

5. VALORACIÓ DELS SISTEMES INFORMÀTICS
D'ANÀLISI ESTRUCTURAL A PARTIR D'EXEMPLES
EXPERIMENTALS I DE CAMP

Per a la construcció de les seccions en les que es basa l'anàlisi estructural del capítol anterior, s'ha utilitzat tant algorismes de restitució com de modelització cinemàtica, tot i que la seva aplicació en el context de la Zona de les Nogueres no és simple, i en molts casos cal aplicar correccions als resultats obtinguts pel programa.

En aquest apartat, es mostra la metodologia seguida per a l'elaboració de les seccions definitives, a partir de l'anàlisi sistemàtic de cada un dels mètodes de restitució. Amb aquest objectiu, s'ha restituït talls geològics de la Zona de les Nogueres i del sistema d'encavalcaments d'Aragüés (Pirineus aragonesos), i seccions de dos models de sorra desenvolupats en un dispositiu *sandbox*.

També es presenta el protocol de modelització cinemàtica 2D dissenyat a partir de l'anàlisi de cada un dels algorismes, utilitzant les mateixes seccions.

Com a objectiu final d'aquest estudi, es fa una valoració crítica de cada un dels mètodes, especificant-ne els avantatges i inconvenients, la seva aplicabilitat en diferents contextos tectònics, i se suggereixen possibles millores.

5.1 SECCIONS DE “CONTROL”

Els models de sorra Mdl5prflA04 (fig.5.1 A) i el Model B (Model 3 de Teixell i Koyi (2003) fig.5.1 B) s'han escollit perquè el fet de conèixer les seves geometries pre- i postdeformació i la seva cinemàtica els converteixen en un bon element de validació. Les seccions de la zona d'estudi utilitzades per a l'anàlisi dels algoritmes tant de restitució com de modelització cinemàtica del 2DMove, corresponen a talls geològics restituïts de Coll de Sas, Manyanet i Sta. Bàrbara (Saura, 2000), tot i que només s'utilitza la part corresponent a les làmines encavalcants d'Erta i d'Orri (fig.5.1 C). La secció d'Aragüés s'ha triat perquè presenta una geometria molt simple, que aflora pràcticament en la seva totalitat, i per tant és de fàcil restitució (fig.5.1 D). Per al cas específic de l'algoritme *Inclined Shear* (IS), també s'ha realitzat una modelització en avanç de la Unitat de Cerc i la Fossa de la Seu d'Urgell, que és l'estructura extensiva més ben constrenyida de la zona d'estudi (fig. 5.1 E).

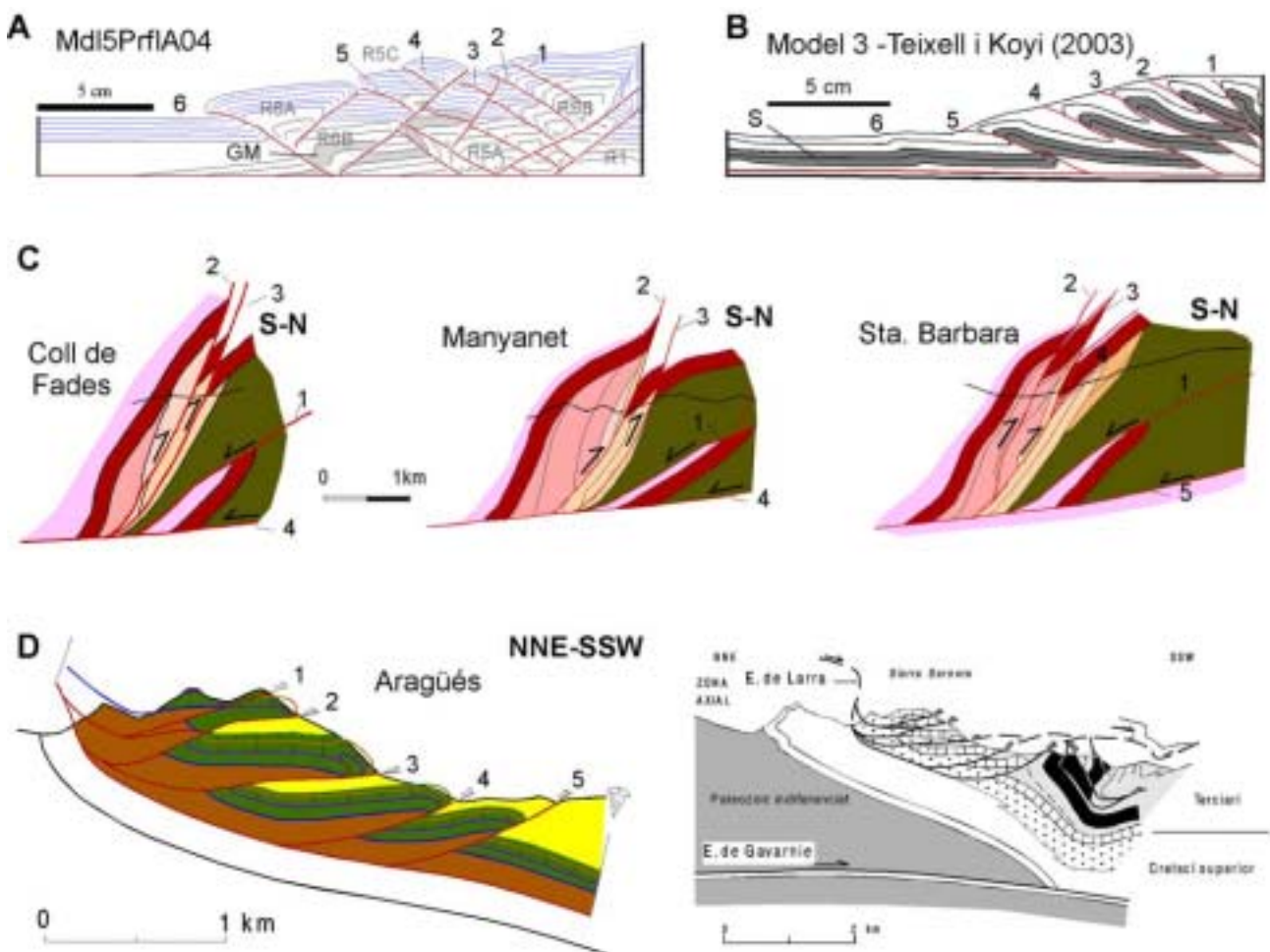


Fig. 5.1.- Seccions utilitzades per a l'avaluació dels algoritmes de restitució i modelització, en les que s'indica l'ordre de funcionament de les falles. A i B.- Models de sorra; GM: glass microbeads, S: sorra. C.- Talls de la zona de les Nogueres; En les tres seccions, la falla 1 representa l'encavalcament d'Erta, mentre que l'encavalcament d'Orri correspon a la falla 4 dels talls de Coll de Fades i Manyanet i la falla 5 del tall de Sta. Bàrbara. L'escala és la mateixa en els tres casos. D.- Tall del sistema imbricat d'Aragüés corresponent al marge est del riu Osia (Teixell i Koyi, 2003) i situació d'aquest sistema respecte el mantell de Gavarnie (Teixell, 1992).

La caracterització geomètrica i cinemàtica detallada d'aquestes seccions de control és bàsica per a la seva utilització com a elements de valoració dels algorismes de restitució i modelització, ja que quan més alt sigui el grau de constrenyiment, més fonamentats estaran els resultats. Per tant, tot seguit es procedeix a una descripció detallada de cada una de les seccions.

Mdl5prflA04: Aquesta secció correspon a un perfil del model *UncmfntyMdl5* realitzat al Hans Ramberg Tectonic Laboratory específicament per a aquesta tesi. Aquest model constava en l'estat pre-deformació d'una part inferior inclinada 5° cap a l'avantpaís, en la que hi havia intercalat un nivell de *glass microbeads*, i d'una part superior amb 5 nivells horitzontals de sorra de quars (taula 5.1).

A partir de les fotografies seqüencials en planta, preses durant la modelització, s'ha mesurat el desplaçament horitzontal ($\pm l$) associat a cada encavalcament i retroencavalcament, que posteriorment s'ha transformat en desplaçament al llarg de la falla (D) utilitzant la fórmula (Koyi, et al., 2000):

$$D = \pm l / \cos \chi$$

χ = angle de l'encavalcament o retroencavalcament.

En aquesta secció, els encavalcaments es van formar en seqüència de bloc inferior i associats a retroencavalcaments, configurant en el moment de formació de cada làmina estructures de tipus *pop up*, que posteriorment són transportades cap a l'avantpaís, i eventualment poden comportar la formació de nous retroencavalcaments. Aquests es formen en l'entroncament de l'encavalcament en la base del model i, a més, poden ser reactivats durant la formació de noves estructures a l'avantpaís. En els estadis finals del model, quan el prisma ja té una alçada considerable, es produeix una deformació heterogènia del seu límit caudal, com a conseqüència de la proximitat del mur mòbil.

Part inferior			Part superior		
	Gruix (cm)	Composició		Gruix (cm)	Composició
nivell 1	0,9	Sorra	nivell 12	0,2	Sorra
nivell 2	0,3	Sorra	nivell 13	0,2	Sorra
nivell 3	0,3	Sorra	nivell 14	0,2	Sorra
nivell 4	0,3	Sorra	nivell 15	0,2	Sorra
nivell 5	0,3	Sorra	nivell 16	0,2	Sorra
nivell 6	0,3	Sorra			
nivell 7	0,3	Sorra			
nivell 8	0,3	<i>Glass Beads</i>			
nivell 9	0,3	Sorra			
nivell 10	0,3	Sorra			

Taula 5.1.- Configuració inicial del model *UncmfntyMdl5*. El gruix vertical total de la part inferior és de 1.5 cm, i el de la part superior és de 1 cm.

La figura 5.2 mostra l'evolució de la deformació del model, i s'observa que la tendència general és la d'una seqüència de bloc inferior, en que les estructures deixen de funcionar quan es forma un nou encavalcament en una posició més avançada. A més, cada nova estructura és activa durant més temps i va associada a un desplaçament més elevat i també a una major dimensió de la làmina. L'encavalcament 4,

però, es desvia de la tendència general, ja que està més temps en funcionament, i no deixa d'acumular transport quan es formen nous encavalcaments. També s'observa que mentre tots els encavalcaments en seqüència de bloc inferior tenen una inclinació homogènia (30.7 - 32.4, fig.5.1C) l'encavalcament 4 està menys inclinat (24.2).

A grans trets, en la seqüència de deformació del model, s'ha diferenciat tres estadis: E1, E2 i E3 (fig.5.2). En l'estadi E1 es formen els encavalcaments 1 i 2, i el retroencavalcament R1, que és l'estructura que acomoda més escurçament durant aquest estadi. En l'estadi E2, es formen els encavalcaments 3 i 4, i continua en funcionament el retroencavalcament R1, que deixa de ser l'estructura d'escurçament més important en favor dels encavalcaments d'avantpaís. L'estadi E3 es caracteritza principalment per l'aturada de retroencavalcament R1. En aquesta etapa es formen els encavalcaments 5 i 6 (a 8.5 cm del mur estàtic), i els retroencavalcaments R5A, R5B, R5C, R6A i R6B. El retroencavalcament el R5B, a la part posterior del model, relleva el R1 com a generador de relleu estructural, i el R6B aprofita en el seu tram superior el traçat del R5C.

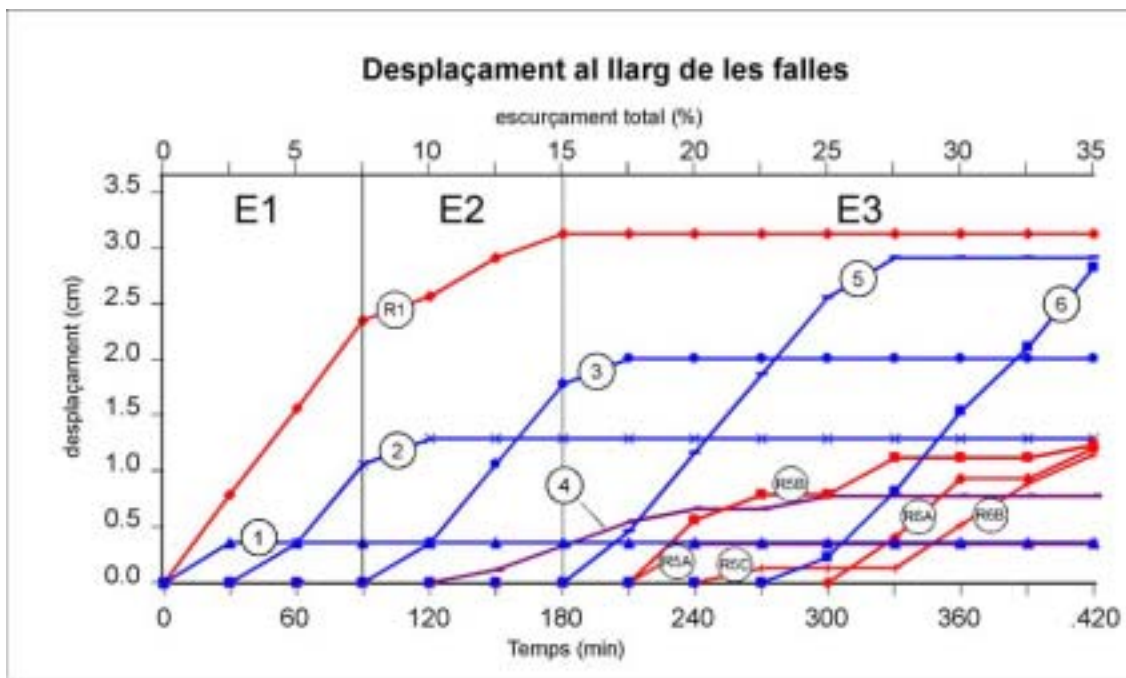


Fig. 5.2.- Gràfic que il·lustra la seqüència d'encavalcaments del model UncmfntyMdl5, mitjançant el registre del temps d'activitat de cada un. S'ha diferenciat els encavalcaments en color blau, els retroencavalcaments en vermell i en lila l'encavalcament 4 (veure fig.5.1 A). Les línies verticals separen els tres estadis de deformació que s'han diferenciat

La raó que l'encavalcament 4 es desviï tant de la tendència general s'ha de buscar en el fet que és el primer que creua el nivell de *glass microbeads*, i ho fa just en la discordança. El contrast reològic que significa aquest contacte comporta que la superfície d'encavalcament canviï d'orientació en aquest punt, disposant-se paral·lela a la discordança, i per tant, donant com a resultat una de les geometries característiques dels models *sandbox* discutides en l'apartat d'anàlisi estructural de la zona de les Nogueres,

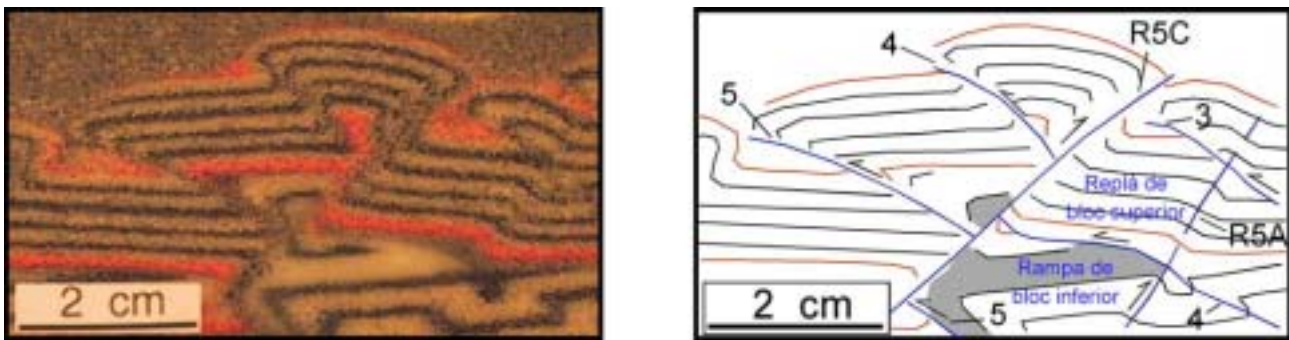


Fig. 5.3.- Detall de la secció Mdl5prflA04, on s'observa com l'encavalcament 4 forma un replà de bloc superior corresponent a una rampa de bloc inferior, com a conseqüència de la combinació d'un contrast litològic i la diferent orientació de les capes del model inicial. De color gris s'ha diferenciat el nivell de *glass microbeads*.

en què una rampa de bloc inferior, donat l'angle entre l'estratificació d'aquest bloc i la falla, correspon a un replà de bloc superior (fig. 5.3). En síntesi, en relació a un sistema de referència extern, la superfície d'encavalcament està inclinada uns 24° cap al rerepaís, es disposa horitzontal en arribar a la discordança, i torna inclinar-se 32° cap al rerepaís per creuar la part superior del model fins arribar a la seva superfície. Tenint això en compte, els termes rampa i replà respecte als elements interns del model, poden generar confusions ja que les sèries són originalment discordants, i per tant és important analitzar en detall la relació geomètrica entre el bloc superior i el bloc inferior d'aquests models, per tal que els càlculs de desplaçament al llarg de la falla i la restitució siguin correctes.

En general, les zones d'encavalcament en models *sandbox* es nucleen com a *kink bands* harmònics que en avançar la deformació esdevenen superfícies d'encavalcament primes, com a resultat de la seva rotació (Mulugueta i Koyi, 1992; Storti et al., 1997). Per altra banda, també ha estat descrita una partició de la deformació al llarg d'un sol encavalcament, condicionada principalment per la sobrecàrrega que augmenta progressivament el comportament dúctil dels materials més profunds, que acomoden la deformació per compactació i escurçament penetratiu paral·lel a les capes (Mulugueta i Koyi, 1987, 1992; Marshak i Wilkerson, 1992; Koyi, 1995), situació que pot comportar que replans de bloc superior no es corresponguin amb replans de bloc inferior sinó amb àmplies zones de deformació dúctil (Koyi i Teixell, 1998). En general, els encavalcaments dels models *sandbox* elaborats per aquesta tesi, presenten morfologies de tipus *kink band*, més o menys evolucionades i en bandes estretes, però en algun cas s'observa que encavalcaments que acomoden la deformació en forma de lliscament en els nivells superiors, passen a zones triangulars de deformació heterogènia (ZDH), on la deformació es manifesta en forma de compactació, plegament o cisalla paral·lela a la superfície d'encavalcament, en funció de la composició dels materials presents en aquesta zona. L'encavalcament 5 de la secció analitzada representa un exemple d'aquest tipus de comportament (fig. 5.4). En aquest cas, trobem una ZDH limitada per dues superfícies de lliscament (5a i 5b, fig.5.4) que convergeixen cap a una superfície d'encavalcament única (5). En aquest cas, el marcador més pròxim a l'encavalcament basal es deforma per compactació i per plegament (plecs lliscats), i la resta es deforma per

cisalla paral·lela als encavalcaments. La transició entre la ZDH i la superfície d'encavalcament 5, amb l'escurçament acomodat per lliscament, és molt brusca, fenomen que probablement està assistit per la presència en la zona de transició del nivell de *glass microbeads*.

