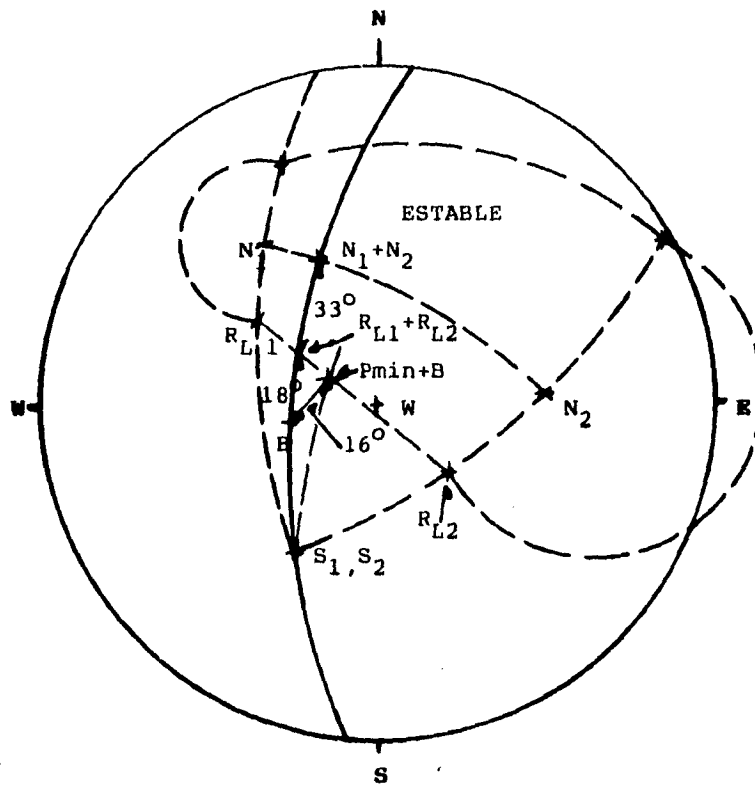
$$P_{\min} = D \operatorname{sen}37^\circ$$

**Caso 2 :** Sobre la cuña actúa un vector  $B$  y el deslizamiento es por la línea de intersección de los planos 1 y 2. La dirección de las fuerzas cortantes  $S_1$  y  $S_2$  están fijadas, paralelas a la línea de intersección de los planos 1 y 2, mientras la posición de  $N_1 + N_2$  y  $R_{L1} + R_{L2}$  quedan definidos dibujando un gran círculo por  $S_1$ ,  $S_2$  y  $B$ , línea continua en la fig. 5.5b.  $R_{L1} + R_{L2}$  esta localizada en la intersección de este gran círculo y un gran círculo formado por  $R_{L1}$  y  $R_{L2}$ .  $N_1 + N_2$  esta localizado en la intersección de el gran círculo formado por  $S_1$ ,  $S_2$  y  $B$ , y el gran círculo formado por  $N_1$  y  $N_2$ .

El factor de seguridad es para este caso determinado por el ángulo de  $51^\circ$  entre  $N_1 + N_2$  y  $B$ , y el ángulo de  $33^\circ$  entre  $N_1 + N_2$  y  $R_{L1} + R_{L2}$ . El factor de seguridad es entonces :

$$F.S. = \operatorname{Tan}33^\circ / \operatorname{Tan}(33^\circ + 18^\circ) = 0.53$$

La dirección del deslizamiento es a lo largo de la línea de intersección, inclinada  $40^\circ$  hacia el S  $27^\circ$  W.



CASO 2 : Deslizamiento por la intersección de los planos 1 y 2

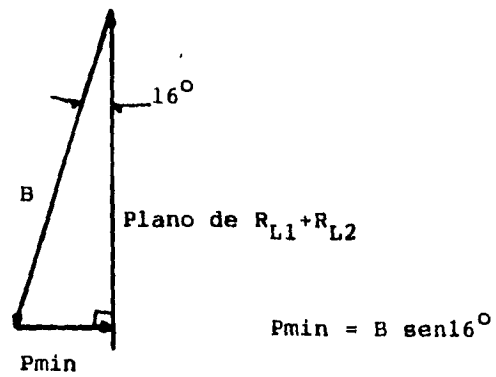


Figura 5.5b

El factor de seguridad para este caso es engañoso , porque la fuerza requerida para estabilizar la cuña no se tiene cerrando el ángulo de  $18^\circ$  entre  $R_{L1} + R_{L2}$  y  $B$  . En lugar de esto , la mínima fuerza  $P_{min}$  se obtiene con un ángulo de  $16^\circ$  , por lo que la mínima fuerza es igual a  $B \text{ sen}16^\circ$  . Señalando que el nuevo vector resultante ,  $P_{min-B}$  , actúa en un plano diferente del plano en el que  $B$  originalmente actuaba.



## **CAPÍTULO VI**

### **ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE CUÑAS APOYADAS EN TRES PLANOS DE FALLA**

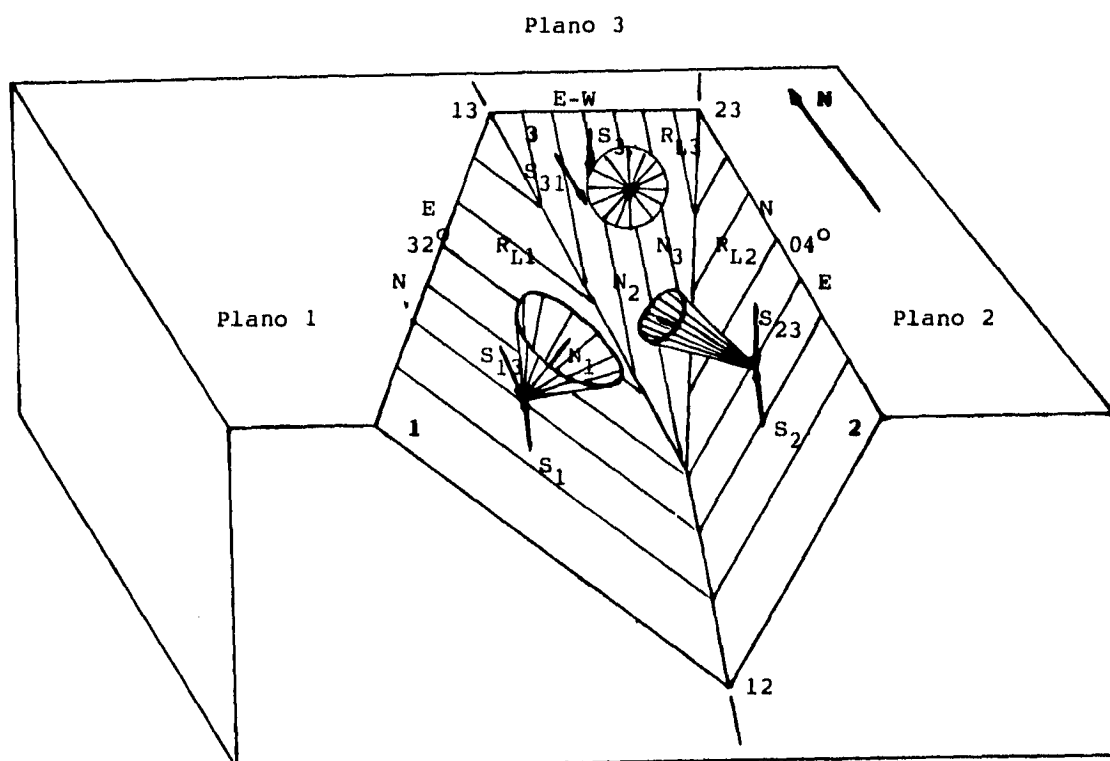


### 6.1 DESLIZAMIENTO DE UNA CUÑA POR TRES PLANOS .

Para el caso de deslizamiento por tres planos otro círculo friccionante es añadido en la estereorred , dependiendo la orientación de las fuerzas el deslizamiento puede ocurrir en cualquiera de los tres planos o en una de las líneas de intersección de dos planos o bien la cuña puede levantarse de los tres planos .

Los métodos para determinar la mínima fuerza requerida para causar el deslizamiento , el factor de seguridad y otros , se determinan de forma similar a la vista para el caso de dos planos , en el capítulo 5 . Antes de hacer cualquier análisis de estabilidad , se debe verificar que los planos sean planos potenciales de falla y que la cuña sea crítica .

La figura 6.1 muestra a los tres planos , la orientación y los ángulos friccionantes y su correspondiente estereorred se muestra en la fig. 6.2 . Para este caso , considerando los tres planos actuando en la cuña , el deslizamiento no ocurre bajo su propio peso . Para que ocurra el deslizamiento arriba del plano 3 o por la línea de intersección de los planos 1 y 3 , o deslizar a lo largo de la línea de intersección de los planos 3 y 2 , una fuerza debe ser añadida .



Plano 1 : Rumbo NE  $32^\circ$  , Echado SE  $40^\circ$  ,  $\phi = 34^\circ$   
 Plano 2 : Rumbo NE  $04^\circ$  , Echado W  $60^\circ$  ,  $\phi = 12^\circ$   
 Plano 3 : Rumbo E-W , Echado S  $50^\circ$  ,  $\phi = 20^\circ$

Figura 6.1

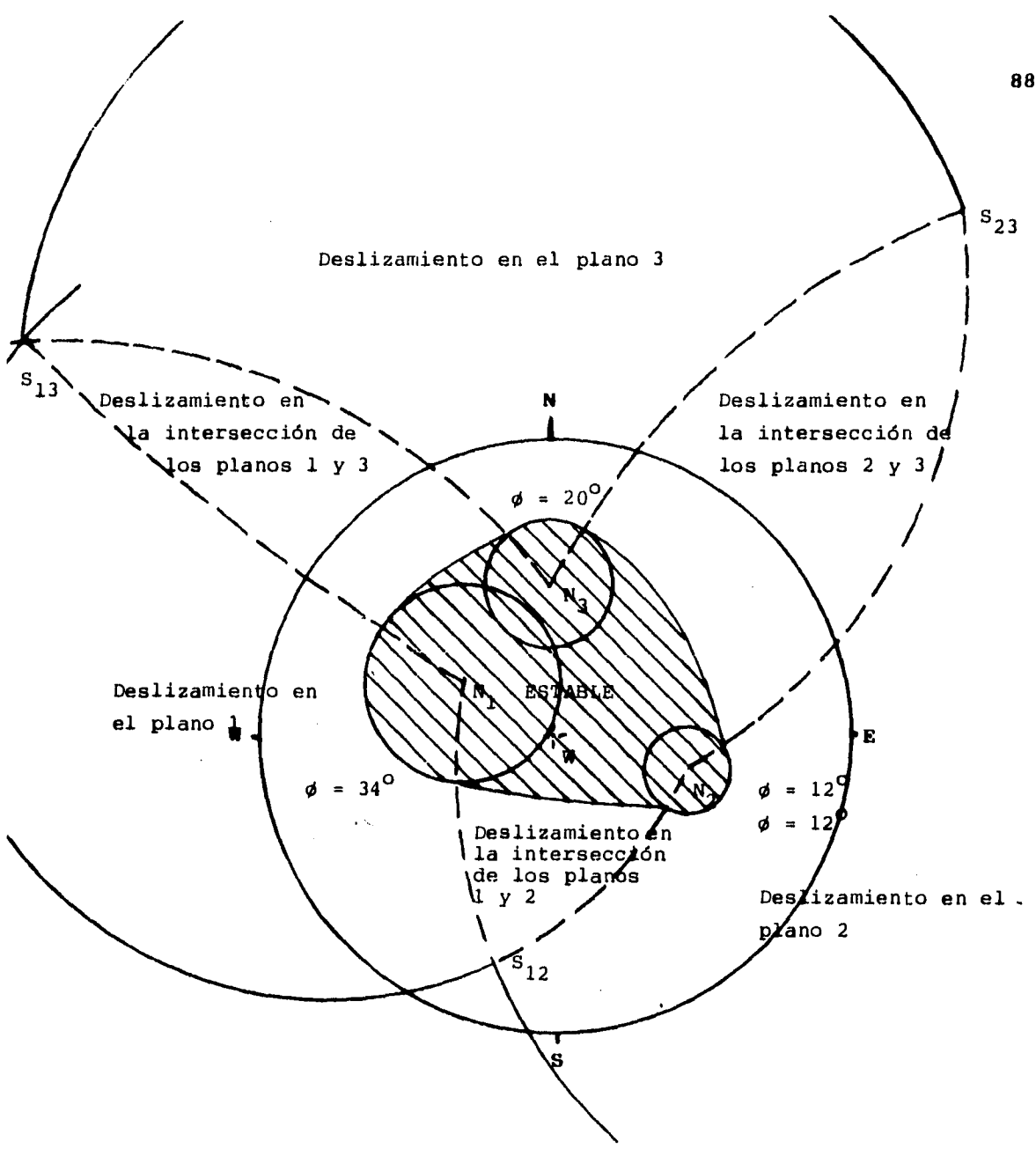


Figura 6.2

## **6.2 MODOS DE FALLA DE UNA CUÑA LIMITADA POR TRES PLANOS .**

Aunque la cuña mostrada en la fig. 6.1 , limitada por tres planos es estable , puede no ser estable si el plano 3 está en la base y corta a los planos , como se muestra la fig. 6.3a . Casos similares a este pueden ocurrir en macizos rocosos donde el conjunto de juntas forman múltiples cuñas , en lugar de una sola cuña.

