



*Perigosidade  
Sísmica*

*Cadeira de Riscos Geológicos  
Módulo I*

*7ª Aula*

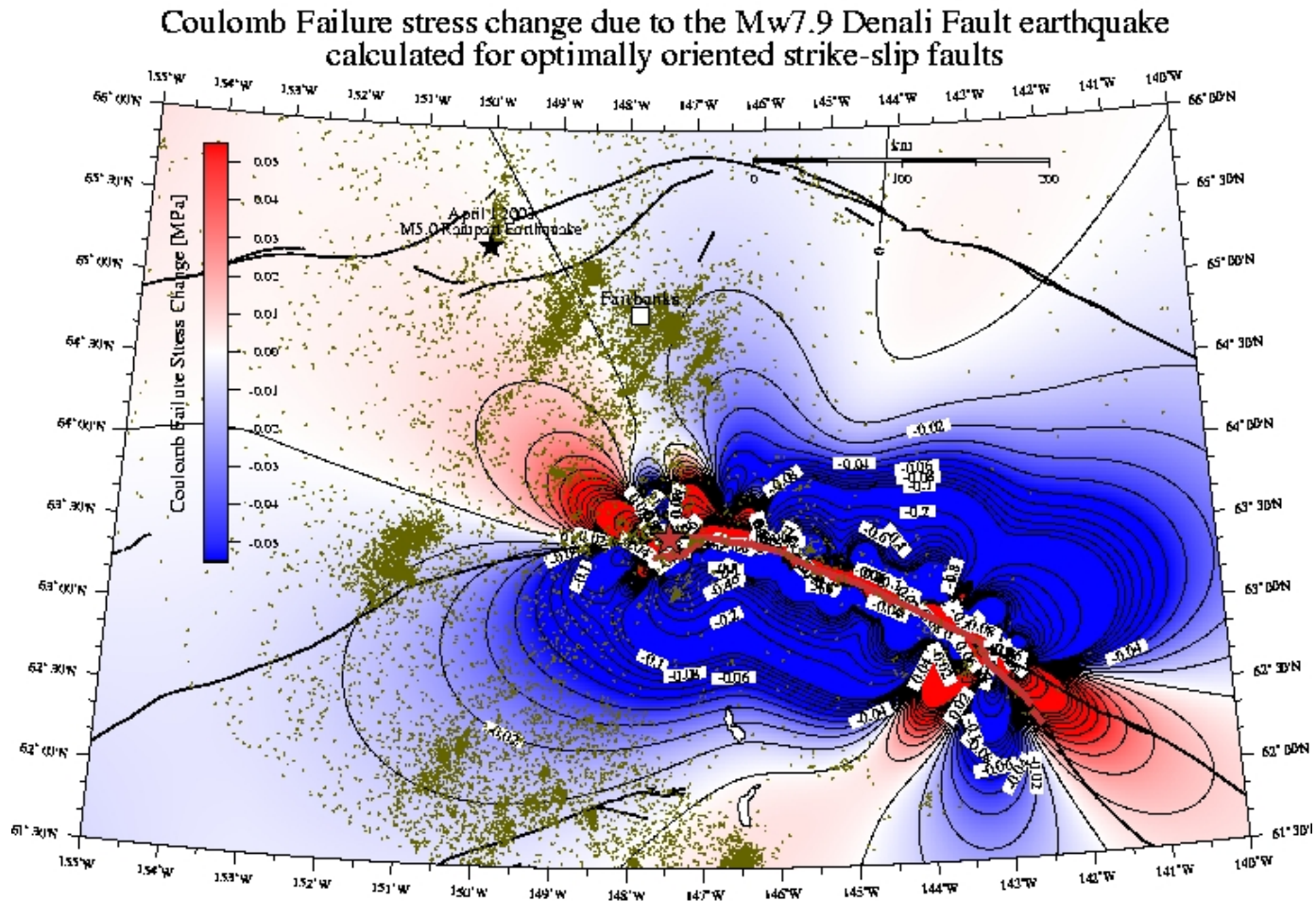
**J. Cabral**

**Izmit, Turquia  
1999**

# PROBLEMA DA INTERACÇÃO ENTRE FALHAS

➤ Ruptura sísmica numa falha produz modificação do campo da tensão na região envolvente à falha:

- *Static stress change*



Sismo de Denali, Alasca, 2002, Lrupt.=330km, rupt. 3 segmentos de falha  
([www.giseis.alaska.edu](http://www.giseis.alaska.edu))

# INTERACÇÃO ENTRE FALHAS – SISMICIDADE DESENCADEADA

➤ Falhas interagem por **modificação do campo da tensão**:

