

ANEXO 2: INVERSIÓN TECTÓNICA

A2.1 Concepto de inversión

El conocimiento de los sistemas extensionales se ha incrementado en los últimos años debido a un avance en la resolución de los datos sísmicos y a la cantidad de líneas sísmicas en profundidad. Estos estudios son realizados principalmente por la industria petrolera, donde se genera el concepto de inversión y se ha reconocido casos de cuencas invertidas desde hace mucho tiempo (Lamplugh, 1920; Stille, 1924; Pruvost, 1930, Voigt, 1962).

La inversión estructural positiva ocurre cuando una cuenca controlada inicialmente por fallas extesionales se reactiva con el movimiento inverso de dichas estructuras por una compresión tectónica posterior. Así también, se define una inversión negativa la cual ocurre cuando el acortamiento litosférico es reactivado en extensión, siendo este último caso poco frecuente (Cooper y Williams, 1989).

El concepto de “inversión de cuenca”, no había sido bien definido, ya que una cuenca puede ser el resultado de un efecto termal (calentamiento), sobrecarga litosférica, compresión y extensión. Los procesos de calentamiento y sobrecarga litosférica generan cuencas de gran extensión a nivel regional. En el caso de cuencas compresivas, se trata de estructuras inversas como lo que ocurre en las cuencas de antepaís, mientras que las cuencas extensivas son delimitadas por fallas normales, formando una estructura denominada graben. Entonces, el concepto de inversión positiva se refiere al último caso, en que ocurre la “inversión de un graben”.

En términos generales la inversión puede ser considerada positiva, cuando es asociada a alzamiento y negativa cuando lo es a subsidencia. En el caso de esta tesis se hablará de inversión, refiriéndose al caso de inversión positiva.

Nótese que una falla se considera un marcador horizontal, el movimiento será normal si existe un desplazamiento del marcador del bloque colgante bajo la elevación regional predeformacional e inversa si el deplazamiento es sobre este regional. Además la reactivación de fallas con movimiento de rumbo es considerado neutro en términos de inversión

A2.2 Inversión Positiva

Estudios sísmicos muestran que muchas de las cuencas extensionales se relacionan con hemigrábenes asimétricos, compuestos por una serie de fallas antitéticas a la falla principal (fallas en dominó), con cambios periódicos en el manto de la falla (fallas lítricas). Es por ello que Bally (1984), modela la inversión positiva usando una simple geometría de un hemigraben sobre una falla lítrica. De esta manera se define una **inversión parcial**, cuando hay reactivación de parte de la falla normal a inversa y las capas pre-rift en el basamento están en clara extensión, mientras que las capas post-rift están en clara compresión. Una **inversión total** en tanto, se genera cuando toda la falla normal es reactivada como inversa sin saltos extensionales a través de la falla en la secuencia pre-rift, reconstituyendo la estratigrafía previa al graben, produciendo una extrusión del material syn extensión (Bally, 1984) (Fig. A2.1).

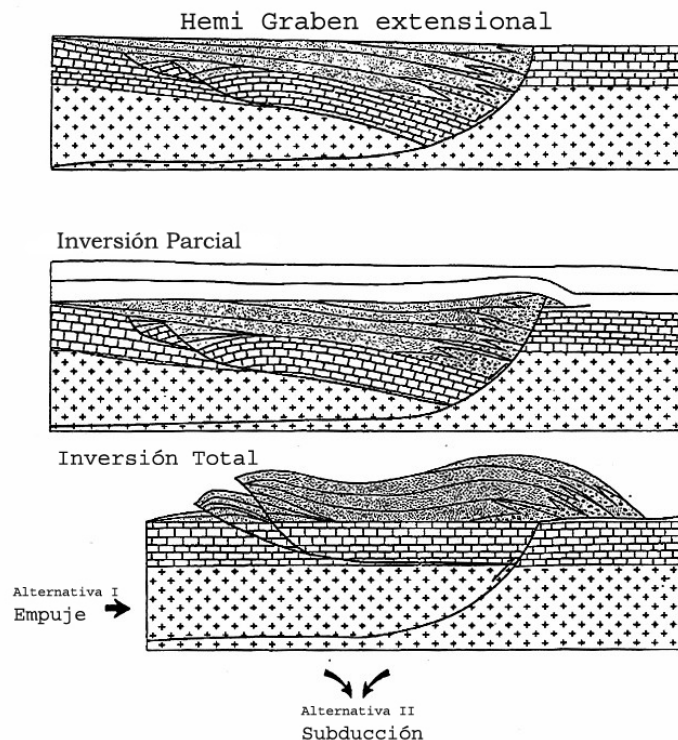


Fig. A2.1: Ilustración de la inversión parcial y total de un hemigraben (Bally, 1984)

A2.3 Magnitud de la inversión

A fin de cuantificar el movimiento de las fallas se definen las secuencias de preextensión o previas al desarrollo de la falla normal, de synextensión, contemporáneas al movimiento de la falla normal y de post extensión, cuando la falla deja de actuar (Fig. A2.2).

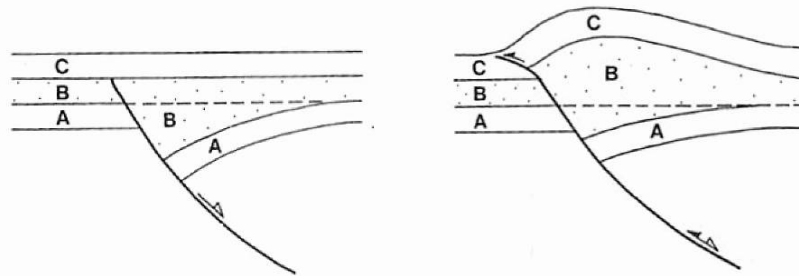


Fig. A2.2: Diagrama esquemático de una inversión estructural positiva de una falla normal listrica. A, B, C son las secuencias estratigráficas: A, pre extensión, B, syn extensión y C, post extensión (Williams et al., 1989)

Un movimiento contraccional desplazará primeramente las secuencias de postextensión y luego progresivamente las de synextensión. Las fallas individuales pueden mantener signos de extensión en profundidad y mostrar contracción asociada a crecimiento de anticlinales en superficie en la parte superior.

Los sedimentos que rellenan la cuenca pueden ser extruídos mostrando una deformación interna, cabalgamiento, retrocabalgamiento o extrusión bipolar (cabalgamiento-retrocabalgamiento) (Fig. A2.3(a)).

