

5.3 VALORACIÓ I APLICACIÓ DELS ALGORITMES DE MODELITZACIÓ CINEMÀTICA DEL 2DMove

Els algoritmes de modelització analitzats en aquest apartat, *Fault Parallel Flow* (FPF) i *Inclined Shear* (IS), són tècniques que simulen el moviment a favor d'una falla del seu bloc superior sense considerar la naturalesa mecànica dels materials involucrats, i segons unes regles geomètriques ja descrites en la introducció d'aquest capítol. Per tant, variables com poden ser l'angle de falla o la cisalla angular (π) són introduïdes a priori per l'usuari, i fenòmens observats a la naturalesa com la variació del desplaçament al llarg d'una falla, la partició de la deformació, la deformació en el bloc inferior, canvis en la cisalla interna o el funcionament simultani de falles no poden ser contemplats si no es realitzen intervencions durant la modelització. Tenint això en compte, s'ha procedit a aquest estudi amb l'objectiu de valorar els avantatges i inconvenients de la aplicació d'aquests algoritmes, així com d'establir un procediment de treball.

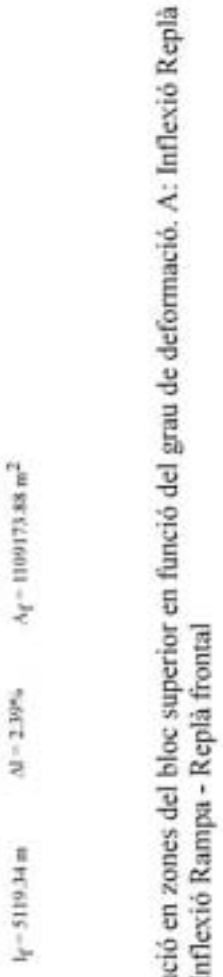
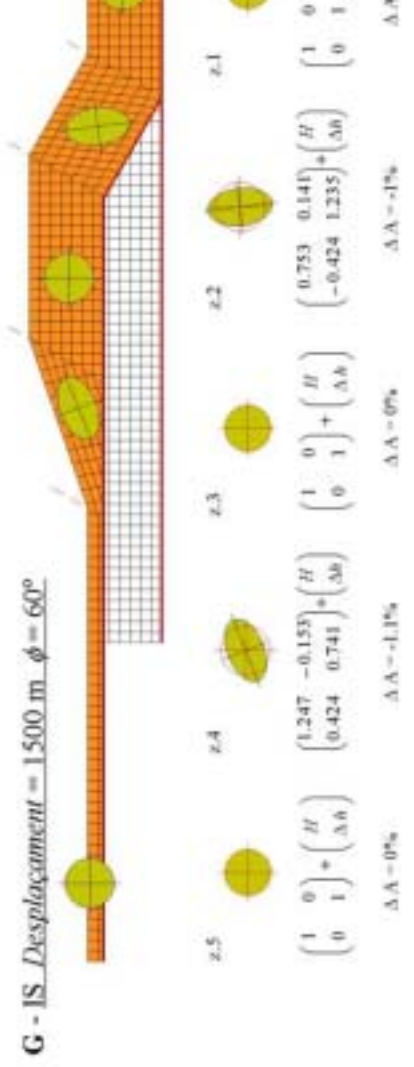
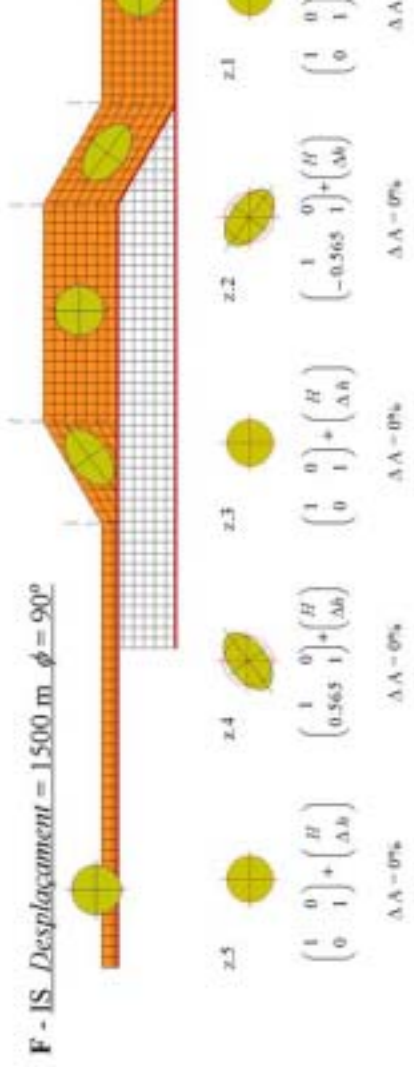
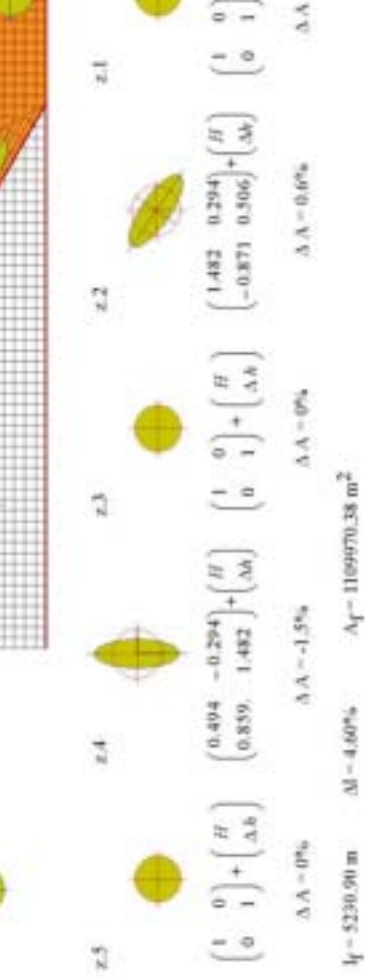
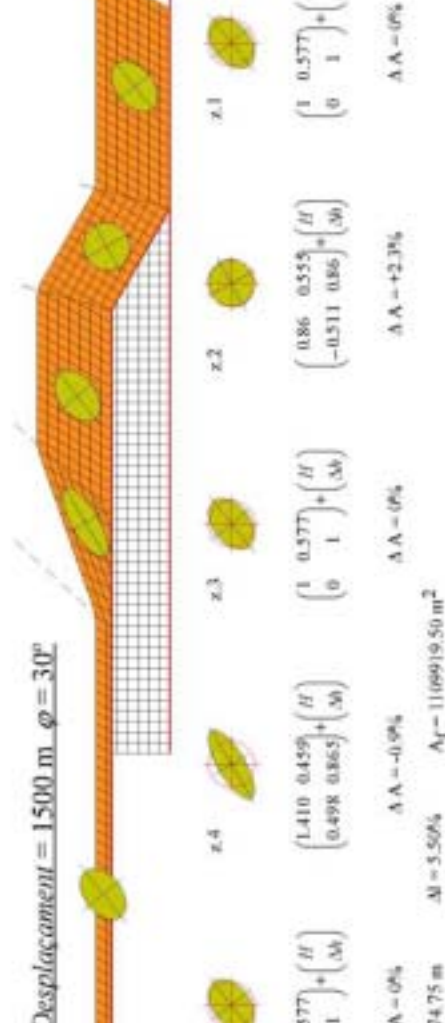
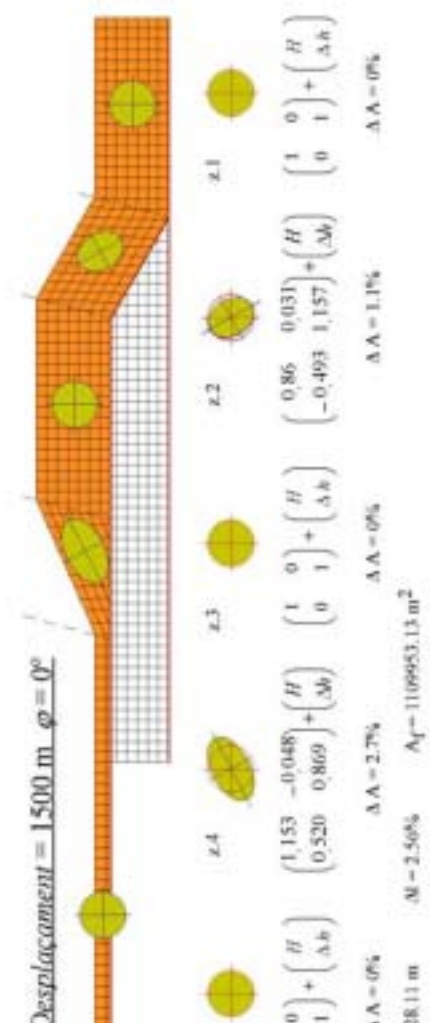
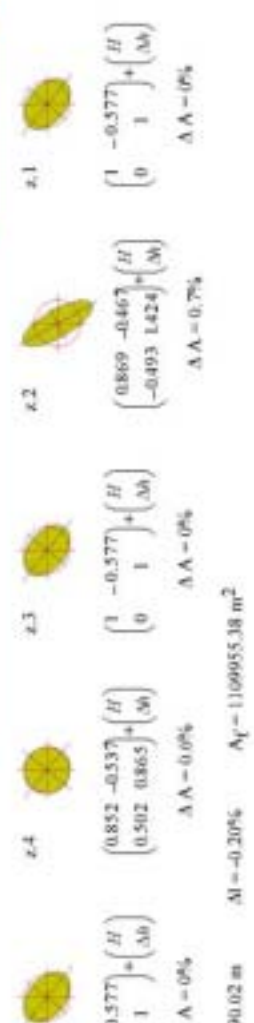
Seguint una estructura similar a la de l'apartat anterior, l'anàlisi d'aquestes tècniques es divideix en quatre parts. En la primera es compara el funcionament dels dos algoritmes en funció de les variables utilitzades a partir de models teòrics simples, amb l'objectiu de definir quin és l'àmbit d'aplicació de cada un i quins són els avantatges i inconvenients que presenten. En la segona, es discuteixen els resultats de l'aplicació d'aquests algoritmes com a eina de restitució i com a eina de modelització en avanç en els models de sorra, a partir de les reconstruccions obtingudes en l'apartat anterior d'anàlisi dels algoritmes de restitució del 2DMove. Tot seguit es procedeix a una discussió similar, però utilitzant exemples de la zona de les Nogueres, i com a conclusió d'aquest apartat es presenta el procediment dissenyat per a la modelització cinemàtica 2D de les seccions 2D de les seccions d'aquesta zona.

5.3.1 Anàlisi de models teòrics

El primer model produït consisteix en un encavalcament simple, replà – rampa – replà, que creua un bloc rectangular de 5km de llarg per 350m d'alt, amb una superfície de 1.74 km², en el que s'ha representat una graella quadrangular per poder visualitzar la deformació interna de la làmina. El replà inferior de l'encavalcament es troba a la base del rectangle, la rampa està inclinada 30° i el replà superior es troba a una alçada de 315m, i per tant, l'àrea total del bloc superior és de 1.11 km² (fig. 5.35 A).

L'estudi ha consistit a aplicar a aquest model la deformació equivalent a un desplaçament de 1500m utilitzant els dos algoritmes i diferents valors per a la cisalla angular (π)¹ en el cas de l'algoritme FPF i l'angle de cisalla (λ) en el cas de l'IS. Un cop aplicada s'ha mesurat la deformació interna a partir de les cel·les deformades i s'ha calculat possibles canvis d'àrea i de longitud, tant de línies individuals com del total

¹ Com que el programa utilitza el mateix símbol (π) per designar el valor de la cisalla angular de l'algoritme FPF i l'angle de cisalla de l'algoritme IS, per evitar confusions els diferenciaré en el text a partir d'aquest punt utilitzant la notació π per FPF i λ per IS. Per fer referència a l'angle de rampa utilitzaré el símbol ζ , i per als replans η .



H - Distribució en zones del bloc superior en funció del grau de deformació. A: Inflexió Replà Rampa, B: Inflexió Rampa - Replà frontal

del model deformat, tenint present que el transport és el mateix per a tots els models, però el que canvia és la distància entre el límit posterior i el límit frontal del bloc superior. L'anàlisi dels resultats ens permet comparar tant el control sobre la deformació de l'angle de cisalla o la cisalla angular en un mateix algoritme, com la variació d'estil tectònic en funció del mecanisme de deformació triat, per a diferents valors de π i λ .

Els angles² triats per a π són de -30° , 0° i 30° i per a λ de -60° , 90° i 60° . Aquest valors corresponen a orientacions sintètiques i antitètiques determinades a partir de l'angle de rampa (ζ), ja que en el cas de FPF, la relació entre els dos paràmetres (π i λ) condiciona la preservació de la longitud de les línies i de les àrees.

En valorar els resultats obtinguts, la primera observació que cal fer és la persistència en tots els models de cinc zones en el bloc superior diferenciades per la seva deformació interna i per la seva relació geomètrica amb el bloc inferior. Aquestes zones corresponen a les següents situacions: replà caudal de bloc superior sobre replà inferior de bloc inferior (Z1), replà caudal de bloc superior sobre rampa de bloc inferior (Z2), replà caudal de bloc superior sobre replà superior de bloc inferior (Z3), rampa de bloc superior sobre replà frontal de bloc inferior (Z4) i replà frontal de bloc superior sobre replà frontal de bloc inferior (Z5).

La següent característica d'aquests models és l'homogeneïtat de la deformació en cada una d'aquestes zones, sense que es produeixi cap disminució de la seva intensitat en allunyar-se de la falla, a diferència del que proposa Elliot (1976) pel desplaçament d'una pila de fulls a favor d'una falla de geometria molt similar a la d'aquests models (fig. 5.36). L'origen d'aquesta diferència és que el model no té en compte les diferents forces internes i externes que actuen durant l'emplaçament de l'escata, i per tant la deformació de cada zona (Z1, Z2, ...) és homogènia i no hi ha dissipació de l'energia al llarg de la làmina. Això implica que la geometria del model deformat amb el 2DMove no depèn de la seva escala.

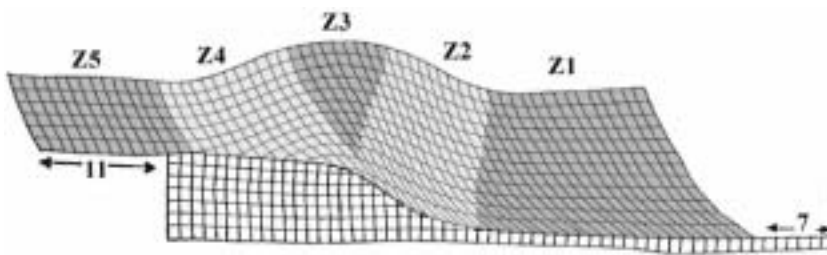


Fig. 5.36.- Distribució de la deformació en una pila de fulls desplaçada a favor d'un encavalcament. En diferents tons de gris s'indiquen aproximadament les zones de deformació descrites en la figura 5.35 E (Elliot, 1976; modificat)

Una altra diferència entre els models deformats amb FPF i el model d'Elliot (fig. 5.36) és que el desplaçament al llarg de la falla és constant, i no es dona cap variació d'aquest en el sentit de transport. Això és degut a que la cisalla angular s'aplica homogèniament a tota la làmina abans d'iniciar-se el desplaçament. A més, la cisalla és paral·lela a les línies de flux, és a dir a la falla, i no a l'estratificació com en els models de lliscament flexural de Suppe (1983). Per tant, el desplaçament (en termes de canvi de coordenades) del marcador superior de la làmina a la part del darrera, resultant de la suma del transport i π , no és igual al de la

² Els signes positiu i negatiu davant l'angle indiquen una rotació dextra i senestra, respectivament, sense tenir cap implicació en termes d'avantpaís i rerepaís. El valor 0° correspon a la vertical en l'algoritme FPF i a l'horitzontal en l'IS.

part frontal. D'aquesta forma, la diferència entre el desplaçament horitzontal dels límits caudal i frontal del marcador superior és de +11 % per $\pi = -30$; 0 % per $\pi = 0$; i -10 % per $\pi = 30$. En els models deformats amb IS no hi ha cap component de cisalla angular fora de les zones de rampa, i en conseqüència, el desplaçament horitzontal dels límits posterior i frontal del model és idèntic en tots els casos, i per tant, la longitud final de tots els models IS és la mateixa.

La deformació amb Fault Parallel Flow (FPF)

En l'estudi en detall dels models deformats amb FPF s'observa que en cada un, Z1, Z3 i Z5, que corresponen a situacions de replà sobre replà, presenten el mateix grau de deformació, que està determinat pel valor imposat de π (veure també figura 5.37). La deformació d'aquestes zones correspon a una cisalla simple, com es pot veure en els tensors de deformació corresponents, més una translació amb una component vertical ($\div h$) i una horitzontal (H), que dependran de la seva posició inicial respecte a la rampa (Taula 5.8). A més, el fet que la deformació correspongui a cisalla simple implica que aquestes zones no experimenten cap canvi de superfície.

		$\pi\#$	Tan π	Desplaçament	Heave (H)	$\div h$
Model B	Z1	-30	-0.577	1500	1500	0
	Z3	-30	-0.577	1500	1415	315
	Z5	-30	-0.577	1500	1500	0
Model C	Z1	0	0	1500	1500	0
	Z3	0	0	1500	1415	315
	Z5	0	0	1500	1500	0
Model D	Z1	30	0.577	1500	1500	0
	Z3	30	0.577	1500	1415	315
	Z5	30	0.577	1500	1500	0

Taula 5.8.- Valors corresponents a la modelització de les zones Z1, Z3 i Z5 amb l'algoritme FPF de la figura 5.35. El desplaçament és igual per a tots els models. El Heave (H) és el desplaçament horitzontal, i és diferent per Z3 en cada model, igual que $\div h$, que representa la diferència entre l'alçada inicial i final d'un punt.

En tots els models s'observa una variació dels valors H i $\div h$ de Z3 respecte a les altres zones (Taula 5.8). Això és degut a que aquesta és l'única de les tres zones que ha estat transportada al llarg de la rampa, i per tant, tenint en compte que el desplaçament a favor de la falla és constant en tot el model, i que Z3 ha viatjat tant sobre replans com sobre rampa, hi ha una disminució del desplaçament horitzontal (Heave). En conclusió, l'algoritme FPF implica que l'escurçament horitzontal no és constant, sinó que varia en funció de la ubicació inicial i final de cada punt.

Pel que fa a les rampes (Z2 i Z4) la situació és més complexa. La primera consideració a fer és que la deformació en aquestes zones es divideix en tres components: 1) cisalla paral·lela a la falla, 2) rotació en traspasar la inflexió de falla i 3) translació a favor de la falla.

En els tres models, a Z2 els marcadors inicialment horitzontals són paral·lels al traçat de la falla ($\varpi \neq 0$), com és d'esperar per un replà de bloc superior que flueixi paral·lelament a una falla (fig. 5.37). En canvi, el

valor de χ no correspon a $90-\pi$ com en les zones Z1, Z3 i Z5, sinó que és de 42° pel model B, 61° pel model C i 92° pel model D. Els marcadors verticals romanen subparal·lels als de Z1, Z3 i Z5.

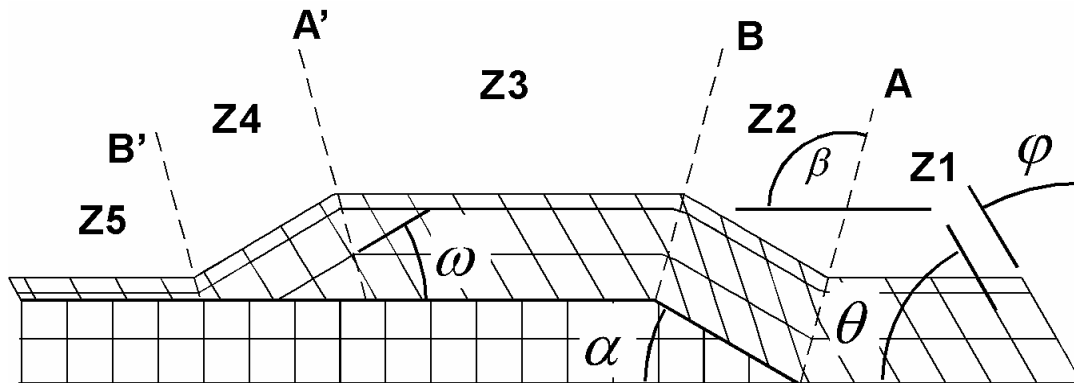


Fig. 5.37.- Representació esquemàtica dels angles a què es fa referència en el text; ζ correspon a l'angle de rampa en relació a l'horitzontal, i $\pi\hat{h}$ la cisalla angular en relació a la vertical; ω i χ són angles entre els marcadors i la falla, per tant, quan ens trobem en les zones Z1, Z3 i Z5 seran respecte als replans, i quan ens trobem en les zones Z2 i Z4 respecte a la rampa.

En un model teòric que suposi un lliscament paral·lel a les capes, la deformació de la zona Z2 és el resultat de la superposició³ d'una cisalla angular i una rotació, que a més, pot generar desplaçaments diferencials entre les cel·les de capes adjacents (fig. 5.36). Per tant, la forma del tensor de deformació per a aquesta zona serà:

$$\begin{pmatrix} \frac{R}{C} \cos \zeta & \sin \zeta \\ \frac{C}{T} \sin \zeta & \cos \zeta \end{pmatrix} \Delta \begin{pmatrix} \frac{R}{C} \\ \frac{C}{T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tan \pi\hat{h} \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{R}{C} H \\ \frac{C}{T} h \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{R}{C} \cos \zeta & \tan \pi\hat{h} \cos \zeta \\ \frac{C}{T} \sin \zeta & \cos \zeta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \sin \zeta \\ 2 \tan \pi\hat{h} \sin \zeta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{R}{C} H \\ \frac{C}{T} h \end{pmatrix} \quad (1)$$

Aquest tensor no implica canvis d'àrea, ni dels valors de ω i χ . Els valors de H i \hat{h} seran diferents per a cada punt en funció de la seva distància a la falla i a la inflexió A en l'estadi indeformat. Contreras i Suter (1990; 1997) proposen un model de lliscament paral·lel a la falla, com els generats amb l'algorisme FPF, en el que l'operador (1) també es vàlid per a la zona Z2, ja que la cisalla s'aplica en l'estadi inicial, quan es troba tota sobre el replà inferior, i per tant, les capes són paral·leles a la falla. En canvi, en cap dels tres models deformats per FPF la deformació observada correspon al tensor (1), ja que la deformació que experimenta la làmina en passar per la inflexió A (fig. 5.35 H) no consisteix només a una rotació rígida (fig. 5.38).

La figura 5.38 A, B i C mostra que la deformació que ha sofert en realitat la Z2 (polígons liles) equival al resultat d'aplicar a la cel·la (polígons gros) una nova cisalla simple paral·lela a la rampa, amb un angle $\pi\hat{h}$ é

³ En aquest capítol utilitzaré aquest terme quan faci referència a la suma de mecanismes de deformació, i el terme anglès *overthrusting* quan em refereixi a superposició tectònica per encavalcament.

-28°, respecte a la perpendicular a la falla. Aquesta cisalla paral·lela a la rampa (T_{ij}) és l'expressió de la cisalla flexural ($\pi^{\#}$) associada a la rotació que es produeix al passar la bisectriu A (línia fixa; figura 5.37).

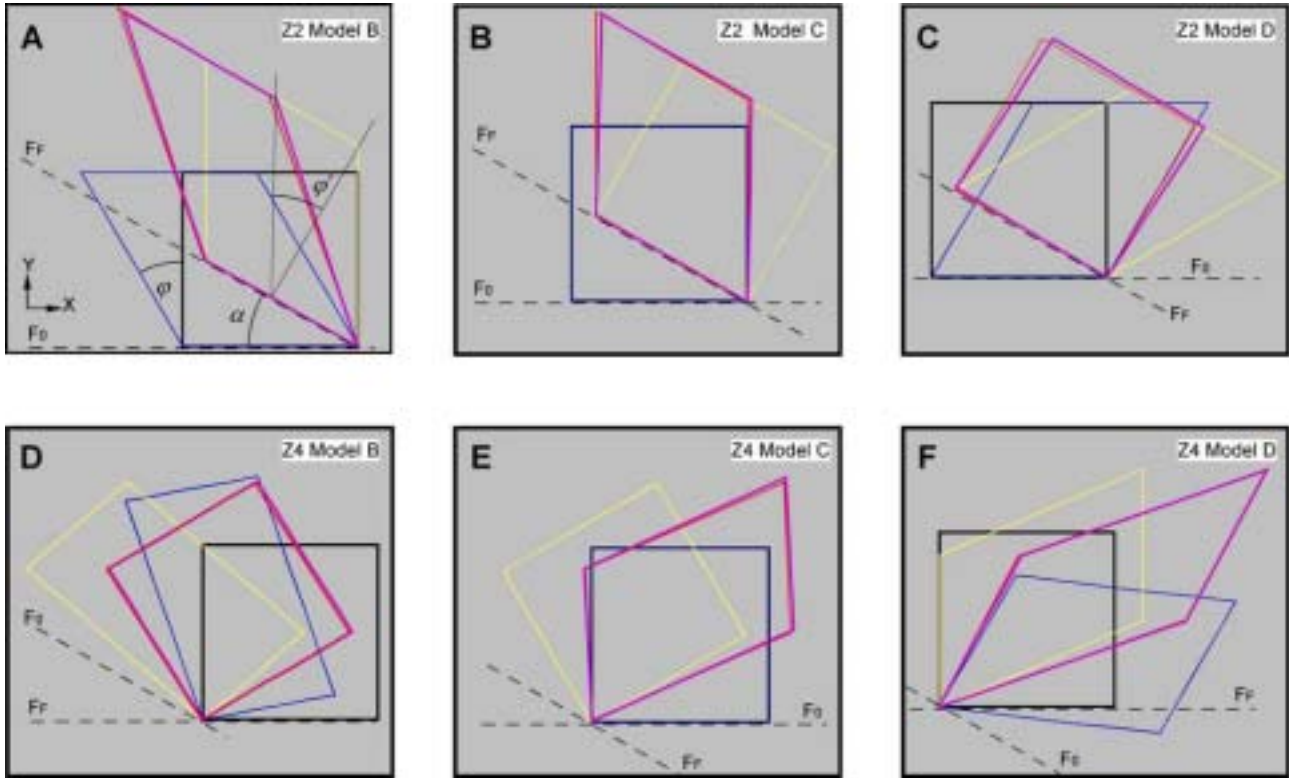


Fig. 5.38.- Representació esquemàtica de la deformació d'una cel·la unitària en les zones Z2 i Z4 de cada model FPF. En negre, la cel·la indeformada; en blau, el resultat d'aplicar la cisalla paral·lela a la falla inicial; en groc, el resultat de rotar la cel·la cisallada; en vermell, la deformació finita calculada numèricament; i en lila la deformació finita observada en la figura 5.35. A A s'indiquen els elements de referència que s'ha utilitzat per al càlcul dels tensors de deformació. F_0 - falla inicial; F_f - falla final; ζ - angle de rampa; π - cisalla angular inicial; i $\pi^{\#}$ cisalla angular associada a la inflexió de falla.

La deformació interna total de Z2 (κ_{ij}^{Z2} , tensor (2)) garanteix la preservació de la longitud de les línies i la potència de les capes, i l'augment d'àrea observat en els tres casos (<2.5%) probablement sigui degut a la suma d'errors de resolució gràfica del programa i errors de mesura. La forma del tensor de deformació κ_{ij}^{Z2} és:

$$\kappa_{ij}^{Z2} = \begin{pmatrix} \begin{matrix} R \\ T \end{matrix} \begin{matrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{matrix} \begin{matrix} \Delta \\ \Delta \end{matrix} \begin{matrix} R \\ T \end{matrix} \begin{matrix} \cos \zeta & \sin \zeta \\ \sin \zeta & \cos \zeta \end{matrix} \begin{matrix} R \\ T \end{matrix} \begin{matrix} \tan \pi^{\#} \\ 1 \end{matrix} \end{pmatrix} \quad (2)$$

on el primer tensor (T_{ij}) correspon a una cisalla simple paral·lela a la rampa, amb $\pi^{\#} = -28^\circ$, i per tant no pot ser expressat de la mateixa forma que un tensor de cisalla en els replans, si s'analitza la deformació finita des d'un sistema de referència extern (x-y, figura 5.38 A). El tensor que defineix aquesta cisalla paral·lela a

la rampa correspon al resultat d'aplicar una rotació del mateix valor l'angle de rampa ($Z \neq \zeta = 30$)⁴, al tensor d'una cisalla simple paral·lela a l'eix x. Per calcular-lo s'ha utilitzat les equacions per al canvi del sistema de referència desenvolupades per Means (1983), on i i j prenen els valors 1 i 2. La forma resultant d'aquest tensor de cisalla paral·lela a la rampa, que tampoc implica cap canvi d'àrea, és:

$$T_{ij} = \begin{pmatrix} \cos^2 Z & \cos Z \sin Z \tan \pi/2 \\ \sin Z \cos Z & \sin^2 Z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 4 \cos Z \sin Z \tan \pi/2 \\ \sin Z \cos Z \tan \pi/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos Z \\ \sin Z \end{pmatrix} \quad (3)$$

L'aplicació del tensor (2) per a les Z2 de cada model (cel·les vermelles, figura 5.38) ha donat valors pràcticament idèntics als empírics de la figura 5.35, confirmant que els canvis d'àrea obtinguts en aquesta figura són el resultat d'errors de mesura i de resolució gràfica.

La deformació de Z4 segueix un patró similar a Z2 en els tres casos. L'angle inicial entre els marcadors horitzontals i la superfície d'encavalcament es manté constant, $\omega \neq 30$, i l'angle χ no correspon exactament a $90 + \pi$, sinó que és de 58° pel model **B**, 87° pel model **C** i 118° pel model **D**. La descomposició de la deformació finita de cada model, seguint el mateix raonament que per a Z2, ens porta a una conclusió molt similar, amb la diferència que la rotació generada en la bisectriu B (fig. 5.37) i la cisalla associada a aquesta rotació són de sentit invers ($Z = -30$, $\pi \neq \pi^B = 28$). Per tant, la deformació finita observada (polígons liles, figura 5.38) equival a aplicar una cisalla simple paral·lela al replà a la cel·la (polígons grocs), que a la seva vegada és el resultat d'aplicar una cisalla paral·lela a la rampa (polígons grocs, $\pi = 30$) i una rotació (polígons blaus) a la cel·la inicial (polígons negres). D'aquesta forma, el tensor que caracteritza la deformació interna de les zones Z4 de cada model és:

$$K_{ij}^{Z4} = \begin{pmatrix} \tan \pi^B \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos Z & \sin Z \\ \sin Z & \cos Z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T'_{11} & T'_{12} \\ T'_{21} & T'_{22} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Les principals diferències amb Z2 són: 1) la cisalla inicial correspon a una cisalla paral·lela a la rampa, i per tant cal transformar l'operador corresponent (p.ex.: en el model **B**, T_{ij} $Z = 30$, $\pi = 30$); 2) la rotació és antihorària ($Z = -30$); i 3) la cisalla final és paral·lela al replà superior ($\pi^B = 28$), i per tant no és necessari realitzar cap transformació. El tensor (4) per a les Z4 dels models **B**, **C** i **D** s'ajusta a la deformació observada llevat d'algunes variacions negligibles.

A Z4 la cisalla final paral·lela al replà té el mateix significat que la cisalla paral·lela a la rampa de Z2, és a dir, la deformació del flanc frontal (*forelimb*) per cisalla flexural. Si no s'apliqués aquesta cisalla, la rotació de Z4 es traduiria en una cisalla extra de les capes de Z5. Tanmateix, és important assenyalar que tot i que

⁴ El símbol Z representa les rotacions associades a qualsevol inflexió, ja sigui la inflexió replà – rampa com un canvi d'angle de la rampa.

aquesta deformació manté sempre l'àrea de la secció, només preserva la longitud i la potència de les capes en el cas que $\pi = -\zeta$ (model **B**).

Z4 està limitada per les superfícies axials A' i B' (fig. 5.37), que es desplacen a favor de la falla juntament amb Z4 durant tota la deformació, a diferència de les superfícies axials A i B (fig. 5.37), que corresponen a les bisectrius de les inflexions de rampa i es mantenen fixes (veure fig. 3.7). En conseqüència, l'orientació de les línies A' i B' estarà definida pel tensor de deformació (4), ja que totes dues creuen la superfície axial B, i per tant, la seva inclinació dependrà dels valors de π i ζ . Per tal que la potència i longitud de les capes es mantingui constant, la línia A' ha de ser la bisectriu entre els marcadors inicialment horitzontals de les zones Z3 i Z4, i la línia B' de les zones Z4 i Z5. Com he dit, aquesta relació només es dóna en el model **B**, on $-\pi = \zeta = 30^\circ$ (fig. 5.35). En els altres models (**C** i **D**), la longitud dels marcadors horitzontals augmenta en un 26% i un 50%, respectivament, i la potència de les capes disminueix un 17% i un 35%.

Contreras i Suter (1990) estableixen la relació entre la disminució de potència i la cisalla angular final (*shear strain*), segons l'equació (5), on t_f correspon a la longitud final d'una línia inicialment perpendicular a l'estratificació i t^* correspon a la potencia final de la capa.

$$t^* = t_f \sin(\alpha_f / 2 / \chi_f) \tag{5}$$

Però el model de FPF de Contreras i Suter (1990) només considera la cisalla paral·lela a la falla introduïda per l'usuari, i tan sols aplica una rotació rígida al bloc superior quan creua una inflexió de falla. Per tant, per calcular els valors t_f , α_f i χ_f d'acord al tipus de deformació aplicat per l'algoritme FPF del 2DMove, cal realitzar algunes variacions a les equacions que descriuen els canvis de longitud i angle del seu model. Les igualtats corregides són:

$$l_n = \left[l_{n41}^2 \sin^2 \iota_{n41} + 2 l_{n41} \cos \iota_{n41} + l_{n41}^2 \tan^2 \pi^n \right]^{1/2} \tag{6}$$

$$\iota_n = \arctan \left(\frac{\sin \iota_{n41}}{\cos \iota_{n41} + 2 \sin \iota_{n41} \tan \pi^n} \right) \tag{7}$$

on n correspon al nombre de zones traspassades per l'element analitzat, l_n correspon a la longitud final d'una línia determinada (i.e.: t_f), ι_n a la seva orientació final respecte a la falla (i.e.: α_f ; χ_f), i π^n correspon a la nova cisalla angular aplicada en cada zona n . Per exemple, una línia de Z3 del model **B** tindrà una longitud (l_3) i una orientació (ι_3) finals, resultants de la combinació de $\pi^{\#} = -30$, $\pi^{\#} = -28$ i $\pi^{\#} = 28$ i els corresponents valors de l_2 i ι_2 , i de $\pi^{\#}_3$ i ι_3 . En tots els casos, $\pi^{\#} = \pi^{\#}$ però $\pi^{\#}$ dependrà de quines superfícies axials creui cada zona. Aquestes equacions ((5), (6) i (7)) també són vàlides per a models més complexes,

que impliquin més inflexions de falla, tot i que caldrà calcular quin és el valor de π en cada tram de l'encavalcament.

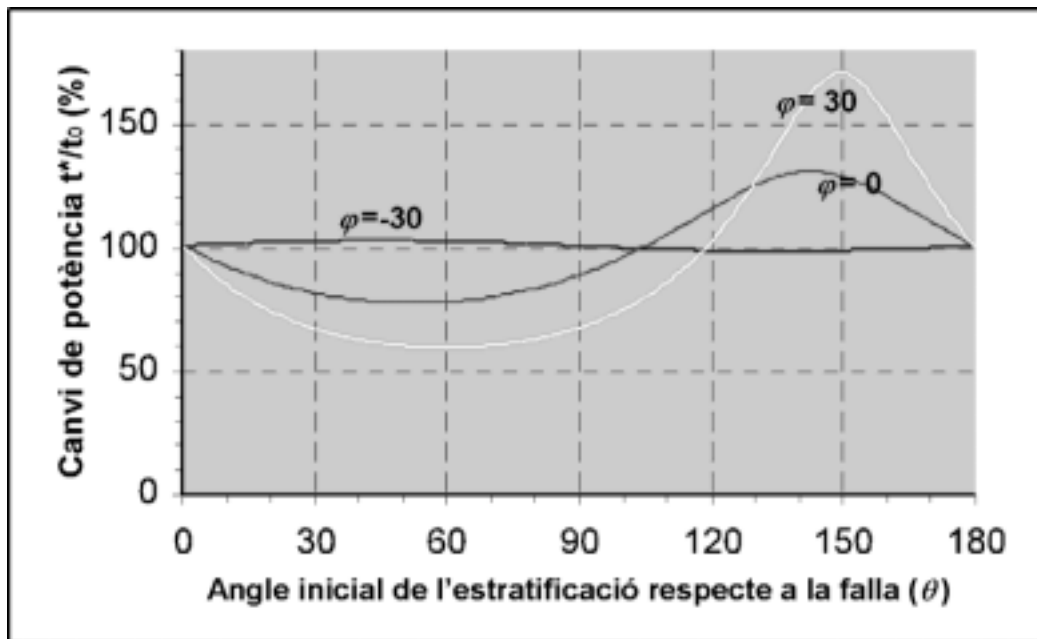


Fig. 5.39.- Variació de la potència de l'estratificació en Z4 en funció de l'orientació inicial de l'estratificació respecte a la falla. model $\pi = -30^\circ$; model $\pi = 0^\circ$; i model $\pi = 30^\circ$.

Utilitzant les equacions (6) i (7) he calculat el valor de t_f , ω_f i χ_f de Z4 en cada model per a totes les orientacions inicials possibles de l'estratificació (respecte a l'encavalcament), per veure com canvia la potència en el flanc frontal (*forelimb*), en funció de la cisalla angular inicial (π). El resultat (fig. 5.39), obtingut a partir de les equacions (5, 6 i 7), mostra com la preservació de la potència és més o menys constant per al model B, on $\pi = -30 = \zeta - \pi^B$. En els altres casos les variacions de potència són més importants, amb un màxim d'augment del 170% per a capes orientades a 150° de la falla i $\pi = 30$, i una disminució màxima del 59%, també corresponent a $\pi = 30$, i a una orientació inicial de 60° .

Per altra banda, la deformació progressiva que ha sofert Z3 no és tan simple com sembla en principi. Tot i que la deformació finita que presenta aquesta zona és idèntica a la de Z1 i Z5, és evident que la seva història de deformació no és la mateixa, ja que durant el moviment de la làmina, la Z3 s'ha desplaçat al llarg de la rampa, creuant les bisectrius A i B (fig. 5.40). El fet que la deformació finita d'aquestes zones sigui la mateixa, ens indica que la deformació que experimenta el bloc superior en creuar la bisectriu B és la inversa de la que experimenta en creuar la bisectriu A. Per tant, la deformació associada a la bisectriu B consisteix en una rotació i una cisalla simple paral·lela a la falla (κ_{ij}^B), d'igual magnitud però de sentit contrari a la de la bisectriu A (κ_{ij}^A). Tot i que al model cinemàtic aquesta deformació progressiva no és evident a primera vista, situacions com la de la zona Z3 a la natura han de presentar evidències d'aquesta deformació.

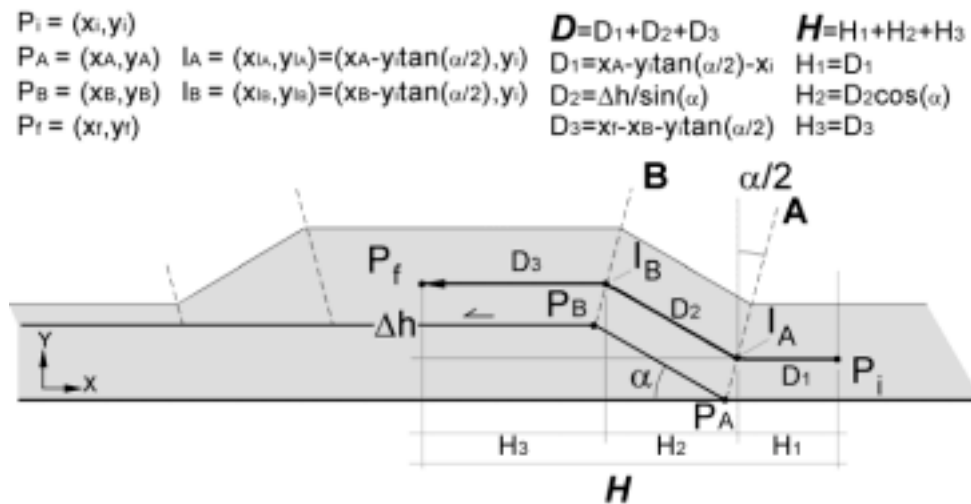


Fig. 5.40.- Configuració dels paràmetres necessaris per calcular la relació entre el desplaçament total (D) i el desplaçament horitzontal (H). D_1 i D_3 són funció de la posició inicial de P_i respecte a l_A , i D_2 és funció de P_i , de $\div h$ i de ζ .

L'última variable de la deformació per FPF és el desplaçament. Com es mostra a la figura 5.35 i a la Taula 5.8, aquesta variable té dues components, el desplaçament horitzontal o *heave* (H) i l'augment d'alçada ($\div h$). El desplaçament horitzontal d'un punt es pot descompondre en tres parts, H_1 , H_2 i H_3 (fig. 5.40), que corresponen respectivament al desplaçament sobre el replà inferior (D_1), la rampa (D_2) i el replà superior (D_3). Tenint en compte que les components H_1 i H_3 són horitzontals, la relació entre el desplaçament total i el desplaçament horitzontal, estarà condicionada per H_2 , i conseqüentment per $\div h$ i ζ . Per tant, si desenvolupem les igualtats de la figura 5.40, la relació entre D i H serà:

$$H = D_1 + D_2 \cos \zeta + D_3 \quad (8)$$

Si substituïm aquesta expressió en els tensors de deformació de la figura 5.35, obtindrem que els vectors de desplaçament per a cada zona són:

$$\left. \begin{matrix} \bar{D}_{z1} \\ \bar{D}_{z5} \end{matrix} \right\} \left(\begin{matrix} \text{R} \\ \text{C} \\ \text{TM} \end{matrix} \right) \left. \begin{matrix} \bar{D}_{z2} \\ \bar{D}_{z3} \\ \bar{D}_{z4} \end{matrix} \right\} \left(\begin{matrix} \text{R} \\ \text{C} \\ \text{TM} \end{matrix} \right) \left. \begin{matrix} 2 \div h / \cos \zeta \\ 4 \div h / \sin \zeta \\ \div h \end{matrix} \right\} \quad (9)$$

$$P_f \mid \left\{ \begin{array}{l} \pi_{ij} \Delta P_i \ 2 \ \bar{D} \\ \kappa_{ij}^A \Delta \pi_{ij} \Delta P_i \ 2 \ \bar{D} \\ \kappa_{ij}^B \Delta \kappa_{ij}^A \Delta \pi_{ij} \Delta P_i \ 2 \ \bar{D} \\ \kappa_{ij}^B \Delta \pi_{ij} \Delta P_i \ 2 \ \bar{D} \\ \pi_{ij} \Delta P_i \ 2 \ \bar{D} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} D \{ \overline{x_{LA} x_i} \\ \overline{x_{LA} x_i} \{ D \{ \overline{x_{LB} x_{LA}} \ 2 \ \overline{x_{LA} x_i} \\ \overline{x_{LB} x_{LA}} \ 2 \ \overline{x_{LA} x_i} \{ D \\ \overline{x_{LB} x_{LA}} \ 2 \ \overline{x_{LA} x_i} \{ D \\ \overline{x_{LB} x_{LA}} \ 2 \ \overline{x_{LA} x_i} \{ D \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} x_i \{ x_A \\ x_i \{ x_A \\ x_i \{ x_A \\ x_A \{ x_i \{ x_B \\ x_B \{ x_i \end{array} \right. \quad (10)$$

Finalment, com a resum d'aquest apartat d'anàlisi de la deformació per FPF, aquest algoritme correspon a la igualtat (10), com a resultat de la combinació dels diferents tensors de deformació calculats per a cada zona.

La deformació amb Inclined Shear (IS)

En els models **E**, **F** i **G** de la figura 5.35, deformats per IS també es poden diferenciar les zones Z1 a Z5, condicionades per la relació entre els replans i les rampes de cada bloc. Z1, Z3 i Z5 no presenten deformació interna finita, i en canvi, Z2 i Z4 presenten una deformació interna generada en traspasar les superfícies axials LA i LB (fig. 5.41). L'orientació d'aquestes línies és λ, i la deformació associada a cada una és la inversa de l'altra. Per això Z3, que ha creuat les dues línies, presenta una deformació interna finita nul·la.