Para los planos 1 y 2 , mostrados en la fig. 6.3a , la cuña todavía es estable bajo su propio peso , como se presentó en la fig. 6.2a . Si el plano 3 se extiende indefinidamente en la base , el plano 2 ya no limita a las cuñas A y B y así el deslizamiento puede ocurrir a lo largo de la intersección de los planos 1 y 3 , como se muestra en la fig. 6.3b .

Otro modo de falla puede ser por las cuñas A y B , actuando como una sola cuña, girando afuera de la línea de intersección de los planos 1 y 3 y deslizando solo por el plano 3 . Esto es probable que ocurra si la masa de las cuñas es concentrada sobre el plano 3 , afuera de la línea de intersección de los planos 1 y 3 . Las cuñas fallando por medio de un giro son analizadas en la sección 6.3 .

Otra posibilidad es que las cuñas A y B se rompan hacia arriba y se deslicen como bloques individuales , la cuña A posiblemente se deslizará en la intersección de los planos 1 y 3 y la cuña B se deslice solo por el plano 3 . Cuando los planos representan conjuntos de juntas en lugar que solo discontinuidades , modos de falla similares a las descritas arriba comienzan a ser bastante posible , permitiendo deslizar las cuñas en planos simples en lugar que en múltiples planos .

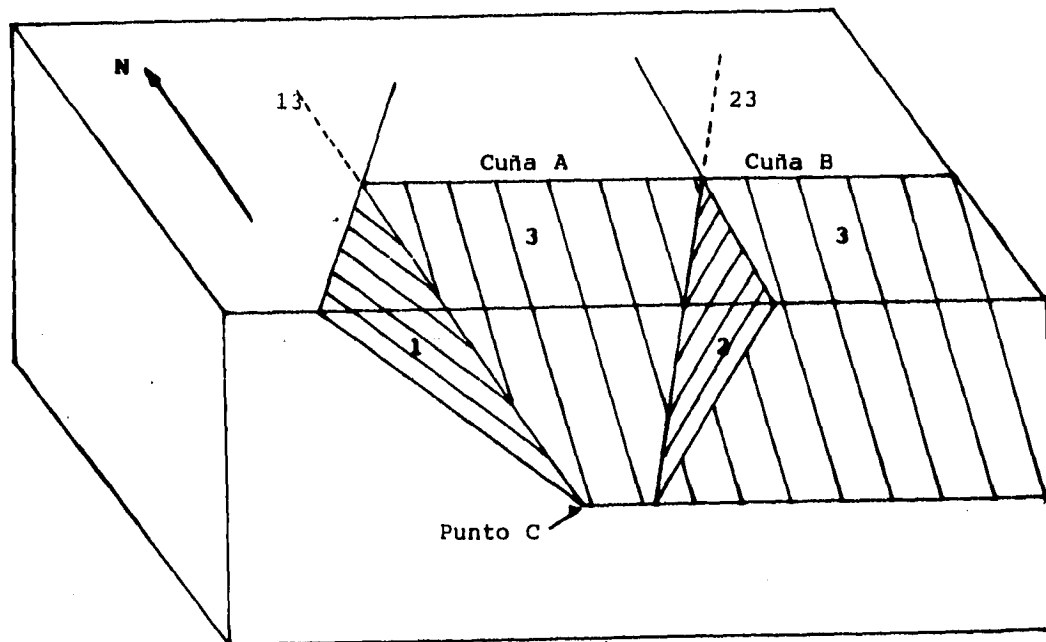


Figura 6.3a

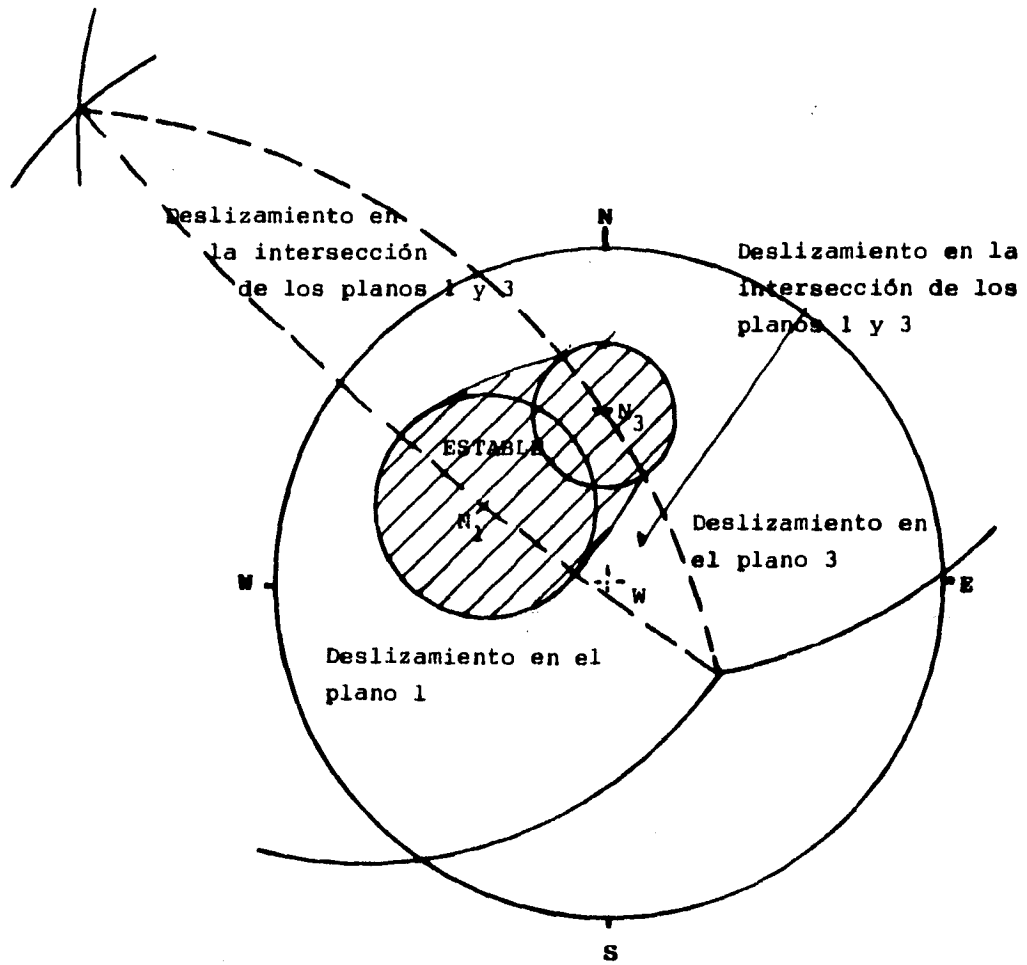


Figura 6.3b

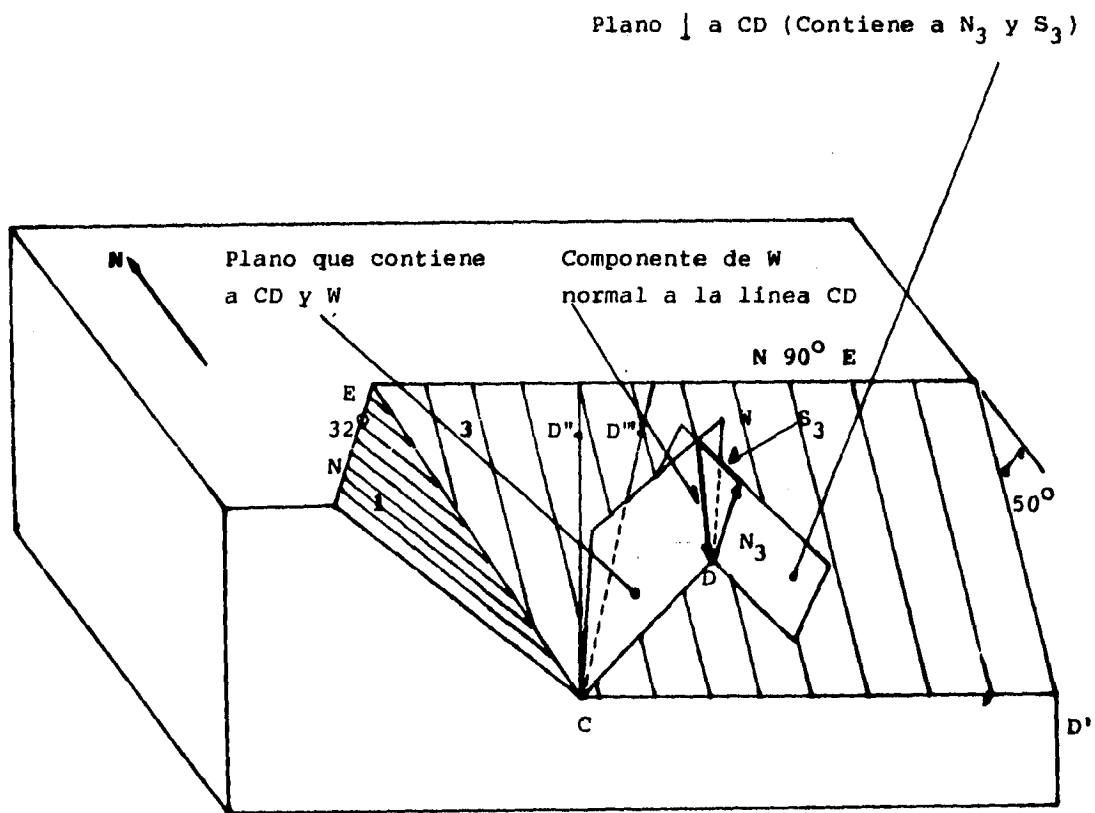
En general , el menor factor de seguridad se puede obtener , si la masa tiene una tendencia a moverse como si fueran varios cuerpos rígidos arriba del conjunto de juntas , en lugar de moverse como un solo cuerpo rígido . Esto es muy importante que se considere en la fase exploratoria del estudio de estabilidad del talud , antes de seleccionar la cuña crítica para el análisis de estabilidad .

### **6.3 FACTOR DE SEGURIDAD POR ROTACIÓN DE UNA CUÑA POR UN PLANO .**

El factor de seguridad en contra de una rotación puede ser estimado usando la estereorred si el punto de aplicación de las fuerzas manejadas en el plano de falla es conocido . Considerando el ejemplo de la fig. 6.4a , la cuña mostrada es la misma del ejemplo de la fig. 6.3a pero incrementando el ángulo friccionante del plano 1 de  $34^\circ$  a  $40^\circ$  , así la cuña es ahora estable contra deslizamiento cuando actúa sobre ella su propio peso , debajo de la intersección de los planos 1 y 3 .