Los depósitos synrif van a mostrar un mayor espesor en la zonas adyacentes a la falla en el bloque colgante, indicando el movimiento de éste y crecimiento de la falla. Se puede definir el intervalo de cambio en el espesor de la secuencia estratigráfica en forma porcentual de la siguiente manera:

$$I = 100 (I_h - I_f) / I_f$$

Donde I_f es el espesor del intervalo estratigráfico en el bloque yacente y I_h es el espesor del mismo intervalo, pero en el bloque colgante, medidos en forma perpendicular a la capa y en la zona adyacente a la falla. Un “peak” revela una actividad máxima en la falla.

Es posible definir un marcador en la secuencia de synextensión, denominado **punto nulo**, que corresponde a un punto que se eleva por contracción, en la reactivación inversa de fallas normales, produciendo un punto a lo largo del perfil de la falla en el cual no hay salto de estratos (DePaor y Eisenstadt, 1987; Gibbs, 1987; Williams et al, 1989). Cuando se ve en 3-D se convierte en una **línea nula**. (Fig. A2.3 (b)).

Cabe hacer notar que si la reactivación llega más allá de la etapa de inversión total, entonces el **punto nulo** dejará de existir, pues la secuencia de synextensión ha sido completamente extruída.

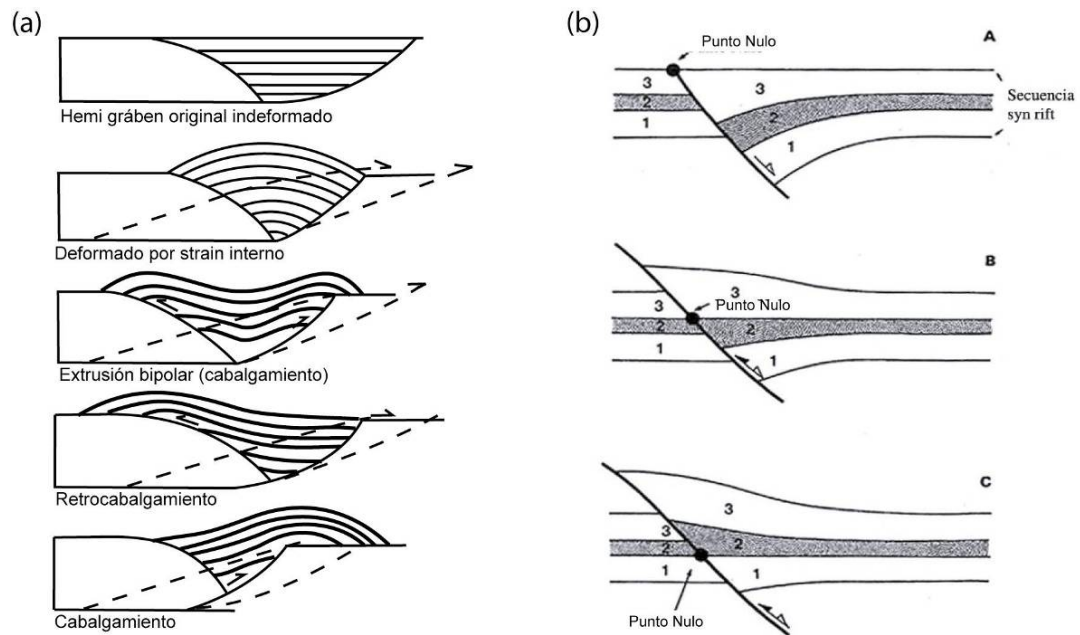


Fig. A2.3: (a) Modelo teórico de la extrusión de la secuencia syn extensión en un hemigraben. Las líneas punteadas muestran posibles cabalgamientos (Hayward y Graham, 1989). (b) Diagrama secuencial que muestra la inversión en contracción de una falla extensional. El punto nulo se mueve progresivamente bajo la secuencia syn extensión con el incremento de la inversión. (Williams et al., 1989).

La posición del punto nulo puede utilizarse para determinar la magnitud relativa de movimiento contraccional y extensional en una falla reactivada, definiendo el radio de inversión como sigue:

$$R_i = d_c / d_h = 1 - d_e / d_h$$

Donde d_c es el espesor de la secuencia de synextensión paralela a la falla y d_h corresponde a la secuencia de synextensión en compresión, es decir sobre el punto nulo. Mientras que d_e es la secuencia de synextensión bajo el punto nulo (Fig A2.4).

De este modo, si $R_i = 0$, no habrá inversión y si $R_i = 1$ la inversión será total.

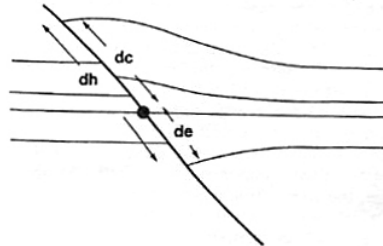


Fig A2.4: Parámetro utilizado en la ecuación del radio de inversión (R_i) (Williams et al., 1989).

En la inversión de una falla lítrica puede haber sólo reactivación en la parte inferior de la falla y luego se forma una nueva falla inversa de bajo ángulo desarrollada en el bloque fijo que llega hasta la superficie. Esta estructura se denomina *short cut* palabra que viene del inglés, pues fue descrita en el sur de Inglaterra (Gibbs, 1987) y en Los Alpes (Gillcris et al., 1987) (Fig. A2.5).

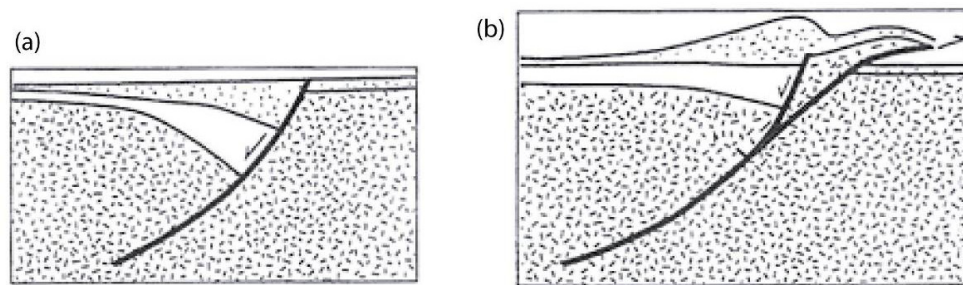


Fig. A2.5: Sección esquemática que muestra la inversión de una falla lítrica con desarrollo de "short cut" en la parte superior de la falla (Gibbs, 1987)

A2.4 Inversión Negativa

La reactivación extensional de sistemas originalmente compresivos tiende a ser menos común que la inversión positiva. En general, la reactivación es sólo parcial y se evidencia en partes del sistema, pudiendo o no existir la reutilización en extensión de sistemas de cabalgamiento.