A la figura 5.41 es mostra que la deformació finita de Z2 i Z4 correspon a una cisalla simple, paral·lela a LA i LB, amb cisalles angulars oposades, α - α resultants de la imposició que les línies paral·leles a la falla mantinguin aquesta condició, és a dir, si α = 0 llavors α = 0 (fig. 5.41). En els models de la figura 5.35, els valors resultants de α calculats empíricament, són 49° per al model **E**, 30° per al model **F** i 30° per al model **G**.

Per tant, el tensor (T_{ij}) que representa la deformació finita de Z2 i Z4 correspon a una cisalla angular (α - α respectivament), paral·lela a λ. Recuperant l'equació per al canvi de sistema de referència de Means (1983) la forma final de T_{ij}, i conseqüentment la relació entre els tensors associats a LA i a LB són:

$$T_{ij} \mid \left\{ \begin{array}{l} \cos^2 \lambda \ 2 \ \cos \lambda \sin \lambda \tan \vartheta \ 2 \ \sin^2 \lambda \quad 4 \cos \lambda \sin \lambda \ 2 \ \cos^2 \lambda \tan \vartheta \ 2 \ \sin \lambda \cos \lambda \\ \sin \lambda \cos \lambda \ 4 \sin^2 \lambda \tan \vartheta \ 2 \ \cos \lambda \sin \lambda \quad \sin^2 \lambda \ 4 \sin \lambda \cos \lambda \tan \vartheta \ 2 \ \cos^2 \lambda \end{array} \right\} \quad (11)$$

$$LA_{ij} \mid \left\{ \begin{array}{l} LA_{11} \quad LA_{12} \\ LA_{21} \quad LA_{22} \end{array} \right\}; LB_{ij} \mid \left\{ \begin{array}{l} LA_{22} \quad 4 \ LA_{12} \\ LA_{21} \quad LA_{11} \end{array} \right\}; LA_{ij} \Delta LB_{ij} \mid \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ 1 \end{array} \right\} \quad (12);(13);(14)$$

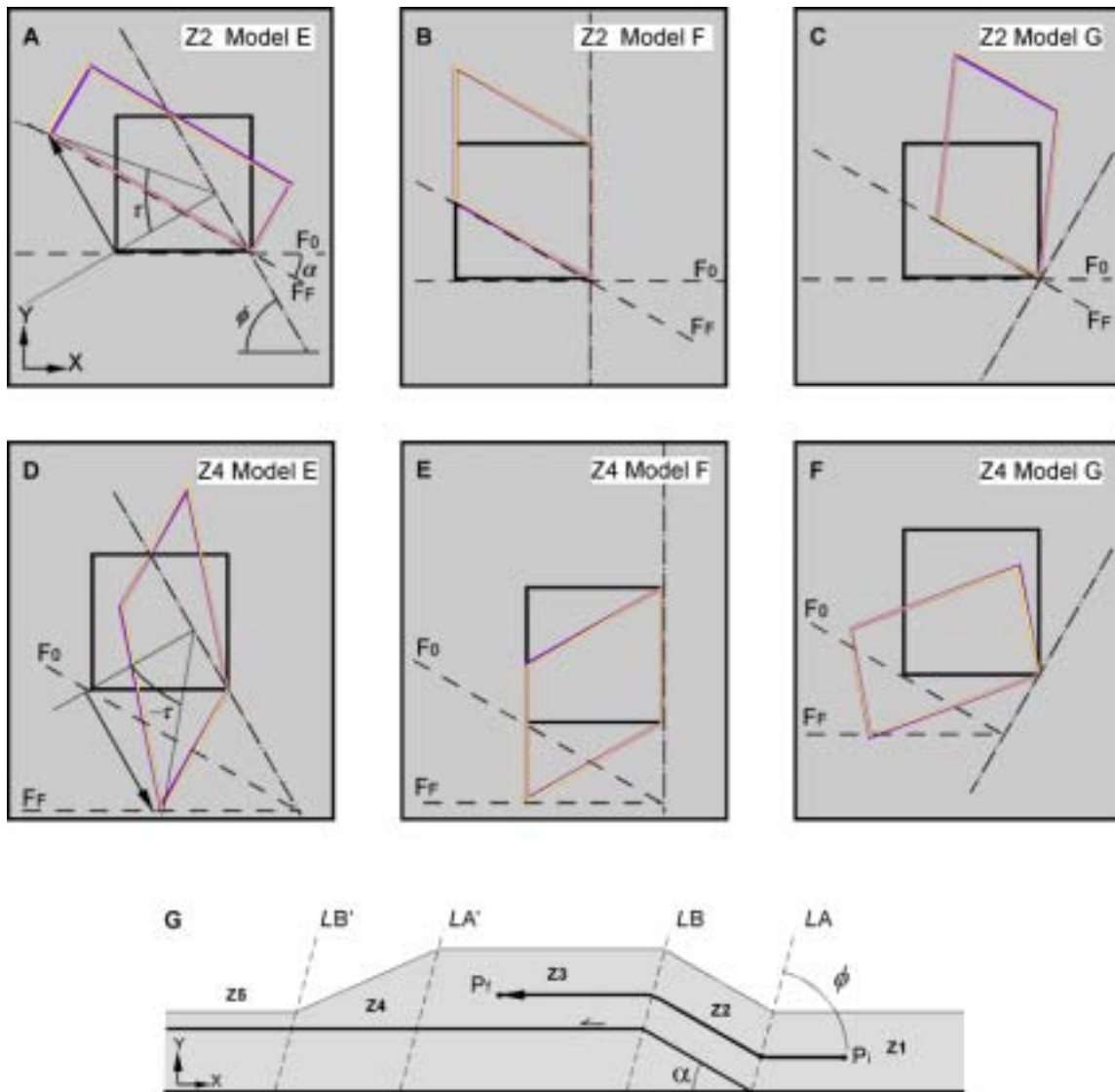


Fig. 5.41.- Representació esquemàtica de la deformació d'una cel·la unitària en les zones Z2 i Z4 de cada model IS. En negre, la cel·la inicial; en groc, el resultat d'aplicar el tensor (11) a la cel·la inicial; i en lila, la deformació empíricament observada en la figura 5.35. A A i D s'indiquen els elements de referència que s'ha utilitzat per al càlcul dels tensors de deformació. F_0 - falla inicial; F_F - falla final; ζ - angle de rampa; ϑ cisalla angular; i λ direcció de cisalla. G.- Representació esquemàtica del funcionament de l'algoritme IS i dels elements estructurals més importants.

Aquest tensors no comporten canvis d'àrea, però sí canvis de longitud i gruix, tal i com es pot veure a la figura 5.35 i a la 5.41, on es mostra la deformació finita d'una cel·la unitària paral·lela als eixos d'un sistema de referència extern x-y. En aquesta darrera figura, també s'observen els canvis de longitud i potència d'una capa en funció de si es troba a Z2 o a Z4, i per tant en funció de la relació angular entre aquesta capa i la falla. El càlcul del canvi de longitud d'una línia respecte a la falla és més complex que en els models deformats per FPF, i la fórmula que expressa aquest canvi és:

$$\varpi = \arctan \left(\frac{12 \frac{\tan \varpi \tan \omega \tan \zeta}{14 \tan \varpi \tan \zeta} + 2 \tan \omega \frac{1}{\tan \zeta}}{2 \tan \omega \frac{1}{\tan \zeta} + 2 \tan \omega \frac{\tan \varpi \tan \omega \tan \zeta}{14 \tan \varpi \tan \zeta}} \right) \quad (15)$$

on ϖ és l'angle final entre una superfície i l'encavalcament, ϖ_0 és l'angle inicial entre la mateixa superfície i l'encavalcament, $\omega = 90 - \lambda$ i ζ és l'angle de rampa.

A partir de l'equació (15) es pot calcular l'evolució dels angles de rampa finals en relació a l'angle de rampa i la direcció de cisalla. Els resultats es representen gràficament en la figura 5.42; a partir d'aquests valors es pot calcular els canvis de potència de les capes en funció de la seva orientació, ζ i λ (fig. 5.43).

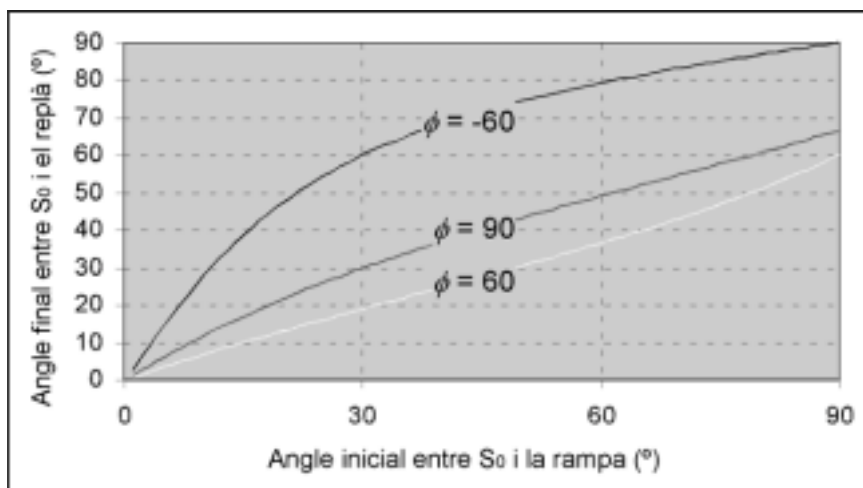


Fig. 5.42.- Evolució dels angles de rampa finals (ϖ) entre l'estratificació (S_0) i la falla en funció de l'angle inicial (ϖ_0) per a diferents valors de λ i una inclinació de la rampa en el bloc inferior de 30° . Gris: model E; rosa: model F; i groc: model G.

Una de les diferències més importants entre els models deformats per FPF i els deformats per IS és l'orientació de les superfícies axials LA , LB , LA' i LB' . En els primers, LA i LB representen la bisectriu de les inflexions que pugui presentar la falla, i LA' i LB' el resultat de la deformació de les bisectrius de les inflexions de falla després d'aplicar la cisalla associada a aquest algoritme. En canvi, en els models deformats amb l'algoritme IS l'orientació de les superfícies axials és λ , segons un sistema de referència extern, i per tant, són totes paral·leles entre sí. La implicació més directa d'aquesta diferència és que mentre que en els models deformats per FPF només es produeixen petits canvis del gruix de les capes a Z4, en els models deformats per IS aquests canvis es produeixen tant a Z2 com a Z4 (fig. 5.43) i estaran determinats per l'equació:

$$t' | \frac{t \cdot \cos(\varpi' 2 \omega)}{\cos(\pi 4 \varpi,)} \quad (16)$$

on ϖ' és l'angle entre la perpendicular a l'estratificació i l'horitzontal ($\varpi' = \varpi - \zeta + 90$), i la resta de paràmetres tenen el mateix significat que a la equació (15). És a partir d'aquesta igualtat que s'han elaborat els gràfics de la figura 5.43.

En la figura 5.43 A, on es mostra la potència final de les capes respecte a la inicial (t_f/t_i), es pot veure que per a angles de rampa (ζ) baixos la variació de la potència és petita, però a mida que augmenta ζ les variacions tant positives com negatives són molt més importants. En conseqüència, aquest gràfic il·lustra la importància que té el valor ζ en l'elecció de λ . La meua opinió és que qualsevol modelització que utilitzi aquest algoritme s'ha de mantenir en un rang de variació de potència d'entre el 60 % i 150 % i més enllà, els valors són poc realistes. Per altra banda, tampoc cal oblidar que aquest tipus de modelització només dona solucions geomètriques sense considerar els aspectes mecànics de la deformació.

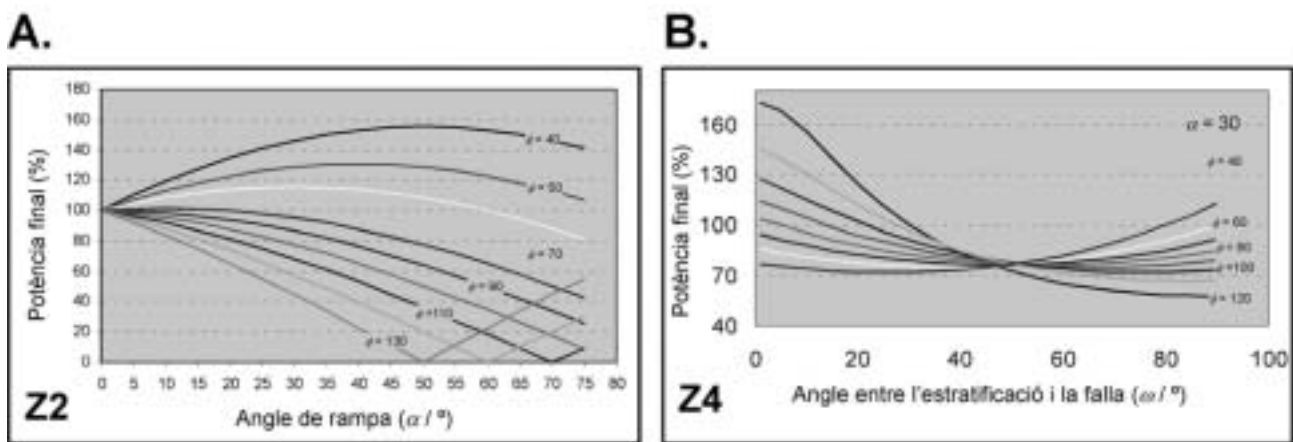


Fig. 5.43.- Relació entre la potència inicial i final (t_f/t_i , %) de les capes en creuar les línies LA (Z2) i LB (Z4), en funció de diferents paràmetres dels models IS. **A.**- Influència en Z2 de l'angle de rampa en el canvi de potència de nivells inicialment horitzontals per a diferents valors de λ . **B.**- Canvis de potència en Z4 en funció de l'orientació inicial de les capes per a diferents valors de λ .

La figura 5.43.C mostra que els canvis de potència de les capes en Z4, en funció de la seva relació inicial amb la rampa, inclinada 30° en els meus models, es mantenen dins un rang de variabilitat més o menys acceptable per a direccions de cisalla d'entre 40° i 120°, especialment per els nivells inicialment subhoritzontals, ja que presenten variacions de potència d'entre el 70% i el 100%, independentment de quin sigui el valor de λ . De totes formes, les direccions de cisalla que mostren una variabilitat més baixa per al rang d'orientacions de l'estratificació analitzades es troben entre 60° i 110°, i per tant sembla aconsellable la utilització d'aquests valors per modelitzar una falla amb un angle de rampa de 30°. La tendència general per a valors de λ baixos és a la pèrdua de potència, sobretot per a angles de falla elevats. Una altra implicació

d'aquest gràfic és l'augment en la variació de la potència amb l'angle de falla, relació que indica que l'elecció de la direcció de cisalla correcta és més important quan més alt sigui l'angle de falla. Finalment, per a angles de cisalla elevats (>100°) s'observa en pràcticament totes les orientacions de falla una recuperació de la potència que porta a relacions t_f/t_i positives.

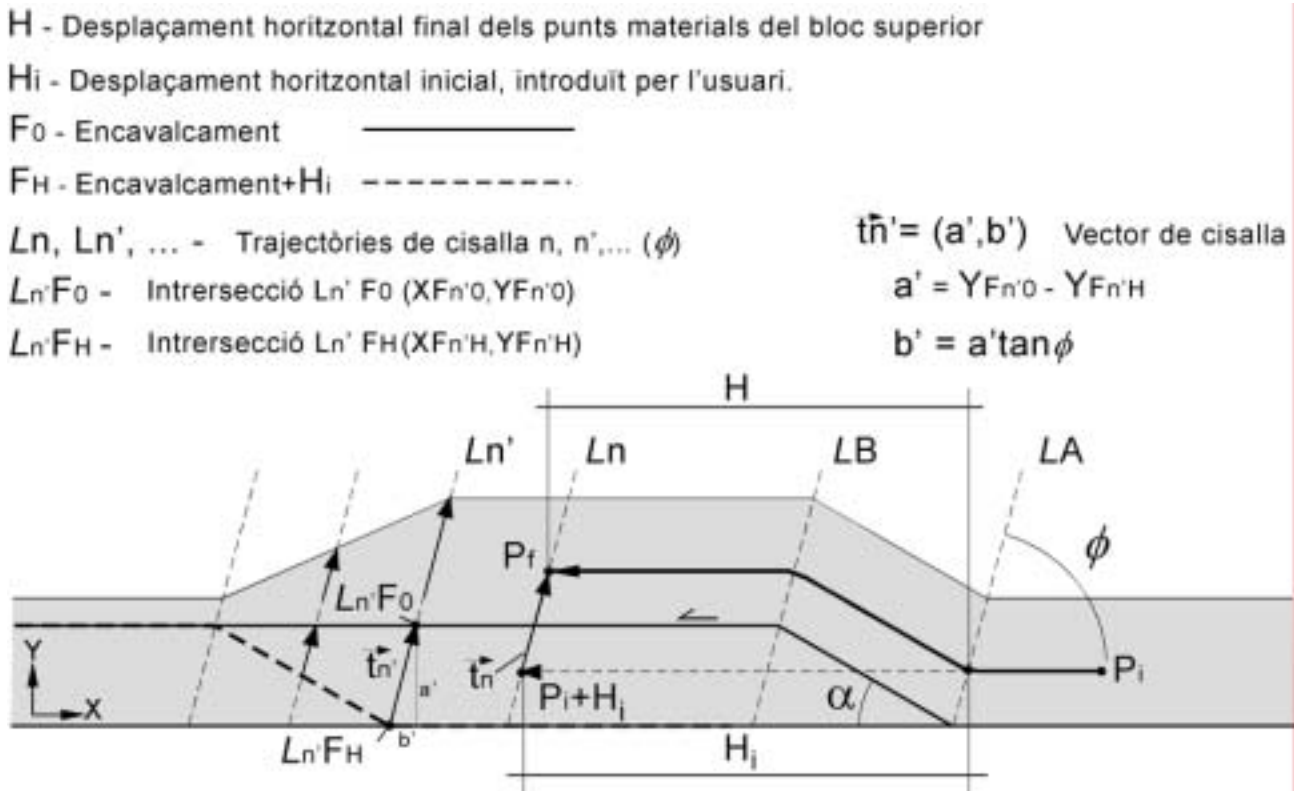


Fig. 5.44.- Esquema dels elements geomètrics que defineixen la deformació per IS. La zona que es troba entre F₀ i F_H correspon a la part del bloc superior que ha de ser traslladada una distància \bar{t}_n' , i en conseqüència $\pm h = a' \bar{N}_0$ i $H = H_i - b'$. En la resta del bloc superior, $H = H_i$, i $\pm h = 0$.

Tot i l'anàlisi de la deformació finita dels models **E**, **F** i **G**, cal completar els tensors de deformació de la figura 5.35 (H, ±h), tenint present que la deformació progressiva associada a la modelització IS no correspon pròpiament a un desplaçament a favor de la falla (fig. 5.44). En concret, el funcionament de l'algoritme consisteix en dos passos: 1) l'aplicació d'un desplaçament horitzontal H_i (valor introduït per l'usuari) al bloc superior indeformat, que anirà a parar a la posició definida per F_H, generant una superposició amb el bloc inferior si es modelitza un encavalcament o l'aparició d'un buit si es modelitza una falla normal, i 2) la posterior translació de tots els punts del bloc superior segons el vector de cisalla definit per λ. La translació serà d'una distància \bar{t}_n' , per a tots els punts situats en un mateix vector de cisalla. Això situarà el bloc superior en el seu lloc (fig. 5.44). En síntesi, aquesta segona part de la deformació per IS consisteix a utilitzar l'algoritme de restitució *Simple Shear Unfolding* com a eina de modelització en avanç, amb el traçat inicial de la falla (F₀) com a superfície *target*, el traçat de la falla desplaçada (F_H) com a superfície de referència, les capes del bloc superior com a marcadors passius, i la direcció de cisalla (L_{n'}, λ) com a *pin*.

A partir de la figura 5.44 es pot deduir la igualtat matemàtica que caracteritza la modelització per IS, que és molt més general que els tensors de deformació finita de la figura 5.35, ja que és vàlida per a totes les zones del bloc superior:

$$P_f \left| P_i 2H_i 2\bar{t}_n ; \begin{matrix} \text{R}_f \\ \text{C} \\ \text{TM}_f \end{matrix} \right| \left| \begin{matrix} \text{R}_i 2 H_i 4 a' \tan v \\ \text{C} \\ \text{TM} y_i 2 a' \end{matrix} \right| \quad (17)$$

on a' correspon a la distància vertical entre les interseccions de F_o i F_H amb el vector de cisalla corresponent (L_n).

Comparació entre els dos algoritmes

En la comparació dels models deformats per FPF i els deformats per IS, s'observa que en tots els casos l'àrea del bloc superior es manté constant, ja que la variació màxima es dona en el model G, i no arriba al 0.1%, fet que indica que les diferències observades són derivades d'errors de mesura a partir dels gràfics. En canvi, pel que fa a la longitud de les "capes", prenent com a referència el marcador horitzontal més alt del bloc superior, la variació pot ser apreciable, i es deu principalment als canvis que es produeixen a Z2 i Z4. El canvi de longitud menor es dona en el model B (-0.2%), amb $\pi = -30$, mentre que en tots els altres models es troba per sobre del 2.5%. En els models deformats per FPF la variació de longitud és conseqüència del valor imposat de π . En primer lloc, aquest paràmetre determina la geometria del límit caudal, i per tant, la distància entre aquest i la bisectriu A (Z1), de tal forma que quan més elevat sigui π , menor serà aquesta distància. La deformació de Z2 no implica cap canvi de longitud ni de potència, ja que les línies A i B corresponen sempre a les bisectrius de la inflexió de falla. En canvi, l'orientació de les línies A' i B' (fig. 5.41) sí que està determinada pel valor de π , i per tant, la distància entre B i A' (Z3) serà diferent per a cada model. En la Z4 aquest canvi d'orientació es tradueix en una disminució de la potència i un augment de la longitud de les capes, donada la inclinació d'aquestes superfícies axials, que no corresponen a les bisectrius dels flancs dels plecs del *forelimb*, a excepció del model B. A Z5 és la variació en l'orientació del límit frontal i de B', associada a π , el que genera canvis de longitud.

Com a síntesi d'aquesta anàlisi de la modelització de l'emplaçament de làmines encavalcants simples, en vista de la geometria final i de la deformació interna dels models de la figura 5.35, les opcions més recomanables per a simular la deformació de roques estratificades a l'escorça superior són les dels models B, C i F. L'elecció final d'un o altre mecanisme i els paràmetres de la deformació s'hauran de basar en l'anàlisi d'indicadors tant cinemàtics com de deformació interna, com per exemple la presència de clivatges i la seva orientació, l'evolució de la potència de les capes al llarg de l'escata a modelitzar, l'aparició i evolució d'estructures de deformació secundàries com poden ser retroencavalcaments o falles normals, indicadors de lliscament entre capes, l'evolució estratigràfica dels sediments sintectònics, etc.

Modelització d'imbricacions múltiples.

Un cop avaluat el funcionament dels mecanismes de modelització amb una sola làmina encavalcant, el següent pas en aquesta anàlisi ha consistit a valorar el funcionament dels algorismes de modelització en sistemes de més d'un encavalcament. Partint d'una situació inicial representada a la figura 5.45 **A**, he fet diversos models en avanç, generant piles d'encavalcaments en seqüència de bloc inferior amb diferent grau d'*overthrusting* (superposició tectònica), utilitzant les mateixes variables de cisalla que en els models **B**, **C** i **F** de la figura 5.35, descartant la opció $\pi = 30^\circ$, un sentit de cisalla poc realista en tectònica d'encavalcaments. Els resultats es presenten a la figura 5.45 **B – G**.

El punt de partida consisteix en una sèrie planoparalela de 425m de potència i 40km de llarg. Aquesta sèrie s'ha dividit en 8 escates de 5 km de llarg, limitades per encavalcaments amb replans a base i sostre de la sèrie, i rampes inclinades 30° . Un cop definit, el model s'ha deformat per emplaçament successiu de les escates amb el mateix desplaçament. El desplaçament de cada làmina encavalcant en els models **B**, **C** i **D** és de 3500m, i en els models **E**, **F** i **G** és de 5000m, la longitud de la pròpia làmina (fig. 5.45). Un cop realitzada la modelització s'ha mesurat 1) l'escurçament horitzontal prenent com a referència el límit posterior de la làmina més endarrerida i el límit frontal de la sèrie (Absolut, X; i en percentatge $\div X$); 2) la longitud del sostre de la sèrie (l), sumant les longituds d'aquesta superfície en cada escata, i el seu canvi respecte a la longitud inicial ($\div l$); 3) el canvi d'àrea total ($\div A$); i 4) el relleu estructural (h) i el seu increment ($\div h$), mesurat entre l'encavalcament basal i el punt més alt del sistema d'encavalcaments (taula 5.9).

Model	Desp. (km)	$\pi^\#$ (°)	$\lambda^\#$ (°) #	l (km)	$\div l$ (%)	A (hm ²)	$\div A$ (%)	X (km)	$\div X$ (%)	h (km)	$\div h$ (%)
A	0	-	-	40.000	-	16.800	-	40.000	-	0.425	-
B	3.5	-30	-	52.489	+31.22	16.798	-0.013	15.500	-61.25	3.400	+700
C	3.5	0	-	40.845	+2.11	16.793	-0.043	15.500	-61.25	1.570	+269
D	3.5	-	90	42.816	+7.04	16.786	-0.083	15.500	-61.25	1.570	+269
E	5	-30	-	40.460	+1.15	16.740	-0.355	0.876	-97.81	3.137	+638
F	5	0	-	48.885	+22.21	18.800	+0.002	5.682	-85.8	3.400	+700
G	5	-	90	47.909	+19.77	16.800	-0.001	5.000	-87.5	3.400	+700

Taula 5.9.- Síntesi de les dades de la figura 5.45. Els models **B**, **C**, **E** i **F** han estat produïts amb l'algorisme FPF i els models **D** i **G** amb l'algorisme IS. Desp.- desplaçament de cada escata; $\pi^\#$ cisalla angular (FPF); $\lambda^\#$ - angle de cisalla (IS); l - longitud del sostre de la sèrie; A - àrea de la secció; X - longitud del sistema d'encavalcaments; h - alçada del sistema d'encavalcaments (relleu estructural).

Els models **B** i **E** (FPF, $\pi = -30$) són els que es diferencien més de la resta, ja que presenten una deformació interna de les làmines superiors més elevada (fig. 5.45).

En canvi, la resta de models presenten geometries similars per al mateix valor de desplaçament, independentment de quin sigui el mecanisme de deformació utilitzat. En la modelització de sistemes d'encavalcaments amb FPF la influència de π és encara més important que en encavalcaments únics. De la mateixa forma que la modelització amb IS, si s'utilitza $\pi^\# = 0$ (fig. 5.45 **C** i **F**), la deformació finita

dels fragments de les escates que es troben sobre replans és nul·la i només les zones que es troben sobre rampes experimenten alguna deformació interna, i l'única diferència entre els dos algorismes és l'orientació de les línies que limiten aquestes zones, amb les conseqüents variacions de longitud i potència de les capes que això pugui comportar. En canvi, quan s'utilitza $\pi \neq 0$ tota la làmina encavalcant presenta deformació interna i la relació angular entre l'escata i l'encavalcament en determina la intensitat.

Quan es modelitza amb el 2DMove un sistema d'encavalcaments en seqüència de bloc inferior, totes les superfícies que es troben per sobre d'un encavalcament funcionen com a superfícies passives, independentment de quina sigui la seva naturalesa prèvia, i experimenten durant el funcionament d'aquest encavalcament la deformació corresponent a la zona en la que es troben. Per tant, la deformació finita d'una làmina encavalcant serà el resultat de la superposició de les successives etapes de deformació a les quals ha estat sotmesa. En conseqüència, quan més antiga sigui una làmina, més deformada estarà. De la mateixa forma que amb una làmina encavalcant simple, els paràmetres que determinaran la deformació interna seran la cisalla angular (π) i la relació amb l'encavalcament, és a dir, la divisió en zones de la figura 5.35 H.

Els models **B** i **C** de la figura 5.45 són un bon exemple de la influència de π en sistemes d'encavalcaments. En aquests models, el desplaçament de cada escata (3500m) la porta com a màxim a formar part de la Z3 de l'encavalcament subjacent, per la qual cosa, quan $\pi = 0$ les escates ja emplaçades només experimentaran la deformació interna associada a la Z2 del nou encavalcament, és a dir, una rotació i una cisalla paral·lela a la rampa (fig. 5.38) en creuar la bisectriu de la inflexió replà – rampa. Si la progressió de la deformació porta aquesta part de la làmina encavalcant a la Z3 de qualsevol dels encavalcaments subjacents, la deformació que ha experimentat serà invertida. El mateix procés d'inversió es dona quan la Z4 d'un encavalcament determinat passa a formar part de la Z2 de qualsevol dels encavalcaments subjacents (fig. 5.45 H). La geometria resultant d'aquest procés és la d'un sistema imbricat d'encavalcaments emplaçat per lliscament flexural, amb preservació de la longitud de les línies i la potència de les capes excepte en el flanc frontal de cada làmina encavalcant ($\pm 1 = +2.11\%$).

La geometria final del model **B** (fig. 5.45) és molt més complexa com a conseqüència del valor de π . Com que aquest valor no és nul, tota la làmina experimenta deformació interna. Això implica, que la deformació associada a l'emplaçament d'un encavalcament es transmet a totes les làmines que tingui per sobre, i en conseqüència, l'elevat grau de deformació interna de les làmines més antigues és el resultat de la superposició de les deformacions associades a tots els encavalcaments. El resultat d'aquest procés es visualitza en la part posterior de cada làmina de la figura 5.45 B. El desplaçament de cada làmina en aquest model implica que els marcadors verticals (en negre) es trobin sempre en la Z1 de tots els encavalcaments que estiguin per davant seu, i per tant, la deformació finita serà el resultat d'aplicar successives vegades una cisalla paral·lela al replà amb $\pi = 30$. En conseqüència, l'angle de cisalla (π) total per a Z1 en cada escata serà, de més antiga a més moderna: -76.1° , -73.9° , -70.9° , -66.6° , -60.0° , -49.1° i -30.0° .

La deformació interna en la resta de zones és el resultat de les relacions de cada làmina encavalcant amb els encavalcaments subjacents, que comporten una complexitat molt elevada com a resultat de les múltiples

combinacions. En general s'observa un augment important de la longitud de les capes ($\div 1 = +31.22\%$) a la part posterior del model i dels angles de Z4 (*forelimbs*) que arriben a estar invertits en les làmines encavalcants 1 (148.4 °), 2 (139.4°), 3 (121.3 °) i 4 (91.7 °).

Una altra diferència important associada al valor de la cisalla angular ($\pi\#$ es dona en el relleu estructural (3400m, model **B**; 1570m, models **C** i **D**). Aquest paràmetre depèn principalment de l'*overthrusting*, que és major en el model **B** com a conseqüència del valor de $\pi\#$ que comporta que la Z3 de la làmina 1 arribi a estar sobre la làmina 8, i el gruix total d'aquest sistema sigui el resultat de la suma de gruixos de totes les làmines. En canvi, en els models **C** i **D** l'apilament màxim és de 4 escates, i per tant el gruix del sistema d'encavalcaments és molt menor.

En els models **E**, **F** i **G** de la figura 5.45 el major desplaçament implica una nova relació entre les zones de cada escata, resultant en una geometria final completament diferent. Els valors $\pi\# 0$ i $\lambda\# 90$ (models **F** i **G**, respectivament) impliquen que cada zona de deformació (Z1, Z2...) estigui sobre el seu equivalent en les làmines subjacents, i els models finals presenten una zona central sense deformació interna (Z3) limitada per dues zones de deformació molt intensa (Z2 i Z4) amb un augment de longitud molt important (**F**: $\div l_f = +22.21\%$; **G**: $\div l_f = +19.77\%$), major quan més antiga sigui la làmina.

En el model **E** la relació entre una escata determinada i les escates subjacents no depèn només del desplaçament sinó que també està condicionada per π . Això es veu si es compara aquest model amb el model **F**; el desplaçament associat a cada làmina encavalcant és el mateix per als dos models, però mentre en el model **F** l'estructura final té la mateixa longitud que les escates individuals, en el model **E** l'apilament té una longitud final que les supera en un 45%. Aquest augment de longitud es localitza a la part frontal dels sistema i implica que quan l'apilament és de més de 3 escates una part del sistema passa a formar part de Z5 del nou encavalcament, fins al punt que la làmina encavalcant 1 es troba pràcticament en la seva totalitat a Z5 de l'encavalcament 7. Com que la deformació associada a Z5 correspon a una cisalla simple (π) paral·lela al replà superior i l'estratificació de les escates d'aquesta zona es troba invertida, la deformació es tradueix en augment de la longitud amb disminució de la potència de les capes i augment de l'angle final entre les capes i la falla (fig. 5.46).

Malgrat la distorsió en el flanc frontal de les làmines superiors, la geometria del model **E** és més realista que la dels models **F** i **G**, conserva la longitud i àrea de les làmines (taula 5.9) i el relleu estructural és lleugerament inferior al dels altres dos models degut a què només un fragment de la part caudal de la làmina 1 es troba sobre la part central del model. Tot i així, la zona pròxima a la vora frontal del model presenta una deformació interna molt elevada. He repetit la modelització amb diferents valors de desplaçament per veure quin és l'efecte de la relació entre longitud i desplaçament de cada escata (fig. 5.47).

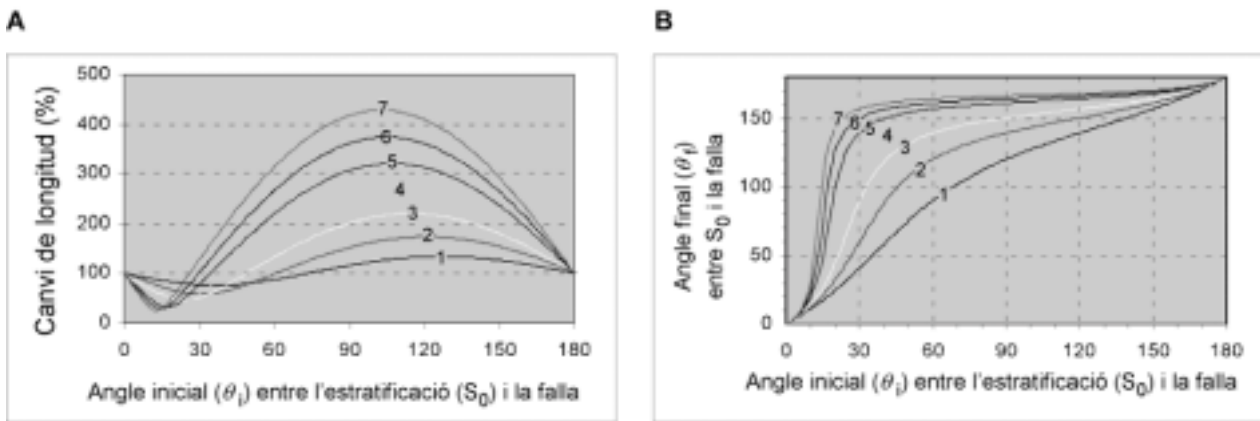


Fig. 5.46.- Deformació finita en Z5 en un sistema d'encavalcaments amb $\pi = -30$. **A.-** Variació de la longitud de les capes en funció de la seva relació angular amb la falla. **B.-** Angles finals entre les capes i la falla en funció de la orientació inicial de les capes. Els nombres indiquen la quantitat d'etapes d'encavalcament corresponents a cada corba. Els valors de cisalla angular acumulada per a cada corba són $\pi_1 = -30$, $\pi_2 = -49.1$, $\pi_3 = -60$, $\pi_4 = -66.6$, $\pi_5 = -70.9$, $\pi_6 = -73.9$, $\pi_7 = -76.1$.

Els resultats mostren que les variacions importants de potència apareixen quan part de l'apilament es troba en la Z5 de l'encavalcament actiu en una etapa determinada. Per a un mateix valor de cisalla angular, el volum de material que s'incorpora a Z5 depèn de la relació entre el desplaçament i la longitud de les làmines encavalcants de tal forma que canvis petits en aquesta relació poden generar diferències importants pel que fa a la variació de gruix total de les capes (fig. 5.47). Per altra banda, quan el desplaçament és menor a la longitud de les làmines (fig. 5.47 **A** i **B**), apareix una zona d'important variació de potència en la part posterior del model.

En vista dels resultats, els models que aporten solucions geomètriques més pròximes a les que s'observen al camp són els elaborats utilitzant l'algorisme FPF amb $\pi \approx 0$. Tanmateix, aquests models generen problemes associats a la superposició de la deformació dels diversos encavalcaments ja que el plantejament geomètric del programa que no té en consideració criteris mecànics.

El fet que la cisalla interna no disminueixi progressivament en allunyar-nos de la superfície d'encavalcament, com he indicat en estudiar el funcionament d'aquest algorisme en encavalcaments simples (fig. 5.35 i 5.36), implica que quan major és la distància entre un punt i la superfície d'encavalcament, més important serà la component del desplaçament generada per la cisalla angular, al contrari del que s'observa a la naturalesa. Per tant els efectes de la cisalla angular es veuen magnificats amb el gruix de material transportat.

Un altre aspecte a valorar fa referència a les superfícies d'encavalcament inactives. L'algorisme FPF del 2DMove deforma passivament tots els materials transportats per un encavalcament determinat sense considerar la naturalesa dels materials, ni la disposició dels elements estructurals que pugui incorporar la làmina encavalcant. En canvi, un model deformat per flux paral·lel a les capes (fig. 5.45 **I**; segons Suppe, 1983b) calcula la deformació a partir de l'orientació d'aquestes i la seva relació amb les superfícies d'encavalcament tant actives com inactives. En conseqüència, els encavalcaments inactius incorporats al

bloc superior d'un encavalcament es deformen com a superfícies passives, però com que separen blocs amb diferent orientació dels elements estructurals, les direccions de flux són diferents a cada costat de la falla, i per tant l'orientació de les superfícies axials canvia en creuar-la. En síntesi, un encavalcament defineix una superfície de partició de la deformació, caracteritzada per un canvi en la distribució de les zones de la deformació.

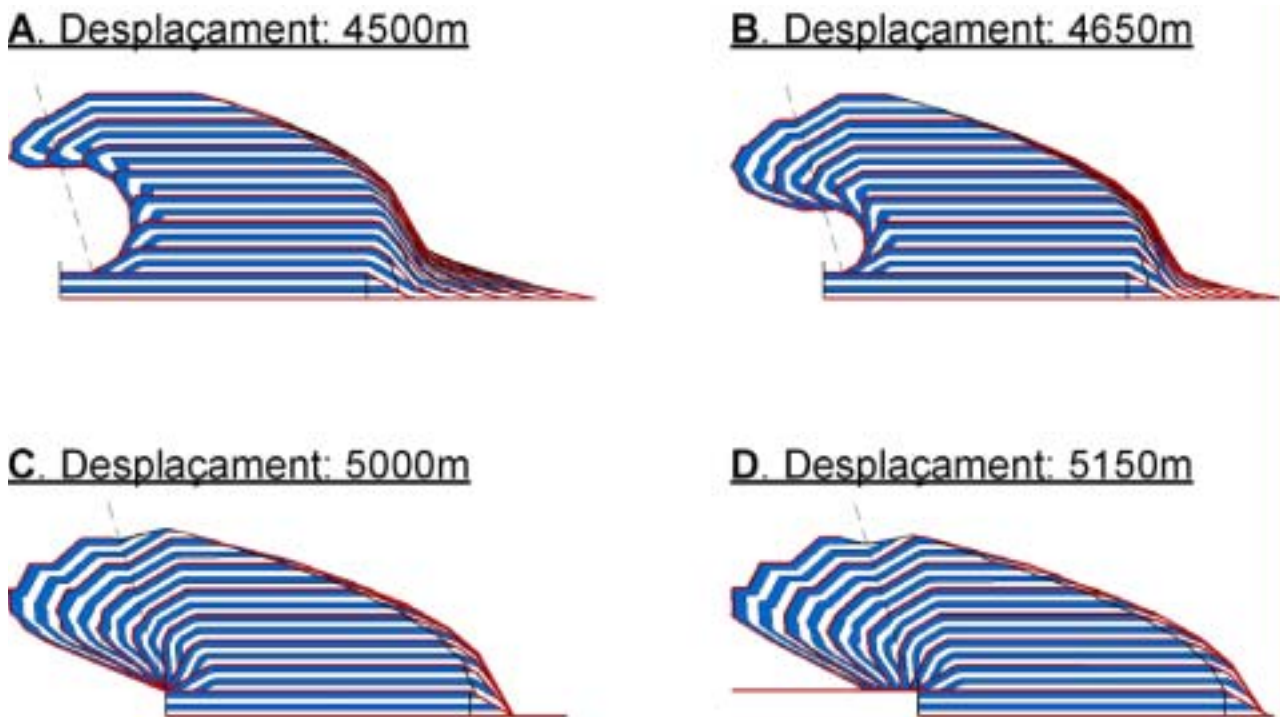


Fig. 5.47.- Sistemes d'encavalcaments amb un alt grau d'*overthrusting* partint de la mateixa situació inicial (fig. 5.45 A). Petits canvis en el desplaçament de les escates generen geometries diferents en el límits anteriors i posterior de l'estructura. La línia discontinua separa Z4 i Z5 de l'encavalcament 7.

A la natura, molts sistemes d'encavalcaments es formen sobre nivells de desenganxament febles. Assumint que el mecanisme de deformació s'aproxima al FPF, això pot fer que els encavalcaments inactius, tot i ser passius a gran escala, es comportin com a discontinuïtats que impedeixin que la deformació interna es propagui al llarg de tota la pila de mantells, i per tant separar zones amb diferent intensitat de deformació en cada estadi.

5.3.2. Modelització cinemàtica dels tascons de sorra

Tal com s'ha fet amb els algorismes de restitució, els tascons de sorra Mdl5PrflA04 i Model B (fig. 5.1) s'han utilitzat per a realitzar un assaig de la modelització de seccions de les que es disposa d'un alt grau de coneixement de les seves característiques geomètriques inicials i finals, així com de dades cinemàtiques. Malgrat tot, els tascons de sorra requereixen una sèrie de consideracions prèvies a la modelització cinemàtica, tant en retrocés com en avanç.

La deformació de Mdl5PrflA04 i Model **B** (fig. 5.1) està condicionada principalment per l'anisotropia mecànica que representa l'alternança de sorra i *glass microbeads*, i per les condicions de contorn que imposa el dispositiu de deformació.

La presència de dos tipus de materials diferents comporta una partició de la deformació degut al contrast entre la incompressibilitat dels nivells de *glass microbeads* i l'elevada compactació que sofreixen les capes de sorra. Aquesta partició es tradueix en canvis en el desplaçament al llarg d'un mateix encavalcament, canvis en l'estil dels plecs, no correspondència entre replans de bloc superior i inferior, etc. Els algoritmes de deformació del 2DMove no permeten considerar ni la compactació ni la partició de la deformació. Per tant la modelització cinemàtica requerirà assumir un valor únic per al desplaçament d'un encavalcament i la consideració de la compactació com un fenomen previ al funcionament dels encavalcaments. Per això, s'utilitzarà com a secció de partida de la modelització en avanç i com a secció objectiu de la modelització en retrocés les restitucions dels models de sorra obtingudes en l'apartat d'anàlisi dels algoritmes de restitució (fig. 5.18 i 4.19), i en el cas del model B es repetirà la modelització amb els valors de desplaçament mesurats per a cada capa en la secció deformada.

Els problemes relacionats amb les condicions de contorn que imposa la premsa es manifesten sobretot a la part posterior del model, i són conseqüència de l'efecte del mur mòbil vertical que no permet el desenvolupament normal de les estructures vergents cap al rerepaís i distorsiona molt les estructures que es trobin a prop d'ell, generant zones de deformació heterogènia (ZDH, fig. 5.6). En la modelització s'ha prescindit d'aquesta deformació ja que no té significat geològic. La placa basal també constitueix una condició de contorn, que es caracteritza pel contrast reològic amb la base metàl·lica, i afavoreix la compactació de la sorra. Aquests efectes són similars als que s'han discutit en el paràgraf anterior, i la solució triada dependrà de cada model i mecanisme de deformació.