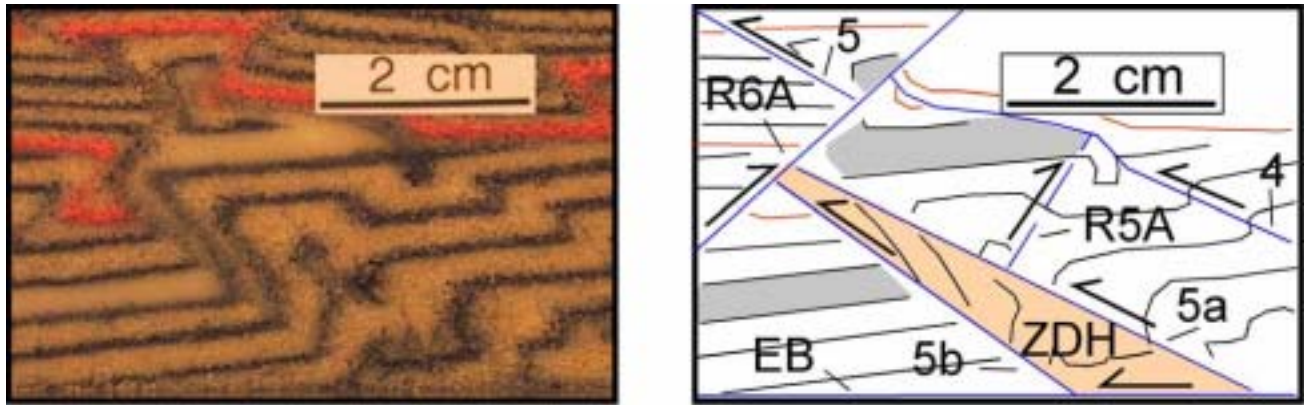


Fig. 5.4.- Detall de la secció Mdl5prflA04 en el que s'observa de color taronja una zona triangular de deformació heterogènia (ZDH) limitada pels encavalcaments 5a i 5b, que esdevenen un encavalcament simple en pujar en la sèrie, i l'encavalcament basal (EB). De color gris s'ha diferenciat el nivell de *glass microbeads*.

Les consideracions expressades en el paràgraf anterior són condicionants que s'han de tenir presents en el procés de restitució/modelització d'una secció. En el cas que ens ocupa, tant la presència de *kink bands* poc evolucionats com de ZDH pot causar una sobrevaloració de la longitud dels nivells, o la generació de geometries poc realistes en la modelització en retrocés, ja que és evident que el mecanisme de deformació de les ZDH no és el mateix que el de la resta del model. Per tant, és important la identificació d'aquestes estructures abans de començar la restitució.

L'últim element a tenir en compte abans de restituir un model *sandbox* és la compactació. Com ja he dit en la discussió anterior, aquesta compactació es produeix tant per efecte de la sobrecàrrega que suposa l'emplaçament del prisma d'acreció, com per efecte de la compressió exercida sobre el model. Per tant, la compactació és un fenomen progressiu simultani a la formació del prisma d'acreció, amb dues components, una vertical (sobrecàrrega) i l'altra horitzontal (compressió), que també genera dos gradients que augmenten la seva intensitat amb la profunditat, i en allunyar-nos del mur mòbil.

Per altra banda, també cal tenir present que alguns models *sandbox* incorporen dos materials amb comportaments diferents. Com a conseqüència de les seves propietats texturals, els nivells construïts amb sorra acomoden la compactació per pèrdua de volum durant l'escurçament del model, mentre que els que contenen *glass microbeads*, no poden assumir la compactació en forma de pèrdua de volum degut a que les seves partícules són esfèriques, i per tant, ho han de fer per engruiximent (Teixell i Koyi, 2003). La presència en un mateix model de materials amb diferent comportament resulta en l'aparició d'anisotropies mecàniques que són un paràmetre determinant en la geometria i cinemàtica de la deformació (Turrini *et al.*, 2001).

En sèries planoparal·leles, les anisotropies mecàniques generen diferències en l'escurçament de nivells diferents, canvis en l'estil dels encavalcaments (forma de la rampa, angle de rampa, variacions en el desplaçament...) i canvis en l'estil dels plecs (Teixell i Koyi, 2003).

En els models *sandbox* d'aquesta tesi, la complexitat associada a les anisotropies mecàniques es veu augmentada pel fet que la part inferior del model es troba inclinada. En referència a aquesta part, l'aspecte més elemental és que qualsevol superfície inclinada respecte a la direcció d'escurçament tectònic sofrirà una rotació i un canvi de longitud. Per tant, si assumim que l'escurçament penetratiu que es produeix horitzontalment no es tradueix en un engruiximent de les capes, és a dir, que hi ha compactació amb pèrdua de volum, els nivells d'aquesta part augmentaran la seva inclinació i disminuiran en longitud. Això succeeix en capes de sorra però no en capes *glass microbeads*, que com ja he dit no admeten pèrdues de volum. Aquest contrast mecànic es tradueix en engruiximents del nivell de *glass microbeads*, rotacions diferencials, *decoupling* de les estructures, lliscaments diferencials... D'altra banda, també cal considerar que el fet que la compactació horitzontal del model no és instantània, sinó que avança simultàniament amb el front de deformació, comporta que la rotació i escurçament dels nivells inferiors també siguin progressius.

Per valorar els algorismes de restitució i modelització cinemàtica, sense deixar de tenir present el que s'ha exposat, he optat per una "restitució objectiu" simplificada, en la que he obviat la presència del nivell de *glass microbeads*, i he considerat un escurçament per compactació horitzontal homogeni del model inicial (taula 5.2), calculat a partir de la mitja entre l'escurçament paral·lel a les capes de la superfície de discordança i el de la superfície superior del model. La caracterització d'aquesta restitució objectiu es presenta a la taula 5.2.

	Model inicial	Model <i>Target</i> $\div l = - 14.25\%$
Longitud total	40 cm	34.3 cm
Longitud dels nivells inferiors	16.1 cm	13.96 cm
Inclinació dels nivells inferiors	5°	5.8°

Taula 5.2.- Valors de la restitució objectiu (veure text) després d'aplicar un escurçament horitzontal del 14.25%.

Model B: Aquesta secció correspon al model 3 de Teixell i Koyi (2003) on s'avalua quin és el rol de les anisotropies mecàniques en la partició de la deformació, mitjançant diferents estratigrafies mecàniques heterogènies amb nivells de sorra i nivells de *glass microbeads*. En concret, el model analitzat en aquesta secció està compost per un tram inferior amb dos nivells de sorra i un tram superior amb dos nivells de *glass microbeads*, de 3mm de gruix cada un, amb una longitud inicial de 40 cm. Tot el conjunt reposa sobre un nivell de *glass microbeads* que fa la funció de superfície d'enlairament de coeficient de fricció baix. L'escurçament total és del 45%, amb una velocitat d'avenç del mur mòbil de 0.3 mm/min.

El prisma d'acreció es desenvolupa en seqüència de bloc inferior, amb làmines que augmenten en volum i transport associat a mida que ens allunyem del mur mòbil, separades per encavalcaments caracteritzats per una inclinació més o menys homogènia, pròxima als 25°. Els encavalcaments passen de superfícies discretes quan creuen els nivells de sorra a zones de deformació difusa en creuar els nivells de *glass microbeads*, que

mostren plects tancats amb flancs frontals invertits i fortament cisallats. Una altra característica d'aquest model és la variació en el desplaçament al llarg d'una mateixa falla que experimenten els diferents nivells en funció de la litologia i soterrament (taula. 4.3), ja que els nivells de sorra acomoden la deformació principalment per lliscament, mentre que els de *glass microbeads* ho fan per plegament, produint una disminució del salt en el sentit d'avenç de l'encavalcament.

	Esc. de capa (%)	Plegament (%)	Encavalcament (cm)						
			(%)	1	2	3	4	5	6
NGM 1	14.4	20.25	10.35	0.25	0.89	0.35	0.75	0.98	0.2
NGM 2	12.6	4.5	27.9	0.63	1.97	3.43	4.11	1.7	0.2
NS 1	9.45	8.1	27.45	1	1.79	3.63	4.44	1.49	0.2
NS 2	14.4	3.6	27	1.38	2.19	3.61	4.1	1.34	0.2

Taula 5.3.- Distribució de la deformació en els nivells del model B. NGM: nivells de *glass microbeads*. NS: nivells de sorra. Esc.: escurçament. Tot i que no existeix un encavalcament *sensu strictu*, s'ha atorgat al plec desarrelat 6 un valor mínim per a poder-lo modelitzar.

Seccions de la zona de les Nogueres¹: les seccions d'aquesta zona triades per a aquesta anàlisi corresponen a la zona de la Subconca d'Erill Castell – Guiró (fig. 5.1 C), amb reompliment vulcano-sedimentari estefano-permià i recoberta pel Buntsandstein amb una potència aproximada de 200m. Totes tenen en comú la inversió tectònica d'aquesta conca, que es veu afectada per retroencavalcament paral·lels a la seva estratificació, desenvolupats en seqüència de bloc inferior. En una etapa posterior a l'emplaçament d'aquesta làmina encavalcant, s'emplaça la unitat de l'Orri, que bascula tot el conjunt cap a l'avantpaís. Encavalcant aquestes escates trobem diverses “*têtes plongeantes*” de la Unitat de les Nogueres, que han estat obviades en aquesta anàlisi amb el fi simplificar-la. Les característiques específiques de cada secció són:

Coll de Fades: en aquesta secció la conca, que incorpora les formacions Erill – Castell, Malpàs i Peranera, té una potència màxima de 765m, i la profunditat de la inflexió replà – rampa de l'encavalcament que la inverteix és de 450m, considerant la base del Buntsandstein com a cota zero. El desplaçament mínim cap al sud de l'encavalcament d'Erta és de 2170m, i el de l'Orri de 1080m. L'estefano-permià està afectat per dos retroencavalcaments. El transport a favor del més septentrional és de 420m, mentre que l'associat al meridional és de 650m. L'escurçament horitzontal, calculat a partir de les ubicacions en la restitució i en l'estadi deformat d'una *pin-line* situada al límit posterior de la base del Buntsandstein i del *cutoff* d'aquesta superfície amb l'encavalcament de l'Orri és del 86%.

Manyanet: El reompliment de la conca en aquesta transversal és molt similar al de la secció anterior, però en aquest cas la seva potència màxima és de 1010 m. La profunditat calculada per a la inflexió replà – rampa és de 790m. El desplaçament mínim associat a l'encavalcament d'Erta és de 3440m i al de l'Orri és de 1810m. Dels dos retroencavalcaments que afecten la conca, el més septentrional està associat a un transport de 120m, i el meridional a 1000m. L'escurçament horitzontal és del 82.5%.

¹ tot i que en el capítol d'anàlisi estructural s'ha realitzat una discussió detallada de l'estructura i evolució d'aquestes seccions, es fa aquí una breu descripció de cada secció com a recordatori.

Sta. Bàrbara: Entre aquesta secció i la anterior desapareix per bisellament basal la formació Malpàs, i apareixen materials de la formació Guiró a la base de la conca. La potència màxima dels materials estefano-permians és de 850 m. La inflexió replà – rampa es troba a una profunditat de 720 m. El desplaçament mínim calculat per a l'encavalcament d'Erta és de 3170m, i de 2460m per al de l'Orri. En aquesta transversal apareixen tres retroencavalcaments. El més septentrional, que transporta una petita escata, està associat a un transport de 30m, el següent cap al sud a un transport de 825m, i l'últim a un transport de 420m. L'escurçament horitzontal és del 85.5%.

Aragüés: La secció triada per a aquesta anàlisi (fig.5.1 **D**) correspon al vessant oriental del riu Osia, al nord del poble d'Aragüés del Puerto, als Pirineus Aragonesos. L'estructura d'aquesta zona està definida per un sistema d'encavalcaments imbricats en seqüència de bloc inferior, amb l'entroncament basal en l'encavalcament de Larra, que es troba inclinat cap a l'avantpaís com a conseqüència de l'emplaçament de la làmina encavalcant de Gavarnie, que plega tota l'estructura formant el sinclinal de Bernera (Labaume *et al.*,1985; Teixell, 1990, 1996). La unitat sedimentària més antiga involucrada en l'estructura són els gresos de Marboré del Maastrichtià, que estan desarrelats en replà sobre argiles i margues d'edat Campanià – Maastrichtià inferior. Per sobre d'aquests materials aflora un conjunt de dolomies i calcàries terciàries (Paleocè – Eocè inferior) dins les que es poden distingir diferents subunitats. Al sostre de la sèrie implicada en l'estructura apareix un paquet de roques menys competents, que comença amb unes margues clivellades amb intercalacions de bretxes carbonàtiques (10-60m) seguides pel grup turbidític d'Hecho.

	Plegament (%)	Encavalcament (%)
Base del grup d'Hecho	11	35
Base de les calcàries terciàries	6	40
Base del Terciari	3	43

Taula 5.4.- Distribució de la deformació en els nivells de la secció d'Aragüés.

Els excepcionals afloraments de les dues vessants del riu Osia permeten una caracterització molt acurada de la geometria del sistema, a partir de l'anàlisi de diferents elements estructurals (taula 5.4), i per tant, el grau de constrenyiment de la seva restitució i modelització cinemàtica és molt elevat. A grans trets, les làmines imbricades presenten uns flancs caudals llargs i rectes on el gruix de les capes es conserva, i flancs frontals curvilinis, amb aprimament de les capes en aproximar-se als encavalcaments. Els angles de rampa i l'estil de deformació varien amb la litologia (taula 5.4; Teixell i Koyi, 2003). Alonso i Teixell (1992) conclouen que la geometria és el resultat de la superposició d'una deformació heterogènia i complexa al lliscament flexural relacionat amb l'emplaçament de les escates.

A la taula 5.5 s'observa que l'orientació del *cutoff* del bloc superior i bloc inferior és consistent per als encavalcaments 2, 3 i 4. La desviació en l'encavalcament 5 és deguda a una disminució del transport cap a l'oest. En base a aquestes dades i a estries observades en la superfície de l'encavalcament 3, s'assumeix que la direcció regional de transport és SSW, paral·lela a la secció 5.1 **D** (Teixell i Koyi, 2003).

Enc.	Orientació del <i>Cutoff</i>		Angle de <i>Cutoff</i> del BS ^a		Desplaçament de l'encavalcament		
	BS	BI	Gresos	Calcàries ^b	Sostre dels gresos	Base de les Calcàries	Longitud ^c restituïda
1	N133	N128	14-16		218		970
2	N114	N109	14-18	90	723	557	543
3	N112	N112	10-13	160	790	684	1048
4	N113	N112		117	437	333	1276
5	N101	N100			283	253	805

^a Angle de *Cutoff* del bloc superior, contat en el sentit de les agulles del rellotge, de l'encavalcament a l'estratificació.

^b "Calcàries" fa referència a la formació de calcàries massives del Paleocè.

^c Valors basats en la longitud restituïda del sostre dels gresos del Marboré.

Taula 5.5.- Resum de les dades de camp del sistema d'encavalcaments d'Aragüés, en base a les quals s'ha realitzat la restitució i la modelització geomètrica del tall 5.1 **D** (Teixell i Koyi, 2003, modificat) Enc.: encavalcament, BS: bloc superior i BI; bloc inferior .

5.2 VALORACIÓ I APLICACIÓ DELS ALGORITMES DE RESTITUCIÓ GEOMÈTRICA DEL PROGRAMA 2DMove

L'avaluació de les tècniques de restitució es divideix en tres parts. En la primera es valora cada algoritme per separat, a partir dels resultats obtinguts en la restitució dels models de sorra, que són els que tenen les característiques geomètriques inicials i finals més ben constrenyides. En el segon es realitza el mateix estudi utilitzant les seccions de camp; i finalment, en la tercera part, es valora quin és el procés òptim per a la restitució de les seccions estudiades en aquesta tesi.

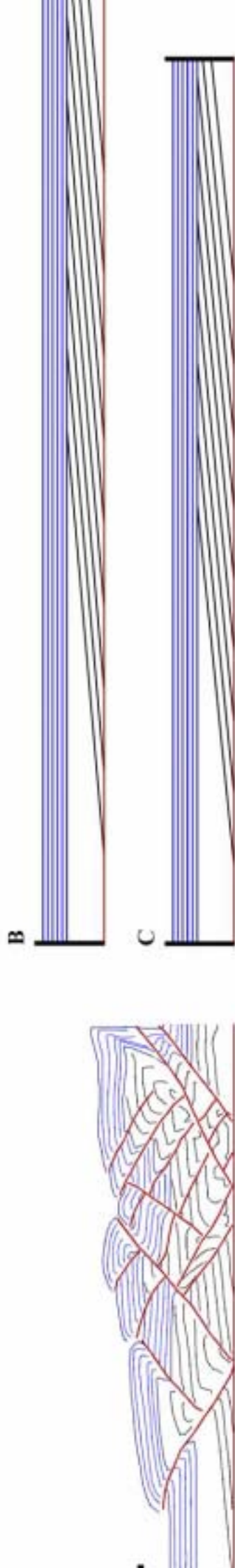
5.2.1 Restitució geomètrica dels tascons de sorra

Restitució amb Line Length Unfolding

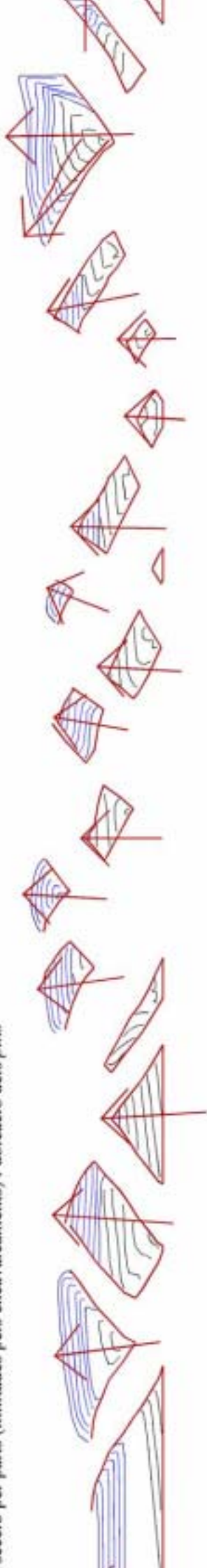
Per a la restitució de la secció Mdl5prflA04 s'ha seguit el procés que es mostra a la figura 5.5. Després de construir la secció objectiu, és a dir, l'objectiu de la restitució (taula 5.3), s'ha procedit al desplegament per parts del 100% de la deformació, utilitzant un *pin* perpendicular als nivells de la sèrie superior (fig. 5.5 2).

