

II. Estructuras desarrolladas en una FPC

Introducción

Las fallas y pliegues caracterizan la estructura de una faja plegada y corrida y en general se encuentran íntimamente relacionados entre sí. Los pliegues, sólo se pueden dar desvinculados de las fallas en sectores de alta ductilidad o en secuencias que tengan, aunque sea en parte, rocas poco competentes. De lo contrario, en rocas donde predomina el comportamiento frágil, los pliegues importantes siempre se vinculan al fallamiento. Es así, que en las FPC, en general predominan estructuras mixtas de plegamiento y fallamiento. El estudio de los modelos principales teóricos de pliegues relacionados a fallas es fundamental a la hora de interpretar una estructura natural. La información con que se cuenta en general es parcial, y en base a ella y al buen entendimiento de los modelos, el intérprete obtendrá un resultado ya sea de importancia económica o científica. En este capítulo se describen los principales tipos de pliegues encontrados en una FPC.

Pliegues por flexión de falla

Si la superficie de una falla no es plana, los bancos que se mueven por encima de ella tienen que acomodarse a su forma. El plegamiento que se genera por el acomodamiento de roca sobre una falla que cambia su inclinación se denomina de flexión de falla o *fault-bend folding*. Este tipo de plegamiento fue observado y analizado por diversos autores (Rich, 1934; Dahlstrom, 1970; etc.), sin embargo, fue Suppe (1983) quien realizó los primeros modelos geométricos cuantitativos de este tipo de estructura.

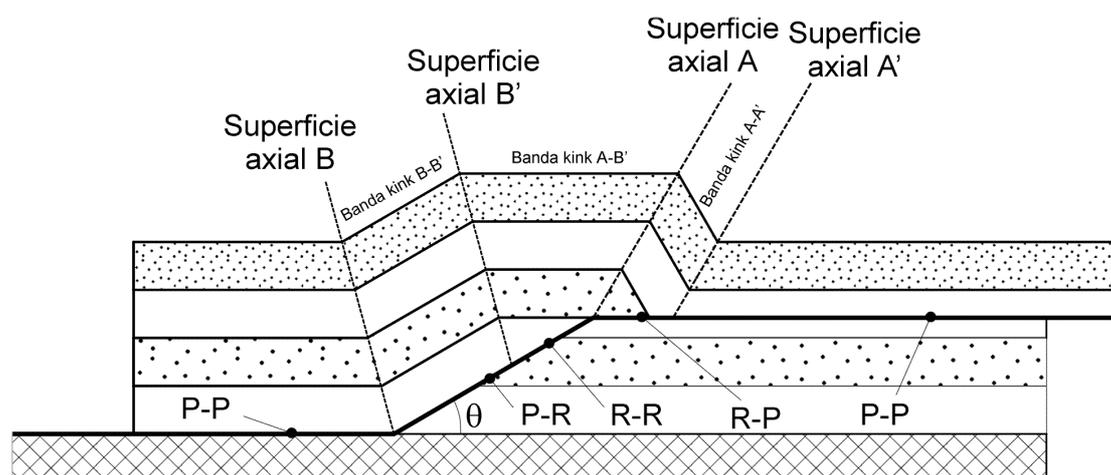


Figura 2.1: Modelo de pliegue de flexión de falla donde se indican las relaciones posibles entre planos y rampas colgantes y basales. Véase discusión en el texto.

Los pliegues por flexión de falla son los más simples de los vinculados a fallamiento y es por esto que es importante su buen entendimiento antes de avanzar con otros más complejos. El modelo de Suppe (1983) se basa en la conservación del

área en una sección cruzada y de la longitud de las líneas estratales antes y después de la deformación. Implica cizalla paralela a la estratificación y por ende no contempla cambio de espesores en los bancos. Antes de describirlo es necesario familiarizarse con algunos elementos geométricos básicos. Se dice que una falla corta en forma de plano (*flat*) a una secuencia cuando lo hace paralelamente a la estratificación y en forma de rampa (*ramp*) cuando lo hace oblicuamente a ésta. Es así que quedan definidas algunas relaciones posibles entre los bloques colgantes y basales de una falla (figura 2.1) que son:

plano colgante sobre plano basal (P-P)
 plano colgante sobre rampa basal (P-R)
 rampa colgante sobre plano basal (R-P)
 rampa colgante sobre rampa basal (R-R)

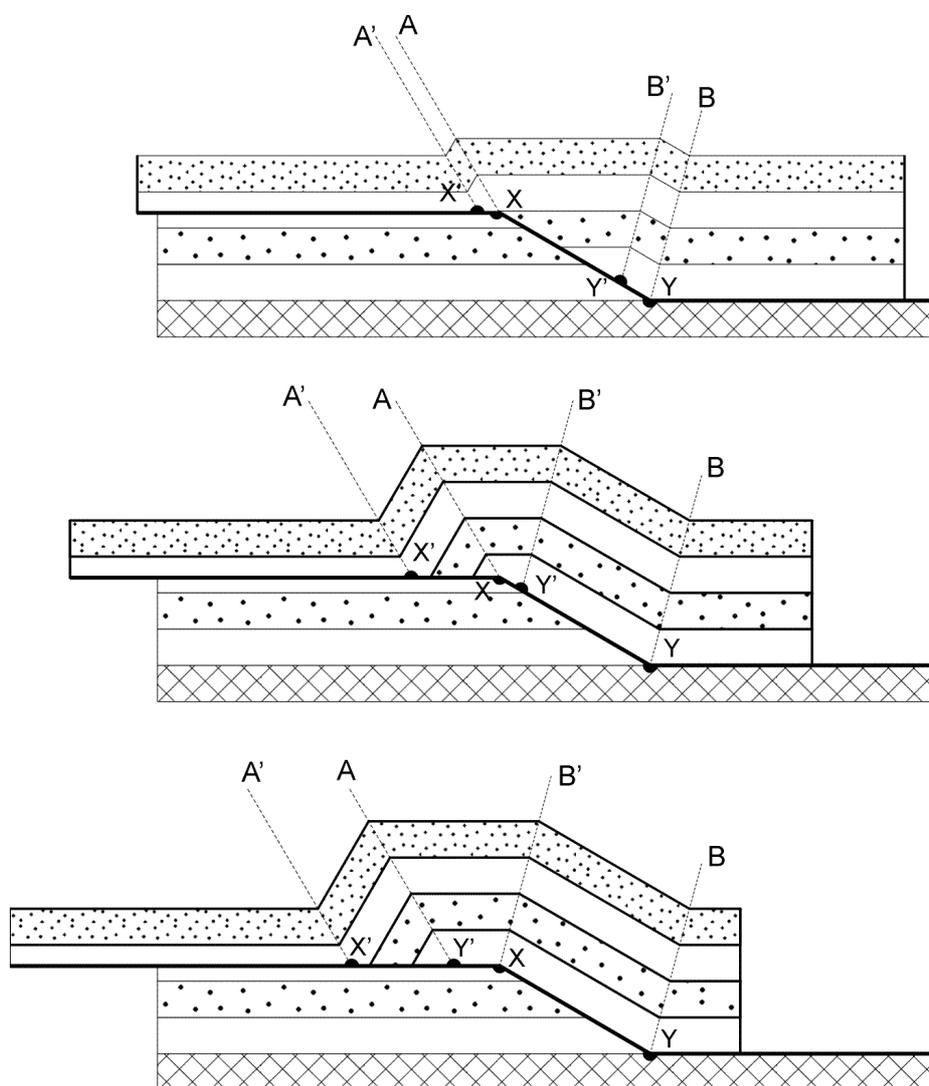


Figura 2.2: Se muestran tres estadios en la evolución de un pliegue de flexión de falla (Suppe, 1983).

En ejemplos naturales también se considera que la falla corta en forma de plano, cuando lo hace con muy bajo ángulo (menor de 5°) respecto de la estratificación. En general los planos se desarrollan sobre rocas dúctiles (evaporitas,

pelitas, lutitas, etc.) o con fuerte anisotropía planar paralela a la estratificación y las rampas sobre rocas más consistentes y frágiles o con fuerte anisotropía planar oblicua a la estratificación. El ángulo con que una rampa se desprende de un plano basal o despegue basal (q) se denomina ángulo de corte (*cut-off angle*) o ángulo de paso fundamental y depende de la reología del material en cuestión (figura 2.1). El ángulo de corte, es una de las variables más importantes en los modelos de Suppe (1983), ya que de él dependen los ángulos dorsal y frontal de un pliegue por flexión de falla. Se denomina *superficie axial* (figura 2.1) a la línea (en sección cruzada 2D) o a la superficie (en 3D) en la que los bancos cambian de inclinación y en los modelos teóricos (Suppe, 1983) debe ser bisectriz del ángulo entre bancos para que éstos no cambien de espesor. El espacio entre dos superficies axiales se denomina banda kink (*kink band*).

En la figura 2.2 se muestran tres estadios en la evolución de un pliegue de flexión de falla. Es importante marcar que el pliegue comienza a crecer en altura (amplitud) hasta llegar a un punto en que ésta se mantiene invariable y se comienza a incrementar su longitud de onda. Las superficies axiales fueron marcadas como A, A', B y B'. Al comenzar el desarrollo del pliegue (figura 2.2a), A y B se encuentran fijadas al bloque basal en los puntos en que la falla cambia de inclinación (X e Y), en cambio A' y B' avanzan (figuras 2.2 a y b) haciendo crecer en ancho a las bandas kink A-A' y B-B', mientras que el de A-B' disminuye. En el momento en que la superficie axial B' alcanza el punto X, se fija a éste y la superficie axial A (antes fija) comienza a avanzar en forma sincrónica con A'. A partir de ese momento las bandas kink B-B' y A-A' dejan de crecer manteniendo un ancho constante y la banda A-B' comienza a ensancharse. Es así que:

<p>la superficie axial B siempre es fija respecto al bloque basal la superficie axial A' siempre es móvil respecto al bloque basal la superficie axial B' inicialmente es móvil y luego fija respecto al bloque basal la superficie axial A inicialmente es fija y luego móvil respecto al bloque basal.</p>

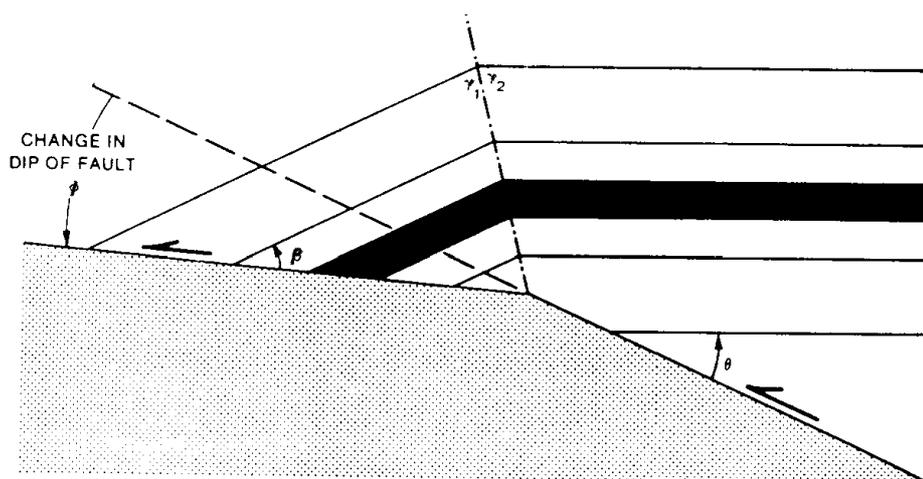


Figura 2.3: Geometría del sector frontal de un pliegue de flexión de falla (Suppe, 1983).

Es importante remarcar que una superficie axial móvil respecto al bloque basal se mueve solidariamente a los bancos del bloque colgante y en cambio una superficie axial fija al bloque basal implica que los bancos del bloque colgante roten al pasar a

través de ella. En casos reales de pliegues de charnelas angulares como los del modelo de Suppe (1983), la rotación abrupta de los bancos en una superficie axial fija al bloque basal produce en la roca una fracturación secundaria que se conoce como *zona de daño* y que puede ser muy importante desde el punto de vista económico, ya sea como reservorio de hidrocarburos por el desarrollo de permeabilidad secundaria o como zona de acumulación de minerales. Es por esto que las superficies axiales fijas al bloque basal también se denominan *activas* y las móviles respecto al bloque basal se denominan *pasivas*. Los términos activa y pasiva no se relacionan con su posición y movimiento sino que se refieren a la posibilidad de los bancos de rotar o no en dichas superficies axiales.



IMPORTANTE: la nomenclatura utilizada en la literatura se refiere a las superficies axiales al bloque colgante, por eso:

- una superficie axial que sea fija al bloque basal va a ser móvil respecto al bloque colgante y se va a denominar *móvil* o *activa*.
- una superficie axial móvil respecto al bloque basal va a ser fija respecto al bloque colgante y se va a denominar *fija* o *pasiva*.

Es por esta razón y para evitar confusiones que es conveniente utilizar sólo los términos *activas* y *pasivas* para referirse a las superficies axiales.

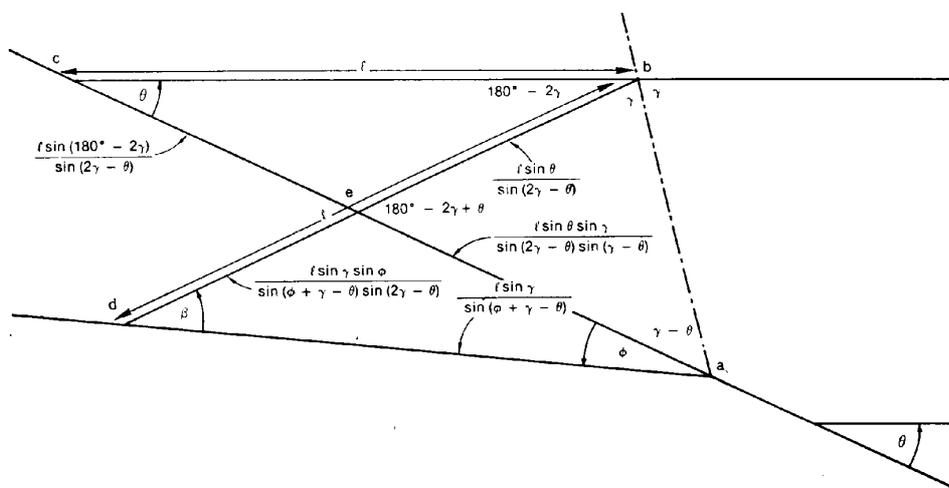


Figura 2.4: Relaciones trigonométricas en el sector frontal de un pliegue de flexión de falla (Suppe, 1983).

Si se analizan los modelos de la figura 2.2, se verá que un pliegue por flexión de falla consume parte del acortamiento aplicado para formar el pliegue (elevación), pero otra parte la transfiere hacia adelante (hacia el antepaís). En la figura 2.2 el acortamiento aplicado está dado por la distancia Y-Y' y el transferido hacia el antepaís por X-X', la diferencia entre ambos es el acortamiento absorbido por plegamiento. Es importante mencionar que el desplazamiento sobre la rampa basal de un pliegue de flexión de falla es constante a lo largo de ella, hecho que no ocurre en otro tipo de pliegues vinculados a fallas.

Suppe (1983) encontró una relación geométrica entre el ángulo de corte q

(figuras 2.3) y el ángulo frontal del pliegue g (nótese que $2g$ representa el ángulo de interlimbo frontal) para que este balancee, es decir para que todos los bancos mantengan la misma longitud antes y después de la deformación y el área se conserve. La relación encontrada se basa fundamentalmente en un desarrollo trigonométrico sencillo pero engorroso que no será desarrollado en este texto (Véase 1983). En la figura 2.3 se muestra la parte frontal de un pliegue de flexión de falla, con un ángulo de corte q . Nótese que para obtener una relación general se muestra una flexión en la inclinación de falla que abajo corta con un ángulo q y arriba con un ángulo f . Se hace una igualdad de áreas entre el triángulo de material que se elevaría si fuera totalmente rígido y el que realmente se encuentra al acomodarse la roca sobre el plano de falla. En base a esa igualdad (figura 2.4) se obtiene la siguiente ecuación general:

$$f = \tan^{-1} \left[\frac{-\sin(g-q) \cdot [\sin(2g-q) - \sin q]}{\cos(g-q) \cdot [\sin(2g-q) - \sin q] - \sin q} \right]$$

Si se considera el caso especial en que $f = q$, la ecuación se simplifica a:

$$f = q = \tan^{-1} \left[\frac{\sin 2g}{1 + \cos^2 g} \right]$$

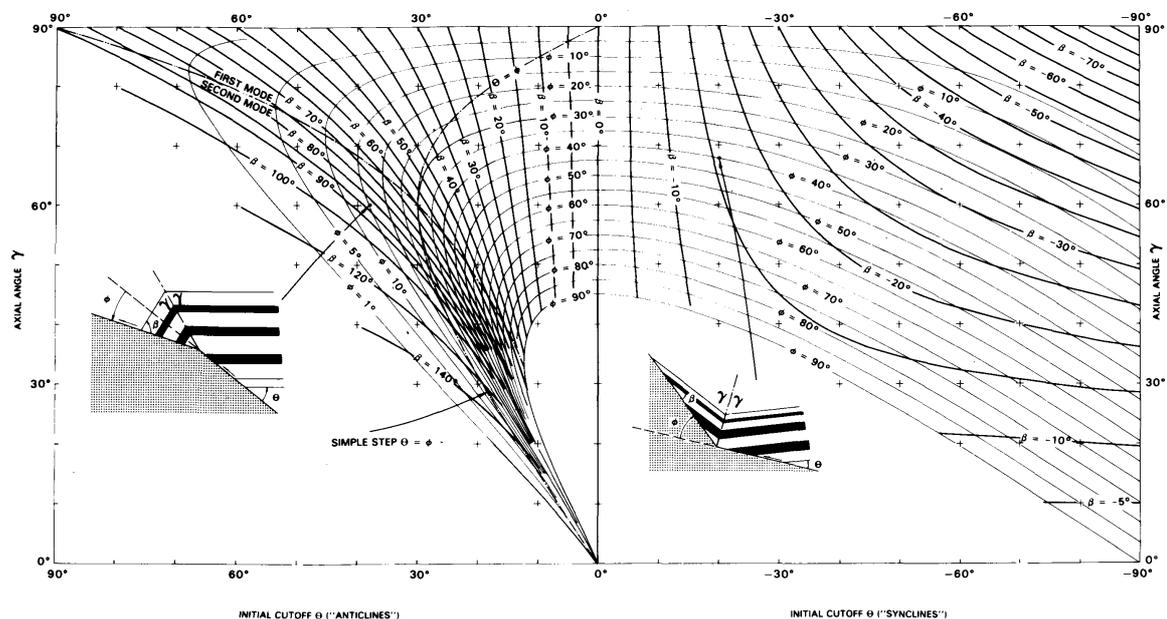


Figura 2.5: Gráfico en que en el eje de abscisas se representa el ángulo de corte q y en el de ordenadas el ángulo frontal g . Se graficaron curvas para distintos f y para $f = q$ para el caso de anticlinales y sinclinales frontales h (Suppe, 1983).