Altres aspectes de la deformació que el 2DMove no permet modelitzar són el funcionament simultani de més d'un encavalcament i els canvis en l'estil de la deformació associats al soterrament. En el primer cas ha calgut decidir l'ordre d'emplaçament dels encavalcaments i quan ha estat necessari, s'ha assumit un funcionament alternatiu i progressiu dels encavalcaments simultanis. Quant als canvis d'estil de la deformació, que consisteixen en el pas de zones de deformació àmplies en profunditat cap a superfícies d'encavalcament netes en superfície, l'única opció és la simplificació de tot el conjunt com a una sola superfície de lliscament.

Modelització cinemàtica en retrocés: restitució cinemàtica.

La figura 5.48 mostra la retrodeformació de la secció Mdl5PrflA04 utilitzant els algoritmes de que disposa el programa 2DMove. La restitució amb l'algoritme FPF s'ha efectuat per a diferents valors de π . Per calcular el desplaçament al llarg d'una falla s'ha utilitzat els *cutoffs* de la base de la sèrie horitzontal i la funció *join beds*, que uneix dues línies triades pel geòleg en el bloc superior i inferior d'un encavalcament. En aquest procés s'ha constatat que quan major és el valor de π menys acurada és la restitució, com a conseqüència de la deformació de tot el bloc superior que aquests valors signifiquen. Com que la

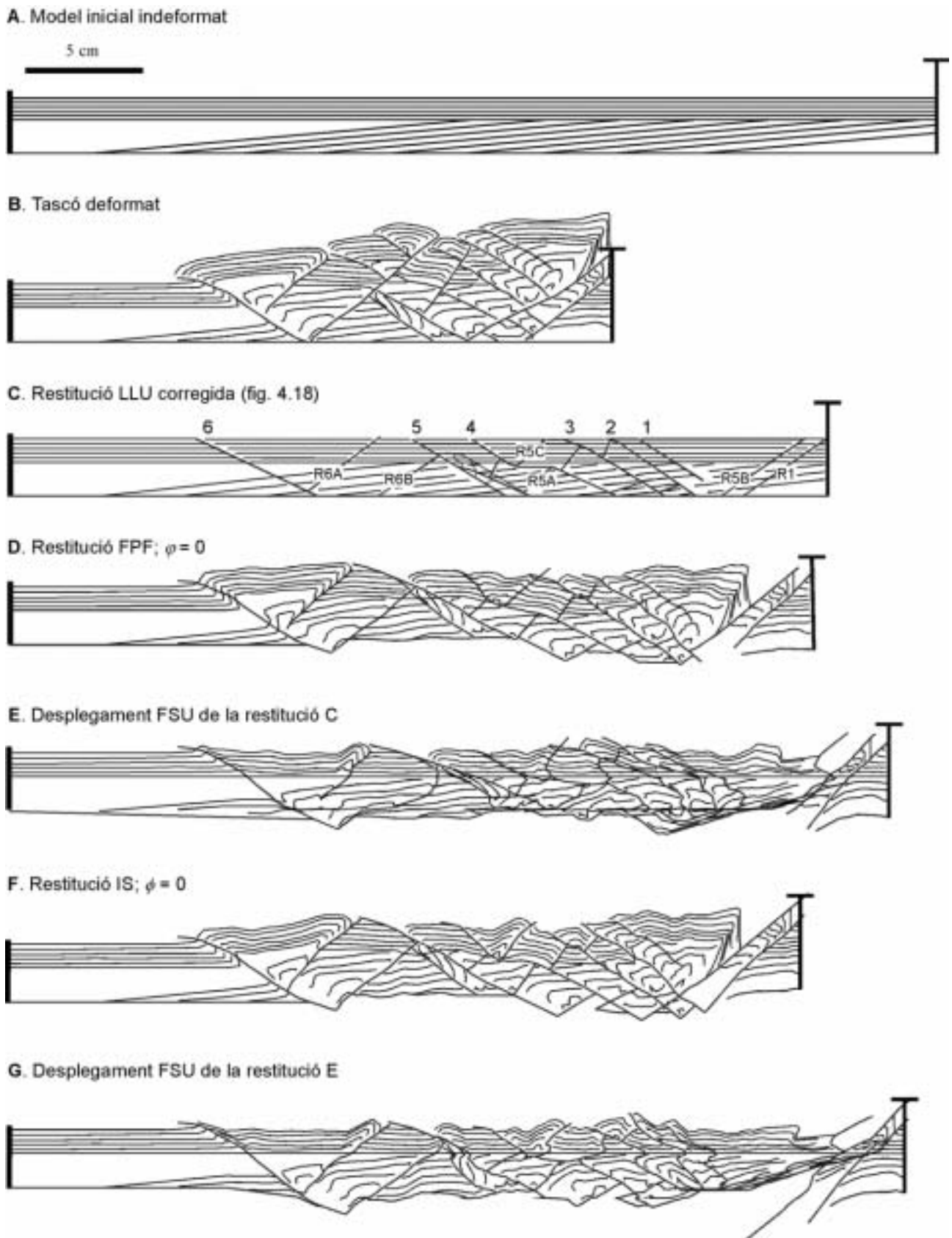


Fig. 5.48.- Restitució cinemàtica (modelització en retrocés) de la secció Mdl5Prf1A04. **A.-** Model de sorra indeformat. **B.-** Tascó de sorra. **C.-** Restitució per LLU corregida (fig. 5.18), l'escurçament corresponent a la compactació no està restituït. **D.-** Restitució amb l'algoritme FPF ($\pi = 0$). El desplaçament s'ha calculat utilitzant la funció *join beds* i s'ha efectuat en el bloc de la dreta, sense considerar si es tractava del bloc superior o del bloc inferior. La irregularitat de la

base del model és deguda a que no s'ha utilitzat un nivell de desenganxament horitzontal sinó que s'ha projectat els encavalcaments mantenint la seva inclinació. **E.**- Desplegament amb l'algoritme FSU de la restitució **D**, utilitzant un *pin* vertical a l'extrem esquerra del model i la base de la sèrie inicialment horitzontal com a superfície de referència. Els dos blocs adossats al mur mòbil s'han desplegat separadament **F.**- Restitució amb l'algoritme IS ($\lambda = 0$) seguint el mateix procediment que en **D**. **G.**- Desplegament amb l'algoritme FSU de la restitució **F**, utilitzant un *pin* vertical a l'extrem esquerra del model i la base de la sèrie inicialment horitzontal com a superfície de referència. En tots els models s'ha deixat la ZDH de la base de l'encavalcament 5 sense retrodeformar i s'ha utilitzat com a superfície de lliscament l'encavalcament que limita aquesta zona per sobre.

retrodeformació es realitza en una seqüència inversa a la de la formació de les estructures, les superfícies d'encavalcament actives són progressivament més irregulars fins arribar a invertir el seu cabussament. El valor de π que menys altera la geometria del bloc superior és $\pi = 0$, ja que només es veuen modificades les zones que creuen alguna inflexió de la falla, i la resta només experimenta una translació sense mostrar cap deformació interna. Un cop feta aquesta observació, he considerat l'eliminació de la inflexió replà – rampa de la base del tascó, prolongant els encavalcaments, mantenint la seva inclinació en l'entroncament amb la placa basal, i els resultat obtinguts són els més realistes. Finalment, també he observat que la millor opció era efectuar el desplaçament sempre en el bloc que es troba a la dreta de la falla, independentment de si es tracta del bloc superior o inferior, per no augmentar la deformació de les parts ja restituïdes (fig. 5.48C i E).

Les ZDH de la base de l'encavalcament 5 i del retroencavalcament R5B s'han tractat de forma diferent a la resta del model. En el primer cas, s'ha preservat la ZDH sense restituir, utilitzant l'encavalcament que la limita per sobre per a efectuar el desplaçament del seu bloc superior i l'alçada de la base de la sèrie horitzontal en el bloc inferior de l'encavalcament que la limita per sota, per calcular el desplaçament. Pel desplaçament associat a R5B he utilitzat l'alçada de la base de la sèrie horitzontal en el flanc normal del bloc superior del retroencavalcament i el *cutoff* en el bloc inferior de la mateixa superfície. Aquest procés deixa el flanc invers del plec sense desfer però permet traduir l'escurçament associat a aquesta zona de forma heterogènia en escurçament per encavalcament.

El resultat de la restitució FPF amb $\pi = 0$ (fig. 5.48 D) mostra en general una aproximació vàlida tant per a la sèrie horitzontal com per a la inclinada, només alterada a les zones de deformació heterogènia, com per exemple els plecs dels encavalcaments 6 i R6A i el flanc invers associat a R5B. Aquest resultat fa evident altra vegada que la deformació d'aquest model està dividida en zones de deformació interna intensa, que limiten zones que només experimenten desplaçament i rotació rígida, per a les que l'algoritme FPF amb $\pi = 0$ funciona millor.

Aquesta idoneïtat es fa evident en el desplegament per FSU de la restitució **D** (fig. 5.48 E). En aquesta figura s'observa que a part de les distorsions associades als plecs de falla, el paral·lelisme de les capes es manté tant en la sèrie superior com en la inferior, i el traçat dels encavalcaments és coherent malgrat la seva irregularitat. Per altra banda, els canvis de profunditat de l'encavalcament basal són conseqüència del procés de retrodeformació, però també mostren com és l'efecte de contorn associat a la placa basal.

Els resultats de la modelització en retrocés amb l'algoritme IS (fig. 5.48 F) són pràcticament idèntics als assolits amb l'algoritme FPF ja que aquests mecanismes només es diferencien en l'orientació de les línies que separen els dominis de cabussament, que en el primer cas són totes paral·leles i verticals, mentre que en

les restitucions per FPF corresponen a la bisectriu de les inflexions de rampa. Això es tradueix en que algunes zones es resolen millor amb un algoritme i d'altres amb l'altre, però a grans trets podem assimilar que el resultat és el mateix. Aquesta similitud també es fa evident en el desplegament per FSU (fig. 5.48 G) que presenta algunes diferències a la base de la part posterior del model, conseqüència de la magnificació de les diferències en el nivell de referència d'un i altre procés, però manté cert paral·lelisme entre les capes de cada sèrie.

La similitud entre els resultats de les restitucions FPF i IS (fig. 5.48 D i E) també es reflecteix en les longituds restituïdes. La restitució per FPF és només un 1.8% més curta que la restitució inicial (fig. 5.48 C) i un 1.34% més llarga que la restitució per IS, que a la seva vegada és un 3.1% més curta que la restitució inicial. Tenint en compte aquesta similitud, i que l'algoritme de deformació que més s'aproxima al mecanisme d'emplaçament dels encavalcaments és el *fault parallel flow*, a partir d'ara em centraré en la valoració d'aquest algoritme.

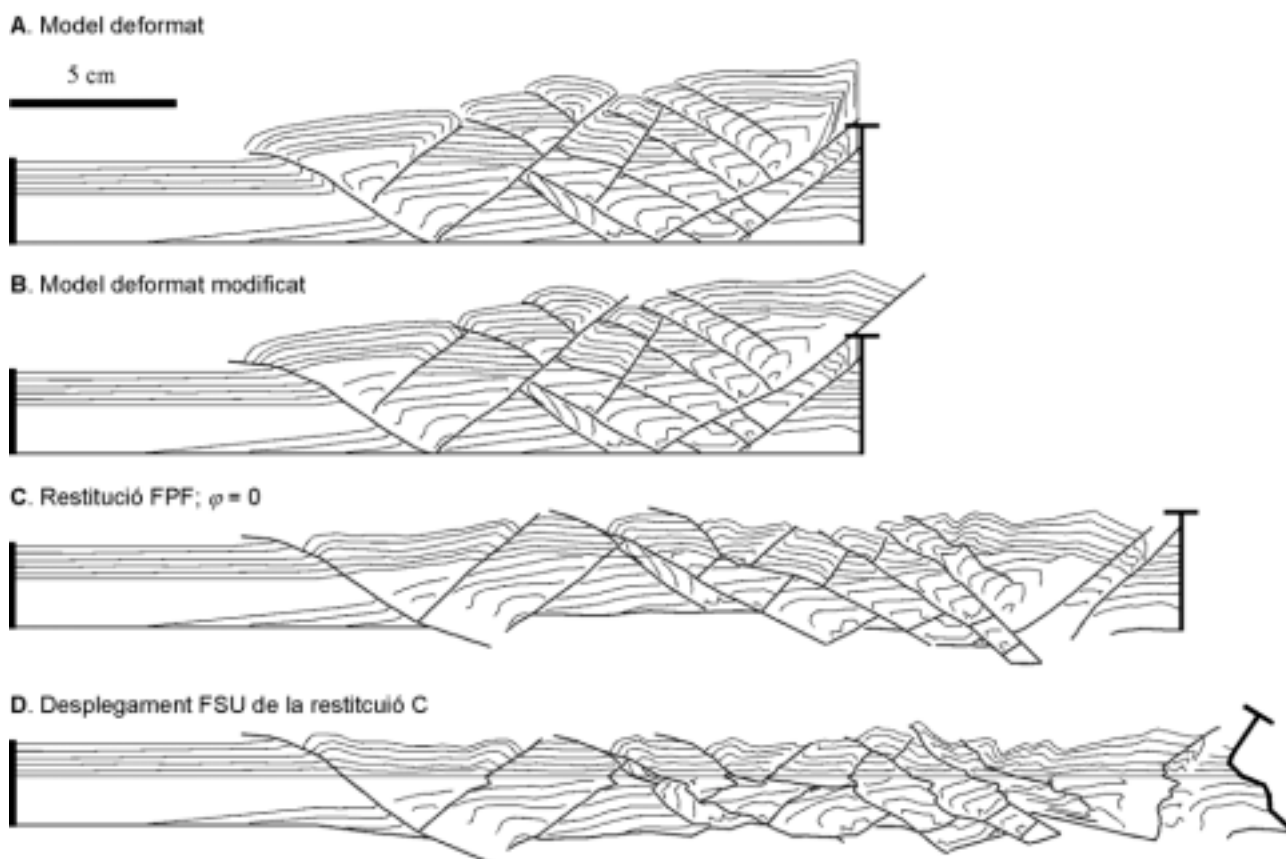


Fig. 5.49.- Restitució per FPF del model deformat (A) amb les ZDH i els flancs inversos modificats (B). La restitució FPF (C) s'ha efectuat seguint el mateix procediment que a la figura 5.48 i el desplegament FSU (D) s'ha fet amb un *pin* vertical situat al límit esquerra del model i utilitzant com a superfície de referència la base de la sèrie horitzontal.

Per completar aquesta discussió he realitzat la restitució per FPF d'una secció deformada teòrica (fig. 5.49) en la que he substituït les ZDH i els plecs de falla de la figura 5.48 B per plecs aproximadament flexurals (fig. 5.49 B). Aquestes correccions representen una transformació qualitativa de la deformació

heterogènia en desplaçament al llarg dels encavalcaments (fig. 5.49 C) i permet obtenir una resultat més pròxim a la restitució inicial (fig. 5.48 C), però com es pot observar a les figures 4.49 C i D els plecs de falla continuen sense desplegar-se. Això es degut en primer lloc al valor nul de la cisalla angular ($\pi = 0$) que implica que la deformació interna que experimenta el bloc superior dels encavalcaments en cada inflexió de falla és una rotació més una cisalla (fig. 5.38 B i E), d'una magnitud igual al canvi d'angle d'aquestes inflexions. Com que la majoria d'encavalcaments del model presenten curvatures molts suaus, les rotacions i cisalles generades no són suficients per desplegar totalment els anticlinals de rampa. A més, com que l'algoritme FPF utilitza com a eixos de rotació les bisectrius de les inflexions de falla, que no coincideixen amb els plans axials dels plecs del bloc superior, el desplegament de les estructures no es produeix allà on correspondria.

Una altra font d'error en la modelització està generada per la localització de la deformació en les zones de falla, fet que l'algoritme FPF no pot considerar. Amb aquest algoritme, la deformació associada a qualsevol canvi d'angle de la falla es transmet a tots els marcadors que té per sobre, i per tant totes les capes que traspassin una inflexió experimenten una deformació que no es correspon amb la realitat i canvien de gruix i longitud.

El desplegament amb FSU (fig. 5.49 D) de la restitució FPF (fig. 5.49 C) tampoc desplega els plecs de falla de la sèrie horitzontal. Això és degut a la distribució dels dominis de cabussament de la capa de referència (base de la sèrie horitzontal), que inclou la major part dels anticlinals de rampa en dominis no plegats del bloc inferior. Per altra banda, aquest mecanisme de desplegament genera un augment de longitud respecte a la restitució objectiu (fig. 5.48 B) del 10.8%, molt superior al de la restitució FPF (fig. 5.49 C) que és del 1.3%. L'augment de longitud del desplegament FSU és principalment conseqüència de la variació en la longitud de les capes durant la restitució FPF.

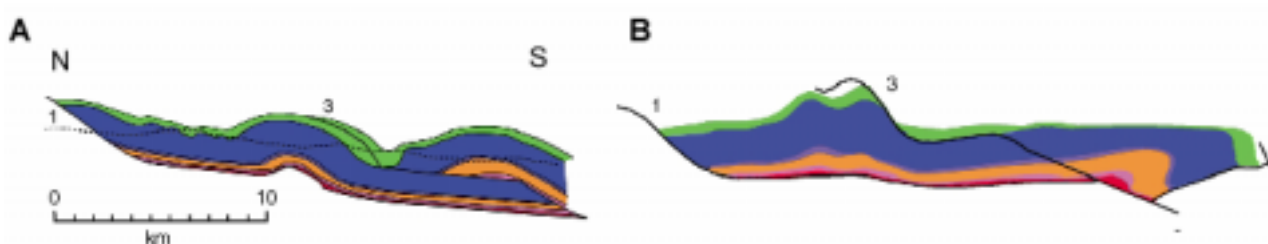


Fig. 5.50.- Exemple de restitució cinemàtica realitzat per Tanner et al. (2003) amb talls del Mantell de Lechtal als Alps alemanys, en la que s'observa problemes de desplegament, de gruix de les capes i en el traçat de les falles. A.- Tall de camp. B.- Restitució per combinació de *Flexural Slip Unfolding* i *Fault Parallel Flow*.

Una solució proposada per al problema del desplegament dels anticlinals de rampa (fig. 5.50; Tanner et al. 2003) és separar-los de la part del bloc superior que no està plegada, desplegar-los individualment i tornar-los a unir a la resta de l'escata, i posteriorment retrodeformar la làmina encavalcant amb l'algoritme FPF. Aquest procediment implica la divisió de les escates utilitzant superfícies no reals, augmentant les fonts potencials d'error i restant validesa a la restitució cinemàtica. Considero que el desplegament per FSU, tant

si es realitza per parts com continu, s'ha d'efectuar un cop realitzada la retrodeformació FPF, si es considera convenient.

En conclusió, la deformació observada en el tascó de sorra s'aproximaria més a un flux paral·lel a les capes, amb la deformació localitzada als plecs de rampa i els flancs posteriors indeformats, que a un flux paral·lel a la falla. En la modelització d'un encavalcament simple replà – rampa – replà he mostrat que per simular un emplaçament per lliscament flexural amb l'algoritme FPF, s'havia d'utilitzar una cisalla angular del mateix valor que el canvi d'angle en la inflexió de falla. En la modelització de la secció Md15Prf1A04, no

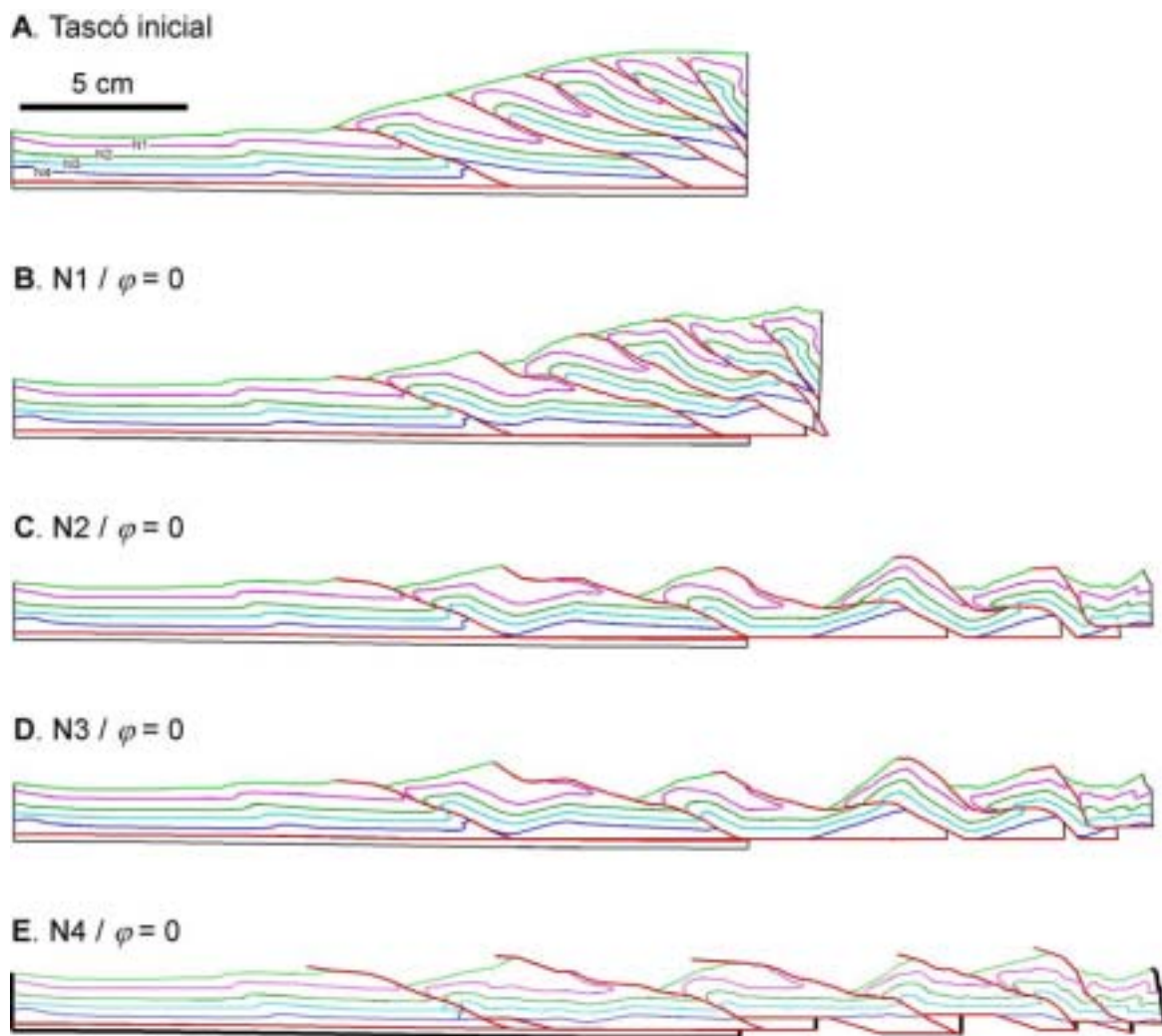


Fig. 5.51.- Restitució per FPF del model **B** de Teixell i Koyi (2003). **A.-** Tascó deformat. **B.-** Restitució per FPF utilitzant la funció *join beds* i els *cutoffs* de N1. **C.-** Restitució per FPF utilitzant la funció *join beds* i els *cutoffs* de N2. **D.-** Restitució per FPF utilitzant la funció *join beds* i els *cutoffs* de N3. **E.-** Restitució per FPF utilitzant la funció *join beds* i els *cutoffs* de N4. Els replans a sostre del coixí de *glass microbeads* basal s'han calculat utilitzant el marcador N4.

es pot actuar d'aquesta manera per dos motius: 1) els encavalcament presenten més d'un canvi d'orientació, i per tant no existeix un valor únic vàlid per a tota una làmina encavalcant, i 2) la utilització d'un valor $\pi \tilde{N}0$

en la modelització d'una seqüència de bloc inferior fa que les làmines més antigues acumulin una deformació interna excessiva que porta a situacions irrestituïbles en els estadis avançats del procés de modelització en retrocés. Per tant, la retrodeformació amb l'algoritme FPF de sistemes imbricats d'encavalcaments emplaçats per lliscament flexural, amb superfícies d'encavalcament complexes genera una aproximació a la cinemàtica del model que sempre deixarà parts sense resoldre, i només és vàlida per a les parts que presenten poca deformació interna.

La retrodeformació del Model **B** de Teixell i Koyi (2003), amb plecs de propagació de falla i grans variacions de desplaçament al llarg de cada encavalcament, s'ha efectuat utilitzant l'algoritme FPF amb $\pi = 0$, calculant el desplaçament amb la funció *join beds* per a cada un dels nivells presents en aquesta secció (fig. 5.51).

La diferència més evident entre les restitucions és el valor de la longitud restituïda, determinada per l'escurçament per encavalcament, reflectint que aquest és molt major per als nivells de sorra que per als nivells de *glass microbeads*, en els que l'escurçament horitzontal es manifesta principalment en forma d'engruiximent de les capes i plegament (fig. 5.51).

En els nivells de sorra (fig. 5.51 **C** i **D**) la restitució és pràcticament idèntica però la seva geometria s'allunya de la del model inicial indeformat perquè els plecs de falla no estan desplegats i l'engruiximent del nivell de *glass microbeads* basal genera una inclinació cap a l'avantpaís de la part posterior de les làmines encavalcants. El fet que els plecs de falla no estiguin desplegats es deu a que són plecs de propagació de falla que l'algoritme FPF no pot restituir ja que s'han format per un mecanisme de deformació diferent.

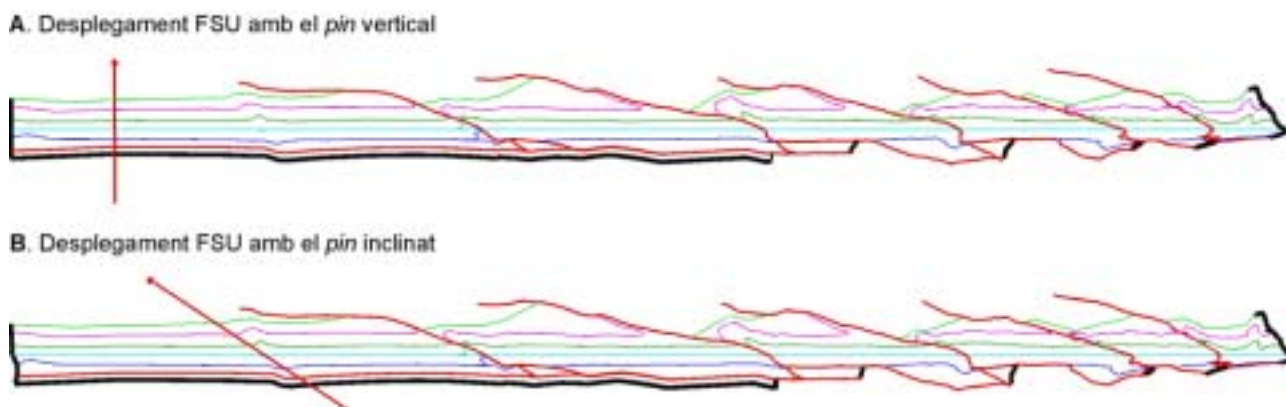


Fig. 5.52.- Desplegament per FSU de la restitució cinemàtica de la figura 5.51 **E** utilitzant **A)** un *pin* vertical i el marcador N4 com a superfície de referència i **B)** un *pin* paral·lel als plans axials dels plecs de propagació de falla i el marcador N4 com a superfície de referència.

El resultat de la restitució cinemàtica de la figura 5.51 **E** s'aproxima molt a la restitució amb LLU (fig. 5.8) tant en la geometria com en la longitud restituïda (-4.5%), mostrant que la deformació dels nivells de sorra es dona bàsicament per encavalcament, i que l'engruiximent que experimenta el coixí de *glass microbeads* basal es correspon amb l'escurçament implicat pels replans de la capa de sorra que hi ha per

sobre. Per tant, en aquesta secció, que consisteix en un sistema imbricat amb làmines encavalcants llargues i amb molt transport al llarg dels encavalcaments, l'algoritme FPF dona bons resultats pels nivells de sorra, però deixa els plecs de falla dels *glass microbeads* incompetents sense desplegar. El desplegament de la restitució amb FSU (fig. 5.52 A i B) continua deixant part dels plecs sense restituir, mostrant que no es tracta de plecs formats per lliscament flexural.

He provat d'assumir que el Model B s'ha emplaçat per flux paral·lel a la falla, repetint la retrodeformació amb $\pi = 30^\circ$. Aquesta restitució comporta una cisalla interna acumulada molt alta per a les làmines posteriors, generant traçats d'encavalcament irregulars i amb inclinacions poc realistes (fig. 5.53 A).

Per evitar l'acumulació de la cisalla angular he retrodeformat el model per parts (fig. 5.53 B). El procés consisteix a restituir per FPF una làmina encavalcant, separant prèviament les escates que té per sobre. Un cop efectuada la retrodeformació se situa la làmina següent al lloc que li correspon utilitzant l'algoritme FSU falla sobre falla i es continua la restitució. El resultat obtingut amb aquest procediment s'aproxima al d'una restitució FPF amb $\pi = 0$ (fig. 5.51 E) i continua sense desplegar els anticlinals de rampa. Tenint en compte que els resultats obtinguts no milloren els anteriors i que el procediment és més laboriós i inexacte (FPF+FSU) la millor opció per a la modelització cinemàtica en retrocés d'aquest tascó d'encavalcaments continua essent $\pi = 0$, sobretot per a les zones de replà.

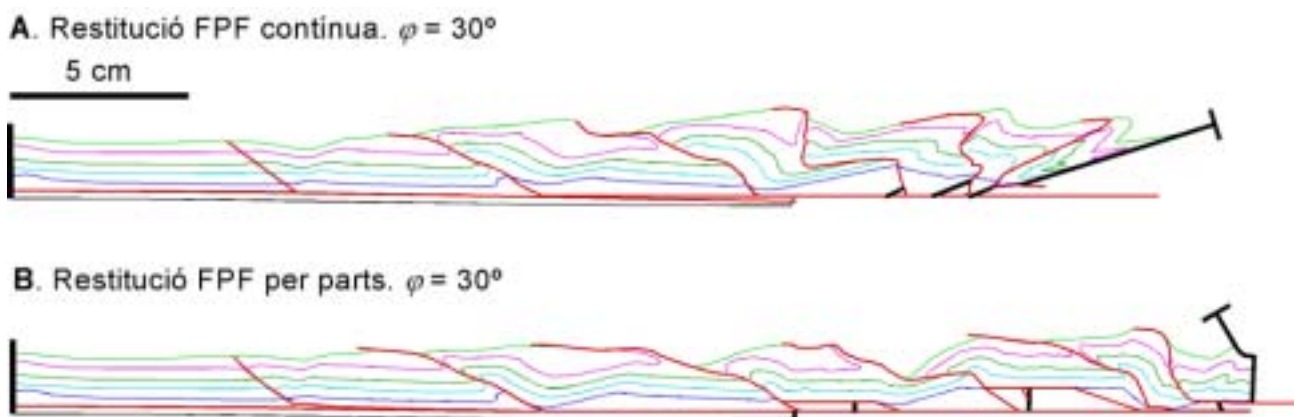


Fig. 5.53.- Restitució per FPF amb $\pi = 30^\circ$ del model B utilitzant el marcador N4 i la funció *join beds*. A.- Restitució contínua. B.- Restitució per parts.

Modelització cinemàtica en avanç.

La modelització cinemàtica en avanç del Mdl5PrflA04 (fig. 5.54) s'ha fet a partir de la restitució per LLU corregida (fig. 5.54 B) utilitzant l'algoritme FPF amb $\pi = 0$ i calculant els desplaçaments a partir de les mesures obtingudes durant la deformació del tascó (fig. 5.2). Degut a les diferències pel que fa a mecanismes de deformació, els valors de desplaçament utilitzats només són una aproximació qualitativa, i com es pot veure en la figura 5.54 C ha resultat en un escurçament final del 38.75%, un 3.75% superior al del model real (fig. 5.54 A). La utilització de valors de desplaçament menors, s'hauria ajustat millor a l'escurçament del

model real, però hauria resultat en una disminució del gruix del model FPF, que ja amb aquests valors és inferior a l'observat. A més, la modelització FPF no considera variacions de desplaçament al llarg d'una única falla.

La diferència entre el gruix del tascó de sorra real i del model FPF és màxima als límits posterior i frontal del sistema imbricat, i disminueix relativament en la part central. Les zones de desviació coincideixen amb l'àrea d'influència del mur mòbil i el nivell de *glass microbeads*, que són dos elements importants que controlen molt la deformació. La diferència de gruix a la part posterior del model no pot ser compensada arealment per la superfície transportada per R1 i R5B que supera la *pin-line* posterior. Això pot indicar que la ZDH associada al mur mòbil genera un engruïment d'aquesta zona que l'algoritme FPF no pot simular.

La diferència de gruix de la part frontal del sistema d'encavalcaments ha de ser en part conseqüència de l'engruïment de la capa de *glass microbeads* que el programa no efectua. Tanmateix, aquest engruïment no és suficient per a compensar la diferència entre els dos models, i per tant, part d'aquesta s'ha d'atribuir a altres causes, com poden ser el mecanisme de deformació o els valors de desplaçament utilitzats.

A. Secció inicial deformada



B. Restitució LLU corregida (fig. 4.18)



C. Modelització en avanç FPF, $\varphi = 0$

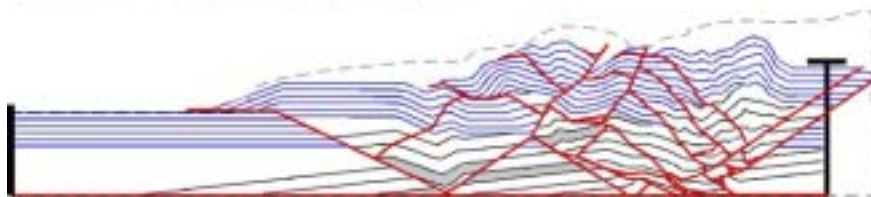


Fig. , 4.54.- Modelització en avanç del model Mdl5PrflA04 a partir de la restitució LLU corregida (fig. 5.18). La línia discontinua a C correspon al contorn de la secció inicial deformada (A). En color gris s'indica la capa de *glass microbeads*.

La geometria interna dels models FPF i de sorra també presenta diferències significatives, principalment relacionades amb els mecanismes de deformació. En general, les divergències poden atribuir-se a la partició de la deformació que s'observa en el tascó de sorra, que no efectua l'algoritme FPF. En el tascó de sorra la

deformació interna associada a les zones de falla no es transmet més enllà d'una distància d'influència, a partir de la qual només es generen rotacions rígides i translacions. En canvi, el mecanisme FPF transmet la deformació generada per les inflexions de falla a tot al bloc superior. Això causa la superposició de cisalles internes que augmenten d'intensitat amb l'antiguitat de les escates i produeixen rotacions, canvis de potència i irregularitats en el traçat dels encavalcaments i de les capes (fig. 5.54C) que no s'observen en el model analògic. Un exemple clar d'aquestes diferències s'observa en els encavalcaments 1, 2 i 3. Mentre que en el tascó de sorra aquests encavalcaments són subparal·lels, rectilinis i estan poc inclinats, i els marcadors adequats presenten inclinacions pròximes a les inicials (excepte a les zones de falla), en el model numèric els encavalcaments són irregulars i mostren inclinacions més elevades, i els marcadors presenten rotacions en tot el seu traçat que generen plecs i canvis de potència.

Un altre punt on s'observen clarament les diferències estructurals generades pels mecanismes de deformació de cada model és el fragment limitat pels encavalcaments 5 i 6, i els retroencavalcaments R6A i R6B. A la realitat, aquest bloc ha experimentat dues etapes de deformació, la primera associada a R6B i la segona a 6. En la modelització FPF, el desplaçament paral·lel a les falles, condicionat per la inflexió entre aquestes i la placa basal ja que $\pi = 0$, genera un sinclinal inexistent al tascó de sorra, perquè la deformació associada a la inflexió de falla i al desplaçament es localitza en les proximitats dels encavalcaments i la part central es manté pràcticament indeformada.

Els efectes de la superposició de cisalles es poden eliminar si s'obvia l'existència de la placa basal i es prolonguen els encavalcaments mantenint-ne la inclinació de la mateixa forma que s'ha fet en la retrodeformació, però aquesta solució genera noves distorsions a la base i a la part posterior del model.

Com a conclusió, la utilització de l'algoritme FPF en la modelització en avanç de la secció Md15Prf1A04 és una aproximació cinemàtica que presenta diferències importants en la deformació interna, degudes a 1) la complexitat estructural associada a l'elevada densitat d'encavalcaments, i 2) les diferències existents en els mecanismes de deformació. Però en aquest cas, malgrat les diferències, la modelització FPF aporta resultats suficientment vàlids analíticament.

Les característiques del Model **B**, més simple que el Md15Prf1A04, permeten una anàlisi de l'algoritme FPF més extensa (fig. 5.55). La modelització s'ha efectuat prenent com a punt de partida la restitució LLU corregida (fig. 5.55 A) i utilitzant les dades de desplaçament mesurades per les superfícies N2, N3 i N4 (Taula 5.3), que són les que limiten els nivells de sorra, que acumulen la major part de la deformació en forma d'encavalcament. En la majoria de modelitzacions s'ha utilitzat un replà superior, a sostre de la sèrie, menys en les modelitzacions **E** i **I** (fig. 5.55), en les que s'ha prolongat la rampa cap a l'avantpaís mantenint-ne la inclinació, assumint que el bloc inferior estaria representat per material esllavissat, procedent del bloc

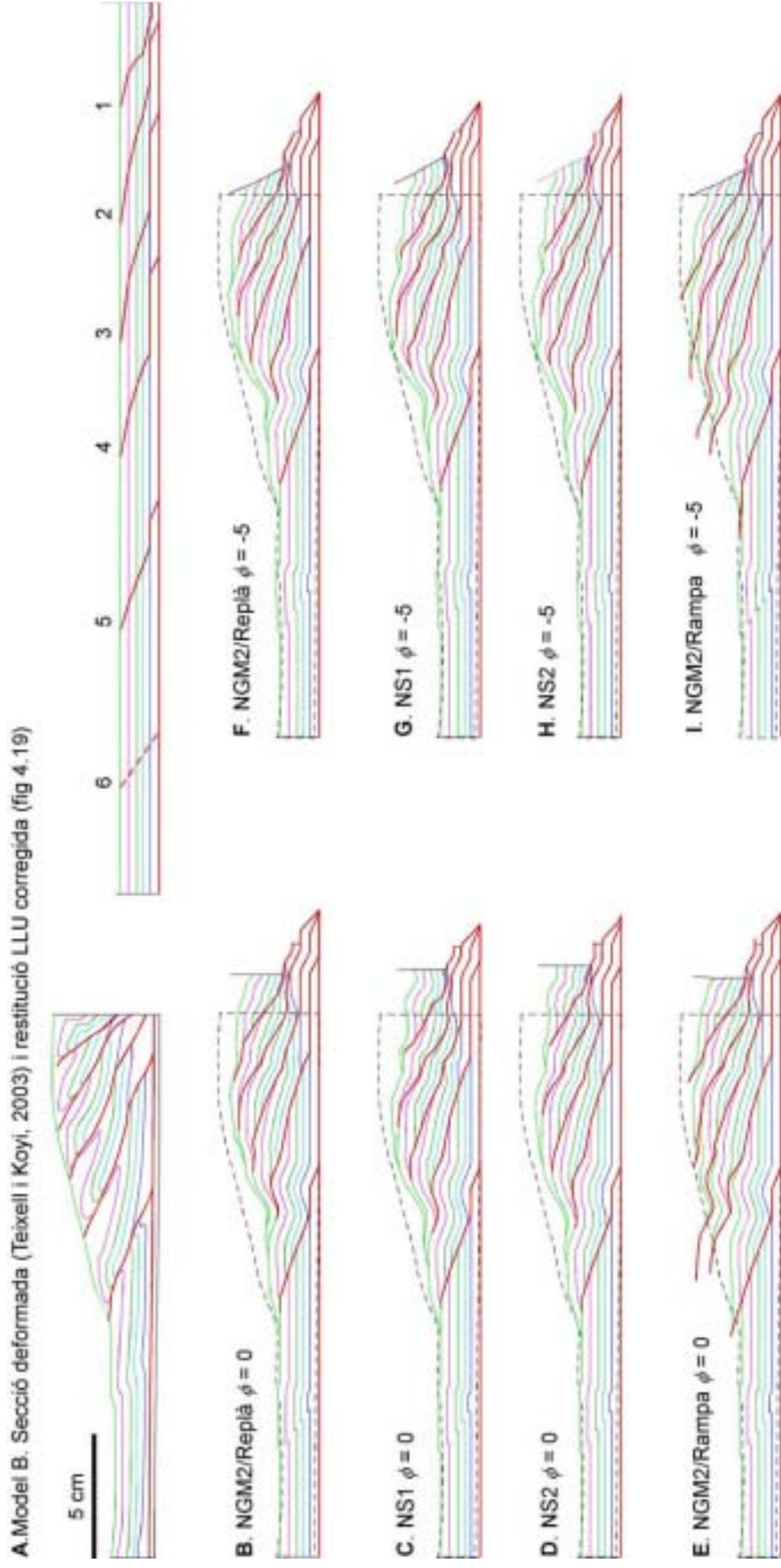


Fig. 5.55.- Modelització en avanç del model **B** (fig. 3.3.1). **A.-** Representació gràfica de la secció analògica deformada (esquerra, Teixell i Koyi, 2003) i restitució per LLU corregida (fig. 3.3.19). **B.-** Modelització utilitzant les dades d'escurçament mesurades pel nivell NGM2, amb replà a sostre de la sèrie i $\lambda = 0$. **C.-** Modelització utilitzant el nivell NS2, amb replà a sostre de la sèrie i $\lambda = 0$. **D.-** Modelització utilitzant el nivell NGM2, amb replà a sostre de la sèrie i $\lambda = 0$. **E.-** Modelització utilitzant les dades d'escurçament mesurades pel nivell NGM2, amb replà a sostre de la sèrie i $\lambda = -5$. **F.-** Modelització utilitzant el nivell NS2, amb replà a sostre de la sèrie i $\lambda = -5$. **G.-** Modelització utilitzant el nivell NGM2, amb replà a sostre de la sèrie i $\lambda = -5$. **H.-** Modelització utilitzant el nivell NS2, amb replà a sostre de la sèrie i $\lambda = -5$. **I.-** Modelització utilitzant el nivell NGM2, prolongant les rampes cap a l'avantpaís i $\lambda = -5$.

superior. També he aprofitat aquest model per valorar la influència de π en la geometria final, realitzant dues sèries de modelització, amb $\pi = 0$ (fig. 5.55 B, C, D i E) i $\pi = -5$ (fig. 5.55 F, G, H i I), respectivament.

Els resultats obtinguts en aquesta modelització són més pròxims a la secció analògica que els del model anterior pel que fa a la geometria general del model, tot i que no reflecteixen els canvis de desplaçament al llarg d'un mateix encavalcament. Les principals diferències es troben: 1) en els valors d'escurçament i del gruix del sistema imbricat, i són conseqüència de la verticalitat imposada al límit posterior del mur mòbil i a la incompressibilitat dels nivells de *glass microbeads*, i 2) en els plecs de propagació associats a les variacions de desplaçament dels encavalcaments del tascó de sorra, elements irreproduïbles amb FPF. En aquest model, l'existència d'un nivell de desenganxament dúctil minimitza els efectes de contorn derivats del contrast reològic entre el model i la placa basal.

La geometria interna del sistema presenta les majors divergències en els nivells de *glass microbeads* i en el desenvolupament dels plecs de falla. Al contrari del que s'observa en el model Mdl5PrflA04, en aquest cas els encavalcaments més antics experimenten en el model analògic una rotació més elevada de la que s'observa en els tascó de sorra, degut novament a l'escurçament penetratiu del nivell de desenganxament i als efectes de contorn del mur mòbil. A més, les capes de *glass microbeads* s'escurcen principalment per plegament. Per això, els models amb $\pi = -5^\circ$ ofereixen una millor aproximació, ja que aquest valor comporta un major desenvolupament dels plecs de falla.

En tots els models (fig. 5.55), l'excés de material al límit posterior del model es compensa arealment amb el dèficit que existeix a sobre del sistema imbricat. L'àrea de compensació és d'aproximadament un 6.6% pels models amb $\pi = 0^\circ$, i d'un 5.2% pels models amb $\pi = -5^\circ$, que representen un 12.1% i un 9.5% de l'àrea total, respectivament. L'escurçament total dels models FPF és diferent per a la base i el sostre (taula 5.10) i varia entre un màxim del 44.4% (Sostre dels models F i I, figura 5.55) i un mínim del 34.9% (Base del model E, figura 5.55).