Com s'observa en la figura 5.5 3, el resultat d'aquesta operació és un seguit de paquets paral·lels, separats per les falles no desplegades, amb un espaiat entre línies marcat per la seva intersecció amb el *pin*. El següent pas consisteix a juxtaposar les superfícies, considerant la restitució objectiu. És a dir, començant per la làmina més allunyada del mur mòbil, a penes deformada en aquesta secció, es juxtaposen les làmines consecutivament, una darrera l'altra, fins a completar la secció.

En detall, partint del mur rígid, que correspon a una línia vertical en la que acaben tots els marcadors de la part superior de la secció, es comença la reconstrucció. Els marcadors de la sèrie inferior del model, considerant la seva posició en la restitució objectiu, es roten 5.8° cap a l'avantpaís, i s'ubiquen de nou. El següent pas és construir la falla 6 (fig. 5.1), unint els límits posteriors de cada marcador i prolongant-la cap a l'encavalcament basal, la placa metàl·lica en aquest cas. La següent làmina es reconstrueix adossant cada marcador al seu corresponent en el bloc inferior, repetint la rotació de 5.8° per als marcadors de la part inferior i finalment es dibuixa l'encavalcament 5 seguint el procés descrit per a l'encavalcament 6. La reconstrucció de les làmines restants se segueix repetint el mateix procés, amb la particularitat que en les làmines desplegades utilitzant un *pin* no vertical, abans de juxtaposar els marcadors caldrà aplicar al conjunt una rotació per tal que els nivells de la part superior siguin horitzontals. D'altra banda, la ZDH de la part inferior de l'encavalcament 5 (fig. 5.4) no ha estat desplegada, ja que es considera que els marcadors han sofert un estirament, i per tant no són utilitzables per a la restitució per preservació de la longitud de les capes. Finalment, s'uneixen els límits posteriors de tots els marcadors per construir una "*pin-line* caudal" que correspondria al mur mòbil, vertical en la realitat.



secció per parts (limitades pels encavalcaments) i ubicació dels *pins*



LLU de cada part. En aquest cas, no s'han desplegat les falles, tot i que s'han conservat per el límit de cada una de les parts. Es pot observar que totes les línies d'una mateixa part són d'orientament de quina sigui la seva orientació inicial.



dual de cada part, eliminació dels *pins*, i reconstrucció de la secció. També s'eliminen les encavalcaments, i per visualitzar millor el procés s'ha donat a cada fragment un color diferent. En gris ha estat compensada arealment, ja que els marcadors han sofert un augment important durant la deformació, o simplement, no hi ha cap marcador en el fragment. S'ha dibuixat els marcadors en vermell i els retroencavalcaments en blau

5. Comparació entre el la restitució objectiu i la restitució per LLU. Els resultats acceptables per a la sèrie superior, tot i que la discordança present és anòmala, conseqüència d'errors acumulats en el procediment. S'observa en la sèrie inferior una disminució important de la longitud, sobretot a la restitució LLU.

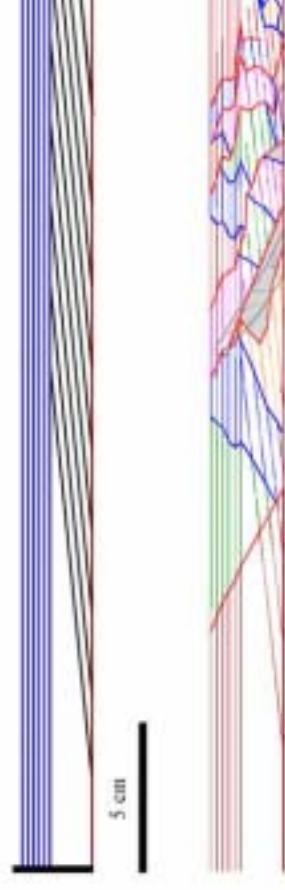


Fig 5.5.- Restitució per parts de la secció Mdl5prfl04 amb l'algoritme Line Length

Com s'observa a les figures 5.5 4 i 5.5 5, el resultat de la restitució, amb una disminució d'àrea del 2.15%, s'aproxima a la secció objectiu, tot i que no suficientment. S'aprecia una tendència general de disminució de la correspondència entre les dues seccions, a mida que ens allunyem del mur estàtic. Aquest distanciament és el resultat de la superposició de l'error acumulat durant la restitució gradual de les làmines, i l'augment de la complexitat de l'estructura en acostar-nos al mur mòbil, tant per un major grau de la deformació, com pel caràcter heterogeni d'aquesta. Aquesta distribució irregular de la deformació es manifesta tant en el traçat irregular (i incoherent) de la *pin-line* caudal, com en les trajectòries gens realistes d'alguns encavalcaments, que en alguns casos arriben a estar inclinats en el mateix sentit del transport.

Un altre aspecte que destaca en observar la secció restituïda és la diferència entre la restitució dels marcadors horitzontals i la dels marcadors inclinats. Mentre els primers han estat juxtaposats un darrere l'altre sense considerar el traçat de les falles obtenint-se un resultat suficientment acceptable, la sèrie inferior no s'ha pogut reconstruir amb els mateixos criteris i, respectant la inclinació de 5.8° cap a l'avantpaís, en diverses ocasions no s'ha pogut disposar en contacte les parts corresponents al bloc superior i al bloc inferior d'un marcador, o en el cas dels nivells inclinats de les làmines més antigues, la seva longitud no es suficient per unir l'encavalcament basal amb la discordança.

Aquestes anomalies s'han d'atribuir a la partició de la deformació amb la profunditat citada en la descripció d'aquesta secció, que implica que les parts inferiors del models es deformin més dúctilment i les superiors ho facin per lliscament a favor dels encavalcaments. Les conseqüències d'aquest fenomen es manifesten en diferents aspectes.

La primera manifestació està associada a l'estructura de la secció deformada. Les superfícies de falla, de traçat fàcilment identificable en els nivells superiors del model, passen a zones de deformació més amples en profunditat, i la seva ubicació depèn en part del criteri del geòleg. Tot i que en la majoria d'encavalcaments el seu traçat és evident, la zona de deformació en el bloc superior és àmplia, i per tant, cal decidir quin és el punt de *cutoff* de cada nivell, és a dir, on acaba la part "utilitzable" de cada marcador com a element de control estructural, pas que pot comportar la sobre- o infravaloració de la seva longitud, i és la font principal d'error en el model.

Analitzant en detall els marcadors horitzontals, obtenim que el marcador que es distancia més del valor esperat és la superfície de discordança, amb un augment de longitud del 4.6% (respecte a la restitució objectiu), i que la sèrie superior presenta una disminució total d'àrea del 3.4%. Aquesta desviació la interpreto com a resultat principalment de la deformació heterogènia que sofreix la sèrie amb els marcadors horitzontal en les làmines més pròximes al mur mòbil, que probablement genera un escurçament no quantificable que augmenta en pujar en la sèrie degut a que la fracció de cada marcador involucrada en aquesta ZDH és major com a conseqüència de la inclinació dels retroencavalcaments (fig. 5.6). A més, el contrast de color que suposa el vermell de la superfície de discordança respecte la resta del model permet identificar-la més fàcilment, inclús allà on a sofert un augment dúctil de longitud, i ha estat sobrevalorada.

En el cas de la sèrie inferior, la situació és més complexa, ja que als condicionants descrits, cal afegir-hi la inclinació dels nivells, i la presència de la capa de *glass microbeads*. Tot i així, la variació d'àrea és molt

inferior que en la sèrie superior, ja que només es produeix un augment del 0.4% en la restitució LLU respecte a la restitució objectiu. La variació de longitud horitzontal màxima de la restitució LLU respecte la restitució objectiu és una disminució del 10.1%, i correspon a la distància horitzontal entre el mur estàtic i el límit caudal del nivell 3 (taula 5.1, fig. 5.5 5). Tanmateix, els marcadors inclinats es desvien de forma important de la restitució objectiu, amb valors de fins al 40% de disminució de longitud per als més pròxims al mur mòbil, i no arriben a disminucions menors del 10% fins al setè marcador (sense tenir en compte que hi ha trams que no estan representats en la restitució).

Una primera explicació a aquesta divergència en el resultat s'ha de buscar en els efectes de vora tant del mur mòbil com de la placa basal. El primer supòsit ja ha estat descrit per als nivells horitzontals. El segon, consisteix una limitació de contorn molt difícil d'avaluar ja que se superposa als efectes del soterrament. A grans trets, la rigidesa de la placa basal impedeix el desenvolupament normal de les estructures, i per tant l'escurçament corresponent al bloc inferior s'ha d'acomodar per compactació, engruiximent i transferència del desplaçament cap a altres posicions. A més, aquesta distorsió no es constant per a un mateix marcador, ja que la pròpia inclinació dels nivells implica que algunes zones es vegin afectades per la proximitat al límit inferior del model, mentre que d'altres no ho estan.

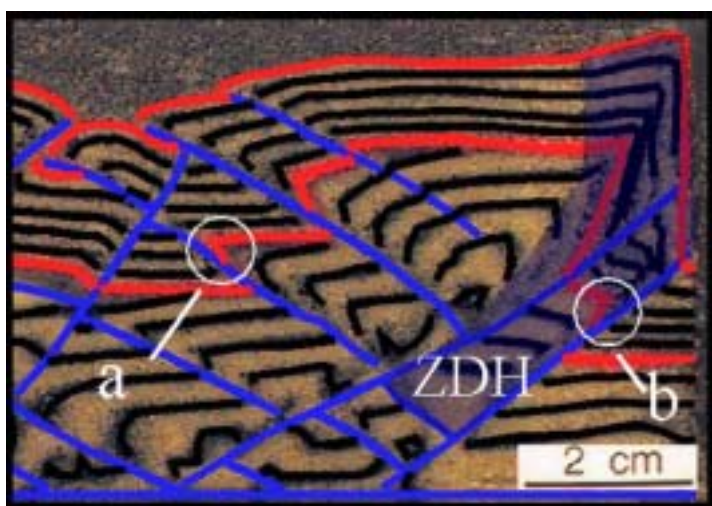


Fig. 5.6.- Detall de la part posterior del model Md15prf1A04. S'ha indicat en color més fosc la ZDH relacionada amb la proximitat del mur mòbil. S'observa clarament com a mida que pugem en la sèrie una major proporció dels marcadors es veu afectada per aquesta deformació heterogènia. També s'han indicat possibles punts (a, b) de sobrevaloració de la longitud de la discordança. L'escurçament no mesurable es tradueix en ZDH (fig. 5.4 i fig. 5.6), però també es manifesta en forma de plects amb engruiximent de xarnera, o plects isoclinals que poden evolucionar cap a encavalcaments en els que el marcador llisca sobre si mateix. Per tant, més que engruiximent es produeix duplicació (fig. 5.7). Una part important de la infravaloració de la longitud d'aquests nivells correspon a aquestes estructures.

Un altre aspecte a valorar en aquesta secció és la funció del nivell amb *glass microbeads*. El rol d'aquest nivell durant la deformació ja ha estat introduït en part en l'apartat de descripció de les seccions de control. Les consideracions expressades ajuden a explicar part dels problemes de la restitució utilitzant l'algoritme LLU. Aquest nivell de coeficient friccional més baix, és el primer dels inclinats que està limitat per dues superfícies amb disminució de longitud menor al 10%. Interpreto aquesta disminució de l'escurçament de capa com la suma de la menor intensitat de la deformació més la no compressibilitat d'aquests materials, que es tradueix en engruiximent de la capa (fig. 5.7 6) i probablement en augment del lliscament a favor de les falles i canvis en la rotació d'aquest nivell respecte els anteriors. Aquest canvi en la deformació es transmet als marcadors inclinats que té per sobre, que per això tenen un escurçament intern similar al d'aquest nivell.

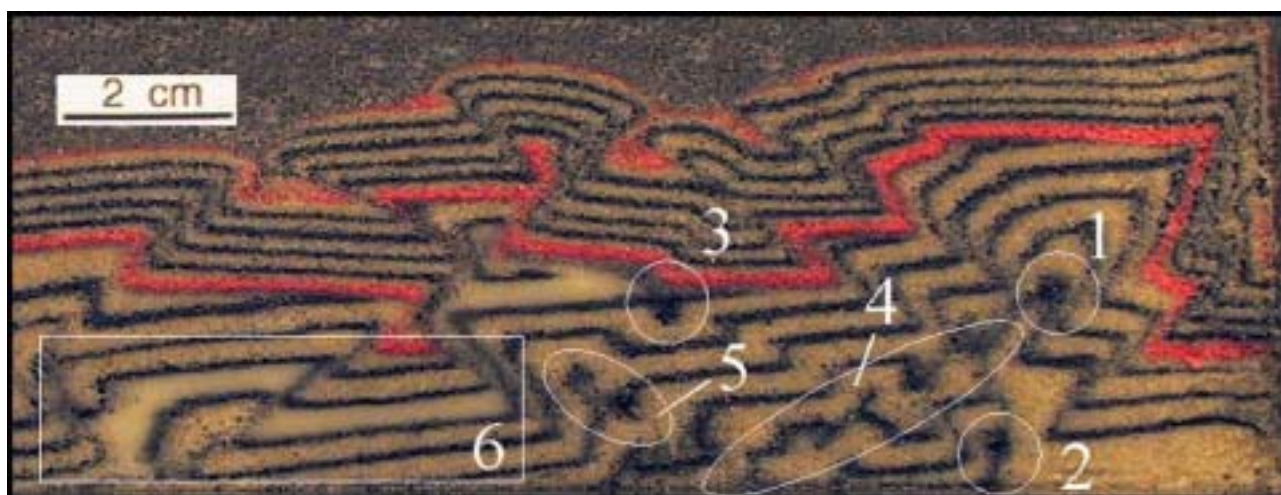


Fig. 5.7.- Exemples de deformació no quantificable. **1:** Engruiximent de xarnera en un plec isoclinal, **2:** Plec tancat conseqüència del contrast friccional entre la sorra i la base, **3:** Plec tancat per contrast friccional entre la sorra i els *glass microbeads*, **4:** Lliscament d'un marcador sobre si mateix, **5:** superposició d'engruiximent de xarnera i lliscament, **6:** Augment de potència amb el soterrament del nivell de *glass microbeads*.

La restitució de la secció **B** de Teixell i Koyi (2003; fig. 5.1 **B**, fig. 5.8) és molt més simple. Tot i la complexitat que pot comportar la presència d'una estratigrafia mecànica, el fet que la disposició inicial i la geometria final del model siguin molt més simples comporta que la resolució de l'estructura sigui més directa. D'entrada, totes les estructures encavalcants es dirigeixen cap a l'avantpaís, i no hi ha retroencavalcaments o encavalcaments fora de seqüència que deformin les estructures prèvies, amb la qual cosa és molt més senzill definir la seqüència de deformació i quin percentatge d'aquesta cal atribuir a cada encavalcament. A més, el transport associat a cada encavalcament és significativament superior als descrits en el model anterior, amb la qual cosa no sorgeixen problemes relacionats amb el dibuix de la superfície encavalcant, eliminant-se d'aquesta forma una de les principals fonts d'error del model anterior.

Per altra banda, la disposició horitzontal dels marcadors, independentment de la seva reologia, també simplifica l'estil de la deformació. Així, de base a sostre, la pila comença amb una capa de *glass microbeads* que fa la funció de nivell d'enlairament, acumulant la major part de la deformació per engruiximent, amortint els efectes de vora generats pel "sòcol" rígid. Per sobre d'aquest material les capes de sorra (NS2 i NS1) al principi es deformen principalment per transport al llarg de la falla i plegament a la part frontal de cada làmina, i en avançar l'escurçament sofreixen una rotació generada per l'emplaçament de les làmines inferiors, definint una cinemàtica típica de cinturons de plecs i encavalcaments. La part superior està formada per un gruix de 6 mm de *glass microbeads* amb dos marcadors (NGM2 i NGM1) que experimenten una deformació més heterogènia. La deformació del nivell inferior (NGM2) es divideix entre plecs i encavalcaments, tot i que en comparació amb les capes de sorra subjacents, la importància relativa del primer mecanisme és molt superior. En canvi, el mecanisme d'escurçament principal del NGM1 és molt diferent,

degut tant a la reologia dels materials com a l'absència de confinament. Per altra banda, els processos superficials dels models (esllavissades) són més importants en aquest cas.

En la figura 5.8 s'observa clarament com l'escurçament per lliscament a favor de les falles i plegament és semblant per a les capes NGM2, NS1 i NS2, tot i que la importància del primer en relació al segon disminueix en el sentit de transport per a cada falla. Aquesta situació, que generaria incongruències en un model que consideri una deformació per lliscament flexural, no comporta problemes majors si s'utilitza l'algoritme LLU ja que la longitud de les capes es manté constant, un cop assumida la compactació horitzontal (~10%).