En el caso que no hay reactivación, la falla extensional corta los cabalgamientos, pudiendo despegar en niveles profundos. Si la falla intersecta el sistema de cabalgamiento en zonas sin repetición de estratigrafía, no existirán puntos nulos. Pero si corta zonas con repetición de la estratigrafía existirán puntos nulos, mostrando contracción bajo estos (Fig. A2.6).

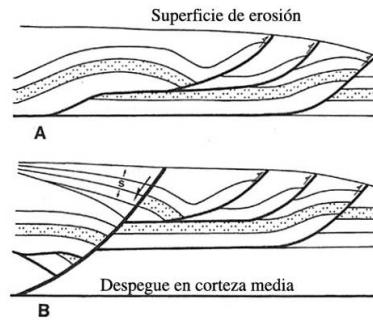


Fig. A2.6: Sistema de cabalgamientos erodado. B, corresponde a una falla extensional que corta el sistema de cabalgamiento preexistente sin reutilizar las fallas inversas. S, representa la secuencia syn extensión extensional (Williams et al., 1989).

Si existe una reactivación parcial se puede introducir el concepto de falla neutra cuando no se logra ver si es contraccional o extensional (Fig. A2.7).

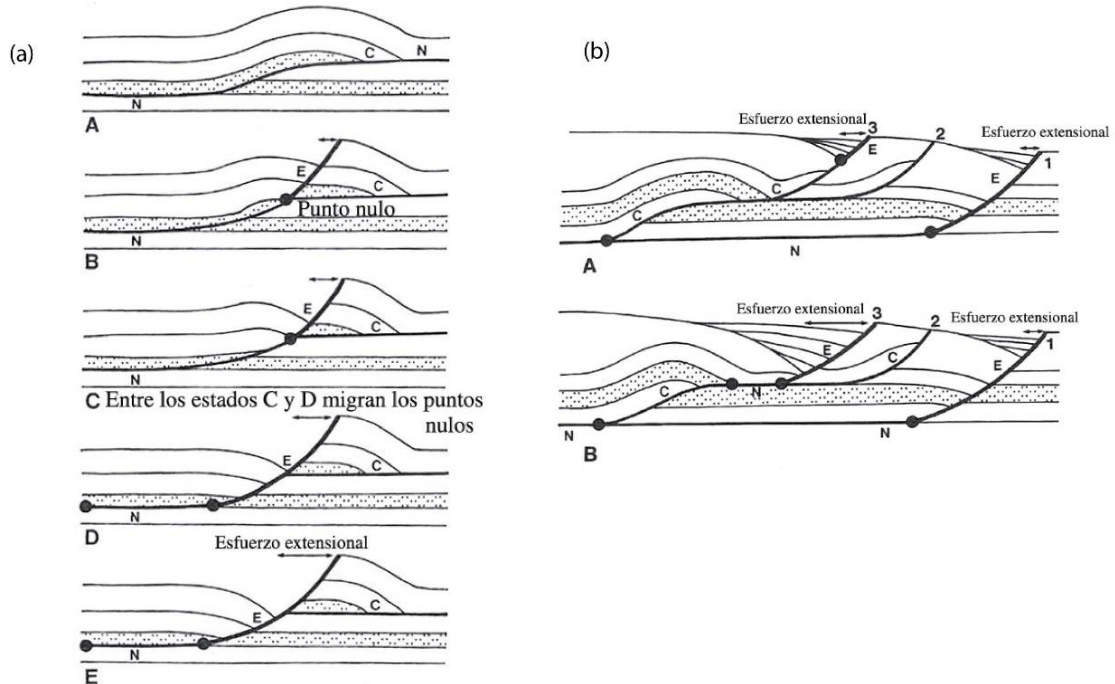


Fig. A2.7: (a) Diagrama secuencial que muestra formación de short cut y reactivación parcial de una sola falla inversa en extensión. Las fallas denominadas C son contraccionales, E extensionales y N neutras (Williams et al., 1989). (b) Sistema de cabalgamientos parcialmente reactivados en extensión. A y B indican dos estados de reactivación. C son fallas contraccionales, E extensionales y N neutras (Williams et al., 1989).

A2.5 Reactivación de Falla

La reactivación corresponde a la reutilización de estructuras anteriores preexistentes, que es el resultado de una tectónica polifase.

A2.5.1 Conceptos básicos de fallas

Anderson (1905) realizó a comienzos de siglo una clasificación dinámica de las fallas basada en el posicionamiento de los tres vectores principales de esfuerzos: σ_1 , σ_2 , σ_3 , ortogonales entre sí, que cumplen el requisito general de $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ (Fig. A2.8). Dependiendo de las posiciones de los vectores se definen los tres tipos de fallas principales: normal (σ_1 vertical, σ_2 y σ_3 horizontal), transcurrente (σ_2 vertical, σ_1 y σ_3 horizontal), e inversa (σ_3 vertical, σ_1 y σ_2 horizontal). La clasificación Andersoniana es muy restringida y presenta problemas para la interpretación de muchos casos, pues no explica el comportamiento lístrico, ni menos las grandes superficies tipo "*detachments extensionales*" o el carácter irregular (con variaciones en el rumbo) de las fallas transcurrentes.

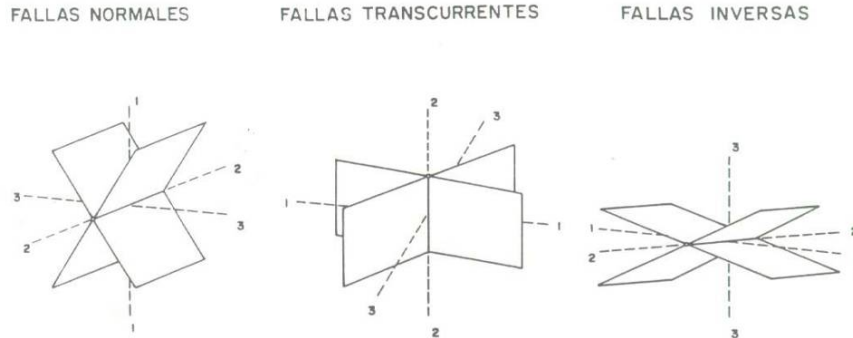


Fig. A2.8: Clasificación dinámica Andersoniana de las fallas. 1,2,3: vectores de compresión σ 1,2,3. Tomada de McClay (1987).