La resolución de estas ecuaciones (figura 2.5) se puede realizar mediante la computadora o utilizando los gráficos de Suppe (1983) en los que en el eje de abscisas se representa el ángulo de corte q y en las ordenadas el ángulo frontal g . Se graficaron curvas para distintos f y para $f = q$ tanto para anticlinales como para sinclinales

frontales. Si se analiza el caso más sencillo en que $f = q$, se ve que para ángulos de corte menores de 30° ($q < 30^\circ$) existen dos valores que dan solución a la ecuación, para un ángulo de corte de 30° existe sólo uno y para ángulos mayores no existe ningún valor que solucione la ecuación. Desde el punto de vista geológico esto significa que podrían existir dos tipos de pliegues de flexión de falla para ángulos de corte menores a los 30° que se denominan de *modo 1* y *modo 2* respectivamente (figura 2.6). Para ángulos mayores al mencionado no existe ninguna estructura de flexión de falla que pueda balancear sin considerar una cizalla interestratal (véase discusión a continuación).

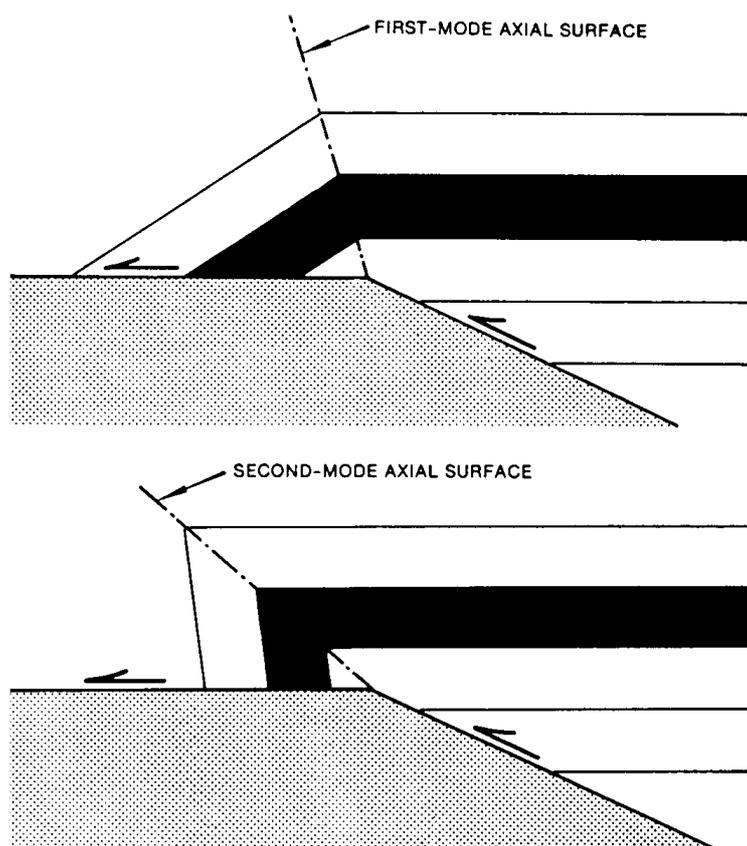


Figura 2.6: Se muestran los dos modelos posibles de pliegues de flexión de falla para $q = f = 25^\circ$ (Suppe, 1983).

Cizalla interestratal

Si se toma una guía telefónica apoyada sobre una mesa y se le dibuja una línea inclinando 20° en uno de sus costados, luego se le introduce por debajo una cuña de madera de 20° (figura 2.7), se verá, que si bien la línea aumentó su inclinación, no se dispone a 40° de la mesa sino que con un ángulo menor. Este hecho se debe a que las hojas de la guía se desplazaron entre ellas mediante *cizalla simple* y disminuyeron el ángulo original de la línea. Al igual que en el ejemplo de la guía, en un pliegue se produce cizalla a través de cada una de las superficies axiales. Suppe (1983) contempló este hecho y las fórmulas expuestas anteriormente compensan las cizallas opuestas que existen en el sinclinal dorsal (superficie axial B de la figura 2.2) y en el anticlinal frontal (superficie axial A de la figura 2.2). Dicho de otro modo, si al construir un pliegue por flexión de falla, para un determinado ángulo de corte q se

utiliza un ángulo frontal g distinto del desprendido de las fórmulas anteriores (o de su expresión gráfica, figura 2.5), al balancear el pliegue, se encontrará que no todos los bancos tienen la misma longitud y que si se unen sus terminaciones con una línea, ésta formará un determinado ángulo con la vertical. Dicho ángulo representa la *cizalla angular* (Y) del modelo y es positiva (+) cuando inclina igual que el plano de falla y negativa (-) cuando lo hace en dirección contraria (véase más adelante figura 2.21).

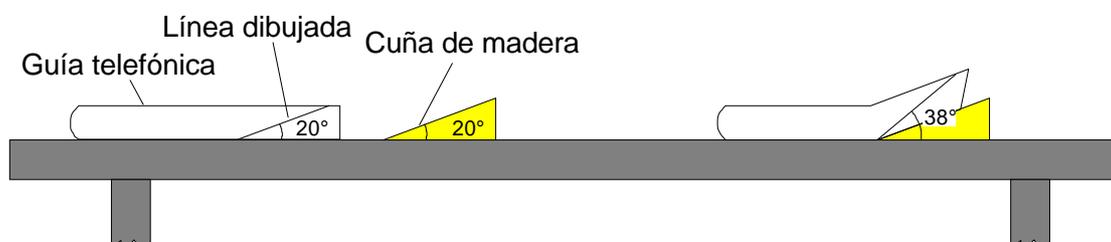


Figura 2.7: Guía telefónica en la que se dibuja una línea inclinando 20° y se le introduce una cuña de 20° por debajo. Véase discusión en el texto.

La cizalla angular (Y) producida por la flexión de un paquete de bancos a través de una superficie axial se calcula mediante relaciones trigonométricas sencillas que se ilustran en la figura 2.8. Las áreas sombreadas deben ser iguales antes y después de la flexión; de dicha igualdad se desprende que:

$$\tan y = 2 \tan \frac{q}{2}$$

la resolución de esta ecuación así como la cizalla angular producida en charnelas curvas se ilustra en la figura 2.9.

Suppe (1983) calculó la cizalla que se produce sobre cada rampa en un pliegue de flexión de falla y definió diferentes *dominios de inclinación* para bancos que se encuentren sobre distintos números de rampas. En la figura 2.10 se observa un pliegue de flexión de falla producido por el apilamiento de dos láminas sobrecorridas. En él se marcan los dominios de inclinación que se encuentran en su superficie según el número de rampas apiladas que tengan por debajo. Dominio 0 indica que no existe ninguna rampa que incline a esos bancos, es decir que están horizontales. Los dominios I, II, III, etc. indican que hay una, dos, tres, etc. rampas apiladas; los valores positivos (+) se refieren a flancos frontales y los negativos (-) a dorsales. La tabla de la figura 2.11 muestra los valores calculados por Suppe (1983) para los distintos dominios, con entradas según el ángulo de corte q . Nótese que existe una limitación en el apilamiento de rampas para cada ángulo de corte. Es decir que, por ejemplo, para un ángulo de corte de 23° , no se pueden apilar más de dos rampas y que el modelo siga balanceando sin aplicar cizalla angular. Es importante destacar que, como se puede ver en la tabla de la figura 2.11, es difícil obtener ángulos frontales muy inclinados o volcados mediante este tipo de mecanismo, ya que por ejemplo para volcar un pliegue producido por corrimientos con un ángulo de corte de 20° , harían

falta por lo menos cuatro rampas frontales apiladas. Como se verá más adelante hay mecanismos de plegamiento mucho más efectivos en este sentido.

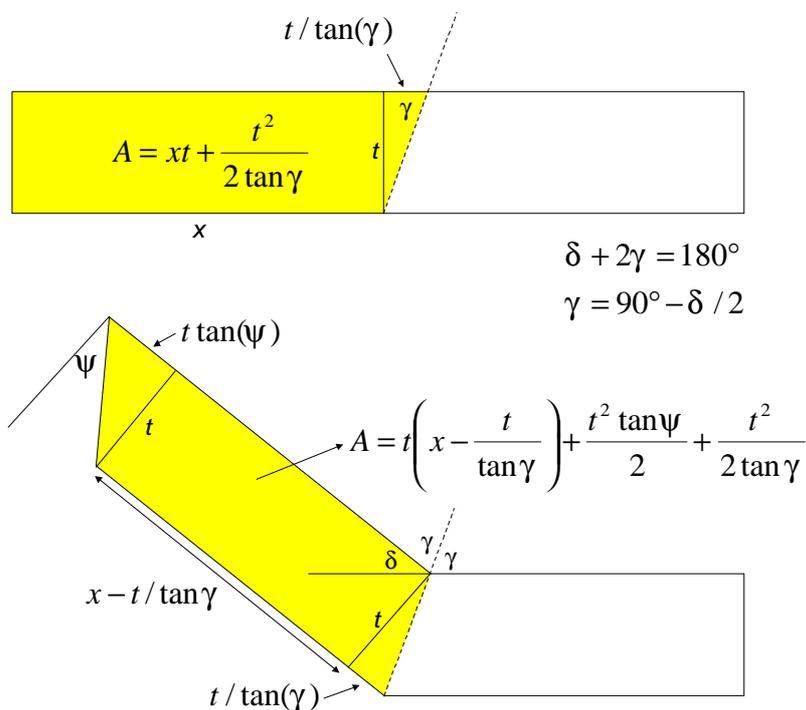


Figura 2.8: Relaciones trigonométricas para calcular la cizalla angular de un sinclinal. Nótese que el área sombreada antes y después de la flexión debe ser la misma.

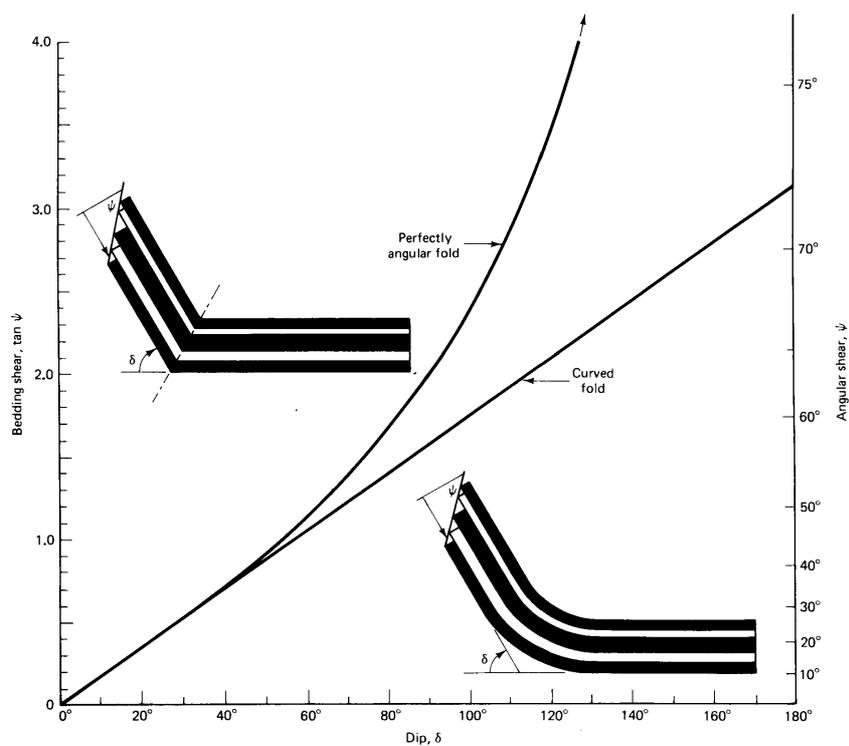


Figura 2.9: Relaciones entre la cizalla angular y el ángulo de inclinación de los bancos para pliegues angulares y curvos (Suppe, 1985).

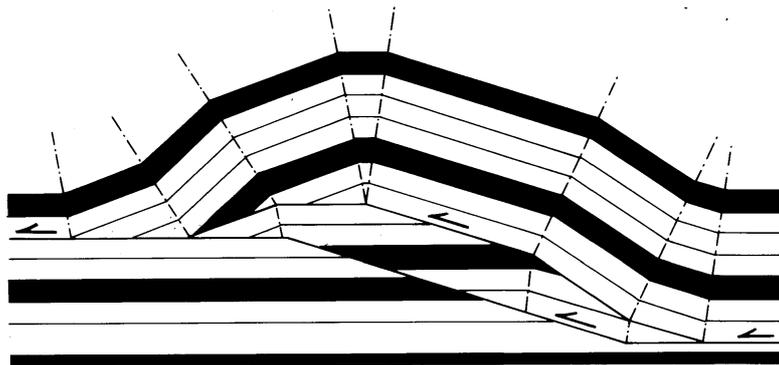


Figura 2.10: Pliegue de flexión de falla producido por el apilamiento de dos láminas sobrecorridas. En él se marcan los distintos dominios de inclinación que se encuentran en su superficie según el número de rampas apiladas que tengan por debajo (Suppe, 1983). Véase discusión en texto.

Forward and Back Dips assuming constant fundamental cutoff angle

Forward Dips							Fundamental Cutoff Angle θ	Backdips						
VII	VI	V	IV	III	II	I		I	II	III	IV	V	VI	VII
81.8°	52.5°	43.0°	34.0°	25.2°	16.6°	8.2°	8°	8°	15.9°	23.4°	30.6°	37.3°	43.5°	49.3°
70.2°	59.2°	48.6°	38.3°	28.3°	18.6°	9.2°	9°	9°	17.8°	26.2°	34.0°	41.3°	47.9°	53.9°
80.6°	67.6°	55.2°	43.3°	31.9°	20.9°	10.3°	10°	10°	19.7°	28.9°	37.4°	45.1°	52.0°	58.2°
93.1°	77.3°	62.6°	48.8°	35.7°	23.3°	11.4°	11°	11°	21.6°	31.5°	40.6°	48.7°	55.9°	62.2°
109°	88.8°	71.0°	54.8°	39.8°	25.8°	12.6°	12°	12°	23.5°	34.1°	43.7°	52.1°	59.5°	65.9°
128°	102°	80.5°	61.5°	44.3°	28.5°	13.8°	13°	13°	25.4°	36.7°	46.7°	55.4°	62.9°	69.4°
180°	119°	91.3°	68.8°	48.9°	31.2°	15.0°	14°	14°	27.2°	39.1°	49.5°	58.4°	66.1°	72.5°
-	148°	104°	76.3°	53.8°	33.9°	16.2°	15°	15°	29.1°	41.5°	52.3°	61.4°	69.0°	75.5°
		124°	85.9°	59.0°	36.8°	17.4°	15°	16°	30.9°	43.9°	54.9°	64.1°	-	
		-	99.2°	65.6°	40.2°	18.8°	17°	17°	32.7°	46.2°	57.5°	-		
		-	123°	73.1°	43.7°	20.2°	18°	18°	34.4°	48.4°	59.9°	-		
			-	82.2°	47.4°	21.6°	19°	19°	36.2°	50.6°	-			
				97.6°	52.0°	23.2°	20°	20°	37.9°	52.7°	-			
				-	57.0°	24.8°	21°	21°	39.6°	-				
				-	63.6°	26.8°	22°	22°	41.3°	-				
				-	72.0°	28.4°	23°	23°	42.9°	-				
				-	30.4°		24°	24°	-					

* Thinning required in forward dips ($\theta_n = \phi_n > 30^\circ$).

Figura 2.11: Tabla mostrando los valores calculados por Suppe (1983) para los distintos dominios con entradas, según el ángulo de corte θ .

Pliegues por flexión de falla de multiflexión-multikink

Los modelos de flexión de falla de Suppe (1983) resuelven muy bien casos en que un corrimiento se flexiona abruptamente y en general producen geometrías angulares que en muchos casos solo representan una aproximación grosera de la realidad. Sin embargo, Mendwedeff y Suppe (1997) generaron modelos bastante más complicados basados en los mismos principios, pero en los que se produce la interferencia de bandas kink y de superficies axiales. Dichos pliegues fueron denominados por los autores como *pliegues por flexión de falla de multiflexión (multibend fault-bend folding)*.