Asumiendo que la rotación ocurre alrededor del punto C en la base de la cuña y que las fuerzas cortante y normal en el plano 3 pueden ser sumadas como fuerzas  $N_3$  y  $S_3$  , actuando en el punto D que es el punto de intersección de la componente normal del vector W en el plano 3 . Por lo cual , la dirección de la fuerza cortante  $S_3$  es perpendicular a la línea CD , como se muestra en la fig. 6.4a.





$C$  es el centro de rotación de la cuña  
 $D$  es el punto de intersección de la fuerza  $W$  con el plano 3

Figura 6.4a

La condición dada para la cuña de la fig. 6.4a es :

Plano 1 : Rumbo NE  $32^\circ$  , echado  $40^\circ$  SE ,  $\phi = 40^\circ$

Plano 3 : Rumbo EW , echado  $50^\circ$  S ,  $\phi = 20^\circ$

También se supone que el centro de gravedad de la cuña es conocido . La línea CD es el brazo del momento desde el centro de rotación C al punto de intersección de la componente del vector peso W en el plano 3 , punto D . Su orientación es asumida y es de S  $45^\circ$  W en el plano 3 .

Por lo anterior , la cuña es estable solo en el plano 1 , por que el echado del plano 1 iguala al ángulo de fricción del plano 1 , que es de  $40^\circ$  . La cuña es por lo tanto estable contra deslizamiento en la intersección de los planos 1 y 3 . La cuña no es estable en el plano 3 , por que su echado excede a su ángulo de fricción .

Si la cuña se extendiera una distancia infinita a la derecha del diagrama , la cuña se comportaría como si se deslizara solo en el plano 3 , ya que la totalidad del peso de la cuña caería sobre el plano 3 y una porción mínima actuaría en el plano 1 . En este caso el brazo del momento para girar la cuña se extiende paralelamente al rumbo del plano 3 , línea CD' fig. 6.4a . Así la fuerza cortante  $S_3$  actuaría directamente arriba del echado del plano 3 , condición necesaria para causar deslizamiento por un solo plano .

El factor de seguridad contra deslizamiento rotando es :

$$F.S. = (\text{MOMENTO RESISTENTE})/(\text{MOMENTO ACTUANTE})$$

$$F.S. = ( CD' W \text{ Tan}20^\circ )/( CD' W \text{ Tan}50^\circ )$$

$$F.S. = \text{Tan } 20^\circ / \text{Tan } 50^\circ = 0.30$$

El factor de seguridad es idéntico para deslizamiento directamente abajo del plano 3 .

Otro caso extremo es cuando el peso de la cuña está concentrado cerca de la intersección de los planos 1 y 3 así , el brazo del momento se extiende directamente arriba del plano 3 , línea CD'' fig. 6.4a .El límite de la fuerza cortante  $S_3$  es el rumbo del plano 3 , la fuerza W no tiene componente en esta dirección así que el giro no puede ocurrir , independientemente de la resistencia friccionante del plano 3 . El factor de seguridad contra giro es por lo tanto :

$$F.S. = ( CD'' \text{ Tan}20^\circ )/( CD'' \text{ Tan } 0^\circ ) = \infty$$

Otro caso , es el giro por la línea CD dirigida al S 45° W del plano 3 , como se muestra en la estereorred de la fig. 6.4b . El factor de seguridad contra rotación es determinado como sigue :

El gran círculo representa al plano 3 dibujado en la estereorred , también se representa a la fuerza normal y el círculo friccionante del plano 3 . La línea CD esta localizada en la intersección del plano 3 y un plano vertical orientado hacia el S 45° W .  $S_3$  esta localizado en el plano 3 , a 90° de la línea CD.

Un gran círculo es dibujado por  $S_3$  y  $N_3$  , representando al plano que contiene a  $S_3$  y  $N_3$  . Una línea recta representa al plano vertical que pasa por CD y W . La componente de W que es normal a CD , esta localizada en el punto donde el plano que contiene a  $S_3$  y  $N_3$  y el plano que contiene a CD y W se cruzan . El factor de seguridad contra rotación es :

F.S. =  $(\text{Tan } \phi) / (\text{Tangente del ángulo entre } N_3 \text{ y la componente de } W \text{ perpendicular a CD})$

$$\text{F.S.} = \text{Tan } 20^\circ / \text{Tan}(20^\circ + 12^\circ) = 0.58$$

Aunque la cuña es estable a lo largo de la intersección de los planos 1 y 3 , para el caso de giro en el plano 3 es inestable . Como se vea , el factor de seguridad en contra de rotación , F.S. = 0.58 , es alto en comparación del factor de seguridad en contra de deslizamiento en el plano 3 solamente , F.S. = 0.30 .

Para que el factor de seguridad en contra de rotación en el plano 3 sea igual a uno el centro de gravedad debe estar orientado al S 27° W en el plano 3 , línea tangente al círculo friccionante en la estereorred de la fig. 6.4b .

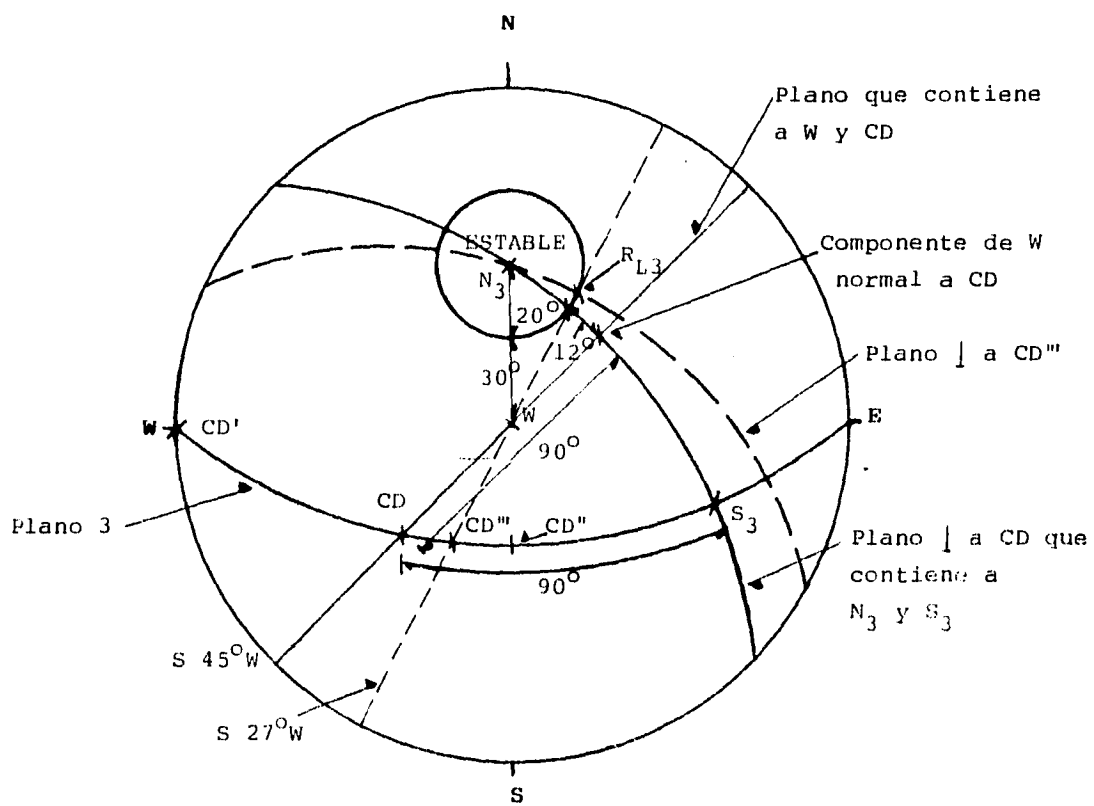
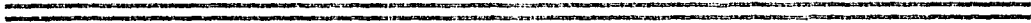


Figura 6.4b

## **CAPÍTULO VII**

### **ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MÉTODO GRÁFICO CON OTRO MÉTODO**



## **7.1 PRINCIPIOS .**

En este capítulo se explicarán las bases para el análisis de estabilidad de taludes mediante el método vectorial , para poder comparar este método con el método estereográfico en el análisis de estabilidad de taludes .

La estabilidad de un talud de roca depende de los siguientes factores :

- Propiedades mecánicas de las juntas que conforman al talud .
- Geometría de las juntas que forman al talud .
- Fuerzas que actúan sobre la masa rocosa susceptible de deslizarse .

Las fuerzas activas que pueden estar presentes en una masa de roca son las siguientes :

- Peso propio de la masa de roca .
- Fuerzas por sobrecarga arriba de la masa de roca .
- Subpresión del agua .
- Fuerzas debidas a sismos .
- Fuerzas por anclajes .
- Otras fuerzas .

En la fig. 7.1 se muestra un talud en el cual están actuando las fuerzas antes mencionadas . Las fuerzas activas que actúan en la cuña como son el peso propio de la cuña  $W$  , la subpresión del agua  $U$  , cargas externas  $Q$  y la fuerza sísmica  $S$  ; son aquellas fuerzas que su magnitud es independiente de la magnitud de otras fuerzas que actúan en la cuña . La fricción  $F$  y la reacción normal  $N$  son fuerzas reactivas cuyas magnitudes son función de las fuerzas que actúan sobre la cuña .

El peso de la cuña se puede obtener de manera aproximada calculando el volumen de la cuña y multiplicarlo por el peso volumétrico de la roca . Algunos valores de pesos volumétricos de rocas se presentan en la siguiente tabla :

<b>MATERIAL</b>	<b>PESO VOLUMÉTRICO (<math>\nu/m^3</math>)</b>
GRANITO	2.65
DIORITA	2.85
GABRO	3.0
YESO	2.3
ROCA DE SAL	2.1
CARBÓN	0.7 A 2.0
CALIZA COMPACTA	2.7
MÁRMOL	2.75
ESQUISTO MICÁCEO	2.82
ANFIBOLITA	2.99
RIOLITA	2.37
BASALTO	2.77
MARGA	2.75



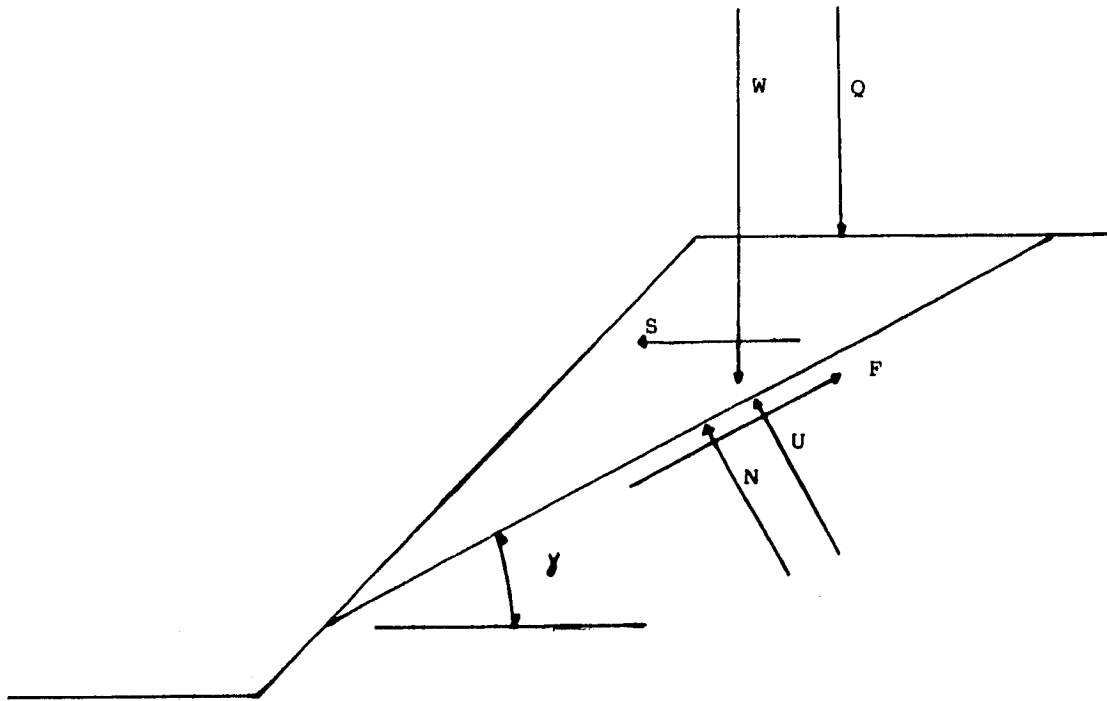


Figura 7.1

La fuerza de subpresión del agua depende de las condiciones de drenaje que tenga la cuña . La condición más desfavorable es que no exista drenaje en la cuña lo que provoca que la fuerza de subpresión sea máxima , como se muestra en la fig. 7.2a . En la practica profesional se propone , en forma aproximada , que no existe pérdida de carga hidráulica hasta las dos terceras partes de la altura de la cuña y el tercio restante exista drenaje de tal manera que sea igual a cero en el pie de la cuña , como se ilustra en la fig. 7.2b .