	Mdl Inicial	B	C	D	E	F	G	H	I
Sostre	45%	41.1%	40.8%	40.2%	41.6%	44.4%	43.1%	43.5%	44.4%
Base	45%	35.2%	36.0%	35.2%	34.9%	35.1%	36.1%	35.2%	35.2%

Taula 5.10.- Dades d'escurçament per al sostre i la base dels models de la figura 5.55 respecte a les dimensions inicials del model de sorra.

S'observa tant a la figura 5.55 com a la Taula 5.10 que els escurçaments del sostre de la sèrie són superiors als de la base, ja que com s'ha dit, l'algoritme FPF només reflecteix l'escurçament per encavalcament, i el nivell de *glass microbeads* basal assumeix el 100% de l'escurçament en forma d'engruiximent, i per tant no es pot simular amb aquest algoritme. En general, els models amb $\pi = -5^\circ$ són els que millor s'aproximen al tascó real, tant per la menor àrea de compensació, com en la seva geometria externa, que s'ajusta al gruix del sistema imbricat a l'alçada de l'encavalcament 3. Per darrera d'aquest encavalcament la diferència en el gruix està generada per l'elevat engruiximent del nivell dúctil basal que s'observa al tascó real a la part posterior del model. Les diferències davant de l'encavalcament 3 estan

associades a l'evolució del replà de bloc inferior de l'encavalcament 5, que experimenta un escurçament penetratiu que no permet el desenvolupament del sinclinal que s'observa en el bloc superior d'aquest encavalcament. L'opció que millor s'aproxima al model de sorra és la del model **I**, amb $\pi = -5^\circ$ i les rampes prolongades cap a l'avantpaís a través del material esllavissat, mantenint-ne la inclinació, tal com s'observa en el tascó realitzat al laboratori.

En síntesi, el flux paral·lel a la falla és una tècnica de modelització relativament acceptable per al model **B** de Teixell i Koyi (2003), limitada per la no reproducció de la variació de desplaçament i escurçament, que era la principal fita del tascó de sorra. La geometria del model permet la utilització de valors de cisalla angular diferents de 0, que no alteren la geometria de les zones de replà, i afavoreixen la formació de plectes a les zones de rampa, tot i que no són de la mateixa naturalesa que els del model de sorra. Tanmateix, els resultats cal analitzar-los tenint en compte les característiques mecàniques de cada model abans i després de realitzar la modelització.

Conclusions referents a la modelització cinemàtica dels tascons de sorra

La modelització amb el programa 2DMove de models de sorra requereix un coneixement de les característiques reològiques dels models i dels mecanismes que controlen la formació de les estructures.

El principal motiu de divergència dels resultats entre els models numèrics i els analògics és la participació de la deformació que s'observa entre diferents nivells estratigràfics dels tascons de sorra, que cap algoritme del programa pot reproduir, ja que propaga homogèniament la deformació associada a una estructura activa, a tots els materials que transporta, sense considerar-ne la mecànica. Això implica que els models cinemàtics (tant en avanç com en retrocés) no reproduïen l'estructura interna de detall de les escates i magnifiquin la deformació de les estructures més antigues.

Una altra causa de diferències geomètriques entre models numèrics i analògics són els efectes de contorn associats al mur mòbil i a la placa basal. Aquests elements, que representen una problemàtica pròpia de la modelització analògica, generen deformacions heterogènies, que no segueixen cap patró cinemàtic evident i per tant no són modelitzables.

La complexitat estructural és un altre dels factors que condiciona la modelització cinemàtica, tant en referència al nombre d'encavalcaments i retroencavalcaments com a les relacions geomètriques entre aquests. Quan més alt sigui el nombre de falles més complexa serà la relació entre zones de deformació, i per tant, més s'allunyan els models numèrics del model de sorra. En aquests casos, no és recomanable la utilització de $\pi \approx 0$, ja que es magnificarien les diferències en les escates més antigues.

Malgrat tot, l'algoritme del 2DMove que millor s'adapta a la modelització cinemàtica dels tascons de sorra és el *fault parallel flow*, degut a la naturalesa contractiva d'aquests tascons. La correspondència entre els models FPF i els tascons de sorra serà major quan més alta sigui la relació entre l'escurçament per encavalcament i l'escurçament per plegament. Per altra banda, el valor de π estarà condicionat per la relació entre la longitud dels replans i de les rampes, i per l'escurçament acumulat per encavalcament.

5.3.3 Modelització cinemàtica en avanç dels talls de camp

Per avaluar l'aplicació de l'algoritme FPF en talls de camp, he utilitzat els talls de la zona de les Nogueres, prenent com a punt de partida les restitucions LLU corregides de la figura 5.33 (pàg. 271), i sense modelitzar l'emplaçament de la unitat de Rialp, que és el que defineix el basculament final de les escates, afectant poc la geometria general del sistema. En una primera aproximació, he utilitzat el mateix valor de π per a totes les falles presents en una secció, i a partir dels resultats he efectuat una segona modelització corregint els valors de cisalla angular, π , que he considerat necessari. La seqüència de funcionament de les estructures utilitzada en la modelització cinemàtica no és la que es mostra a la figura 5.1 (pàg. 224), ja que s'ha hagut d'alterar lleugerament per evitar els efectes de la superposició d'etapes de deformació.

La figura 5.56 mostra el resultat de les diferents modelitzacions per al tall de Coll de Fades. La diversitat d'angles de *cutoff* i l'episodicitat associada a l'emplaçament de diferents unitats impedeixen definir un valor únic de π que permeti conservar la potència de les capes durant tota la deformació. A més, el funcionament dels retroencavalcaments simultani al dels encavalcaments principals no pot ser modelitzat com a una sola etapa de deformació, i per això els retroencavalcaments s'han realitzat per separat al final. Aquest procés, implica que quan els retroencavalcaments estan en funcionament (en el model), la seva geometria és diferent de la que tenien durant el seu funcionament en la natura (fig. 5.56), fet que causa un augment de la complexitat del seu bloc superior. En general, s'observa que les irregularitats (traçat, canvis de potència i de longitud) en el bloc superior del retroencavalcament 3 augmenten amb el valor de π (taula 5.11), i això es manifesta tant en la relació entre la potència final màxima i mínima del Buntsandstein en un mateix model, com en la relació entre la potència inicial i final.

	P _i (m)	P _f màxima (m)	P _f mínima (m)	max/min (%)	P _i /P _f max. (%)	P _i /P _f min. (%)
B	200	197	143	137	99	72
C	200	237	144	164	119	73
D	200	463	116	397	233	59
E	200	477	111	433	241	56

Taula 5.11.- Variació finita de la potència del Buntsandstein en el bloc superior del retroencavalcament 3 en les modelitzacions de la figura 5.56. P_i: Potència inicial (fig. 5.56 A). P_f: potència final.

Els resultats de la Taula 5.11 indiquen que la modelització que més s'aproxima als talls de camp restituïts és la **B**, però la inclinació final de l'encavalcament d'Erta (1) i dels retroencavalcaments 3 i 4 en aquest model és massa baixa si es compara amb la secció de camp (fig. 5.1). A això s'hi ha d'afegir les variacions de potència en el bloc superior del retroencavalcament més tardà en tots els models. Abans del seu funcionament, la potència del Buntsandstein correspon a la que s'observa en el bloc inferior del retroencavalcament 4 que és de 192 m a **B** (96%), 205 m a **C** i **D** (102.5%) i 219 m a **E** (109.5%).

Aquesta variació en la potència del Buntsandstein també s'observa en la unitat d'Orri (170m a **B**, 180m a **C**, 188m a **D** i 206m a **E**), tot i que aquesta unitat només està afectada per l'emplaçament del seu

encavalcament basal, i és conseqüència de que cap dels valors de π triats correspon a l'angle de rampa de l'encavalcament d'Orri.

Les dades numèriques, geomètriques i cinemàtiques obtingudes dels assaigs de la figura 5.56, han servit per definir el procediment final per a la modelització de la transversal de Coll de Fades. En la primera part del procediment, he modelitzat els encavalcaments d'Erta (1) i Orri (2) amb $\pi = -20^\circ$, i en la segona he modelitzat els retroencavalcaments 3 i 4 amb $\pi = 0^\circ$. El valor de π dels encavalcaments manté dins un marge acceptable la potència del Buntsandstein de les unitats d'Erta i Orri, alhora que permet un augment important de la inclinació dels retroencavalcaments sense que aquest arribin a estar invertits abans de la seva modelització (fig. 5.56 D). El valor de π per als retroencavalcaments no genera canvis de potència del Buntsandstein importants, tot i que continua causant problemes geomètrics en la zona d'influència de l'entroncament d'aquests encavalcaments en el replà superior de l'encavalcament d'Orri.

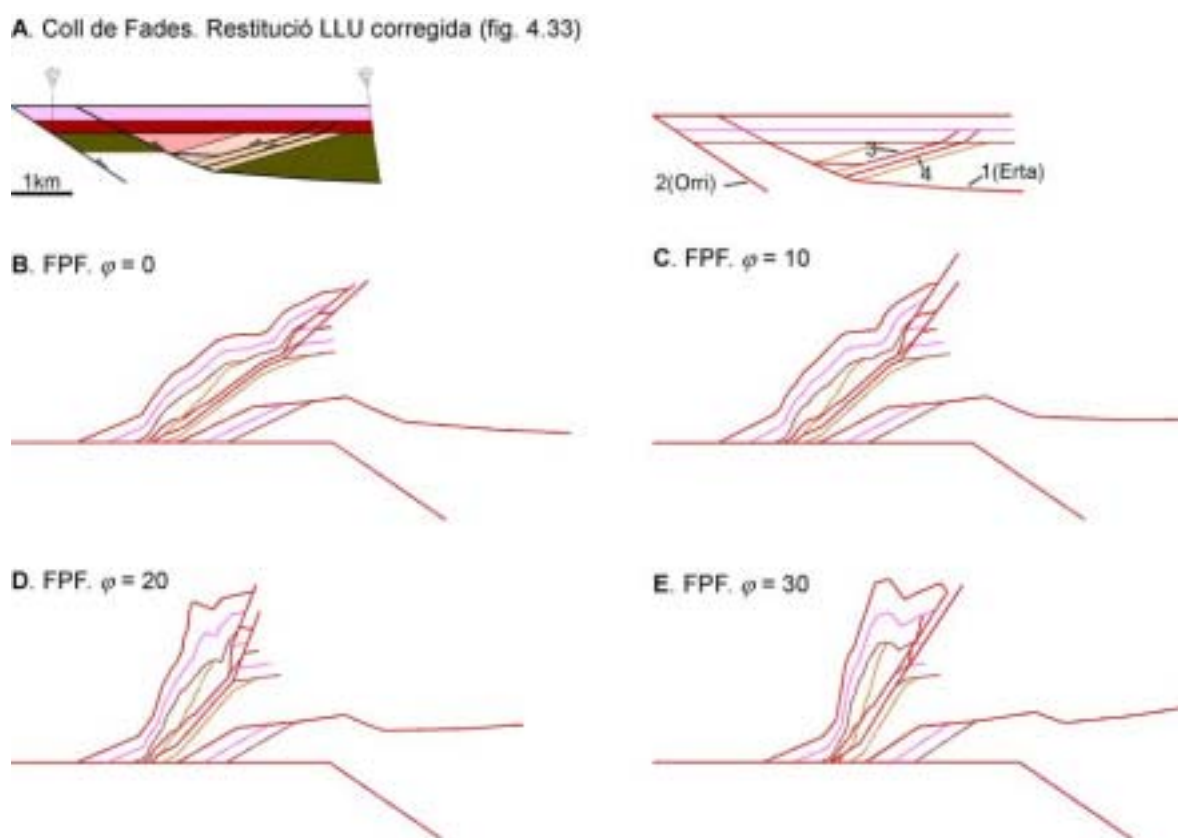


Fig. 5.56.- Assaigs de modelització cinemàtica en avanç de la secció de Coll de Fades (zona de les Nogueres). **A.**- Situació de partida, corresponent a la restitució LLU corregida (fig. 5.33), els nombres indiquen l'ordre de modelització de les falles. **B.**- Modelització FPF amb una cisalla angular de 0° , per a tots els encavalcaments i retroencavalcaments. **C.**- Modelització FPF amb $\pi = -10^\circ$. **D.**- Modelització FPF amb $\pi = -20^\circ$. **E.**- Modelització FPF amb $\pi = -30^\circ$ per a totes les estructures. L'escala gràfica de la figura A és la mateixa per a tots els models.

A grans trets, la geometria del model FPF (fig. 5.57 C) s'aproxima considerablement al tall de camp (fig. 5.57 A) però les diferències encara són evidents. El primer motiu de divergència entre un i altre tall és el mecanisme de deformació. El tall de camp (Saura, 2000) es va realitzar assumint un emplaçament per

lliscament flexural de totes les làmines encavalcants, i mantenint la potència de les capes. En aquest context, es considera que els retroencavalcaments són de fet la manifestació a gran escala del lliscament paral·lel a les capes estefano-permianes. La modelització cinemàtica utilitzant l'algoritme FPF implica que l'emplaçament de les escates es dona per lliscament paral·lel a la falla. Com ja he discutit, aquest mecanisme genera canvis en el gruix de les capes si no es tria el valor de π adequat (igual a l'angle de rampa), i com que aquest model presenta diverses escates no existeix un valor de π que conservi la potència en totes les unitats, tot i que el valor triat és el més favorable. Les variacions de potència més importants es donen al bloc superior del

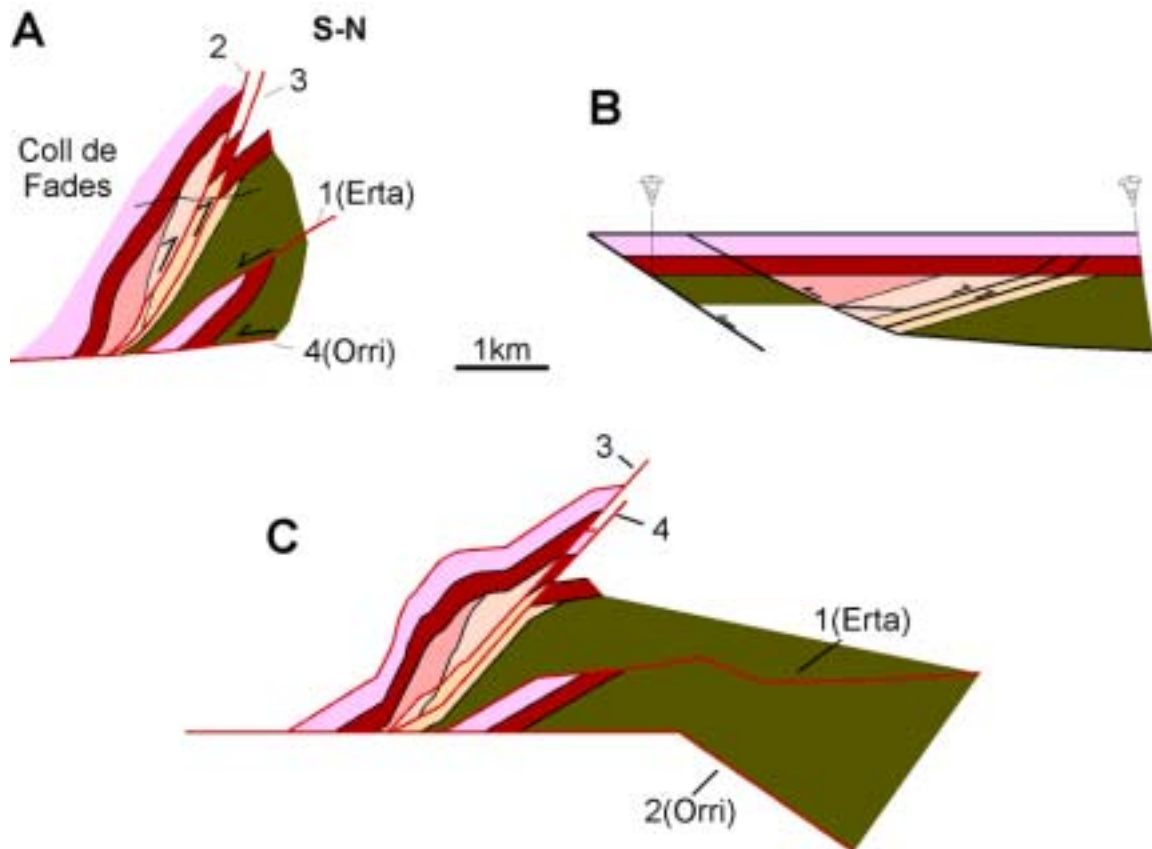


Fig. 5.57.- Modelització en avanç de la transversal de Coll de Fades. **A.**- Tall de camp, la numeració indica l'ordre real d'emplaçament de les estructures. **B.**- Restitució LLU corregida (fig. 5.33). **C.**- Modelització FPF de les escates d'Erta i Orri (sense la deformació associada a l'encavalcament de Rialp) amb $\pi = -20^\circ$ pels encavalcaments d'Erta (1) i Orri (2) i $\pi = 0$ per als retroencavalcaments 3 i 4. La numeració indica l'ordre de modelització de les estructures. L'escala és la mateixa per tots els models.

retroencavalcament 3 com a conseqüència de la geometria antiformal d'aquesta escata, que implica una variació en la relació angular entre el Buntsandstein i el retroencavalcament. Aquest fet genera una deformació finita diferent a cada domini de cabussament, també afectada per les inflexions de rampa. Les diferències en la geometria del bloc superior del retroencavalcament 3 són la conseqüència més evident de l'ús de mecanismes de deformació diferents. En el model FPF la potència del Buntsandstein varia entre un mínim de 152m (76% de la potència inicial) i un màxim de 247m (123% de la potència inicial), però l'àrea

en secció dels materials de la conca estefano-permiana és de 1 089 486 m², un 98.7% de l'àrea dels mateixos materials en el tall de camp, i per tant es pot dir que l'àrea no canvia.

Un altre factor que genera diferències entre els dos talls és que la modelització cinemàtica no incorpora la deformació associada a l'emplaçament de la unitat subjacent de Rialp. Es pot atribuir a aquesta causa la major part de la diferència en l'escurçament (87% per figura 5.57 A i 83% per figura 5.57 C), en la inclinació dels retroencavalcaments en el seu tram central (65° per figura 5.57 A i 48° per figura 5.57 C) i en la distància vertical entre l'encavalcament d'Orri i el *cutoff* de bloc superior del sostre del Buntsandstein en el retroencavalcament 3 (2657 m per figura 5.57 A i 2328m per figura 5.57 C).

Tot i que les dades numèriques (taula 5.11) del model B de la figura 5.56 continuen aproximant-se millor al tall de camp que les del model C de la figura 5.57, la variabilitat i la geometria general d'aquest darrer permeten assumir aquesta modelització com la millor, tenint en compte les possibilitats de l'algoritme de deformació FPF.

La modelització cinemàtica en avanç de les transversals de Manyanet i Sta. Bàrbara s'ha fet seguint el mateix procediment que en el cas anterior. És a dir, partint de les restitucions LLU corregides de la figura 5.33, s'ha efectuat diversos assaigs de modelització utilitzant diferents valors de π (0°, -10°, -20° i -30°), i els resultats d'aquest treball han indicat que el procediment final escollit per a la transversal de Coll de Fades també és aplicable en aquestes transversals. Per tant, els models cinemàtics de la figura 5.58 s'han fet en dues etapes, en la primera es modelitzen dels encavalcaments amb $\pi = -20^\circ$ i en la segona els retroencavalcaments amb $\pi = 0^\circ$.

El resultat obtinguts en les dues transversals s'aproximen suficientment als talls de camp, tot i que presenten els mateixos problemes que la modelització de la transversal de Coll de Fades (taula 5.12).

En la transversal de Manyanet, les principals diferències es donen en el bloc superior del retroencavalcament 3, degut a que el canvi d'angle en l'entroncament basal d'aquesta estructura és més elevat que en les altres transversals, i que el seu desplaçament també és major. Això fa que el volum de material que creua la inflexió sigui més gran, i per tant la seva zona d'influència és major, resultant en una major distorsió de la geometria del seu bloc superior.

En la transversal de Sta. Bàrbara, les diferències més importants també es troben al bloc superior del retroencavalcament 3, però no són tan importants com en la modelització del tall de Manyanet. En aquest cas, la complexitat es veu augmentada pel funcionament dels retroencavalcaments 4 i 5, que impliquen el desplaçament del pla axial de l'anticlinal que presenta el bloc superior del retroencavalcament 3 cap a una posició més elevada de la que s'observa en el tall de camp.

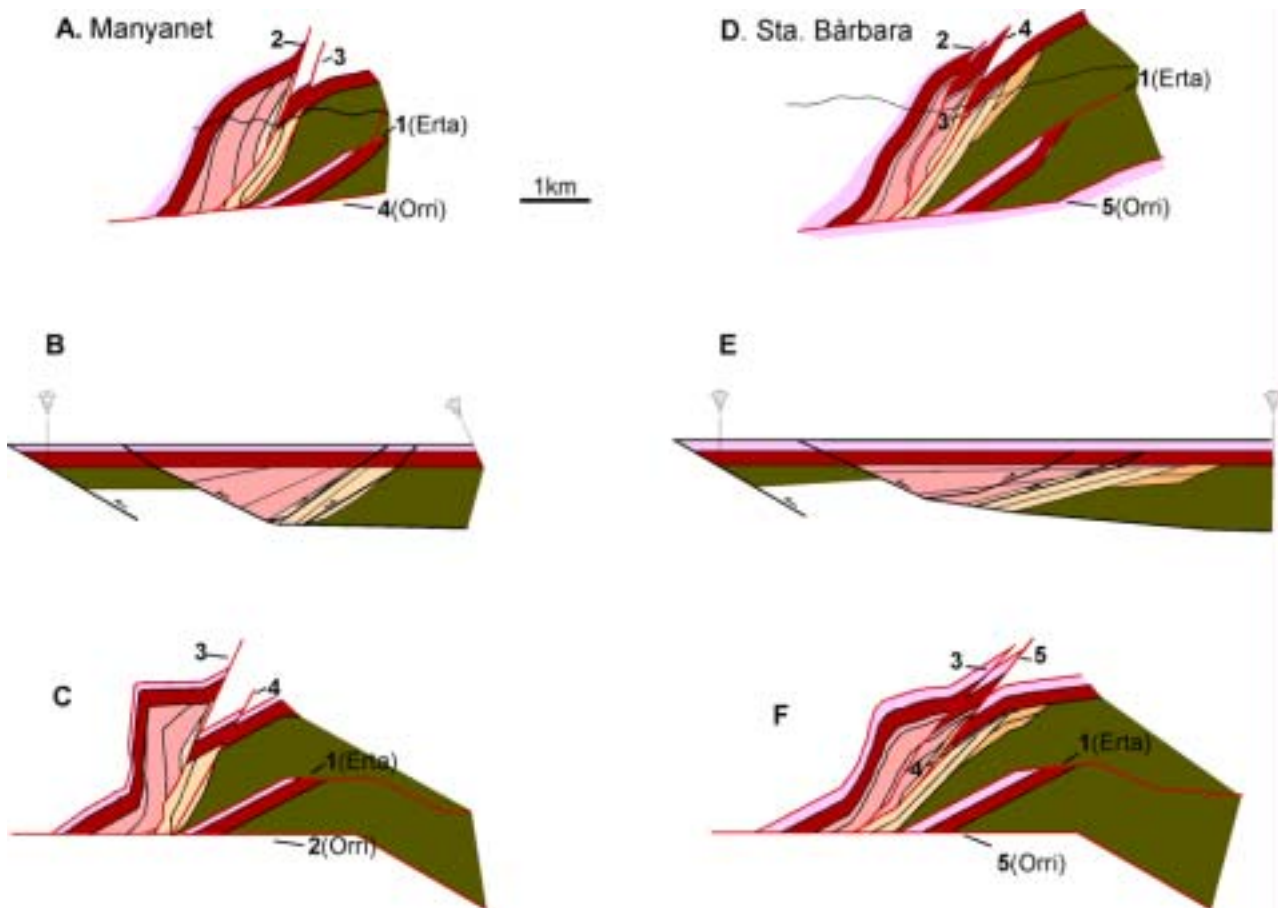


Fig. 5.58.- Modelització cinemàtica de les transversals de Manyanet i Sta. Bàrbara. **A.-** Tall de camp de la transversal de Manyanet. **B.-** Restitució LLU corregida del tall A (fig. 5.33), la numeració indica l'ordre real de funcionament de les estructures. **C.-** Modelització FPF de la transversal de Manyanet. Els encavalcaments d'Erta (1) i d'Orri (2) amb $\pi = -20^\circ$ i els retroencavalcaments 3 i 4 amb $\pi = 0^\circ$, la numeració indica l'ordre de modelització de les estructures. **D.-** Tall de camp de la transversal de Sta. Bàrbara. **E.-** Restitució LLU corregida del tall D (fig. 5.33), la numeració indica l'ordre real de funcionament de les estructures. **F.-** Modelització FPF de la transversal de Sta. Bàrbara. Els encavalcaments d'Erta (1) i d'Orri (2) amb $\pi = -20^\circ$ i els retroencavalcaments 3, 4 i 5 amb $\pi = 0^\circ$, la numeració indica l'ordre de modelització de les estructures. L'escala és la mateixa per a totes les figures.

	Esc. (m/%)	Relleu (m)	P _{max} (m)	P _{min} (m)	P _{max} /P _{min} (%)
Manyanet					
Tall de camp	5072 / 87	2299	247	160	154
Model FPF	5025 / 82	2214	200	200	100
Relació (%)	99	96	111	72	
Sta. Bàrbara					
Tall de camp	5813 / 80	2559	232	147	158
Model FPF	5571 / 72	2215	200	200	100
Relació (%)	96	86	116	73	

Taula 5.12.- Comparació dels paràmetres dels tall de camp i de les modelitzacions FFF de les transversals de Manyanet i Sta. Bàrbara (fig. 5.58). Esc.: escurçament horitzontal. Relleu: distància vertical entre l'encavalcament d'Orri i el punt més elevat del sostre del Buntsandstein. P_{max}.: Potència màxima del Buntsandstein en una transversal. P_{min}.: Potència mínima del Buntsandstein en una transversal.

En síntesi, els models FPF dels talls de Coll de Fades, Manyanet i Sta. Bàrbara, indiquen que la modelització d'aquestes seccions utilitzant el 2DMove dona bons resultats, tot i que requereix un coneixement previ de les característiques geomètriques, cinemàtiques i mecàniques de la deformació, per poder comprendre i acotar els paràmetres i limitacions de la modelització, i consegüentment per donar validesa analítica als resultats.

5.3.4 Restitució cinemàtica dels talls de camp

Un cop efectuada aquesta anàlisi dels algorismes de modelització cinemàtica del 2DMove és evident que la restitució cinemàtica dels talls de la zona de les Nogueres requereix un procediment propi, donada la complexitat estructural d'aquesta zona. El principal problema que presenten els talls és el gran nombre d'escates i la relació espacial i temporal entre aquestes. La inversió de les làmines encavalcants més antigues, que només es pot aconseguir utilitzant l'algoritme FPF, que serà el que utilitzaré per defecte en aquests talls. Com es mostra a la figura 5.49, la modelització d'estructures amb un alt grau de superposició tectònica dona lloc a geometries poc realistes com a conseqüència de la necessitat d'utilitzar valors de cisalla angular (π) diferents de 0. Això implica una elevada deformació interna finita, com a conseqüència de la superposició de la deformació associada a l'emplaçament d'escates subjacents.

Una altra característica de la zona de les Nogueres és el funcionament simultani de les estructures encavalcants i retroencavalcants, que el programa no permet reproduir, i per tant, obliga a l'usuari a establir una seqüencialitat entre les estructures per a poder modelitzar la secció completa, tal com s'ha fet en els models de les figures 5.56, 5.57 i 5.58.

Finalment, l'últim aspecte a tenir present en restituir cinemàticament els talls és la direcció d'escurçament tectònic. Els talls modelitzats són paral·lels a la direcció de transport, tot i que no és descartable que, degut a la seva geometria, alguna làmina encavalcant generi rotacions fora del pla dels elements estructurals que té per sobre, limitant així la precisió de la restitució. Per tant, en valorar els resultats d'aquest procés, cal tenir present que la seva fiabilitat disminueix en les escates més antigues.

A la figura 5.59 es mostra el procés seguit per a la restitució cinemàtica dels talls de la zona de les Nogueres. El primer pas realitzat ha estat la projecció de les dades de camp disponibles (contactes i cabussaments) en el perfil topogràfic. El següent pas és establir la relació temporal entre els diferents encavalcaments a partir de l'anàlisi de les relacions tectono-sedimentàries i de tall, tant en la secció modelitzada com en les seccions adjacents i en la cartografia geològica en general. Un cop establerta la seqüència d'emplaçament, es divideix la secció en parts que posteriorment es restituiran per separat, per a evitar la magnificació de la cisalla angular associada a la superposició d'encavalcaments. En general, s'han separat les parts del tall corresponents a les unitats tectòniques principals: Erta i Nogueres (fig. 5.60).

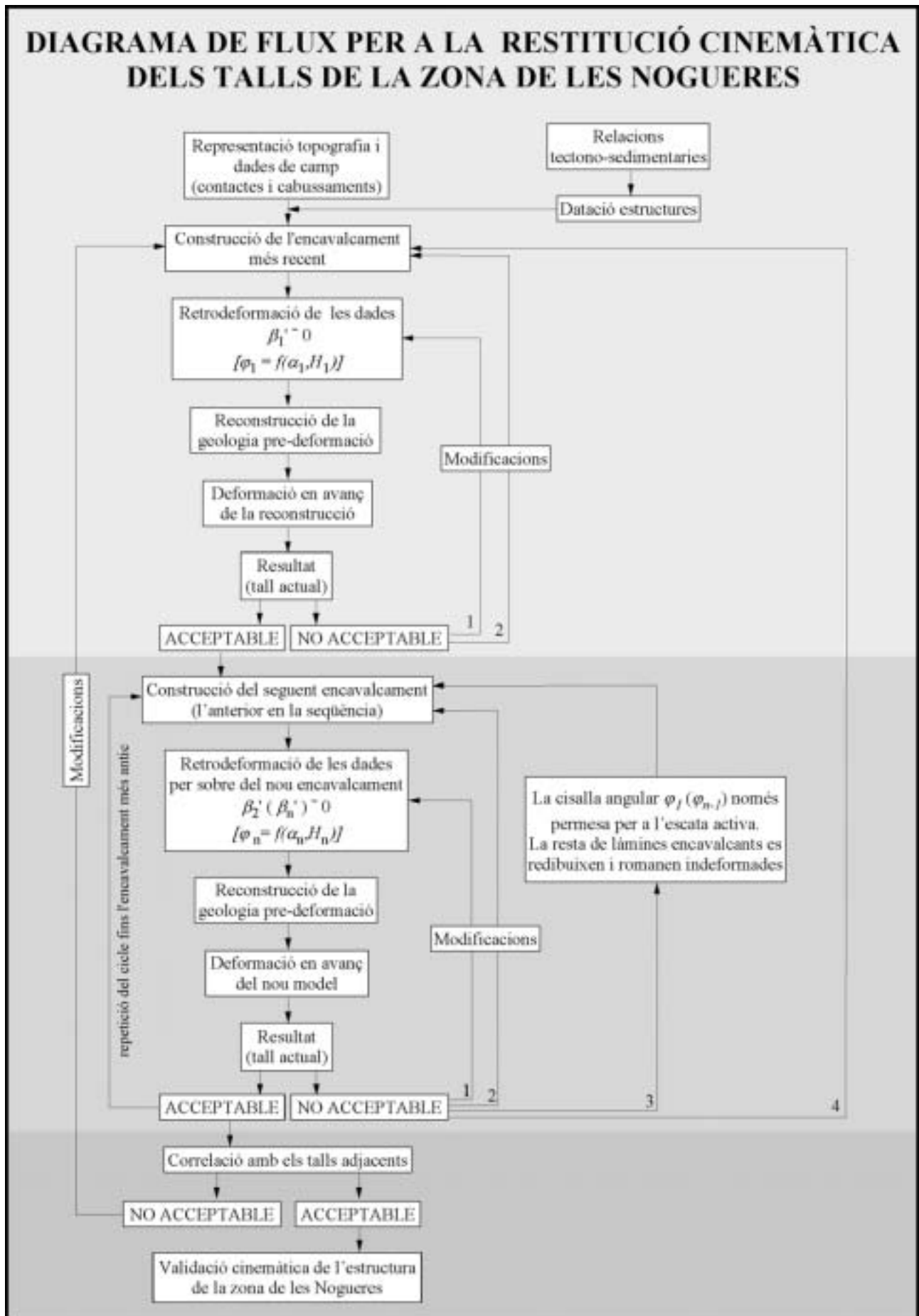


Fig. 5.59.- (pàg. anterior) Diagrama de flux per a la restitució cinemàtica dels talls de la zona de les Nogueres. ζ_n - angle de rampa de l'encavalcament n. $\eta\#_n$ - cabussament de les capes incloses a la làmina encavalcant n en la restitució. H_n - desplaçament horitzontal de l'encavalcament n. π_n - cisalla angular associada a l'encavalcament n.

La restitució cinemàtica de les parts de la secció es realitza en ordre invers al seu emplaçament, i per tant, es comença amb la més moderna, la unitat d'Erta. En aquest cas, també cal realitzar algunes consideracions prèvies abans de la modelització de les estructures. Com he discutit en el capítol d'anàlisi estructural de la zona de les Nogueres, els retroencavalcaments que afecten la conca d'Erill Castell presenten dues etapes de funcionament, una simultània a la inversió de la conca, i l'altra associada a l'aixecament tectònic generat per l'encavalcament d'Orri. Això implicaria la modelització dels retroencavalcament en dues etapes, una al principi de la restitució, la corresponent a l'emplaçament de la unitat d'Orri, i una altra al final, corresponent a l'estadi inicial de la inversió tectònica, moment en el que s'originen els retroencavalcaments paral·lels a l'estratificació. Per simplificar el procés, tot l'escurçament corresponent als retroencavalcaments s'ha modelitzat al principi del procés. A més, aquesta opció també soluciona el problema de la simultaneïtat entre l'encavalcament d'Erta i els retroencavalcaments, i els canvis de desplaçament característics d'aquests.

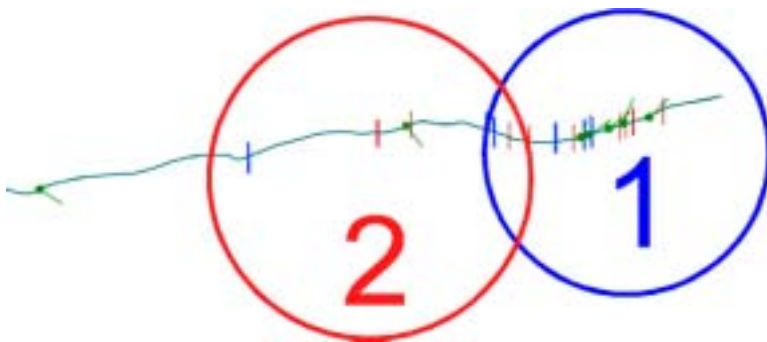


Fig. 5.60.- Primera fase de la restitució cinemàtica del tall de Sta. Bàrbara. Projecció de les dades de camp i separació de les principals unitats estructurals. Vermell.- contactes estratigràfics; blau.- falles; verd.- cabussaments de les capes; 1.- part corresponent a la unitat d'Erta (fig. 5.61); 2.- part corresponent a la unitat de les Nogueres.

La modelització dels retroencavalcaments comença, a la seva vegada, per establir el seu ordre de funcionament. Utilitzant els criteris cinemàtics, de camp i dels models analògics discutits en el capítol d'anàlisi estructural de la Zona de les Nogueres, s'ha definit una seqüència de bloc inferior per a aquestes estructures. Per tant, considerant la seva vergència cap a la zona axial, els retroencavalcaments més septentrionals seran els més recents. En aquest punt, ja es pot començar la restitució pròpiament dita (fig. 5.61).

El primer pas, consisteix a dibuixar el retroencavalcament més recent, a partir de les dades disponibles (fig. 5.61A). Una vegada s'ha definit el traçat de l'encavalcament, es restitueixen les dades disponibles, utilitzant valors de π i desplaçament (H) deduïts a partir dels cabussaments i els contactes estratigràfics. Seguidament es repeteix el procediment amb el següent retroencavalcament i finalment es completa la geologia anterior al funcionament d'aquestes estructures, prenent com a referència les dades de camp

restituïdes. Si el resultat d'aquest procés és realista, es procedeix a la deformació en avanç de la restitució, utilitzant els mateixos valors de $\pi\#H$ que en la restitució cinemàtica.

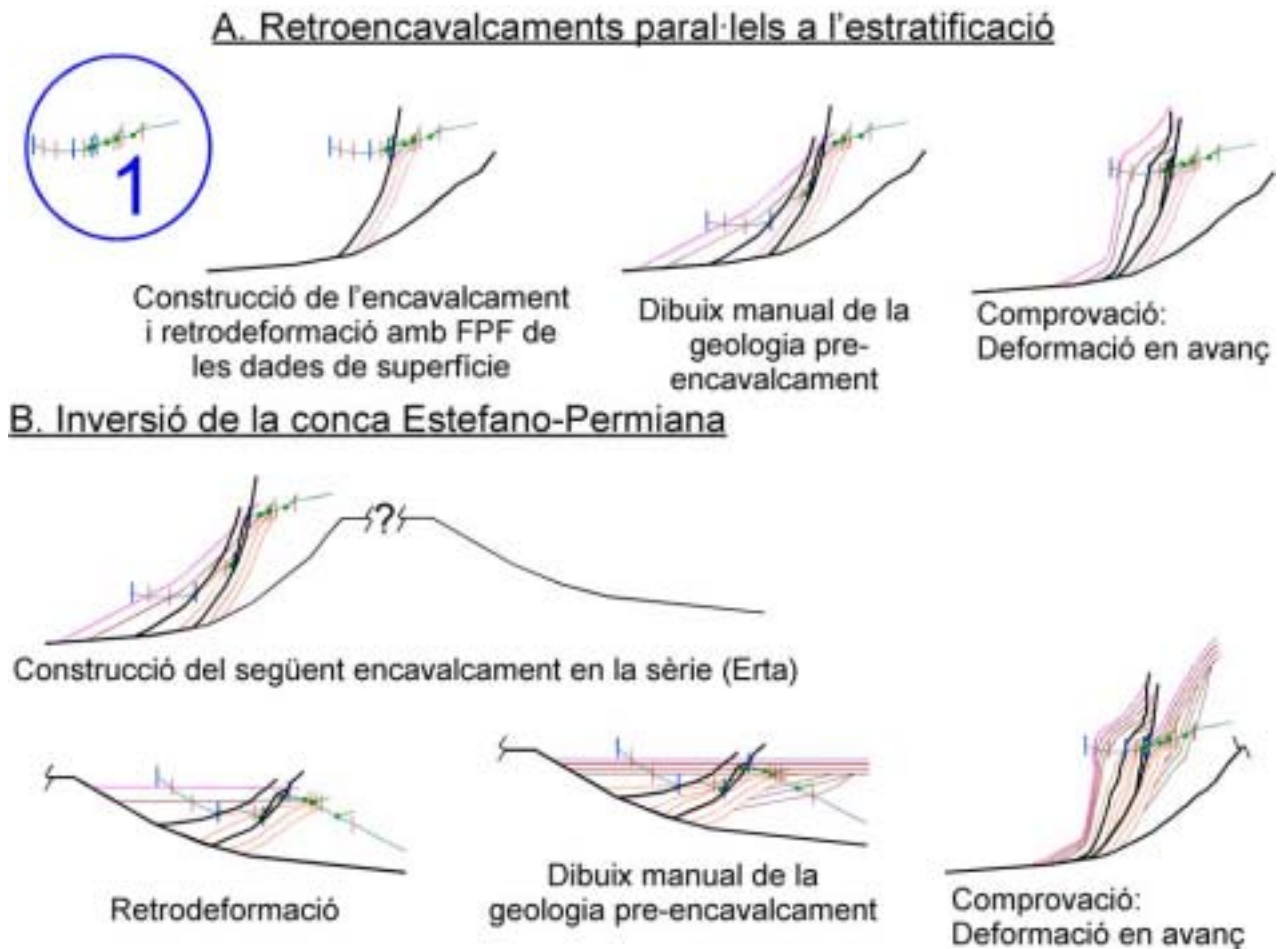


Fig. 5.61.- Procés de restitució cinemàtica amb l'algoritme FPF de la unitat d'Erta en el tall de Sta. Bàrbara. **A.**- Restitució dels retroencavalcaments. **B.**- Restitució de l'encavalcament d'Erta.

El resultat final ha de mantenir les dades de superfície inicials inalterades, i si la geometria de la secció és coherent, el tall quedarà cinemàticament validat. Si en algun punt del procés els resultats no s'ajusten als criteris geològics i geomètrics establerts, es torna a començar el procés. Primer provant diferents valors de $\pi\#H$, i si així no fos suficient, es redibuixa el retroencavalcament. El procés es repeteix tantes vegades com sigui necessari, fins que el tall geològic i la restitució siguin geològicament acceptables.

Quan la part corresponent als retroencavalcaments ja ha estat validada, es procedeix a la restitució cinemàtica de l'encavalcament d'Erta (fig. 5.61 **B**). El primer pas es dibuixar el traçat de l'encavalcament d'Erta deformat, és a dir, la seva geometria actual. En la naturalesa, aquesta geometria és el resultat de la deformació produïda per l'encavalcament d'Orri. En aquest cas, com que les unitats principals es modelitzen separatament, no es restitueix cinemàticament la unitat d'Orri, sinó que es pren com a punt de partida el traçat actual de l'encavalcament d'Erta, malgrat que aquest es trobi inclinat cap a l'avantpaís. Per tant, partint de la situació resultant de la restitució cinemàtica dels retroencavalcaments, es prolonga horitzontalment

l'encavalcament d'Erta cap a la Zona Axial (fig. 5.69B). Posteriorment es transporta totes les dades disponibles sobre el replà, utilitzant valors de $\pi\#H$ que donin com a resultat una geometria pròxima a la d'un *forelimb* sobre un replà de bloc inferior. El resultat d'aquest pas correspondria a una simplificació de la deformació associada a l'escata subjacent d'Orri.

A partir d'aquesta situació (fig. 5.61 B), es procedeix a la construcció de la rampa de bloc inferior de l'encavalcament d'Erta. Això es realitza restituint cinemàticament les dades de superfície, utilitzant diferents valors de $\pi\#H$ i ζ (angle de rampa), fins a aconseguir una combinació de paràmetres que disposi la base i el sostre del Buntsandstein horitzontals i generi una geometria coherent de l'encavalcament. Quan això s'aconsegueix, es completa les parts de la secció que encara no han estat dibuixades, condicionades per les dades de superfície restituïdes, i es corregeixen els elements ja dibuixats que ho requereixin. Finalment, es modelitza en avanç tota la secció fins a la situació actual. Si els resultats són geològicament acceptables i no s'alteren les dades de camp, la part del tall corresponent quedarà cinemàticament validada. Si els resultats no són satisfactoris, es repeteix el procés efectuant modificacions. Primer en els valors de $\pi\#H$ i ζ , després en la geometria dels encavalcaments, i si tot i així no es troba cap solució vàlida, finalment s'hauria de començar el procés des del principi, és a dir, des de la restitució dels retroencavalcaments.