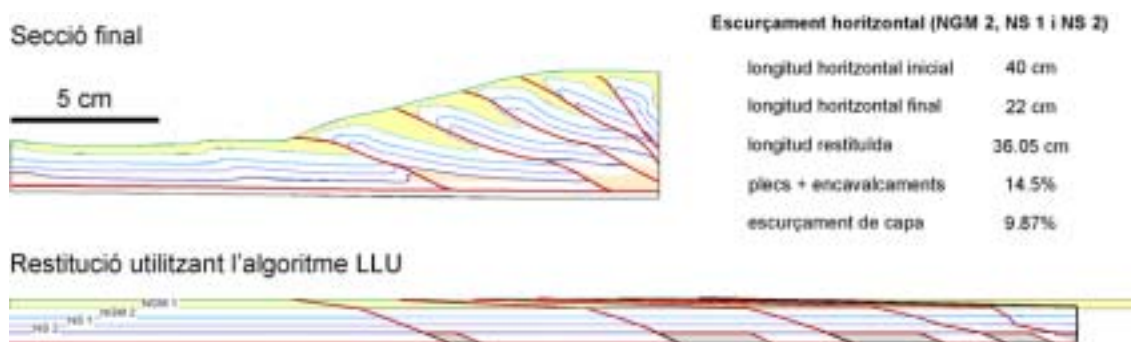


Fig. 5.8.- Restitució de la secció B utilitzant l'algoritme LLU. Les àrees de color gris en la restitució corresponen a replans de bloc superior que no tenen un equivalent en la secció final (Koyi *et al.*, 1999). Per restituir la capa basal de *glass microbeads* s'ha mesurat la longitud dels replans i l'àrea en excés del nivell d'enlairament (àrees de color taronja). Tot i que l'escurçament conjunt per plecs i encavalcaments de NGM2, NS1 i NS2 és el mateix la distribució entre un i altre mecanisme és diferent per cada nivell. En groc el nivell restituït per preservació d'àrea.

La situació canvia de manera radical per al nivell d'enlairament basal. En aquest cas, l'escurçament corresponent a transport sobre replans de bloc superior en els nivells de sorra es dona per engruïment en el bloc inferior (21%; Teixell i Koyi, 2003), que no presenta aquests replans sinó que es deforma penetrativament tal com es descriu a Koyi *et al.* (1999). Per tant, la restitució d'aquesta capa no és tant directa quan s'utilitza el LLU, i considerant la seva incompressibilitat l'he restituït per preservació de l'àrea de la secció, a partir de la mesura de l'àrea en excés a la secció final i la longitud dels replans de bloc superior.

La restitució per LLU del nivell superior no és possible ja que els processos superficials n'alteren completament la geometria. Tanmateix, tenint en compte que no hi ha canvi d'àrea, la restitució d'aquesta capa ens dona un resultat molt més pròxim al model inicial, i per tant més llarg que la restitució per LLU (fig. 5.8). L'escurçament respecte al model inicial és d'un 4.3% atribuïble en la seva totalitat a errors del procediment.

En síntesi, l'algoritme LLU ens dona informació sobre la longitud restituïda dels diferents nivells que constitueixen una secció, permetent-nos calcular la part de l'escurçament total corresponent la compactació², obtenint una primera aproximació a la geometria pre-deformació. D'altra banda, en seccions que impliquin

² La part de l'escurçament corresponent a la compactació l'he pogut calcular en els models perquè conec la seva geometria inicial, situació que no es dona en el cas de seccions reals, si bé és cert, que els mecanismes de compactació en la direcció horitzontal en les roques no són de la magnitud dels que es donen a la sorra.

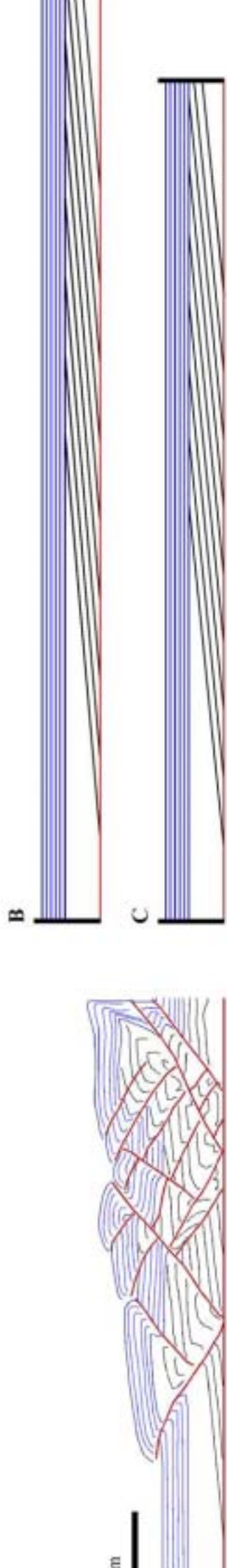


Fig. 4. Reconstrucció de la secció per parts (limitades pels encavalcaments), i ubicació dels *pisos* i les superfícies (en groc)

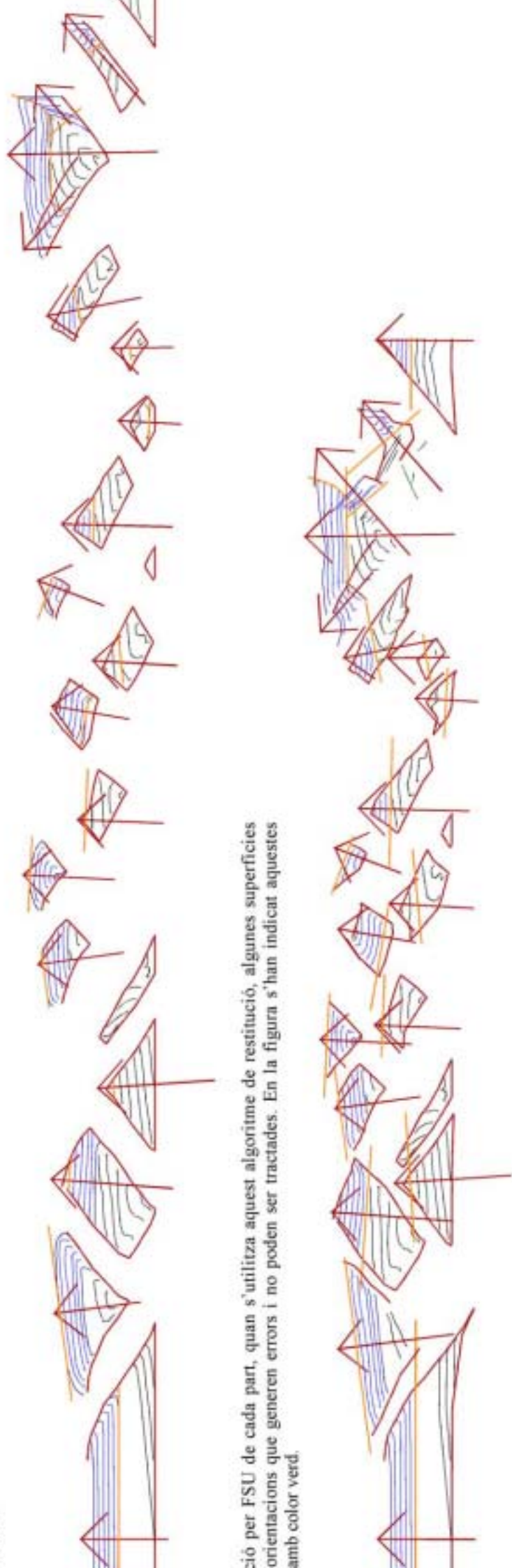


Fig. 5. Comparació entre el model inicial escurejat un 14,25% i la secció restituïda. S'observa que l'algoritme funciona acceptablement per a la part superior de, amb el marcatge horitzontal, però presenta problemes a la part inferior i posterior, degut principalment a l'efecte de vora que aquest algoritme no té en consideració

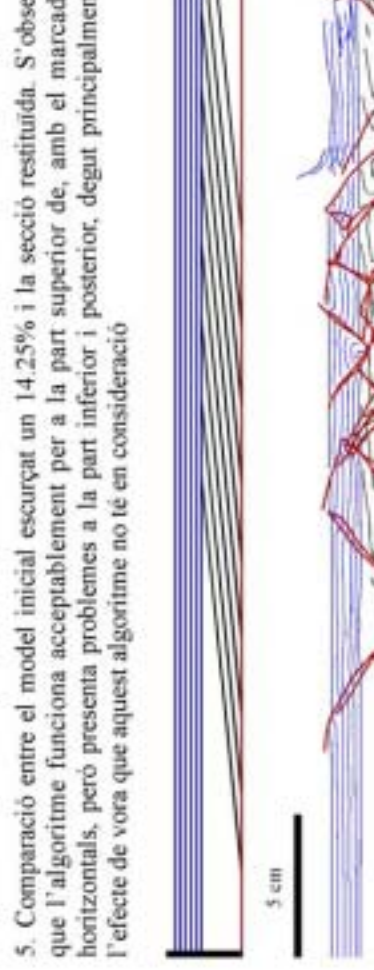


Fig. 6. Reconstrucció de la secció individual de cada part, eliminació dels *pisos* i superfícies *target*, i reconstrucció de la secció

Fig. 7. Reconstrucció per FSU de cada part, quan s'utilitza aquest algoritme de restitució, algunes superfícies d'orientacions que generen errors i no poden ser tractades. En la figura s'han indicat aquestes amb color verd.

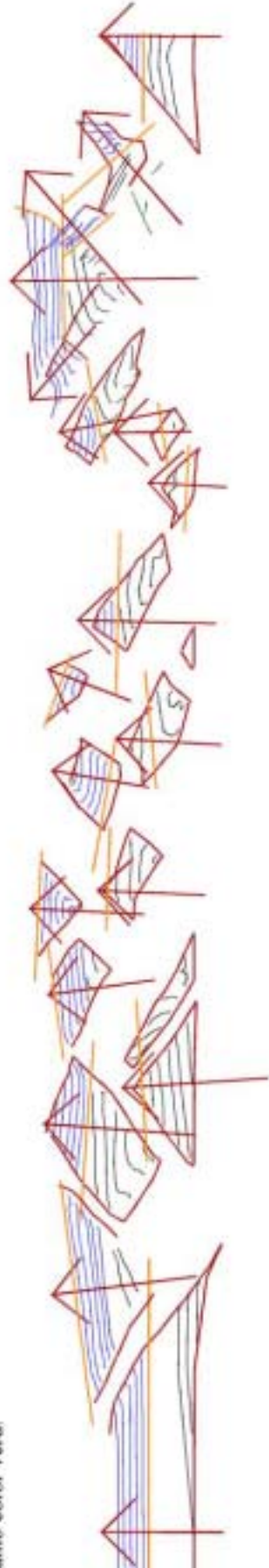
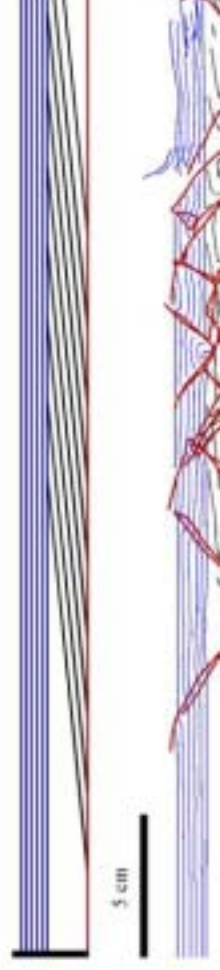


Fig. 8. Reconstrucció de la secció individual de cada part, eliminació dels *pisos* i superfícies *target*, i reconstrucció de la secció



Fig. 9. Reconstrucció de la secció individual de cada part, eliminació dels *pisos* i superfícies *target*, i reconstrucció de la secció



escurçaments penetratius diferencials, ja sigui per contrastos reològics, soterrament o inclinació d'algunes capes respecte a la direcció d'escurçament, els valors obtinguts poden comportar errors en la interpretació de l'estructura, i per tant cal completar el desplegament de les capes amb una anàlisi de les diferents característiques de la secció, per efectuar les correccions que siguin necessàries. En definitiva, aquest mecanisme ens serà útil en seccions monòtones, planoparal·leles i sense contrastos reològics importants, i amb nivells d'enlairament poc profunds per tal que els efectes de la càrrega sedimentària siguin mínims i es puguin negligir.

Restitució amb Flexural Slip Unfolding

A diferència del LLU aquest algoritme presenta l'avantatge que conserva l'àrea i l'angle entre les línies, tot i que només conserva la longitud dels marcadors paral·lels a la superfície de referència, tal i com és d'esperar en la realitat. Per tant, en el cas de la secció Mdl5prflA04 que mostra la deformació de dues sèries separades per una discordança angular, és evident que, a priori, la utilització d'aquest algoritme ha d'aportar millores significatives. De totes formes, igual que en el cas anterior, la pràctica ens mostra que hi ha consideracions prèvies que en condicionen l'ús.

El procés seguit es mostra a la figura 5.9. Després de separar el model en parts, cal emplaçar els *pins* i escollir les superfícies de referència i les corresponents superfícies *target*. En aquest cas, tot i que normalment s'aconsella la utilització de *pins* paral·lels als plans axials dels plecs, he optat per pins perpendiculars als nivells superiors, en els trams centrals de cada bloc, prenent com a superfície de referència el marcador horitzontal superior o inferior, en funció del grau de constrenyiment de cada un. Tenint en compte que l'algoritme manté constant la longitud de les capes paral·leles a la superfície de referència amb un espaiat marcat pel punt d'intersecció amb el *pin*, l'elecció no ha de canviar el resultat final. Allà on no ha estat possible utilitzar un marcador horitzontal com a superfície de referència, per absència o constrenyiment insuficient, s'ha utilitzat un dels marcadors inclinats seguint els mateixos criteris. Pel mateix motiu que amb l'algoritme anterior, la ZDH de la part basal de l'encavalcament 5 no ha estat restituïda (fig. 5.5).

La utilització del FSU en contextos compressius està recomanada per a la restitució de seccions que continguin plecs d'inflexió de falla, en els que el pla axial dels plecs és també la seva bisectriu (Suppe, 1983). Seguint aquest raonament, un *pin* paral·lel al pla axial de l'anticlinal de rampa, implicarà un desplegament en què els punts continguts en aquest *pin* no experimentaran cap mena de lliscament, tal com suposa el model de Suppe i Namson (1979) per a làmines encavalcants en què tota la rampa de bloc superior ha sobrepassat la inflexió rampa – replà (fig. 3.7). En el nostre cas però, cap encavalcament té prou transport associat com per assumir una cinemàtica d'aquest tipus, i la deformació està caracteritzada per rotació rígida de blocs limitats per zones de deformació intensa, definides per *kink bands* rotats (que encara no han evolucionat cap a superfícies d'encavalcament en molts de casos). Per tant, és més correcta l'elecció de pins perpendiculars als nivells horitzontals ja que aquests no han sofert lliscament paral·lel a les capes, i un cop desplegats, aplicar-los una rotació solidària per completar la restitució de cada part (fig. 5.9 3 i 4).

Com a superfícies *target* s'ha utilitzat el resultat de desplegar amb LLU les superfícies de referència perpendicularment al *pin*, per tal que el procés mantingui la potència de les capes. Tornant al raonament anterior, en una escata emplaçada per lliscament flexural en què els replans siguin horitzontals, la restitució per FSU es pot realitzar directament a un *target* horitzontal, ja que tant si el *pin* és vertical com paral·lel al pla axial, la potència de les capes no varia. En la restitució de la secció Mdl5PrflA04, no es pot evitar la restitució en dos passos (desplegament i rotació), perquè la utilització d'un *pin* inclinat comportaria una disminució del gruix de les capes si es fes directament (fig. 5.10).

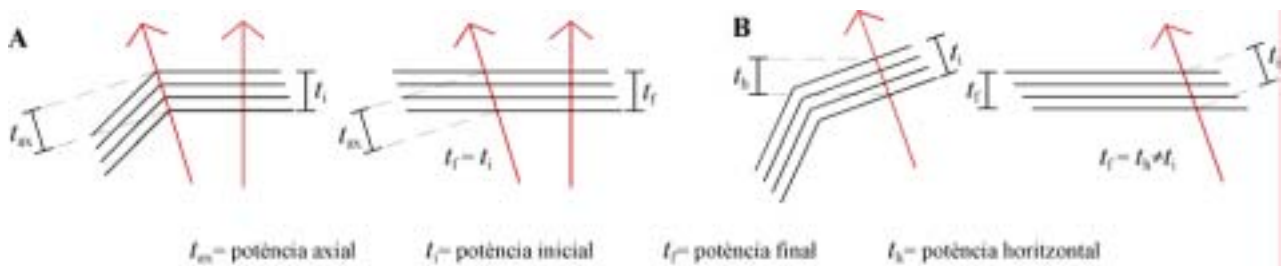


Fig. 5.10.- Comparació de la restitució a un *target* horitzontal per FSU d'un plec flexural sense rotació (A) i un plec flexural amb rotació (B) En el primer cas, tan si s'utilitza un *pin* vertical com paral·lel al pla axial, la potència es conserva, mentre que en el segon cas, amb un *pin* perpendicular a les capes es produeix una disminució de la potència. La longitud de les capes es manté constant en tots dos casos.