La fuerza por sismo se considera igual al peso de la cuña multiplicado por un coeficiente sísmico ,  $c$  , de la región donde se localiza la cuña . Hay ocasiones en que las características propias de la superficie de deslizamiento implican que el coeficiente de comportamiento sísmico ,  $Q$  , pueda variar de dos a tres . Por lo que el coeficiente sísmico reducido ,  $c'$  , es :

$$c' = c / Q$$

Y la fuerza sísmica vale :

$$S = c' W$$

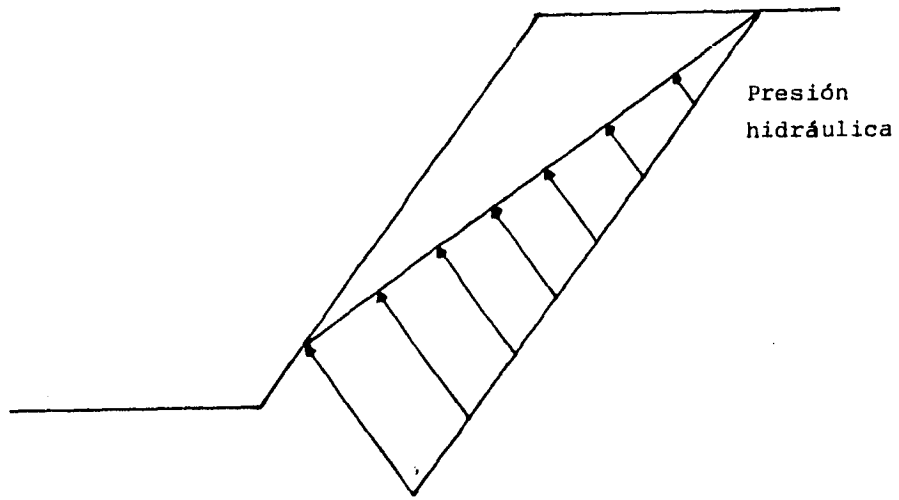


Figura 7.2a

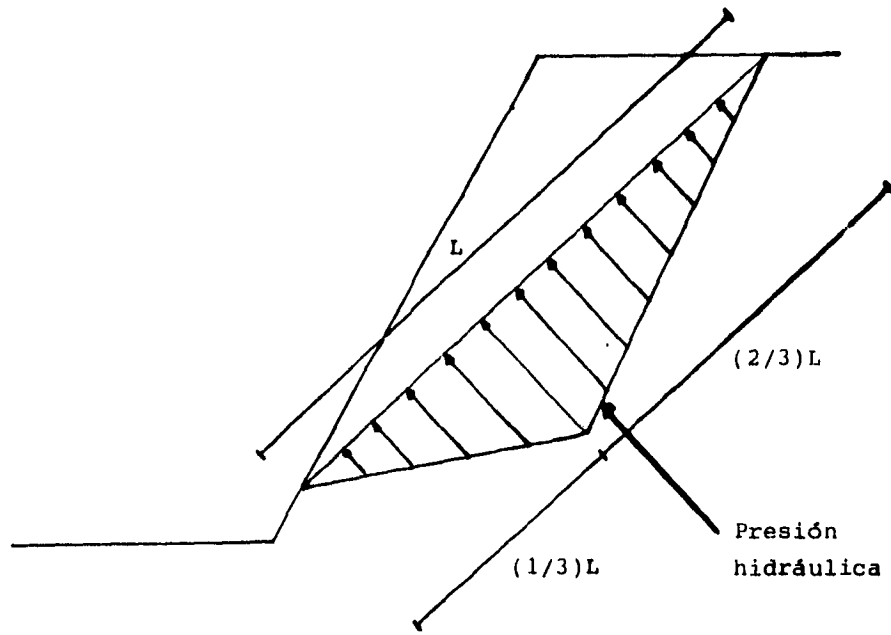


Figura 7.2b

## 7.2 ANÁLISIS BIDIMENSIONAL .

Para poder hacer un análisis bidimensional de una cuña potencial de deslizamiento , se requiere que los rumbos de las diaclasas que conforman a la cuña sean paralelos o casi paralelos al rumbo de la cara del talud de roca .

### 7.2.1 Factor de seguridad .

Se puede definir el factor de seguridad de un talud , como el cociente de dividir la sumatoria de los elementos resistentes que se oponen a la falla entre la sumatoria de los elementos actuantes que provocan la falla . Los elementos resistentes y actuantes pueden ser fuerzas , esfuerzos , momentos , etc ; dependiendo del tipo de falla que se tenga y su análisis . Por lo que , el factor de seguridad general se puede escribir como :

$$F.S. = (\text{Sumatoria de elementos resistentes})/(\text{Sumatoria de elementos actuantes})$$

### Factor de seguridad por deslizamiento .

El factor de seguridad por deslizamiento de una cuña potencial , se puede definir como el cociente de dividir la sumatoria de fuerzas resistentes entre la sumatoria de fuerzas actuantes . Para el talud de la fig. 7.1 es factor de seguridad por deslizamiento es :

$$\Sigma F_R = ( W \cos\gamma - S \operatorname{sen}\gamma - U ) \operatorname{Tan}\phi$$

$$\Sigma F_A = W \operatorname{sen}\gamma + S \cos\gamma$$

$$F.S._D = \Sigma F_R / \Sigma F_A$$

$$F.S._D = (W \cos\gamma - S \operatorname{sen}\gamma - U) \operatorname{tan} \phi / (W \operatorname{sen}\gamma + S \cos\gamma)$$

Factor de seguridad por volteo .

El factor de seguridad por volteo con respecto a un eje de giro , se define como el cociente de dividir la sumatoria de momentos resistentes entre la sumatoria de momentos actuantes , escribiéndose como :

$$F.S._v = \Sigma M_R / \Sigma M_A$$

### 7.2.2 Estabilidad de taludes rocosos .

Cuando el factor de seguridad es menor al permitido , el talud es potencialmente deslizable por lo que para estabilizarlo se pueden usar medidas tales como drenaje o anclas .

El fin de las medidas de drenaje es abatir lo mas posible la subpresión del agua, por medio de galerías filtrantes , drenes , etc . Externamente se pueden construir drenajes tales como cunetas y contracunetas , zanjias , etc .

Las medidas de anclaje son para no permitir que el talud se mueva , aumentando la resistencia del macizo rocoso . Existen anclas friccionantes y de tensión . Las primeras incrementan la resistencia por fricción a lo largo de la ancla , y las anclas de tensión producen un incremento del esfuerzo normal sobre la superficie de deslizamiento .

Las anclas de tensión solo quedan sujetas al macizo rocoso en su extremo , quedando un espacio libre entre el cuerpo de la ancla y la roca . Las anclas de fricción no tienen empotramiento en su extremo , el espacio entre el ancla y la roca queda relleno de un cementante especial que evita que el ancla se deslice .

### **7.3 ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL .**

Cuando la geometría de las fallas del macizo no permite un análisis bidimensional , el problema se debe atacar por métodos tridimensionales . En la fig. 7.3 se muestra un tetraedro que representa una cuña de deslizamiento . Para su análisis en el espacio se usa el método vectorial .

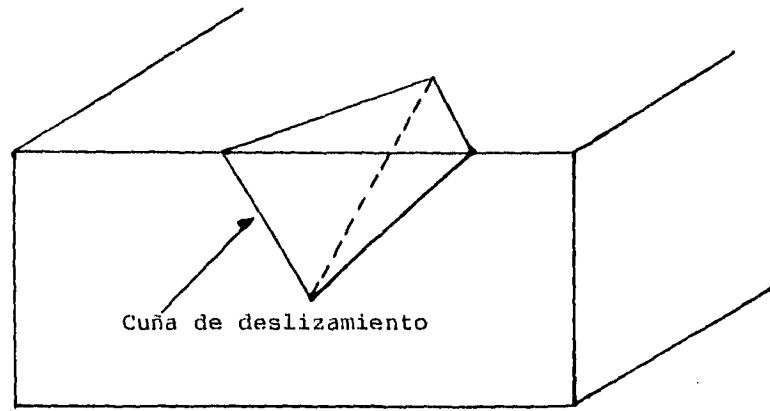


Figura 7.3

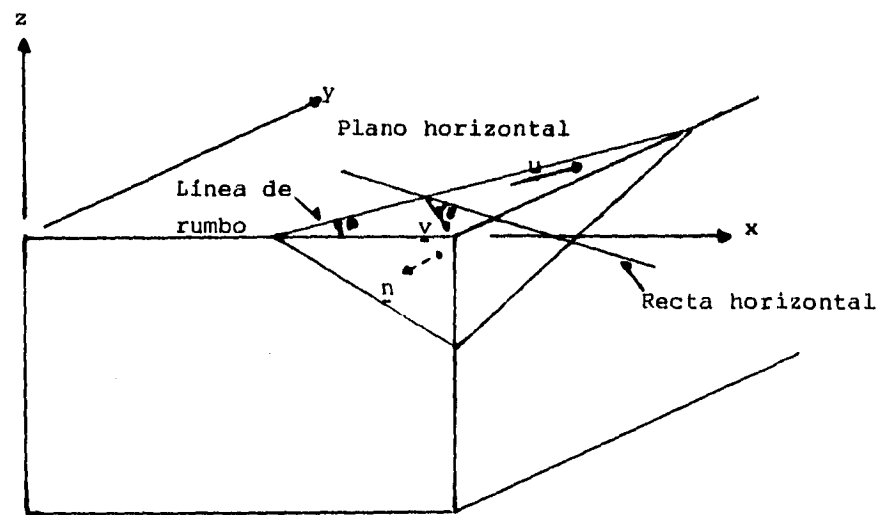


Figura 7.4

### 7.3.1 Propiedades geométricas de la cuña de deslizamiento .

En el método vectorial se usan algunos conceptos como son el vector rumbo , el vector echado y el vector normal al plano de la falla . En la fig. 7.4 se supone que el plano de la corona y la línea del hombro del talud son horizontales y se coloca el sistema coordenado mostrado , en donde la línea de hombro coincide con el eje x . El eje y dirigido hacia el cuerpo del talud es positivo y el eje z hacia arriba también es positivo .

El ángulo formado entre la línea de rumbo y el sentido positivo del eje x , es llamado  $\beta$  y se mide en sentido antihorario . El buzamiento o echado de la falla, nombrado  $\gamma$  , es el ángulo formado entre dos líneas rectas perpendiculares a la línea de rumbo , una recta horizontal y otra recta contenida en el plano de la falla y varía de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  .

El vector rumbo ,  $\underline{u}$  , está contenido en el plano de falla paralelo a la línea de rumbo , puede calcularse como :

$$\underline{u} = i \cos\beta + j \sin\beta$$

El vector echado ,  $\underline{v}$  , es perpendicular al vector rumbo y esta contenido en el plano de falla con un sentido positivo hacia abajo , puede calcularse como :

$$\underline{v} = i \sin\beta \cos\gamma - j \cos\beta \cos\gamma - k \sin\gamma$$



El vector normal al plano de falla ,  $\underline{n}$  , se obtiene por el producto vectorial o producto cruz de  $\underline{u}$  x  $\underline{v}$  ,calculándose como:

$$\underline{n} = \underline{u} \times \underline{v} = -i \operatorname{sen}\beta \operatorname{sen}\gamma + j \operatorname{cos}\beta \operatorname{sen}\gamma - k \operatorname{cos}\gamma$$

Cuando el ángulo  $\beta$  es menor a  $90^\circ$  el vector  $\underline{n}$  tiene un sentido hacia abajo y un sentido hacia arriba cuando  $\beta$  es mayor de  $90^\circ$  .