Si se considera por ejemplo una falla con dos flexiones como la de la figura 2.13a, existen dos posibilidades de interferencia de bandas kink para que el modelo balancee sin que los bancos cambien de espesor. Una de ellas representa una interferencia *horaria* de bandas kink y la otra una interferencia *antihoraria* (figura 2.13 b y c). Es importante observar que a partir de la misma falla y aplicando el mismo desplazamiento, se pueden generar dos geometrías bastante diferentes entre sí.

También el modelo de multiflexión contempla la interferencia de kinks internos, es decir que se pueden generar superficies axiales dentro de bandas kinks que permiten generar modelos variados a partir de condiciones iniciales semejantes. Por ejemplo, la figura 2.14a muestra que al moverse el bloque colgante sobre el plano de falla, a partir del mismo se generan dos bandas kink. Dentro de estas bandas se pueden generar una o más superficies axiales (figura 2.14 a y b), que al evolucionar producen estructuras complejas como la de la figura 2.14c.

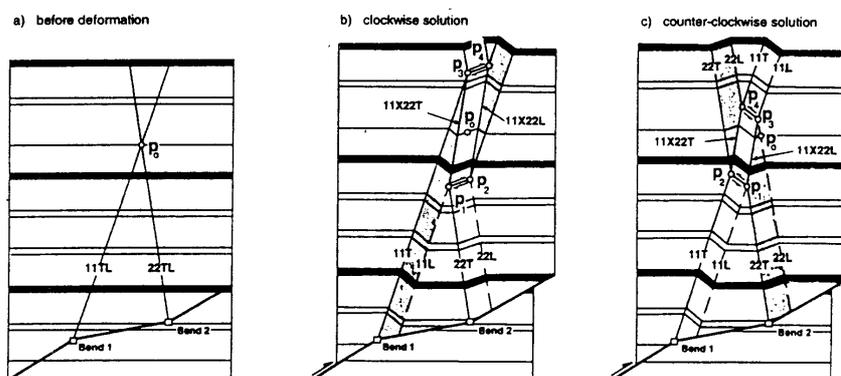


Figura 2.13: Inicio de la interferencia de bandas kink por encima de una falla con dos flexiones (Medwedeff y Suppe, 1997).

Mediante el método de multiflexión, Mendweleff y Suppe (1997) demuestran que a partir de una configuración sencilla de fallas planas y mediante la generación e interferencia de superficies axiales y bandas kink, se pueden obtener estructuras sumamente complejas (figura 2.15) que pueden representar mejor la realidad que los modelos iniciales de pliegues por flexión de falla (Suppe, 1983). Por supuesto, trabajar con modelos multiflexión es mucho más complicado, pero permite modelar secciones semejantes a las observadas en el campo.

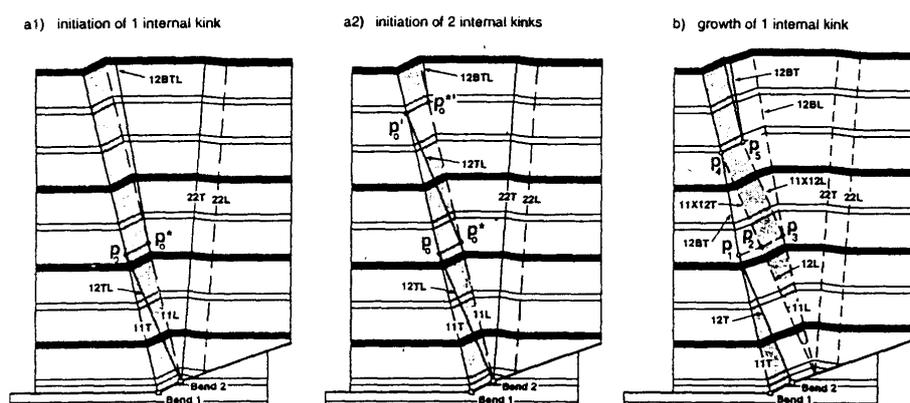


Figura 2.14: Inicio de crecimiento e interferencia de bandas kink internas (Mendweleff y Suppe, 1997).

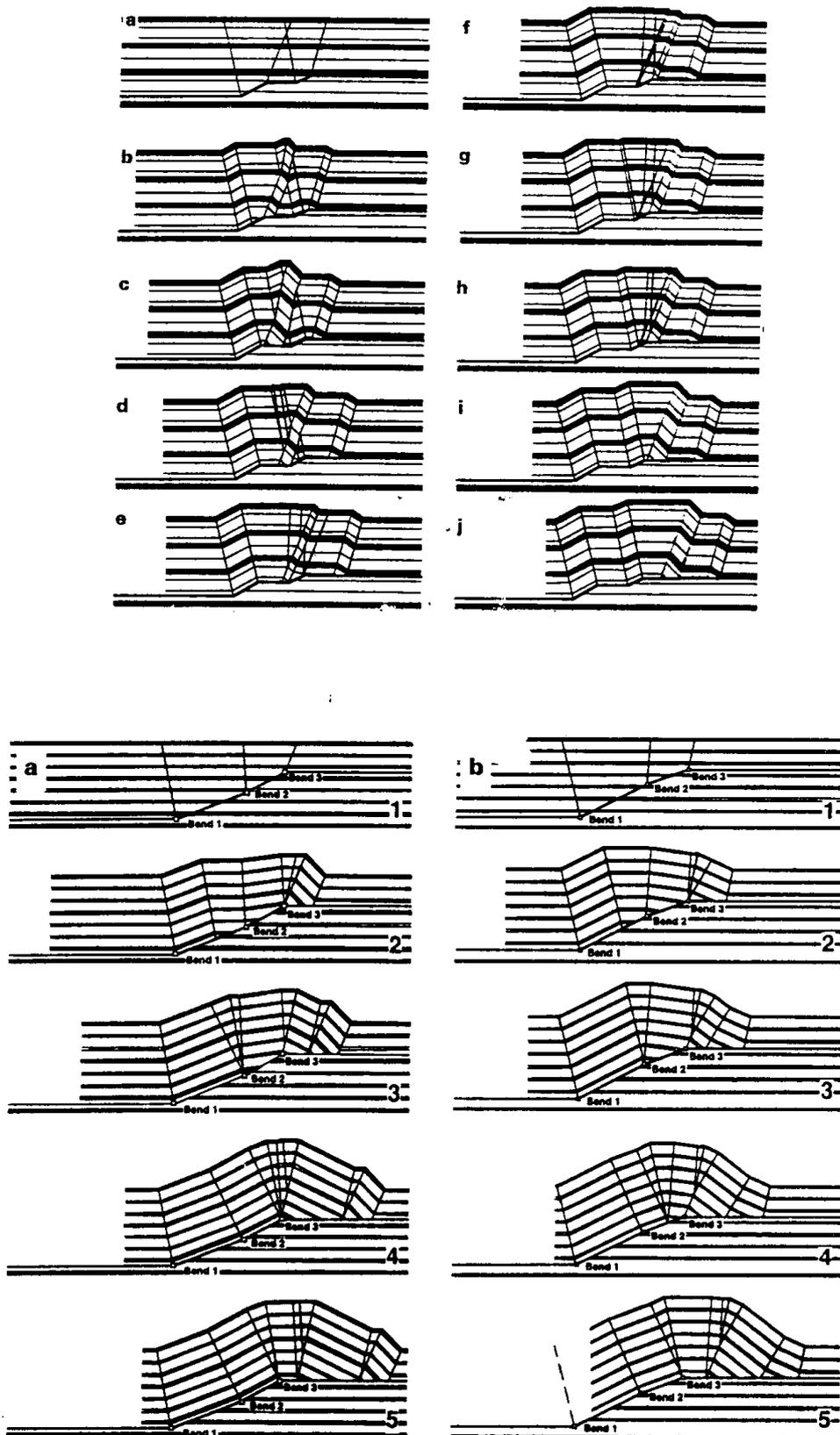


Figura 2.15: Ejemplos en que se muestra que a partir de una configuración sencilla de fallas planas y mediante la generación e interferencia de superficies axiales y bandas kinks, se pueden obtener estructuras sumamente complejas (Mendweleff y Suppe, 1997).

Pliegues por propagación de falla

Los pliegues de flexión de falla revisados anteriormente no son muy eficientes para explicar estructuras con limbos frontales volcados sin apilar muchas rampas, sin embargo es muy común encontrar en la naturaleza pliegues volcados vinculados a una sola falla. Suppe y Mendweleff (1990) propusieron un modelo de pliegue-falla que puede explicar este tipo de casos y que denominaron **plegamiento por propagación de falla** (*fault-propagation folding*). A diferencia del modelo de flexión, en que primero

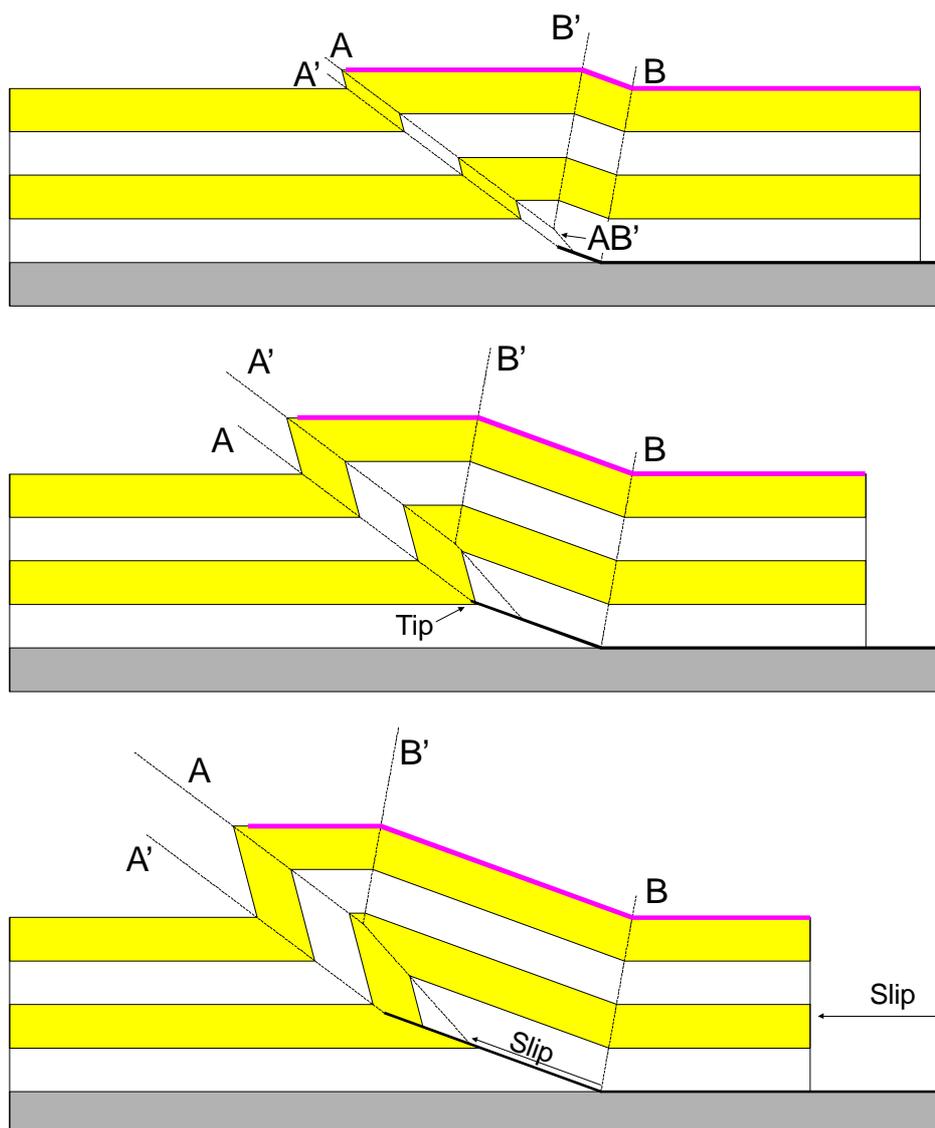


Figura 2.16: Evolución de un pliegue de propagación de falla (Suppe y Mendweleff, 1990).

se genera una falla en forma rápida y limpia y sobre ella se desplaza y acomoda el bloque colgante, en los pliegues por propagación, la falla va creciendo sincrónicamente con el plegamiento. Esto significa que la falla va a tener un **punto de terminación** o *fault tip* y que, en consecuencia, el desplazamiento no es constante a lo largo del plano de falla, sino que progresivamente disminuye hacia arriba hasta hacerse cero en el punto de terminación (figura 2.16). En la figura 2.16 se muestra la

evolución de un pliegue por propagación de falla. Las superficies axiales fueron marcadas como A, A', B y B'. La superficie axial B es fija respecto al bloque basal (superficie axial activa) y todas las otras son móviles respecto al bloque basal. Sin embargo, A, A' y B' también son superficies activas, excepto en casos especiales en que A puede comportarse como pasiva. El pliegue crece hacia arriba y cada vez se va haciendo más puntiagudo. Las bandas kink B-B' y A-A' van haciéndose cada vez más anchas y la A-B' cada vez más angostas.

El desplazamiento aplicado al modelo se puede medir entre el punto en que comienza la rampa colgante (Y') y en que comienza la rampa basal (Y). Desde el punto Y' hacia arriba el desplazamiento disminuye hasta hacerse cero en el punto de terminación. Es por esto que este tipo de estructuras convierte todo el acortamiento en plegamiento y no traslada rechazo hacia el antepaís como en el caso de los pliegues de flexión de falla.

Pliegues por propagación de falla de espesor de limbos constante

Es el modelo más simple y más común y al igual que en los pliegues de flexión de falla, se asume que no hay cambio de espesor de los bancos durante la deformación. Suppe y Medwedeff (1990) realizaron todo el formuleo correspondiente a este modelo de pliegues. Al igual que en el caso de flexión de falla, se basa en un desarrollo trigonométrico sencillo pero engorroso que no será analizado en este texto y que finalmente termina relacionando el ángulo de corte q con el ángulo frontal g y g^* (figura 2.17). Nótese, que en la construcción de un pliegue de propagación de falla

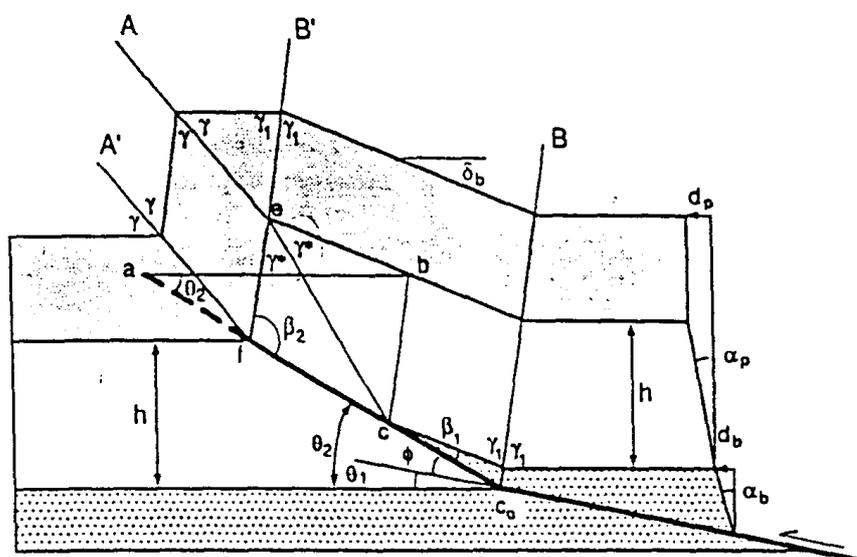


Figura 2.17: Pliegue de propagación de falla de espesor de limbos constante.

teórico, el banco que está al mismo nivel que el punto de terminación, forma un anticlinal puntiagudo con una única superficie axial que lo bisecta. Los que están por debajo hacen lo mismo, pero están fallados. Los que están por encima no se encuentran fallados y forman un pliegue de techo plano con bancos horizontales y dos superficies axiales. Es por esto que en este modelo (figura 2.17) se definen dos ángulos frontales, el g (ángulo de interlimbo $2g$) y el g^* (ángulo interlimbo $2g^*$, véase figura 2.17). La fórmula general para los pliegues de propagación de falla de espesor de limbos constante es (véanse referencias en figura 2.17):

$$\sin q_2 = \frac{\sin g^* \sin(g^* - b_1)}{\sin(g_1 - g^*) + \left[\frac{\sin g_1 \sin(g^* - b_1)}{\sin(2g^* - b_1)} \right] - \tan a_p \sin g^* \sin g_1}$$

donde

$$g = 90^\circ + g^* - g_1; b_2 = 180^\circ - 2g^* + b_1; \text{ and } d_b = 2(g - g^*)$$

Si no hay un cambio de inclinación en la rampa de la falla y $\theta_1 = 0$ y $\theta_2 = \phi$ la fórmula se reduce a:

$$\tan a_p = \frac{1 + 2 \cos^2 g^*}{\sin 2g^*} + \frac{\cos q_2 - 2}{\sin q_2}$$

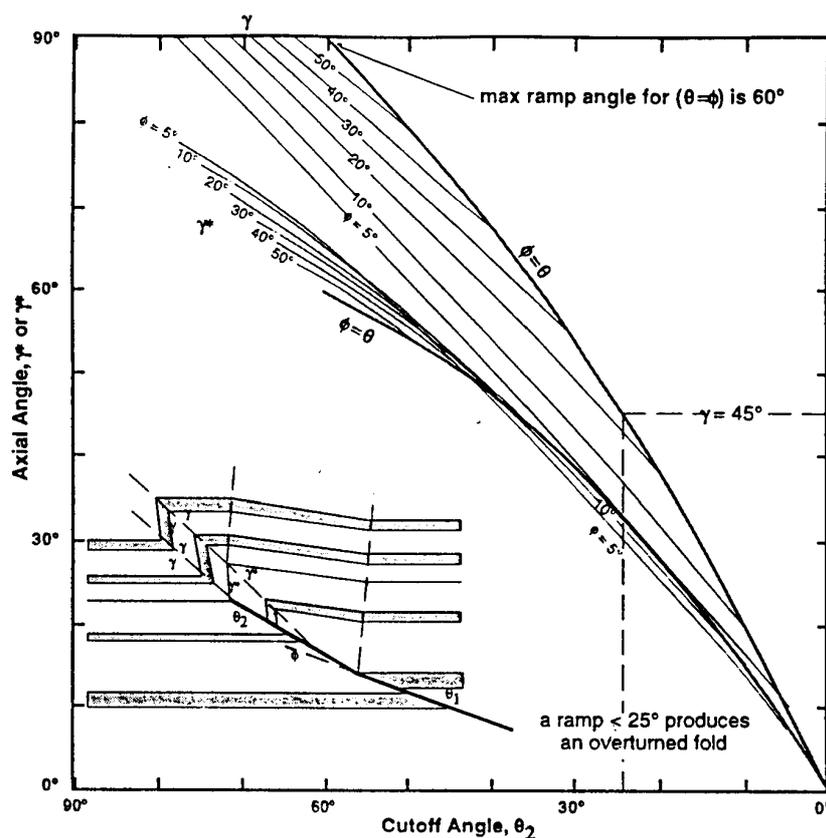


Figura 2.18: Relaciones entre el ángulo de corte y los ángulos interlimbo para pliegues de propagación de falla de espesor de limbo constante (Suppe y Medwedeff, 1990).