De acuerdo al sentido de movimiento podemos decir que una falla normal es aquella en la que el bloque del techo se mueve hacia abajo con respecto al bloque del muro. Estas fallas suelen tener buzamientos moderados a altos, con un promedio de 60° . Las fallas con buzamientos menores a 45° (no previstos por la dinámica Andersoniana) pasan a denominarse fallas normales de bajo ángulo. Las fallas transcurrentes son aquellas que acomodan movimiento horizontal de los bloques adyacentes. Estas dependiendo a su vez del movimiento

relativo de un bloque con respecto al otro, pueden ser de dos tipos: dextrales o sinestrales. Por su parte, las fallas inversas se caracterizan por un movimiento del bloque del techo hacia arriba con respecto al muro. Las fallas inversas tienen generalmente un buzamiento menor a 45° , en promedio 30° . Si estas buzanan más 45° pasan a denominarse fallas inversas de alto ángulo. Tanto las fallas normales como las inversas pueden ser lítricas (Fig. A2.9).

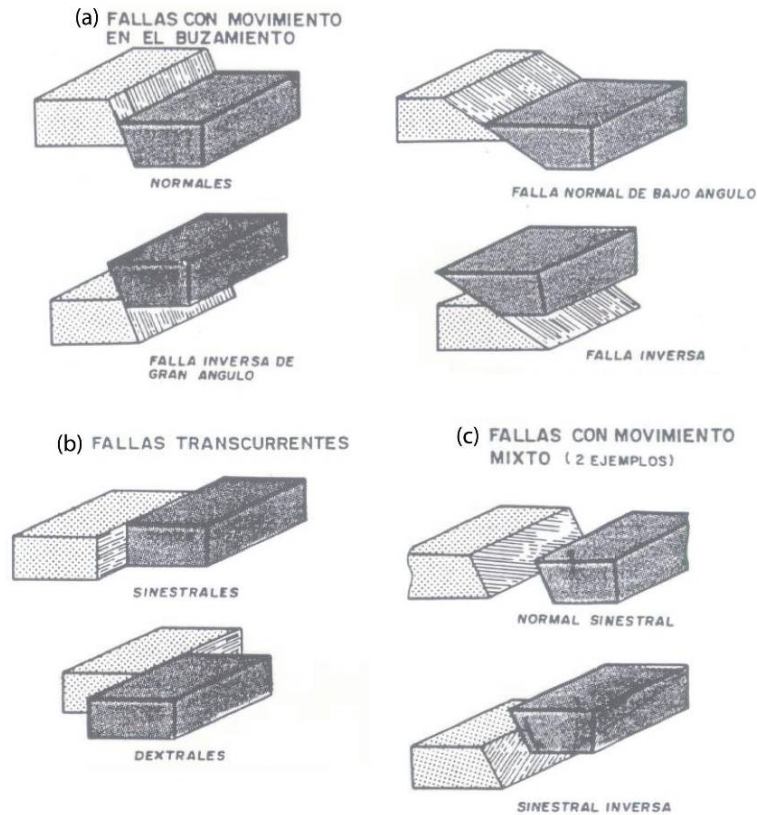


Fig. A2.9: Clasificación de las fallas en función del sentido de deslizamiento. Tomada de Davis y Reynolds (1996).

A esto habría que agregar el movimiento combinado que pueden tener las fallas, en este caso se habla de fallas con deslizamiento oblicuo (Fig. A2.10), que son combinaciones de movimiento (mixto) entre fallas transcurrentes (traslación horizontal) con movimientos normales o inversos (deslizamiento hacia arriba o abajo a lo largo del plano de falla).

Las fallas son fracturas de las cuales se pueden distinguir varios tipos (Fig. A2.10):

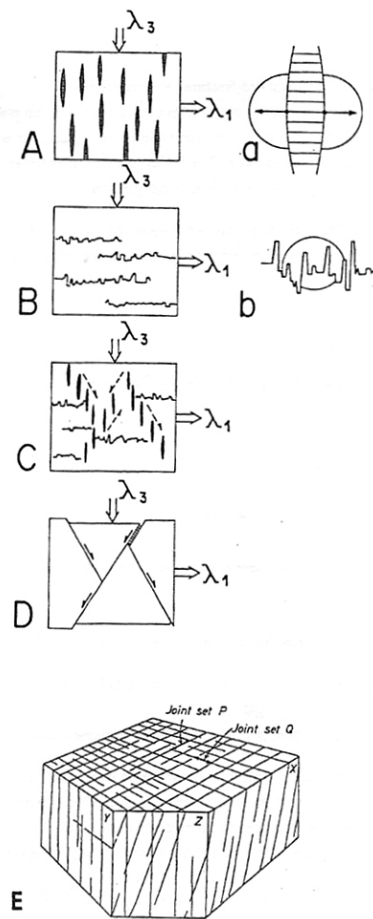


Fig. A2.10: Orientación de las discontinuidades según la orientación de los ejes principales de deformación. A, corresponden a grietas de tensión, B a estilolitas, C grietas de tensión en echelón y estilolitas, D fallas conjugadas y E diaclasas (Ramsay y Huber, 1987).

- Grietas de tensión: fracturas donde los bloques son desplazados perpendicularmente al plano de fractura. Asociadas a estas estructuras están las estilolitas que son superficies de disolución por presión.

- Diaclasas son fracturas de extensión sin movimiento relativo entre los bloques.

- Fallas son fracturas acompañadas de un desplazamiento entre los dos bloques. En general, no forman sólo un plano de falla, sino que una zona de deformación de un cierto espaciamiento (de cm a m según la amplitud de la falla). Pueden ser de todos tamaños desde microfallas hasta la escala de placas litosféricas.

A2.5.2 Criterio de ruptura de Mohr Coulomb

Este criterio de ruptura de cizalle frágil está basado en la ley de deslizamiento friccional (Ley de Amonton) que dice:

$$\tau = \sigma_n \tan \phi$$

Donde τ y σ_n son los esfuerzos normal y de cizalle actuando en el plano de ruptura potencial y ϕ es el ángulo de fricción interna de ese plano (ángulo de deslizamiento).

Se ha reconocido además que, con anterioridad al desarrollo del plano de fractura, la cohesión (c_0) de la roca tiene que ser sobrepasada.