### 7.3.2 Cálculo del volumen de una cuña deslizable .

El volumen de la cuña de deslizamiento nos sirve para determinar el peso de dicha cuña , un modo de calcular este volumen es resumido a continuación y mostrado en la fig. 7.5 :

$$V = ( 1/6 ) | \underline{DB}' \times \underline{DC} | (h_1 + h_2 )$$

en donde

$$\underline{DC} = \underline{AC} - \underline{AD}$$

$$\underline{DB}' = \underline{AB}' - \underline{AD}$$

$$\underline{X}_{12} = \underline{n}_2 \times \underline{n}_1$$

$$\underline{AB}' = ( h_1 / \underline{X}_{12z} ) \underline{X}_{12}$$

$$\underline{AD} = ( h_1 / (\tan \alpha \tan \beta_1) - h_1 / (\tan \gamma_1 \operatorname{sen} \beta_1) , h_1 / \tan \alpha , h_1 )$$

$$\underline{AC} = ( h_1 / (\tan \alpha \tan \beta_2) - h_1 / (\tan \gamma_2 \operatorname{sen} \beta_2) , h_1 / \tan \alpha , h_1 )$$

$$\underline{AB} = ( (h_1 + h_2) / \underline{X}_{12z} ) \underline{X}_{12}$$

$$h_2 = ( 1 - \tan \epsilon_x / \tan \alpha ) \tan \delta / (\tan \epsilon_x - \tan \delta ) h_1$$

$$\tan \epsilon_x = \underline{X}_{12z} / \underline{X}_{12y}$$

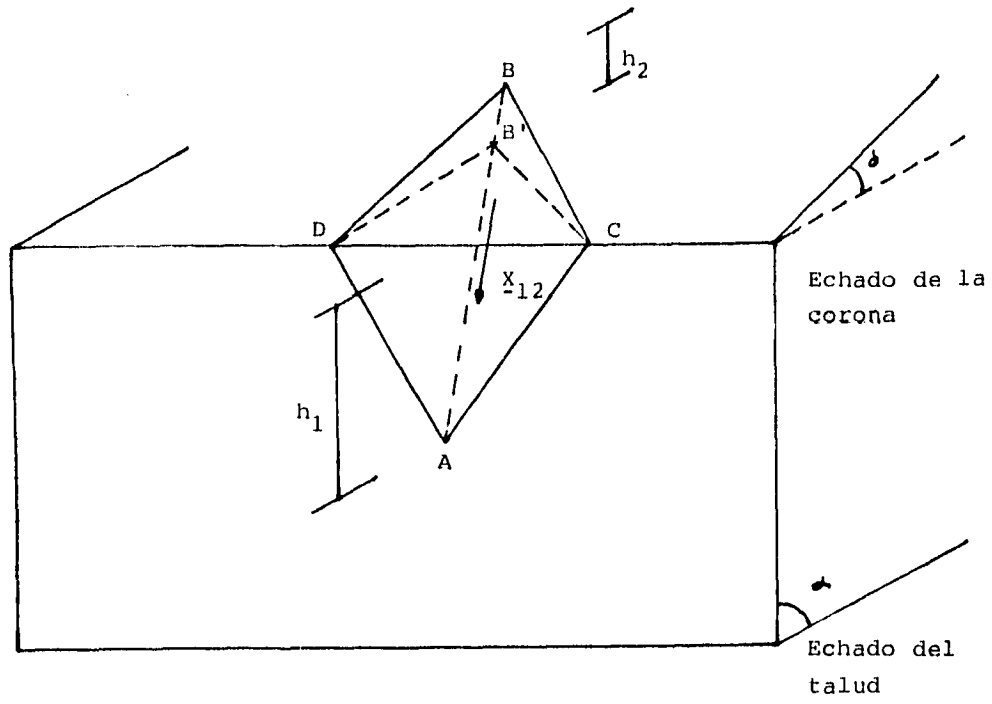


Figura 7.5

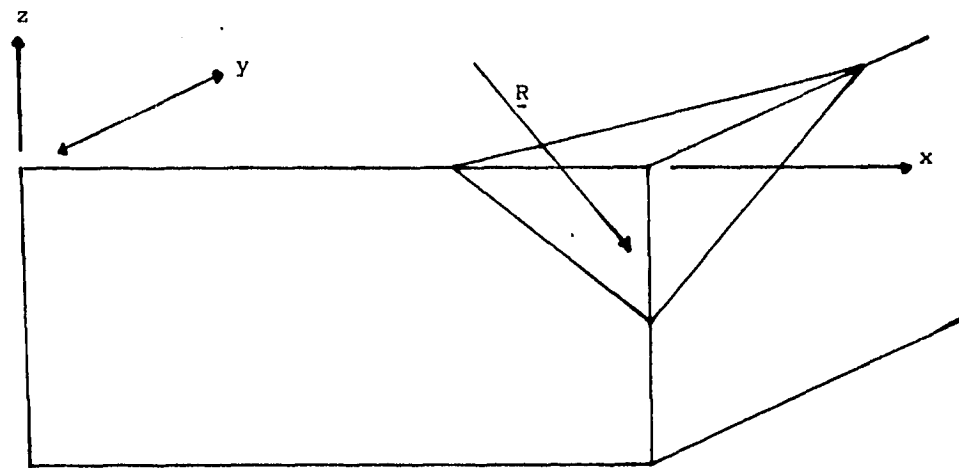


Figura 7.6

### 7.3.3 Deslizamiento de una cuña por un plano .

Para obtener el factor de seguridad por deslizamiento de la cuña mostrada en la fig. 7.6 se procede de forma similar al análisis bidimensional . La dirección del deslizamiento ocurre a través de la línea de intersección de dos planos , uno que contiene a  $\underline{R}$  y  $\underline{n}$  y otro plano que es el de falla . La sumatoria de fuerzas reactivas y activas se muestran a continuación . La resultante de las fuerzas activas se nombra  $\underline{R}$  . El ángulo entre  $\underline{R}$  y  $\underline{n}$  se llama  $\theta$  .

$$\Sigma F_R = | \underline{R} | \cos \theta \tan \phi$$

pero

$$| \underline{R} \cdot \underline{n} | = | \underline{R} | \cos \theta$$

por lo que

$$\Sigma F_R = | \underline{R} \cdot \underline{n} | \tan \phi$$

Se usa el valor absoluto de  $\underline{R} \cdot \underline{n}$  porque cuando el ángulo  $\beta$  es mayor a  $90^\circ$   $\underline{n}$  tiene un sentido hacia arriba , lo cual produce que  $\underline{R} \cdot \underline{n}$  sea negativo .

La sumatoria de fuerzas activas es :

$$\Sigma F_A = | \underline{R} | \text{sen} \theta$$

pero

$$| \underline{R} \times \underline{n} | = | \underline{R} | \text{sen} \theta$$

Por lo que la sumatoria de fuerzas activas es :

$$\Sigma F_A = | \underline{R} \times \underline{n} |$$

El factor de seguridad por deslizamiento puede entonces definirse como sigue:

$$F.S. = \Sigma F_R / \Sigma F_A = | \underline{R} \cdot \underline{n} | \tan \phi / | \underline{R} \times \underline{n} |$$

#### 7.3.4 Deslizamiento de una cuña por dos planos .

En la fig. 7.7 se muestra una cuña deslizable . Definiendo los siguientes vectores :

$$\begin{aligned} \underline{X}_{12} &= \underline{n}_2 \times \underline{n}_1 \\ \underline{b}_1 &= \underline{X}_{12} \times \underline{n}_1 \\ \underline{b}_2 &= \underline{X}_{12} \times \underline{n}_2 \end{aligned}$$

El vector  $\underline{b}_1$  esta en el plano 1 y es perpendicular al vector  $\underline{X}_{12}$  . El vector  $\underline{b}_2$  está contenido en el plano 2 y es también perpendicular al vector  $\underline{X}_{12}$  .

La cuña de deslizamiento de la fig. 7.7 puede tener los tipos de falla siguientes :

a) La cuña pierde contacto con los dos planos ; cumpliéndose las siguientes desigualdades :

$$\underline{R} \cdot \underline{n}_1 < 0 \quad \underline{R} \cdot \underline{n}_2 > 0$$

La cuña en este caso es inestable , por lo que para estabilizarla hay que realizar trabajos de drenaje , anclaje , etc. , solos o combinados .

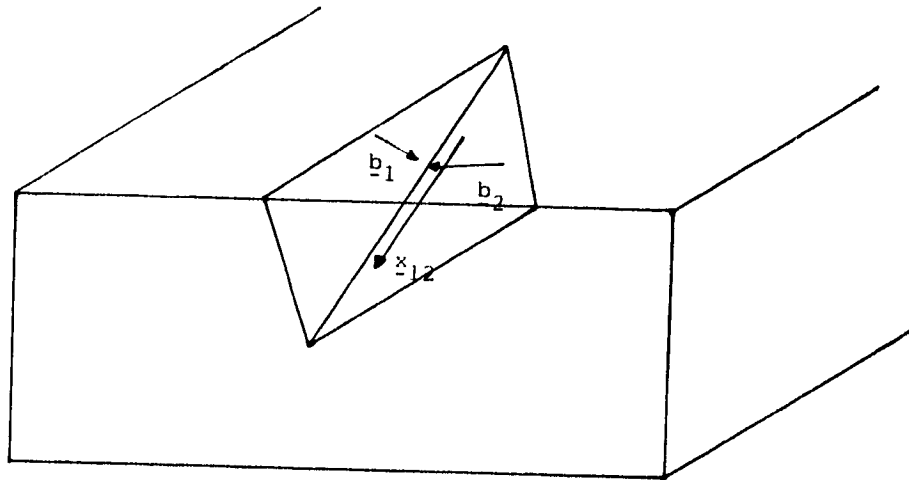


Figura 7.7

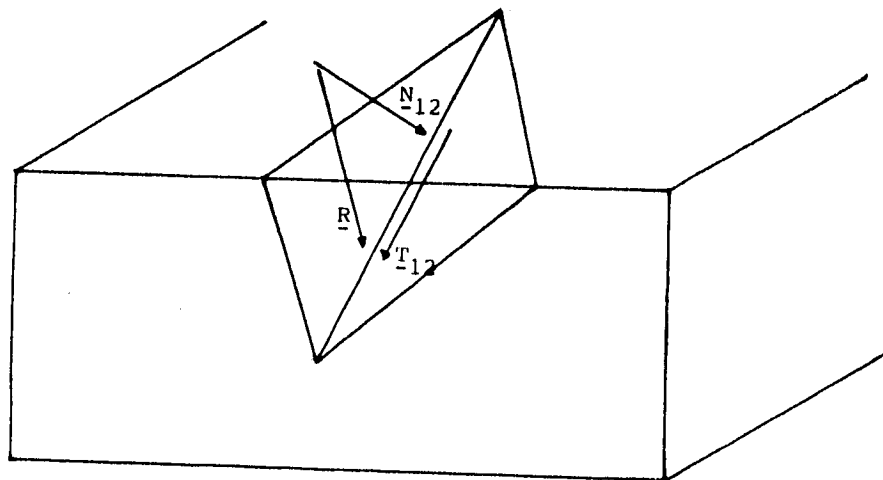


Figura 7.8

b) La cuña se desliza solo por el plano 1 , cumpliéndose las desigualdades siguientes :

$$\underline{R} \cdot \underline{n}_1 > 0 \quad \underline{R} \cdot \underline{b}_1 < 0$$

Con la primera desigualdad se asegura que la cuña solo se apoyará en el plano 1 y con la segunda desigualdad que la cuña se separa de la línea de intersección de los planos 1 y 2 deslizándose por el plano 1 . Para este caso se analiza a la cuña como se explica en el inciso 7.3.3 .