Un problema habitual en aquest algorisme és que al calcular el desplegament el programa no pugui crear línies de flux per a tots els punts de la secció, deixant parts d'aquesta sense restituir. Normalment, canviant la situació del *pin* o augmentant-ne la longitud, el problema se soluciona. Una de les fonts principals de problemes són els plects amb el pla axial orientat a un angle molt elevat respecte el *pin*. Aquesta situació pot comportar una intersecció múltiple d'aquest marcador, o que el desplegament impliqui que el marcador passi

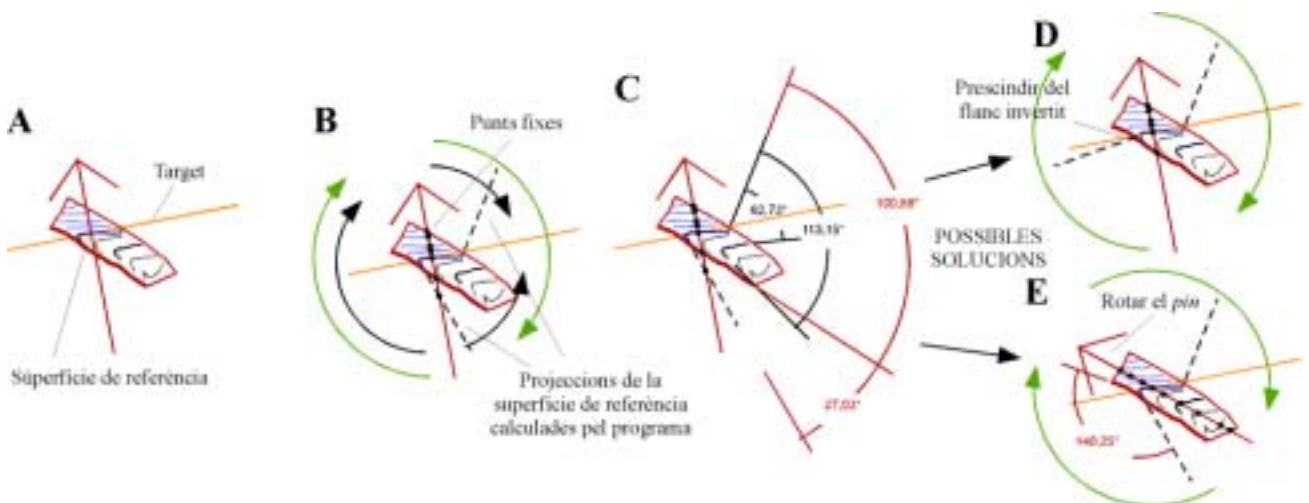


Fig. 5.11.- Representació dels problemes generats per una superfície de referència que creua el *pin* més d'una vegada. A: Fragment de la secció Mdl5prflA04; B i C: Il·lustració dels problemes originats pel FSU; les fletxes verdes representen els fluxos en una situació normal, i les negres els resultants de la doble intersecció superfície de referència – *pin*, que també genera un problema d'angles amb els marcadors; D i E: Solucions possibles. En aquest cas és preferible la D, ja que com s'observa a E, el flanc invertit de la superfície de referència és la causa principal del problema.

d'un costat a l'altre del *pin*. En aquest cas el programa no pot efectuar la restitució ja que tots els punts continguts en el *pin* són fixes, els que estan a la dreta flueixen cap a la dreta i els de l'esquerra cap a l'esquerra (fig. 5.11). En la secció Mdl5PrflA04, aquesta situació es dona en diversos blocs, en els que els marcadors inclinats presenten plecs amb el flanc frontal invertit. En aquests casos s'intenta ubicar el *pin* en diferents posicions i es repeteix la restitució per FSU fins que aquesta es possible. De totes formes, si no es troba cap posició satisfactòria, ja sigui per què no existeix o perquè la nova situació implica un lliscament exagerat de la resta de marcadors (quant més lluny se situï el *pin* major és el lliscament), es prescindeix de la part no restituïble i es restitueix la resta del bloc (fig. 5.11). En aquests casos, s'ha indicat en color verd la part del model no desplegada (fig. 5.9).

Un cop restituïdes i rotades totes les parts, es procedeix al muntatge de la secció restituïda. En aquesta secció s'ha utilitzat com a nivell patró la discordança entre les dues sèries, unint els *cutoffs* d'aquest marcador (fig. 5.10 4), o en els blocs en què no és present, s'ha utilitzat el marcador disponible. Aquest procediment genera buits i superposicions de parts de les seccions, i a la part frontal del model dona un resultat satisfactori per al tram horitzontal, i acceptable, amb algunes consideracions, per a la sèrie inferior. En acostar-nos a la part posterior la restitució perd precisió, fins a arribar a geometries impossibles de reconstruir a la part més gruixuda del prisma, fent evident una altra vegada que els mecanismes de deformació en aquesta zona no són fàcilment restituïbles amb els algoritmes disponibles. La complexitat del model restituït per FSU no és aplicable a l'error acumulat durant el procés, ja que el lliscament paral·lel a les capes de cada part és independent, a diferència del restitució per LLU, en què aquest paràmetre era el resultat de la juxtaposició dels marcadors.

En l'anàlisi del resultat, de la zona menys deformada a la més deformada, s'observa que la restitució FSU es desvia significativament de la restitució objectiu pel que fa a la placa basal. És evident que per les característiques del dispositiu de deformació, el sòcol és un element rígid que no experimenta cap tipus de deformació. Com que l'algoritme no contempla aquesta possibilitat, ja que aplica la retrodeformació a tots els punts de la secció, per mantenir la distància entre marcadors ha de deformar la base del model, donant lloc a la geometria anòmala de la superfície d'enlairament, i a una sobrevaloració de la profunditat d'aquest (fig. 5.12).

En aquests cas, el problema associat a la naturalesa canviant de les zones de deformació, plegament en profunditat i encavalcament en situacions més elevades, es manifesta en el diferent grau de desplegament de les estructures (fig. 5.12). Com que s'ha pres com a capes de referència marcadors de la sèrie superior, amb plecs de falla suaus de dimensions molt restringides, el desplegament per FSU dels marcadors horitzontals no és suficient per desplegar els marcadors inclinats, que presenten plecs més evolucionats amb flancs inversos llargs. En conseqüència, el programa només pot restituir en la seva totalitat els trams centrals de cada bloc de restitució, que s'han deformat homogèniament, mentre que l'heterogeneïtat de la deformació en les parts pròximes a les falles implica que el desplegament de la capa de referència només desplegui parcialment els marcadors que presenten un grau de plegament més elevat. El problema també s'hauria donat

si s'hagués triat una capa inclinada com a superfície de referència, amb la diferència que enlloc de trobar-nos amb marcadors semidesplegats, obtindríem nivells "sobredesplegats", és a dir, que les capes horitzontals de la sèrie superior presentarien plects sinclinals a les zones de rampa de bloc superior (fig. 5.12).

Una altra de les conseqüències de la utilització dels nivells de la part superior com a superfícies de referència i *pins* verticals està relacionada amb la geometria de les escates. En alguns casos, el *pin* creua els nivells de la sèrie horitzontal, però surt del bloc en la sèrie inferior, com a conseqüència dels seus límits inclinats, i a més, bona part dels nivells inferiors no es troben directament sota la superfície de referència. Per solucionar aquest problema, el programa projecta els límits d'aquesta superfície, assumint que no hi ha deformació més enllà de la falla, i utilitza la projecció per completar la restitució (fig. 5.11). Aquesta projecció no sol ser representativa de l'estructura, i comporta l'aparició de "sobredesplegaments" d'alguns marcadors, arribant-se a l'extrem d'obtenir marcadors de la sèrie inferior inclinats cap al mur mòbil (fig. 5.12). La solució a aquesta contingència passa per la projecció manual dels límits (feta pel geòleg) per tal de minimitzar-ne els efectes. No obstant, he fugit en la mesura del possible d'aquestes intervencions pel grau d'interpretació (i per tant d'incertesa) que afegeixen al model, i més tenint en compte que l'objectiu d'aquesta anàlisi és la valoració del funcionament de l'algoritme. Per altra banda, la utilització de nivells inclinats com a superfície de referència implicaria la no conservació de la potència dels marcadors horitzontals i en funció de la ubicació del *pin*, una distorsió de l'angle de rampa.

En el resultat també s'observa que al juxtaposar els *cutoff* de bloc superior i inferior del nivell de referència, l'encaix de la resta de la falla no és exacte, generant-se zones de superposició i buits, que generalment corresponen als plects de falla en la secció deformada (fig. 5.12). Aquesta situació reforçaria la teoria que els plects en models analògics tipus *sandbox* no es produeixen per lliscament flexural, almenys en els seus estadis inicials, sinó que els flancs inversos es formen per una deformació heterogènia. En els trams inferiors, el desplegament incomplet de la seqüència és el principal responsable de l'existència de buits entre els diferents blocs. En definitiva, aquesta observació indica que l'elecció de *pins* perpendiculars a l'estratificació en el tram central dels models és correcta.

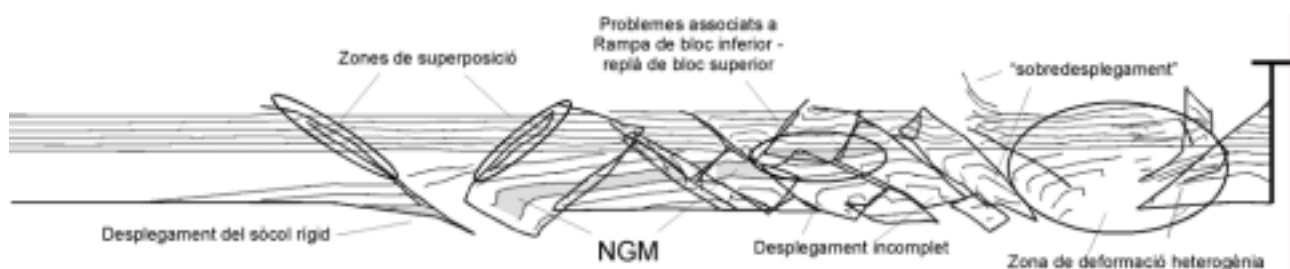


Fig. 5.12.- Síntesi dels diferents tipus d'anomalies en la restitució de seccions utilitzant l'algoritme FSU. NGM: *glass microbeads*. Els traços gruixuts corresponen als encavalcaments i retroencavalcaments.

Quant als efectes del nivell de *glass microbeads* discutits per al LLU, aquest algoritme aporta i completa informació. Una primera observació, té a veure amb la conservació de la potència de nivells paral·lels associada al procediment, i que aquest algoritme només restitueix el plegament flexural i no la deformació

penetrativa. És a dir, tenint en compte que els marcadors inferiors tenen una inclinació i gruix idèntics, a la restitució, s'haurien de conservar aquestes característiques geomètriques, com a mínim en cada fragment restituït individualment. En la figura 5.12 s'observa que en la majoria de casos aquest nivell augmenta de gruix durant la deformació, i sol separar estils de deformació diferents en les seves parts superior i inferior. Finalment, la incongruència més destacable es dona a la zona de correspondència entre una rampa de bloc inferior i un replà de bloc superior (fig. 5.3). En aquest punt la complexitat geomètrica de la restitució augmenta significativament, amb 1) superposicions proporcionalment més importants que en la resta de la secció, 2) correspondència nul·la entre el bloc inferior i el bloc superior en el tram inclinat, i 3) una variació en la inclinació del marcador, indicant que en aquesta zona la deformació estava més governada per la reologia dúctil d'aquest material que per processos purament flexurals.

Per darrera de la capa de *glass microbeads*, la geometria de la secció restituïda esdevé molt més complexa. La suma de la disminució de la mida de les làmines i una deformació més intensa implica un grau d'error més alt, sobretot per als fragments que no contenen marcadors horitzontals i els que es troben més pròxims al mur posterior. Això augmenta la probabilitat d'error tant en l'emplaçament dels elements de restitució com en la posterior reconstrucció de la secció. Per tant, com ja he dit, aquesta s'ha fet a partir de la superfície de discordança, prescindint de la resta de marcadors, fent evident l'heterogeneïtat de la deformació d'aquesta zona. L'excepció d'aquesta zona de deformació intensa, és el bloc basal directament adossat al mur, que només ha estat deformat per compactació, ja que el retroencavalcament R1, format en els primers estadis de la compressió, ha funcionat com a *passive-roof thrust* (Banks i Warburton, 1992) transmetent la deformació associada al lliscament de l'encavalcament basal a les làmines que té per sobre.

L'escurçament per compactació calculat a partir de la restitució per FSU és del 8.75%, un 5.5% menor que el calculat per a obtenir la secció *target*. Aquesta diferència és normal si tenim present que la restitució s'ha fet a partir de la superfície de discordança que ja es desviava en un 4.6% en la restitució per LLU. Aquest valor es complementa amb la major proporció de buits que superposicions (fig. 5.12) tant en la part superior com en la inferior, sobretot a la zona posterior del model. Per tant, es probable que es repeteixi una sobrevaloració de la longitud d'aquesta superfície, pels mateixos factors discutits per a l'algoritme LLU.

Per a la restitució de la secció **B** s'ha seguit el mateix procediment, tot i que s'ha aprofitat les seves característiques, menys complexitat geomètrica del model inicial i de la deformació, per valorar més detalladament les implicacions de l'orientació del *pin* i de la superfície *target*. Utilitzant com a superfície de referència el marcador entre els nivells NGM2 i NS1, s'ha repetit la restitució utilitzant 1) un *pin* paral·lel al pla axial i un *target* horitzontal (fig. 5.13 **B**), 2) el mateix *pin* amb un *target* perpendicular, obtingut a partir del nivell de referència per LLU (fig. 5.13 **C**) i, finalment, 3) un *pin* perpendicular a les capes, en el seu tram central, amb un *target* perpendicular al *pin*, obtingut de la mateixa forma que l'anterior (fig. 5.13 **D**). Pels motius descrits per al model anterior, la restitució dels dos últims s'ha de fer en dos passos (FSU + rotació, fig. 5.10).

Els resultats obtinguts, mostren que a pesar d'algunes divergències en els nivells més dúctils, el procediment funciona molt millor que per a la secció Mdl5PrflA04 en els nivells de sorra. En general, el paral·lelisme entre els marcadors que limiten les capes de sorra, inclosos els replans de bloc inferior, es manté en totes les restitucions, independentment de l'orientació dels elements utilitzats. Com es pot observar en la figura 5.13, l'orientació del *pin* respecte l'estratificació condiciona principalment la valoració de la magnitud de la cisalla angular (λ , *backshear*). Això és degut al canvi del sentit de lliscament entre capes en el tram situat entre els *pins* utilitzats en cada restitució, ja que, com ja he dit, la intersecció entre el *pin* i un marcador, determina el seu eix de desplegament flexural, generant un lliscament entre capes levògir a la dreta del *pin* i dextrògir a l'esquerra. Per tant, la diferent ubicació del *pin* en cada restitució implica la utilització d'eixos de desplegament diferents, que comporten un canvi d'orientació de les falles i el límit caudal de la restitució, que utilitzo per determinar el valor de la cisalla angular. En les zones de rampa, però, el paral·lelisme d'aquests marcadors ja no és tant ajustat, com a conseqüència de la variació de la relació encavalcament – plegament per a diferent nivells al llarg d'una mateixa falla, indicant una altra vegada, que el mecanisme de formació d'aquest plec no és purament flexural.

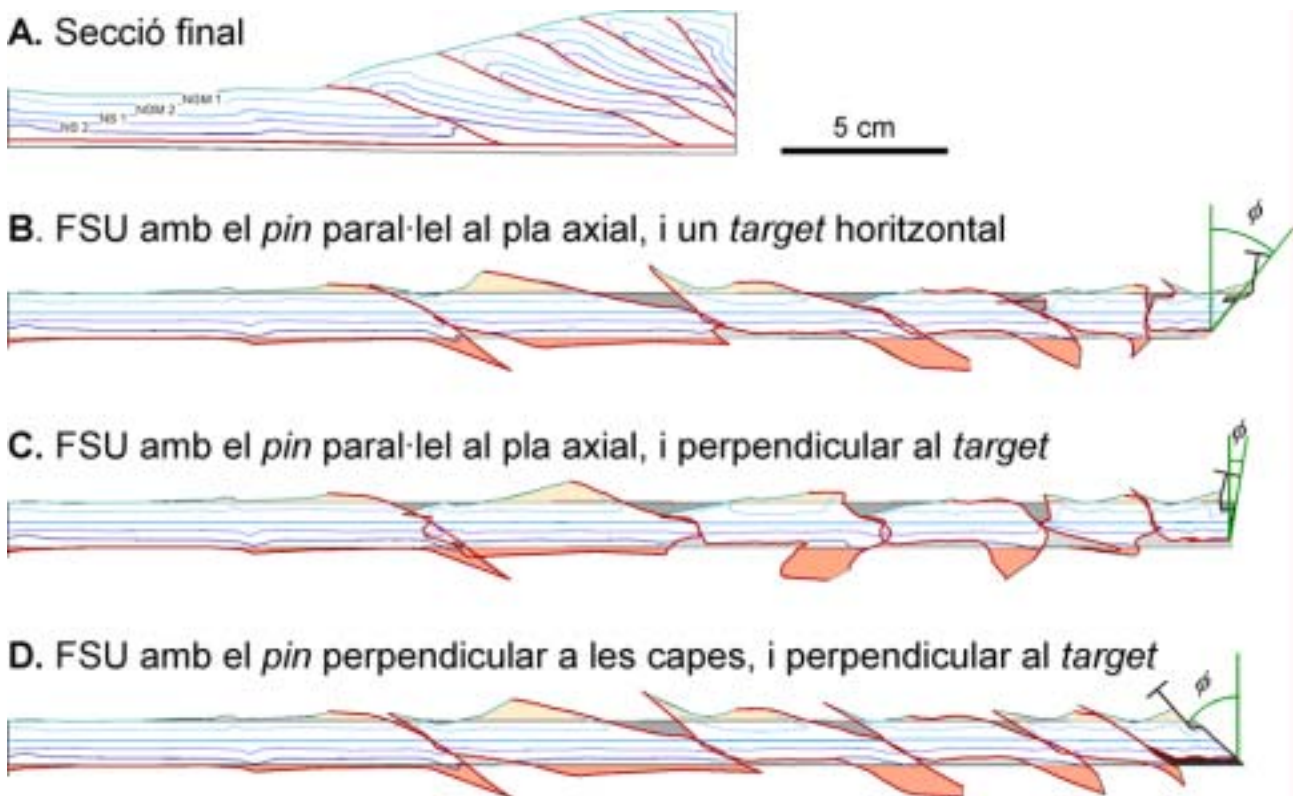
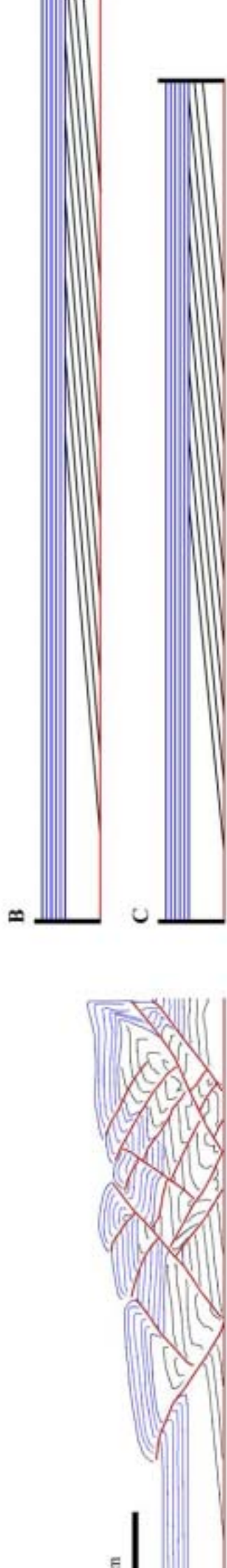


Fig. 5.13.- Restitució de la secció **B** per Flexural Slip Unfolding, utilitzant diferents *pins* i *targets*. S'observa com la cisalla angular (λ) varia en funció de la relació entre aquest dos elements. El desplegament dels nivells de *glass microbeads* comporta l'aparició de zones d'augment (colors taronges) i disminució d'àrea (colors grisos), respecte a unes superfícies inferior i superior hipotètiques, que posteriorment s'utilitzaran per restituir arealment la secció.

