

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.

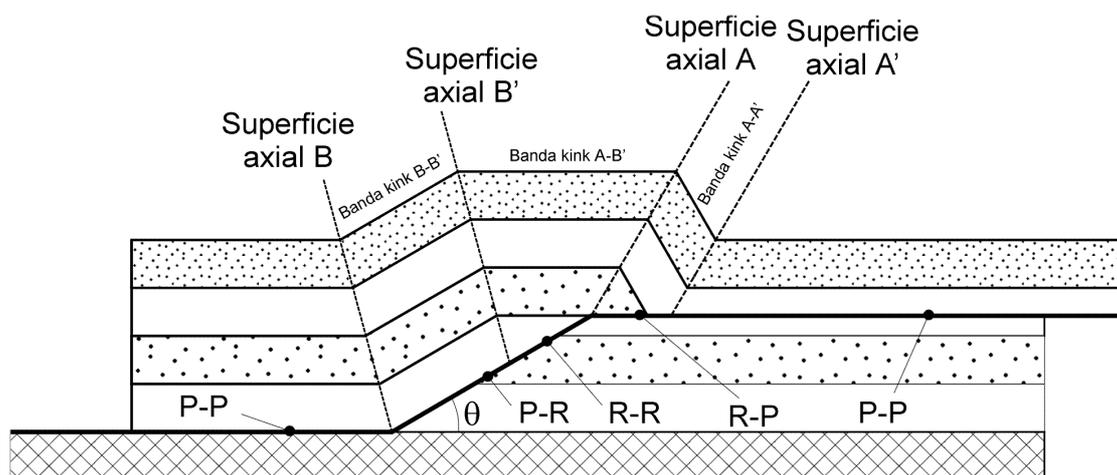


Figura 2.1: Modelo de pliegue de flexión de falla donde se indican las relaciones posibles entre planos y rampas colgantes y basales. Véase discusión en el texto.

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)