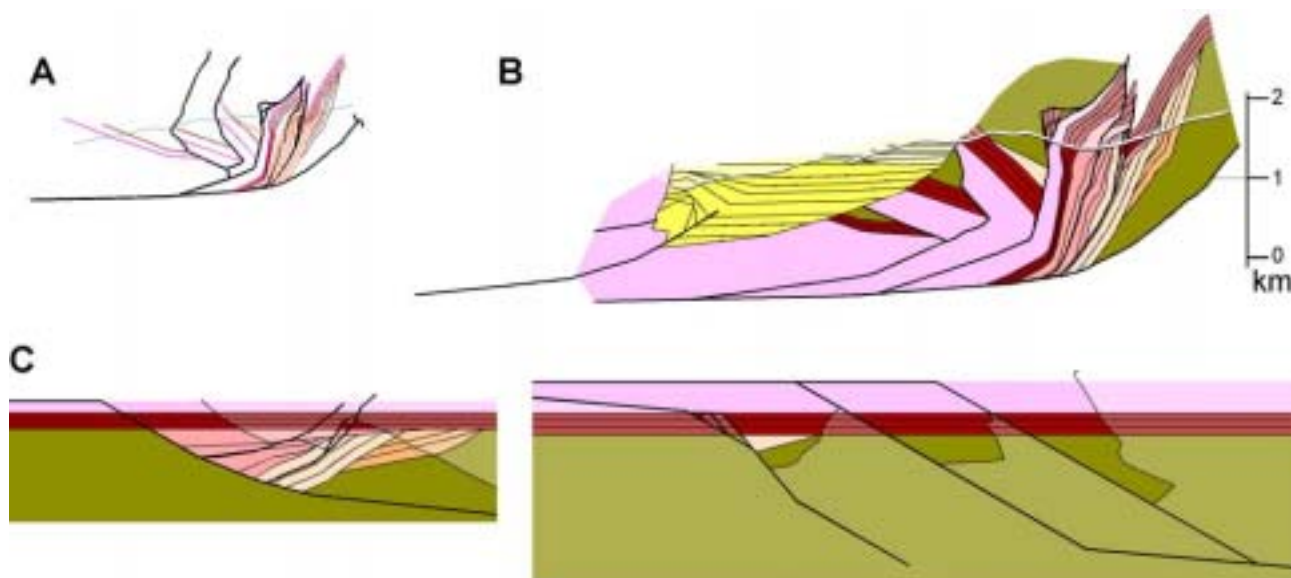


Fig. 5.62.- A.- Tall de Sta. Bàrbara cinemàticament validat amb 2DMove. B.- Tall de Sta. Bàrbara completat amb les estructures que no han estat restituïdes cinemàticament. C.- Restitució cinemàtica del tall de Sta. Bàrbara. Llegenda dels colors a la làmina 1, en annex. En tons més clars s'ha indicat la part de la restitució que actualment es troba per sobre de la superfície topogràfica.

Un dels elements que s'ha de dibuixar en la restitució cinemàtica de l'escata d'Erta, és el traçat de l'encavalcament de Nogueres en aquest sector, abans del seu emplaçament. La modelització en avanç d'aquest element, juntament amb la resta de la làmina encavalcant d'Erta, donarà com a resultat la geometria actual de l'encavalcament de Nogueres. A partir d'aquest punt, el procés a seguir és el mateix que per a

l'escata d'Erta. En la transversal de Sta. Bàrbara, la unitat de Nogueres està dividida en tres escates menors en seqüència de bloc inferior, i per tant la restitució es realitzarà de més modern a més antic, buscant els valors de π i ζ que generin la geometria més acceptable per a cada encavalcament, tal com s'ha fet amb l'escata d'Erta. De la mateixa forma, el resultat final ha de ser coherent amb les dades de camp, i en cas contrari caldria repetir el procés, començant per l'última estructura modelitzada i continuant per l'anterior, repetint el procés fins arribar a l'inici de la restitució si fos necessari. Un cop validada la part corresponent a la unitat de Nogueres, el conjunt de la secció quedarà cinemàticament validat (fig. 5.62). En aquest punt cal completar la secció amb les dades de camp que no han estat incloses en la restitució, però que formen part de la transversal modelitzada, en aquest cas, els conglomerats intramuntans oligocens.

L'últim pas d'aquests procediments de treball, és la validació a escala regional. Les sèries de seccions paral·leles han de mostrar una coherència de resultats que permeti correlacionar les estructures entre seccions adjacents, i així poder definir l'estructura tridimensional de la zona. Si alguna de les seccions no pogués ser correlacionada, caldria buscar una nova solució que s'aproximes millor a les transversals adjacents.

La restitució cinemàtica per parts inclou l'assumpció implícita que la cisalla corresponent a l'emplaçament d'una làmina encavalcant no es transmet a les escates que té per sobre, i obliga a considerar els materials dúctils del Keuper com a un element mecànic de partició de la deformació, com ha estat indicat en el capítol d'anàlisi estructural de la zona de les Nogueres.

5.4 MODELITZACIÓ CINEMÀTICA DE PLECS DE PROPAGACIÓ DE FALLA AMB EL PROGRAMA RampeEM

5.4.1 Modelització de plecs de propagació de falla aïllats (PPF)

Per a la valoració del funcionament de l'algorisme PPF (plecs de propagació de falla) del programa d'anàlisi estructural RampeEM he utilitzat el model analògic **B** de Teixell i Koyi (2003)(fig. 5.1), que presenta plecs de propagació de falla llistats a la taula 5.3 (pàg. 230). A diferència dels algorismes del 2DMove, aquest programa només permet la modelització en avanç, i per tant, s'ha utilitzat com a punt de partida de la modelització la restitució obtinguda per combinació de LLU i FSU de la figura 5.19 (pàg. 249), ja que el RampeEM tampoc permet modelitzar la compactació de les capes de sorra, i l'engruiximent equivalent de les capes de *glass microbeads*. Una altra de les limitacions d'aquest programa és que només permet modelitzar cada encavalcament per separat, sense possibilitat de reproduir sistemes imbricats. Per tant, en aquest apartat s'analitza el funcionament del programa per a plecs de propagació de cisalla aïllats, i en el següent es proposa un mecanisme per a modelitzar cinemàticament sistemes d'encavalcaments.

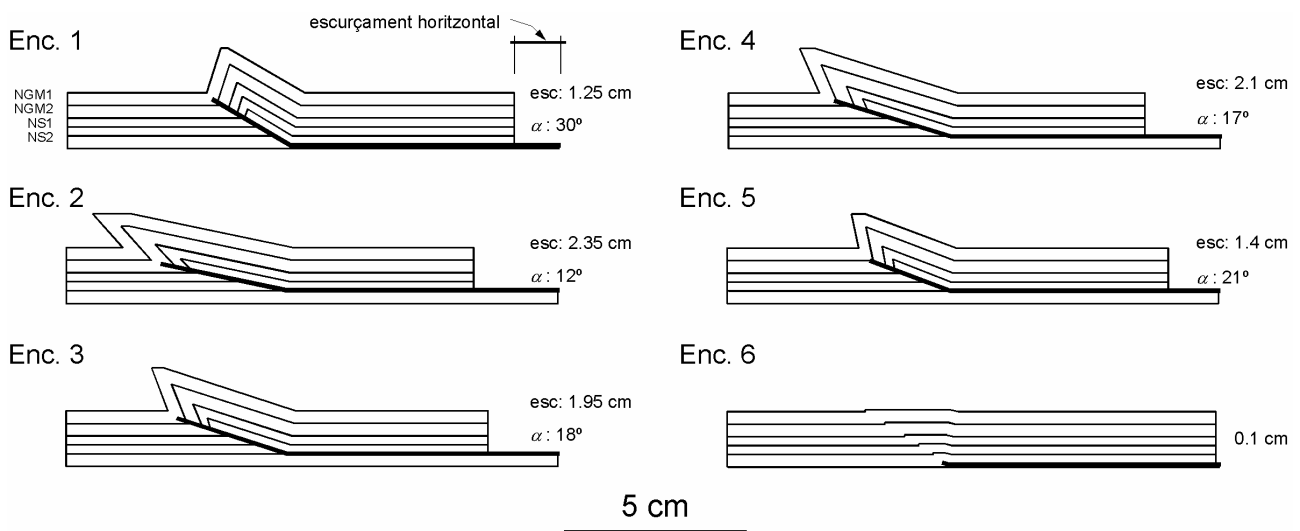


Fig. 5.63.- Modelització en avanç per separat de les escates del tascó de sorra del model **B**. Els gruiços de partida dels models són els obtinguts en la restitució combinada LLU+FSU de la figura 5.19, i els angles de rampa deriven dels observats en el model analògic. L'ordre dels encavalcaments és el que es mostra en la figura. esc: escurçament horitzontal. ζ: angle de rampa.

La modelització de cada una de les escates del tascó per separat (fig. 5.63) permet reproduir els canvis de desplaçament al llarg d'un encavalcament característics del model analògic, i que representen en el model cinemàtic que l'escurçament acumulat per lliscament en les capes basals s'acomodi en forma de plegament en les capes superiors, de tal forma que l'escurçament horitzontal total és el mateix per a totes les capes del model. En tots els encavalcaments (fig. 5.66) la rampa s'ha prolongat fins a la base del nivell NGM1, de tal forma que en les capes de sorra l'escurçament es dona principalment per encavalcament. En la capa NGM2

és més important la component de plegament que la d'encavalcament, i en la capa NGM1 pràcticament la totalitat de l'escurçament horitzontal és per plegament. A excepció de l'encavalcament 1 que s'arrela a la base del model, el nivell de desenganxament s'ha situat al sostre del coixí basal de *glass microbeads*, ja que la major part del lliscament basal es dona en aquesta superfície, i aquest programa no permet la definició d'una geometria replà – rampa – replà en l'estadi de formació dels plecs de propagació de falla. El plec de desenganxament frontal del tascó (enc. 6; fig. 5.63) es desenganxa a la base del tascó, i representa un escurçament horitzontal d'un mil·límetre, necessari per poder generar el plec.

Amb aquest algoritme, per calcular quina és l'opció que més es correspon amb els valors d'escurçament per plegament i encavalcament de cada capa, el paràmetre que s'ha de modificar és l'angle de rampa. La figura 5.63 mostra els resultats que més s'aproximen al model analògic, partint dels angles de rampa mesurats en el tascó, modificats per aproximar el màxim possible els resultats numèrics al model analògic. Per això, els valors d'escurçament de la figura 5.63 s'aproximen als observats en el model (taula 5.3), però no són idèntics. Els angles de rampa obtinguts són relativament baixos, amb l'excepció de l'encavalcament 1 que té un angle de 30° , més pròxim a l'angle de fricció interna de la sorra (fig. 5.63).

La geometria dels plecs de propagació de falla dels models de la figura 5.63 seria clarament inestable en un tascó de sorra, ja que la inclinació dels flancs frontals és molt superior a l'angle de fricció dels materials anàlegs. Tot i així, el tascó de sorra analitzat presenta flancs inversos com els que es desenvolupen en els models cinemàtics, però amb la diferència que els plecs presenten un volum important de material esllavissat davant dels flancs invertits. Per tant, l'algoritme PPF proporciona una solució geomètricament correcta, però mecànicament inestable. Aquesta anomalia es pot solucionar amb l'edició posterior a la deformació dels models, assumint que l'angle de fricció dels materials anàlegs determina el pendent màxim de la superfície del model. Aquesta inclinació definirà una superfície teòrica, que ha de limitar per sota l'àrea en excés de la cresta del plec. Aquesta superfície també representarà el límit superior del material teòricament esllavissat per davant del flanc invertit (fig. 5.64). Les àrees en la secció del material en excés a la cresta dels plecs i del material esllavissat s'han de compensar mútuament. Aquesta solució proporciona una aproximació simplista però efectiva al model real.

Enc. 4

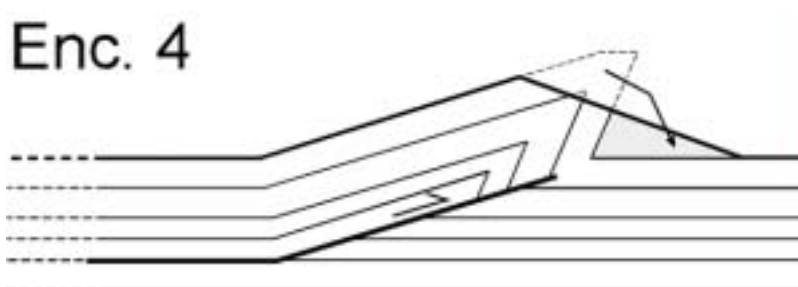


Fig. 5.64.- Correcció de la geometria de l'encavalcament 4 del model **B**. La línia discontinua limita la zona inestable del model cinemàtic, i l'àrea grisa representa la zona de recepció del material esllavissat.

Un cop format el plec de propagació de falla, l'algoritme PPF permet incrementar l'escurçament horitzontal associat a l'encavalcament sense que això comporti un major desenvolupament del plec de propagació. El programa ofereix dues possibilitats: 1) lliscament a favor d'un nou replà creat pel davant de la

rampa, i 2) lliscament a favor d'una nova rampa formada a través del flanc invertit del plec. En el cas del tascó de sorra analitzat, quan es produeix lliscament no acumulat per plegament dels nivells superiors, l'opció més adequada és la del lliscament a favor d'un replà frontal, que en les capes de *glass microbeads* es pot assimilar a part de l'engruiximent que presenten per davant dels plecs de propagació de falla. La figura 5.65 mostra el resultat d'aplicar un increment de 1.65cm en l'escurçament horitzontal de l'encavalcament 3 del model; la part del bloc superior que es troba per davant del límit frontal del model (A) s'ha de traduir en engruiximent. En aquesta figura també es pot observar que la deformació generada per aquesta segona etapa de modelització és la mateixa que la que es genera si s'utilitza l'algoritme FPF del programa 2DMove amb una cisalla angular de 0° , ja que els plans axials dels plecs corresponen a les bisectrius de les inflexions de rampa, alhora que el pla axial III no canvia la seva orientació en desplaçar-se al llarg del replà.



Fig. 5.65.- Desplaçament al llarg d'un replà del plec de propagació de falla associat a l'encavalcament 3 (fig. 5.63). La part del bloc superior que es troba per davant de la línia A es tradueix en engruiximent dels nivells superiors en el model analògic. El paral·lelisme dels plans axials II i III indica que aquesta deformació no suposa cap deformació interna en el replà frontal del bloc superior.

La utilització de l'algoritme PPF amb el programa RampeEM és efectiva per a la modelització en avanç de plecs de propagació de falla, ja que és una forma ràpida de calcular i representar les estructures d'escurçament formades segons aquest mecanisme, a partir dels criteris geomètrics definits per Suppe i Medwedeff (1984) i Suppe (1985). Aquesta naturalesa geomètrica de l'algoritme representa un problema en el nostre cas ja que no considera els problemes d'estabilitat gravitatòria associats a la inversió típica dels flancs frontals d'aquestes estructures. De la mateixa forma que en el tascó de sorra estudiat, que presenta un important volum de material esllavissat davant dels plecs, en la naturalesa també són abundants els sediments sintectònics al peu dels relleus, si els plecs són aflorants en el moment del seu desenvolupament. Per tant, la solució proposada per al tascó de sorra (fig. 5.64), també pot fer-se extensible a la reproducció d'estructures de la naturalesa.

També representa una limitació d'aquest programa la forma en que cal introduir les dades. En tots els models (i amb tots els algoritmes) el punt de partida és una sèrie planoparal·lela de la que l'usuari només pot definir els gruixos de les capes. Per tant, elements tan habituals com les discordances o la presència de làmines encavalcants més antigues en el bloc superior no poden ser modelitzades. Per altra banda, tot i que l'algoritme PPF permet aplicar al paquet deformat un segon estadi de deformació (lliscament sobre replà o trencament del flanc invertit), en aquest estadi no es pot introduir cap modificació al plec, com podria ser l'existència de sediments sintectònics o la formació d'un nou encavalcament en posició més avançada.

5.4.2 Modelització de sistemes imbricats

Com he indicat en la introducció de l'apartat anterior, la modelització de sistemes de més d'un encavalcament amb el programa RampeEM no és possible, donada la impossibilitat d'introduir elements no horitzontals en el bloc superior de l'encavalcament que es vol modelitzar. Per a modelitzar el tascó de sorra de Teixell i Koyi (2003) he optat per utilitzar combinadament l'algoritme PPF del programa RampeEM i l'algoritme FPF del programa 2DMove.

El procés seguit consisteix en dues etapes. En la primera, amb el programa RampeEM he modelitzat cada encavalcament per separat amb l'algoritme PPF (fig. 5.63), reproduint la part de la deformació acomodada per plegament en les capes superiors. En la segona etapa (fig. 5.66), amb el programa 2DMove, he modelitzat la part de l'escurçament per encavalcament no associada a plecs de propagació de falla, utilitzant l'algoritme FPF amb $\pi = 0$, i partint de les geometries obtingudes en la primera etapa.

Aquest procés presenta com a principal problema metodològic l'acumulació de les limitacions específiques de cada algoritme. D'entrada, la definició de la geometria inicial del model amb l'algoritme PPF dificulta l'escalat del model, sobretot en referència a la distància entre encavalcaments. Partint de l'espaiat entre les estructures obtingudes en la restitució (fig. 5.66 B), s'insereixen gràficament i progressiva al model general les geometries deformades de cada una de les escates obtingudes amb el programa RampeEM. La dificultat d'aquest procés augmenta quan la làmina que s'està emplaçant, es troba per sobre el plec de propagació de falla de l'encavalcament subjacent, abans que aquest s'activi. En aquest cas, la ubicació de l'estructura s'ha realitzat utilitzant l'algoritme *Fault Parallel Flow*, i l'alçada "regional" de les capes com a nivell de referència (fig. 5.66 E, F). Aquesta metodologia comporta problemes en el moment de definir el límit posterior del model, que en aquest cas no he definit fins haver modelitzat tots els encavalcaments (fig. 5.66 I).

Un altre problema d'aquest procediment de treball és la pèrdua d'àrea de la secció que es produeix en la modelització successiva dels diversos encavalcaments. Aquesta pèrdua es produeix sota els replans posteriors de bloc inferior (fig 4.63) al exportar les figures del RampeEM al 2DMove, ja que la rampa de bloc inferior s'arrela a la base del model i en aquest procés només s'insereix el bloc superior dels encavalcaments. També es produeix una pèrdua de superfície en la part frontal dels replans de bloc superior durant la modelització amb *Fault Parallel Flow* (fig. 5.66 C-G).

A la figura 5.67 es mostra el resultat de la modelització cinemàtica després d'aplicar a tot el tascó de sorra la correcció de pendent dels flancs frontals, necessària per a obtenir geometries gravitacionalment estables, condicionades per l'angle de fricció interna dels materials. Aquesta modificació no s'ha efectuat al flanc posterior del plec associat a l'encavalcament 1, perquè la inclinació resultant de les capes en aquesta zona està alterada per la important pèrdua de superfície del bloc inferior durant la modelització cinemàtica. Les diferències més importants que s'observen entre el model analògic i el cinemàtic es localitzen a la part posterior i, en menor ordre, per davant del flanc invertit del plec de propagació de falla associat a l'encavalcament 4. L'origen d'aquestes diferències es troba en el nivell basal de *glass microbeads*, que

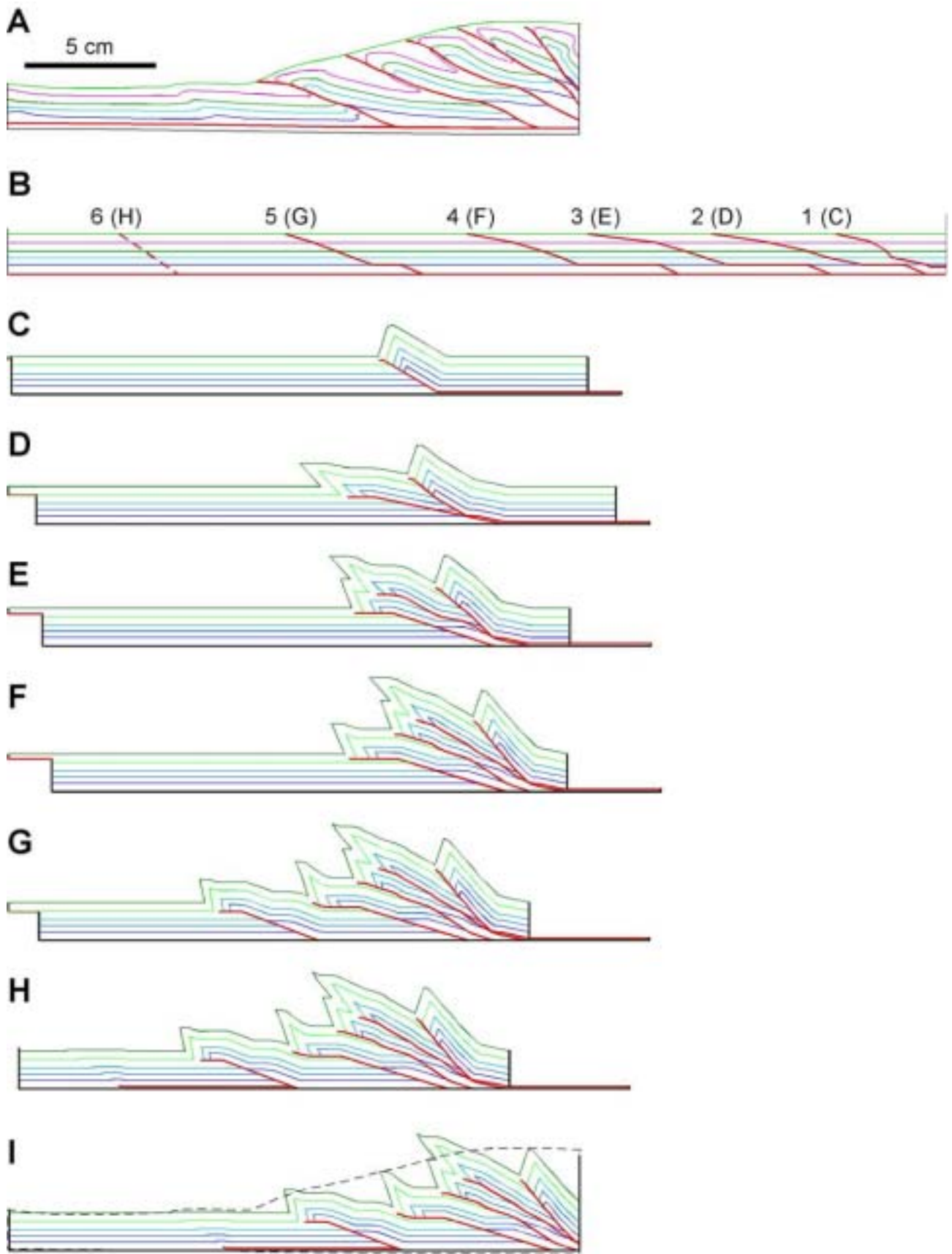


Fig. 5.66.- Modelització en avanç del tascó de sorra Model **B** de Teixell i Koyi (2003) combinant els algoritmes PPF del RampeEM i FPF del 2DMove. **A.**- Interpretació gràfica de la secció. **B.**- Restitució combinada utilitzant els algoritmes *Flexural Slip Unfolding* i *Line Length Unfolding* del 2DMove (Els nombres indiquen l'ordre de funcionament dels encavalcaments i les lletres indiquen en quina figura es representa el seu emplaçament). **C, D, E, F, G i H.**- Emplaçament successiu dels encavalcaments (veure explicació en el text). **I.**- Comparació entre el resultat de la modelització cinemàtica i l'envolupant del tascó de sorra.

en el tascó de sorra presenta un engruiximent que la modelització cinemàtica no reproduïx (el·lipses negres, fig. 5.67 **B**). Les zones de més engruiximent coincideixen amb els punts on el límit superior del tascó de sorra i del model cinemàtic més es distancien.

Per altra banda, el procediment permet reproduir les estructures típiques d'aquest tascó de sorra, en què no tots els replans de bloc superior tenen el seu equivalent en el bloc inferior (Koyi i Teixell, 2003). En el model cinemàtic, la no correspondència és el resultat de la pèrdua durant el procés de modelització de part dels replans de bloc inferior. Aquesta eliminació, tot i no correspondre al que succeeix en la realitat, si que pot ser indicativa de la importància de l'engruiximent del nivell basal en l'evolució estructural del tascó.

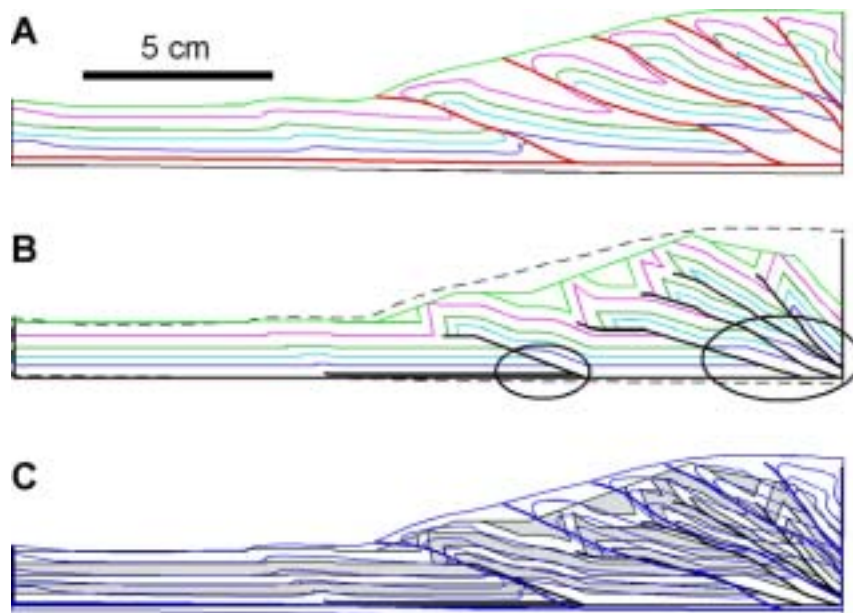


Fig. 5.67.- Correcció del pendent de la superfície del model cinemàtic. **A.**- Tascó de sorra. **B.**- Model cinemàtic corregit. Les el·lipses indiquen les zones del model cinemàtic que més es distancien del tascó de sorra. **C.**- Superposició dels resultats de la modelització cinemàtica (alternança de capes grises i blanques) i la modelització analògica (línies blaves).

La millor aproximació al tascó de sorra que he pogut fer amb els programes es presenta a la figura 5.67. La diferència d'àrea de la secció entre els dos models (analògic i numèric) és d'aproximadament 6.5 cm^2 , xifra que correspon a una disminució de superfície del 12% del model cinemàtic respecte el tascó de sorra. Si en realitzar el càlcul es té en compte l'àrea del nivell de *glass microbeads* basal perduda al inserir successivament els encavalcaments en el tascó de sorra (fig. 5.63), i la perduda per encavalcament en la part frontal del model (fig. 5.66), la diferència es redueix a 2.1 cm^2 , és a dir, a un 3.65%. Tenint en compte el procés seguit, aquesta diferència entra dins d'un marge acceptable, tot i que l'estructura interna de les escates

que es troben per sobre de les zones d'engruiximent presenta una inclinació més elevada cap al "rerepaís" en el model cinemàtic, precisament com a conseqüència de la no reproducció de l'engruiximent tectònic, que impedeix en el tascó de sorra la rotació normal de les estructures més antigues.

Tot i que el resultat d'aquest procediment és satisfactori, el procés seguit i la quantitat d'assumpcions i incerteses associades és tan elevat que la validesa dels resultats per a un cas en el que no es tingui un grau de coneixement tan elevat de l'estructura és qüestionable. Exemples de les assumpcions més importants de la modelització cinemàtica són: 1) Ubicació manual dels plecs en funció de la geometria final del model, sense considerar l'efecte de la compactació; 2) Assumpció d'un particular tipus de plegament (estrictament flexural) i conseqüentment, del paral·lelisme i potència constant de les capes a l'avantpaís, 3) Pendent de la superfície del model només determinat per l'angle de fricció interna i 4) Encavalcaments amb geometria simple replà – rampa – replà.

5.4.3 Conclusions referents a la utilització de l'algoritme PPF del programa RampeEM

Els resultats presentats tant en l'apartat de modelització d'encavalcaments simples, com en el de modelització de sistemes imbricats, fan evident que les restriccions de l'algoritme PPF del programa RampeEM són importants, sobretot com a conseqüència del format d'introducció de les dades que dificulta la definició dels paràmetres inicials de manera que s'ajustin a la realitat. Per altra banda, la simplicitat de les possibilitat que ofereix aquest programa, impedeix introduir al model situacions tan habituals com canvis en l'angle de rampa, presència de capes inclinades, formació de sistemes imbricats, etc. A més, el fet que només permeti la modelització en avanç limita la utilització del programa com a element de validació de talls geològics.

La principal aportació d'aquest programa és la seva utilització com a eina d'anàlisi cinemàtic, ja que ajuda a visualitzar de forma ràpida les estructures de tipus "plec de propagació de falla" per a diferents valors de l'angle de rampa, escurçament i profunditat del nivell de desenganxament, aportant llum a casos en que pugui interpretar-se que l'estructura observada al camp correspon a una situació d'aquest tipus.

5.5 VISUALITZACIÓ I MODELITZACIÓ 3D: APLICACIÓ I VALORACIÓ

La tècnica de visualització tridimensional utilitzada en aquesta tesi es basa en l'elaboració de seccions bidimensionals paral·leles i la posterior interpolació de superfícies entre seccions, utilitzant la funció de construcció de superfícies reglades del programa Autocad, que és un programa assequible i amb molta difusió, descrita en el capítol 3. En aquest apartat es descriu com s'ha aplicat aquest procediment i quines són les principals limitacions que presenta.

La figura 5.68 mostra l'evolució en quatre estadis d'un encavalcament simple replà – rampa – replà, amb una conca sedimentària situada per davant de anticlinal de rampa i desenganxada en el replà superior. Aquesta estructura relativament simple ha estat utilitzada per il·lustrar el procediment seguit.

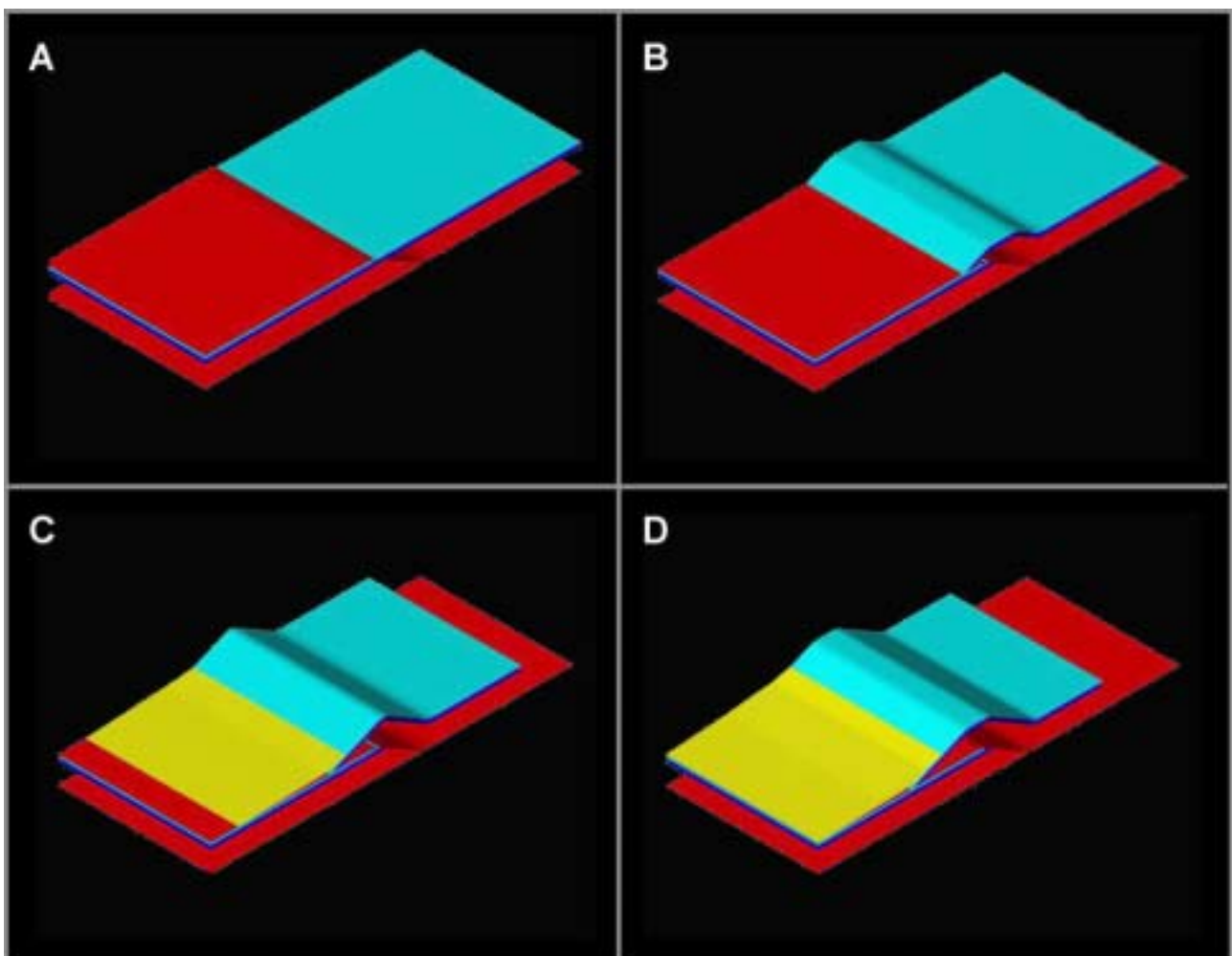


Fig. 5.68.- Reconstrucció tridimensional de l'evolució d'un encavalcament per interpolació entre dues seccions paral·leles. A - D.- Estadis successius de deformació. De color vermell es representa l'encavalcament, en blau dues superfícies estratigràfiques afectades per l'encavalcament, i en groc els sediments sintectònics.

L'estructura tridimensional obtinguda és perfectament cilíndrica perquè les seccions paral·leles utilitzades per reconstruir-la són idèntiques, i no hi ha cap canvi d'orientació a la zona interpolada. En conseqüència, el

resultat és fàcilment visualitzable tant en format 2D com 3D, i aparentment representa una bona solució. Tot i així, malgrat la simplicitat de l'estructura modelitzada, ja es manifesten en el model algunes de les limitacions d'aquesta tècnica. Pel que fa a la reconstrucció de superfícies, el programa Autocad està molt condicionat per la geometria de les seccions utilitzades, ja que un cop les superfícies han estat construïdes no poden ser editades. Per tant, si a la zona compresa entre els dos talls existeix algun element que n'altera la geometria, ja sigui d'origen tectònic, estratigràfic o erosiu, la reconstrucció no el reflecteix, i no és possible introduir-lo quan aquesta ja està feta. Per exemple, si els sediments sintectònics del model corresponen a un ventall al·luvial amb la zona apical encaixada a la cresta de anticlinal de rampa, entre les dues seccions, aquesta tècnica no permet la seva reproducció. Això implica, que la densitat dels talls seriatos ha d'estar determinada per les variacions laterals que s'observin en les superfícies reconstruïdes.

En referència a la modelització cinemàtica de la deformació, la tècnica utilitzada per a elaborar les figures de l'apartat 4.5 no correspon a una modelització tridimensional, sinó que consisteix en la reconstrucció tridimensional d'estadis intermedis obtinguts amb tècniques de modelització 2D. Aquest procés no comportaria cap problema en un model com el de la figura 5.68, donada la seva simplicitat. No obstant, si es modelitza una estructura amb desplaçaments oblics aquesta tècnica no permet reproduir-los, principalment perquè està subjecte a les limitacions pròpies dels algorismes de modelització cinemàtica 2D, descrits en els apartats anteriors.

A la figura 5.69 es mostren dos exemples de reconstruccions tridimensionals elaborades a partir dels talls geològics de la zona de les Nogueres. En aquestes figures es fa evident la subordinació de la reconstrucció a les característiques de cada tall. La figura 5.69A correspon a l'estructura 3D de la làmina d'Erta entre la vall del Flamicell i la transversal de la Coll de Fades, elaborada a partir de talls transversals. En aquesta zona la làmina d'Erta conté la fossa d'Erill Castell, que està afectada per la franja de retroencavalcaments de St. Quiri, i la seva geometria general correspon a un anticlinal de rampa basculat cap al sud com a conseqüència de l'emplaçament d'escates subjacents. La reconstrucció 3D reproduceix amb una fidelitat acceptable aquests trets, però les superfícies representades no corresponen exactament a la seva geometria actual, ja que la interpolació no té en compte el seu traçat cartogràfic que, junt amb dades puntuals de cabussament, és l'únic element de constrenyiment de què es disposa entre els talls. Això es tradueix en superfícies dividides en dominis planars, amb els vèrtexs situats en les línies de tall, que són molt evidents al dibuix.

Per la seva banda la figura 5.69B correspon a la reproducció de l'estructura del bloc superior de la finestra de Rialp, elaborada a partir de talls orientats E-W. Aquesta zona correspon a la terminació oriental de la làmina encavalcant d'Erta, i és caracteritzada per la presència de falles i rampes obliqües. La tendència general de les superfícies de la zona està representada satisfactòriament en la figura, però el fet que algunes de les superfícies només estiguin representades en algun dels talls, implica que la seva reconstrucció tridimensional només es pugui fer parcialment. Per altra banda, la densitat dels talls d'aquesta figura és superior a la de la figura 5.69A, i per tant l'estructura aconseguida s'aproxima molt més a la que es vol reproduir (i les línies de tall no són tant marcades). En conseqüència, si la interpretació de l'estructura reproduïda és correcta, la solució obtinguda és molt satisfactòria.

Per altra banda, una altra de les característiques de la tècnica utilitzada per reconstruir superfícies 3D que es fa evident en la figura 4.69 és la limitació de la visualització que representa la seva reproducció en un format bidimensional. Per això, les figures 3D d'aquesta tesi es presenten en arxius amb format DXF en un CD adjunt.

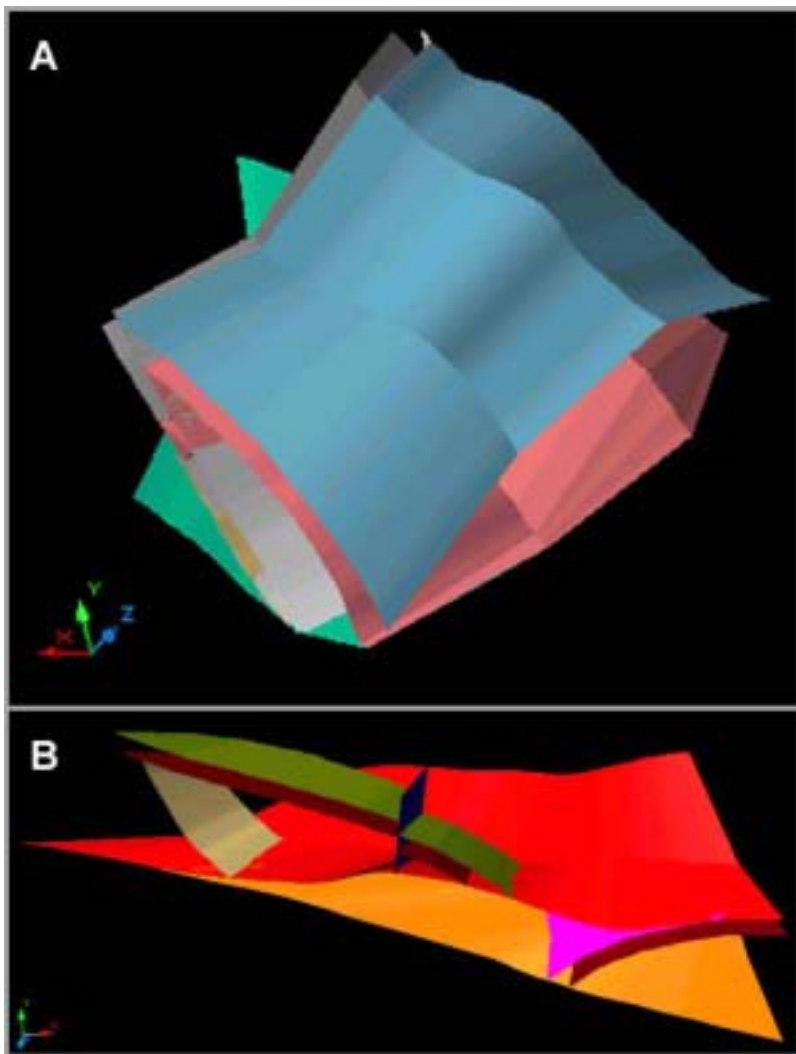


Fig. 5.69.- Exemples de superfícies de la zona de les de les Nogueres reconstruïdes tridimensionalment.

A.- Reconstrucció 3D de la làmina encavalcant d'Ertà i l'encavalcament de Sta. Bàrbara a la zona compresa entre la vall del Flamicell i la transversal de Coll de Fades.

B.- Reconstrucció 3D de l'estructura del bloc superior de la finestra de Rialp (vall de la Noguera Pallaresa).

En síntesi, la tècnica de visualització 3D utilitzada està molt limitada per les línies de tall a partir de la qual es construeixen les superfícies, mostrant una relació molt evident entre la densitat dels talls geològics i la fidelitat de les superfícies obtingudes. Per tant, tenint en compte la complexitat de gran part de les estructures estudiades, les reconstruccions tridimensionals presentades s'han d'entendre com aproximacions generals a l'estructura que es vol reproduir, donant una idea de la tendència geomètrica de les superfícies reconstruïdes, sense intentar reproduir amb exactitud la seva geometria actual. Per la seva banda, les figures corresponents a la reconstrucció tridimensional de l'evolució cinemàtica de la zona d'estudi, elaborades a partir d'estadis successius de deformació, estan limitades pels mateixos aspectes i per les limitacions pròpies dels algorismes de modelització utilitzats, presentats en els apartats anteriors. Tanmateix, ajuden a comprendre tridimensionalment una estructura.

5.6 CONCLUSIÓ: APLICABILITAT I LIMITACIONS DELS SISTEMES UTILITZATS

L'anàlisi extens que he realitzat dels diferents algoritmes de restitució i modelització cinemàtica que ofereixen els programes 2DMove i RampeEM mostra que cal diferenciar entre les seves possibilitats com a eina de restitució i validació de talls geològics, i la seva utilització com a eina analítica. És per això que en aquest apartat es valoren per separat cada una d'aquestes aplicacions.

Com és natural, la utilització d'aquests programes obliga a una sèrie de simplificacions, entre les que destaca, l'assumpció que la deformació dels talls analitzats es dona sempre en condicions de *plane strain*, donada la naturalesa bidimensional dels programes.

Utilització dels programes com a eina de restitució i validació de talls geològics:

La possibilitat d'utilitzar algoritmes de restitució i algoritmes de modelització obliga a diferenciar entre restitució geomètrica i restitució cinemàtica (també referida en el text com a modelització en retrocés o retrodeformació cinemàtica). Els resultats assolits per un o altre mètode no són els mateixos, ja que les divergències conceptuals condicionen tot el procés. No obstant, quan més pròximes siguin les solucions obtingudes per un i altre mecanisme, major serà la consistència dels models i talls geològics.