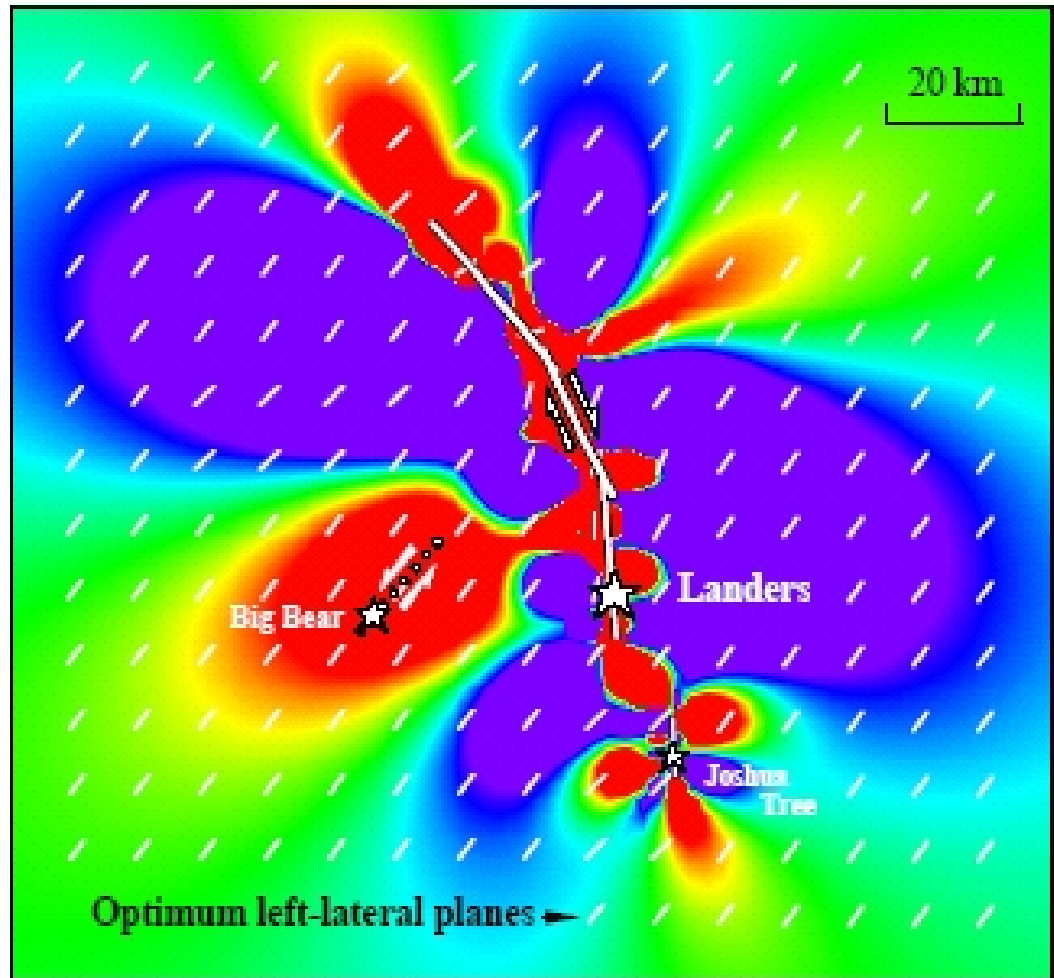
- Ruptura sísmica pode desencadear **ruptura em segmentos contíguos** e noutras **falhas próximas**, após algum tempo (minutos a meses)  
→ **sismos desencadeados** (*triggered*).

# INTERACÇÃO ENTRE FALHAS – SISMICIDADE DESENCADEADA

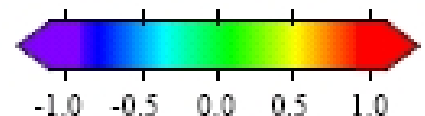
- Modificação da “**tensão de Coulomb**” (alteração do estado de tensão) causada pelo sismo de Landers (1992, M 7,4, Califórnia, 25km do sistema de falhas de S. André);
- Sismo de Big Bear ocorreu 3hr e 20min depois, por ruptura ao longo da linha a ponteadado, desencadeado por um aumento da tensão de Coulomb de 2,2-2,9 bar.

King et al., 1994

[//quake.wr.usgs.gov/research/deformation/modeling/papers/landers.html](http://quake.wr.usgs.gov/research/deformation/modeling/papers/landers.html)



Coulomb stress change caused by Landers and Joshua Tree Earthquakes before occurrence of the Big Bear shock (bars)



# DOBRAMENTOS ACTIVOS

➤ Os **dobramentos activos** (**neotectónicos**)

geralmente são:

- pouco frequentes
- pouco intensos

➤ Raramente se observa um **relevo de dobramento primário**, devido a:

- erosão rápida nas elevações ≡ antiformas
- sedimentação nas depressões ≡ sinformas

# DOBRAMENTOS ACTIVOS

## ➤ Diferentes mecanismos de geração:

- dobramento por **encurtamento tangencial** devido a **flexão** ou **buckling**; p. ex. sistemas de dobras *en echelon* geradas em zonas de falha de desligamento activas.