Según este criterio, si en un plano de la roca existe un esfuerzo de cizalle, el cual supera la resistencia que la roca opone a la fractura (cohesión entre las partículas componentes) y además es capaz de vencer el roce que se opone al deslizamiento de los bloques a ambos lados del plano, la roca se romperá por este plano. El criterio de Navier Coulomb define una ecuación que rige este comportamiento, con la cual se puede trazar una envolvente de ruptura que delimita dos dominios. En el dominio inferior no existe ruptura, mientras que en el superior la ruptura se realiza en un ángulo θ con σ_1 (Fig. A2.11). Pudiendo ser expresado como:

$$\tau = c_0 + \sigma_n \tan \phi$$

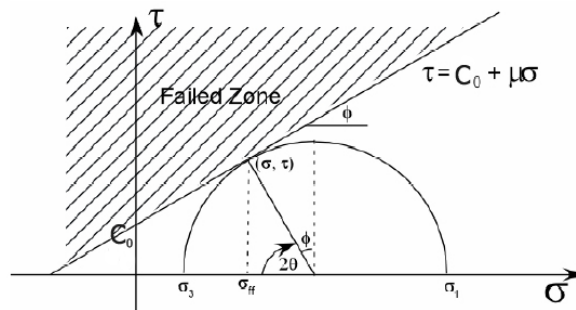


Fig. A2.11: Diagrama del círculo de Mohr, donde τ = componente de cizallamiento, C_0 = cohesión, σ_n = componente normal, θ = ángulo de ruptura óptimo y μ = coeficiente de fricción interna ($\mu = \tan(\phi) = 1/\tan(2\theta)$)

A2.6 Factores que favorecen la reactivación de fallas

A2.6.1 Reactivación en una zona fracturada

La fracturación es un fenómeno destructivo de la roca, después de la ruptura se produce un cambio en las propiedades de la roca, de modo que disminuye la cohesión (C) y el ángulo de fricción interna (φ)

$$C' = C_0 - \Delta C_0$$

$$\varphi' = \varphi - \Delta\varphi$$

Luego en la ecuación de la envolvente de ruptura para una roca fracturada esta dada por

$$\tau = C' + \text{tg}(\varphi') \sigma_n,$$

Si la facturación de una roca produce pérdida total de la cohesión se tiene (Fig. A2.12 (a)):

$$\tau = \text{tg}(\varphi') \sigma_n$$

Además, Handin (1969) demostró que diferentes tipos de rocas pueden tener diferentes valores de fricción a lo largo de planos de falla cuando son comparados a roca intacta. Empíricamente (Fig. A2.12 (b)), se ve que una disminución en el ángulo de fricción dentro de superficies de falla incrementarán el posible rango de orientaciones de planos de falla que pueden ser reactivados ($\mu = \tan(\varphi) \Rightarrow \tau = C_0 + \mu\sigma_n$).

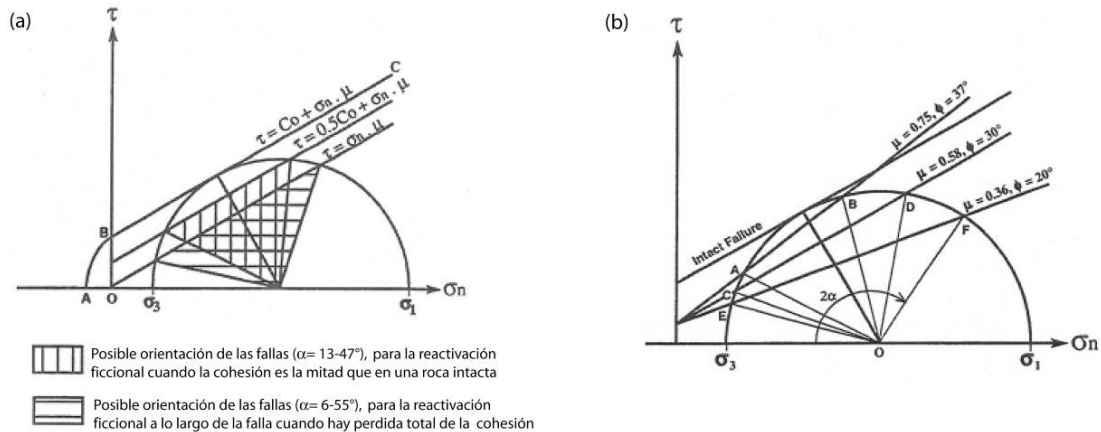


Fig. A2.12: Construcción del círculo de Mohr ilustrando el efecto de: (a) la reducción de la cohesión a lo largo de la superficie de la falla y (b) el incremento o reducción del coeficiente de fricción a lo largo de la falla con cohesión reducida. La fallas que pueden ser reactivadas friccionalmente, si: (1) $\mu = 0,75$ (AOB), reactivación podría ser en fallas con ángulo entre 14 y 39° de σ_1 ; (2) $\mu = 0,58$ (COD), fallas entre 10 y 50° de σ_1 y (3) $\mu = 0,36$ (EOF), fallas entre 8 y 63° de σ_1 (McClay, 1999).

A2.6.2 Presión de fluidos de poros

En la corteza los fluidos más comunes que rellenan los poros de las rocas son: agua, salmuera e hidrocarburos. La influencia de los fluidos en la resistencia de las rocas es considerable. Inicialmente se comprobó que la resistencia de un cristal seco es diez veces mayor a la del mismo en estado húmedo. Price (1966) y otros concluyeron que la resistencia uniaxial de una roca completamente saturada era solo un 45% de su resistencia cuando se secaba en horno. La influencia de los fluidos en la resistencia de una roca se asocia a efectos químicos y mecánicos. El efecto químico (o Reh binder) está relacionado con la pérdida de energía superficial de las paredes de los poros producida por el agua absorbida. Si hay una condición de stress favorable, las microfisuras tienden a propagarse. El agua absorbida también produce, a elevadas temperaturas, migración de soluciones inorgánicas y disolución. Este efecto químico es común en la naturaleza. Sin embargo, sus efectos son pequeños cuando se compara con la influencia mecánica de las presiones de fluidos.

Los efectos mecánicos corresponde a que la presión de fluidos reduce la habilidad de la roca de soportar los efectos del stress diferencial (es decir, altas presiones de fluidos reducen la resistencia de la roca) e influye en el modo de deformación (Fig.A2.13).