Estas fórmulas pueden resolverse mediante el uso de la computadora o pueden utilizarse las curvas realizadas por Suppe y Medwedeff (1990) que se observan en la

figura 2.18. Un gráfico simplificado para una rampa sin quiebre puede verse en la figura 2.19. Es interesante notar que cuanto menor sea el ángulo de corte q menor van a ser los ángulos de interlimbo $2g$ y $2g^*$, es decir que más volcado va a estar el pliegue. Contrariamente cuanto mayor sea q , mayor será el ángulo interlimbo y menor la inclinación del flanco frontal del pliegue. La figura 2.20 muestra la variación del ángulo frontal del pliegue según el ángulo de corte inicial. Nótese que para ángulos de corte muy altos el pliegue puede tener una vergencia aparente contraria. Esto último suele ocurrir en regiones con inversión tectónica, donde la falla inversa es de ángulo muy alto.

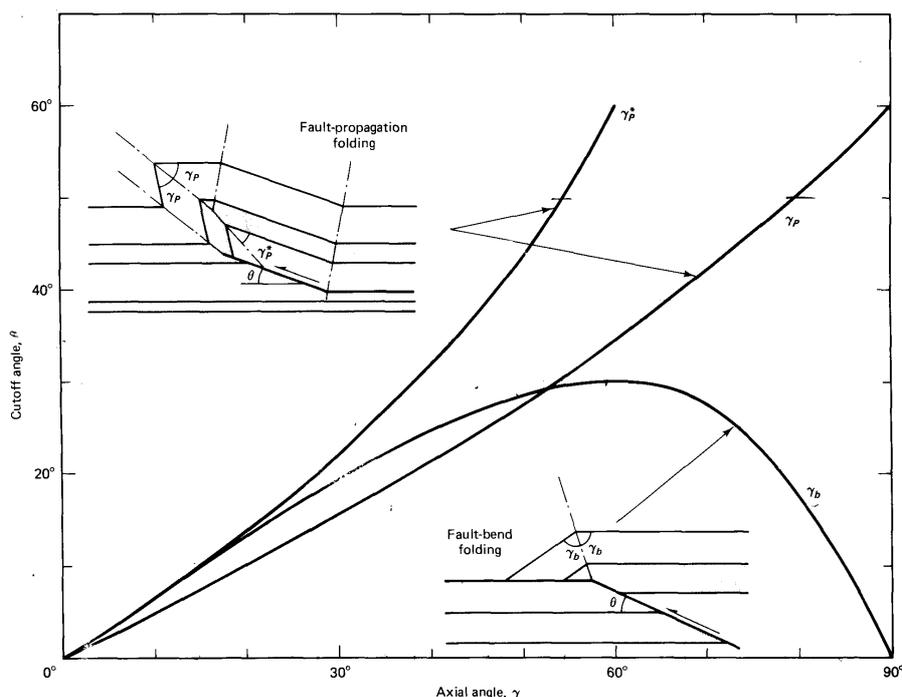


Figura 2.19: Gráfico simplificado en que se muestra las relaciones angulares para pliegues de propagación y flexión de falla, en el caso de fallas sin quiebres de pendiente (Suppe, 1985).

La cizalla angular puede cambiar mucho la geometría de un pliegue de propagación de falla (figura 2.21). En la figura 2.22 se muestra un gráfico en el que a partir del ángulo interlimbo y del ángulo de corte se puede obtener la cizalla angular del modelo (α , o también denominada γ).

Pliegues por propagación de falla de charnela fija (espesor NO constante)

En la figura 2.23 se puede ver que en el frente de un pliegue de propagación de falla, el material tiene que rotar a través de la superficie axial A. Esto muchas veces no es posible, sobre todo en las estructuras con bajo ángulo de corte que poseen flancos frontales volcados. Es así que Suppe y Medwedeff (1990) concibieron un modelo que denominaron ***plegamiento de propagación de falla de superficie axial frontal fija o charnela fija (fault-propagation folding with fixed front anticlinal axial surface)*** (figura 2.24). Dicho modelo evoluciona igual al anterior, hasta que se produce la imposibilidad de rotación de bancos a través de la superficie axial A. Desde ese momento dicha superficie axial se inmoviliza y el pliegue evoluciona engrosando el limbo frontal A-A' (figura 2.24). Esto implica un cambio de espesor de

los bancos y en consecuencia una cierta ductilidad en el sistema. Sin embargo, los pliegues de charnela fija son los menos comunes dentro de los de propagación de falla. Suppe y Medwedeff (1990) realizaron formuleos para este tipo de estructuras que no se transcribirán en la presente guía.

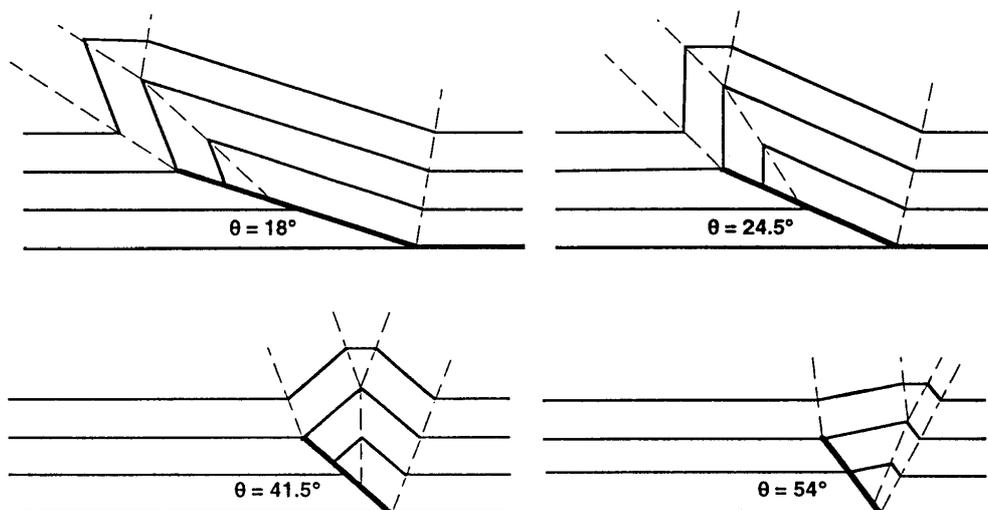


Figura 2.20: Variación de ángulo frontal de un pliegue de propagación de falla según el ángulo de corte inicial (Allmendinger, 1997).

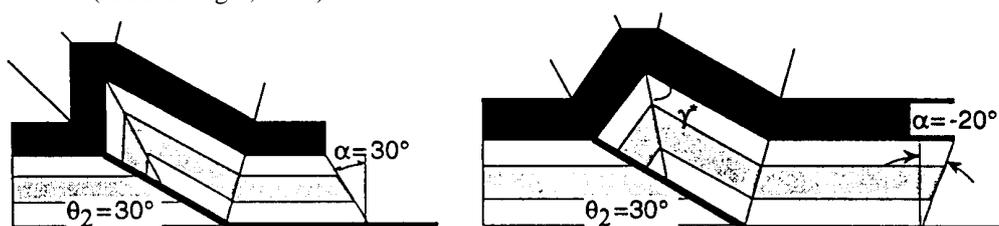


Figura 2.21: Variación de la geometría de un pliegue de propagación de falla según la cizalla angular aplicada (Allmendinger, 1997).

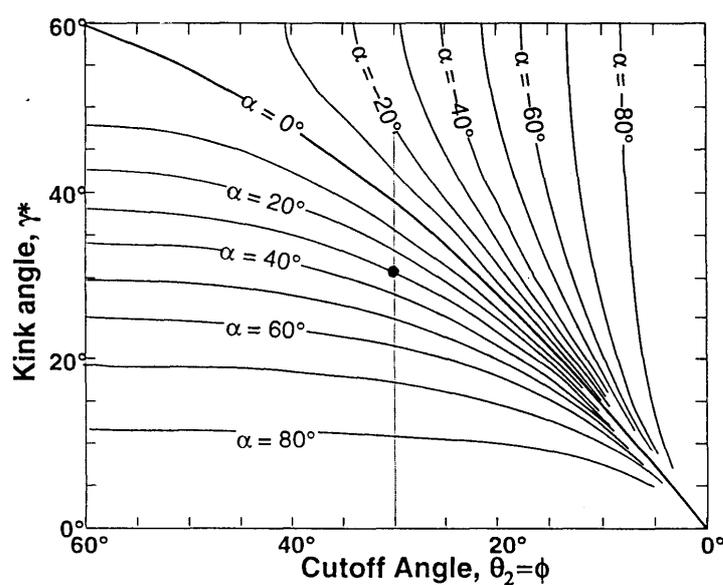


Figura 2.22: Gráfico en el que a partir del ángulo interlimbo y del ángulo de corte se puede obtener la cizalla angular del modelo (α), (Allmendinger, 1997).

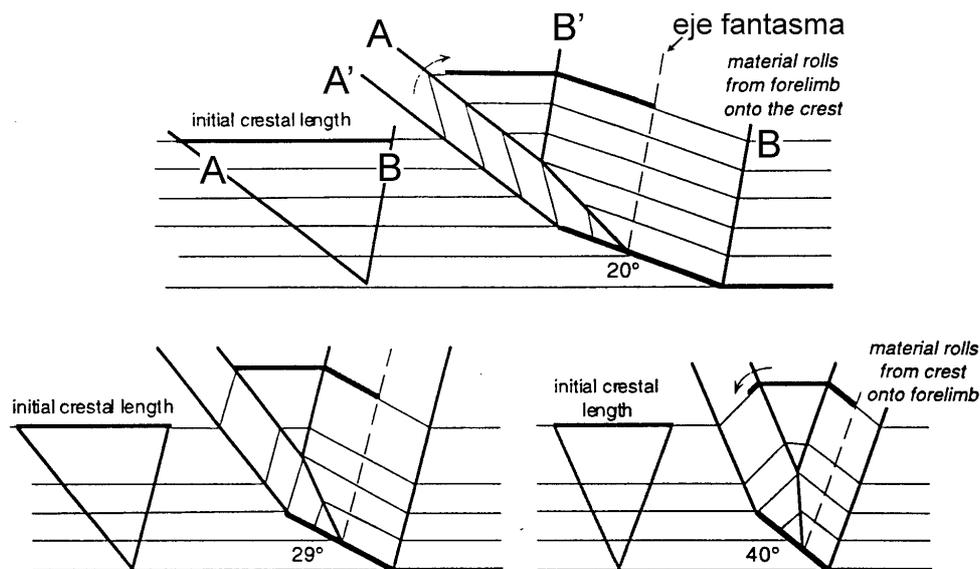


Figura 2.23: Durante la evolución de un pliegue de propagación de falla, el material tiene que moverse desde y hacia la cresta. Para entender como se mueve dicho material se puede utilizar el concepto de longitud inicial de la línea crestral (Zapata y Allmendinger, 1996). Véase discusión en el texto.

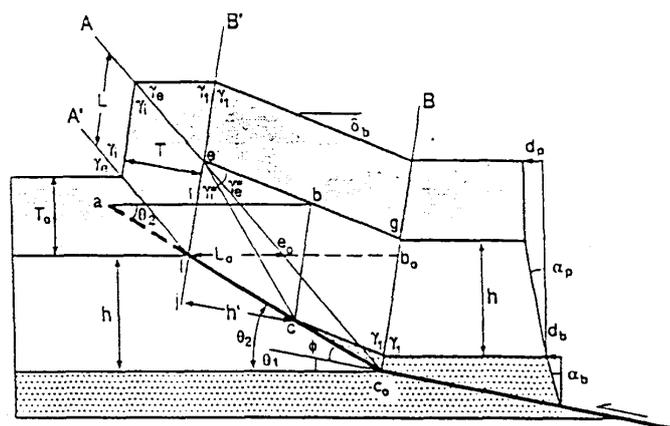


Figura 2.24: Pliegue de propagación de falla de charnela fija (Suppe y Medwedeff, 1990).

Pliegues por propagación de falla transportados

Si se observa con detenimiento la figura 2.23, se verá que durante la evolución de un pliegue de propagación de falla, el material tiene que moverse desde y hacia la cresta. La superficie axial B' se mueve junto con el bloque colgante, sin embargo, la longitud de la cresta no se mantiene constante durante la evolución del pliegue, lo que indica que tiene que haber un intercambio de material entre la cresta y el limbo frontal. Para entender como se mueve dicho material se puede utilizar el concepto de longitud inicial de la línea crestral y eje fantasma (Zapata y Allmendinger, 1996) que se ilustra en la figura 2.23. El eje fantasma es paralelo a la superficie axial B y pasa por el punto en que comienza la rampa frontal. Este eje se puede utilizar como punto de referencia para medir la longitud inicial de la cresta en cualquier etapa de evolución del pliegue. Se puede ver que si el ángulo de corte es elevado (mayor a

29°), el material migra desde la cresta hacia el flanco frontal (menor a 29°), pero si es bajo, el movimiento es inverso. Para un ángulo de corte de 29° el material no se moviliza entre la charnela y el flanco frontal y la superficie axial A (figura 2.16) se comporta como pasiva.

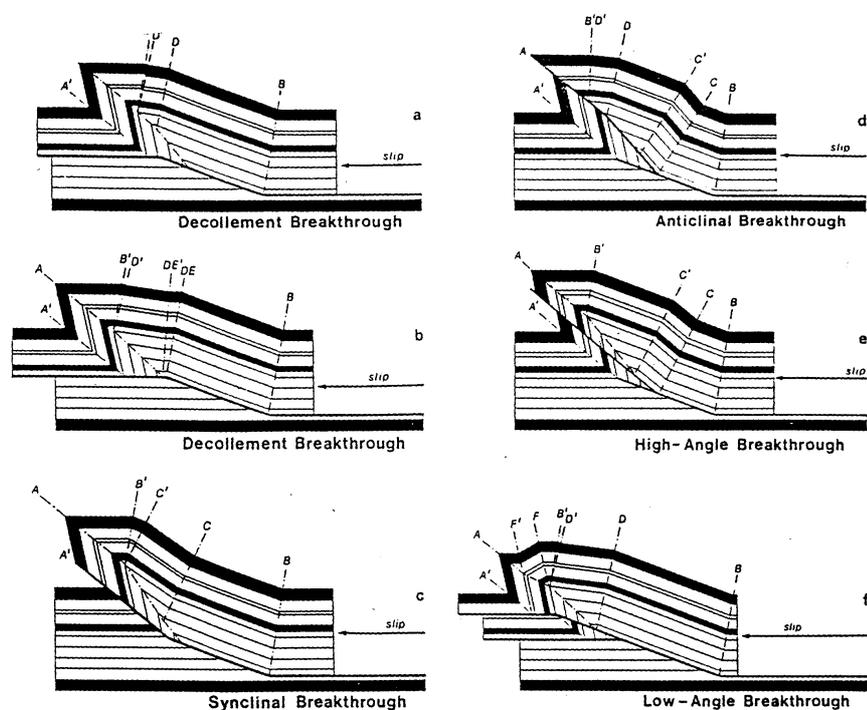


Figura 2.25: Pliegues de propagación de falla transportados (Suppe y Medwedeff, 1990).

En muchos casos reales con ángulos de corte bajo y limbos frontales volcados, el material se ve imposibilitado mecánicamente para migrar hacia la cresta del pliegue y éste se bloquea. Cuando esto ocurre, puede producirse una nueva falla hacia el antepaís o se puede romper el pliegue y producirse un transporte del mismo hacia adelante. Este tipo de estructuras se llaman *pliegues por propagación de falla transportados* o *breakthrough fault propagation folds*. Su comportamiento es mixto ya que comienza como un pliegue de propagación de falla y después de trabarse se comporta como uno de flexión de falla.