La situació canvia radicalment pel que fa referència als nivells de *glass microbeads*. El mecanisme de deformació d'aquestes capes és principalment penetratiu, i per tant, el funcionament d'un algoritme de



ió de la secció per parts (limitades pels encavalcaments), i ubicació de les direccions de cisalla i
cies *target* (color groc)



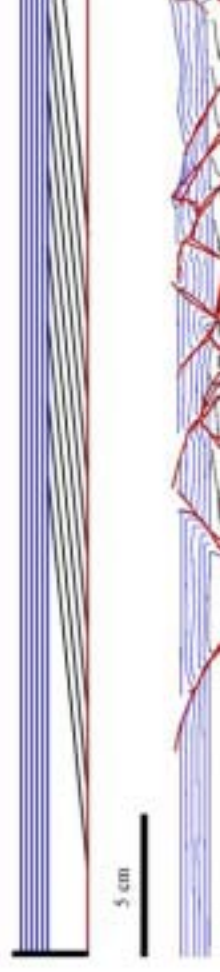
ció per SSU de cada part. Quan s'utilitza aquest algoritme de restitució, algunes superfícies
orientacions que generen geometries impossibles en aquests marc tectònic. Tot i així no s'ha
correcció, per tal de fer evidents els problemes d'aquest procediment



o individual de cada part, eliminació dels marcadors de cisalla i superfícies *target*, i
ció de la secció



5. Comparació entre la secció objectiu i la secció restituïda per SSU. S'observa que, d
mateixa manera que el FSU, l'algoritme funciona acceptablement per a la sèrie super
amb els marcadors horitzontals i presenta problemes a la sèrie inferior i la part poster
degut principalment a l'efecte de vora que aquest algoritme no té en consideració



desplegament per lliscament flexural, ha de generar problemes per definició. Per la capa que fa la funció de nivell d'enlairament, l'engruiximent de les zones corresponents a replans de bloc inferior es tradueix en una sobrevaloració de la profunditat de l'encavalcament basal per sota del marcador del nivell de sorra NS2, i en canvi, l'absència de material per sota dels replans de bloc superior genera buits en la zona corresponent al nivell d'enlairament en la restitució. Els nivells NGM1 i NGM2 presenten una deformació caracteritzada per plegament, principalment a la part frontal de les làmines encavalcants, i engruiximent, sobretot a la part caudal d'aquestes, generant en la restitució traçats de falla anòmals que comporten l'aparició de zones d'excés i zones de dèficit de material (fig. 5.13). Tot i així, el nivell NGM1 està molt afectat per processos superficials (esllavissades i col·lapses) que fan difícil l'avaluació de la seva deformació.

Pel principi de conservació de la superfície de la secció en deformació plana, les àrees d'excés de material han d'estar compensades per les àrees de dèficit més la part corresponent a escurçament per compactació en els nivells de sorra. En la taula 5.6 es presenten els resultats d'escurçament penetratiu en les restitucions per FSU de la figura 5.13 respecte al model inicial no deformat. En general, en tots els nivells de *glass microbeads* la superfície en excés és aproximadament un 5% major que la superfície deficitària. Aquesta diferència és deguda en part a errors acumulats pel procediment, però també al fet de separar les àrees d'excés i les de dèficit amb una superfície horitzontal, que pot portar a una infravaloració de l'augment de potència homogeni en les làmines posteriors del model. En vista dels resultats d'escurçament, sembla que l'opció més satisfactòria és la que utilitza *pins* paral·lels al pla axial i superfícies *target* perpendiculars a aquests, però si s'observa la figura 5.13, s'aprecia que les zones de rampa estan molt més ben solucionades en la restitució amb els pins perpendiculars als marcadors, per tant, i tenint en compte que els valors d'escurçament continuen dins un rang d'error acceptable, considero que en aquest cas continua essent una millor opció l'elecció de pins perpendiculars a l'estratificació en el cos de la làmina encavalcant per a la restitució amb l'algoritme FSU.

	÷ Àrea (%)		Eскурçament penetratiu horitzontal (%)	
	NGM1+NGM2	Nivell basal	Base	Sostre
B	11.9	5.3	10.5	6.7
C	5.7	0.4	9	9.7
D	5.9	4.8	7.2	13.1

Taula 5.6.- Valors de variació d'àrea (excés vs. dèficit) i d'escurçament penetratiu utilitzats per a les restitucions de la figura 5.13.

En conclusió, la restitució de seccions utilitzant l'algoritme *Flexural Slip Unfolding* no és simple i requereix una anàlisi de l'estil de la deformació abans de la seva aplicació. Tot i així, aquesta anàlisi no garanteix una resolució reeixida i ràpida. Variables com l'orientació del *pin* i les superfícies *target*, o l'elecció d'una superfície de referència condicionen significativament el resultat. D'altra banda, la pròpia restitució per FSU ens aporta informació sobre el mecanisme de deformació, ja que si aquest no és estrictament el lliscament flexural apareixeran incongruències, desplegaments diferencials, buits i superposicions, etc., que ens indicaran estructures que cal restituir utilitzant altres mètodes, perquè el seu mecanisme de creixement no és el que suposa l'algoritme. Quant a la restitució de seccions que impliquin

sèries discordants, l'algoritme FSU permet restituir superfícies obliqües, i per tant és millor que l'algoritme LLU, però els problemes són similars. Tanmateix, en aquests casos la selecció dels elements que defineixen la restitució és més complicada que en els models concordants, ja que ha de considerar les característiques geomètriques dels diferents trams presents a la secció.

La mida i forma de les diferents parts en què es divideixi la secció també condiciona el resultat, ja que pot ser que alguna de les superfícies a restituir es trobin fora de la zona constrenyida per la superfície de referència, problema que el programa soluciona projectant el seu límit. Per tant, cal localitzar les zones en què es produeix aquest fenomen i quan la projecció realitzada pel programa no sigui satisfactòria, fer-la manualment, operació que requereix la interpretació d'una porció estructura "inexistent" però necessària per completar el procediment.

En síntesi, l'èxit de l'aplicació d'aquesta tècnica requereix la iteració del procés de restitució per parts, analitzant les diferents variables possibles, fins a l'obtenció d'una solució satisfactòria. Cal tenir present (que en el seu defecte), el procés en sí és útil com a eina analítica i aporta informació que pot ser útil per a la comprensió de la geometria i cinemàtica de la secció.

Restitució amb Simple Shear Unfolding (Restore)

De la mateixa forma que amb els algorismes anteriors, la restitució utilitzant l'algoritme SSU implica un procés per parts (fig. 5.14). Si bé aquest mecanisme de deformació està descrit per a contextos extensius (*Inclined Shear*), s'ha aplicat a la secció Mdl5prflA04 per veure quin és el seu comportament en contextos contractius. En aquest cas, els criteris seguits per a la ubicació i orientació dels pins, les superfícies de referència i les superfícies *target*, són similars als del FSU.

El problema principal per l'elecció de la superfície de referència és la presència de plecs amb flancs invertits, perquè això comporta la restitució d'aquest flanc al mateix tram de la superfície *target* que el flanc normal, donant lloc a geometries anòmales, per tant, s'ha de fugir d'aquesta situació sempre que sigui possible, tot i que en aquesta secció no s'ha pogut fer sempre (fig. 5.15).

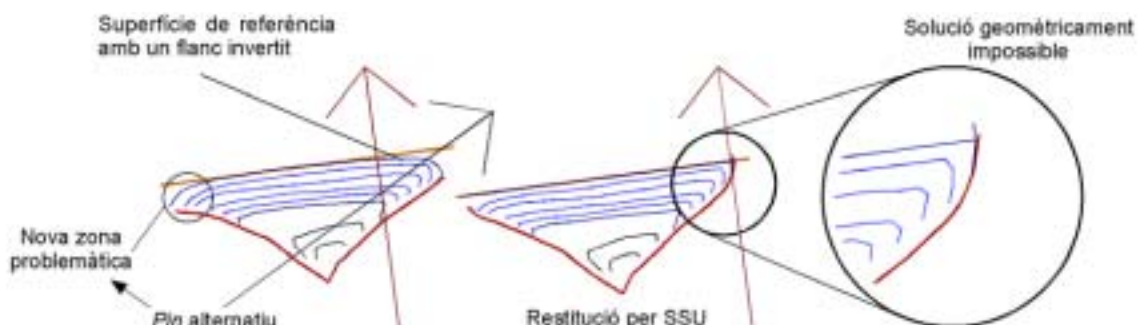


Fig. 5.14.- Problemes associats a l'ús de superfícies de referència amb flancs invertits. Com a conseqüència de la doble vergència de les estructures en tots els marcadors no hi ha solució alternativa a aquesta superfície.

A diferència del mètode anterior, quan s'escull la superfície *target* en algun dels blocs d'aquesta restitució, és millor la utilització d'una superfície horitzontal, obtenint-se millors resultats per a les ZDH, sobretot si el *pin* s'ha orientat paral·lelament a la falla (fig. 5.16 A). Per tant, si es compara la restitució per SSU amb les altres, s'aprecia clarament que els resultats obtinguts són geomètricament molt millors per a la part basal de l'encavalcament 5 i la zona més alta del prisma d'acreció, fet que indica que la cisalla paral·lela a les falles és el mecanisme de deformació dominant en aquestes àrees.

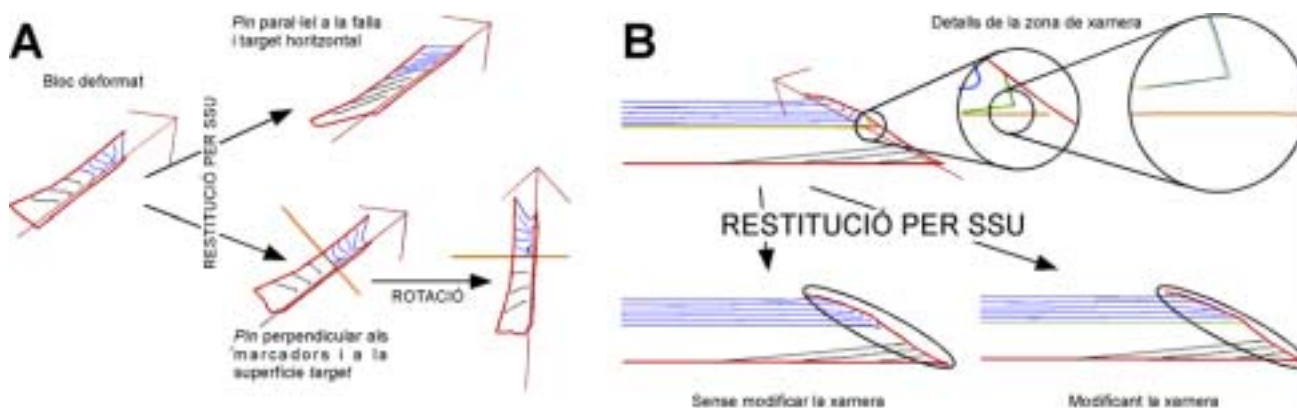


Fig. 5.16.- **A.-** Comparació de la restitució per SSU d'un bloc deformat heterogèniament, utilitzant una superfície *target* horitzontal (a dalt) i una altra d'inclinada (a baix). La restitució en dos passos que requereix el segon cas comporta una verticalització de les falles i un augment gran de potència. **B.-** Il·lustració d'una anomalia del procediment relacionada amb zones d'angularitat elevada. A dalt, es mostra una ampliació de la zona de xarxera en la que s'observa de color verd la modificació realitzada a la base de la sèrie horitzontal. El canvi efectuat és pràcticament imperceptible, però la seva influència és evident en la restitució.

Per algun motiu desconegut, alguns punts generen un sobredimensionament de la cisalla, expressada en irregularitats brusques de la superfície de referència, que poden o no transmetre's a la resta de marcadors. Interpreto això com una anomalia del procediment relacionada amb l'angularitat d'alguns marcadors, i sembla que també amb la densitat de punts i la intersecció del marcador amb la superfície *target* (fig. 5.16 B). La solució consisteix a suavitzar les corbes, o eliminar els punts que originen el problema, tot i que quan aquest canvi altera massa la secció deformatada, he considerat que no era oportú.

Contradient els plantejaments realitzats a priori, la valoració del conjunt de la restitució mostra un resultat més satisfactori que l'obtingut utilitzant l'algoritme FSU, i llevat de les zones de falla, que el de la tècnica LLU. En general, els problemes geomètrics que presenta la solució són molt similars als del FSU: sobrevaloració de la profunditat del nivell d'enlairament, superposicions i buits en les zones de falla, desplegament incomplet dels marcadors i augment de la complexitat de la restitució en les proximitats del mur mòbil. De la mateixa forma, també mostra la poca deformació que ha sofert el bloc basal adossat al mur mòbil, i l'engruiximent i partició de la deformació associats al nivells de *glass microbeads* (fig. 5.17).

L'escurçament horitzontal penetratiu calculat utilitzant aquest mètode és del 8.1%, el menor de tots els calculats amb els diferents algoritmes. Això és degut principalment a la millor aproximació que suposa aquests algoritme a la restitució de les ZDH, que al no preservar la longitud dels marcadors es veu menys condicionat pels errors d'interpretació de l'estructura discutits en els altres mecanismes (geometria de les

falles, ubicació dels *cutoff*, etc.), i en definitiva, a que aquest mecanisme de deformació sembla ser el que ha governat la deformació del model.



Fig. 5.17.- Reproducció de la part central de la restitució per SSU del model Mdl5prflA04 en la que s'indiquen algunes anomalies característiques d'aquest mecanisme

En síntesi, de forma similar als altres algoritmes, la restitució per SSU no genera una solució definitiva, però sí que aporta una aproximació vàlida com a eina analítica, completant la informació obtinguda a partir dels altres algoritmes. Per tant, a pesar que el mecanisme no sigui el característic d'un context concret, no deixa de ser aconsellable la seva utilització, com a una aproximació prèvia al problema plantejat, i com s'ha vist en aquest cas, arribant a indicar que aquest mecanisme pot ser el més apropiat en alguna situació puntual. De totes formes no cal oblidar que estem treballant amb un model de sorra amb les particularitats cinemàtiques que això suposa³.

Conclusions referents a la restitució dels talls dels models de sorra

Si bé els diferents algoritmes presenten problemes en la seva aplicació, la utilització sistemàtica dels tres mecanismes és una bona eina instrumental i analítica per a la restitució de seccions geològiques, ja que cada una aporta informació tant sobre la geometria, com la cinemàtica d'una secció, indicant quines són les possibles fonts d'error i quina pot ser la millor solució a un problema determinat. Partint d'aquesta afirmació, s'ha restituit per LLU els dos models estudiats, tenint en compte la informació subministrada per a cada un dels algoritmes en les zones que aquests no resolen (fig. 5.18, fig. 5.19).

La solució final que es proposa per a la secció Mdl5prflA04 (fig. 5.18 **D**) suposa un escurçament horitzontal penetratiu del 13.5%, un 0.75% menys que el calculat d'entrada per a la secció *target*, i no s'ha quantificat l'engruiximent del nivell de *glass microbeads*, ja que es desconeix quin és l'efecte que aquest factor produiria en la geometria de la secció restituïda. El procediment final ha consistit en la reconstrucció amb els marcadors restituïts per LLU, i la utilització dels resultats obtinguts per FSU i SSU com a referència per a la inclinació de les falles i la ubicació dels propis marcadors, el primer per a les làmines deformades per transport i rotació solidària i el segon per a les zones de deformació heterogènia.

Tot i així, el resultat no acaba de ser satisfactori ja que els marcadors de la sèrie superior no generen un límit posterior vertical, com és d'esperar a priori. De totes formes, si s'observa la figura 5.18 **C** s'aprecia que el problema coincideix en la restitució amb la ZDH adossada al mur mòbil (fig. 5.6), i que els dos blocs que es troben per sota la falla R5B presenten una geometria coherent si es restitueixen separatament. Per altra

³ La restitució de la secció **B** per SSU no ha aportat resultats coherents, per això no es discuteix.

banda, la irregularitat en el traçat del bloc superior d'aquesta falla desapareix si s'uneixen els *cutoffs* de bloc superior de la sèrie inferior i dels marcadors centrals de la sèrie superior (R5B'), obtenint-se una línia paral·lela a la restitució del bloc inferior de l'encavalcament R5B. Per tant, s'ha considerat que els nivells 12, 13, i 16 (taula 5.1) de la sèrie superior s'han sobrevalorat, i R5B s'ha desplaçat fins a coincidir amb R5B' (fig. 5.18 C i D).