La presión de fluidos favorece el fracturamiento ya que reduce el estrés efectivo para producirlo y puede expresarse según la ley de Amonton como:

$$\tau = \mu (\sigma_n - P_f), \text{ donde } P_f \text{ corresponde a la presión de fluidos de poros.}$$

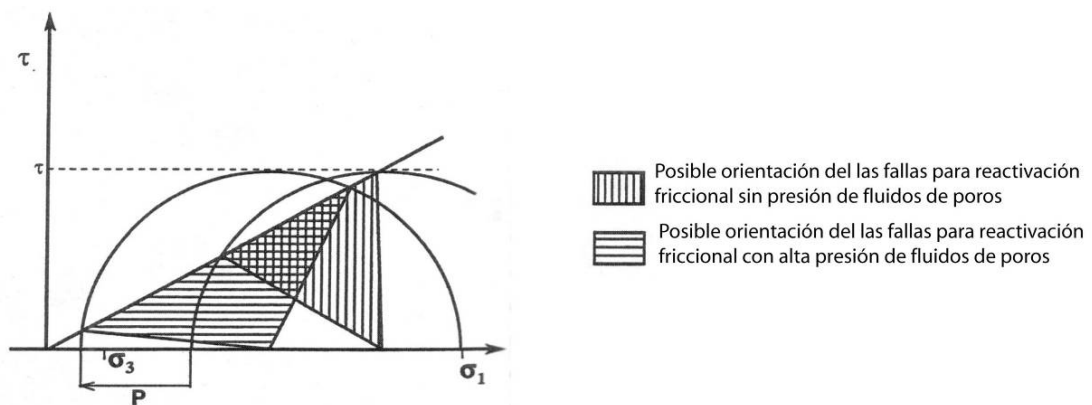


Fig. A2.13: Construcción del círculo de Mohr ilustrando el efecto del incremento de la presión de fluidos de poros P_f y el rango de los posibles ángulos de las fallas que pueden ser reactivadas (Sibson, 1985).

A2.6.3 Rol de la sobrepresión de fluidos

El fallamiento en la corteza superior es dominado por el criterio de fricción Byerlee (1978), quien muestra que prácticamente todas las rocas tienen las mismas propiedades friccionales, donde $0.6 < \mu < 0.85$. Para la situación en que la falla se encuentra entre el plano σ_1/σ_3 (σ_1 , σ_3 stresses principales máximo y mínimo, respectivamente), el radio de estrés se define como:

$$\sigma_1/\sigma_3 = (\sigma_1 - P_f)/(\sigma_3 - P_f) = (1 + \mu \cot \theta_r) / (1 - \mu \tan \theta_r)$$

Donde θ_r es el ángulo de reactivación, luego el ángulo óptimo de reactivación de fallas, donde σ_1/σ_3 es positivo y mínimo, bajo el rango de coeficientes de Byerlee es $25^\circ < \theta_r^* < 30^\circ$ (Fig. A2.14). Sobre estos valores la reactivación se dificulta pues se requieren altos radio de stress. El “lock up” ocurre cuando $\sigma_1/\sigma_3 \rightarrow \infty$ y esto es en $\theta_r \rightarrow 0$ ó $2\theta_r^*$. La reactivación cuando $\theta_r > 2\theta_r^*$ será posible sólo si $\sigma_3 < 0$ o si $P_f > \sigma_3$.

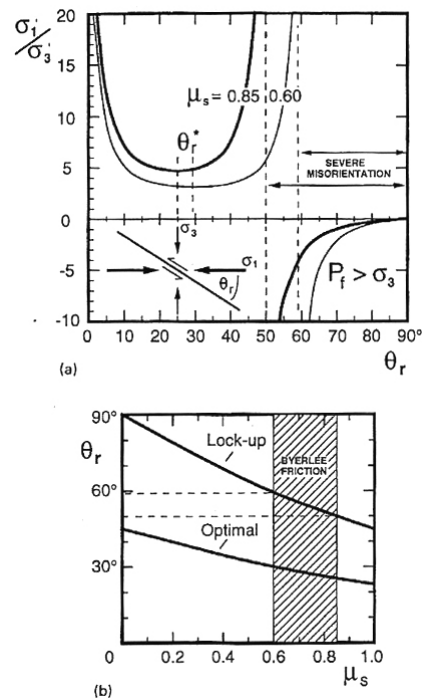


Fig. A2.14: (a) Radio de stress σ_1/σ_3 , para reactivación friccional de fallas poco cohesivas, planteado en función de el ángulo de reactivación θ_r , para $\mu = 0.6$, línea gruesa y $\mu = 0.85$, línea delgada (Sibson, 1985). (b) Valor del ángulo óptimo de reactivación y de lock up friccional para fallas poco cohesivas planteado en función del coeficiente de fricción μ (Sibson, 1995).

Si la presión de poro de fluido es mayor que la calculada por el gradiente hidrostático (aproximadamente 10 MPa/Km), la sobrepresión influye en los mecanismos de deformación prediciendo el stress efectivo. Gubert y Rubey (1959) definen el factor λ , que describe la magnitud de la sobrepresión en función de la presión litostática:

$$\lambda = (P_f - P_h) / \rho g z,$$

donde P_f corresponde a la presión de fluidos, P_h a la presión de fluidos hidrostática, z a la profundidad, ρ a la densidad de la roca, g a la aceleración de gravedad.

Si $\lambda = 0$, sólo actúa la presión de fluidos hidrostática; mientras que si $\lambda = 1$, implica que la presión de fluido excede la resistencia de la roca.

Cuando existe una asociación entre sobrepresión y deformación de la roca, en una inversión de cuenca sedimentaria, muestra los siguientes rasgos:

- Sistemas de venas hidrotermales asociadas con zonas de fallas inversas antiguas exhumadas desde grandes profundidades (Sibson, 1990).
- Arreglos de venas syn cinemáticas en cuencas invertidas en las cuales las fibras minerales verticales indican dilatación (Cosgrove, 1993).
- Procesos de brechización en zonas de falla (Sibson, 1986).
- Orientación e inclinación desfavorable de planos de falla fuertemente invertidos y selectividad de reactivación entre sets geométrica y cinemáticamente similares (Sibson, 1995).

A2.6.4 Rol de la reología de la corteza en la reactivación

Se supone que la corteza tiene una composición uniforme que va desde una reología “suave”, controlada por el cuarzo húmedo, representando una corteza félsica, a una “dura”, controlada por la plagioclasa seca rica Ca (Ranalli 1995, 1997), que representa una corteza intermedia a básica, esta simplificación de primer orden es válida en zonas de colisión. Asumiendo que la reología en el dominio frágil es de tipo Coulomb y en el dominio dúctil

es viscoso no lineal (ley de poder, Poirier, 1985; Ranalli, 1995), bajo estas condiciones la transición cortical frágil/dúctil es igual a:

$$\beta \rho g z (1 - \lambda) = (\epsilon/A)^{1/n} \exp(E/nR(T_0 + az))$$

Donde z es la profundidad, β es función de los parámetros friccionales y de orientación de los campos de stress, ρ la densidad de la roca, g la aceleración de gravedad, λ el factor de fluido de poro, ϵ la tasa de strain dúctil, R la constante de gas, A , n y E los parámetros de la ley de poder.