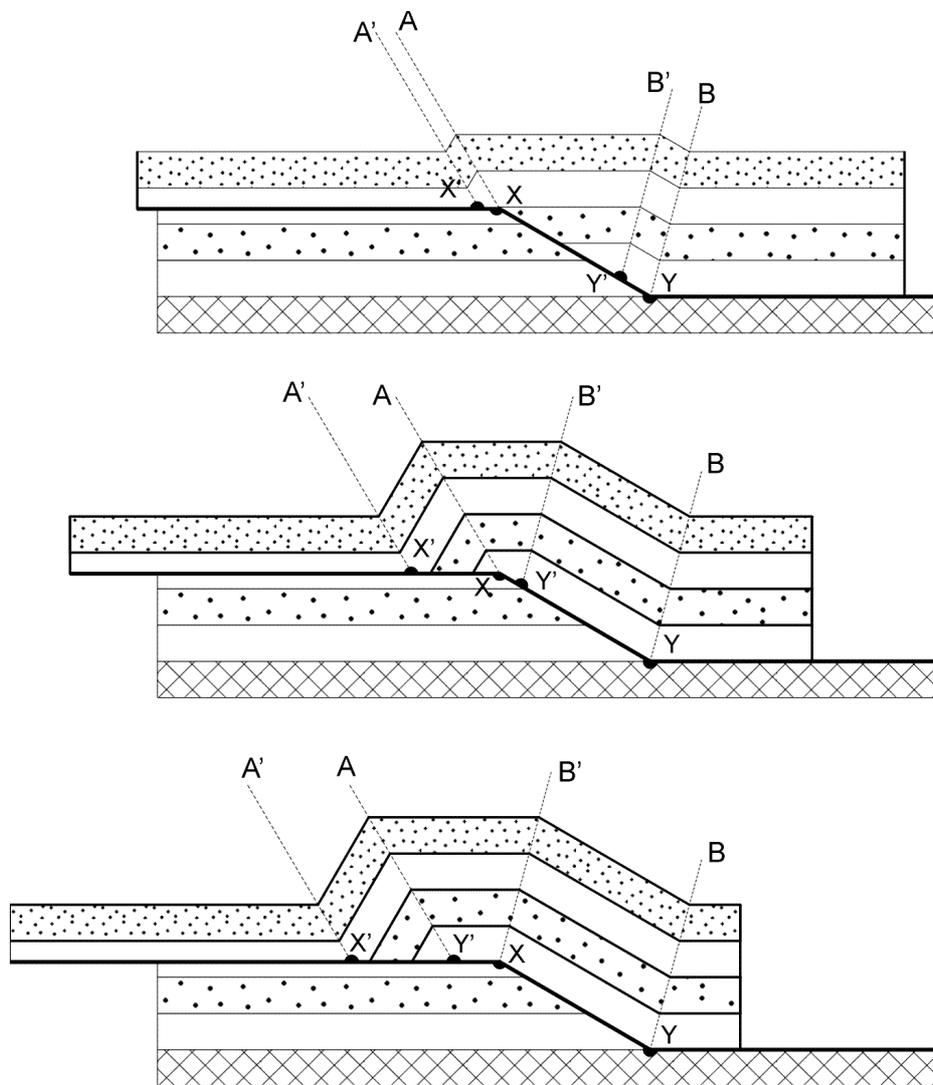


Figura 2.2: Se muestran tres estadios en la evolución de un pliegue de flexión de falla (Suppe, 1983).

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:

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.

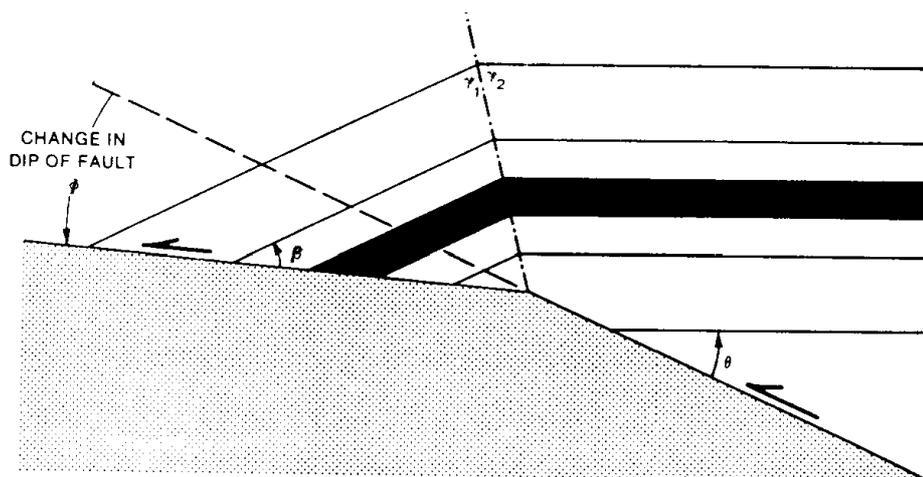


Figura 2.3: Geometría del sector frontal de un pliegue de flexión de falla (Suppe, 1983).

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.

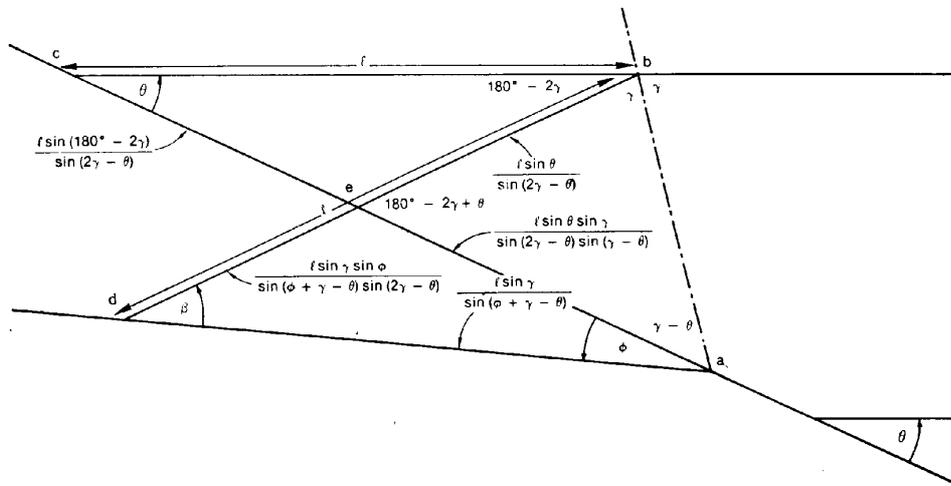


Figura 2.4: Relaciones trigonométricas en el sector frontal de un pliegue de flexión de falla (Suppe, 1983).