Cuando en pliegue se bloquea, se rompe, es decir que la falla se propaga instantáneamente hasta alcanzar la superficie. Con la persistencia del régimen compresivo, el bloque colgante comienza a moverse sobre el nuevo plano de falla y a acomodarse a él como en los modelos de flexión de falla. El lugar por el cual la falla se propaga, en general, va a estar condicionado por las debilidades propias de cada sistema en particular. En las figuras 2.25 (Suppe y Medwedeff, 1990) y 2.26 (Mitra, 1990) puede verse que en algunos casos lo hace a través de la superficie axial sinclinal frontal, otras por la superficie axial anticlinal frontal, otras lo hace en forma de plano, etc. Se ha visto que muchos pliegues en la naturaleza tienen este origen, es decir que comienzan con una propagación de falla y posteriormente se transportan.

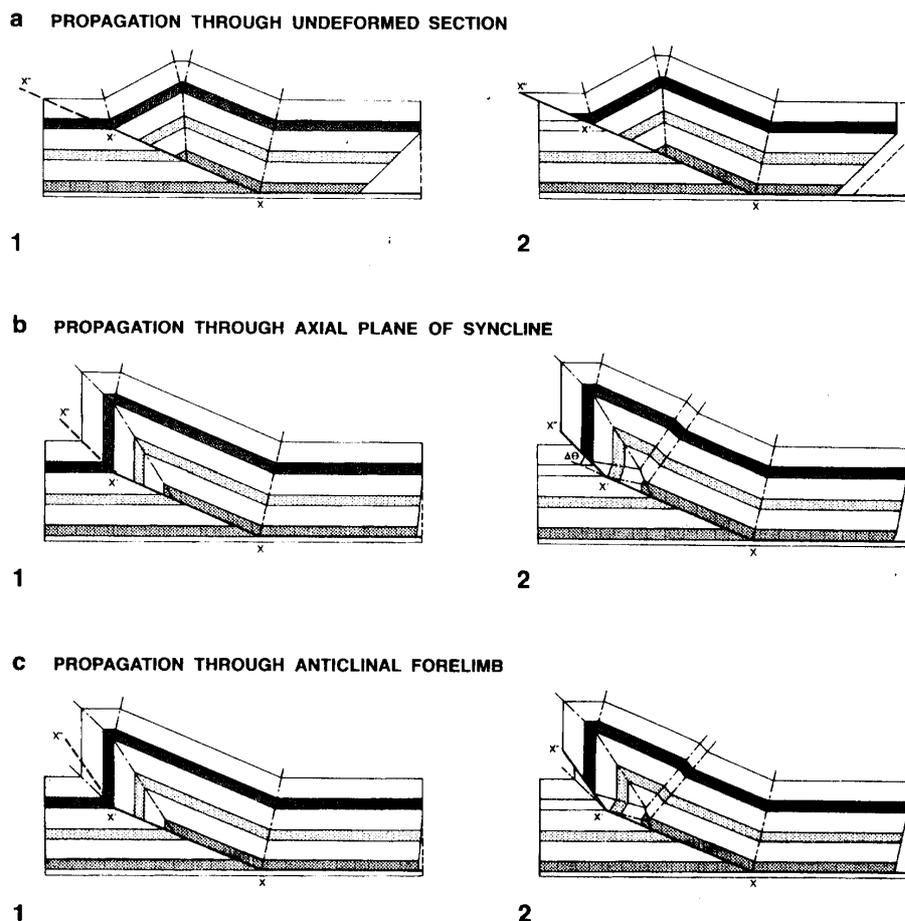


Figura 2.26: Pliegues de propagación de falla transportados (Mitra, 1990).

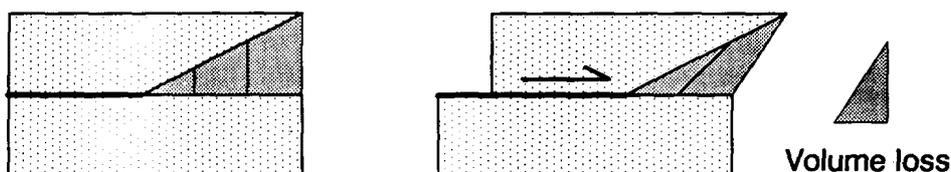
Pliegues de propagación de falla de cizalla triangular

Los pliegues de propagación de falla propuestos por Suppe y Medwedeff (1990) son muy prácticos y fáciles de utilizar, sin embargo constituyen sólo una de las aproximaciones geométricas a las estructuras de este tipo que se encuentran en la naturaleza. En ejemplos naturales es muy común encontrar pliegues de propagación de falla de limbos curvos y con cambios de espesores en los bancos. En modelos experimentales los pliegues generados por propagación de falla son de charnelas curvas y se aprietan progresivamente con el aumento de rechazo. Esto no sucede en las geometrías propuestas por Suppe y Medwedeff (1990) en que el ángulo interlimbar se mantiene constante con el desplazamiento y sólo depende del ángulo de corte. Erslev (1991) estudió estas diferencias en pliegues que involucran al basamento y propuso un modelo de cizalla triangular para explicar muchas de las geometrías encontradas en la naturaleza, al que denominó pliegues de propagación de falla de cizalla triangular (*trishear fault propagation fold*).

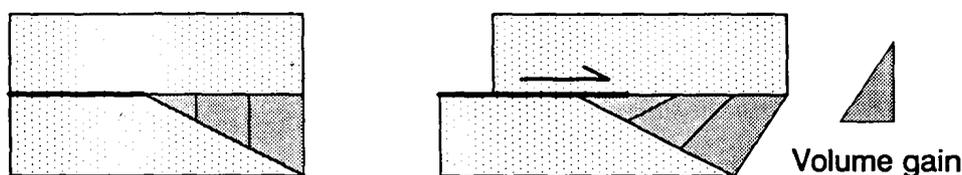
Para entender que es y que ocurre en una zona de cizalla triangular, se pueden imaginar dos bloques entre los que se genera una propagación de falla (figura 2.27). Se suponen ambos bloques como rígidos excepto en el sector sombreado en que el movimiento de las distintas partículas puede no ser paralelo y puede considerarse

dúctil. La zona de cizalla triangular puede estar restringida al bloque colgante (figura 2.27a), al bloque basal (figura 2.27b) o ser simétrica y acomodarse entre ambos (figura 2.27c). En los dos primeros casos varía el área durante la deformación, y el modelo no balancea. En el segundo, el área se mantiene constante por lo que el modelo es balanceable. Es así que Erslev (1991) propuso a las zonas de cizalla triangular como simétricas, sin embargo y como posteriormente demostraron Zehnder y Allmendinger (2000) si bien esto es lo más común, no es estrictamente necesario.

A. Hanging-Wall Triangular Shear Zone



B. Footwall Triangular Shear Zone



C. Symmetric Triangular Shear Zone

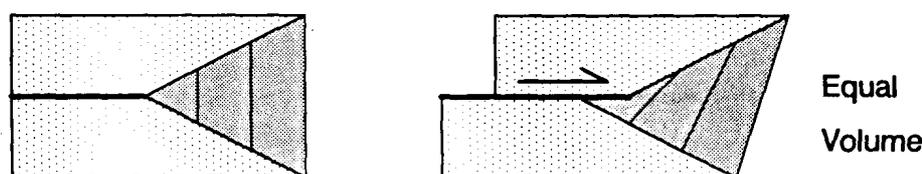


Figura 2.27: Geometría simplificada de cizalla triangular (Erslev, 1991). Véase discusión en texto.

Ahora bien, ¿cuál es el movimiento del material dentro de la zona de cizalla? Si se supone un movimiento de *sisa simple* como el propuesto entre las figuras 2.28 a y b, se puede ver que el área de la porción sombreada en ambas figuras no es la misma. Es decir que mediante *cizalla simple*, si bien se mantiene el área total del triángulo de cizalla, no se conserva el área en porciones individuales del mismo. Para que esto ocurra, el movimiento de las partículas no tiene que ser paralelo al de la falla (no debe ser *sisa simple*) sino que tiene que existir una componente oblicua a la del plano de falla como en la figura 2.28c. Esto es lo que se denomina **cizalla triangular** o *trishear*. Las áreas sombreadas en las figuras 2.28 a y c son iguales. El ángulo abarcado por la cizalla triangular se llama **ápice** y de él depende la diferencia entre las áreas en el caso de *sisa simple*. Cuando el ápice es 0° no habrá diferencia entre las áreas de las figuras 2.28 a y b, por lo que se puede considerar a la *sisa simple* como un caso particular de *trishear*.

Si se rotan 90° antihorariamente las figuras 2.28 a y c, y se supone un ejemplo geológico con un material estratificado horizontalmente cortado por una falla en propagación vertical, se verá que en la zona de cizalla los bancos no mantienen su

espesor constante ya que se produce un afinamiento en la charnela anticlinal y un engrosamiento en el sinclinal (figura 2.29). Las líneas estratales de la figura 2.29 se plegaron en forma angular sólo porque se encontraban inicialmente perpendiculares a la falla. Es decir que si consideráramos un pulso más de deformación sobre los mismos bancos ahora inclinados, estos se plegarían en forma curva si lo hacen siguiendo el modelo de cizalla triangular.

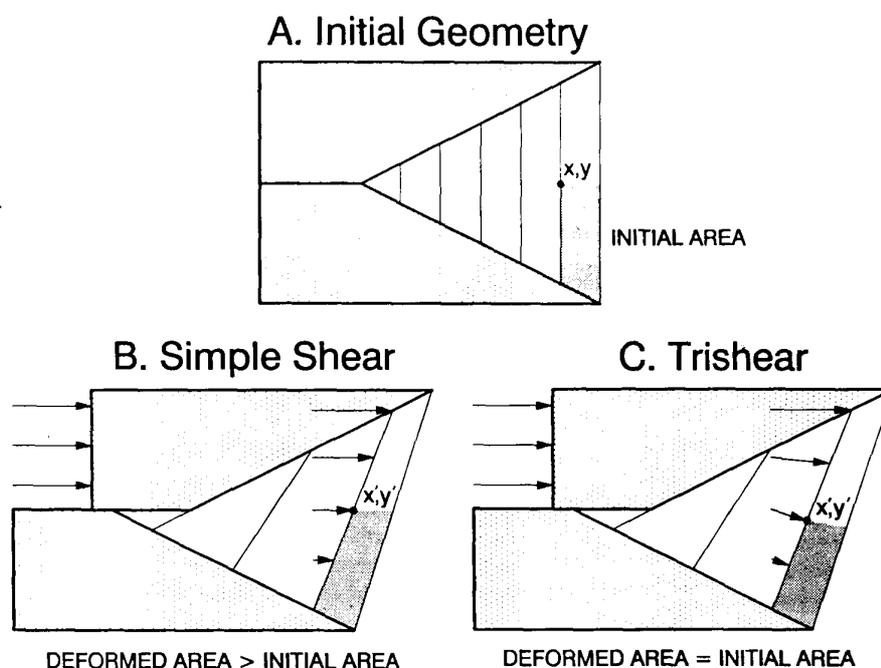


Figura 2.28: Comparación entre cizalla simple y cizalla triangular (Erslev, 1991). Véase discusión en el texto.

El predecir y reconstruir estructuras utilizando cizalla triangular, no es tan simple como en los modelos geométricos de Suppe (1985) y no se puede hacer sin el uso de la computadora. Posteriormente al trabajo de Erslev (1991), Hardy y Ford (1997) desarrollaron un algoritmo matemático para trabajar con este tipo de estructuras. En él propusieron un campo lineal de velocidades dentro de la zona de *trishear* (figura 2.30) en el que la velocidad disminuye en forma lineal desde el límite de la zona triangular con el bloque colgante hasta hacerse cero en el límite con el bloque basal. Igualmente la dirección de movimiento varía de paralela al plano de falla a paralela al borde inferior con el bloque basal.

Zehnder y Allmendinger (2000) generalizaron el modelo, y desarrollaron un algoritmo muy útil y fácilmente aplicable en un programa de computación. Estos autores definen un sistema de coordenadas donde el eje x es paralelo a la falla, el eje y es perpendicular a la misma y el origen de coordenadas se encuentra en el *tip-line* (figura 2.30). Ellos basan su desarrollo en que la condición para que un modelo de deformación sea balanceable por área (se conserve el área antes y después de la deformación) es que la divergencia del campo de velocidad sea cero:

$$\text{div } \underline{v} \equiv \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0$$

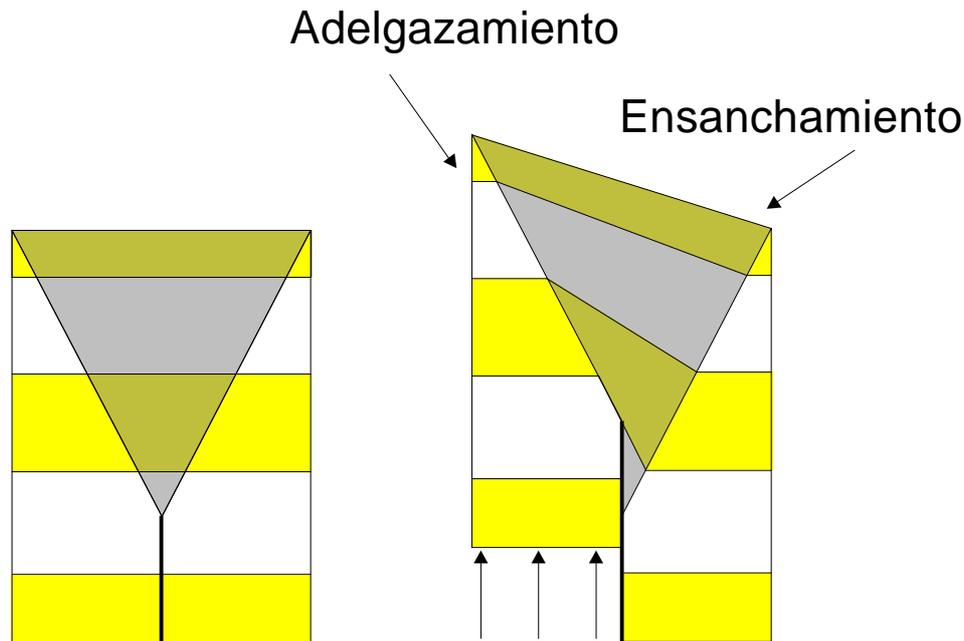


Figura 2.29: Modelo simplificado de falla de propagación vertical de cizalla triangular homogénea. Véase discusión en el texto.

Las condiciones de borde para la zona de *trishear* en el sistema de coordenadas descrito son:

$$\begin{aligned} V_x = V_0, \quad V_y = 0, \quad \text{en } y = x \tan \mathbf{j}_1 \\ V_x = 0, \quad V_y = 0, \quad \text{en } y = -x \tan \mathbf{j}_2 \end{aligned}$$

y definiendo ahora un campo de velocidad en el eje x y utilizando la ecuación de divergencia se puede obtener el campo de velocidad en el eje y para que el modelo balancee. Zehner y Allmendinger (2000) proponen la siguiente ecuación para generalizar el campo de velocidad en el eje x en una zona de *trishear* simétrica (donde $\mathbf{j}_1 = \mathbf{j}_2 = \mathbf{j}$):

$$V_x = \frac{V_0}{2} \left[\operatorname{sgn} y \left(\frac{|y|}{x \tan \mathbf{j}} \right)^{\frac{1}{s}} + 1 \right], \quad x > 0, \quad -x \tan \mathbf{j} \leq y \leq x \tan \mathbf{j}$$

donde $\operatorname{sgn} y$ representa el signo de y , y s es un parámetro para cambiar la forma de campo. Es decir, cuando $s = 1$ el campo es lineal como el propuesto por Hardy y Ford (1997), cuando $s > 1$ el cambio de velocidad de V_x en la zona de *trishear* no es lineal.

Utilizando las ecuaciones anteriores se puede despejar la velocidad en el eje y (V_y) para que el modelo balancee:

$$V_y = \frac{V_0 \tan j}{2(1+s)} \left(\frac{|y|}{x \tan j} \right)^{\frac{1+s}{s}} - \frac{V_0 \tan j}{2(1+s)}$$

Si bien no se expondrán aquí, en el trabajo de Zehner y Allmendinger (2000) se deducen las ecuaciones para zonas de cizalla triangular no simétricas y para distintos campos de velocidad V_x (variaciones de s).

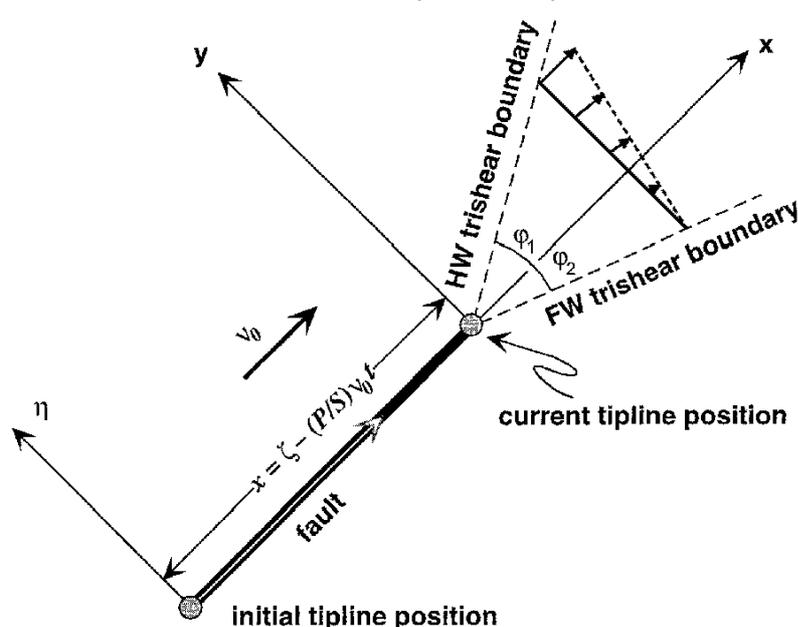


Figura 2.30: Campo lineal de velocidades dentro de la zona de trishear propuesto por Hardy y Ford (1997), y sistemas de coordenadas utilizado por Zhender y Allmendinger (2000). Véase discusión en el texto.