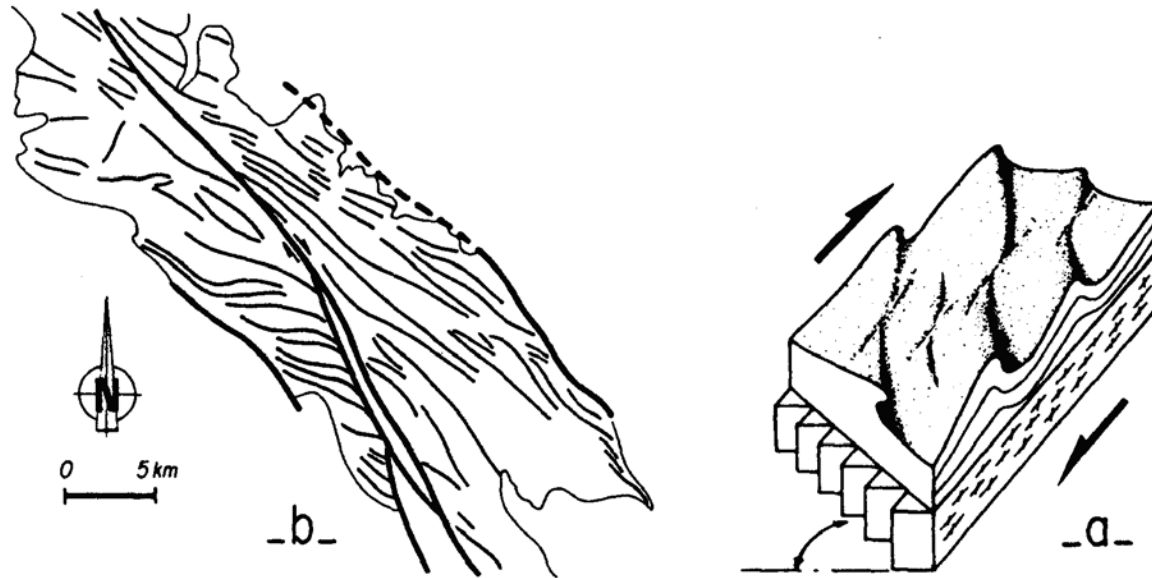


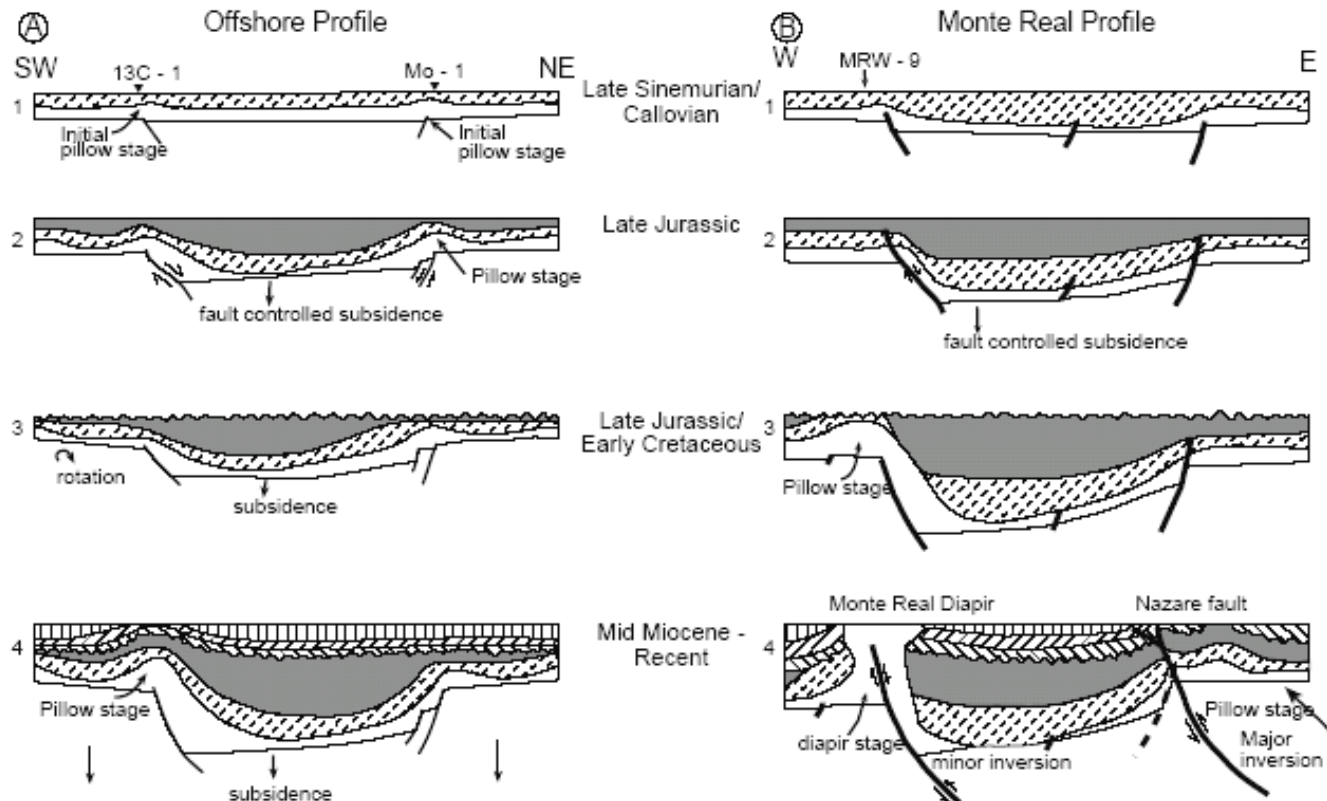
Fig. 9.9 - Plis en échelon. a- Modèle de développement dans une couverture soumise au cisaillement de son socle. b- Sédiments plio-pléistocènes plissés en échelon le long du système de décrochement de San Andreas (région de Salinas, Californie). (a- Iglesias Ponce de Leon et Choukroune, 1980. Jour. Str. Geol., 2, 63 ; b- Page, 1981. Rubey Vol. 1, Prentice-Hall éd., N.J.).