- ∉ El programa 2DMove ofereix diversos algoritmes de restitució geomètrica (LLU, FSU i SSU) que poden ser utilitzats per a validar talls geològics, tot i que la seva aplicació no sempre és possible:
 - L'algoritme *Line Length Unfolding* (LLU) és la versió informàtica del mètode tradicional de restitució per preservació de la longitud de les capes, i per tant és ràpid, però presenta problemes en la restitució de superfícies inclinades com les falles o sèries discordants. En el cas dels talls de la zona de les Nogueres, aquest algoritme ha permès accelerar el procés de desplegament de totes les superfícies i disminuir l'error associat a la restitució manual, millorant, per tant, els resultats obtinguts per Saura (2000).
 - L'algoritme *Flexural Slip Unfolding* (FSU) desplega les estructures presents en el tall, mantenint-ne la superfície en secció i els angles entre superfícies. Aquest algoritme és el més recomanable, però la seva utilització és limitada en talls estructuralment complexos com els de la zona de les Nogueres, ja que la restitució s'ha de fer per separat i pot necessitar més d'un cicle de desplegament. En aquests casos, la utilització d'un *pin* i una superfície de referència adequats és molt més important per la diversitat en els resultats que cada opció comporten, i a més, el procediment de restitució no sempre dona bons resultats.
 - L'algoritme *Simple Shear Unfolding* (SSU) és l'equivalent a una restitució pel mètode de cisalla inclinada. Per tant, la seva utilització és indicada per a la restitució de talls geològics de zones on el gruix de les capes no es conserva durant la deformació, com per exemple talls geològics d'estructures distensives. Aquest algoritme també és molt sensible a l'elecció dels

- pins* i superfícies de referència adequats, amb la consegüent diversitat de resultats que això pot comportar. En el cas dels talls de la zona de les Nogueres aquest algoritme no es pot utilitzar donada la naturalesa principalment compressiva de les estructures dels talls actuals.
- La restitució geomètrica de talls geològics amb els algoritmes LLU i FSU (sempre que sigui possible) és el procés més complet de restitució i validació dels talls de la Zona de les Nogueres, ja que permet incorporar a la restitució per preservació de la longitud de les capes la informació obtinguda pel mètode del desplegament flexural.
- ≠ La utilització en retrocés dels algoritmes de modelització cinemàtica del programa 2DMove és un mecanisme per a restituir i validar cinemàticament els talls geològics. Els resultats obtinguts amb aquests algoritmes no són els mateixos que els obtinguts amb els algoritmes de restitució, tot i que han de ser pròxims. Els dos algoritmes de modelització que ofereix el programa (FPF i IS) és poden utilitzar com a mecanismes de restitució cinemàtica, tot i que cada un presenta algunes limitacions:
- L'algoritme *Fault Parallel Flow* (FPF) aplica a tots els punts materials del bloc superior un desplaçament paral·lel a la falla, generant una deformació interna determinada per les inflexions del pla de falla i un valor de cisalla angular (π) introduït per l'usuari. Les principals limitacions associades a aquest mecanisme són 1) la determinació de la cisalla angular, que ha de ser igual a l'angle de rampa si es vol preservar la potència de les capes; 2) la propagació homogènia de la cisalla angular a tot el bloc superior sense que es produeixi cap disminució dels seus efectes en allunyar-nos del pla de falla, resultant en una magnificació de la deformació interna en les parts més allunyades; 3) L'acumulació de cisalla angular en sistemes d'encavalcaments en seqüència de bloc inferior que comporta una deformació interna finita molt elevada de les escates més antigues; 4) la no consideració de l'estructura interna prèvia del bloc superior (orientació de les capes, presència d'estructures prèvies...) que genera estructures poc realistes, sobretot als *forelimbs* dels encavalcaments; i 5) la impossibilitat de deformar els blocs inferiors.
 - L'algoritme *Inclined Shear* (IS) aplica al bloc superior un desplaçament horitzontal determinat per l'usuari, i posteriorment projecta el pla de falla del bloc superior sobre la mateixa falla del bloc inferior segons una direcció de cisalla (λ) també determinada per l'usuari. Aquest algoritme no conserva el gruix de les capes ja que la cisalla és obliqua a l'estructura i és especialment útil per a la restitució de falles normals. Els problemes més importants associats a l'IS són 1) la determinació de la direcció de cisalla (normalment orientada antitèticament entre 65° i 80°; 2) la propagació al llarg de tot el bloc superior de la deformació interna associada al desplaçament sense amortir-ne els efectes en allunyar-se del pla de falla; 3) la necessitat d'utilitzar falles que s'horitzontalitzin en profunditat per poder mantenir l'alçada regional del bloc superior; i 4) tal com passa amb l'algoritme FPF, la ignorància de les característiques mecàniques i estructurals del bloc superior, que pot donar lloc a geometries inversemblants.

- Els dos algoritmes de restitució cinemàtica presenten de problemes que podrien solucionar-se si el programa oferís un algoritme de restitució amb cisalla paral·lela a les capes.
- € El programa RampeEM és un programa de modelització en avanç, i no ofereix la possibilitat de restituir talls geològics.
- € La restitució i validació cinemàtica dels talls de la zona de les Nogueres s'ha fet seguint un procés dissenyat especialment. Assumint que l'algoritme FPF és el que millor representa els processos d'emplaçament de les làmines encavalcants d'aquesta zona, he restituït per separat les escates d'Orri, Erta i Nogueres (de més moderna a més antiga), sense considerar la deformació interna que l'emplaçament de cada làmina encavalcant pot generar en les que té per sobre. Això permet evitar l'acumulació de cisalla angular que implicaria una modelització contínua de totes les escates. En aquest procés, només restitueixo les dades disponibles (principalment dades de superfície), buscant els valors d'angle de rampa i cisalla angular que em permetin reconstruir una geometria pre-orogènica coherent. Un cop fet això, he deformat en avanç la reconstrucció obtinguda utilitzant els mateixos valors que en la restitució cinemàtica, però en sentit invers. Si la geometria final és coherent amb les dades de camp, considero que el tall està cinemàticament validat. La utilització d'aquesta metodologia de treball està limitada a aquells talls en què es pot assumir que la direcció de transport de totes les estructures és paral·lela al pla del tall, i en què el nombre i gruix de les làmines encavalcants no sigui excessiu, ja que aquest paràmetre també magnifica la deformació interna de les escates més altes.

Utilització dels programes com a eina analítica:

Tot i les possibilitats que ofereixen aquests programes com a eines per a la restitució i validació de talls geològics, el seu potencial com a eines analítiques és, segons la meua experiència, la seva aportació principal. Malgrat les limitacions de cada algoritme, la seva utilització sistemàtica pot proporcionar informació valuosa per a l'anàlisi estructural d'una zona determinada. Els principals aspectes que cal destacar en aquest camp són:

- € La utilització combinada dels diferents algoritmes de restitució, a part de permetre construir talls geològics més ben constrenyits, localitza ràpidament les zones mal resoltes en els talls de camp, que amb els mètodes tradicionals de treball es podien haver passat per alt. Alguns exemples d'aquesta aplicació són les correccions en el traçat i la profunditat de l'encavalcament d'Erta en la restitució dels talls de la conca estefano-permiana d'Erill Castell – Estac.
- € La sistematització dels programes valorats aporta informació sobre els mecanismes i processos de deformació. D'aquesta forma he efectuat les correccions en els encavalcaments 2 i 3 del tall d'Aragüés (fig. 5.33), realitzades a partir dels resultats de les restitucions fetes amb FSU i SSU, i els càlculs d'escurçament per plegament d'aquesta mateixa secció realitzats utilitzant l'algoritme FSU. Un altre exemple de l'aplicació pràctica de l'anàlisi estructural sistemàtic amb el 2DMove és

l'obtenció de resultats satisfactoris utilitzant dos cicles de restitució amb l'algoritme FSU en les seccions de la conca d'Erill Castell – Estac, que reforça la hipòtesi de l'existència de dues direccions de lliscament flexural en la deformació de sèries angularment discordants.

- ≠ La modelització cinemàtica en avanç permet visualitzar de forma ràpida la consistència de les conclusions referents a l'evolució de les estructures, ja que accelera la construcció de talls corresponents a etapes intermèdies sense necessitat d'elaborar progressivament seccions compensades quan es vol il·lustrar l'evolució de la deformació. Les modelitzacions de la inversió de les conques estefano-permianes amb FPF, l'evolució de la fossa de la Seu d'Urgell amb IS (fig. 4.69) i el desenvolupament del plec de propagació de falla de la unitat de Banyeres amb PPF (RampeEM) són exemples del potencial d'aquestes eines. Tanmateix, a part de les limitacions dels algorismes de modelització cinemàtica que ofereixen tant el 2DMove com el RampeEM indicats en tractar la seva utilització com a eina de restitució cinemàtica, altres aspectes que en limiten la seva utilització en avanç són 1) la impossibilitat de modelitzar falles de funcionament simultani, el que obliga a establir una cronologia de les estructures que no es correspon amb la realitat (p.ex.: encavalcament d'Orri i retroencavalcaments de la conca d'Erill Castell – Estac); 2) la no reproducció de variacions en la magnitud de l'escurçament per encavalcament al llarg d'una mateixa falla, com en el cas del sistema imbricat d'Aragüés, que requereix la utilització combinada dels dos programes per poder reproduir-los, amb els problemes procedimentals que això comporta (pèrdua d'àrea de la secció, escalat...); i 3) la impossibilitat de variar les característiques del model durant la modelització amb l'algoritme PPF (RampeEM) que cal solucionar a posteriori (p.ex.: canvis en l'envolupant del tascó de sorra de Teixell i Koyi (2003) associats a processos gravitacionals, sedimentació sintectònica, etc.).

En síntesi, els programes utilitzats i valorats en aquesta tesi són principalment una eina que complementa l'anàlisi estructural d'una zona, aportant informació sobre els processos de deformació, ajudant a la interpretació d'estructures ambigües i un cop realitzades les primeres interpretacions, indicant la localització de zones de resolució complexa que cal redefinir.

Per altra banda, el temps i esforços esmerçats¹ en la valoració crítica i la comprensió del funcionament dels programes 2DMove i RampeEM poden semblar excessius pel que fa als objectius d'aquesta tesi, però no ho són tant si es té en compte que el coneixement adquirit ha de ser aplicable d'ara en endavant tant en altres contextos geològics, com en el desenvolupament de solucions als problemes conceptuals i metodològics identificats en aquesta anàlisi.

¹ Tot i que em refereixo al treball que he realitzat en aquesta tesi, aquesta observació també és vàlida per a qualsevol persona que hagi treballat o es disposi a fer-ho amb qualsevol programa d'anàlisi estructural i modelització.

6. CONCLUSIONS

CONCLUSIONS

Els resultats de l'estudi de camp són els següents:

- ∄ Les diverses escates alpines del marge sud de la Zona Axial (entenen aquesta en sentit ampli, integrant les làmines encavalcants de sòcol dels Pirineus meridionals) es poden agrupar en tres làmines encavalcants compostes, els **mantells de l'Orri, Erta i les Nogueres**. Aquesta agrupació obeeix a criteris de posició, d'estil tectònic i d'edat relativa d'emplaçament.
- ∄ La inversió tectònica és un procés important en el desenvolupament d'aquests mantells. En concret, la localització i dimensions de les escates està determinada per fosses d'edat estefano-permiana. Tanmateix, el registre estefano-permià no constitueix un criteri unitari de divisió dels mantells en sentit nord-sud al llarg de tota la zona d'estudi.
- ∄ Els mantells de l'Orri i Erta, que són els més inferiors, s'observen arrelats en el Paleozoic de la Zona Axial. En canvi el que he anomenat mantell de les Nogueres, jau sempre sobre un replà de bloc inferior, desarrelat, del qual no s'observa la rampa caudal. A aquest encavalcament basal l'anomeno encavalcament de Nogueres *s.l.*, tot i que és una estructura composta.
- ∄ En el mantell de les Nogueres, el control exercit per les fosses estefano-permianes resulta en una partició de la deformació que ha permès agrupar-les en tres sectors juxtaposats en direcció paral·lela a les estructures (est-oest). En el sector occidental, on les fosses eren petites, les làmines són de dimensions reduïdes, tenen poca continuïtat lateral i estan molt capgirades. En el sector central, la distribució irregular de les fosses es tradueix en dos conjunts de làmines de dimensions diferents. En el sector oriental, on no hi havia fossa, hi ha menys làmines i apilament.
- ∄ Les fàcies devonians del sòcol tampoc serveixen per fer divisions en sentit nord-sud, sinó que la seva distribució és lateral. Al sector occidental hi ha la subfàcies Sierra Negra i als sectors central i oriental la subfàcies Comte.
- ∄ Internament, el mantell de les Nogueres està compost per nombroses escates menors, formades en una seqüència de bloc inferior, que permet agrupar-les en tres sistemes principals en funció de la seva posició i de la cronologia d'emplaçament:
 - ∄ **Làmina encavalcant de Castells (làmina superior)**: aquesta làmina encavalcant és la més alta i meridional, i també la més capgirada. Està sempre tallada en el seu marge sud per contactes retroencavalcants.
 - ∄ **Làmines encavalcants intermèdies**: aquest grup és el més extens i està format per escates diferents en cada sector. El sector occidental està format per les escates de Gotarta, Castellgermà i Erdo, el sector central està representat per la làmina de Freixe, i el sector oriental per la làmina del Montsec de Tost. L'encavalcament basal de les làmines intermèdies, resultant de la unió dels encavalcaments de cada escata, l'anomeno **encavalcament de Freixe – Erdo**.
 - ∄ **Làmines inferiors**: sistema encavalcant compost per moltes escates d'ordre menor, amb abundants rampes laterals i estructures tipus *shortcut*. Aquest grup no es correspon amb les Nogueres inferiors de Muñoz

(1992). Les escates diferenciades són: el dúplex dels Hostalets – Adraén, l'escata d'Arcalís – España, l'escata de Sta. Bàrbara, i l'escata de la Costera. Aquestes escates són les més tardanes, i es formen com un dúplex per sota de les làmines intermèdies. L'encavalcament basal d'aquest grup, resultant de la unió dels encavalcaments de cada escata, és anomenat encavalcament d'**Arcalís – les Iglésies**.

- € Sobre l'encavalcament de les Nogueres *s.l.* podem trobar tant les làmines inferiors com les intermèdies. És per això que he donat noms diferents als encavalcaments locals. Els encavalcaments de Freixe – Erdo i d'Arcalís – les Iglésies s'entronquen caudalment, essent l'encavalcament de les Nogueres *s.l.* l'envolupant que resulta d'aquest entroncament.
- € El mantell d'Erta s'emplaça després del de les Nogueres i inverteix les fosses estefano-permianes d'Erill Castell i d'Estac. L'excloc de les Nogueres perquè sovint presenta diferents característiques estratigràfiques al sòcol i no està desarrelat. La inversió tectònica en el mantell d'Erta es manifesta també mitjançant un sistema de retroencavalcaments (**sistema de Sant Quiri**).
- € El mantell d'Erta sols existeix als sectors central i occidental. Termina a la vall de la Noguera Pallaresa, a l'est de la qual les escates de les Nogueres presenten un menor grau de rotació, amb un canvi molt important d'aspecte en tall. La zona de trànsit entre aquestes dues àrees és molt complexa, caracteritzada per rampes laterals i falles de transferència. Per sota, el mantell de l'Orri inverteix la conca de Gramós – Prats d'Aguiló, i en part va funcionar simultàniament al mantell d'Erta.
- € El límit est de la zona de les Nogueres està definit per una rampa lateral d'aquesta sobre el **mantell del Cadí**. Tanmateix els respectius encavalcaments basals acaben convergint, indicant que són equivalents laterals i que en part van funcionar alhora.
- € Els conglomerats terciaris de les conques de Senterada, la Pobla, Taús i Montant (Eocè superior – Oligocè) registren l'activitat tectònica tardana a la zona d'estudi. Són posteriors al mantell de les Nogueres, però contemporanis a l'emplaçament dels mantells d'Erta i l'Orri i al sistema de retroencavalcaments de Morreres – Lavansa que defineix el contacte entre la zona de les Nogueres i el Mesozoic de la Unitat Sudpirinenca Central.
- € He diferenciat tres grups dins dels conglomerats (Sarroca, Senterada i Antist), separats per discordances. Els conglomerats d'Antist es troben subhorizontals i probablement registren la fi de l'encavalcament de l'Orri i la transferència del desplaçament al de Rialp, que no crea relleu diferencial a la zona d'estudi.

He desenvolupat una sèrie de models analògics de sorra per analitzar la deformació de sèries discordants, enfocats a la inversió tectònica de les conques estefano-permianes cobertes en discordança pel Triàsic:

- € En els models, la presència de capes inclinades cap a l'avantpaís sota la discordança afavoreix el desenvolupament de retroencavalcaments, a diferència de models planoparal·lels amb fricció basal comparable descrits per altres autors.
- € Degut a la discordança, els encavalcaments paral·lels a l'estratificació de la sèrie inclinada passen de replà a rampa en creuar la discordança, sense canviar la seva inclinació.

- ∄ L'orientació dels encavalcaments vergents a l'avantpaís és independent del cabussament dels marcadors de la seqüència inclinada, però aquest paràmetre pot controlar la inclinació dels retroencavalcaments sempre i quan els marcadors estiguin dins d'un rang de cabussaments.
- ∄ Els models analògics reproduïxen aspectes geomètrics i cinemàtics de la franja de retroencavalcaments de St. Quiri, indicant que es tracta d'un element associat a la inversió de la conca de Erill Castell.

He analitzat els talls de camp i els models analògics amb programes de modelització cinemàtica per tal de valorar la seva aplicabilitat en zones d'encavalcament complexes:

- ∄ L'anàlisi dels algoritmes de restitució i modelització cinemàtica dels programes 2DMove i RampeEM mostra que cal diferenciar entre les seves possibilitats com a eina de restitució i validació de talls geològics, i la seva utilització com a eina analítica, essent la darrera el seu valor principal.
- ∄ L'algoritme *Line Length Unfolding* (LLU) presenta problemes en la restitució de superfícies inclinades com les falles o sèries discordants, però és el d'aplicació més ràpida i directa.
- ∄ L'algoritme *Flexural Slip Unfolding* (FSU) desplega les estructures presents en el tall, mantenint-ne la superfície en secció i els angles entre superfícies. Aquest algoritme és el més recomanable, però la seva utilització és limitada en talls estructuralment complexos, ja que la restitució s'ha de fer per parts i pot comportar la necessitat de més d'un cicle de desplegament.
- ∄ L'algoritme *Simple Shear Unfolding* (SSU) és indicat per a la restitució de talls geològics de zones on el gruix de les capes no es conserva durant la deformació, com per exemple en zones extensives. Aquest algoritme és molt sensible a l'elecció dels *pins* i superfícies de referència adequats, amb la consegüent diversitat de resultats que això pot comportar.
- ∄ L'algoritme de modelització en avanç *Fault Parallel Flow* (FPF) genera una deformació als blocs superiors molt subordinada al valor de cisalla angular (π) que s'escull a priori. A més d'això, la principal limitació d'aquest algoritme és que la cisalla angular es transmet homogèniament a tot el bloc superior, amb la consegüent acumulació de *strain* en sistemes d'encavalcaments múltiples, que apareixen molt distorsionats. He hagut de dissenyar un procediment específic per tal de solucionar aquest inconvenient.
- ∄ L'algoritme *Inclined Shear* (IS) aplica al bloc superior un desplaçament horitzontal i una direcció de cisalla (λ) també determinats per l'usuari. Presenta per tant, unes limitacions similars a l'anterior, i a més necessita falles que s'horitzontalitzin en profunditat per poder mantenir l'alçada regional del bloc superior.
- ∄ Aquests algoritmes no poden deformar els blocs inferiors, i tampoc consideren les característiques mecàniques i d'estructura prèvia dels blocs superiors, sinó que són únicament cinemàtics.

5. BIBLIOGRAFIA

- Agustí, J. i Roca, E.** (1987): Síntesis biostratigráfica de la fosa de la Cerdanya (Pirineos Orientales). *Estud. Geol.*, 43: 521-529.
- Agustí, J., Gibert, J., Moyà, S. i Cabrera, L.** (1979): Roedores e insectívoros (Mammalia) del Mioceno superior de la Seu d'Urgell (Cataluña, España). *Act. Geol. Hisp.*, 14: 362-369.
- Almela, A. i Rios, J.M.** (1947): Explicación del mapa geológico de la provincia de Lérida. Esc.: 1:200000. *IGME*: 193pp.
- Alonso, J.L.** (1989): Fold reactivation involving angular unconformable sequences: theoretical analysis and natural examples from the Cantabrian Zone (Northwest Spain). *Tectonophysics*, 170: 57-77.
- Alonso, J.L. i Teixell, A.** (1992): Forelimb deformation in some natural examples of fault-propagation folds. En: *K.R. McClay (ed.) Thrust tectonics. Chapman & Hall, New York*: 175-180.
- Amigó, J.M.; Bastida, J.; Lago, M. i Pocovi, A.** (1985): Estudio de la confluencia térmica del emplazamiento de las rocas doleríticas (ofitas) del área de Estopiñán (provincia de Huesca y Lérida) en los sedimentos triásicos encajantes. *II Col. Estrat. y paleogeog. del Pérmico y Triásico Esp.* Inst. Est. Ilerd.: 7.
- Apperson, K.D. i Goff, D.F.** (1991): Deformation or thrust ramps and footwalls observed in numerical models. *EOS*, 72: 514-515.
- Arthur, T.J.** (1993): Mesozoic structural evolution of the UK Southern North Sea: insights from analysis of fault systems. En: *Parker, J.R. (ed.) Petroleum Geology of Northwest Europe: Proceedings of 4th conference. Jour. Geol. Soc. (London)*, 1269-1280.
- Astre, G.** (1924): Sur les Unités tectoniques des Sierras del Cadí, de Port del Compte et de quelques massifs voisins (Pyrénées catalanes). *C.R. Ac. Sc. Paris*, 178: 2106.
- Autran, A.** (1996): Planche Mag H5: Plutonisme des Pyrénées orientales. En: *Synthèse géologique et géographique des Pyrénées, Mém. BRGM-ITGE. Lâmina MagH5*.
- Bachman, M. i Willems, H.** (1996): High-frequency cycles in the upper Aptian carbonates of the Organyà basin, NE Spain. *Geol. Rundsch.*, 85: 586-605.
- Bally, A.W.** (1984): Tectonogenese et sismique de reflexion. *Bull. . Soc. Geol. .France*, 26: 279-286.
- Baltuille, J.M.; Becker-Platen, J.D.; Benda, L. i Ivanovic Calzaga, I.** (1992): A contribution to the subdivision of the Neogene in Spain using palynology. *News, Stratigr.*, 27: 41-57.
- Banks, C.J. i Warburton, J.** (1992): "Passive-roof" duplex geometry in the frontal structures of the Kirthar and Sulaiman mountain belts, Pakistan. *Jour. Struct. Geol.*, 8: 229-237.
- Barnolas, A., i Gil-Peña, I.** (2001): Ejemplos de relleno sedimentario multiepisódico en una cuenca de antepaís fragmentada: La Cuenca Surpirenaica. *Bol. Geol. Min.*, 112 (3): 17-38.
- Bates, M.** (1987): Palaeomagnetic studies of fold and thrust geometry in the Southern Pyrenees. *Tesi de doctorat, Univ. Of Leeds*: 474 pp.
- Bates, M.** (1989): Palaeomagnetic evidence for rotations and deformation in the Nogueras Zone, Central Southern Pyrenees. *Jour. Geol. Soc. (London)*, 146: 459-476.
- Bayer, R.; De Cabissole, B.; Casa, A.; Corpel, J. i Debeglia, N.** (1998): Planche 4: Gravimetrie, Anomalie de Bouger. En: *Synthèse géologique et géographique des Pyrénées, Mém. BRGM-ITGE. Lâmina Gph4*.

- Beràstegui, X.; Garcia, J.M. i Losantos, M.** (1990): Structure and sedimentary evolution of the Organyà basin (Central South Pyrenean Unit, Spain) during the lower Cretaceous. *Bull. Soc. Geol. France*, 8: 251-264.
- Beràstegui, X.; Losantos, M.; Muñoz, J.A. i Puigdefàbregas, C.** (1993): *Tall geològic del Pirineu Central 1:200000*, Servei Geològic de Catalunya, Barcelona.
- Berger, P. i Johnson, A.M.** (1980): First order analysis of deformation of a thrust sheet moving over ramp. *Tectonophysics*, 70, T9-T24.
- Bergerat, P.** (1982): Le couloir rodanien au Paléogène: analyse de la fracturation et interprétation cinématique régionale. *Rev. Geogr. Phys. Geol. Dyn.*, 23: 239-243.
- Betzler, C.** (1989): A carbonate complex in an active foreland basin: the Paleogene of the Sierra de Port del Comte and the Sierra del Cadí (Southern Pyrenees). *Geodinamica Acta*, 3: 207-220.
- Betzler, C.** (1989): The upper Paleocene to middle Eocene carbonate between the rio Segre and the rio Llobregat (Eastern South Pyrenees): Facies, stratigraphy and structural evolution. *Geol. Paläontol. Strati. Tübingen*, 2: 1-113.
- Birot, P.** (1937): Recherches sur la morphologie des Pyrénées orientales franco-espagnoles. *Tesi de doctorat, Univ. De París*: 318 pp.
- Boersma, K. Th.** (1973): Devonian and Lower Carboniferous conodont biostratigraphy, Spanish Central Pyrenees. *Leidse Geol. Meded.*, 49(2): 303-377.
- Boissevain, H.** (1934): Etude géologique et morphologique de la vallée de la Haute-Segre. *Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse*, 66: 33-170.
- Bott, M.H.P.** (1959): The mechanics of oblique slip faulting, *Geol. Mag.*, 96: 109
- Bou, O.** (1998): L'estructura geològica del dom de la Rabassa. *Tesi de Llicenciatura, Universitat Autònoma de Barcelona*: 132 pp.
- Boyer, S.E.** (1992): Geometric evidence for synchronous thrusting in the southern Alberta and northwest Montana Thrust belts. En: *K.R. McClay, (ed.) Thrust Tectonics. Chapman & Hall, New York*, 377-390
- Boyer, S.E. i Elliot, D.** (1982): Thrust Systems. *AAPG Bull.*, 66: 1196-1230.
- Bradley, D.C. i Kidd, W.S.F.** (1991): Flexural extension of upper continental crust in collisional foredeeps. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 103: 1416-1438.
- Bresson, A.** (1903): Études sur les formations anciennes des Hautes et Basses Pyrénées. *Bull. Serv. Carte Geol. France*, 93(14): 35-317.
- Broutin, J., Doubinger, J., Gisbert, J. i Satta-Pasini, S.** (1988): Premières datations palynologiques dans les faciès Buntsandstein des Pyrénées catalanes espagnoles. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 306(II): 159-163.
- Brower, Th. N.** (1968): Internal report Geol. Min. Inst. Leiden (Dept. Sediment.).
- Buchanan, J.G.** (1996): The application or cross-section construction and validation within exploration and production: a discussion. En: *P.G. Buchanan i D.A. Nieuland (eds) Modern Developments in Structural Interpretation, Validation and Modelling, Geological Society Special Publication*, 99: 41-50.
- Buchroithner, M.F.** (1979): Conodontenstratigrafische untersuchungen im Silur und Devon der Ost- und Zentralen pyrenäen. *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, 5: 268-283.

- Bulnes, M. i McClay, K.R.** (1999): Benefits and limitations of different 2D algorithms used in cross-section restoration of inverted extensional faults: application to physical experiments. *Tectonophysics*, 312: 175-189.
- Butler, R.H.W.** (1983): Balanced cross-sections and their implications for the deep structure of the northwest Alps. *Jour. Struct. Geol.*, 5: 125-137.
- Butler, R.H.W.** (1986): The restoration of thrust systems and displacement continuity around the Montblanc massif, NW external Alpine thrust belt. *Jour. Struct. Geol.*, 7: 569-582.
- Cabrera, L., Roca, E. i Santanach, P.** (1988): Basin formation at the end of a Strike-slip fault: the Cerdanya Basin (eastern Pyrenees). *Jour. Geol. Soc. (London)*, 145: 261-268.
- Cadell, H.M.** (1888): Experimental researches in mountain building. *Trans. Roy. Soc. Edin.*, 35: 337-360.
- Calvet, F.** (1986): El Triàsic. En: *P. Santanach (ed.) Història Natural dels Països Catalans. (Geologia I). Enciclopèdia Catalana.*
- Calvet, F. i Anglada, E.** (1987): El triàsic del Pirineo. Anàlisi estratigràfic, cronoestratigràfic y sedimentològic. *Informe I.G.M.E. Diciembre 1987* (inèdit).
- Calvet, M.** (1985): Néotectonique et mise en place des reliefs dans l'Est des Pyrénées; l'exemple du horst des Albères. *Rev. Geogr. Phys. Geol. Dyn.*, 26, 119-130.
- Cámara, P. i Klimowitz, J.** (1985): Interpretación geodinámica de la vertiente centro-occidental surpirenaica. *Estudios Geol.*, 41, 391-404.
- Capellà, I. i Carreras, J.** (1996): La zonación estructural del Hercínic del Pirineo central en el anticlinoria de la Pallaresa. *Estudios Geol.*, 52, 51-61.
- Carreras, J. i Druguet, E.** (2002): *Estudio estratigràfic y estructural del anticlinorio de la Pallaresa. Hojas de Tírvia (182) y Noarre (150).* Informe IGME, Març 2002 (inèdit).
- Casanovas, L., Santafe, J.V., Sanz, J.L. i Buscalioni, A.D.** (1987): Arcosaurios (Crocodilia, Dinosauria) del Cretácico superior de la Conca de Tremp (Lleida, España), *Estudios Geol.*, vol. extr. Galve-Tremp: 95-100.
- Casas, J.M. i Poblet, P.** (1989): Essai de restitution de la déformation dans una zone avec plis et chevauchements: le «synclinal de Llavorsí» dans les Pyrenées centrales (Espagne). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 308 (II), 427-433.
- Caus, E., García-Senz, J., Rodes, D. i Simó, A.** (1990). Stratigraphy of the lower Cretaceous (Berriassian-Barremian) sediments in the Organyà basin, Pyrenees, Spain. *Cretaceous Research*, 11, 313-320.
- Chapple, W.M.** (1978): Mechanics of thin-skinned fold-and-thrust belts. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 89: 1189-1198.
- Chester, J.S.** (2003): Mechanical stratigraphy and fault-fold interaction, Absaroka thrust sheet, Salt River Range, Wyoming. *Jour. Struct. Geol.*, 25: 1171-1192.
- Chester, J.S. i Chester, F.M.** (1990): Fault-propagation folds above thrusts with constant dip. *Jour. Struct. Geol.*, 12: 903-910.
- Chester, J.S., Logan, J.M. i Spang, J.H.** (1991): Influence of layering and boundary conditions on fault-bend and fault-propagation folding. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 103: 1059-1072.
- Chevalier, M.** (1909): Note sur la "cuencita" de la Seo de Urgel. *Bull. Soc. Geol. France*, 9(IV): 158-178.

- Choukroune, P. i ECORS TEAM** (1989): The ECORS Pyrenean deep seismic profile reflection data and the overall structure of an orogenic belt. *Tectonics*, 8(1): 23-39.
- Choukroune, P. i Séguret, M.** (1973): Tectonics of the Pyrenees, role of gravity and compression. En: *K.H. de Jong i R.Scholten (eds.) Gravity and Tectonics, Wiley, New York*: 141-156.
- Contreras, J. i Suter, M.** (1990): Kinematic modelling of cross-sectional deformation sequences by computer simulation : coding and implementation or the algorithm. *Jour. Geophys. Res.*, 95: 21913-21929.
- Contreras, J. i Suter, M.** (1997): A kinematic model for the deformation of duplex systems with a perfectly planar roof thrust. *Jour. Struct. Geol.*, 19 (3-4): 269-278.
- Coward, M.P.** (1996): Balancing sections through inverted basins. En: *P.G. Buchanan i D.A. Niewland (eds.) Modern Developments in Structural Interpretation, Validation and Modelling, Geol. Soc. Spec. Pub.*, 99: 51-77.
- Creuzot, G., Mercier, E., Ouali, J. i Tricart, P.** (1993): La tectogenèse atlasique en Tunisie centrale: apport de la modelisation géométrique. *Eclog. Geol. Helvet.*, 86(2): 609-627.
- Crusafont, M i Golpe Posse, J.M.** (1974): El nuevo yacimiento vallesiense de Ballestar (nota preliminar). *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Geol.)*, 72: 67-73.
- Crusafont, M. I Rosell, J.** (1966): Primera datación de los tramos superiores del Eoceno continental de la Cuenca de Ager (provincia de Lérida). *Not. y Com. IGME*, t. LXXIX-IV: 341-353.
- Dahlen, F.A. i Barr, T.D.** (1989) Brittle frictional mountain building 1. Deformation and mechanical energy budget. *Jour. Geoph. Res.*, 94: 3906-3922.
- Dahlen, F.A., Suppe, J. i Davis, D.** (1984): Mechanics of fold-and-thrust belts in accretionary wedges: cohesive coulomb theory, *Jour. Geophys. Res.*, 89: 10087-10101.
- Dahlstrom C.D.A.** (1969): Balanced cross-sections. *Can. Jour. Earth Sci.*, 6: 743-757.
- Dahlstrom C.D.A.** (1970): Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains. *Bull. Can. Petrol. Geol.*, 18: 332-406.
- Dalloni, M.** (1910): Etude géologique des Pyrénées de l'Aragon. *Ann. Fac. Sci. Marseille*, 19: 444 pp.
- Dalloni, M.** (1913): Stratigraphie et tectonique de la région des Nogueras (Pyrénées centrales). *Bull. Soc. Geol. France*, 13(IV): 243-263.
- Dalloni, M.** (1930): Etude géologique des Pyrénées catalanes. *Ann. Fac. Sci. Marseille*, 26: 373 pp.
- Daudre, A.** (1879): Études synthétiques de Géologie Expérimentelle. *pt. 1. Paris, Dunod*: 828p.
- Davis, D., Suppe, J. i Dahlen, F.A.** (1983): Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges. *Jour. Geophys. Res.*, 88: 1153-1172.
- Davison, I** (1986): Listric fault profiles using roll-over shapes and bed-length balance. *Jour. Struct. Geol.*, 8: 209-210.
- Degardin, J.M.** (1988): Le Silurien des Pyrénées. Biostratigraphie. *Publ. Soc. Géol. Nord*, 15: 1-525.
- Déperet, Ch. i Rérolle, L.** (1986): Note sur la géologie et sur les mammifères fossiles du bassin lacustre Miocène supérieur de la Cerdagne. *Bull. Soc. Geol. France*, 13: 488-506.
- Dixon, J.M. i Liu, S.** (1992): Centrifuge modelling of the propagation of thrust faults. En: *K.R. McClay (ed.) Thrust tectonics. Chapman & Hall, New York*: 53-70.

- Eeckhout** (1968a): A case study of a mantled gneiss antiform, the Hospitalet Massif, Pyrenees (Andorra, France). *Geol. Ultraiectina*, 45: 1-193.
- Eeckhout** (1968b): Cambro – Ordovician lithostratigraphy in the Hospitalet Massif (Pyrenees). *Hercynia*, 11(2): 167-173.
- Egan, S.S., Buddin, T.S., Kane, S.J. i Williams, G.D.** (1997): Three-dimensional modelling and visualisation in structural geology: New techniques for the restoration and balancing of volumes. En: *Proceedings of the 1996 Geoscience Information Group Conference on Geological Visualisation, Electronic Geology*, 1(Paper 7): 67-82.
- Egan, S.S., Kane, S.J., Buddin, T.S., Williams, G.D. i Hodfets, D.** (1999): Computer modelling and visualization of structural deformations caused by movement along geological faults. *Computer Geosci.*, 25: 283-297.
- Elliot, D.** (1976a): The motion of thrust sheets. *Jour. Geophys. Res.*, 81: 949-963.
- Elliot, D.** (1976b): The energy balance and deformation mechanisms of thrust sheets. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.*, 283: 289-212.
- Elliot, D.** (1983): The construction of balanced cross-sections. *Jour. Struct. Geol.*, 5: 101.
- Elliot, D. i Johnson, M.R.W.** (1980): Structural evolution of the northern part of the Moine thrust belt. *Trans. Roy. Soc. Edin.: Earth Sci.*, 71: 69-96.
- Endignoux, L. i Mugnier, J.L.** (1990): The use of a forward kinematic model in the construction of balanced cross sections. *Tectonics*, 9(5): 617-620.
- Erickson, S.G.** (1995): Mechanics of triangle zones and passive-roof duplexes: implications of finite-element models. *Tectonophysics*, 245: 1-11.
- Erickson, S.G. i Jamison, W.R.** (1995): Viscous-plastic finite-elements models or fault-bend folds. *Jour. Struct. Geol.*, 17: 561-573.
- Erickson, S.G., Strayer, L.M. i Suppe, J.** (2001): Initiation and reactivation of faults during movement over a thrust-fault ramp : numerical mechanical models. *Jour. Struct. Geol.*, 23: 11-23.
- Favre, A.** (1878): Archives des Sciences Physiques et Naturelles, Núm. 246.
- Feist, M. i Colombo, F.** (1983): La limite Crétace-Tertiaire dans le NE de l'Espagne du point de vue des charofites. Colloque Sénonien, *Geol. Mediterr.*, X(3-4): 303-326.
- Ferrer, J., Le Calvez, I., Luterbacher, H.P. i Promolli, I.** (1973): Contribution a l'étude des foraminifères ilderdiens de la région de Tremp (Catalogne). *Mém. Mus. Nat. Hist.*, 29: 1-80.
- Flinch, J.F.** (1990): Estudi geològic de l'extrem occidental de la serra del Cadí i del sector oriental de la Zona de les Nogueres. *Tesi de Llicenciatura, Univ. de Barcelona*: 75pp.
- Flinch, J.F. i Casas J.M.** (1996): Inversion of a transfer system into lateral ramps: an example from South-Central Pyrenees (Spain). *Geol Rundsch.*, 85: 372-379.
- Ford, M., Williams, E.A., Artoni, A., Vergés, J., i Hardy, S.** (1997): Progressive evolution of a fold pair from growth strata geometries, Sant Llorenç de Morunys, SE Pyrenees. *Jour. Struct. Geol.*, 19(3-4): 413-441.
- García Sansegundo, J.** (1992): Estratigrafia y estructura de la Zona Axial Pirenaica en la transversal del Valle de Arán y de la Alta Ribagorça. *Publ. Esp. Bol. Geol. Min.*, 167 pp.

- García Senz, J.** (2002): Cuencas extensivas del Cretácico inferior en los Pirineos centrales, formación y subsecuente inversión. *Tesis Doctoral, Univ. de Barcelona*: 310 pp.
- García-López, S., García Sansegundo, J. i Arbizu, M.** (1990): Datos estratigráficos i paleontológicos de la sucesión devónica del río Baliera (Zona Axial, Pirineos centrales españoles). *Geogaceta*, 7: 33-35.
- Garrido Megías, A.** (1973): Estudio geológico y relación entre la tectónica y sedimentación del Secundario y Terciario de la vertiente meridional pirenaica en su zona central (provincias de Huesca y Lérida). *Tesis Doctoral, Univ. de Granada*: 395 pp.
- Garrido Megías, A. i Rios, L.M.** (1972): Síntesis geológica del Secundario y Terciario entre los ríos Cinca y Segre (Pirineo Central de la vertiente surpirenaica, provincias de Huesca y Lérida), *Bol. Geol. Min.*, 83: 1-47.
- Geiser, P.A.** (1988): The role of kinematics in the construction and analysis of geological cross-sections in deformed terrains. En: G. Mitra i S. Wojtal (eds.) *Geometries and mechanics of thrusting with special reference to the Appalachians*. Geol. Soc. Amer. Spec. Pub., Paper 222.
- Gibbs, A.D.** (1983): Balanced cross-sections from seismic sections in areas of extensional tectonics. *Jour. Struct. Geol.*, 5: 153-160.
- Gillcrist, R., Coward, M. i Mugnier, J.L.** (1987): Structural inversion and its controls: examples from the Alpine foreland and the French Alps. *Geodinamica Acta (Paris)*, 1(1): 5-34.
- Gil-Peña, I. i Barnolas, A.** (2001): Superposición estructural hercínica y alpina en el borde occidental del domo de Pallassos (Noguera de Tor, Pirineo central). *Bol. Geol. Min.*, 112 (3): 5-16.
- Gisbert, J.** (1981): Estudio geológico-petroológico del Estefaniense-Pérmico de la Sierra del Cadí (Pirineos de Lérida). Diagénesis y sedimentología. *Tesi de Doctorat, Univ. de Zaragoza*: 313 pp.
- Gisbert, J.** (1983a): El Pérmico de los Pirineos españoles. En: *Martínez-Díaz (ed.) Carbonífero y Pérmico de España, IGME., Madrid*, II: 405-420.
- Gisbert, J.** (1983b): Las molasas tardihercínicas del Pirineo. *Libro Jubilar J.M. Rios. Geología de España*, II: 168-185.
- Gisbert, J.** (1986): Els temps tardihercínians. En: *P. Santanach (ed.) Història Natural dels Països Catalans (Geologia I). Ed. Enciclopèdia Catalana, Barcelona*, 1: 197-240.
- Gisbert, J., Martí, J. i Gascon, F.** (1985): Guía de la excursión al Stephaniense, Pérmico y Triásico inferior del Pirineo catalán. *II Co. Estratigrafía y Paleogeografía del Pérmico y Triásico de España, La Seu d'Urgell 1985*: 79 pp.
- Goguel, J.** (1952): Tectonics (1962 translation), *Freeman and Co., San Francisco*: 384 pp.
- Golpe Posse, J.M.** (1981): Los mamíferos de las Cuencas de Cerdanya y Seu d'Urgell (depressiones pirenaicas) y sus yacimientos: Vallesiense Medio-Superior. *Bol. Geol. Mineral.*, 92: 91-100.
- Gross, M.R., Gutierrez, A.G., Bai, T., Wacker, M.A i Collinsworth, K.B.** (1997): Influence of mechanical stratigraphy and kinematics on fault scaling relations. *Jour. Struct. Geol.*, 19: 171-183.
- Guerin-Desjardins, B. i Latreille, M.** (1961): Etude géologique dans les Pyrénées entre les rios Segre et Llobregat (provincias de Lérida et Barcelonne). *Rev. Inst. Franc. Petrol.*, 16 (9): 922-940.
- Habermehl, M.A.** (1970): Depositional history and diagenesis of quartz-sand bars and lime mud environments in the Devonian Basibé Formation (Central Pyrenees, Spain). *Leidse Geol. Meded.*, 46(1): 1-55.

- Hall, J. Sir.** (1815): On the vertical position and convolutions of certain strata and their relation with granite. *Trans. Roy. Soc. Edin.*, 7, 37-44.
- Hartevelt, J.J.A.** (1965): Internal Report Geol. Inst. Leiden. (Dept. Struct. Geol.).
- Hartevelt, J.J.A.** (1969): Geological Map of the Central Pyrenees, Sheet 10: Segre – Valira, Andorra – Spain, scale 1:50000. En: *L.U. de Sitter, H.J. Zwart i J.F. Savage (eds.), Geological Institute Leiden University, Holland.*
- Hartevelt, J.J.A.** (1970): Geology of the upper Segre and Valira valleys, central Pyrenees, Andorra/Spain. *Leidse Geol. Meded.*, 45: 349-354.
- Hauge, T.A. i Gray, G.C.** (1996): A critique of techniques for modelling normal-fault and rollover geometries, En: *P.G. Buchanan, i D.A. Niewland (eds.) Modern Developments in Structural Interpretation, Validation, and Modelling, Geol. Soc. Spec. Pub.*, 99: 89-97.
- Hayward, A.B. i Graham, R.H.** (1989): Some geometrical characteristics of inversion. En: *M.A. Cooper i G.D. Williams (eds.) Inversion Tectonics, Geol. Soc. Spec. Pub.*, 44: 17-39.
- Hoorn, B. Van** (1970): Sedimentology and paleogeography of a turbidite in Spain. *Leidse Geol. Meded.* 45: 167-236.
- Hopper, R. J., Goh, L.S. i Dewy, F.** (1995): The inversion history of the northeastern margin of the Broad Fourteens Basin. En: *J.G. Buchanan i P.G. Buchanan (eds.) Basin Inversion. Geol. Soc. London Spec. Pub.*, 88: 167-190.
- Hossack, J.R.** (1979): The use of balanced cross-sections in the calculation of orogenic contraction:- a review. *Jour. Geol. Soc. (London)*, 136: 705-711.
- Hossack, J.R.** (1983): A cross-section through the Scandinavian Caledonides constructed with the aid of branch lines. *Jour. Struct. Geol.*, 5: 103-122
- Hossack, J.R.** (1994): Geometric Rules of Section Balancing of Salt Structures in The Gulf of Mexico. *Abstract Volume: Modern Developments in Structural Interpretation, Validation and Modelling, London, UK.*
- Jacob, Ch.** (1927): Considerations tectoniques sur les Pyrénées. *Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse*, XVI (II): 289-298.
- Jacob, Ch.** (1930): Zone Axiale, versant sud, versant nord des Pyrénées. *Livre jubilaire Soc. Geol. France*, II: 389-410, pl. XLI.
- Jacob, Ch., Fallot, P., Astre, G. i Ciry, R.** (1926): Observations tectoniques sur le versant méridional des Pyrénées orientales. *C.R. 14e. Congr. Geol. Internat., Madrid 1926*, 2: 335-412.
- Jamison, W.R.** (1987): Geometric analysis of fold development in overthrust terrains. *Jour. Struct. Geol.*, 9: 207-219.
- Kane, S.J., Williams, G.D., Buddin, T.S., Egan, S.S. i Hodgetts, D.** (1997): Flexural-slip based restoration in 3D, a new approach, *1997 AAPG Annual Convention Official Program*: A58.
- Kilsdonk, B. i Fletcher, R.C.** (1989): An analytical model of hangingwall and footwall deformation at ramps on normal and thrust faults. *Tectonophysics*, 163: 153-168.
- Koyi, H. A.** (1995): Mode of internal deformation in sand wedges. *Jour. Struct. Geol.*, 17: 293-300.
- Koyi, H.A. i Teixell, A.** (1999): Where is the footwall flat: A cautionary note on template constraints. *Jour. Struct. Geol.*, 21: 373-377.