El modelo de *trishear* fue propuesto por Erslev (1991) para pliegues que involucran al basamento y se adapta bien a pliegues en rocas dúctiles, sin embargo también se puede aplicar a rocas sedimentarias en que los engrosamientos o adelgazamientos se resuelven con microfracturas o con el acomodamiento de algunos bancos más dúctiles. Es importante remarcar que la deformación dentro de la zona de cizalla triangular no es homogénea, por lo cual no se conserva el paralelismo de las líneas. Si bien el modelo está balanceado por áreas, no lo está por longitud de líneas (es decir que no se conserva la longitud de los bancos antes y después de la deformación).

Allmendinger (1998) trazó la deformación dentro de la zona triangular (figura 2.30) definiendo círculos mediante puntos discretos que al moverse siguiendo los algoritmos de *trishear* se deforman en pseudo-elipses (al no ser homogénea la deformación, no se forman elipses verdaderas). Ajustando elipses verdaderas a dichos puntos, se pueden obtener los ejes principales y las líneas de no deformación finita de dichas elipses. Este método es sumamente potente para predecir patrones de fracturamiento en pliegues que se puedan explicar por *trishear*.

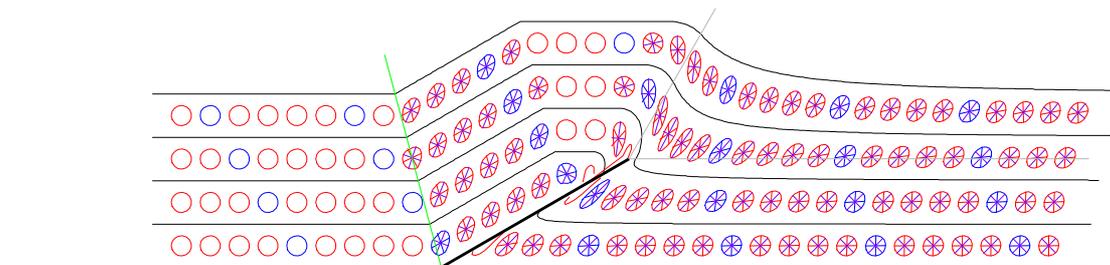


Figura 2.31: Allmendinger (1998) trazó la deformación dentro de la zona triangular definiendo círculos en el modelo original que se deforman a pseudo-elipses. Se pueden obtener los ejes principales y la líneas de no deformación finita de dichas pseudo-elipses. Este método es sumamente potente para predecir patrones de fracturamiento en pliegues que se puedan explicar por trishearndo

Los principales parámetros del modelo de trishear

Erslev (1991) observó que las zonas de cizalla triangulares pueden estar fijas al bloque basal o moverse junto con el bloque colgante (figura 2.31). Si el ápice del triángulo de cizalla está fijo a la pared basal, el basamento (en negro) entra en la deformación, pero si el ápice se fija a la pared colgante esto no ocurre. Hardy y Ford (1997) cuantifican la velocidad relativa de la zona de *trishear* respecto de los bloques colgante y basal mediante la relación propagación/desplazamiento (P/S). La propagación (P) representa la velocidad de avance del *tip-line* respecto al bloque basal y el desplazamiento (S de slip) la velocidad de avance del bloque colgante respecto al bloque basal. Esta relación (P/S) se convirtió en una de las variables más importantes del modelo y según lo investigado por Allmendinger (1999) controla más la geometría resultante que el propio ángulo ápice del *trishear*. Las otras variables que participan en el modelo, son el ángulo de falla, ángulo ápice de *trishear*, desplazamiento (S) y posición inicial del *tip-line*. La figura 2.32 muestra algunas de las geometrías posibles generadas por el modelo de trishear y la influencia que tiene el cambio de las diferentes variables.

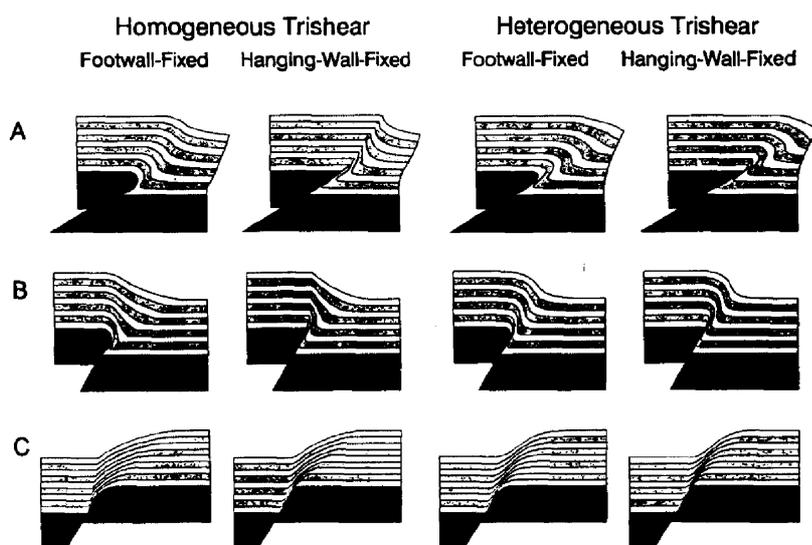


Figura 2.32: Ejemplos de pliegues de propagación de falla de cizalla triangular para fallas inversas de alto ángulo, corrimientos y fallas directas. Modelos generados para sisa homogénea y heterogénea por computadora (TRISHEAR; Erslev, 1991).

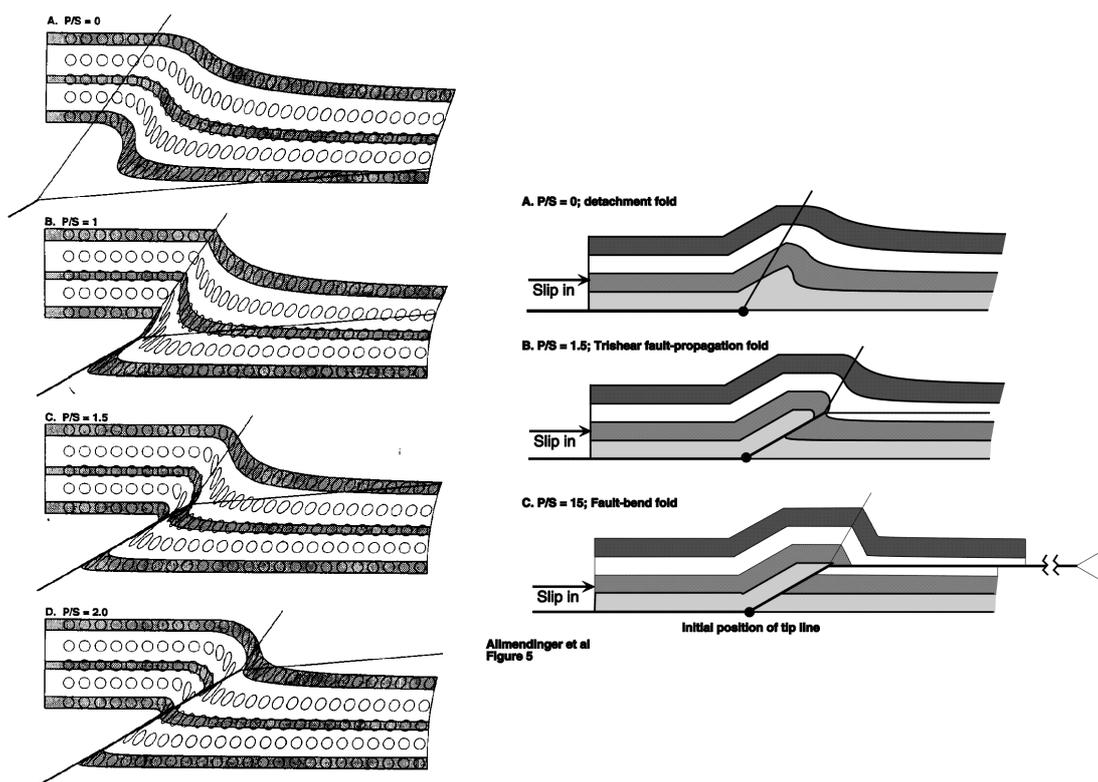


Figura 2.33: Ejemplos de pliegues de propagación de falla de cizalla triangular para fallas inversas. Tomado de Allmendinger (1998) y Allmendinger *et al.* (2000).

Cizalla triangular del limbo dorsal

Los modelos de pliegues por flexión y propagación de falla (Suppe, 1983; Suppe y Mendwedeff, 1990) revisados anteriormente fueron y siguen siendo muy exitosos ya que son sencillos, fácilmente aplicables y representan muy bien muchas estructuras encontradas en la naturaleza. Sin embargo, fallan en explicar pliegues curvos y cambios de espesores en los limbos como los encontrados en muchos ejemplos reales. El modelo de pliegues de propagación de falla de cizalla triangular (Erslev, 1991) resuelve este problema para los limbos frontales, y ha demostrado ser muy poderoso para modelarlos curvos a partir de fallas rectas o de fallas curvas. Pero que pasa con los limbos dorsales de los pliegues? Cuales son los modelos que se utilizan para su construcción? El más común es el usado en los pliegues de flexión y propagación de falla que implica cizalla paralela a la estratificación (Suppe, 1983) y que se construye utilizando superficies axiales que bisectan las flexiones de la falla (véanse figuras 2.1 y 2.2). Este método genera limbos dorsales rectos y charnelas angulares. El modelo de cizalla inclinada (*incline shear*, White et al., 1986), que será analizado más adelante, puede explicar limbos dorsales curvos con cambios de espesores pero sólo a partir de una falla lítrica o curva.

Recientemente Cristallini y Allmendinger (2000) propusieron el modelo de cizalla triangular del limbo dorsal (*back-limb trishear*) que puede explicar limbos dorsales curvos con cambios de espesores a partir de fallas rectas con charnelas angulares. La idea del *back-limb trishear* simplemente se basa en que los bancos rotan de manera progresiva sobre una flexión angular del plano de falla. El área dentro de la

cual rotan tiene forma triangular y ápice en el punto de inflexión de la falla (figura 2.34). Es así que los bancos cercanos a la falla van a formar una curva aguda y los más alejados van a tener una curvatura suave. La zona triangular puede ser simétrica o asimétrica respecto de la bisectriz de la inflexión del plano de falla. Las ecuaciones que definen el movimiento dentro de la zona de cizalla pueden verse en el trabajo de Cristallini y Allmendinger (2000).

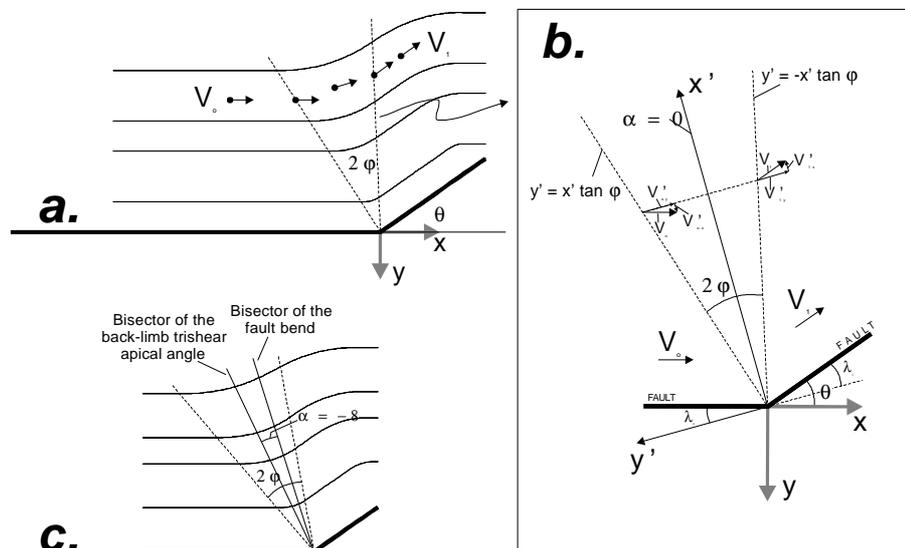


Figura 2.34: En el modelo de *back-limb trishear* (Cristallini y Allmendinger, 2000) los bancos rotan de manera progresiva sobre una flexión angular del plano de falla. Los algoritmos son análogos a los de *trishear* del limbo frontal.

Es interesante remarcar que si se utiliza una zona triangular de ángulo ápice igual a cero y simétrica respecto a la bisectriz de la inflexión del plano de falla, se obtienen limbos dorsales angulares exactamente iguales a los tradicionales de Suppe (1983) (figura 2.35a). Si la zona es asimétrica y con ápice igual a cero el método reproduce al modelo de cizalla inclinada (figura 2.35b). En otras palabras, se pueden considerar a los modelos de cizalla paralela (*parallel shear*) y de cizalla inclinada (*incline shear*) como casos especiales del *back-limb trishear*.

En la figura 2.35 c, d, e y f pueden compararse las diferencias entre modelos de *back-limb trishear* simétricos y asimétricos. En el primero de los casos (figura 2.35 c y d), existe un espesamiento de los bancos en la charnela sinclinal y una adelgazamiento en el limbo dorsal. Ambos se compensan y el modelo se balancea por áreas manteniendo el desplazamiento paralelo a la falla constante a uno y otro lado de la zona triangular. En el caso de la figura 2.35e donde la asimetría es negativa (hacia atrás), los bancos se espesan tanto en la charnela sinclinal como en el limbo dorsal. Esto hace que parte del acortamiento sea consumido en el engrosamiento de los bancos y por ende el desplazamiento paralelo a la falla sea menor hacia adelante de la zona triangular. Si bien todas las demás variables son iguales que las de la figura 2.35 c y d, la altura del pliegue es menor. Por último, en el caso de la figura 2.35f donde la asimetría es positiva (hacia adelante), los bancos se adelgazan tanto en la charnela sinclinal como en el limbo dorsal y para mantener balanceado al modelo, el desplazamiento paralelo a la falla tiene que ser mayor hacia adelante de la zona triangular. Esto significa que la altura del pliegue va a ser mayor que el de la figura 2.35 c y d. Las variaciones en el ángulo ápice de la zona triangular resultan en distinta

curvatura de los bancos en la charnela sinclinal: a mayores ángulos la curvatura es más suave.

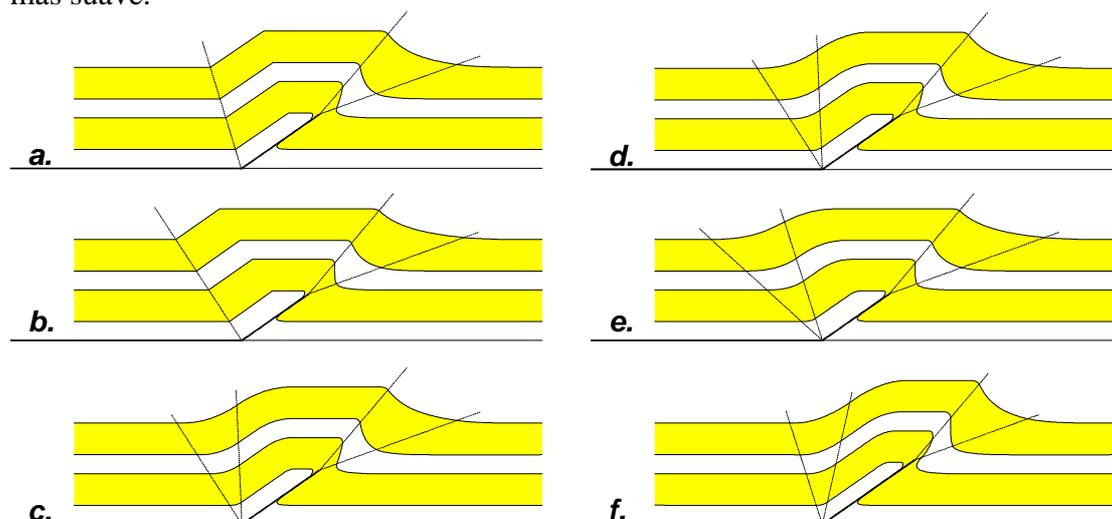


Figura 2.35: Ejemplos de *back-limb trishear*. *a.* zona triangular de ángulo ápice igual a cero y simétrica respecto a la bisectriz de la inflexión del plano de falla. *b.* zona triangular asimétrica y con ápice igual a cero. *c.* y *d.* zona triangular de ángulo ápice igual a 30° y simétrica respecto a la bisectriz de la inflexión del plano de falla. *e.* y *f.* zonas triangulares con ápice igual 30° y asimetrías de 30° negativa y positiva respectivamente.

Cizalla inclinada

El método de cizalla inclinada (*incline shear*) fue propuesto por White et al. (1986) para determinar la geometría de fallas directas en base a la forma de las sedimentitas del bloque colgante de la falla. Sin embargo, su uso se puede hacer extensivo a fallas inversas (Brooks et al. 2000) y es especialmente útil para modelar pliegues desarrollados a partir de fallas curvas y estructuras de inversión tectónica. La figura 2.36 muestra la idea fundamental del método que implica cizalla simple no paralela a la estratificación. Se la puede visualizar como una serie de lápices que forman el bloque colgante y que se van a mover adaptándose a la geometría de la falla. La inclinación de los planos de cizalla (lápices de la figura 2.36) es arbitraria, y de ella va a depender la geometría final del pliegue. En el modelo de cizalla inclinada básicamente se conserva el desplazamiento horizontal mientras que el vertical está es función del primero y del ángulo de cizalla. Las ecuaciones para aplicar el método se pueden obtener de White et al. (1986); también puede ser aplicado gráficamente siguiendo la idea de la figura 2.36.