# DOBRAMENTOS ACTIVOS

- dobramento por deslocamento vertical diferencial ou bending; p. ex. em domas de intrusão diapírica e nas correspondentes bacias marginais (piercing);

20

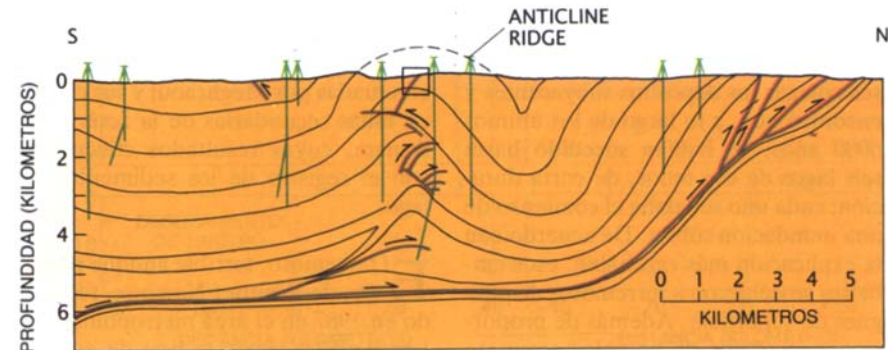
*E.S. Rasmussen et al. / Tectonophysics 300 (1998) 199–225*



Rasmussen et al., 1998

# DOBRAMENTOS ACTIVOS

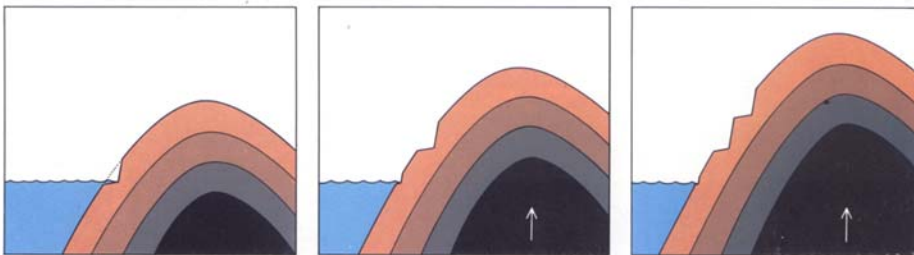
- Dobras activas por flexão acima de um descolamento (***decollement buckling***) (Exemplo: **Anticlinal de Ventura Avenue**, NW Los Angeles)



7. UNA FRACTURACION INTENSA invade el núcleo del anticlinal Ventura Avenue. Esta fractura, ocasionada por el combamiento de los estratos, produce muchas fallas (*lineas moradas*). El análisis de los datos de sondeos petrolíferos (*lineas verdes verticales*) efectuados en el anticlinal muestra que el pliegue se aplana a unos seis kilómetros de profundidad. De acuerdo con la explicación más satisfactoria, había una falla casi horizontal, o cabalgamiento, en la base del pliegue. Los movimientos a lo largo de fallas que se bifurcan de esta falla principal hacen que el pliegue se doble y crezca, como ocurre en el modelo ofrecido en la figura 5.