- Koyi, H.A., Hessami, K. i Teixell, A.** (2000): Epicenter distribution and magnitude of earthquakes in folr-thrust belts: insights from sandbox models. *Geophys. Res. Let.*, 27 (2): 273-276.
- Labauve, P., Séguret, M., i Seyve, C.** (1985): Evolution of a turbiditic foreland basin and analogy with an accretionary prism: Example of the Eocene South-Pyrenean basin. *Tectonics*, 4: 661-685.
- Lago, M. i Pocoví, A.** (1985): Magmatismos en el límite Trias superior- Lias inferior del área cantábrica y de los Pirineos: Características geológicas, petrológicas y consideraciones estructurales. *II Coloquios de Estratigrafía y Paleogeografía del Pérmico y Triasico Español*.
- Lan, L. i Hudleston, P.J.** (1995): Angular folds developed in single layers and rheological implications. *Geol. Soc. Amer. Abstracts with programs*, 27: 123.
- Lapparent, A. F. de, i Aguirre, E** (1956): Algunos yacimientos de Dinosaurios en el Cretácico superior de la Cuenca de Tremp, *Estudios Geol.*, 31-32: 377-382.
- Liu, H., McClay, K.R. i Powek, D.**(1992): Physical models of thrust wedges. En: *K.R. McClay (ed.) Thrust tectonics. Chapman & Hall, New York.*, 71-81.
- Livermore, R.A. i Smith, A.G.** (1985): Some boundary conditions for the evolutions of the Mediterranean Region, En: *D.J. Stanley i F.C. Wezel (eds.) Geological evolution of the Mediterranean Basin, Raimono Selli Commemorative Volume, Springer Verlag, Berlin*, 83-100.
- Llompert, C** (1977). Paleontología de la fauna de moluscos en un sector de la Vall d'Àger (prov. de Lérida). *Publ. Geol. Univ. Auton. Barcelona*, 7: 247, p. 31, figs. 27, 6 láms. Bellaterra (Barcelona).
- Llompert, C., Casanovas, L. i Santafe, J.V.** (1984): Un nuevo yacimiento de Icnitas de Dinosaurios en las facies garumnienses de la Conca de Tremp (Lleida, España), *Acta Geol. Hisp.* 19(2): 143-147.
- Llopis, N.** (1945): Sobre la tectónica del Paleozoico de la zona de las Nogueras. *Not. y Com. IGME*, 14: 199-288.
- Losantos, M.** (1988): Structure of the Pallaresa dome (Central Pyrenees). *Abstracts Symposium on the Geology of the Pyrenees and the Betics, 1988, Barcelona*. 48.
- Losantos, M., Aragonés, E., Berastegui, X., Palau, J. i Puigdefàbregas, C.** (1989): Mapa Geològic de Catalunya 1:250.000. Ed. Institut Cartogràfic de Catalunya.
- Luterbacher, H.P.** (1969): Remarques sur la position stratigraphique de la formation d'Àger (Pyrénées Meridionales). *Coll. sur l'Eocène. Mem. BRGM, Paris*, 69: 255-232.
- Marshak, S. i Wilkerson, M.S.** (1992): Effect of overburden thickness on thrust bell geometry and development. *Tectonics*, 11: 560-566.
- Martí, J.** (1986): El vulcanisme explosiu Tardihercinia del Pirineu Català. *Tesi de Doctorat, Universitat de Barcelona*: 303pp.
- Martí, J.** (1991): Caldera-like structures related to Permo-Carboniferous volcanism of the Catalan Pyrenees (NE Spain). *Jour. Volcanol. Geoth. Res.* 45: 173-186.
- Martí, J.** (1993): El vulcanismo estefano-pérmico del Pirineo catalán. *Guía de Campo. Instituto de Ciencias de la Tierra (Jaume Almera), CSIC. Barcelona, España*.
- Martí, J. i Mitjavila, J.** (1988): El vulcanismo tardihercinico del Pirineo Catalan, II: Caracterización de la actividad explosiva. *Acta Geol. Hisp.*, 23: 21-31.
- Masriera, A. i Ullastre, J.** (1983): Essai de synthèse stratigraphique des couches continentales de la fin du Crétace des Pyrénées catalanes (NE de l'Espagne). *Colloque Sènonien, Géologie Méditerranéenne*, X(3-4): 283-290.

- Masriera, A. i Ullastre, J.** (1985): Puntualización acerca de las relaciones entre el Eoceno marino de Montcalb – La Coromina, el de St. Llorenç de Morunys y los conglomerados continentales encajantes (Pirineo Catalán). *Econ. Geol.*, 41; 385-390.
- McClay, K.R.** (1992): Glossary of thrust tectonics terms. En: *K.R. McClay (ed.) Thrust tectonics. Chapman & Hall, New York*: 419-433.
- Means, W.D.** (1983): Application of the Mohr-circle construction to problems of inhomogeneous deformation. *Jour. Struct. Geol.*, 5(3/4): 279-286.
- Mellere, D.** (1992): I Conglomerati di Pobla de Segur: Stratigrafia Fisica e Relazioni Tettonica-Sedimentazione, *Tesi de Doctorat, Universita degli Studi di Padova*, 203pp.
- Mellere, D. i Marzo, M.** (1992): Los depósitos aluviales sintectónicos de la Pobla de Segur: alogrupos y su significado tectonoestratigráfico. *Acta Geol. Hisp.*, 27: 145-159.
- Mercier, E.** (1992): Une evolution possible des chevauchements associés aux plis de propagation: le transport sur le plat (modélisation et exemple). *Bull. Soc. Geol. France*, 163: 713-720.
- Mercier, E., Outtani, F., i de Lamotte, F.** (1997): Late stage evolution of fault-propagation folds: principles and example. *Jour. Struct. Geol.*, 19 (2): 185-193.
- Mey, P.H.W.** (1967a): Evolution of the Pyrenean basins during the Late Palaeozoic. *Inter. Symp. Devonian System, Calgary*, 2: 1157-1166.
- Mey, P.H.W.** (1967b): The geology of the Upper Ribagorzana and Baliera Valleys, Central Pyrenees, Spain. *Leidse Geol. Meded.*, 41: 153-220.
- Mey, P.H.W.** (1968): Geological Map of the Central Pyrenees, Sheet 8: Ribagorzana – Tor, Spain, scale 1:50000. En: *L.U. de Sitter (ed.), Geological Institute Leiden University, Holland*.
- Mey, P.H.W., Nagtegaal, P.J.C., Roberti, K.J. i Hartevelt, J.J.A.** (1968): Lithostratigraphic subdivision of post-Hercynian deposits in the South-Central Pyrenees, Spain. *Leidse Geol. Meded.*, 41: 153-220.
- Mirouse, R.** (1966): Recherches géologiques dans la partie occidentale de la zone primaire des Pyrénées. *Mem. Expl. Carte Geol. Det. France*: 451 pp.
- Misch, P.** (1934): Der Bau der Mittleren Südpynenäen. *Abh. der Gess. Wiss. Göttingen*, III F., 12: 1-168.
- Mitra, S.** (1990): Fault-propagation folds: geometry, kinematic evolution, and hydrocarbon traps. *AAPG Bull.*, 74 (6): 921-945.
- Moeri E. Von** (1977): Oberkretazische Schelfsedimente in den Zentralpyrenäen zwischen Rio Segre und Llobregat. *Eclog. Geol. Helvet.*, 70(1): 193-235.
- More, N. i Thiébaud, J.** (1964): Constitution de quelques roches volcaniques Permiennes de la Sierra del Cadí (Pyrénées Catalanes). *Bull. Soc. Geol. France*, (7)6: 383-396.
- Morley, C.K.** (1986): Vertical strain variations in the Osen-Roa thrust sheet, north-western Oslo Fjord, Norway. *Jour. Struct. Geol.*, 8: 621-637.
- Muller, J. i Roger, Ph** (1977): L'évolution structurale des Pyrénées (domaine central et occidental). Le segment hercynien, la chaîne de fond alpine. *Geol. Alpine*, 53(2): 149-191.
- Mulugeta, G. i Koyi, H. A.** (1987): Three-dimensional geometry and kinematics of experimental piggy-back thrusting. *Geology*, 15: 1052-1056.

- Mulugeta, G. i Koyi, H. A.** (1992): Episodic accretion and strain partitioning in a model sand wedge. *Tectonics*, 202: 319-333.
- Muñoz, J.A** (1985): Estructura Alpina i Herciniana a la vora sud de la Zona Axial del Pirineu oriental. *Tesi de Doctorat, Univ. de Barcelona*, 305 pp.
- Muñoz, J.A.** (1988): Estructura de las unidades surpirenaicas en la transversal del corte ECORS. *Guía de campo de la reunión extraordinaria ECORS-Pirineos, Setiembre 1988, Balaguer-Boussens*, 35 pp.
- Muñoz, J.A.** (1992): Evolution of a Continental Collision Belt: ECORS-Pyrenees Crustal Balanced Cross-section. En: *K.R. McClay (ed.) Thrust tectonics. Chapman & Hall, New York*: 235-246.
- Muñoz, J.A., Martínez, A. i Vergés, J.** (1986): Thrust sequences in the eastern Spanish Pyrenees. *Jour. Struct. Geol.*, 8 (3/4): 399-405.
- Muñoz, J.A., Puigdefàbregas, C. i Fontboté, J.M.** (1983): El ciclo Alpino y la estructura tectónica del Pirineo. *Libro Jubilar J.M. Rios. Geología de España, II*: 185-205
- Muñoz, J.A., Puigdefàbregas, C. i Santanach, P.** (1983): El ciclo alpino y la estructura tectónica del Pirineo. En: *J.A. Comba (coord.) Libro jubilar J.M. Rios. Geología de España, IGME, Madrid, II*: 185-205.
- Mutti, E., Rosell, J., Allen, G.P., Fonesu, F. i Sgavetti, M.** (1985): The Eocene Baronia tide dominated delta-shelf system in the Ager basin. En: *M.D. Mila i J. Rosell (eds.) IAS 6th European Regional Meeting, Exc. Guide-book. Lérida. Spain*: 579-600.
- Mutti, E., Séguret, M. i Sgavetti, M.** (1988): Sedimentation and deformation in the Tertiary sequences of the southern Pyrenees. *AAPG Mediterranean Basins Conference. Field trip 7*: 1-153.
- Nagtegaal, P.J.C.** (1969): Sedimentology, paleoclimatology and diagenesis of post-Hercynian continental deposits in the South-Central Pyrenees. *Leidse Geol. Meded.*, 42: 143-238.
- Oele E., Sluiter W.J. i Pannekoek A.J.** (1963): Tertiary and Quaternary sedimentation in the Conflent, *Leidse Geol. Meded.*, 28: 297-320.
- Olivet, J.L., Bonnin, J., Beuzart, P. i Auzende, J.M.** (1984): Sea Beam survey of the Azores triple Junction. *E.O.S.*, 62(17): 405.
- Peybernès, B.** (1968): Précissions stratigraphiques sur le Jurssique termonal et le Crétacé Inferieur aux abords de la vallée du Sègre (province de Lérida, Espagne). *C. R. Acad. Soc. Geol. France*, 1: 15-16.
- Peybernès, B.** (1976): Le Jurassique et le Crétacé inférieur des Pyrénées franco-espagnoles entre la Garonne et la Méditerranée. *Tesi de Doctorat, Sc. Nat. Toulouse, Imp. C.R.D.P. Toulouse*: 459 pp.
- Peybernès, B. i Souquet, P.** (1973): Biostratigraphie des marnes noires de l'Aptien-Albien de la zone sud-pyrénéene. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 276: 2501-2504.
- Poblet, J.** (1991): Estructura de les unitats del vessant sud de la zona axial del Pirineu central. *Tesi de Doctorat, Univ. de Barcelona*: 604 pp.
- Puigdefàbregas, C. i Simó, A.** (1986): Evolution and Cyclicity in a tectonically controlled shelf, Arensandstone, Maastrichtian, Tremp, South Central Pyrenees. En: *R.J. Knight i J.R. McLean (eds.) Shelf Sands and Sandstones. Can. Soc. Petrol. Geol. Mem.*, 11: 332.
- Puigdefàbregas, C., Muñoz, J.A. i Vergés, J.** (1992): Thrusting and foreland basin evolution in the Southern Pyrenees. En: *K.R. McClay (ed.) Thrust tectonics. Chapman & Hall, New York*. 247-254.
- Ramsay, J.G.** (1967): Folding and fracturing of rocks. *McGraw-Hill. New York*: 568 pp.

- Ranalli, G. i Yin, Z.-M.** (1990): Critical stress difference and orientation of fault in rocks with strength anisotropies: the two-dimensional case. *Jour. Struct. Geol.*, 12 (8): 1067-1071.
- Reddy, J.N., Stein, R.J. i Wickham, J.S.** (1982): Finite-element modeling of folding and faulting. *Inter. Jour. Num. Ana. Meth. Geomech.*, 6: 425-440.
- Riba, O., Reguant, S i Villena, J.** (1983): Ensayo de síntesis estratigráfica y evolutiva de la cuenca terciaria del Ebro. Libro Jubilar J.M. Rios. *Geología de España*, II: 131-159.
- Rijnsburguer, A.** (1967): International report Geol. Min. Inst. Leiden (Dept. Struct. Geol.).
- Roca, E.** (1986): Estudi geològic de la fossa de la Cerdanya. *Tesi de Llicenciatura. Univ. de Barcelona*: 109 pp.
- Roca, E.** (1996): The Neogen Cerdanya and Seu d'Urgell intramontane basins (Eastern Pyrenees). En: *P.F. Friend i C.J. Dabrio (eds.) Tertiary Basins of Spain. The stratigraphic record of crustal kinematics. Cambridge University Press*: 114-119
- Roca, E. i Santanach, P.** (1986): Génesis y evolución de la fosa de la Cerdanya (Pirineos Orientales) *Geogaceta*, 1: 37-38.
- Roger, Ph.** (1965): Etude stratigraphique et structurale de la zone des Nogueras entre l'Esera et l'Isabena (Huesca-Espagne). *Act. Soc. Linnéenne Bordeaux, Sér. 3*, 102(5): 1-25.
- Rosell, J.** (1963): Sobre la existencia de la discordancia precenomaniense en el Prepirineo de la provincia de Lérida. *Notas y Comuns. Inst. Geol. y Minero de España*, 72: 71-80.
- Rosell, J.** (1967): Estudio geológico del sector del Prepirineo comprendido entre los ríos Segre y Noguera Ribagorzana (prov. De Lérida). *Pirineos*, 21: 9-214.
- Rosell, J.** (1994): Mapa geológico y Memoria explicativa de España a escala 1:50.000, *Hoja de Tremp n°252 (33-11), Série MAGNA, Instituto Tecnológico y Geominero de España, Madrid*.
- Rosell, J. i Llompарт, C.** (1982): Pirineo. En: *El Cretácico de España, Univ. Complutense, Madrid*: 161-198.
- Rosell, J. i Riba, O.** (1966): Nota sobre la disposición sedimentaria de los Conglomerados de la Pobla de Segur (Prov. de Lérida). *Instituto de Estudios Pirenaicos, Zaragoza*, 1-16.
- Roure, F., Choukroune, P., Berastegui, X., Muñoz, J.A., Villien, A., Matheron, P., Bareyt, M., Seguret, M., Camara, P. i Deramond, J.** (1989): ECORS deep seismic data and balanced cross-sections: geometric constraints on the evolution of the Pyrenees. *Tectonics*, 8(1): 41-50.
- Rowan, M.G.** (1996): Advantages and limitations of section restoration in areas of extensional salt tectonics: an example from offshore Louisiana. En: *P.G. Buchanan i D.A. Nieuland (eds.) Modern Developments in Structural Interpretation, Validation and Modelling. Geol. Soc. Spec. Pub.*, 99: 147-161.
- Sanz De Síría, A.** (1978): La flora miocénica de las cuencas pirenaicas catalanas. *Bul. Inf. Ins. Paleontol., Sabadell*, 10: 52-62.
- Sanz De Síría, A.** (1980): Estudio sistemático y paleoecológico de la flora miocénica de la cuenca de la Seu d'Urgell, *Paleontol. Evol.*, 15: 3-29.
- Saula, E., Mató, E., Martínez, A., Vergés, J. i Muñoz, J.A.** (1994): Mapa geológico y Memoria explicativa de España a escala 1:50.000, *Hoja de Berga n°293 (36-12), Série MAGNA, Instituto Tecnológico y Geominero de España, Madrid*.

- Saura, E** (2000): Les unitats de les Nogueres i la seva relació amb els conglomerats oligocens entre les valls del Flamissell i el Manyanet (Pirineus Centrals), *Treball de Recerca, Univ. Autònoma de Barcelona*: 118pp.
- Saura, E. i Teixell, A.** (2000): Relación entre los conglomerados oligocenos y las estructuras tectónicas en la zona de Les Nogueres (Pirineo Central), *Geotemas*, 2: 201-203.
- Saura, E. i Teixell, A.** (2003): Complex 3-D Inversion Geometries at the Laeding Edge of an Antiformal Stack: Field Studies and Forward Modelling. *AAPG International Conference and Exhibition, Official Program*, A85.
- Savage, H.M., i Cooke, M.L.** (2003): Can flat-ramp-flat geometry be inferred from fold shape?: A comparison of kinematic and mechanical folds. *Jour. Struct. Geol.*, 25: 2023-2034.
- Savostin, L.A., Sobouet, J., Zonenshaim, P., Le Pichon, X. i Roulet, M.** (1986): Kinematic evolution of the Tethys belt from Atlantic ocean to the Pamirs since the Triassic. *Tectonophysics*, 123: 1-35.
- Schardt, H.** (1884): Geological studies in the Pays-D'Enhant Vaudois. *Bull. Soc. Vaudois Sci. Nat.*, XX: 143-146.
- Schmidt, H.** (1931): Das Paläozoikum der Spanischen Pirenäen . *Abh. der Gess. Wiss. Göttingen Math. Phys.*, Kl. 3, Folge, 5 (8): 1-85.
- Schöllhorn, E.** (1992): Biogene Sedimentation an einem Rampen-Transekt des Apt/Alb in den mittleren Südpyreäen. *Fachbereich Geowiss Univ Bremen*, 30: 277-287.
- Seguret, M.** (1964): Sur les style en têtes plongeantes des structures pyrénéennes de la zone des Nogueres (versant sud des Pyrénées centrales). *C.R. Acad. Sci. Paris, Sér. D*, 268: 907-910.
- Seguret, M.** (1972): Etude tectonique des nappes et séries décollés de la partie centrale du versant sud des Pyrénées. Caractères synsédimentaire, rôle de la compression et de la gravité. *Tesi de Doctorat, Univ. de Montpellier*: 210 pp.
- Sgavetti, M., Mutti, E., Rosell, J. i Legarreta, L.** (1984): Tectonically controlled Depositional Sequences in the Upper Cretaceous Aren Sandstone, South-Central Pyrenees, Spain, *Abstr. 5th. IAS. European regional meeting of Sedimentology*: 406-407.
- Simó, A.** (1985): Secuencias deposicionales del Cretácico superior de la Unidad del Montsec (Pirineo Central). *Tesi de Doctorat, Univ. de Barcelona*: 326 pp.
- Simó, A., Puigdefabregas, C i Gili, E.** (1985): Transition from shelf to basin on an active slope, Upper Cretaceous, Tremp area, Southern Pyrenees. En: *M.D. Mila i J. Rosell (eds.) IAS 6th European Regional Meeting, Exc. Guide-book. Llérida. Spain*: 63-108.
- Sitter, L.U.** (1959): The structure of the axial zone of the Pyrenées in the province of Llérida. *Estudios Geol.*, XV (41-44): 349-360.
- Solé Sabaris, L. i Llopis Lladó N.** (1946): Explicación de la hoja nº216 Bellver. *Mapa geológico de España. Inst. Geol. Min. Esp.*: 109 pp.
- Solé Sabaris, L., Fontboté, J.M., Masachs, V. i Virgili, C.** (1956): Elementos estructurales de la zona axial en el alto Ribagorzana. *Act. 2^{ème}. Cong. Intern. Etudes Pyrénéennes, Luchon-Pau, 1954*, 2, Sect. I: 171-184.
- Solé Sugrañes, L. i Santanach, P.** (1970): Nota sobre la escama de corrimiento del Montsec de Tost en el Prepirineo español, *Act. Geol. Hisp.*, V(1): 24-28.
- Soler, A.** (1990): Geologia i Metal·logènia del Contacte sud del Granit d'Andorra (Pirineus Centrals). *Tesi de Doctorat, Universitat de Barcelona*: 659 pp.

- Soler, D., Teixell, A. i García-Sansegundo, J.** (1998): Amortissement latéral du chevauchement de Gavarnie et sa relation avec les unités sud-pyrénéennes. *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planetes*, 327: 699-704.
- Soriano, C.** (1992): Estructura de les Unitats de les Nogueres inferiors entre els rius Flamicell i Noguera Pallaresa. *Tesi de Llicenciatura, Univ. de Barcelona*: 68 pp.
- Soriano, C., Martí, J. i Casas, J.M.** (1996): Palinspastic reconstruction of Permo-Carboniferous basins involved in Alpine deformation: the Erill Castell-Estac basin, Southern Pyrenees, Spain. *Geol. Mijn.*, 75: 43-55.
- Souquet, P.** (1967): Le Crétacé supérieur sud-pyrénéen en Catalogne, Aragón et Navarre. *Tesi de Doctorat. Fac. Sci. Toulouse III*, 1: 47-70.
- Speksnijder, A.** (1986): Geological analysis of Paleozoic large-scale faulting in the South-Central Pyrenees, Spain. *Geol. Ultraiectina*, 43: 1-211.
- Speksnijder, A.** (1987b): The structural development of the Orri dome, Southern Variscan Pyrenees, Spain. *Eclogae Geol. Helvet.*, 80(3): 697-733.
- Storti, F., Salvini, F. i McClay, K.R.** (1997): Fault-related folding in sandbos analogue models of thrust wedges. *Jour. Struct. Geol.*, 19, 583-602.
- Strayer, L.M. i Hudleston, P.J.** (1997): Numerical modeling of fold initiation at thrust ramps. *Jour. Struct. Geol.*, 19 (3-4): 551-566.
- Suppe, J.** (1980b): Imbricated structure of western foothills belt, south-central Taiwan. *Petrol. Geol. Taiwan*, 17: 1-16.
- Suppe, J.** (1983): Geometry and kinematics of fault-bend folding. *Amer. Jour. Sci.*, 283: 684-721.
- Suppe, J.** (1985): Principles of Structural Geology. *Prentice Hall*: 537pp.
- Suppe, J. i Medwedeff, D.A.** (1984): Fault-propagation folding. *G.S.A. Abstracts with programs*, 16: 670.
- Suppe, J. i Medwedeff, D.A.** (1990): Geometry of kinematics of fault-propagation folding. *Eclogae Geol. Helvet.*, 83: 409-454.
- Suppe, J. i Namson, J.** (1979): Fault bend origin of frontal folds of the western Taiwan fold-and-thrust-belt. *Petrol. Geol. Taiwan*, 25: 1-18.
- Tanner, D.C., Behrmann, J.H. i Dresmann, H.** (2003): Three-dimensional retro-deformation of the Lechtal Nappe, Northern Calcareous Alps. *Jour. Struct. Geol.*, 25: 737-748.
- Teixell, A.** (1990): Alpine thrusts in the western termination of the Pyrenean Axial zone. *Bull. Soc. Geol. France*, 8: 241-249.
- Teixell, A.** (1992): Estructura Alpina de la Transversal de la Terminación Occidental de la Zona Axial Pirenaica. *Tesi de Doctorat, Univ. de Barcelona*: 252 pp.
- Teixell, A.** (1998): Crustal structure and orogenic material budget in the west central Pyrenees. *Tectonics*, 17: 395-406.
- Teixell, A. i Koyi, H.A.** (2003): Experimental field study of the effects of lithological contrasts on thrust-related deformation, *Tectonics*, 22(5): 1054, doi:10.1029/2002TC001407.

- Teixell, A. i Muñoz, J.A.** (2000): Evolución tectono-sedimentaria del Pirineo Meridional durante el Terciario: una síntesis basada en la transversal del río Noguera Ribagorçana. *Rev. Soc. Geol. España*, 13(2): 251-264.
- Thompson, R.I.** (1981): The nature and significance of large blind thrusts within the southern Rocky Mountains of Canada. En: *K.R. McClay and N.J. Price (eds.) Thrust and Nappe Tectonics, Spec. Pub. Geol. Soc. 9, London: 449-462*
- Turrini, C., Ravaglia, A. i Perotti, C.R.** (2001): Compresional structures in a multilayered mechanical stratigraphy: Insights from sandbox modeling with three-dimensional variations in basal geometry and friction. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, 193: 153-178.
- Ullastre, J. i Masriera, A.** (1989): Discusión de algunas apreciaciones estratigráficas relativas al "Cretácico superior de la Vall d'Alinyà" (Pirineo oriental, Lérida). *Acta Geol. Hisp.*, 24 (1): 55-58.
- Valenzuela, J.I.** (1989): Conodontos del Lochloviense y Praguense del Pirineo Central. *Tesi de Doctorat, Univ. de Zaragoza: 118 pp.*
- Valloni, R., Amorosi, A., Cibin, U., De Donatis, M., De Nardo, M.T., Farina, M., Ghiselli, F., Martelli, L., Martini, A., Ottria, G., Piccin, A., Pixxiolo, M., i Severi, P.** (1991). Proposta di classificazione macroscopica delle areniti. *Acta Naturalia de "L'Ateneo Parmense"*, 27 (1/2): 1-22.
- Vannucchi, P., Maltman, A., Bettelli, G. i Clenell, B.** (2003): On the nature of scaly fabric and scaly clay. *Jour. Struct. Geol.*, 25: 673-388.
- Vergés, J.** (1993): Estudi geològic del vessant sud del Pirineu oriental i central. Evolució cinemàtica en 3D. *Tesi de Doctorat, Univ. de Barcelona: 203 pp.*
- Vergés, J., Martínez, A., Berastegui, X., Fleta, J., Pujadas, J., Tosquella, J., Samsó, J.M^a, Sanz, J., i Barberà, M.** (1993a): Memoria explicativa y cartografía geológica de la Hoja 255 (La Pobla de Lillet) del mapa geológico de España E. 1:50.000, *MAGNA, ITGE*.
- Vergés, J., Millán, H., Roca, E., Muñoz, J.A., Cirés, J., Den Bezemer, T., Zoetemeijer, R. i Cloetingh, S.** (1995): Eastern Pyrenees and related foreland basins: pre-, syn-, and post-collisional crustal-scale cross-sections, *Mar. Petrol. Geol.*, 12(8): 903-915.
- Verral, P.** (1981): Structural interpretation with application to North Sea problems. *Geol. Soc. Course Notes, 3, Lectures: 13-27.*
- Verschuren, M., Nieuland, D. i Gast, J.** (1996): Multiple detachment levels in thrust tectonics: sandbox experiments and palinspastic reconstruction. En: *P.G. Buchanan i D.A. Nieuland (eds.) Modern Developments in Structural Interpretation, Validation and Modelling, Geol. Soc. Spec. Pub.*, 99: 227-234.
- Vicens, E.** (1992): Estudio de la fauna de rudistas (Hippuritidae y radiolitidae) de los materiales cretácicos del Pirineo Oriental: implicaciones bioestratigráficas. *Tesi de Doctorat, Univ. Autònoma de Barcelona.*
- Virgili, C.** (1960): El Triásico de los Catalánides. *Bol. Inst. Geol. Min. Esp.*, 69: 856 pp.
- Virgili, C.** (1961): The sedimentation of the Permotriassic rocks in the Noguera Ribagorçana valley (Pyrenées-Spain). *XXI Int. Geol. Congress*, part 23: 136-142.
- Waterlot, M.** (1967): Contribution à l'étude géologique du Carbonifère antéstéphanien des Pyrénées centrales espagnoles. *Tesi de Doctorat, Univ. De Lille: 323 pp.*
- Waterlot, M.** (1969a): Grands faits stratigraphiques et paléogéographiques du Carbonifère antéstéphanien des Pyrénées centrales espagnoles. *Bull. Soc. Geol. France, Ser. 7e.*, 11(4): 502-510.

- Waterlot, M.** (1969b): Contribution a l'étude géologique du Carbonifère anté-stéphanien des Pyrénées centrales espagnoles. *Mem. I.G.M.E.*: 279-328.
- Williams, G.D.** (1985): Thrust tectonics in the South Central Pyrenées. *Jour. Struct. Geol.*, 7(1): 11-17.
- Williams, G.D. i Fischer, M.W.** (1984): A balanced section across the Pyrenean Orogenic belt. *Tectonics*, 3(7): 773-780.
- Williams, G.D., Powell, C.M. i Cooper, M.A.** (1989): Geometry and kinematics of inversion tectonics. En: *M.A. Cooper i G.D. Williams (eds.) Inversion Tectonics, Geol. Soc. Spec. Pub.*, 44: 17-39.
- Willis, B.** (1893): The mechanics of Appalachian structure. *US Geological Survey 13th Annual Report, Part 2*: 211-282.
- Withjack, M.O. i Peterson, E.T.** (1993): Prediction of normal fault geometries – A sensitivity analysis, *AAPG Bull.*, 77: 1860-1873.
- Woodward, N.B. i Rutherford, E.** (1989): Structural lithic units in external orogenic zones. *Tectonophysics*, 158: 247-267.
- Yin, Z.M. i Ranalli, G.** (1992): Critical stress difference, fault orientation and slip direction in anisotropic rocks under non-Andersonian stress systems. *Jour. Struct. Geol.*, 14 (2): 237-244.
- Zamorano, M** (1993): Los sistemas deltaicos del Ilerdiense superior - Cusiense de la cuenca de Ager (fm. Ametlla). Prepirineo de Lleida. *Tesi de Doctorat. Univ. Autònoma de Barcelona*: 161 pp.
- Zandvliet, J.** (1960): The geology of the upper Salat and Pallaresa valleys, Central Pyrenees, France-Spain. *Leidse Geol. Meded.*, 25: 1-127.
- Zoetemeijer, R i Sassi, W.** (1992): 2-D reconstruction of thrust evolution using the fault-bend fold method. En: *K.R. McClay (ed.) Thrust tectonics. Chapman & Hall, New York*, 133-140.
- Zwart, H. J.** (1979): The geology of the central Pyrenees. *Leidse Geol. Meded.*, 50: 1-4.
- Zwart, H.J. i Roberti, K.F.** (1976): Geological Map of the Central Pyrenees, Sheet 9: Flamisell - Pallaresa, Spain, scale 1:50000. En: *H.J. Zwart (ed.), Geological Institute Leiden University, Holland*:

ANNEXOS

ENGLISH FIGURE CAPTION

Fig. 1.1. Geologic sketch map of the Pyrenees showing the main longitudinal and transverse divisions of the chain (after Teixell, 1996). The red square indicates the location of the entire Nogueres Zone; only the eastern part of this structural unit is analyzed in this work.

Fig. 1.2. Geologic cross-sections through the Pyrenean chain according to various authors. A. After Williams and Fischer (1984); B. After Roure et al. (1989); C. After Muñoz (1992); D. After Teixell (1998). Section A was published before the acquisition of the ECORS-Pyrenees seismic reflection profile, where B and C are based on this profile. D is based on the ECORS-Arzacq profile.

Fig. 1.3. Tectonic sketch map of the study zone, showing the main structural elements (synthesized from own data and Losantos et al., 1989, Poblet, 1991, Teixell, 1992, Roca, 1996, Garcia Senz, 2002, and Saura, 2000). The Port del Comte thrust sheet (PC) has been included in the Cadí Unit. The Neogene grabens of La Seu d'Urgell and La Cerdanya are indicated (LS and LC).

Fig. 2.1. Main geographic and geologic divisions of the study zone.

Table 2.1. Lithostratigraphy of the Upper Ordovician (after Poblet, 1991).

Table 2.2. Division in facies and subfacies areas of the Devonian of the Pyrenees (from Poblet, 1991, modified after Mey, 1967b).

Table 2.3. Comparative table of the Devonian of the study zone according to different authors.

Fig. 2.2. Stratigraphic type sections of the Devonian facies areas in the study zone, originally created by Boersma (1973) and later modified by Galera (1996). A. Sierra Negra facies area in the Castells thrust unit. B. Comte facies area at El Comte (Noguera Pallaresa valley).

Fig. 2.3. Synthetic logs of the Pyrenean Stephano-Permian basins and correlation between different authors; A.- after Besly and Collinson (1991), modified. B.- after Séguret (1972). C.- after Zwart (1979).

Fig. 2.4. Stratigraphic log of the Guiró formation between Guiró and Castellnou d'Avellanós, in the Erill Castell-Estac basin (after Mey et al., 1968).

Fig. 2.5. Stratigraphic and chrono-stratigraphic log of the Triassic of the Nogueres Zone and the Cadí nappe (after Calvet and Anglada, 1987).

Fig. 2.6. Stratigraphic log of the Triassic Buntsandstein facies at Palanca de Noves (Segre valley), according to Gisbert et al. (1985). These authors do not explicitly distinguish the stratigraphic units of Calvet and Anglada (1987), although they can be recognized in the log. Note the general fining- and thinning-upwards trend.

Fig. 2.7. Logs of the Triassic Muschelkalk facies between the Segre valley and the Sierra de Cadí, after Calvet and Anglada (1987). The basal limit of the Muschelkalk is of tectonic nature at the Segre valley, whereas it is stratigraphic in the Cadí area.

Fig. 2.8. Stratigraphic log of the Triassic Keuper facies in the Hostalets-Adrahent area (after Flinch, 1990).

Fig. 2.9. A. View of the Pont d'Hostalets lahar deposit. B. Line-drawing of this volcano-sedimentary deposit. The succession is overturned, and hence the base is to the right of the picture. The irregularity of the base indicates its erosional character.

Fig. 2.10. Simplified geological map of the Bóixols-Turbón thrust sheet (USC), modified from Garcia Senz (2002). To the E is the Organyà basin, characterized by a thick lower Cretaceous succession, and to the W is the Pont de Suert basin, with a much reduced lower Cretaceous series.

Table 2.4. Correlation diagram of the lower Cretaceous stratigraphic units defined by different authors at Organyà (A) and Pont de Suert (B) (modified from Garcia Senz, 2002).

Fig. 2.11. Two representative stratigraphic logs of the lower Cretaceous of the Organyà and Pont de Suert basins and their correlation (after Garcia Senz, 2002).

Fig. 2.12. Correlation diagram of the Jurassic and Cretaceous of the central Southern Pyrenees, based on Zwart (1970) and Mey et al. (1968).

Fig. 2.13. Logs of the middle and upper Mesozoic from Garrido Megías (1973). A. The Jurassic succession at Bonansa. B. The upper Cretaceous succession at Collegats.

Fig. 2.14. Lithostratigraphic units and depositional sequences of the upper Cretaceous of the Central Southpyrenean Unit after Simó (1985). Units to the left correspond to the Noguera Ribagorçana area; the ones in the centre to the Flamicell-Noguera Pallaresa and Sant Corneli areas, and those to the right correspond to the Montsec area.

Fig. 2.15. Similarities between the upper Cretaceous succession of the USC and Cadí nappes (after Hartevelt, 1970).

Fig. 2.16. Synthetic log showing the stratigraphy of the Banyeres unit, according to Flinch (1990). The lower part, until the middle Garumnian limestone, corresponds to the upper Cretaceous, while the upper part corresponds to the Paleocene-lower Eocene.

Fig. 2.17. Stratigraphic log of the Bona and Adrahent upper Cretaceous formations (after Flinch, 1990). See text for the fossil symbols.

Fig. 2.18. Stratigraphic log of the Garumnian facies at Coll del Pradell (after Flinch, 1990).

Fig. 2.19. Stratigraphic log of the base of the Cadí formation at Coll de la Fera, between Fórnoles and Adraén (from Flinch, 1990).

Fig. 2.20. Interpretative cartoon of the structural evolution of the Port del Comte and Cadí areas during the Eocene (after Betzler, 1989). Note facies and thickness changes associated to the activity of the Pyrenean thrusts.

Fig. 2.21. Photomicrograph of a Silurian pebble in the Eocene conglomerate.

Fig. 2.22. Stratigraphic relationships between the main conglomeratic units of the Pobla de Segur basin along an E-W section (from Mellere and Marzo, 1992).

Table 2.5. Comparative table of the stratigraphic divisions proposed by different authors for the Collegats formation conglomerates (modified from Mellere and Marzo, 1992).

Fig. 2.23. Synthetic stratigraphic logs of the Neogene of the Seu d'Urgell basin (after Roca, 1996). B1. Bellestar sub-basin. B2. Western end of the Alàs sub-basin.

Fig. 3.1. Map of the study zone showing in bold lettering the principal author of the geological mapping of a particular area, and in italic the bibliography used as a basis to complete field data.

Fig. 3.2. Sketch diagram describing the Line Length Unfolding (LLU) algorithm from 2DMove. The pin must be placed perpendicularly to bedding in order to avoid thickness changes and incorrect results (from 2DMove Manual, 2000, modified).

Fig. 3.3. Diagram showing the restoration process using the Flexural Slip Unfolding (FSU) algorithm (from 2DMove Manual, 2000, modified). At the end of the process (C), points XPT and XPR are in the same position, and all the points XPN have experienced a displacement equal to that of XPR after the pin. Distances LTN and LNM determine the trace of passive markers in the restoration. Hence, the choice of pin and reference level is crucial.

Fig. 3.4. Sketch diagram describing the Simple Shear Unfolding (SSU) algorithm for vertical shear (shear angle $\lambda = 90^\circ$) (from 2DMove Manual, 2000, modified). Arrows in the upper part indicate the sense of shear. All points contained in the same flow line (e.g., P1 and P2) experience equal displacement.

Fig. 3.5. Sketch diagram describing the Inclined Shear (IS) algorithm. From an initial state shown in A, the application of an extension (B) creates a void towards which the hangingwall collapses following parallel movement vectors (C). All points contained in a vector (L_x) experience equal displacement (from 2DMove Manual, 2000, modified).

Fig. 3.6. Sketch describing the backward application of the FPF algorithm. From the final, deformed state (A) the hangingwall is restored following the flow lines defined by the dip bisectors of the fault surface (B). Preserving line lengths (C) imposes an angular backshear (λ) defined by the inclination of the trailing edge (modified from 2DMove Manual, 2000). The forward application of this algorithm can be seen in Fig. 3.7.

Fig. 3.7. Comparison between the kinematics of the Suppe and Namson (1979) model (A) and that of the FPF algorithm of 2DMove. In the first model, the crest of the hangingwall anticline is horizontal (or parallel to the flat segments), whereas in the second model, the culmination is inclined to the foreland and experiences a thickness increase until the stage in which the line Y'B' gets to the point X. Also note that bisectors YB and XA are fixed to the footwall, while X'A' and Y'B' are fixed to the hangingwall.

Fig. 3.8. Sketch illustrating two possible late-stage evolutions of a fault-propagation fold (modified after Mercier et al., 1997).

Fig. 3.9. Sketch showing the result of applying the three deformation patterns offered by the PPF algorithm to the same original stratigraphic sequence. In B, the slip not accommodated is null, whereas in C and D is of 40 pixels.

Table 3.1. Results of the models in Fig. 3.9 produced with RampeEM. A. Basic fault-propagation fold. B. Fault-propagation folds developing flats. C. Fault-propagation folds with forelimb breakthrough. Note that terminology of this software is in French.

Fig. 3.10. Process of construction of a ruled surface with AutoCAD. A. Cross sections used for 3D reconstruction. B. Tabular surface with a density of 6 polygons; the ramp dip in the sections, X-Y, is larger than that interpolated by AutoCAD X'-Y', due to the low density of the 3D net. C. Tabular surface with a density of 40 polygons; in this case, the ramp dip is the same in the sections and in the extrapolated surface. D. Tabular surface with torsion.

Fig. 3.11. 3D reconstruction of a surface cut by a thrust fault with a lateral tip line. A. Result achieved not taking into account the displacement reduction; the program does not take into account the structural elements of each section, giving

an anomalous surface. B. Surface constructed taking into account the lateral change of displacement. C. Block-diagram showing the thrust fault (red), a surface cut by it (dark yellow), and a surface not affected (light yellow).

Table 3.2. Initial configuration of the sandbox models. Esc.: shortening; Long.: length; P.t.: total thickness; P.: thickness; ζ : dip angle; s. ζ : dip sense; AP: foreland; RP: hinterland; AM: mechanical anisotropy.

Fig. 3.12. Sketch showing the steps in building the sandbox models (1, 2 and 3). 4. Profile sketch of the compressional mechanism used to deform the models. NEB: basal detachment level.

Table 3.3. Scaling parameters between models and nature. In the model Uncnfmy-Mdl10, the length ratio is $L_r = 3.75 \cdot 10^{-5}$.

Fig. 4.1. Synthetic geological maps showing the structure of the Axial Zone, north of the Nogueres thrust sheets (modified after Poblet, 1991).

Fig. 4.2. Structural units of the western sector-part W. Numbered lines indicate the cross-sections constructed from this area. Grayed: Quaternary; L: thrust sheet.

Fig. 4.3. Structural units of the western sector -part E. Grayed: Quaternary.

Fig. 4.4. Key to maps and cross-sections from the Gortarta-Sta. Bàrbara sector.

Fig. 4.5. Geological map of the western sector -part W, indicating cross-section lines. Colour key in Fig. 4.4.

Fig. 4.6. The Igiüerri transect (cross-section 1 in Fig. 4.5.) A. geologic cross-section. B. FSU restoration. Colour key in Fig. 4.4.

Fig. 4.7. The Gotarta unit as seen from the western side of the Noguera de Tor valley. A. Field photograph. Indicated are the main geographic localities. B. Structural interpretation. G1 refers to Fig. 4.6; EP: Stephano-Permian; Tb: Buntsandstein; Tm: Muschelkalk; Tk: Keuper; λ : ophites; J: Jurassic; C. Cretaceous.

Fig. 4.8. View of Tossal de Miravet, constituting the northern boundary of the Serra Faiada thrust sheet in the Noguera Ribagorçana valley, near Pont de Suert. Tk: Keuper; J: Jurassic; Ci: Lower Cretaceous.

Fig. 4.9. Cross-section of the Malpàs transect (cross-section 2 in Fig. 4.5.). G1 and G2: Gotarta thrusts; LC: La Costera thrust. Colour key in Fig. 4.4.

Fig. 4.10. Outcrop sketch of the Erill Castell formation of the Gotarta thrust sheet at barranc de Malpàs. Indicated are two faults with striae indicating north side down.

Fig. 4.11. Cross-section of the Coll de Fades transect (cross-section 3 in Fig. 4.5.), restored with the LLU algorithm (modified after Saura, 2000). Colour key in Fig. 4.4.

Fig. 4.12. A. Photograph of the southern part of the Coll de Fades transect. B. Structural interpretation. Note in the foreground backthrust R5 between the Gotarta and Serra Faiada thrust sheets. D: Devonian; EP: Stephano-Permian; Tb: Buntsandstein; J: Jurassic; C. Cretaceous; R4: backthrust 4 in Fig. 4.11. In the middle ground is the area where the Jurassic and Cretaceous of the Serra Faiada thrust sheet backthrusts the Gotarta thrust sheet. To the west of Pont de Suert is the hill shown in Fig. 4.8.

Table 4.1. Comparison between thrust displacement values according to the kinematical (FPF) and geometric (LLU) restorations. Desp.: displacement; λ : angular shear. Initial and final position of models (X0 and Xf) are measured taken the pin line at the Buntsandstein's hangingwall cutoff by the Erta thrust as reference 0, with positive values to the right. Value "Erta B" is a necessary operation to model the kinematical restoration in two parts, and corresponds to the deformation produced by the Erta thrust on the Gotarta-La Costera group.

Fig. 4.13. A. Cross-section of the Coll de Fades transect cinematically balanced with the FPF algorithm (cross-section 3B in Fig. 4.5). B. Kinematical restoration. Colour key in Fig. 4.4.

Table 4.2. Comparison between thickness values from the LLU and FPF restorations. Some of the distances refer to the base of the Buntsandstein.

Fig. 4.14. Forward modelling of the St. Quiri backthrust system in the Coll de Fades transect. A. Initial stage, after emplacement of the Erta and Orri thrust sheets. B. Activity of R1. C. Activity of R2. D. Activity of R3. All backthrusts root in the Erta thrust, with a 25° to 30° step-up angle that is responsible for thinning of the Buntsandstein. Note how the angular shear associated to each backthrust successively distorts the geometry of its relative hangingwall.

Fig. 4.15. Superposition of the FPF (black) and LLU (red) restorations. The main differences between the two lie on the depth of the Buntsandstein of the Gotarta thrust sheet and the thickness of the Buntsandstein of the Erta thrust sheet, which alter the deep geometry of the Gotarta – La Costera thrust system. In spite of this, similarities are sufficient to validate the structural interpretation of this transect.