Parametrizando en función de la temperatura del Moho se obtienen los perfiles reológicos (Fig. A2.15) y el espesor de la capa superior frágil de la corteza (Fig. A2.16) el cual incrementa no linealmente con la temperatura del Moho. Como se puede apreciar el efecto de la composición es mucho más pronunciado que el efecto de la presión de poro de fluido.

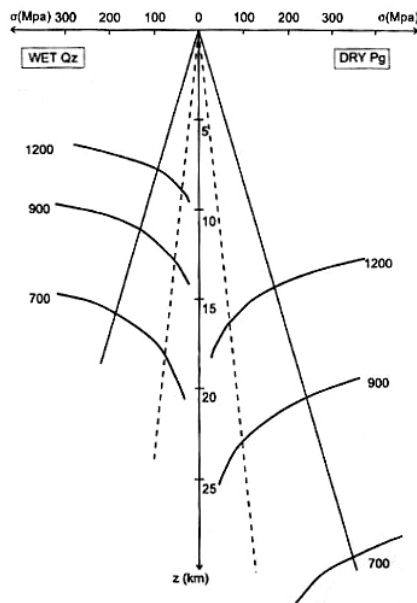


Fig. A2.15: Perfiles reológicos de extensión para la composición de la corteza. Las líneas sólidas corresponde a $\lambda=0.4$ y las líneas punteadas a $\lambda=0.8$. Las curvas están parametrizadas en función de la T del Moho en grados K (Ranalli, 2000).

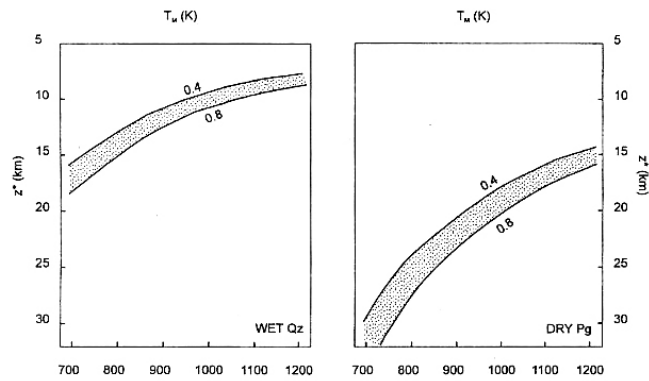


Fig. A2.16: Espesor de la capa cortical frágil en función de la composición y temperatura del Moho (líneas) para valores intermedios del factor de poro de fluido intermedios. (Ranalli, 2000).

En consecuencia, la ocurrencia y extensión de una capa dúctil cortical inferior se verá afectada por la reología. Si la reología es de composición félsica esta capa se desarrollará bajo todas las situaciones, mientras que si es intermedia a básica el espesor será reducido, o sea muy delgado o ausente.

Una falla preexistente puede ser reactivada si el estrés diferencial es menor que el estrés diferencial crítico para la formación de la falla.

El rango de reactivación decrece con el incremento de la profundidad y aumenta con la presión de poro de fluido. Asimismo, el rango de ángulos en los cuales se producirá la reactivación de fallas normales es mayor que para las fallas inversas (Fig. A2.17).

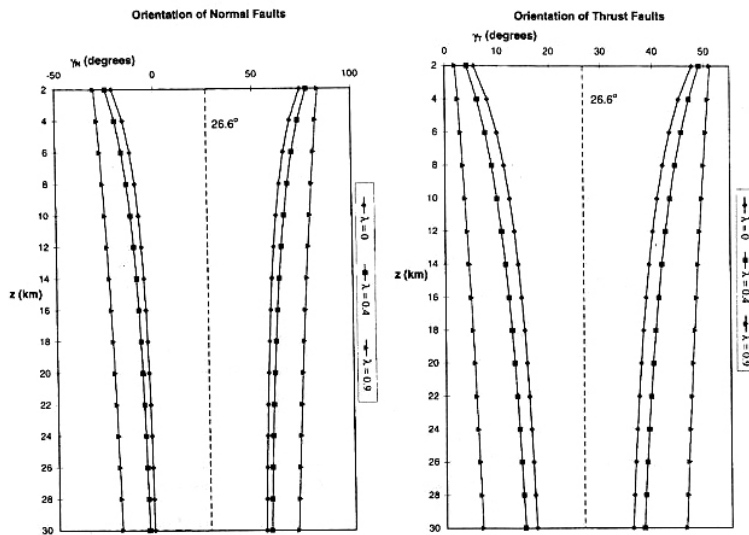


Fig. A2.17: Rango de ángulos de reactivación de planos preexistentes de fallas normales e inversas para tres factores de fluido de poro diferentes. La línea punteada indica la orientación las favorable (Ranalli, 2000)

En general el rango de orientaciones para reactivación de fallas normales es mayor que para inversas. En ambos casos el rango incrementa con el decrecimiento de la profundidad y el incremento de la presión de poro de fluido. Si la presión de poro de fluido es la hidrostática o mayor el rango de reactivación en extensión es suficientemente amplio para la reactivación de fallas inversas a normales en ángulo de 20° a 30° . Sin embargo, para reactivación de fallas de 60° a 70° en compresión se requiere una disminución en el coeficiente de fricción a lo largo del plano de falla.

A2.7 Mecanismos para la reactivación selectiva de fallas

Sobre la base de la teoría de reactivación en 2D y sin tomar en cuenta stress inhomogéneo, existen tres mecanismos para la reactivación selectiva de fallas observados durante la inversión:

- a) Las fallas de bajo ángulo en set rotados de tipo dominó o las fallas lítricas son preferentemente reactivadas en compresión con menores radios de stress que las de alto ángulo (Fig. A2.18).

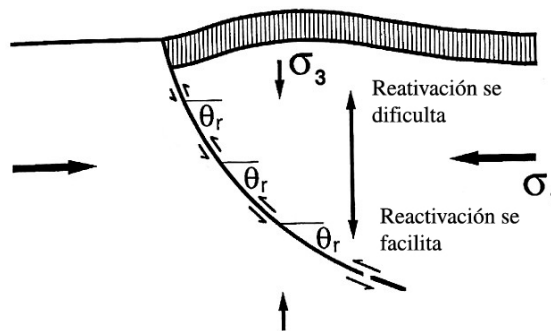


Fig. A2.18: Cambio de manto de las fallas normales lítricas con la profundidad variando el grado de reactivación en compresión (Sibson, 1995).