Stein e Yeats, 1989

- 9 terraços marinhos;
- 1800 a 5600 anos
- Levantamento co-sísmico
- I. recorrência – 600 anos



2. ANTICLINAL VENTURA AVENUE, cerca de Ventura, en el estado de California. Se trata de uno de los pliegues, o estructuras geológicas en las que los sedimentos estratificados se han combado hacia arriba hasta formar un arco amplio, que ha experimentado uno de los levantamientos más rápidos del mundo. Los sedimentos combados pueden verse en la fotografía (arriba). En los flancos

del anticlinal, el oleaje de tormentas ha excavado nueve terrazas. La datación por carbono de las conchas marinas indica que la edad de las terrazas varía entre 1800 y 5600 años. Puesto que el nivel del mar no ha variado de modo apreciable durante ese lapso temporal, la explicación más sencilla es que las terrazas las han levantado temblores que se han ido sucediendo cada 600 años (abajo).

Stein e Yeats, 1989

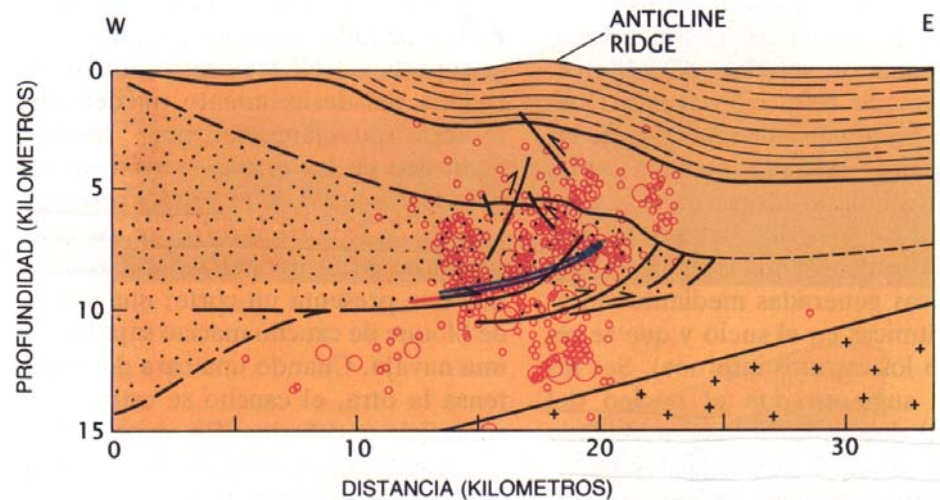
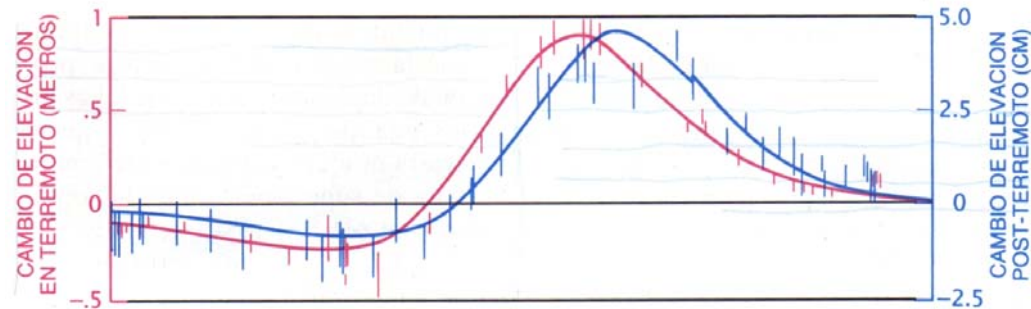


# DOBRAMENTOS ACTIVOS

- Dobras activas relacionadas com deslizamento em falhas inversas cegas localizadas em profundidade (**fault-propagation folding**, **dobras de propagação de falha**);

- A **dobra anticlinal** associada à **propagação** da **falha inversa cega** que gerou o sismo de **Coalinga** (*Anticlinal Ridge*, com 750m de altura), elevou-se 75cm durante o sismo. Após o terramoto, a falha continuou a deslizar assismicamente durante 4 anos e a dobra superficial amplificou-se cerca de 10%, deslocando-se a charneira vários quilómetros para E