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:

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

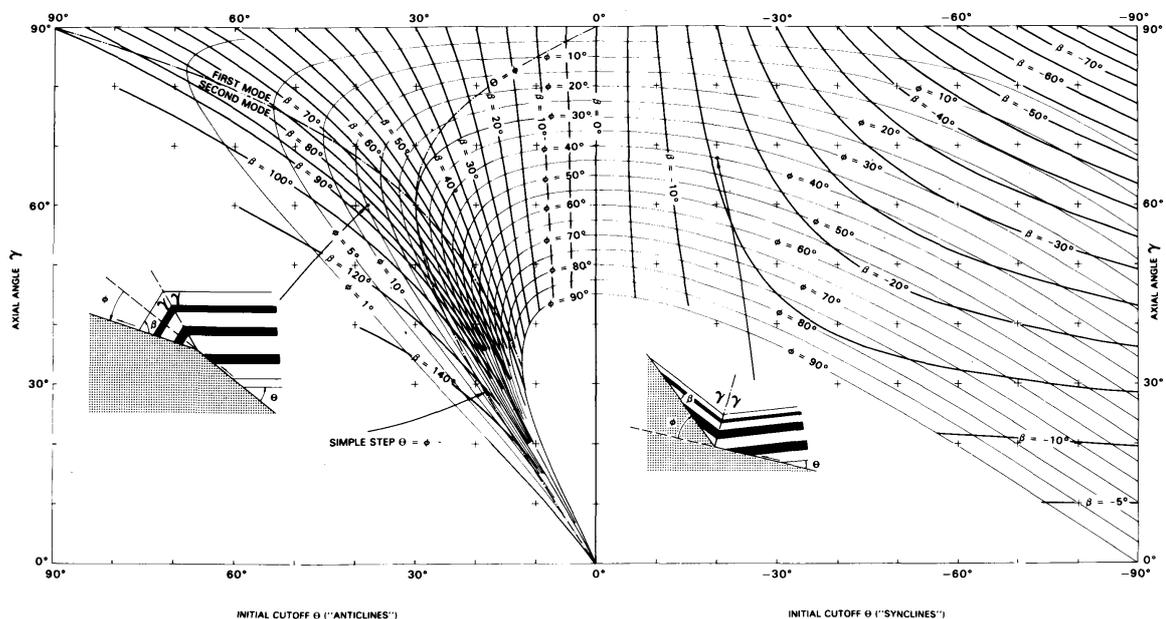


Figura 2.5: Gráfico en que en el eje de abscisas se representa el ángulo de corte q y en el de ordenadas el ángulo frontal g . Se graficaron curvas para distintos f y para $f = q$ para el caso de anticlinales y sinclinales frontales h (Suppe, 1983).

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).

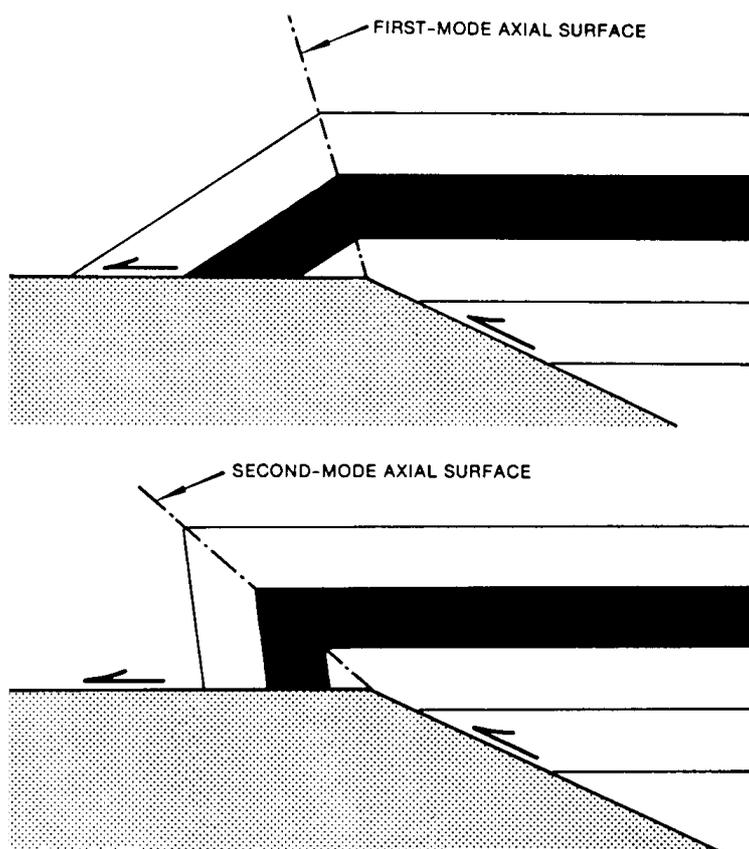


Figura 2.6: Se muestran los dos modelos posibles de pliegues de flexión de falla para $q = f = 25^\circ$ (Suppe, 1983).

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).