Fig. 4.16. Panoramic view of the Erta thrust sheet from Tossal de Tous. In the foreground is the base of the Buntsandstein of the Gotarta thrust sheet; in middle ground is the Coll de Fades transect, and in the background appears the Malpàs

transect. D1: Rueda and Baciver fms.; D2: Fontjanina, Manyanet and Civis fms.; EC: Erill Castell fm.; MP: Malpàs fm.; PN: Peranera fm.; Tb: Buntsandstein; Tk: Keuper; λ : ophite. Length of crest in the middle ground is 3.5 km.

Fig. 4.17. Geological map of the Erta thrust sheet at the Noguera the Tor valley (modified after Mey, 1968). The dashed line indicates the trace of the Igüerri thrust east of Roca Escura and two alternative interpretations (A and B) for the western continuation of the Erta thrust.

Fig. 4.18. 3D visualization of the Erta thrust sheet (orange) and the basal thrust of the Gotarta – la Costera system (blue). A. Isometric visualization from a point of view in the south (X = south; Z = east). B, C and D: Successive sections along a N-S vertical plane. Green: Igüerri thrust; Dark red: top of Buntsandstein in the Erta thrust sheet. (see chapter 5.5).

Fig. 4.19. 3D visualization of the Gotarta – La Costera thrust system. A. Isometric visualization from a point of view in the SE (X = east; Z = south). B, C and D: Successive sections along a N-S vertical plane. Blue: basal thrust of the Gotarta – la Costera system; Green: Gotarta thrust; Yellow: base of Stephano-Permian; Dark red: base of Buntsandstein. The internal thrusts of la Costera thrust sheet are not represented.

Fig. 4.20. Geological map of the eastern sector –part E (St. Quiri backthrust system and Sta. Bàrbara – Erdo stack). Colour key in Fig. 4.4.

Fig. 4.21. Geologic cross-section of the Manyanet transect, restored by LLU (cross-section line 4 in Fig. 4.20).

Fig. 4.22. View of the Manyanet transect from the south. On the background are the Axial Zone mountains, dominated by Devonian rocks. More to the south appear the Erta thrust sheet with the Erill Castell basin deformed by bedding-parallel backthrusts. Over the Buntsandstein of the Erta thrust sheet lays the Castellgermà thrust sheet of the Nogueres zone, in fault contact with the Jurassic of the USC. Red arrow indicates the point where Triassic lies directly on hercynian basement. D: Devonian; EP: Stephano-Permian; Tb: Buntsandstein; Tk: Keuper; J: Jurassic.

Fig. 4.23. Sketch showing the Erta thrust surface in figure 4.21, including the parts reactivated as backthrusts.

Fig. 4.24. A. Image of the Viu tectonic window, showing an anticline defined by lower Cretaceous carbonates cut by a horizontal fault surface over the Keuper (lowlands in the foreground). B. View to the SE of Xerallo showing the Jurassic of the USC (left) overthrusting conglomerates of the Sarroca group.

Fig. 4.25. Geologic cross-section of the Sta. Bàrbara transect, restored by LLU (cross-section line 5 in Fig. 4.20).

Fig. 4.26. Field image of the Sta. Bàrbara thrust sheet. A. View of the eastern part of the thrust sheet from the Sta. Bàrbara peak (Pui de Far). B. Structural interpretation. The basal thrust of the sheet can be found to the north of the photograph. D1: Baciver fm.; D2: Fontjanina fm.; EP: Erill Castell fm.; Tb: Buntsandstein; Tk: Keuper. Stripes indicate the areas where the topographic slope coincides with the overturned base of the Buntsandstein.

Table 4.3. Comparison between thrust displacement values according to the kinematical (FPF) and geometric (LLU) restorations. Desp.: displacement; λ : angular shear. Initial and final position of models (X0 and Xf) are measured taken the pin line at the Buntsandstein's hangingwall cutoff by the Erta thrust as reference 0, with positive values to the right. Values of Erta and H2 in the kinematical restoration are underestimated (see text).

Fig. 4.27. Geologic cross-section of the Sta. Bàrbara transect, cinematically restored (cross-section line 5 in Fig. 4.20).

Fig. 4.28. Reproduction of cross-section 5 without the tertiary conglomerates.

Fig. 4.29. Superposition of the present-day sections (A) and the LLU and FPF restorations (B). Red: LLU restoration; Black: FPF restoration. Thinning experienced by the Buntsandstein in the kinematical restoration results in a decrease of the length of the basin in the restoration.

Fig. 4.30. 3D visualization of the Erta thrust sheet and the Les Iglésies thrust. A. Isometric visualization from a SW point of view (X = north; Z = east). B and C. Successive sections along a N-S vertical plane. Green: Erta thrust; Blue: Les Iglésies thrust; Gray: St. Quiri backthrusts; Yellow: base of Erill Castell basin; Pink: base of Buntsandstein. Note how the Les Iglésies thrust mimics the ramp anticline of the Erta thrust sheet. This figure has been completed with profiles III and V of Saura (2000).

Fig. 4.31. Longitudinal sections between the Costera and Flamicell areas, showing a frontal view of the structure before the emplacement of the Orri and Rialp thrust sheets (backthrusts not represented). The thickness of the Erta thrust sheet is related to the Erill Castell basin, which shows an eastern migration of the depocenters (modified after Saura, 2000).

Fig. 4.32. 3D visualization from a SE point of view of the lateral branchment between the Erdo lower thrust and the Les Iglésies thrust. Surfaces constructed with GOCAD.

Fig. 4.33. 3D visualization from a SE point of view of the Nogueres thrust sheets west of Fig. 4.32 (X = north; Z = east). Blue: Les Iglésies thrust; yellow: Erdo lower thrust; pink: Erdo upper thrust; grey: Castellgermà thrust; green: accommodation cross-fault.

Fig. 4.34. Panoramic view of Coll de Sas, between the Manyanet and la Costera transects. B. Structural interpretation. Blue: basal la Costera thrust; red: St. Quiri backthrusts. C. Photograph of the Coll de Sas from the St. Quiri peak. D. Structural interpretation. Backthrusts are the same as in Fig. 3.29 B. Note footwall ramps when crossing the Buntsandstein.

Fig. 4.35. Restoration by FSU of the Erta thrust sheet in two unfolding cycles. The first cycle does not adequately restore the stephano-permian sequence, whereas the second cycle does it in a satisfactory way.

Fig. 4.36. A, B and C. Photographs of models 1, 2 and 3 after 35% shortening. D, E and F. Structural interpretation of the photographs. Gray layer in F is made of glass microbeads. Numbers of forethrusts indicate the activity order. Backthrusts are indicated by an R followed by a number indicating the forethrust to which they are associated. G, H and I. Diagrams showing the activity time of each thrust by records of the horizontal slip. Blue lines: forethrusts; red lines: backthrusts. Violet line in diagram I is a forethrust that experienced an evolution different from the rest (see text for explanation).

Table 4.4. Analogue model specifications. CM: mechanical contrasts (glass microbeads layers); Long.: length; Incl.: dip. Compaction values correspond to the unconformity.

Table 4.5. Listing of the active thrusts in each of the deformation stages of the analogue models. Some structures are active during more than one stage, but are represented only in the main ones (with the exception of R1 in all models and thrust 4 in model 3 –see text for explanation).

Fig. 4.37. Detail of model 1 showing a backthrust R7 gliding along a marker bed.

Fig. 4.38. Detail of model 2 showing forethrust 5 and two associated backthrusts (R5A and R5B). R5B changes in orientation when crossing the unconformity, becoming parallel to it.

Fig. 4.39. Detail of two structurally equivalent sections of model 3 (same scale). A. Detail of section in Fig. 4.36 C. All thrusts except number 4 dip homogeneously from base to top of the model. The step-up of thrust 6 is just at the basal onlap of the glass microbeads layer. Thrust 4 forms a hangingwall flat on the unconformity at the upper truncation of the microbeads layer. Backthrust R6B keeps a constant dip of 35°. B. Detail of a section cut some 4 cm to the right of the previous one (viewing from the frontal wall). Structures can be easily projected between the two sections, and are indicated in italics. GM: glass microbeads; fk5: basal forekinks of thrust 5. Thrust 6 steps-up in the same position as in Fig. A. The hangingwall flat of thrust 4 on the unconformity is better defined, as it has more displacement and was not cut by R6B. The alignment of hinges of fk5 is used as a gliding plane by R6B, and for this reason this fault shows a greater dip (50°).

Fig. 4.40. Bed-length restoration of the Erta thrust sheet (A, B and C) and of the sandbox models, corrected for horizontal compaction according to values in table 4.4. In the Sta. Bàrbara transect (H) R1 is the only thrust that is not parallel to bedding.

Table 4.6. Ratio (Rel.1 and Rel.R2) between the displacement of backthrusts in Fig. 4.40 and their passive transport during the activity times.

Fig. 4.41. Key to map and cross-sections of the central sector of the Nogueres Zone.

Fig. 4.42. A. Structural units of the central sector of the Nogueres Zone. Dashed lines indicate zones represented in Figs. 4.42 B and C. B. Detail of the Castells unit in the Taús area. C. Geological map of the Noguera Pallaresa valley (colour key in Fig. 4.41).

Fig. 4.43. A. Geometrically balanced cross-section of the Cogulló transect. B. Section restoration (colour key in Fig. 4.41).

Fig. 4.44. Panoramic view of the southern margin of the Senterada basin at the Cogulló transect. Note bed fanning in the conglomerates of the Senterada group.

Table 4.8. Comparison between thrust displacement values according to the kinematical (FPF) and geometric (LLU) restorations. Desp.: displacement; λ : angular shear. Initial and final position of models (X0 and Xf) are measured taken the pin line at the Buntsandstein's hangingwall cutoff by the Orri thrust as reference 0, with positive values to the right. Value "Rialp B" results from an operation necessary to tilt the Orri thrust.

Fig. 4.45. Cinematically balanced cross-section of the Cogulló transect. B. Section restoration (colour key in Fig. 4.41).

Fig. 4.46. Superposition of the geometrically (red) and cinematically (black) balanced sections.

Fig. 4.47. Geological map of the eastern boundary of the Senterada basin, corresponding to the area shown in Fig. 4.44. In the central part, the tertiary conglomerates lie on the Castells thrust sheet, whose lateral continuation beneath the conglomeratic cover admits to alternative interpretations (blue and red lines).

Fig. 4.48. Geologic cross-sections of the Noguera Pallaresa valley (colour key in Fig. 4.41).

Fig. 4.49. Alternative interpretation of the relationship between the Erta thrust sheet and the Nogueres thrust sheets assuming that the northern boundary of the former is a lateral ramp, obliquely crossed by the section.

Fig. 4.50. Geological map of the southern part of the Rialp tectonic window. I-I' to III-III': lateral sections of Fig. 4.52.

Fig. 4.51. Longitudinal sections illustrating the structure of the eastern boundary of the Erta thrust sheet before its emplacement (A) and before the emplacement of the Orri thrust sheet (B). Hence, section A corresponds to a more northern position than section B. West of the Malmercat fault, section B is located ahead of the branch point of the Orri and Erta thrust.

Fig. 4.52. Longitudinal sections of the Rialp window considering that A) all the Keuper cropping out in the window corresponds to the Rialp thrust sheet, and B) part of the Keuper belongs to the Orri thrust sheet. Section III-III' is compatible with the two hypotheses as it is located more to the south (see location of sections in Fig. 4.50).

Fig. 4.53. 3D visualization of the structural geometry around the southern boundary of the Rialp window, showing the lateral branch lines of the Orri, Erta and España-Arcalís thrusts. Gray: base of the Estac basin; blue: Estac fault; brown and pink: base and top of Buntsandstein. Compare with Fig. 4.52.

Fig. 4.54. Longitudinal cross-section of the Castells thrust sheet in the Gerri area (section 9, Fig. 4.42A). Dashed lines indicate the sections along the Noguera Pallaresa valley (colour key in Fig. 4.41). Folded thrust at Useu is of hercynian age.

Fig. 4.55. A. Geometrically balanced cross-section of the Taús transect. B. Section restoration (colour key in Fig. 4.41).

Fig. 4.56. Field photograph of the Nogueres s.l. thrust in the port del Cantó area, showing it as a hangingwall flat over the Buntsandstein of the Orri thrust sheet. Field of view is approximately 1 km.

Fig. 4.57. Geometrically balanced cross-section of the Trejuvell transect. B. Section restoration (colour key in Fig. 4.41).

Fig. 4.58. Panoramic view of the Trejuvell transect (A) and corresponding structural interpretation (B). This figure also shows the trailing branchment between the Freixe and Arcalís-España thrusts, and the change in structural style between the western (figures 4.7, 4.12, 4.16, 4.22, 4.26 and 4.34) and central sectors of the Nogueres zone. CO: Cambro-ordovician; Dci: Undifferentiated Paleozoic of the Comte subfacies. EP: Stephano-permian; Tb: Buntsandstein; Tk: Keuper and Muschelkalk; J.C: Jurassic and lower Cretaceous. AE: Arcalís-España thrust sheet.

Fig. 4.59. 3D visualization of the Nogueres thrusts in the central sector. A. 3D view of the Arcalís – España and Escós thrusts (light brown), and the Freixe thrust (red) south of the trailing branch line and of the Malmercat fault. Point of view from the SE. In purple is indicated the base of the Triassic of the Freixe thrust sheet (internal structure of the Arcalís – España thrust sheet not shown). B, C and D. Serial sections of Fig. A following a NE-SW vertical plane. C corresponds to the Noguera Pallaresa valley. E. View of the lower thrusts of the Nogueres zone together the Freixe and Castells thrusts from a point of view in the SW.

Fig. 4.60. A. Geological map of the Nogueres zone east of Segre valley. B. Colour key to maps and cross-sections. C. Sketch map indicating the main structural units. MT: Montsec de Tost; LB: La Bastida klippe; LR: Raubet thrust sheet; FM: Montant tectonic window; FS: Sorribes window.

Fig. 4.61. Geometrically balanced cross-section of the Castellar de Tost transect. B. Restoration of the Orri thrust sheet. Dashed lines indicate the trace of present-day topography. The shortcut of the Orri thrust has been drawn by joining the FSU restoration of the Buntsandstein's cutoff and the Gramós fault, which has been unfolded in two steps.

Fig. 4.62. Field image of a footwall syncline of an internal thrust of the Hostalets –Adraén duplex, constituted by Triassic rocks.

Fig. 4.63. Geometrically balanced cross-section of the Torà de Tost transect. B. Restoration of the Orri thrust sheet. Dashed lines indicate the trace of present-day topography (see colour key in Fig. 4.60).

Fig. 4.64. Aspect of the Colldarnat fault, which defines the boundary between the Montsec de Tost thrust sheet and the USC. J: Jurassic; C: lower Cretaceous; DCi: Devonian. Ridge in the background is some 2.5 km long.

Fig. 4.65. Geometrically balanced cross-section of the Banyeres transect. B. Restoration of the Orri and Banyeres thrust sheets. Irregular trace of upper Cretaceous and Paleocene beds is an artefact caused by the restoration algorithm. However, undulations of Eocene beds are tectonic in origin. Dashed lines indicate the trace of present-day topography (see colour key in Fig. 4.60).

Fig. 4.66. Alternative cross-section through the Banyeres and Cadí thrust sheets, showing a void between the Orri and Cadí thrusts that would result if an additional thrust slice as that of Fig. 4.65 is not introduced.

Fig. 4.67. Geological map of the La Seu neogene graben after Hartvelt (1970), Roca (1991), and own data (colour key in Fig. 4.60).

Fig. 4.68. A. Geological map of the Cerc graben. B. Sketch map showing the main structures. C. Cross-section across the graben (colour key in Fig. 4.60).

Fig. 4.69. Forward modelling of the La Seu graben using the Inclined Shear algorithm of 2DMove. Location of section in Fig. 4.67, colour key in Fig. 4.60.

Fig. 4.70. 3D visualization of the Orri thrust sheet between the Noguera Pallaresa valley and the Banyeres transect, from a point of view in the SE (X = N). Note how the ramp anticline is deformed by E-W folds associated to the Rialp thrust. N-S folds and stephano-permian faults have not been drawn. B and C. Serial sections following a N-S vertical plane. D. Palinspastic reconstruction of the Erill Castell, Estac and Gramós - Prats d'Aguiló stephano-permian basins. Red: Orri thrust; Green: Gramós fault; Yellow: base of Gramós - Prats d'Aguiló basin; Pink: base of Buntsandstein; Light blue: post-hercynian unconformity in the hangingwall of stephano-permian faults; Light blue: post-hercynian unconformity in the footwall of stephano-permian faults.

Fig. 4.71. A. Photograph of the Lavansa valley from the Montant de Tost - Sorribes road. Structural interpretation. C. Close-up of the upper Montsec de Tost thrust, showing the Devonian Rueda fm. overriding triassic shales, in an overturned position. D. E-W geologic cross-section of the Montsec de Tost (see location in Fig. 4.60). D: Devonian; Tb: Buntsandstein; Tk: Keuper and Muschelkalk; J+C: Jurassic and lower Cretaceous; Cs: upper Cretaceous; G: Garumnian

facies; E: Alveolina limestone fm.; M: Montsec de Tost thrust; MI: Montsec de Tost lower thrust; MS: Montsec de Tost upper thrust; B: Banyeres thrust; FP: Pujals tectonic window; R: backthrust; USC: Central Southpyrenean Unit.

Fig. 4.72. Forward modelling of the Montsec de Tost thrust sheet. In the initial stage (A), the differential thickness of the Buntsandstein is associated to a south-dipping normal fault. During a first deformation stage (B), the entire thrust sheet is transported to the south. In a later stage (C), the triassic fault is rotated to become a preferential thrust slip plane. Slip from the rear is transmitted to the upper Montsec de Tost thrust.

Fig. 4.73. Field photographs of the boundary between the Nogueres zone and the Serra Faiada thrust sheet. A. Serra Faiada thrust in the southern limb of the Bellera anticline, south of Xerallo. B. Basal unconformity of the Senterada tertiary basin in the Cadolla valley, between Senterada and Sarroca de Bellera. Tertiary beds are tilted in the northern limb of the Bellera anticline. C. Panoramic view of the Senterada basin north of the Bòssia valley. Note bed fanning in the lower part of the succession. D. High angle thrust cutting the USC and the tertiary conglomerates in a locality between Xerallo and Sarroca de Bellera. E. Sarroca group conglomerates south of Perves. Beds are affected by a penetrative system of south-dipping fault planes. F. Close-up of one of the fault planes, containing slickensides indicating reverse slip. Tk: Keuper; J+C: Jurassic and lower Cretaceous.

Fig. 4.74. A. Geological map of the Sarroca - Perves area. B and C. Cross-sections (modified after Saura, 2000). More illustration of the structure of the tertiary conglomerates can be found in the cross-sections presented in Plate 1 (annex).

Fig. 4.75. Synthetic cartoon showing the late tecto-sedimentary evolution of the Manyanet transect, with emphasis on the evolution of tertiary sedimentation. (modified after Saura and Teixell, 2000).

Fig. 4.76. Geological map of the northern margin of La Pobla basin and the southern margin of the Senterada basin in the Flamicell valley (colour key in Plate 1).

Fig. 4.77. Cross-sections of the transition between the La Pobla and Senterada basins (see location in Fig. 4.76). A. Cross-section at Cérvoles, in the western margin of the Flamicell valley. B. Cross-section at Roc de St. Aventí, in the eastern margin of the Flamicell valley. C. Cross-section at Peracalç, featuring a flexural slip unfolding of the Peracalç syncline revealing possible Aptian age normal faults.

Fig. 4.78. Lluçà backthrust in the Flamicell valley. Indicated in white are tensional gashes consistent with reverse slip.

Fig. 4.79. Synthetic tecto-sedimentary evolution of the transition zone between the La Pobla and Senterada basins.

Fig. 4.80. Field photograph of the Colldarnat fault showing slickensides indicating dextral and reverse slip.

Fig. 4.81. Sketch of the northern margin of the Central Southpyrenean Unit (USC) in the Castellar de Tost transect. B. Flexural slip unfolding with 2DMove.

Fig. 4.82. Initial stage and post-Nogueres stage. Main valleys are indicated. Graphic scale is the same for all figures. A.- Initial configuration from a SW viewpoint. N-S distance between basins is the minimum necessary to generate geometries similar to the field study case. G.- Gotarta basin; SB.- Sta. Bàrbara basin; AE.- d'Arcalís - España basin. Dark red.- unconformity between Hercynian and Buntsandstein; orange.- unconformity between Hercynian and Stephano-Permian B - I.- Nogueres thrust sheets. Brown.- footwall Buntsandstein of the Nogueres *s.l.* thrust; dark red.- Buntsandstein of the Nogueres thrust sheets; Golden to yellow colours.- Nogueres zone thrusts; red.- Serra Cavallera thrust.

Fig. 4.83.- Post-Erta and Orri stage. Main valleys are indicated. Graphic scale is the same for all figures. A.- Initial configuration from a SW viewpoint. Blue.- Orri thrust; green.- Erta thrust; Yellow to golden colours.- Nogueres thrust sheet thrusts; red.- Serra Cavallera thrust; Dark red.- Buntsandstein top. A.- Orri thrust sheet. B.- Erta thrust sheet. C.- Orri and Erta thrust-sheets. D- I.- Nogueres zone thrust sheets from a SE viewpoint.

Fig. 4.84.- Post-Rialp stage. Main valleys are indicated. Graphic scale is the same for all figures. A.- Initial configuration from a SW viewpoint. Blue.- Orri thrust; green.- Erta thrust; Yellow to golden colours.- Nogueres thrust sheet thrusts; red.- Serra Cavallera thrust; Dark red.- Buntsandstein top; purple.- Morreres backthrust. A.- Orri thrust sheet. B.- Erta thrust sheet. C.- Orri and Erta thrust-sheets. D- I.- Nogueres zone thrust sheets from a SE viewpoint.

Fig. 5.1. Sections used to evaluate the restoration and modelling algorithms; the fault activity order is indicated. A and B. Sandbox models; GM: glass microbeads; S: sand. C. Cross-section of the Nogueres Zone; fault 1 is the Erta thrust; the Orri thrust is labelled as fault 4 in the Coll de Fades and Manyanet sections, and as fault 5 in the Sta. Barbara section. Same scale in all the cases. D. Cross-section of the Aragüés imbricate system in the E slopes of the Osia valley (Teixell and Koyi, 2003); the position of this system with respect to the Gavarnie thrust is also shown (after Teixell, 1992).

Table 5.1. Initial configuration of model UncmfmyMdl5. The thickness of the lower part is 1.5 cm, and that of the upper part is 1 cm.

Fig. 5.2. Graph illustrating the thrust sequence of model UncmfmyMdl5, by plotting the activity time of each thrust. Thrusts are represented in blue, backthrusts in red, and the purple corresponds to thrust 4 in Fig. 5.1.A. Vertical lines separate three main deformation stages.

Fig. 5.3. Close-up view of section Mdl5prflA04 showing thrust 4 forming a hangingwall flat corresponding to a footwall ramp, as a result of a combination of a lithologic contrast and differential orientation of the original marker beds. A glass microbeads layer is indicated in grey.

Fig. 5.4. Close-up view of section Mdl5prflA04 showing a triangular-shaped heterogeneous deformation zone (ZDH) (orange), bounded by the basal thrust (EB) and by thrusts 5a and 5b, which merge upsection into a single thrust. The glass microbeads layer is indicated in grey.

Table 5.2. Parameters of the target restoration (see text) after 14.25% shortening.

Table 5.3. Distribution of deformation in model B. NGM: glass microbeads layers; NS: sand layers; Esc.: shortening. For modelling requirements a minimum slip value had to be considered for forekink6.

Table 5.4. Distribution of deformation in the Aragüés section.

Table 5.5. Summary of field data from the Aragüés thrust system, that form the basis for restoration and modelling shown in figure 5.1D (modified from Teixell and Koyi, 2003). Enc.: thrust; BS: hangingwall; BI: footwall.

Fig. 5.5. Restoration in parts of section Mdl5prflA04 with the Line Length Unfolding algorithm.

Fig. 5.6. Close-up of the rear of model Mdl5prflA04. Indicated in darker colour is the ZDH related with the advancing rearwall. Note that as we go upsection, a large proportion of the marker levels is affected by this heterogeneous deformation zone. Also indicated are the points (a,b) of possible overestimation of the unconformity's length.

Fig. 5.7. Examples of non-quantifiable deformation. 1: Hinge thickening in an isoclinal fold. 2: Tight fold arising from the frictional contrast between sand and the basal plate. 3: Tight fold arising from the frictional contrast between sand and glass microbeads. 4: Slip of a marker over itself. 5: Superposition of hinge thickening and slip. 6: Thickness increase induced by overburden in the glass microbeads layer.

Fig. 5.8. Restoration of section D using LLU. Grey-shaded areas in the restored section correspond to hangingwall flats that do not have a footwall counterpart in the deformed section (i.e., Koyi and Teixell, 1999). To restore them I have measured the length of the flats and the excess area of the detachment layer (orange). The area-restored layer is indicated in yellow. Even though the total shortening of layers NGM2, NS1 and NS2 acquired by folding and imbrication is the same, the distribution of the two mechanisms varies according to the nature of the layer.

Fig. 5.9. Restoration in parts of section Mdl5prflA04 with the Flexural Slip Unfolding algorithm.

Fig. 5.10. Comparison between the FSU restoration to a horizontal target of: A) a flexural fold without rotation, and B) a flexural fold with rotation. In A thickness is always conserved (irrespective of the choice of a vertical pin or a pin parallel to the axial plane), whereas in B, a pin perpendicular to bedding causes thinning. Bed lengths are constant in both cases.

Fig. 5.11. Problems arising from the pin crossing a reference surface more than once. A. Fragment of section Mdl5prflA04; B and C: Problems in using FSU; green arrows represent the flow directions in a normal case, and the black ones those associated to a double intersection, that creates an angular problem as well; D and E: Possible solutions. In this case D is preferred, because, as seen in E, the overturned limb of the reference surface is the source of the problem.

Fig. 5.12. Summary of the different sorts of anomalies in the restoration using FSU. NGM: glass microbeads layer.

Fig. 5.13. Restoration of section B by FSU using diverse pins and targets. Note that the angular shear (λ) varies depending on the relationships between these two elements. The unfolding of the glass microbeads layers brings along the generation of zones of area increase (orange) and of area decrease (grey), with respect to hypothetical upper and lower bounding surfaces that eventually will be used to area restore the section.

Table 5.6. Values used in area balancing the restorations of Fig. 5.13.

Fig. 5.14. Problems associated to the use of reference surfaces with inverted limbs. Due to the double vergence of structures in all the markers, there is no alternative solution.

Fig. 5.15. Restoration in parts of section Mdl5prflA04 with the Simple Shear Unfolding algorithm.

Fig. 5.16. A. Restoration of a heterogeneously deformed block: comparison of the results of SSU restoration using a horizontal target (top) and an inclined target (bottom). The second case requires the restoration to be performed in two steps, what causes a verticalization of the fault surfaces and a marked bed thickening. B. Illustration of an anomaly related to an angular zone.

Fig. 5.17. Close-up of the central part of the section Mdl5prflA04 restored by SSU, indicating some of the anomalies typical of this algorithm.

Fig. 5.18. Final restoration of section Mdl5prflA04. A. Deformed section. B. Target restoration. C. Restoration with LLU, showing a void in the rear part of the model. D. Restoration taking into account the corrections described in the text. The ZDH at the base of thrust 5 is only partially restored (green).

Fig. 5.19. Proposed restoration for section B. Each glass microbeads layer has thickened homogeneously by 11.8%. The penetrative shortening for the entire model is 9,87%.

Fig. 5.20. Process of restoration by Line Length Unfolding of the Coll de Fades cross-section.

Fig. 5.21. Comparison of LLU restorations of cross-sections from Manyanet (A), Sta. Bàrbara (B) and Aragüés (C), with those of Saura (2000) and Teixell and Koyi (2003). In the cross-sections of the Nogueres Zone, fault surfaces are indicated in blue, and beds in black. In the Aragüés section faults are in red, bedding surfaces in blue and violet, and black lines in the restored section correspond to segments not represented in the actual cross-section.

Fig. 5.22. Restoration of the Sta. Bàrbara section by LLU using two pins, and comparison with other results. A. Example of the restoration steps in part of the section. B. LLU restoration using two pins. C. Initial restoration (Saura, 2000). D. Restoration by LLU with a single pin. Thin lines represent bedding, and thick ones represent fault surfaces.

Fig. 5.23. Restoration of the Coll de Fades section by FSU, illustrated with Erta thrust slice in 3, 4 and 5.

Fig. 5.24. Restoration of the Coll de Fades section by FSU, showing the zones of excess area and of area deficit (grey), the angular shear (λ), and the Buntsandstein's fold envelope and Erta thrust (dashed lines).

Fig. 5.25. Cycles of restoration by FSU of the Manyanet and Sta. Bàrbara sections. In the Sta. Bàrbara section, the parallelism between base and top of the Buntsandstein makes a third restoration cycle unnecessary.

Fig. 5.26. Illustration of problems related to the use of short templates. In this case FSU algorithm projects the marker without any geometric constraint, and hence non realistic geometries arise.

Fig. 5.27. Restoration of the Aragüés cross-section using different reference surfaces, either without unfolding the Bernera syncline (B, D) and unfolding it (C, D). A horizontal target and a pin parallel to the axial plane have been used in all cases.

Fig. 5.28. Fault-over-fault reconstruction of the Aragüés cross-section. A: Restoration by parts with FSU, without unfolding the Bernera syncline. B. Restoration in two unfolding cycles. In the first (Bernera syncline), the basal thrust of the system is restored to a horizontal target (datum), using a pin parallel to the fold's axial plane. In the second, each of the thrust slices is restored by FSU. Dashed lines indicate the regional elevation of the base of the Tertiary.

Fig. 5.29. Restoration of the Coll de Fades cross-section by Simple Shear Unfolding (SSU). The third step is illustrated only with part of the section, but the process is the same everywhere.

Fig. 5.30. Restoration of the Manyanet and Sta. Bàrbara sections by SSU (right) and comparison with the initial sections (left). The results are similar to those obtained with the first cycle of FSU (Fig. 5.26), even though the pattern of voids and overlaps varies slightly.

Fig. 5.31. Restoration of the Aragüés section by SSU using different targets and reference surfaces. In series A I have used pins perpendicular to bedding and to the target, while in series B I have used a pin parallel to the axial plane of the Bernera fold and perpendicular to the target (first phase), followed by a vertical pin in the second phase. C. Comparison of the restoration of the Bernera syncline by FSU and LLU.

Fig. 5.32. Superposition of the reconstruction of all the field sections using the different algorithms. In the reconstructions of the Aragüés section by FSU and SSU, I show the restoration in two phases, using the base of the Tertiary as a reference surface.

Table 5.7. Summary of restored lengths (l), depth to flat-ramp hinges ($Prof.$) and variation with respect to the target restoration. $\div l$. length increase; $\div P$. depth increase.

Fig. 5.33. Corrected restorations of all the field sections analyzed in this chapter. Fig. D contains a correction on the present-day Aragüés cross-section of Teixell and Koyi (1993), consisting on adding a detachment between Cretaceous and Tertiary rocks of thrust sheet 4. This modification implies a change in the numeration of thrusts of Fig. 5.1.

Fig. 5.34. Process of correction of the initial section from Sta. Bàrbara. A. Parts used to correct the section; R2: backthrust 2; R3: backthrust 3. B. Arrows indicate zones to be corrected. C. Forward application of the FSU algorithm to fold the corrected parts. Dashed lines represent the target surfaces. For the fragments of the Erta slice, the target is the reference surfaces used in the initial restoration (A), whereas for the Orri unit the target is the new trace of the Erta thrust. D. When merging the parts, a correction of the hangingwall of R2 above the base of Keuper has been necessary. E. The restoration of the new section by FSU yields better results than the initial section (Fig. 5.26), and validates the corrections.

Table 5.8. Parameters used in the FPF modelling of zones Z1, Z3 and Z5 of Fig. 5.35. Fault displacement is equal in all the models. Heave for Z3 is different in each model, like $\div h$ (difference between initial and final elevation of a point).

Fig. 5.37. Sketch showing the angles referred to in text. ζ : ramp angle with respect to the horizontal; π : angular shear with respect to the horizontal; ϖ and χ are angles between markers and the fault, and hence they refer to flats in Z1, Z3 and Z5, and to ramps in Z2 and Z4.

Fig. 5.38. Sketch showing the deformation of a unit cell in zones Z2 and Z4 from each FPF model. The undeformed cell is shown in black, in blue is the result of a shear parallel to the initial fault, in yellow the result of rotating the sheared cell, in red the finite deformation calculated numerically, and in violet the finite deformation observed in Fig. 5.35. The reference elements used to calculate the deformation tensor are shown in A. F_0 : initial fault; F_F : final fault; ζ : ramp angle; π : initial angular shear; π' : angular shear associated to the ramp hinge.

Fig. 5.39. Thickness variation in Z4 in function of the initial orientation of bedding with respect to the fault. Model B π : 30 degrees; model C π : 0 degrees; model D π : 30 degrees.

Fig. 5.40. Parameters needed to calculate the relationship between total displacement (D) and horizontal displacement (H). D1 and D3 are function of the initial position of P_i with respect to 1A, and D2 is function of P_i , $\pm h$ and ζ .

Fig. 5.41. Sketch showing the deformation of a unit cell in zones Z2 and Z4 from each Inclined Shear (IS) model. The initial cell is shown in black, in yellow the result of applying the tensor (11), and in violet the deformation observed empirically in Fig. 5.35. In A and D, the reference elements used to calculate the deformation tensor are indicated. F_0 : initial fault; F_f : final fault; ζ] ramp angle; ϑ] angular shear; λ] shear direction. G. Schematic representation of the IS algorithm and of the main structural elements.

Fig. 5.42. Evolution of the final ramp angles (ϑ') in function of the initial angles (ϑ) for different values of λ and a footwall ramp angle of 30° . Grey: model E; pink: model F; yellow: model G.

Fig. 5.43. Ratio between the initial and final thickness (t_f/t_i , %) of beds crossing lines LA (Z2) and LB (Z3), as a function of the parameters of the IS models. A. Effect of ramp angles on thickness variation of originally horizontal layers from Z2 for different values of λ . B. Thickness variation in Z4 as a function of the initial orientation of beds, for different values of λ .

Fig. 5.44. Sketch showing the geometric elements defining deformation by IS. The area between F_0 and F_h corresponds to the portion of the hangingwall to be translated a distance \bar{t}_h' , and consequently $\pm h = a' \bar{N}_0$ and $H = H_i - b'$. In the remainder of the hangingwall, $H = H_i$, and $\pm h = 0$.

Table 5.9. Summary of data in Fig. 5.45. Models B, C, D and F have been produced with the FPF algorithm, and models D and G with the IS algorithm. Desp.: displacement of each thrust slice; π : angular shear (FPF); λ : shear angle (IS); l.: length of the top; A.: sectional area; X.: length of the thrust system; h.: height of the thrust system (structural relief).

Fig. 5.45. Forward modelling of thrust systems. A: Initial model; numbers indicate the emplacement sequence. B, C, E and F: Modelling with Fault Parallel Flow. D and G: Modelling with Inclined Shear. H: Distribution of deformation zones in an imbricate system created with 2DMove using FPF and IS. I: Distribution of deformation in dip domains within an imbricate thrust system formed by flexural shear (after Suppe, 1983b).

Fig. 5.46. Finite deformation in Z5 in a thrust system with $\pi = -30$. A. Bed length change as a function of the angle between bedding and fault. B. Final angles between bedding and fault as a function of the initial orientation of bedding. Numbers indicate the thrust stages corresponding to each curve. The cumulative angular shear for each curve is $\pi_1 = -30$, $\pi_2 = -49.1$, $\pi_3 = -60$, $\pi_4 = -66.6$, $\pi_5 = -70.9$, $\pi_6 = -73.9$, $\pi_7 = -76.1$.

Fig. 5.47. Imbricate systems with high degree of overthrusting deriving from the same initial situation (Fig. 5.45A). Small changes in displacement create large geometrical differences in the leading and trailing edge of the system. The dashed line separates Z4 and Z5 of thrust 7.

Fig. 5.48. Kinematical restoration (backward modelling) of section Mdl5PrflA04. A. Undeformed sand pack. B. Sand wedge. C. Corrected LLU restoration (see Fig. 5.18); shortening accommodated by compaction not restored. D. Restoration with FPF ($\pi = 0$). Displacement has been calculated using the Join Beds utility, and has been applied to either right-sided block, irrespective its hangingwall or footwall character. The irregularity at the model base is due to the fact that I did not use a horizontal decollement level, but the projection of the thrusts keeping their inclination. E. FSU unfolding of restored section D, using a vertical pin in the left end of the model, and the horizontal base of the succession as a reference surface. The two blocks attached to the advancing piston have been unfolded separately. F. restoration with IS ($\lambda = 0$), following the same procedure as in D. G. FSU unfolding of restored section F, using a vertical pin in the left end of the model, and the horizontal base of the succession as a reference surface. In all the models, the ZDH at the base of thrust 5 has been left undeformed, and the upper thrust that bounds this zone has been used as the gliding surface.

Fig. 5.49. Restoration by FPF of the deformed model (A) with the modified ZDH and inverted limbs. The FPF restoration (C) was performed with the same procedure as in Fig. 5.48; the FSU unfolding used a vertical pin in the left end of the model, and the horizontal base of the succession as a reference surface.

Fig. 5.50. Example of a kinematical restoration from the Lechtal nappe of the German Alps (after Tanner et al., 2003), showing problems in unfolding, bed thickness and fault traces. A. Field cross-section. B. Restoration by a combination of Flexural Slip Unfolding and Fault Parallel Flow.

Fig. 5.51. Restoration by FPF of Teixell and Koyi's (2003) model B. A. Deformed sand wedge. B. FPF restoration using the Join Beds utility, and N1 cutoffs. C. Same with N2 cutoffs. D. Same with N3 cutoffs. E. Same with N4 cutoffs. The flats at the top of the basal cushion of glass microbeads have been calculated using marker N4.

Fig 5.52. FSU unfolding of the kinematical restoration of Fig. 5.51 E, using: A. a vertical pin and N4 marker as a reference surface, and B. a pin parallel to the axial plane of the fault-propagation folds and the same reference surface.

Fig. 5.53. Restoration by FPF ($\pi \neq 30$ degrees) of model B using N4 and Join Beds. A. Continuous restoration. B. Restoration by parts.

Fig. 5.54. Forward modelling of Mdl5PrflA04 starting from the corrected LLU restoration (Fig. 5. 18). The dashed line in C marks the edge of the initial deformed section (A). The glass microbeads layer is indicated in grey.

Fig. 5.55. Forward modelling of model B (Fig. 5.1). A. Line drawing of sand model B (Teixell and Koyi, 2003) and modified LLU restoration (Fig. 5.1). B. Modelling with $\pi = 0$, using shortening values calculated for N2, and with a flat at the top of the succession. C. Modelling with $\pi = 0$, using shortening values calculated for N4, and with a flat at the top of the succession. D. Modelling with $\pi = 0$, using N2, and with a flat at the top of the succession (note difference from B). E. Modelling with $\pi = 0$, using N2, and extending the ramps towards the foreland. F. Modelling with $\pi = -5$, using shortening values calculated for N2, and with a flat at the top of the succession. G. Modelling with $\pi = -5$, using N4, and with a flat at the top of the succession. H. Modelling with $\pi = -5$, using N2, and with a flat at the top of the succession. I. Modelling with $\pi = -5$, using N2, and extending the ramps towards the foreland.

Table 5.10. Shortening data for base and top of models from Fig. 5.55 with respect to the initial size of the sand packs.

Table 5.11. Finite thickness variation of the Buntsandstein in the hangingwall of backthrust 3 in the Nogueres Zone models of Fig. 5.56. Pi: initial thickness (cf. Fig. 5.56 A); Pf: final thickness.

Fig. 5.56. Kinematical modelling tests of the Coll de Fades cross-section (Nogueres Zone). A. Starting point, corresponding to the corrected LLU restoration (Fig. 5.33); numbers indicate the modelling order of each fault. B. FPF modelling with zero angular shear. C. FPF modelling with $\pi = -10$ degrees. D. FPF modelling with $\pi = -20$ degrees. E. FPF modelling with $\pi = -30$ degrees. The graphic scale shown in A is the same for all the models.

Fig. 5.57. Forward modelling of the Coll de Fades transect. A. Field section; numbers indicate the activity order of each structure. B. Corrected LLU restoration (Fig. 5.33). C. FPF modelling of the Orri and Erta thrust slices (without the deformation associated to the Rialp thrust), with $\pi = -20$ degrees for the Erta (1) and Orri thrusts (2), and $\pi = 0$ for backthrusts 3 and 4. Numbers indicate the modelling order of each structure, and the scale is the same for all the models.

Fig. 5.58. Kinematical modelling of the Manyanet and Sta. Bàrbara sections. A. Field cross-section from Manyanet. B. Corrected LLU restoration of the section in A (cf. Fig. 5.33); numbers indicate the activity order of each structure. C. FPF modelling of the Manyanet section, with $\pi = -20$ degrees for the Erta and Orri thrusts, and $\pi = 0$ for backthrusts 3 and 4. Numbers indicate the modelling order of each structure. D. Field cross-section from Sta. Bàrbara; numbers indicate the activity order of each structure. F. FPF modelling of the Sta. Bàrbara section, with $\pi = -20$ degrees for the Erta and Orri thrusts, and $\pi = 0$ for backthrusts 3, 4 and 5. Numbers indicate the modelling order of each structure. Scale is the same for all figures.

Table 5.12. Comparison between parameters of field sections and FPF models of the Manyanet and Sta. Bàrbara transects (Fig. 5.58). Esc.: horizontal shortening; Relleu: vertical distance between the Orri thrust and the highest point of the Buntsandstein; Pmax.: maximum thickness of the Buntsandstein; Pmin.: minimum thickness of the Buntsandstein.

Fig. 5.59 (previous page). Flow diagram of the kinematical restoration of the Nogueres Zone cross-sections. ζ_n : ramp angle of thrust n; $\eta_n^\#$: bedding dip of thrust sheet n in the restoration; H_n : horizontal displacement of thrust n; π_n : angular shear associated to thrust n.

Fig. 5.60. First phase of the kinematical restoration of the Sta. Bàrbara section. Projection of field data and separation of the main structural units. Red: stratigraphic boundaries; blue: faults; green: dips; 1: Erta unit (Fig. 5.61); 2: Nogueres unit.

Fig. 5.61. Sketch of the kinematical restoration process of the Erta thrust slice in the Sta. Bàrbara section. A. Restoration of backthrusts; B. Restoration of the Erta thrust.

Fig. 5.62. A. Validated cross-section of the Sta. Bàrbara transect. B. Cross-section completed with structures and units not restored cinematically. C. Kinematical restoration. Colours of lithologic units are the same as in the geological map of plate 1 (in annex). In pale colour I indicate the part of the restored section that is above the present topographic surface.

Fig. 5.63. Forward modelling of the experimental sand wedge (each thrust slice modelled separately). The initial thickness of the models is obtained from the combined LLU+FSU restoration shown in Fig. 5.19. The order of thrusts is also shown in that figure. Esc.:shortening; ζ : ramp angle.

Fig. 5.64. Forelimb collapse of thrust 4 from model B. The discontinuous line bounds the unstable zone of the kinematical models, and the shaded area represents the accumulation zone of slumped material.

Fig. 5.65. Displacement along a flat of the fault-propagation fold associated to thrust 3 (Fig. 5.63). The part of the hangingwall beyond point A. would correspond to layer thickening in the analogue model. The parallelism shown by the axial planes indicates that this deformation does not impose strain in the hangingwall.

Fig. 5.66. Forward modelling of the sand wedge Model B of Teixell and Koyi (2003), combining the PPF algorithm of RampeEM and the FPF of 2DMove. A. Interpretation of the section. B. Restoration using Flexural Slip Unfolding and Line Length Unfolding. Numbers indicate the activity order of thrusts, and letters indicate which figure illustrates their respective activity. C, D, E, F, G and H. Diagrams showing the successive emplacement of each thrust unit. I. Comparison between the sand wedge and the results of kinematical modelling.

Fig. 5.67. Surface slope correction of the kinematical model. A. sand wedge. B. Corrected kinematical model. Ellipses indicate zones within the kinematical model that depart the most from the geometry of the sand wedge. C. Superposition of the results of the kinematical modelling (grey and white layers) and the analogue modelling (blue lines).