Stein e Yeats, 1989

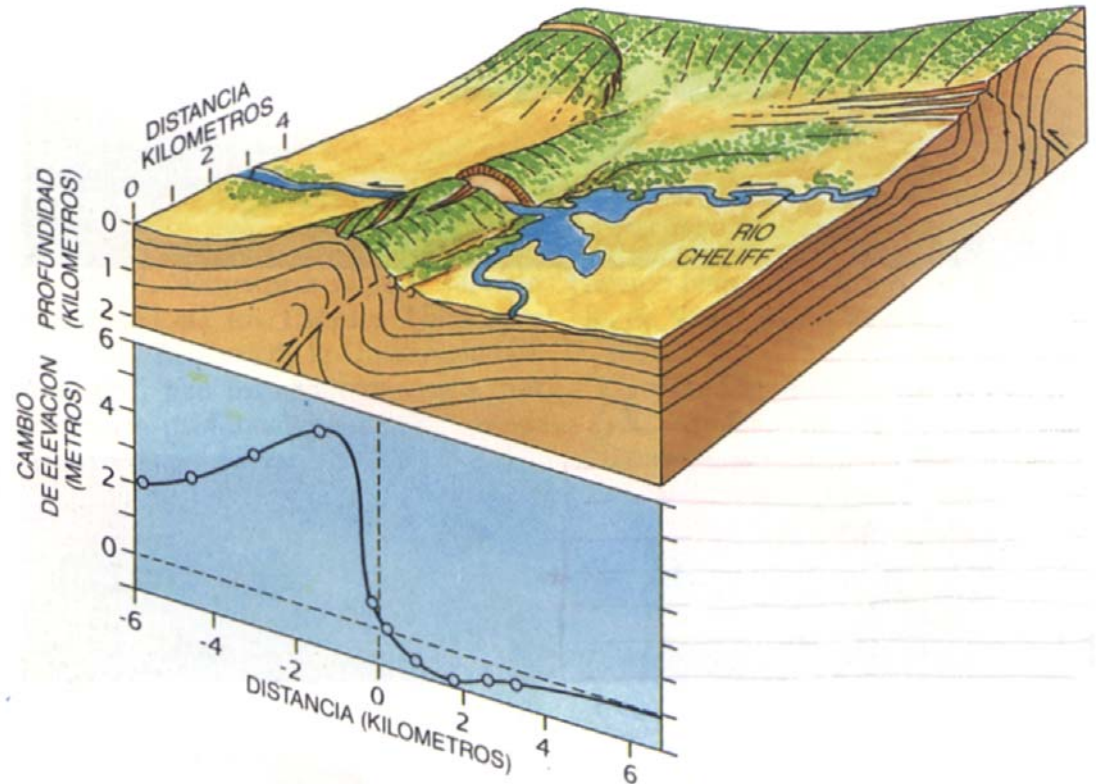


3. TERREMOTO DE COALINGA em 1983 de  $M = 6,5$ . Provocou a surpresa de los científicos en California al no estar asociado con ninguna falla de superficie. La deformación del pliegue superior (representada en función de la distancia a un origen arbitrario) se muestra según las líneas verticales rojas en el diagrama de arriba. La línea roja simboliza la deformación producida en un modelo de falla ciega que se muestra en el recuadro inferior. También se ofrece en azul (*recuadro superior*) la deformación habida en los cuatro primeros años subsiguientes al terremoto. La deformación en curso indica que la falla continúa propagándose en el núcleo del pliegue, como muestra la curva azul del recuadro inferior. Los perfiles sísmicos revelan la existencia de muchas fallas en profundidad en esa región del anticlinal (*segmentos más cortos, recuadro inferior*). La repartición muy dispersa de las réplicas (círculos) que siguieron al terremoto principal de 1983 (*círculo mayor*) puede atribuirse a pequeños desplazamientos a lo largo de esas fallas. Tal distribución contrasta con la de un terremoto de falla de superficie, en donde todas las réplicas se alinean según la falla.

# DOBRAMENTOS ACTIVOS

- dobras activas associadas a uma geometria curva em descolamentos ou em falhas cavalgantes activas (**fault bend folding; hanging-wall antiform**).

- O sismo de Al Asnam ( $M_w=7,3$ , Argélia) foi produzido por um deslizamento de cerca de 3 a 6m numa falha inversa, a vários quilómetros de profundidade. Apenas no segmento central da falha é que uma parte significativa do deslocamento alcançou a superfície topográfica (2m). Contudo, o anticlinal associado à falha elevou-se 5m, enquanto o vale adjacente se afundou 1m, barrando o curso do rio Cheliff que atravessa o relevo tectónico por uma garganta epigénica (por antecedência)