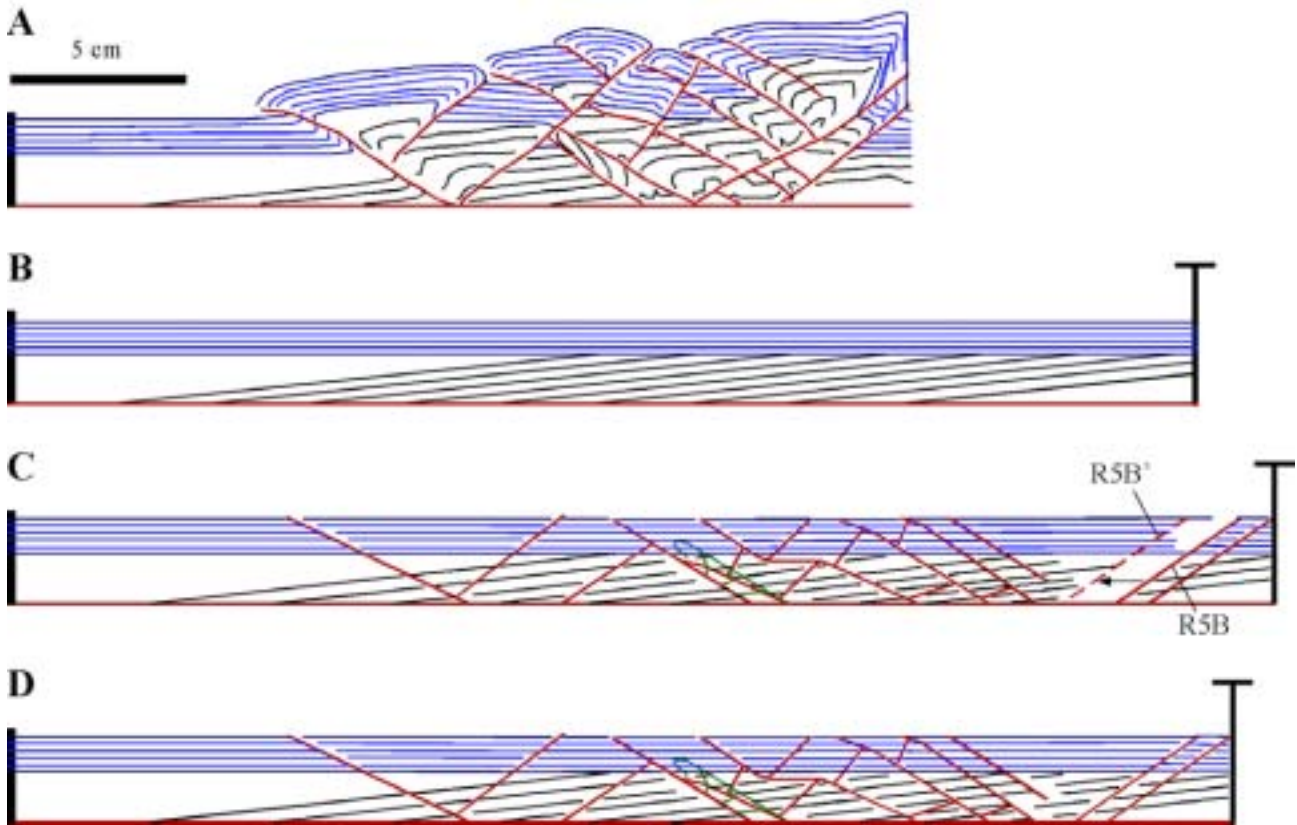


Fig. 5.18.- Restitució final de la secció Mdl5prflA04. **A.**- Secció deformada. **B.**- Restitució *target*. **C.**- Restitució en la que s'observa el buit en la part posterior del model en la restitució LLU. **D.**- Restitució amb les correccions esmentades al text. La ZDH de la base de l'encavalcament 5 només ha estat restituïda parcialment (color verd).

El procés final seguit per a la secció **B** és lleugerament diferent a l'utilitzat per a la secció Mdl5PrflA04, degut principalment a un major control del comportament dels nivells incompressibles. En aquest cas, els nivells de sorra s'han restituït per LLU, obtenint-se un escurçament horitzontal per compactació respecte al model inicial indeformat del 9.87%. Els nivells de *glass microbeads* s'han reconstruït assumint que la seva longitud restituïda és la mateixa que la dels nivells de sorra, i la seva àrea en la restitució és igual a la de la secció deformada (*plane strain*). Això resulta en un engruiximent homogeni del 11.8% de cada nivell de *glass microbeads* (fig. 5.19).

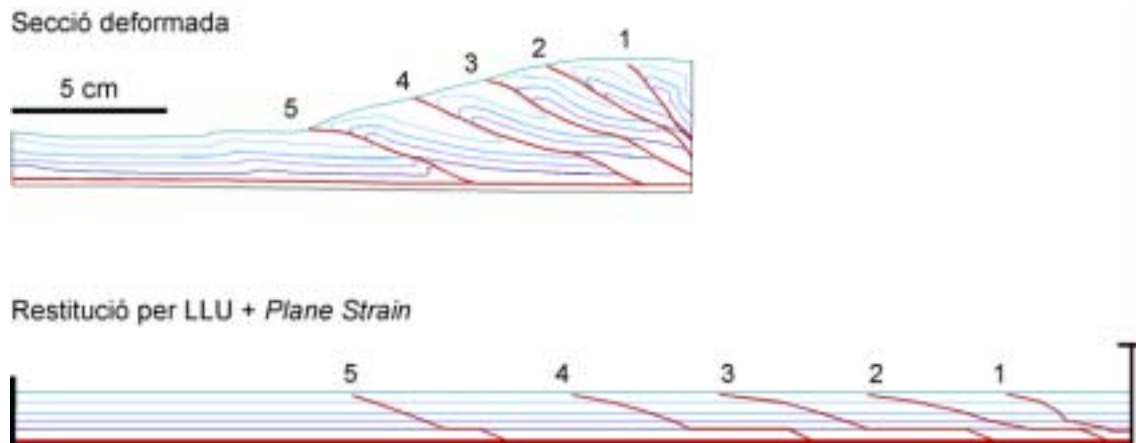


Fig. 5.19.- Restitució proposada per a la secció **B**. Cada nivell de *glass microbeads* s'ha engruixit homogèniament un 11.8%, i l'escurçament horitzontal penetratiu de tot el model és d'un 9.87%, respecte al model inicial indeformat.

Quant a les rampes, en arribar al nivell superior se'ls ha disminuït lleugerament la inclinació, i no s'han prolongat fins a la superfície del model. De totes formes, aquest canvi d'inclinació, observat en l'encavalcament 5, s'ha realitzat arbitràriament perquè no hi ha cap element que ens permeti mesurar l'angle de rampa, ja que a causa dels processos superficials dominants en l'evolució de la deformació d'aquest nivell, no existeix una correspondència entre la longitud de les rampes de bloc inferior i les de bloc superior, perquè la propagació de les falles es dona en part a través del material esllavissat progressivament durant el seu emplaçament. Per tant, existeix una transferència contínua de material del bloc superior al bloc inferior com a conseqüència de processos gravitacionals que és irrestituïble amb els algorismes del 2DMove, i que no s'atura amb l'encavalcament, sinó que s'allarga en el temps mentre es forma el prisma d'acreció, alterant el propi traçat de l'encavalcament.

Els replans intermedis en el bloc inferior s'han reconstruït per compensació d'àrees en cada làmina encavalcant, a partir de la longitud dels replans en el bloc superior i de l'àrea en excés en el bloc inferior, és a dir, s'ha transferit l'àrea en excés del nivell de *glass microbeads* basal a la zona de material deficitari sota el replà de bloc inferior. Les dades utilitzades en aquest procés s'han extret de la restitució per FSU amb el *pin* perpendicular a la capa de referència i a la superfície target (fig. 5.13 **D**).

5.2.2 Restitució geomètrica de les seccions de camp

A diferència dels models de sorra, en les seccions de camp l'estructura a restituir és una interpretació que integra les dades de camp i criteris geomètrics, i no es coneix la situació de partida, que és precisament un dels objectius del procés de restitució, juntament amb la validació de la secció. Per tant, el grau d'incertesa és més elevat. Per altra banda, l'escurçament conseqüència de la compactació no és un factor a tenir en compte, ja que no es dona en la mateixa magnitud que en els models de sorra, sempre i quan no es desenvolupin clivatges penetratius. En general, el procés seguit per a la restitució de totes les seccions és molt similar a l'utilitzat per als models de sorra, amb alguna variació conseqüència de les particularitats pròpies de cada una, que es discuteixen tot seguit.



per LLU mitjançant: Separació per parts de la secció



4

2

3

4

s pins



4

2

3

4



4

2

3

4



1

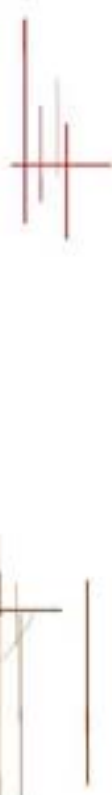
2



3



3



4

6.1. Separació de superfícies estratigràfiques (línies fines a la part superior) i falles (línies gruixudes inferior)



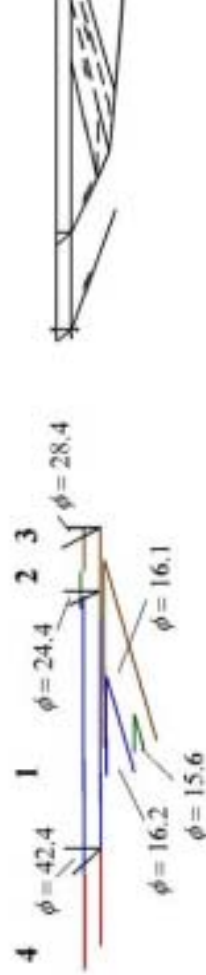
1

2

3

4

6.2. Reconstrucció de les capes horitzontals i rotació (α) de les inclinades. Allà on sigues'aplicarà cisalla paral·lela a les capes (ϕ).



4

1

2

3

4

$\phi = 42.4$

$\phi = 24.4$

$\phi = 28.4$

$\phi = 16.2$

$\phi = 16.1$

$\phi = 15.6$

6.3. Reconstrucció de les superfícies dels encavalcaments i ubicació de les parts rotades a la inicial



7. Superposició de resultats. En colors la restitució de partida, i en línies blaves gruixudes el resultat del mètode LLU del *ZDMove*



3

Restitució amb Line Length Unfolding

Per a il·lustrar el procés seguit per restituir les seccions amb aquest algoritme del programa 2DMove s'utilitza la secció del Coll de Fades de la zona de les Nogueres (fig. 5.20). Els passos seguits, són molt similars als anteriors, utilitzant el Buntsandstein com a *datum* horitzontal, i només es diferencien en la rotació dels nivells de la conca estefano-permiana, que es realitza per a cada superfície individualment, a partir de l'angle de discordança observat al camp per a cada nivell. Com que aquest mètode no té en compte el lliscament paral·lel a les capes, els *cutoffs* de les làmines encavalcants restituïdes no coincideixen. Això ha requerit aplicar un desplaçament de les capes per fer-les coincidir, el que significa que hi ha hagut un lliscament paral·lel a les capes de magnitud quantificable (fig. 5.20 6.2).

Els *pins* de cada secció s'han escollit perpendiculars a la base i al sostre del Buntsandstein, per tal de preservar-ne la potència, conservant així la seva àrea en la secció. No obstant, en restituir el tall, sorgeix un problema en el bloc que es troba entre els dos retroencavalcaments. En aquest cas, la longitud de la base i el sostre del Buntsandstein combinada amb el baix angle de les rampes que creuen aquest nivell, impossibilita l'elecció d'un *pin* perpendicular a l'estratificació que creui les dues superfícies (fig. 5.20 2-2). Aquesta situació no representa cap problema quan el tram que es restitueix és rectilini, però com que en aquest cas aquests nivells estan lleugerament plegats, la restitució resulta en un augment del gruix, degut a que la projecció de les capes fins intersecar el *pin* no respecta la conservació de la potència i els punts de tall estan més distanciats del que correspon. De la mateixa forma, en funció del tipus i orientació del plec es podria haver produït una disminució del gruix. Per minimitzar l'efecte d'aquesta sobrevaloració de la potència del Buntsandstein, he optat per un *pin* perpendicular a la base, en el seu *cutoff* de bloc superior en el retroencavalcament 3 (fig. 5.20).

Quant als resultats obtinguts, tot i la similitud amb la restitució inicial (fig. 5.20 1), lògica si es té en compte que el fonament del procediment seguit és el mateix per a les dues seccions, crida l'atenció que la longitud de la base de la formació Erill Castell és major en la nova restitució, implicant un augment de la profunditat de la inflexió replà – rampa, que es troba a una profunditat de 641m, 191m més profunda que la calculada per Saura (2000). Tot i així, l'escurçament horitzontal mínim és el mateix ($\neq l = 12\text{m}$, fig. 5.20 7), tenint en compte que els punts de referència utilitzats per a aquest càlcul no consideren l'escurçament associat als retroencavalcaments. Per tant, la diferència entre la restitució inicial i la restitució per LLU ha de ser resultat de la precisió en la mesura, ja que a part de la divergència en el gruix de la làmina d'Erta la diferència és pràcticament nul·la. Com que la nova restitució continua essent geològicament possible, la secció continua estant validada.

En la restitució de la resta de talls utilitzant aquest algoritme (fig. 5.21) s'ha seguit el mateix procediment, i els resultats obtinguts presenten més o menys les mateixes característiques que per a la secció de Coll de Fades.

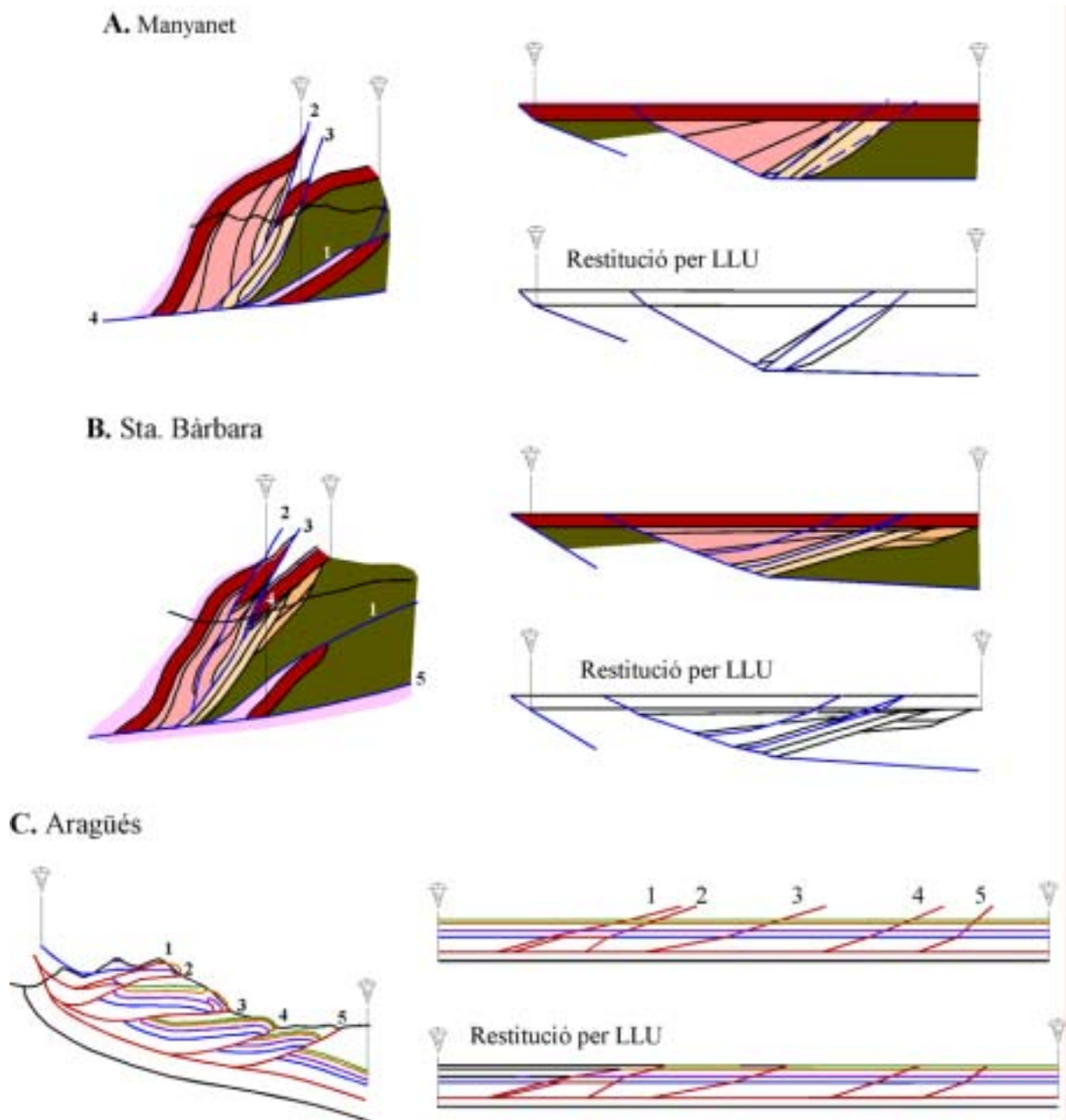


Fig. 5.21.- Comparació de les restitucions per LLU de les seccions de A.- Manyanet, B.- Sta. Bàrbara i C.- Aragüés amb les de Saura (2000) i Teixell i Koyi (2003). En les seccions de la Zona de les Nogueres s'ha indicat en blau les falles i en negre les superfícies estratigràfiques. En la secció d'Aragüés les falles estan representades en vermell, les superfícies estratigràfiques en blau i lila, i en negre en la restitució la part d'aquestes no representades en el tall geològic.

A la secció de Manyanet es manté el valor d'escurçament horitzontal prèviament calculat, que continua sense considerar la deformació associada als retroencavalcaments, i es repeteix l'augment de profunditat de l'encavalcament basal, deduït a partir de l'augment de longitud del contacte entre la formació Malpàs i la formació Peranera, i dels retroencavalcaments, que en aquesta secció han estat restituïts per LLU en els trams paral·lels a l'estratificació, com si fossin una capa més. La longitud restituïda de la base del Triàsic és de 6015m, 76m menys que en la restitució inicial (0.7 %), diferència atribuïble a la precisió dels mètodes.

L'increment del gruix d'aquesta làmina és de 77m (9.7 %), i a més, la restitució per ordinador comporta un canvi de la inclinació del replà basal, horitzontal en la restitució de Saura (2000), i inclinat 1.2° cap al nord en la nova solució.

Quant a la secció de Sta. Bàrbara, els resultats obtinguts s'ajusten molt als de la restitució inicial. Llevat de petits canvis d'angle a la zona d'inflexió replà – rampa, tant les longituds de les superfícies com els angles de les falles es mantenen idèntics en les dues seccions, probablement com a conseqüència del major grau de constrenyiment, ja que es disposa de més superfícies per restituir. L'augment de longitud de la base del Buntsandstein és de 49m (0.7%) i la inflexió replà – rampa és 44m menys profunda (6.1%), variacions atribuïbles a la precisió de cada tècnica.