- b) La presencia de anomalías de material de baja fricción sobre la falla, tales como montmorillonita, puede producir una reactivación selectiva.
- c) En fallas de manto comparable, puede ocurrir una reactivación selectiva cuando los niveles de presión de fluido fueran localmente elevados.

A2.8 Criterios estructurales para reconocer la inversión positiva

Las cuencas invertidas se caracterizan por revertir el sentido de movimiento de las fallas de normal a inverso con un cambio en la polaridad del relieve estructural y expulsión de los sedimentos syn extensión (Fig.A2.19).

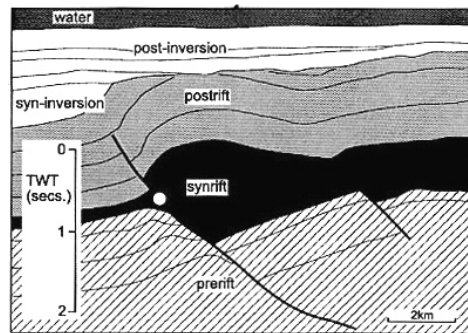


Fig. A2.19: Sección típica de inversión geométrica de un hemi graben al este de la cuenca del mar de Java, Indonesia (Goudswaars y Jenyon, 1988).

El término, cabalgamiento se usa para fallas de rumbo- manteo que se originan en un campo de stress compresivo horizontal, típicamente con ángulos de 30° al máximo stress principal. Mientras que el término de fallas inversas se refiere a estructuras que también son producidas por stress compresional horizontal, pero tienen ángulos de manteo de hasta 60° con la horizontal. Las fallas inversas pueden tener una alta inclinación debido a una retrorrotación y aumento del cabalgamiento después que está formada o bien debido a que se inicia como falla normal y subsecuentemente es reactivada a falla inversa durante la inversión de la cuenca. Por lo tanto, la presencia de fallas inversas de alto ángulo serán un buen indicador de que puede haber ocurrido inversión.

El criterio diagnóstico para reconocer una inversión de cuenca es la identificación del punto nulo o línea nula, que mostrará un movimiento normal en la parte inferior e inverso en la parte superior de este punto en el cual el desplazamiento neto de la falla será igual a cero. Como la magnitud de la inversión se incrementa, el punto nulo migrará progresivamente a lo largo de la falla, consecuentemente a menudo se generará acortamiento en la secuencia superior.

Algunas de las características geométricas, pero no determinantes de inversión pueden ser las siguientes:

- Pliegue de crecimiento con un anticlinal sobre la falla reactivada provocando un alto estructural;
- Cambio del depocentro que va moviéndose desde una zona proximal a un crecimiento más distante de la falla;
- Arqueamiento y alzamiento de escala regional o ancho de la cuenca;
- Inversión del manto de los bloques fallados;
- ‘Retrocabalgamientos’ (Cabalgamientos vergentes hacia el bloque colgante)
- Estructuras de ‘buttressing’ y ‘pop-up’ desarrolladas contra la falla extensional;
- Cabalgamientos fuera del hemi-graben debido a falta de espacio de espacio;
- Estructuras de ‘puntas de flecha’ o ‘arpon’ desarrolladas por hemi-graben parcialmente invertidos
- ‘Estructuras de short-cut en el bloque subyacente.

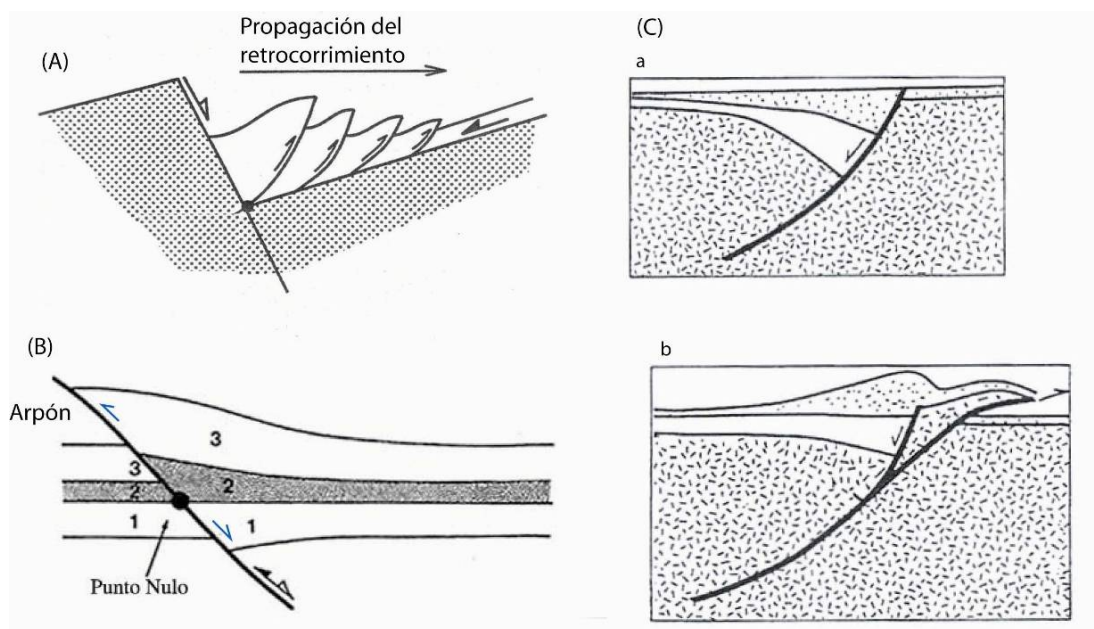


Fig. A2.20: Secciones esquemáticas que muestra algunas geometrías típicas de inversión tectónica (A) Desarrollo de un retro-corrimento por buttressing, ejemplo tomado de los Alpes (Gilchrist, 1987). (B) Estructura de arpón o punta de flecha y punto nulo, sobre este punto se ve movimiento inverso y sobre este normal. (C) Falla listrica con desarrollo de “short cut” en la parte superior de la falla (Gibbs, 1987)

A2.9 Causas de la inversión tectónica

Las principales causas que podrían generar inversión tectónica son la siguientes:

- a) Inversión de los stresses principales probablemente debidos a cambios en el movimiento de placas
- b) Subducción
- c) Alzamiento isostático
- d) Movimientos de sal
- e) Oblicuidad entre el estrés extensivo y compresivo sobre 45° (Nalpas et al, 1995)