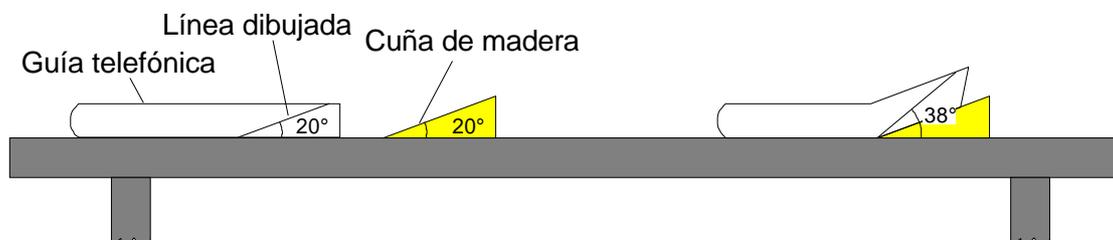


Figura 2.7: Guía telefónica en la que se dibuja una línea inclinando 20° y se le introduce una cuña de 20° por debajo. Véase discusión en el texto.

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.

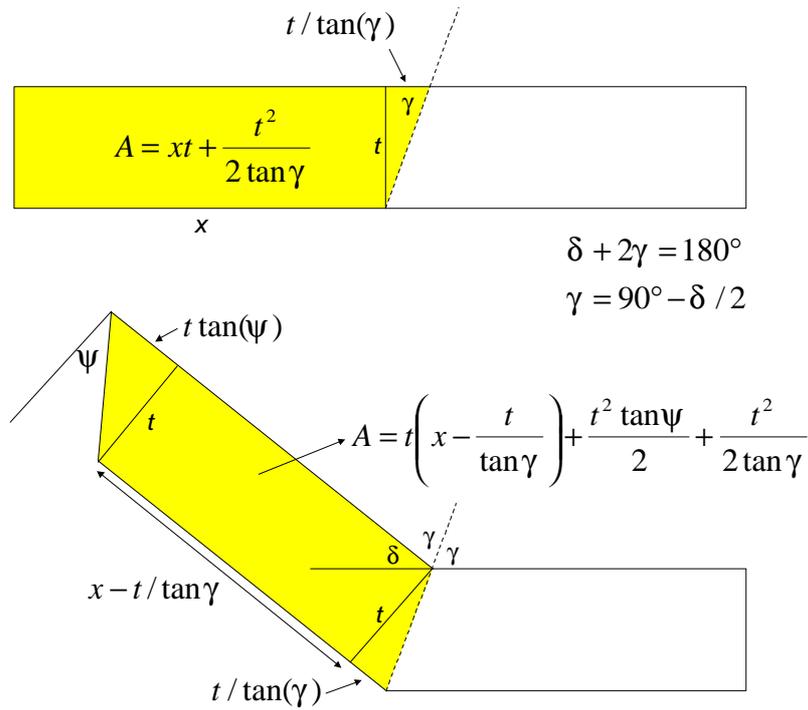


Figura 2.8: Relaciones trigonométricas para calcular la cizalla angular de un sinclinal. Nótese que el área sombreada antes y después de la flexión debe ser la misma.

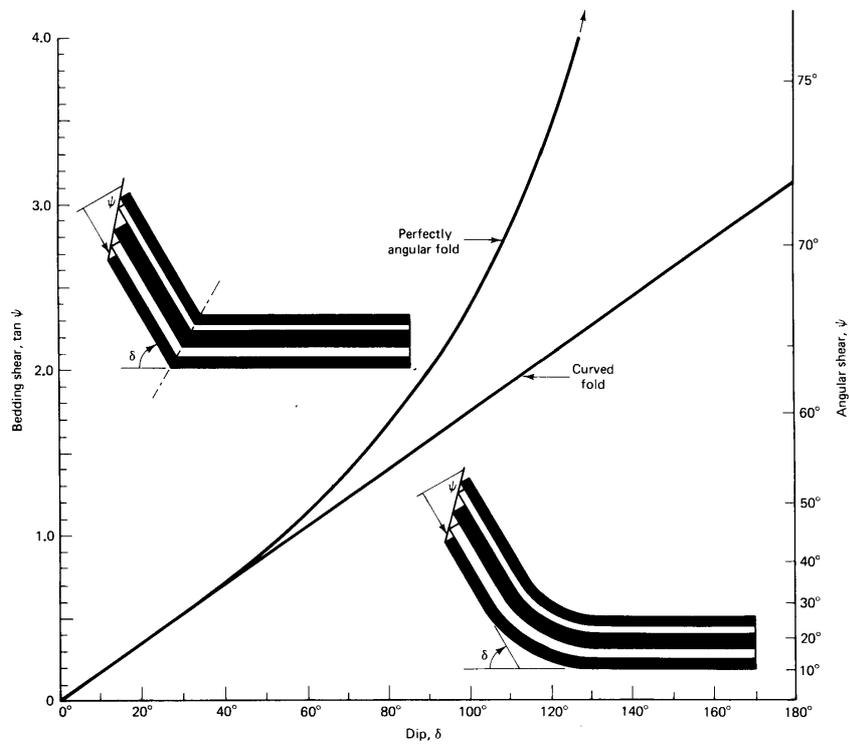


Figura 2.9: Relaciones entre la cizalla angular y el ángulo de inclinación de los bancos para pliegues angulares y curvos (Suppe, 1985).