c) La cuña se desliza únicamente por el plano 2 , cumpliéndose que :

$$\underline{R} \cdot \underline{n}_2 < 0 \quad \underline{R} \cdot \underline{b}_2 < 0$$

La primera condición garantiza que la cuña solo se apoye sobre el plano 2 , y la segunda condición garantiza que la cuña se separe de la línea de intersección de los planos 1 y 2 , deslizándose solo por el plano 2 . Para el análisis de este caso se procederá del mismo modo que el caso b .

d) La cuña se desliza por la línea de intersección de los planos 1 y 2 , cumpliéndose las siguientes desigualdades :

$$\begin{array}{ll} \underline{R} \cdot \underline{n}_1 > 0 & \underline{R} \cdot \underline{b}_1 > 0 \\ \underline{R} \cdot \underline{n}_2 < 0 & \underline{R} \cdot \underline{b}_2 > 0 \end{array}$$

Para determinar el factor de seguridad de este caso se procederá de la siguiente manera :

El factor de seguridad por deslizamiento se define como :

$$F.S. = \Sigma F_R / \Sigma F_A$$

La sumatoria de fuerzas actuantes , mostrada en la fig. 7.8 , se determina de la siguiente manera : la proyección de la resultante de fuerzas activas ,  $\underline{R}$  , sobre  $\underline{X}_{12}$  es igual a :

$$|\underline{T}_{12}| = \text{proy } \underline{X}_{12} \underline{R} = \underline{R} \cdot \underline{X}_{12} / |\underline{X}_{12}|$$

La sumatoria de fuerzas actuantes es:

$$\Sigma F_A = |\underline{T}_{12}| = \underline{R} \cdot \underline{X}_{12} / |\underline{X}_{12}|$$

La sumatoria de fuerzas resistentes es la suma de fuerzas de fricción sobre el plano 1 , dada por  $\underline{N}_1 \tan \phi_1$  donde  $\underline{N}_1$  es la fuerza normal al plano 1 y la fuerza de fricción sobre el plano 2 , dada por  $\underline{N}_2 \tan \phi_2$  donde  $\underline{N}_2$  es la fuerza normal al plano 2 . Las fuerzas normales  $\underline{N}_1$  y  $\underline{N}_2$  se determinan como sigue :

El vector  $\underline{T}_{12}$  tiene un valor de :

$$\underline{T}_{12} = |\underline{T}_{12}| \underline{X}_{12} / |\underline{X}_{12}|$$

Para determinar  $\underline{N}_1$  y  $\underline{N}_2$  se tiene que calcular  $\underline{N}_{12}$  que es vector normal al vector  $\underline{X}_{12}$  .

$$\underline{N}_{12} = \underline{R} - \underline{T}_{12}$$

Pero también

$$\underline{N}_{12} = \underline{N}_1 \underline{n}_1 + \underline{N}_2 (-\underline{n}_2) = \underline{N}_1 \underline{n}_1 - \underline{N}_2 \underline{n}_2$$

Es decir :

$$(\underline{N}_{12X}, \underline{N}_{12Y}, \underline{N}_{12Z}) = \underline{N}_1 (\underline{n}_{1X}, \underline{n}_{1Y}, \underline{n}_{1Z}) - \underline{N}_2 (\underline{n}_{2X}, \underline{n}_{2Y}, \underline{n}_{2Z})$$

Igualando cada uno de sus términos tenemos :

$$\begin{aligned} N_{12X} &= N_1 n_{1X} - N_2 n_{2X} \\ N_{12Y} &= N_1 n_{1Y} - N_2 n_{2Y} \\ N_{12Z} &= N_1 n_{1Z} - N_2 n_{2Z} \end{aligned}$$

$\underline{N}_1$  y  $\underline{N}_2$  se determinan del sistema de ecuaciones mostrado . Se puede emplear la tercera ecuación para comprobar los valores de  $\underline{N}_1$  y  $\underline{N}_2$  . La sumatoria de fuerzas resistentes es por lo tanto :

$$\Sigma F_R = \underline{N}_1 \tan \phi_1 + \underline{N}_2 \tan \phi_2$$

Por lo anterior el factor de seguridad por deslizamiento a lo largo de la línea de intersección de los planos 1 y 2 es :

$$F.S. = (\underline{N}_1 \tan \phi_1 + \underline{N}_2 \tan \phi_2) / |\underline{T}_{12}|$$



#### 7.4 CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD POR DESLIZAMIENTO DE UNA CUÑA USANDO EL MÉTODO VECTORIAL .

Para comparar el método estereográfico y el método vectorial para el análisis de estabilidad de taludes se resolverá el siguiente ejemplo :

Determinar el factor de seguridad por deslizamiento de una cuña con las siguientes características :

Falla	Rumbo	Echado	$\phi$	Subpresión t
A	NE 35°	26° SE	44°	95
B	NW 59°	43° SW	54°	490

$$\alpha = 70^\circ \quad , \quad \delta = 6^\circ \quad , \quad h_1 = 6 \text{ m} \quad , \quad \gamma = 2.4 \text{ t/m}^3$$

Considerar una fuerza sísmica horizontal del 20% del peso de la cuña , en dirección de una recta que tenga la proyección horizontal del vector  $\underline{X}_{12}$  .

En la figura 7.9 , se muestran los dos planos de falla A y B de donde se puede concluir que el plano 1 es el plano A y el plano 2 es el plano B.

Del diagrama podemos obtener los siguientes valores :

$$\beta_1 = 90^\circ - 35^\circ = 55^\circ \quad \gamma_1 = 26^\circ \quad (\text{Plano 1})$$

$$\beta_2 = 90^\circ + 59^\circ = 149^\circ \quad \gamma_2 = 180^\circ - 43^\circ = 137^\circ \quad (\text{Plano 2})$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación de  $\underline{n}$  , vector normal del inciso 7.3.1 :

$$\underline{n} = -i \text{ sen } \beta \text{ sen } \gamma + j \text{ cos } \beta \text{ sen } \gamma - k \text{ cos } \gamma$$

$$\underline{n}_1 = -0.36 i + 0.25 j - 0.90 k$$

$$\underline{n}_2 = -0.35 i - 0.58 j + 0.73 k$$

Aplicando las ecuaciones del inciso 7.3.4 :

$$\underline{X}_{12} = \underline{n}_2 \times \underline{n}_1 = 0.34 i - 0.58 j - 0.30 k$$

$$\underline{b}_1 = \underline{X}_{12} \times \underline{n}_1 = 0.60 i + 0.41 j - 0.12 k$$

$$\underline{b}_2 = \underline{X}_{12} \times \underline{n}_2 = -0.60 i - 0.14 j - 0.40 k$$

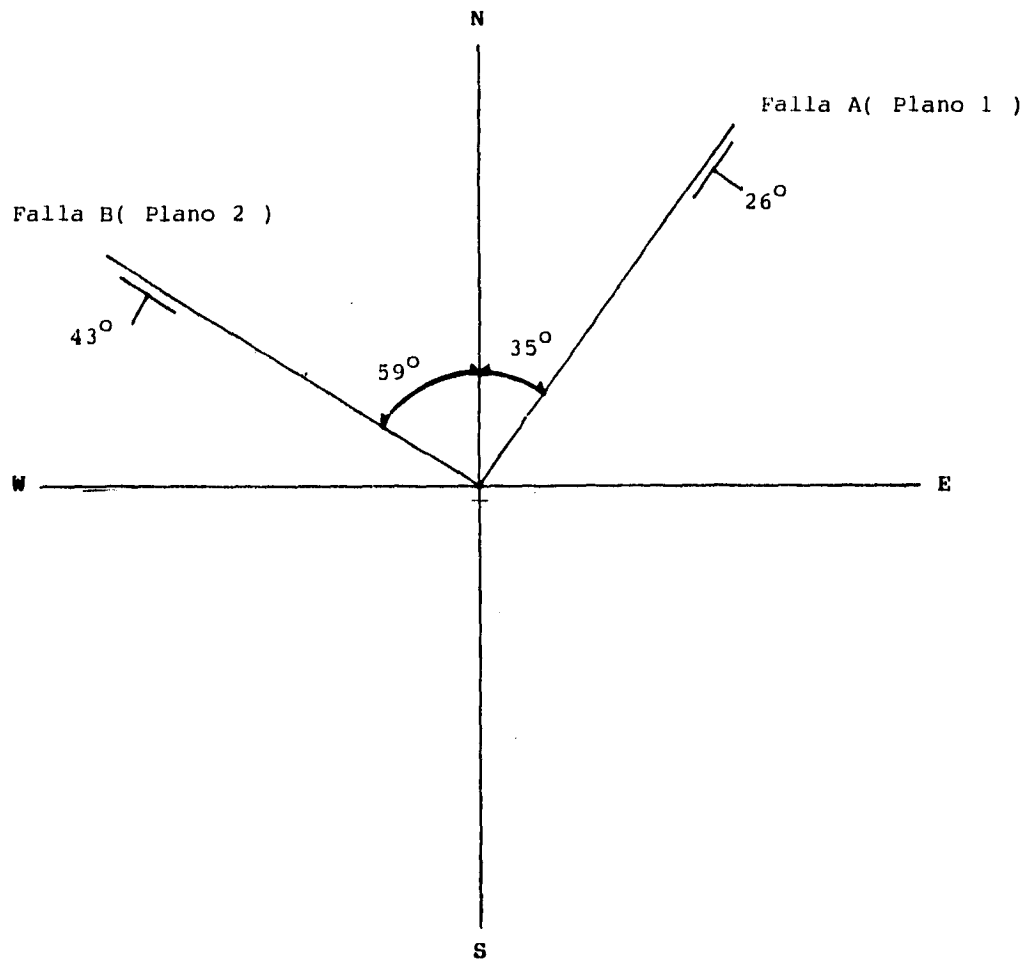


Figura 7.9

Para el cálculo del volumen de la cuña deslizable se sigue el inciso 7.3.2. :

$$\begin{aligned} \tan \varepsilon_x &= -0.30 / -0.58 = 0.51 \\ h_2 &= (1 - 0.51/\tan 70^\circ) (\tan 6^\circ / (0.51 - \tan 6^\circ)) \times 6 \\ h_2 &= 1.24 \\ \underline{AB} &= [(6 + 1.24)/-0.30] (0.34 i - 0.58 j - 0.30 k) \\ \underline{AB} &= -8.21 i + 14.0 j + 7.24 k \\ \underline{AC} &= [(6/(\tan 70^\circ \tan 49^\circ) - 6/(\tan 37^\circ \tan 49^\circ))] \cdot 6 / \tan 70^\circ, 6) \\ \underline{AC} &= 8.89 i + 2.18 j + 6.0 k \\ \underline{AD} &= [(6/(\tan 70^\circ \tan 55^\circ) - 6/(\tan 26^\circ \tan 55^\circ))] \cdot 6 / \tan 70^\circ, 6) \\ \underline{AD} &= -13.49 i + 2.18 j + 6.0 k \\ \underline{AB}' &= (6/-0.30) \times (0.34 i - 0.58 j - 0.30 k) \\ \underline{AB}' &= -6.80 i + 11.6 j + 6.0 k \\ \underline{DB}' &= (-6.80 i + 11.6 j + 6.0 k) + (13.49 i - 2.18 j - 6 k) \\ \underline{DB}' &= 6.69 i + 9.42 j + 0.0 k \\ \underline{DC} &= (8.89 i + 2.18 j + 6.0 k) + (13.49 i - 2.18 j - 6 k) \\ \underline{DC} &= 22.38 i \\ \underline{DB}' \times \underline{DC} &= (6.69 i + 9.42 j) \times (22.38 i) \\ \underline{DB}' \times \underline{DC} &= -210.82 \end{aligned}$$

Por lo anterior el volumen de la cuña puede calcularse como :

$$\begin{aligned} V &= 1/6 |-210.82| (6.0 + 1.24) \\ V &= 255 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

**Peso de la cuña deslizable :**

$$\begin{aligned} W &= V \times \gamma = 255 \times 2.4 \\ W &= 612 \text{ ton} = -612 \text{ k} \end{aligned}$$