Pliegues por despegue

Los *pliegues por despegue* (*detachment folds*) son los más sencillos de entender y su desarrollo se basa en la compresión de uno o más bancos de material de alta ductilidad (evaporitas, arcillitas, lutitas, etc.) a los que sobreyacen bancos más consistentes. El espacio generado por debajo de la cúpula del pliegue puede ser rellenado por el material dúctil sin la necesidad de que existan rampas de falla en el sistema (figuras 2.37 y 2.38).

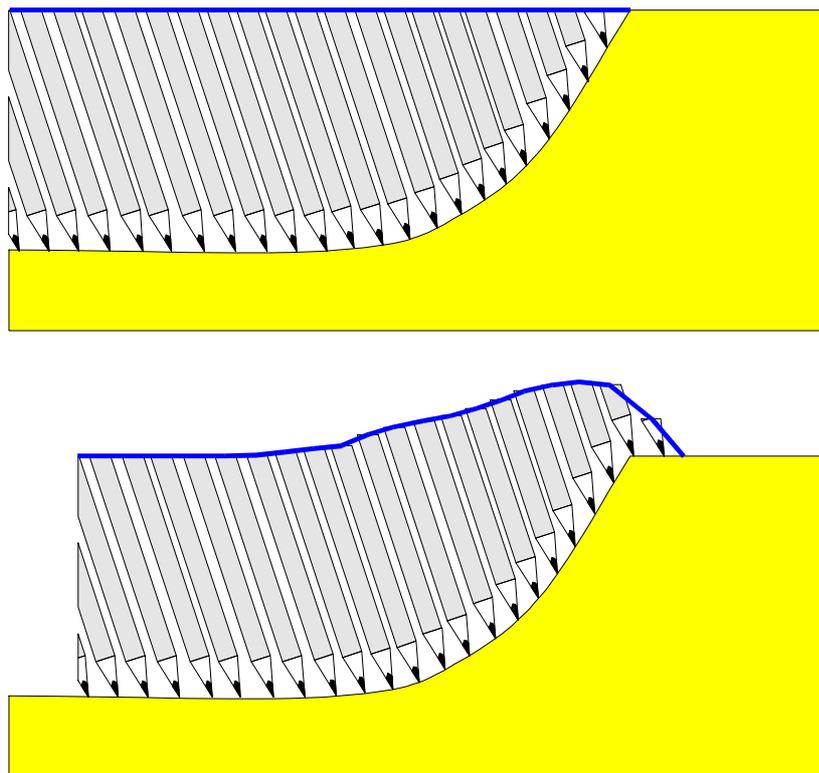


Figura 2.36: Diagrama esquemático que ilustra la idea del modelo de *incline shear* con lápices. La inclinación de los lápices representa el ángulo de *incline shear* de el depende la geometría del bloque colgante.

Es importante entender la diferencia entre un pliegue por despegue y un diapiro. El primero se genera por esfuerzos compresivos horizontales que pliegan la secuencia, y el material dúctil migra hacia el núcleo de la estructura. Este tipo de mecanismo se denomina *tectoquinesis*. En el caso de los diapiros, no es necesario ningún esfuerzo horizontal, ya que por el propio peso de la secuencia que sobreyace al material dúctil se produce la extrusión de éste hacia arriba. Este mecanismo se denomina *haloquinesis* (figura 2.39). Por supuesto en los pliegues por despegue reales suele estar sobrepuesta la haloquinesis dando estructuras complejas mixtas.

En términos generales, en todos los modelos de pliegues que se analizaron hasta el momento se puede asumir que el movimiento del material solo se da en el sentido de transporte de la estructura (en el plano de la sección). En los pliegues por despegue esta situación suele no cumplirse ya que el material dúctil puede moverse también oblicua o perpendicularmente a la dirección de transporte tectónico. Sin embargo, para simplificar su estudio, primero se debe entender el problema en dos dimensiones.

Básicamente existen dos modelos bidimensionales para explicar la formación de pliegues por despegue (figura 2.40). El primero de ellos (modo 1) se produce como consecuencia de una deformación instantánea en los bancos competentes que sobreyacen a las evaporitas y la migración posterior de este material hacia el núcleo de la estructura. El acortamiento es absorbido por un aumento en la amplitud del pliegue, manteniendo la longitud de onda del mismo constante (figura 2.41). Este mecanismo fue denominado por Poblet y McClay (1996) como modo 1: inclinación

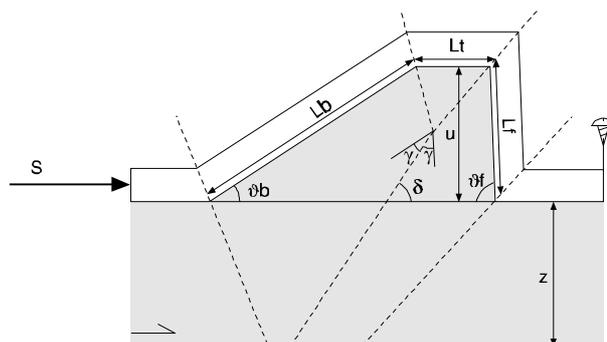


Figura 2.37: Modelo de plegamiento por despegue de una sola capa (Poblet y McClay, 1996).

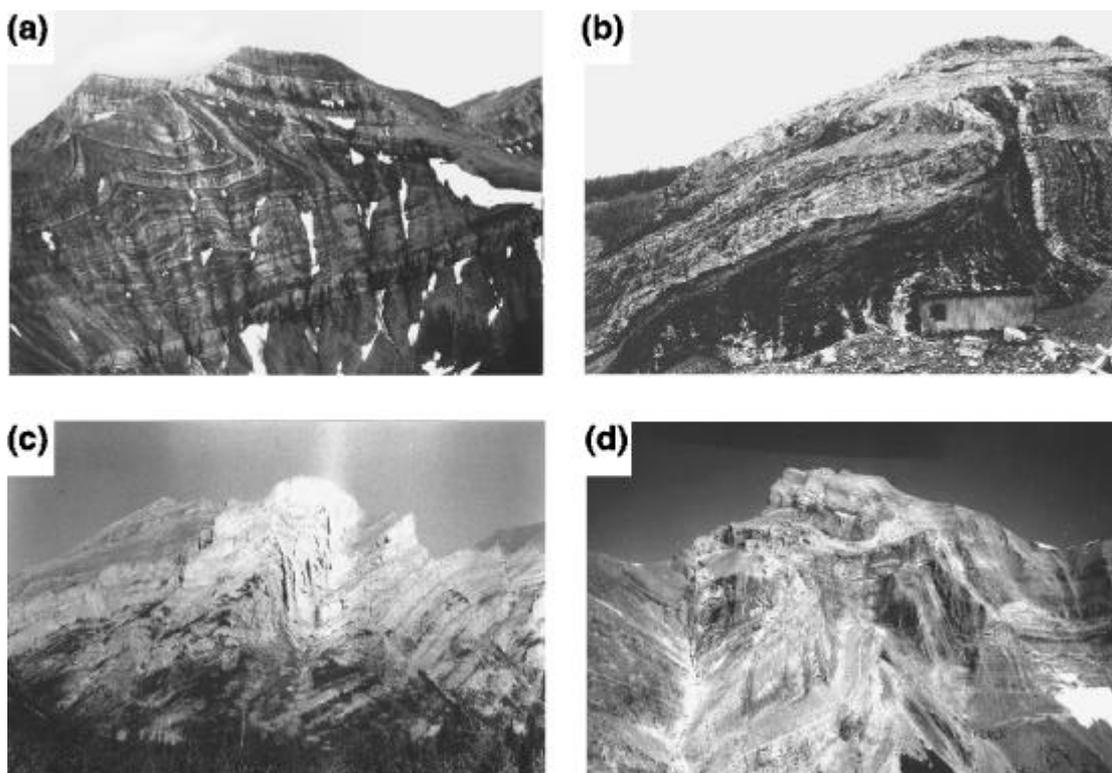
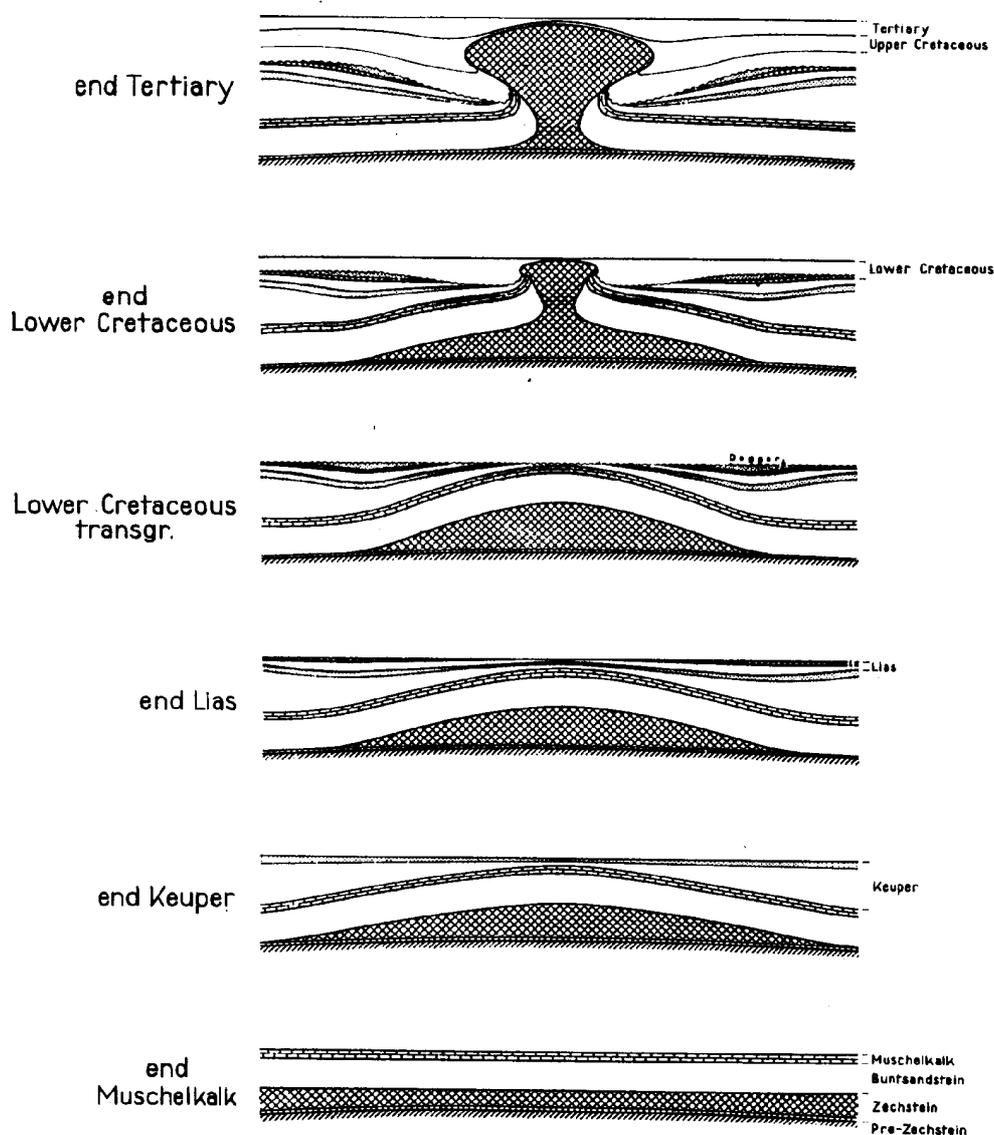


Figura 2.38: Ejemplo de pliegues por despegue. (a) Mt. Burden, Rocayosas Canadienses del Norte. (b) Grassy Mountain, Rocayosas Canadienses del Sur. (c) Pliegues chevron en las Rocayosas Canadienses del Sur. (d) Área de Haltway River, Rocayosas Canadienses del Norte. (tomado de Poblet y McClay, 1996).

constante de limbos y variación de la longitud de los mismos (*constant limb dip and variable limb length*). En la figura 2.41 puede verse para un modelo simplificado de este mecanismo, como varían algunos parámetros. Mientras la longitud de onda del pliegue se mantiene constante, la amplitud aumenta con el acortamiento. La evolución areal del pliegue muestra que si bien el área total de material dúctil involucrada en la estructura se mantiene constante y es igual a la inicial, el área que sobresale al nivel regional (es decir el área que representa al acortamiento) aumenta linealmente con el acortamiento.

La figura 2.40b, muestra un mecanismo de formación diferente (modo 2), en el que se produce el arqueamiento progresivo de los bancos competentes y la

migración del material dúctil hacia el centro de la estructura. En este caso, el acortamiento es absorbido por un leve aumento en la amplitud y una fuerte disminución de la longitud de onda (figura 2.41). Este mecanismo fue denominado por Poblet y McClay (1996) como modo 2: longitud constante de limbos y rotación



progresiva de los mismos (*variable limb dip and constant limb length*). En la figura

Figura 2.39: Diagrama mostrando la formación de un diapiro salino sin intervención de esfuerzos horizontales (haloquinesis). Ejemplo del stock Zechstein (Trusheim, 1960).

2.41 se muestra para un caso simple que mientras la amplitud del pliegue aumenta suavemente, la longitud de onda disminuye fuertemente con el acortamiento. El área por encima del nivel regional aumenta hasta un máximo y luego disminuye con el acortamiento. La evolución del área total (figura 2.41) muestra algo semejante, cuando comienza el plegamiento, se requiere un exceso de material dúctil que tiene que ingresar de afuera del sistema, este exceso llega a un máximo a partir del cual el pliegue comienza a expulsarlo hasta volver al área inicial. Si la compresión continúa, el pliegue comienza a expulsar también parte del material dúctil que inicialmente existía. Este hecho es muy importante, ya que implica movilidad desde y hacia el

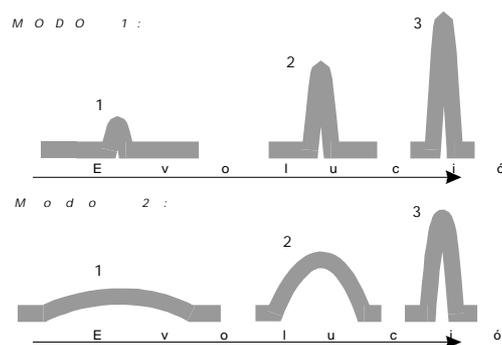


Figura 2.40: Diferentes modos de pliegues por despegue. Modo 1: inclinación de limbos constante. Modo 2: longitud de limbos constante.

núcleo del pliegue de mucho material, que en casos reales puede producirse desde cualquier sector aledaño a la estructura. La diferencia entre los modelos *modo 1* y *modo 2* es fundamental para entender la cinemática de los movimientos del material incompetente en forma perpendicular u oblicua a la dirección de transporte tectónico.

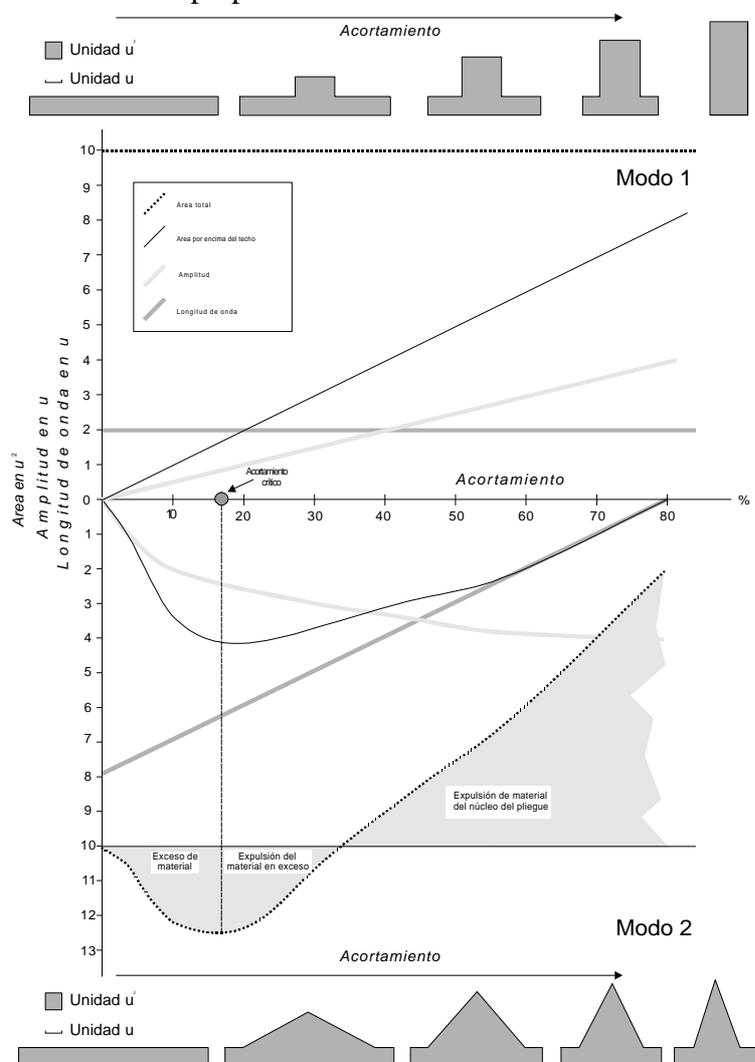


Figura 2.41: Variación simplificada de algunos parámetros con el acortamiento. El modo 1 necesita poco material dúctil para su desarrollo y la cantidad va aumentando linealmente con el acortamiento. En contraposición el modo 2 requiere exceso de material incompetente hasta alcanzar un acortamiento crítico, pasado el cual, necesita expulsarlo del núcleo de la estructura.