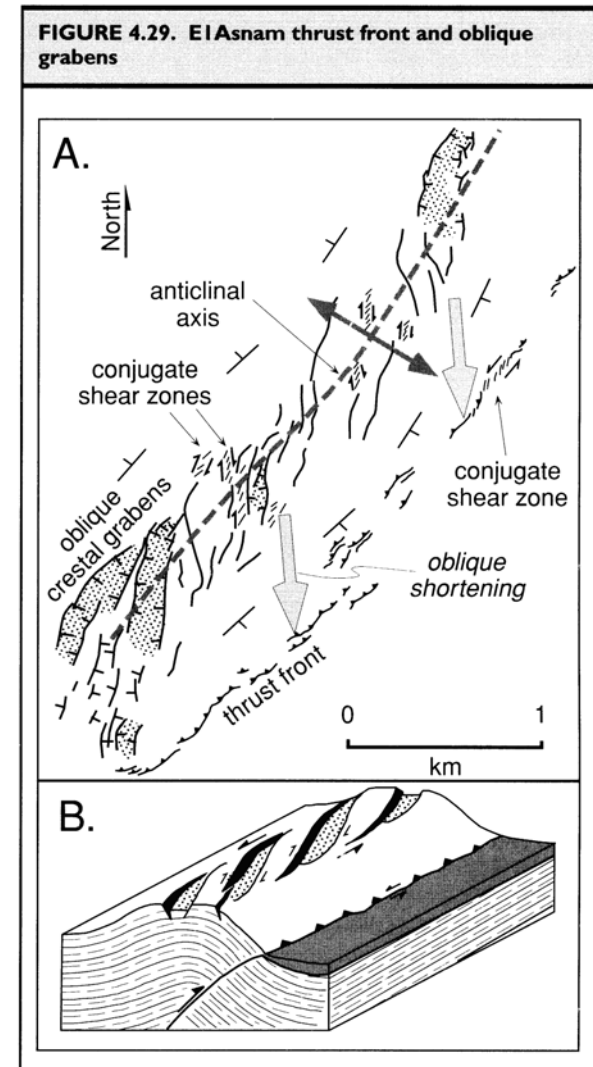
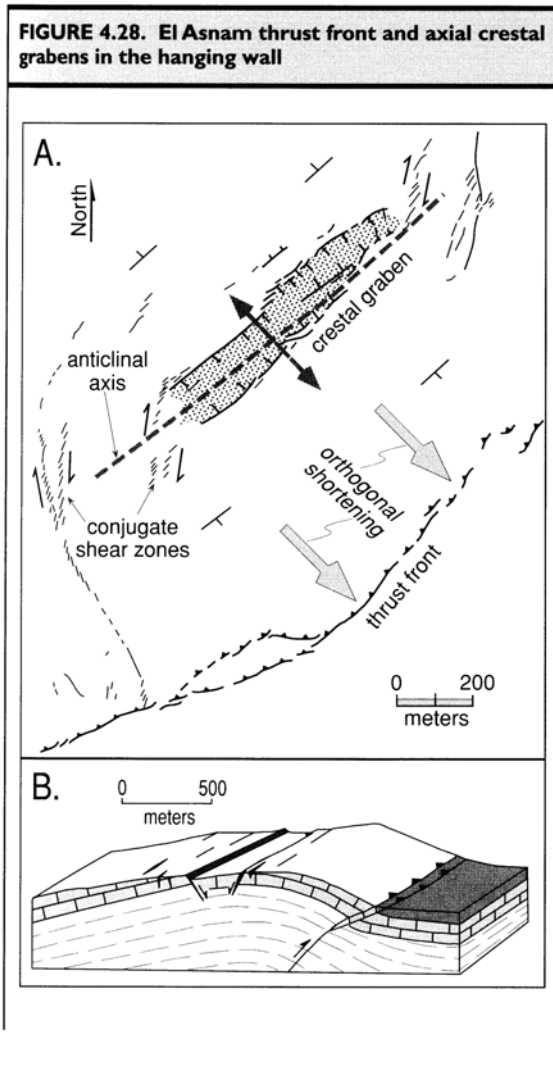


6. TERREMOTO DE EL ASNAM, de magnitud  $M = 7,3$  en 1980. El temblor represó el río Cheliff. El río había excavado una garganta a través del pliegue en el lugar del terremoto, pero durante el seísmo el suelo se elevó cinco metros, cerrando el cauce. En el lago que se creó temporalmente se acumularon aluviones; las excavaciones efectuadas bajo esta nueva capa de aluvión han aportado pruebas de otros seis lagos de corta vida durante los últimos 6000 años. Probablemente han sido el resultado de terremotos “de pliegue” que se han repetido cada milenio. La gráfica muestra el cambio de elevación del suelo a través del pliegue; la similitud entre la curva del levantamiento y la forma del pliegue indica que estos sucesos han creado el doblez.

Stein e Yeats, 1989

# DOBRAMENTOS ACTIVOS – *BENDING MOMENT* FAULTS

- Mecanismo de **deformação** nas dobras - **tangencial longitudinal**: formam-se **falhas secundárias normais** na **zona de charneira**, delimitando pequenos **graben**:
  - orientados paralelamente ao cavalgamento principal se este tem movimento de *dip-slip* puro
  - ou obliquamente a ele se o movimento tem componente de desligamento (*oblique-slip*). (Ex. Al Asnam).