**Fuerza de sismo :**

$$\begin{aligned} S &= c' \times W = 0.2 \times 612 \\ S &= 122.4 \text{ ton} \end{aligned}$$

Fuerzas de subpresión de agua :

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_1 (-\underline{n}_1) = 95 (0.36 i - 0.25 j + 0.9 k)$$

$$\underline{U}_1 = 34.2 i - 23.75 j + 85.41 k$$

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_2 (\underline{n}_2) = 490(-0.35i - 0.58 j + 0.73 k)$$

$$\underline{U}_2 = -171.99 i - 286.16 j + 357.70 k$$

Proyectando la fuerza en la dirección horizontal del vector  $\underline{X}_{12}$  tenemos :

$$\underline{X}_{12} = 0.34 i - 0.58 j \quad (\text{proyección horizontal})$$

Haciendo al vector  $\underline{X}_{12}$  unitario

$$\underline{X}_{12u} = 0.51 i - 0.87 j$$

Por lo anterior el sismo es :

$$\underline{S} = S (\underline{X}_{12u}) = 122.4(0.51 i - 0.87 j)$$

$$\underline{S} = 62.42 i - 106.5 j$$

Vector resultante

$$\underline{R} = \underline{W} + \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{S}$$

$$\underline{R} = (0,0,-6.12) + (34.2,-23.75,58.5) + (-171.99,-286.16,357.7) + (62.42,106.5,0)$$

$$\underline{R} = -75.37 i - 416.41 j - 168.8 k$$

Para poder clasificar el tipo de deslizamiento de la cuña se debe hacer las siguientes operaciones :

$$\underline{R} \cdot \underline{n}_1 = (-75.37,-416.41,-168.8) \cdot (-0.36,0.25,-0.9)$$

$$\underline{R} \cdot \underline{n}_1 = 74.95$$

$$\underline{R} \cdot \underline{n}_2 = (-75.37, -416.41, -168.8) \cdot (-0.35,-0.58,0.73)$$

$$\underline{R} \cdot \underline{n}_2 = 146.41$$

$$\underline{R} \cdot \underline{b}_1 = (-75.37,-416.41,-168.8) \cdot (0.6,0.41,-0.12)$$

$$\underline{R} \cdot \underline{b}_1 = -195.69$$

$$\underline{R} \cdot \underline{b}_2 = (-75.37,-416.41,-168.8) \cdot (-0.6,-0.14,-0.4)$$

$$\underline{R} \cdot \underline{b}_2 = 171.64$$

Por los resultados obtenidos y comparándolos con los casos del inciso 7.3.4 tenemos que se tiene el caso b donde :

$$\underline{R} \cdot \underline{n}_1 > 0 \qquad \underline{R} \cdot \underline{b}_1 < 0$$

Por lo que la cuña solo se desliza sobre el plano 1 , separándose de la línea de intersección de los planos 1 y 2 . En este caso se analiza la cuña como se explica en el inciso 7.3.3 , factor de seguridad por deslizamiento de una cuña por un plano.

El factor de seguridad por deslizamiento de una cuña se define como el cociente de dividir la sumatoria de fuerzas resistentes entre la sumatoria de fuerzas actuantes. Para este ejemplo son :

$$\begin{aligned} \Sigma F_R &= |\underline{R} \cdot \underline{n}_1| \tan \phi = 74.95 \tan 44^\circ \\ \Sigma F_R &= 72.38 \\ \Sigma F_A &= |\underline{R} \times \underline{n}_1| = |(-75.37, -416.41, -168.8) \times (-0.36, 0.25, -0.9)| \\ \Sigma F_A &= 449.9 \end{aligned}$$

Por lo anterior el factor de seguridad por deslizamiento de la cuña es el siguiente:

$$F.S._D = \Sigma F_R / \Sigma F_A$$

$$F.S._D = 72.38 / 449.9$$

$$F.S._D = \underline{0.16}$$

Dado el valor del factor de seguridad obtenido se llega a la conclusión , de que la cuña del ejemplo es inestable , por lo que hay que utilizar técnicas para estabilizar el talud como por ejemplo drenajes y anclas como las que se explicaron en el inciso 7.2.2 .

### 7.5 CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD POR DESLIZAMIENTO DE UNA CUÑA POR MEDIO DEL MÉTODO ESTEREOGRÁFICO .

A continuación se explicará el método gráfico para el ejemplo mencionado .

El deslizamiento de una cuña a través de dos planos de falla puede ser determinado con rapidez con la estereorred . La orientación de las fuerzas actuantes es la que determina si la cuña se deslizará por un solo plano o por la intersección de ambos planos . Se supone que las fuerzas cortantes  $S_1$  y  $S_2$  actúan paralelamente a la línea de intersección de los planos 1 y 2 .

Primero se trazan los planos 1 y 2 correspondientes a las fallas A y B respectivamente , después se marcan las normales a cada plano localizado a  $90^\circ$  del plano . El punto donde los dos grandes círculos se cruzan es la línea de intersección de los planos 1 y 2 , como se muestra en la estereorred de la figura 7.10 .

En la figura 7.11 se marcan los conos friccionantes de cada plano , con un radio igual a  $r\phi$  y recordando que el centro de cada cono no coincide con la normal de cada plano .

En la estereorred de la figura 7.12 se indican las zonas de estabilidad e inestabilidad , limitadas por las fuerzas reactivas  $R_{L1}$  y  $R_{L2}$  . Las zonas de inestabilidad abarcan las zonas de deslizamiento abajo y arriba de la intersección , deslizando en un solo plano y levantando a la cuña de ambos planos. Y como se ve en la fig. 7.13 la resultante de las fuerzas actuantes en la cuña ,  $R$  , cae en la zona de deslizamiento por el plano 1 . Para el caso de deslizamiento por un solo plano la orientación de  $R_{L1}$  queda definido por el cono friccionante del plano 1.

La sumatoria de las fuerzas de subpresión , el peso de la cuña y la fuerza debida al sismo se muestran en las gráficas de las figuras 7.14 , 7.15 y 7.16 . Las magnitudes de estas fuerzas se muestran en la sección 7.4 .