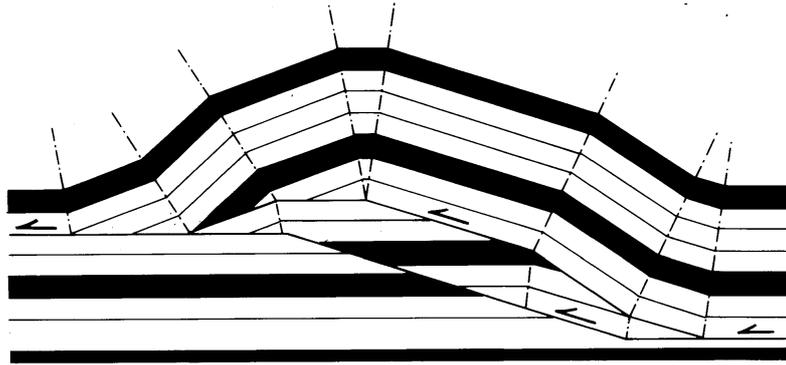


Figura 2.10: Pliegue de flexión de falla producido por el apilamiento de dos láminas sobrecorridas. En él se marcan los distintos dominios de inclinación que se encuentran en su superficie según el número de rampas apiladas que tengan por debajo (Suppe, 1983). Véase discusión en texto.

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.

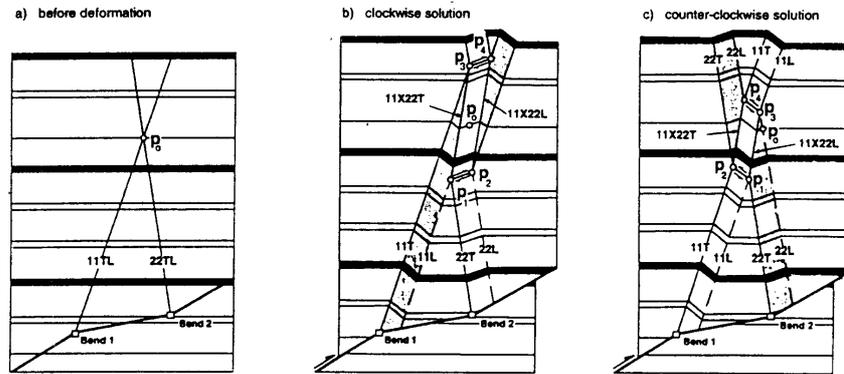


Figura 2.13: Inicio de la interferencia de bandas kink por encima de una falla con dos flexiones (Medwedeff y Suppe, 1997).

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.

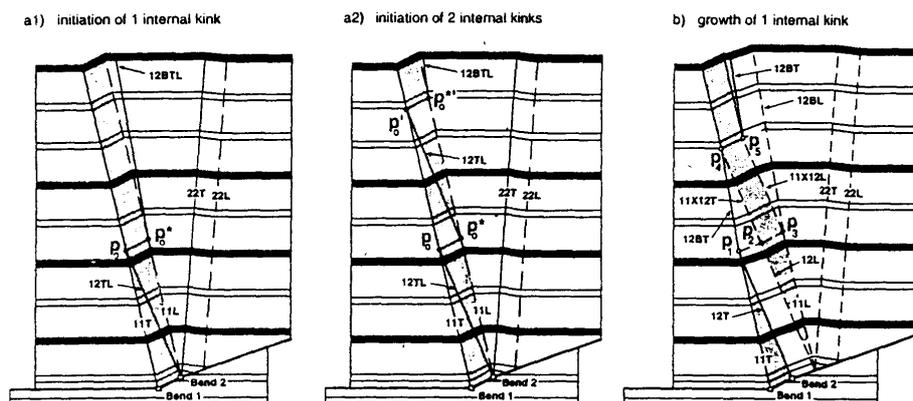


Figura 2.14: Inicio de crecimiento e interferencia de bandas kink internas (Mendweleff y Suppe, 1997).