Como es común en la naturaleza, ninguno de estos mecanismos actúa en forma pura y en general el proceso es la resultante de ambos (figura 2.42). Es así que Poblet y McClay (1996) definen los modos 3 y 4 como modos mixtos entre el 1 y el 2. Ambos modelos, modo 3 y 4 (figura 2.43), implican longitud e inclinación de limbos variable, y la diferencia radica en que el modo 4 asume que la superficie de despegue basal se encuentra exactamente a la profundidad en que se intersectan las superficies axiales sinclinales del pliegue (figura 2.43).

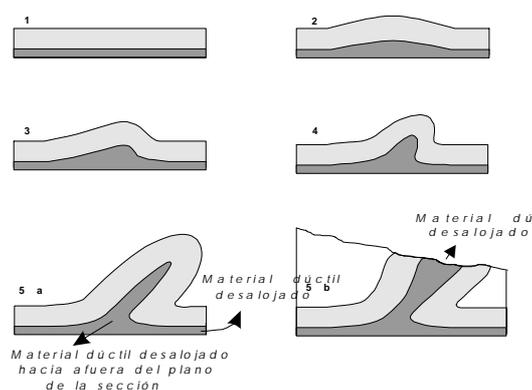


Figura 2.42: Modelo de pliegue por despegue combinado entre el *modo 1* y el *modo 2*. Nótese el cambio de longitud de los limbos y la rotación de los mismos a medida que evoluciona el pliegue.

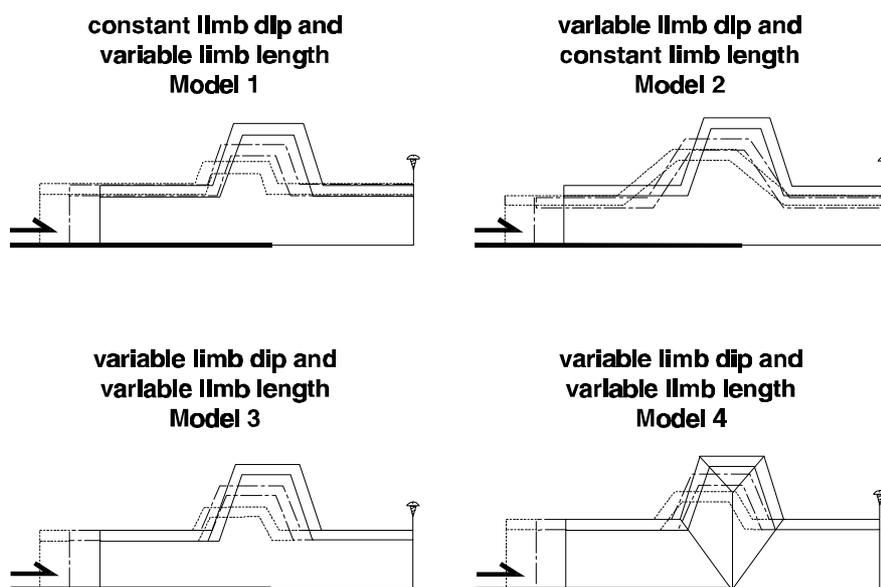


Figura 2.43: Pliegues por despegue. Arriba: modos 1 y 2. Abajo: modos combinados 3 y 4 (Poblet y McClay, 1996).

Pliegues de propagación/despegue (Chester y Chester, 1990)

Como se analizó anteriormente los pliegues rara vez son generados por un solo mecanismo, sino que son producto de la combinación de dos o más de ellos. Se han estudiado geometrías combinadas de pliegues de propagación y flexión de falla (como por ejemplo los pliegues de propagación de falla transportados o *breakthrough fault*

propagation folds) y en este punto se analizará una geometría combinada entre pliegues de propagación de falla y pliegues por despegue (*fault-propagation/detachment folds*; Chester y Chester, 1990; Marret y Bentham, 1997).

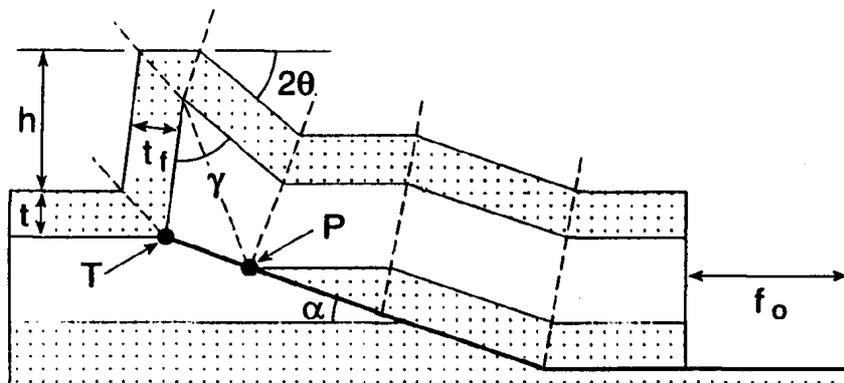


Figura 2.44: Geometría de un pliegue de propagación/despegue (Chester y Chester, 1990; Marrett y Bentham, 1997).

El modelo más simple de este tipo de pliegues puede verse en la figura 2.44. Una de las diferencias principales con los modelos anteriores es que la inclinación del limbo dorsal ($2q$, **nótese** que se cambió la nomenclatura respecto a los modelos anteriores) de la estructura no depende directamente del ángulo de rampa (a). Por otro lado en un pliegue por propagación de falla común, el rechazo en el plano de falla no es constante en la totalidad de la rampa colgante, sino que varía desde un máximo en la parte inferior de la misma hasta un mínimo (desplazamiento nulo) en el punto de terminación o *tip*. Sin embargo, en los pliegues de propagación/despegue puede existir parte de la rampa colgante con desplazamiento constante (por debajo del punto P en la figura 2.44). Es decir, y como se observa en la figura 2.44, el rechazo es constante en la porción de rampa colgante ubicada por debajo del punto de iniciación del pliegue P y comienza a perderse linealmente a partir de ese punto hasta hacerse nulo en el de terminación o *tip* (punto T).

Los parámetros que se utilizan para calcular el ángulo de corte de la falla que da origen a esta estructura son: el ángulo de inclinación del limbo dorsal respecto de la inclinación regional del basamento del pliegue ($2q$) el ángulo interlimbo (g) y la relación de espesores entre el limbo frontal y el espesor original (t_f/t). Estos parámetros se relacionan trigonométricamente con el ángulo de corte de la falla (a) mediante la siguiente ecuación (Marrett y Bentham, 1997):

$$a = \operatorname{arccotan} \left[-A - B + \sqrt{(A + B)^2 + 2A \cdot \cotan(2q + g) - \left(\frac{t_f}{t}\right)^2} \right]$$

donde

$$A \equiv \tan \mathbf{q} - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{t_f}{t} \right)^2 + 1 \right] \cotan \mathbf{g} - \frac{t_f}{t} \operatorname{cosec} \mathbf{g}$$

$$B \equiv \frac{1}{2} \left[\left(\frac{t_f}{t} \right)^2 - 1 \right] \cotan (2\mathbf{q} + \mathbf{g})$$

En la figura 2.45 se resuelve la relación anterior para $t_f = t$, es decir sin que ocurran cambios de espesor en el limbo frontal del pliegue.

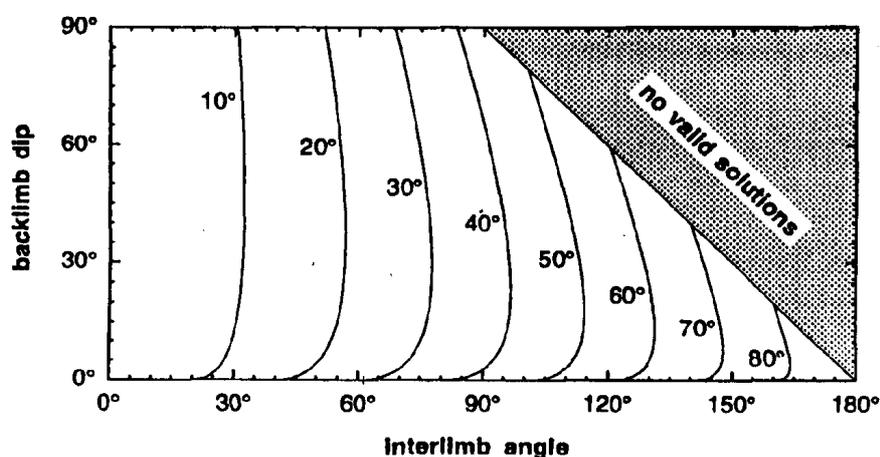


Figura 2.45: Gráfico mostrando la relación entre la inclinación del limbo dorsal (2θ) el ángulo de interlimbo (γ) y el ángulo de corte de la falla (α). Nótese que el ángulo de corte es más sensible al ángulo de interlimbo que a la inclinación del flanco dorsal (Marrett y Bentham, 1997).

Es importante notar que el ángulo de corte (\mathbf{a}) es más sensible al ángulo de interlimbo (\mathbf{g}) que a la inclinación del flanco dorsal ($2\mathbf{q}$). Es decir que si se deja fija la inclinación del limbo dorsal, una pequeña variación en el ángulo de interlimbo trae una importante variación en el ángulo de rampa, pero si en cambio se deja fijo el ángulo de interlimbo, una gran variación en la inclinación del limbo dorsal casi no produce variaciones en el ángulo de rampa. Nótese que si el ángulo de interlimbo es menor que 30° , el ángulo de rampa es inferior a 10° y la geometría del pliegue es prácticamente la de un pliegue por despegue. En el caso extremo en que el ángulo de rampa es 0° , la geometría del pliegue es aquella propuesta por Dahlstrom (1990) para pliegues por despegue.

La relación entre los parámetros dados, en especial el ángulo de rampa (\mathbf{a}) y el cociente (t_f/t) es algo más complicada (Marrett y Bentham, 1997). En términos generales un aumento en el espesor del limbo frontal trae aparejado un decrecimiento en el ángulo de rampa calculado, y viceversa.

Es interesante e importante entender que para este tipo de estructuras no solo se puede calcular el ángulo de corte de una falla ciega a partir de datos superficiales, sino también el desplazamiento ocurrido sobre el plano de falla para generar el pliegue observado (f_0). Para esto, además de los parámetros anteriores es necesario definir dos adicionales. Uno es denominado como relieve estructural (h) y el otro como distancia paralela a la falla entre el punto de terminación de la falla o *tip* (T) y el de comienzo del pliegue (P): distancia (TP) (véase figura 2.44). La ecuación que relaciona a (TP) y (f_0) con los parámetros anteriores es:

$$TP = hC \operatorname{cosec}(2q + g - a)$$

y

$$f_0 = hC \left[\frac{t}{t_f} \operatorname{cosec} a - \operatorname{cosec}(2q + g - a) \right]$$

donde

$$C \equiv \frac{\operatorname{cosec}(2q + g)}{\frac{t}{t_f} \operatorname{cosec} g + \cotan g - \cotan(2q + g - a)}$$

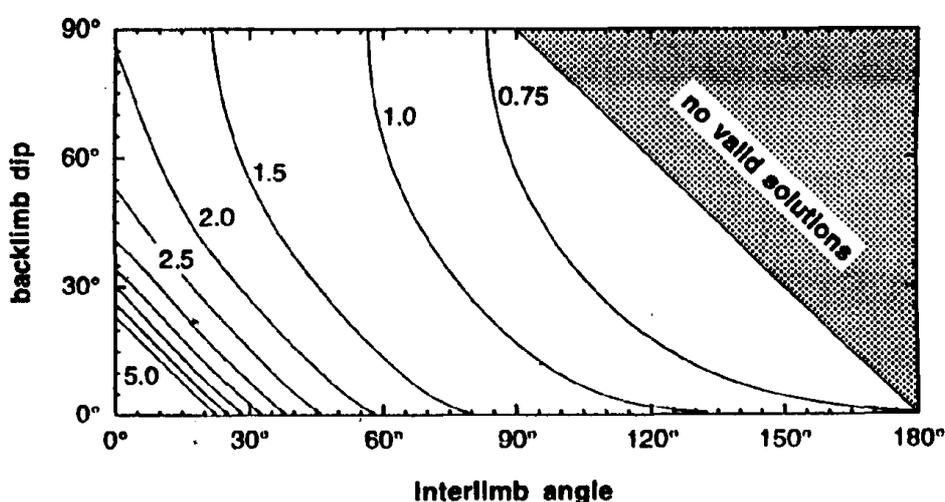


Figura 2.46: Gráfico mostrando el desplazamiento normalizado sobre el plano de falla (f_0/h) en función de los parámetros (2θ) y (γ) para el caso en que $t_f = t$ (Marrett y Bentham, 1997).

En las figuras 2.46 y 2.47 pueden verse los gráficos que relacionan mediante las ecuaciones anteriores al ángulo de interlimbo (g) y a la inclinación del flanco dorsal ($2q$) con TP y f_0 respectivamente. Los valores de TP y f_0 se normalizan al relieve estructural para eliminar la dependencia que estos cálculos tienen de la escala. Tanto

TP como f_0 son sensitivos a cambios en cualquiera de los dos ángulos ($2q$ y g). Para un determinado relieve estructural, el desplazamiento en el plano de falla (f_0) aumenta con una disminución en la inclinación del limbo dorsal y/o con un decrecimiento en el ángulo de interlimbo. La distancia TP aumenta sistemáticamente con el aumento del ángulo de interlimbo, pero guarda una relación más complicada con la inclinación del flanco dorsal del pliegue.

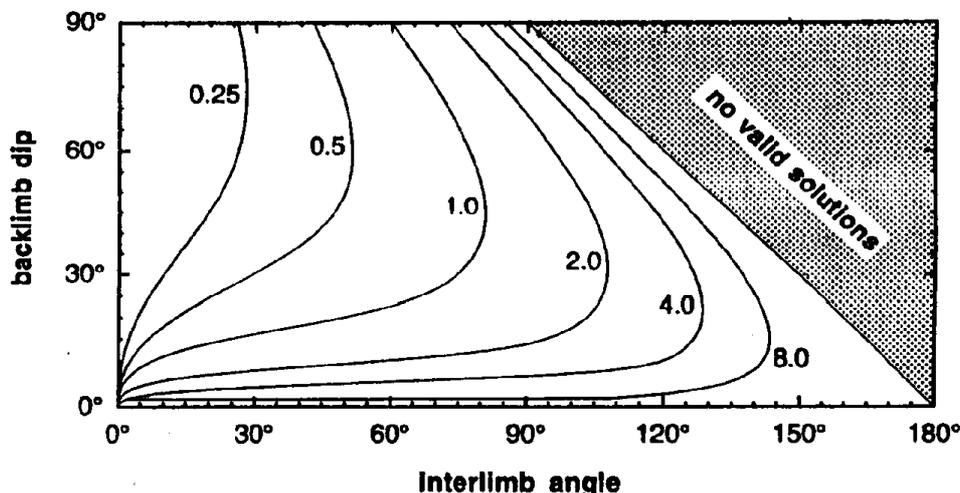


Figura 2.47: Gráfico mostrando la distancia normalizada entre el punto de terminación de la falla y el de comienzo del pliegue (TP/h) en función de los parámetros (2θ) y (γ) para el caso en que $t_f = t$ (Marrettt y Bentham, 1997).

Si bien la relación de estos parámetros con el cambio de espesor del limbo frontal es más complicada, en términos generales se puede decir que un aumento en el espesor produce un aumento en el desplazamiento calculado y en la distancia TP .

La última información que se requiere para construir un pliegue de este tipo es la posición del plano de falla. Pero si se analiza la figura 2.44 se verá que el punto T está ubicado sobre la bisectriz del sinclinal frontal y el punto P sobre la bisectriz del anticlinal, esto significa que al poder calcular TP y a , existe una sola posición que satisface dichos valores.

Análisis geométrico, cinemático y dinámico

El análisis geométrico de una estructura implica entender su forma, sus relaciones angulares y espaciales. En los desarrollos vistos anteriormente se hizo un análisis geométrico de los distintos tipos de pliegues, es decir se estudió la relación entre el ángulo de corte y los ángulos frontales y dorsales de los pliegues, y entre la posición de las superficies axiales, el plano de falla, y el acortamiento absorbido. Es como estudiar la configuración durante un instante en la evolución de una determinada estructura: algo así como una fotografía de ella. La importancia de este tipo de análisis es que permite reconstruir la estructura en profundidad a partir de datos superficiales y subsuperficiales, y calcular acortamientos orogénicos.

Un análisis cinemático en cambio, implica el estudio de la evolución de la estructura. Esto es, como se fue moviendo, como fueron variando los ángulos, que superficies axiales permanecieron inmóviles, y cuales se movilizaron, etc. Es como analizar una filmación o una animación de la estructura. Su importancia principal radica en que permite hacer una historia de la estructura y predecir la posición de zonas con fracturamiento secundario, importantes para el alojamiento de depósitos minerales o hidrocarburos.

Por último un análisis dinámico implica deducir el régimen de esfuerzos que actuó para dar origen a la estructura observada, y como los mismos se distribuyeron y/o modificaron localmente en el seno de la estructura.