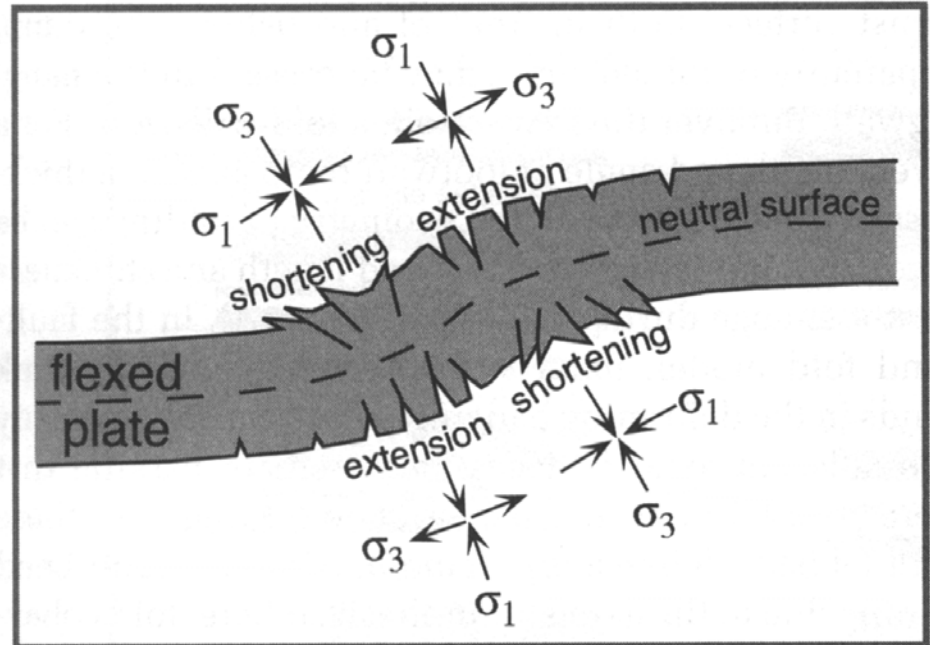
Burbank e Anderson, 2001

## BENDING MOMENT FAULTS

• Esta falhas normais geradas na área axial de antiformas de cavalgamento, por extensão no arco externo do dobramento, são geralmente designadas por **bending-moment faults**;

- **amortecem-se em profundidade**, terminando na superfície neutra do arqueamento e, conseqüentemente, limitam-se ao nível superficial da crosta
- **não têm capacidade para gerar sismicidade importante**, embora a sua **ruptura** seja **cosmística** de eventos maiores originados na falha de cavalgamento principal.

FIGURE 4.31. Bending-moment faults resulting from flexure of an elastic plate

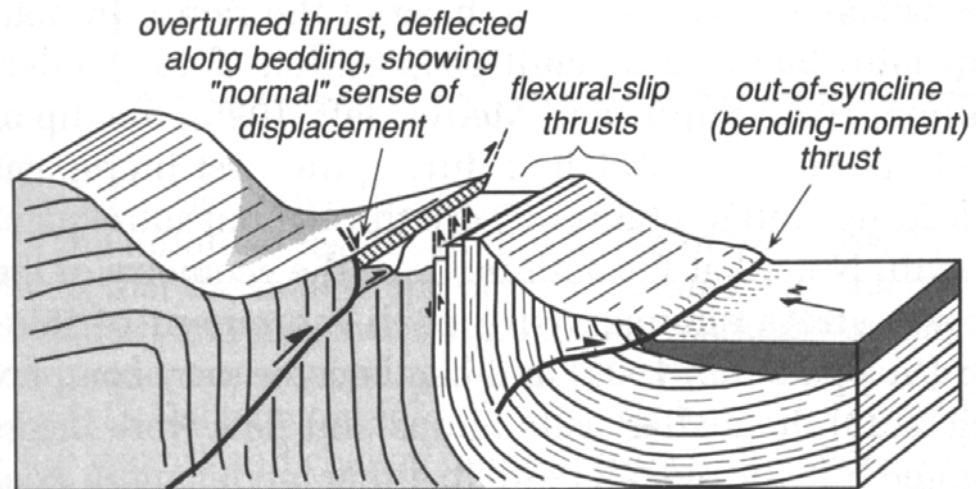


Folding causes stretching along the outer, convex surface of the warped layer, while shortening is induced along the inner, concave surface.

# DOBRAMENTOS ACTIVOS – FALHAS DE DELIZAMENTO FLEXURAL

- Há ainda a considerar as **falhas de deslizamento flexural**, resultantes de movimento em superfícies de estratificação devido a **dobramento por deslizamento flexural**.

FIGURE 4.32. Complex fault geometries in the El Asnam earthquake



Multiple rupture patterns result from thrust faulting in folded strata. Coseismic slip along bedding planes creates flexural-slip faults and overturning of the thrust plane in places. Footwall folding leads to out-of-syncline thrusting. Modified after Philip and Meghraoui (1983).

# FALHA DO ALQUEVA -MOMENT BENDING?