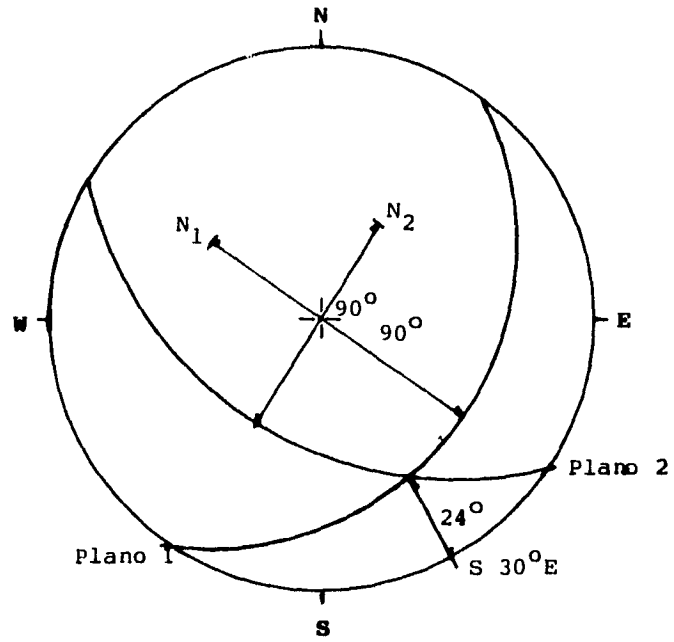


Figura 7.10

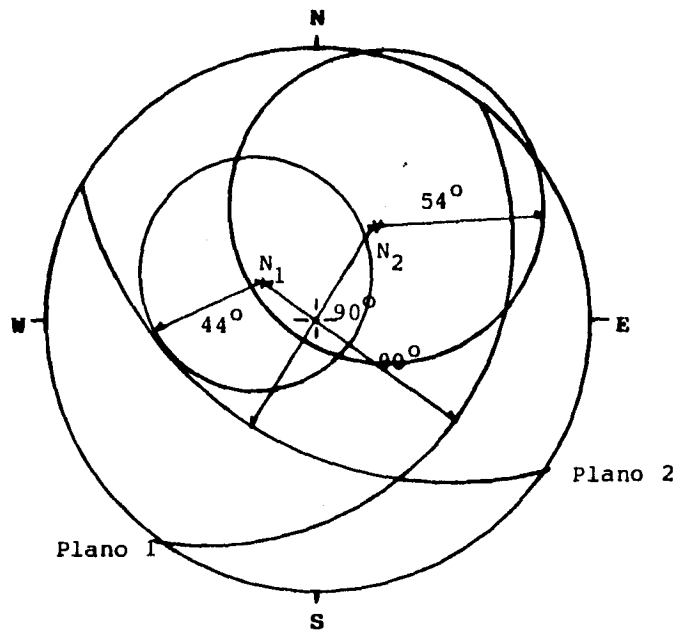


Figura 7.11

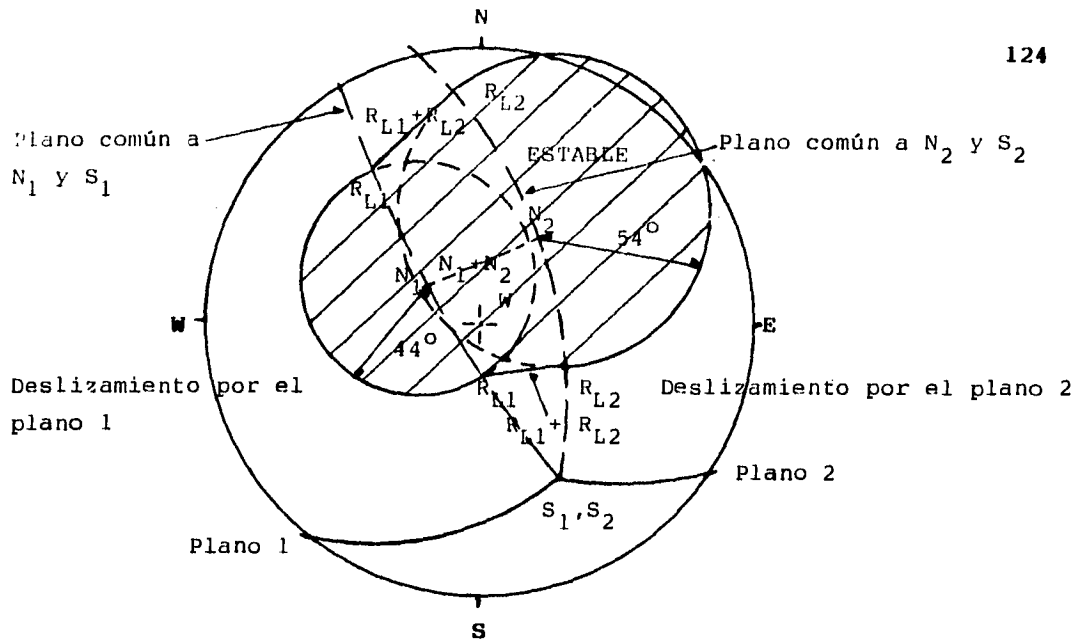


Figura 7.12

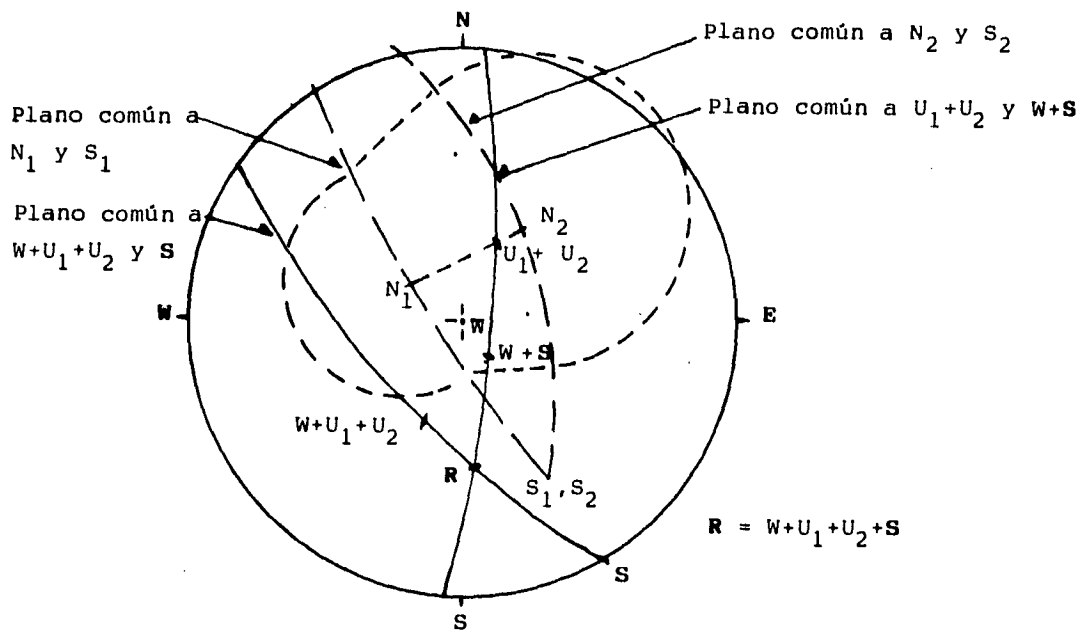


Figura 7.13



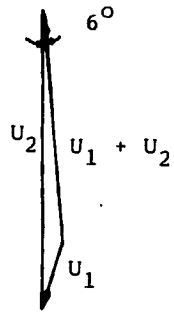


Figura 7.14

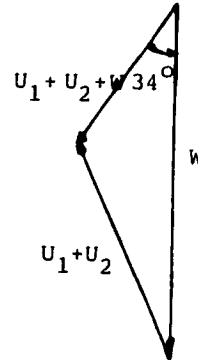


Figura 7.15

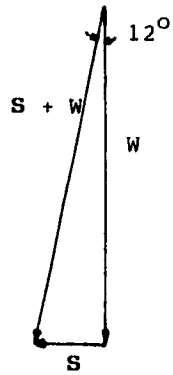


Figura 7.16

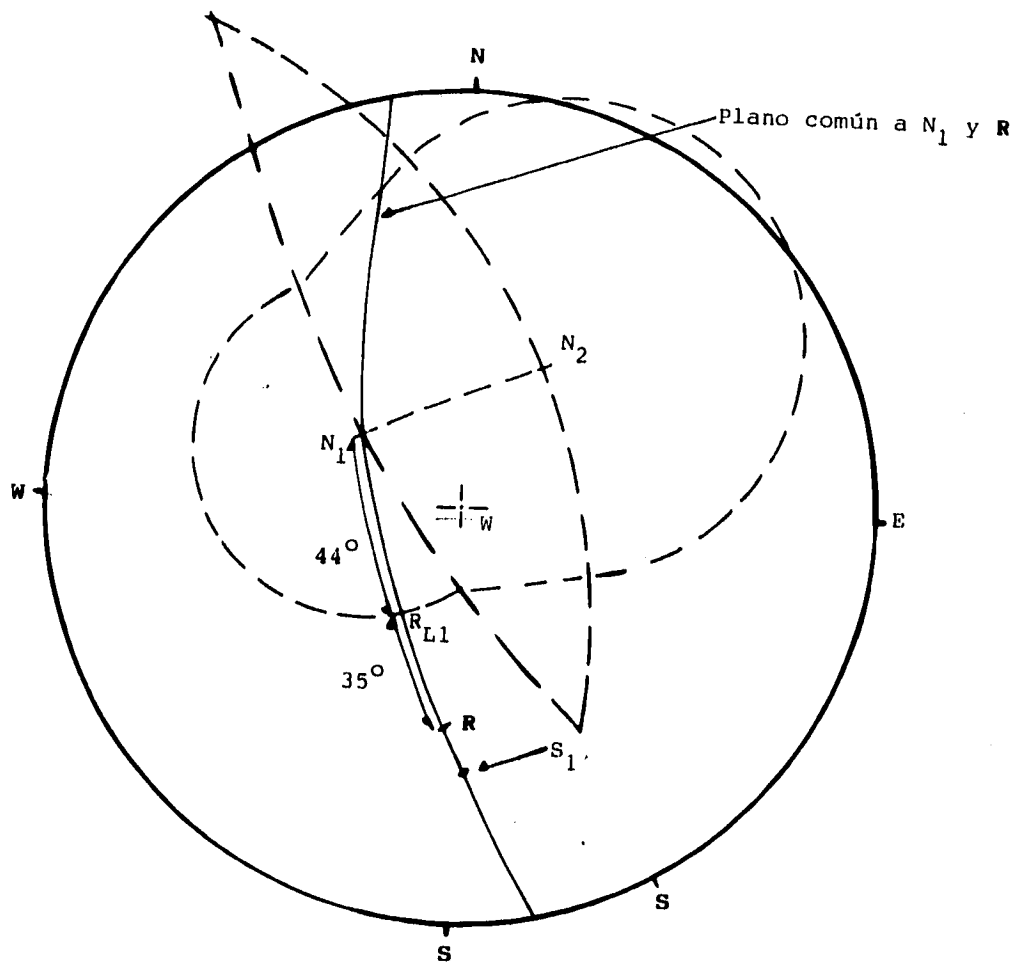


Figura 7.17

Para el caso de deslizamiento por el plano 1 , la orientación de la fuerza normal  $\underline{N}_1$  y la resultante  $\underline{R}$  , son conocidas . La orientación de la reacción  $\underline{R}_{L1}$  y la fuerza cortante  $\underline{S}_1$  son las incógnitas , pero son conocidas al actuar dentro del plano que contiene a  $\underline{N}_1$  y a  $\underline{R}$  , así , su posición se obtiene trazando un gran círculo por  $\underline{N}_1$  y  $\underline{R}$  , como se muestra en la figura 7.17.

En la fig. 7.17 , la fuerza reactiva  $\underline{R}_{L1}$  está localizada a  $44^\circ$  de  $\underline{N}_1$  , alrededor del círculo descrito por el cono friccionante . El ángulo entre  $\underline{R}_{L1}$  y  $\underline{R}$  es de  $35^\circ$  . Estos ángulos son medidos en la escala marcada en la estereorred . Por lo que el factor de seguridad por deslizamiento es :

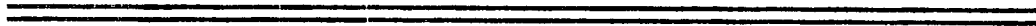
$$F.S. = (\text{Sumatoria de fuerzas resistentes}) / (\text{Sumatoria de fuerzas actuantes})$$

$$F.S. = \tan 44^\circ / \tan(44^\circ + 35^\circ)$$

$$F.S. = \underline{0.18}$$

Por el valor del factor de seguridad obtenido se concluye que la cuña es inestable. El valor obtenido por el método gráfico y el vectorial es muy similar , el error en el método gráfico puede deberse a errores en la lectura de los ángulos o en la traza de los grandes círculos en la estereorred .

## **CONCLUSIONES Y COMENTARIOS**



## CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

La proyección estereográfica consiste en proyectar un punto o una línea de la superficie de una esfera a un plano horizontal que pasa por el centro de dicha esfera . La proyección estereográfica de planos y líneas hace que la solución de problemas en donde se involucra la orientación relativa de planos y líneas en el espacio sea más simple , en mecánica de rocas esta proyección es muy usada para el análisis de estabilidad de excavaciones .

La proyección estereográfica también es llamada proyección de ángulos iguales o de Wulff . Este tipo de proyección se usa mucho por su simplicidad en el trazo de proyecciones .

Otro método , además de la proyección estereográfica para calcular la configuración de polos para la representación de datos geológicos de campo es la proyección de áreas iguales . Este tipo de proyección se usa cuando se tiene información estadística compleja de la orientación y frecuencia de planos y líneas.

Las ventajas y desventajas de una u otra proyección se compensan cuando se utiliza un solo tipo de proyección para dar solución total a un problema , más que una solución parcial del problema .

Las estereorredes pueden ser usadas para evaluar la estabilidad de cuñas tridimensionales de roca con planos friccionantes resistentes . La cuña puede deslizar si la resultante de las fuerzas que actúan en la cuña tiene una inclinación mayor al ángulo de fricción ,  $\phi$  , medido desde la normal .

El método de la estereorred no es siempre rápido y fácil cuando se analiza la estabilidad de cuñas cuando se tiene gran cantidad de fuerzas involucradas para causar o no la falla , ya que visualizar en una estereorred esta información puede ser confuso , por lo cual para evitar errores es mejor usar los métodos analíticos.

El caso más simple es el análisis de estabilidad de una cuña por un solo plano , aunque para dar solución a este tipo de problemas es más simple usar un polígono bidimensional de fuerzas . La sumatoria de fuerzas no puede representarse en la proyección estereográfica , ya que este método no muestra las magnitudes de las fuerzas sino solamente la dirección de la resultante , con la ayuda de gráficas de vectores .

El análisis de una cuña deslizable por dos planos de falla puede ser resuelto con facilidad con la estereorred , la orientación de las fuerzas manejadas es la que determina si la falla ocurre a lo largo de la intersección de los planos o por cualquiera de los planos . Las zonas de estabilidad e inestabilidad están separadas en la estereorred por los límites de las fuerzas reactivas ; las zonas de inestabilidad incluyen zonas de deslizamiento abajo y arriba de la intersección , deslizando por un solo plano y levantando a la cuña de los planos .

Los métodos para calcular la mínima fuerza para causar el deslizamiento , el factor de seguridad y otros para una cuña deslizable por tres planos de falla , se determina en forma similar que el caso de una cuña con dos planos de falla , verificando antes que dichos planos sean potencialmente de falla y que la cuña sea crítica .

El factor de seguridad para este caso puede reducirse al mínimo si la cuña tiende a deslizarse como si fueran varios cuerpos rígidos en lugar que una sola masa . Lo anterior es importante que se tome en cuenta en la fase exploratoria del estudio de estabilidad de taludes antes de seleccionar la cuña crítica que se tomará como la ideal para el análisis de estabilidad .

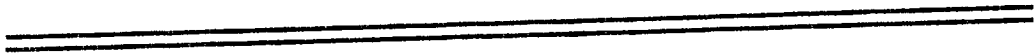
Al comparar al método estereográfico con el método vectorial los resultados obtenidos son similares ; existe en el método estereográfico un acarreo de errores tanto en la lectura de los datos , en el trazo en la estereorred y en la medición de los grados en la misma , pero como dichos errores son mínimos se llega a la conclusión que ambos métodos son igualmente confiables .

El método estereográfico para el análisis de estabilidad tiende a caer en desuso , tanto en el ámbito profesional como el docente , por el desarrollo del método vectorial , ya que este en problemas complejos resulta mas rápido y con un índice de error menor que el método estereográfico .

El método estereográfico tiene la ventaja que se puede visualizar el problema , observando las orientaciones de las fuerzas involucradas , los planos de falla y las zonas de estabilidad e inestabilidad , lo cual hace que la comprensión del problema sea más directa .

Su estudio en las escuelas superiores se debe llevar a cabo aunque sea en forma básica , para que los alumnos conozcan otro método para el análisis de estabilidad de taludes , porque el método estereográfico aún en nuestra época sigue siendo vigente .

## **BIBLIOGRAFÍA**





## BIBLIOGRAFÍA

E. Hoek , D. Sc. ; E. T. Brown , Ph. D. **Excavaciones subterráneas en roca** . México : Mc Graw Hill , 1986 , 634 p.p.

Richard , E , Goodman . **Introduction to rock mechanics** . EUA . 1980 467 p.p.

Proceeding of the third ISRM congress . **Advances rock mechanics** . EUA , Denver. 1974 , 1756 p.p.

Agustín Deméneghi Colina . **Apuntes de mecánica de rocas** . México . 1994 , 65 p.p.

A. J. Hendron , Jr. E. J. Cording , A. K. Aiyer . **Analytical and graphical methods for the analysis of slopes in rock masses** . EUA , University of Illinois , 1971 , 150 p.p.

Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas . **Simposio : La mecánica de rocas en México** . México . 1982 , 510 p.p.

Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas . **I Reunión nacional de mecánica de rocas** . México . 1985 , 75 p.p.