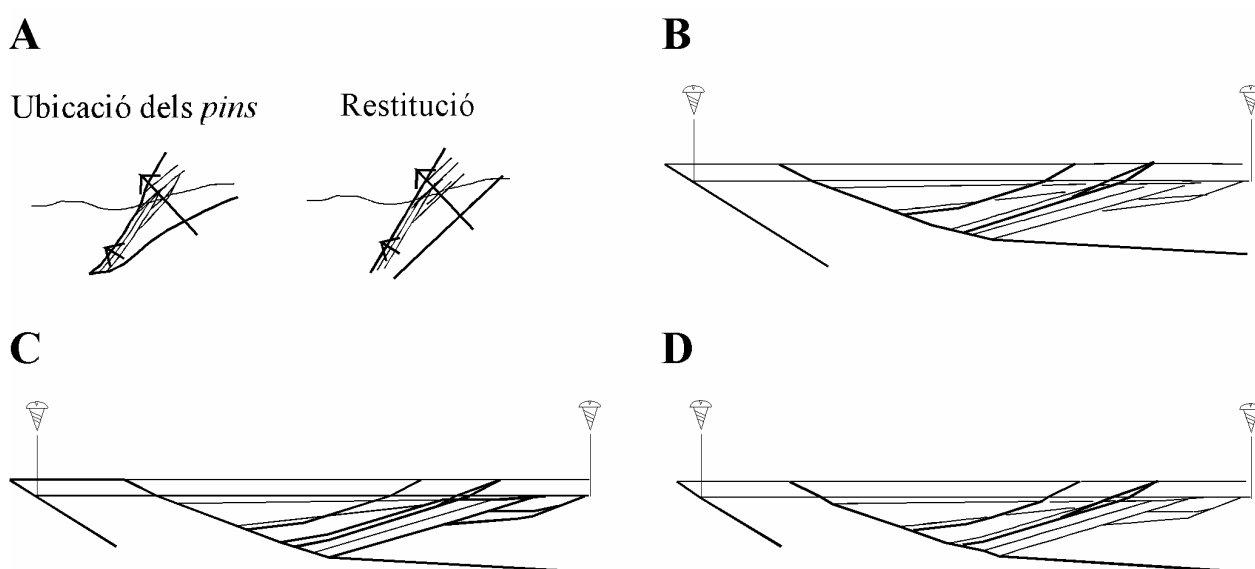


Fig. 5.22.- Restitució per LLU utilitzant dos pins de la secció de Sta. Bàrbara i comparació amb els altres resultats. **A.**- Exemple dels passos seguits en una de les parts de la secció. **B.**- Restitució per LLU amb 2 pins. **C.**- Restitució inicial (Saura, 2000). **D.**- Restitució per LLU amb un sol pin. Les línies fines corresponen a l'estratificació i les gruixudes a les falles.

Les característiques d'aquesta darrera secció em van fer plantejar la possibilitat d'utilitzar dos pins amb orientacions diferents, un per als nivells del Buntsandstein, i l'altre per als estefano-permians (fig. 5.22). A priori, tot i que els resultats del desplegament de les superfícies estratigràfiques ha de donar el mateix valor de longitud, però amb diferent orientació, aquest procediment permet conservar la potència dels nivells de la part inferior si es tria un pin perpendicular a aquests, i per tant podria aportar més informació per a la solució de la restitució. No obstant, en vista de la figura 5.22, sembla evident que la utilització de dos pins no aporta cap millora significativa ja que el resultat és el mateix, i per tant vaig descartar aquesta alternativa.

Finalment, la restitució per LLU de la secció d'Aragüés també dona un resultat quasi idèntic a la restitució de Teixell i Koyi (2003). En aquest cas, al tractar-se d'una sèrie planoparal·lela, tots els nivells són

perpendiculars als *pins*, i per tant, no cal rotar-los independentment, i l'única intervenció que ha de fer el geòleg és aplicar la cisalla paral·lela a les capes, que aquest algoritme no efectua, per tal que tots els *cutoff* de bloc superior i inferior corresponents estiguin en contacte. L'única diferència entre la restitució manual de Teixell i Koyi (2003) i la feta amb l'algoritme LLU es troba en el replà de l'encavalcament 2, situat a la base del Terciari, que surt 107m (2%) més llarg a la restitució LLU, resultat que he fet extensible a tota la seqüència.

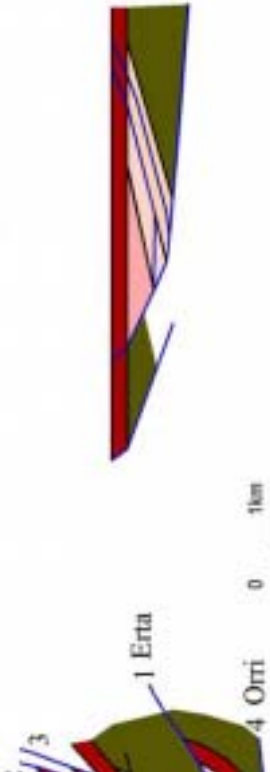
En síntesi, la restitució de talls de camp per LLU és una tècnica que dona resultats consistents, però que requereix per part de l'usuari un alt grau de reinterpretació sobretot en seccions que incorporin sèries amb discordances angulars, ja que no conserva paràmetres com la potència dels estrats inclinats, els angles entre les capes o entre les capes i les falles. Per tant tampoc permet la restitució de superfícies no rectilínies abans de la deformació, com poden ser les falles, la topografia o, en el cas de la zona de les Nogueres, el contacte entre les conques estefano-permianes i el sòcol Hercinià. Per altra banda, la ubicació dels *pins* no és tan crítica si es coneix la potència dels diferents nivells i l'angle entre les superfícies obliqües, ja que si es pot assumir que aquests angles no han canviat significativament durant la deformació, es poden realitzar individualment les rotacions necessàries. La cisalla paral·lela a les capes està determinada pels angles de falla i s'aplica després del desplegament d'aquestes. Tot això fa que sigui una eina ideal per a seqüències planoparal·leles com la d'Aragüés, però implica un major tractament de les variacions estratigràfiques i angulars quan coexisteixen trams amb diferent orientació primària.

Restitució amb Flexural Slip Unfolding

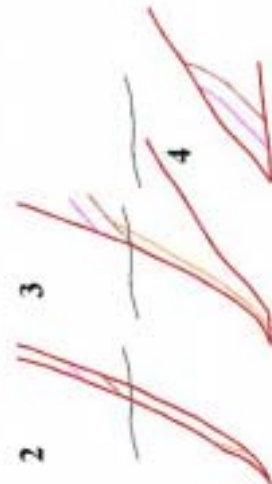
El procés seguit per a la restitució mitjançant aquest algoritme és el mateix que el descrit per als models de sorra. És a dir, separació per parts de la secció, ubicació dels pins i les superfícies de referència i *target*, desplegament per parts, i reconstrucció de la secció (fig. 5.23). En aquest cas, però, degut a la complexitat de les seccions de la zona de les Nogueres, els problemes generats per l'aparició de buits i superposicions són més importants, i s'ha hagut de buscar solucions alternatives.

En la restitució per FSU de la secció de Coll de Fades s'ha utilitzat la base o el sostre del Buntsandstein com a superfície de referència, en funció de quin sigui el marcador de major longitud per garantir el màxim constrenyiment possible, i el *pin* s'ha disposat perpendicular a aquestes superfícies. El *pin* també s'ha utilitzat per a construir la superfície *target* mitjançant LLU (com en els models de sorra). Després de desplegar cada part individualment, es reconstrueix la secció completa utilitzant com a *datum* la base del Buntsandstein (fig. 5.23 6)

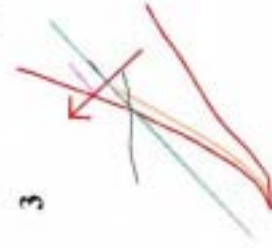
En el resultat d'aquest procés s'observa l'aparició de buits i solapaments entre cada bloc, i a més, si se superposa a la restitució inicial, també apareixen zones d'excés i de dèficit d'àrea (fig. 5.23 7). Aquestes zones corresponen principalment als replans de bloc superior i de bloc inferior dels retroencavalcaments que



de la secció

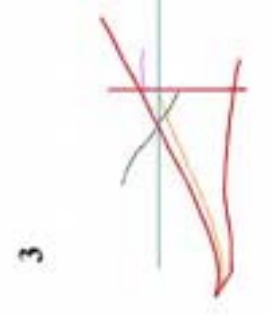


3. Ubicació dels pins i de les superfícies *target*

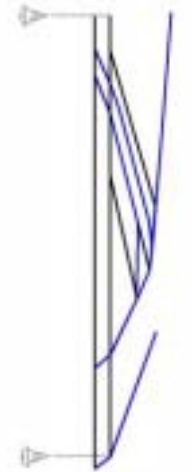


superfícies de referència

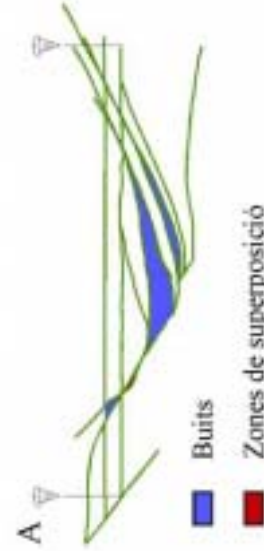
5. Rotació de les superfícies *target* a l'horizontal



restitució per FSU un cop reconstruïda (esquerra) i la restitució inicial (dreta). En blau camients



respecte a la restitució de partida (B)

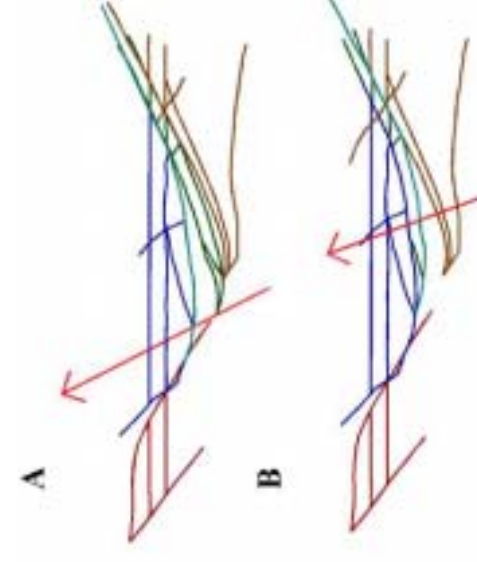


- Buits
- Zones de superposició

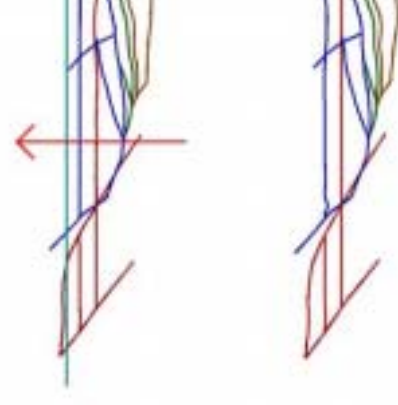


- Excés d'àrea en la restitució
 $\Delta A = 0.52 \text{ km}^2$
- Dèficit d'àrea en la restitució
 $\Delta A = 0.26 \text{ km}^2$

8. Restitució dels encavalcament en dos passos, primer el més meridional (A) i després el septentrional (B). Orientació del *pin* perpendicular als nivells estefano-permians.



9. Restitució de la base del Triàsic horitzontal



10. Comparació de resultats, a la dreta el resultat utilitzant el mètode FSU en dos passos restitució *target*



afecten els materials estefano-permians¹, i es deuen principalment al fet que les superfícies de referència no són representatives per a bona part de la làmina, i tota la restitució d'aquest bloc es fa a partir de la projecció de les superfícies de referència que realitza automàticament el propi programa (fig. 5.11).

La solució que s'ha proposat per aquest problema és l'aplicació d'un segon cicle de desplegament per FSU (5.23 8). En aquesta segona fase, que també s'ha realitzat per parts, s'ha utilitzat com a superfícies *target* i de referència els replans de bloc superior i inferior, respectivament, dels retroencavalcaments que limiten cada part. S'ha començat per la unitat més meridional de la secció (que és la que està més constrenyida), i s'ha continuat amb els blocs subjacents consecutivament. L'orientació dels *pins* s'ha definit perpendicular als estrats estefano-permians, assumint que durant la deformació, a més de la cisalla paral·lela a les capes del Buntsandstein, també existeix en major o menor mesura un lliscament a favor dels nivells inferiors, donant d'aquesta forma un significat geològic a aquesta segona etapa de desplegament². Després de diverses iteracions vaig observar que la millor opció era situar els *pins* als *cutoffs* de la base del Buntsandstein, minimitzant d'aquesta forma els efectes d'aquesta segona etapa de desplegament en el Triàsic. Finalment, i per tal d'obtenir una restitució respecte un *datum* horitzontal (la base del Buntsandstein), s'ha realitzat una última restitució de tot el conjunt per FSU (fig. 5.23 9).

Pel que fa als desajustos en l'angle de rampa que apareixen entre les làmines encavalcants d'Erta i d'Orri he intentat seguir el procediment descrit en el paràgraf anterior, però no he obtingut cap opció vàlida que em permetés utilitzar les rampes de bloc superior i bloc inferior de l'encavalcament d'Erta com a superfícies *target* i de referència respectivament, ni un *pin* geològicament coherent. En les diferents iteracions es produïa un augment progressiu de la potència del Triàsic en allunyar-nos de l'encavalcament d'Erta, o bé un augment de la inclinació en el mateix sentit, acompanyat d'una disminució de la potència. Per tant, s'ha deixat aquest bloc tal com queda després de la primera fase de desplegament, considerant que la dispersió del bloc inferior és derivada del procés de restitució, i assumint que el traçat d'aquesta falla és el del bloc superior. Aquesta solució no altera la restitució de la resta de la làmina encavalcant d'Orri.

El resultat final (fig. 5.23 10) s'aproxima suficientment a la restitució *target*, a excepció de la profunditat de l'encavalcament basal, que tal com passa amb la restitució per LLU és major, situant-se 125 m per sota, suggerint també que aquest valor havia estat infravalorat. Quant a la longitud horitzontal de la restitució de la base del Buntsandstein, l'augment és de 38 m (0.7%), dins un marge d'error acceptable, sobretot si es té en compte que en total s'ha aplicat tres cicles de desplegament i que encara existeix una zona sense restituir on l'encavalcament d'Erta creua el Buntsandstein. Pel que fa al sostre d'aquest nivell, la seva longitud entre el *cutoff* de l'encavalcament d'Orri i el límit caudal de la restitució és lleugerament superior al de la secció inicial, però aquest augment es veu compensat quasi en la seva totalitat pel buit que existeix entre el *cutoff* de bloc superior i el de bloc inferior en l'encavalcament d'Erta. Per altra banda, si es considera com a superfície en excés el triangle que defineixen els límits caudals de la base i el sostre del Buntsandstein (fig. 5.24), i es

¹ En utilitzar el terme "replà" en aquest context, faig referència als trams dels retroencavalcaments que són paral·lels a l'estratificació dels materials estefano-permians.

compara amb l'àrea deficitària a la part frontal de la làmina encavalcant d'Erta, es troba que aquesta és un 6% superior. Per tant, podem dir que pràcticament es compensen, permetent-nos assumir que l'angle de rampa obtingut mitjançant FSU pel bloc inferior de l'encavalcament d'Orri és vàlid. Això implica que l'augment d'àrea de la part caudal correspon a la cisalla angular (*backshear*, λ) i és el resultat d'utilitzar pins perpendiculars a l'estratificació i no paral·lels al pla axial dels plecs d'inflexió de falla. Per tant, a diferència de la secció inicial, la nova inclinació de la rampa serà de 30°, 15° menor, resultat molt més coherent en un context compressiu. Quant a la potència del Buntsandstein, aquesta es manté al voltant dels 200m, igual que a la restitució *target*, amb variacions tant positives com negatives que es troben dins un rang acceptable (fig. 5.24), generades principalment durant la segona fase de desplegament (fig. 5.23 6 i 10).

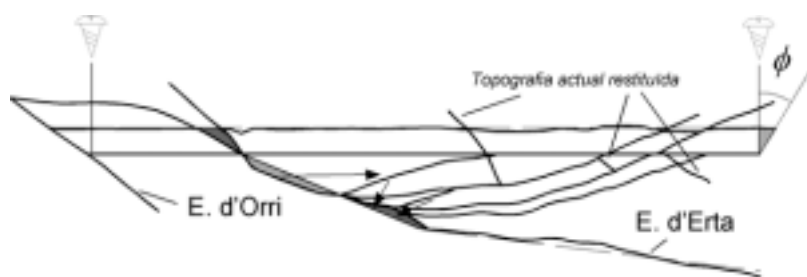


Fig. 5.24.- Restitució per FSU de la secció de Coll de Fades, en la que s'indiquen les zones d'excés i dèficit de superfície en color gris, la cisalla angular (λ) i les envolupants del sostre del Buntsandstein i l'encavalcament d'Erta en línies discontinües

La part inferior de la restitució, corresponent a la conca estefano-permiana, presenta una major divergència. Una part d'aquesta variabilitat és conseqüència del desplegament en dues etapes, i una altra del menor grau de control sobre l'estructura. Un cop acceptada la necessitat d'una segona etapa de desplegament, tenint en compte que aquesta no ha estat aplicada al fragment limitat per les falles 1 i 2, és probable que el traçat curvilini de la rampa de bloc superior de l'encavalcament d'Erta en la formació Peranera no sigui correcte, i conseqüentment es generi una superposició del bloc superior al bloc inferior (fig. 5.24). Aquest supòsit requereix una zona de compensació d'àrea, que he ubicat a la part basal d'aquesta rampa, on la geometria és més complexa i la solució per FSU presenta un traçat molt irregular. Evidentment, aquesta compensació no és directa ja que la zona excedentària conté la formació Peranera, i la deficitària correspondria a les formacions Erill Castell i Malpàs, però si compensem l'excés d'àrea a la zona de contacte entre les formacions Peranera i Erill Castell, es pot transferir subseqüentment aquesta compensació als nivells inferiors (fletxes en la figura 5.24).

Quant a les irregularitats de la part basal de la conca i de l'encavalcament basal, aquestes són una transferència de les variacions de potència del Triàsic inferior que es generen en el tercer cicle de desplegament per FSU, i que el funcionament d'aquest algoritme de restitució magnifica. En conseqüència

² Els termes fase i etapa en aquest apartat fan referència a passos consecutius en el procés de restitució, sense que això impliqui cap episodicitat de la deformació en la naturalesa.

opto per una suavització d'aquestes superfícies, definint una envolupant amb una inclinació homogènia inclinada 7°, més que en la restitució inicial (fig. 5.24).

Un dels avantatges de la tècnica FSU és que permet la restitució de superfícies irregulars com la topografia actual (fig. 5.24) o la ubicació de qualsevol tipus de dada puntual, lineal o de superfície, i per tant, es pot mostrar en la reconstrucció de l'estadi pre-deformació quina és la posició que ocupaven en aquell moment aquests elements, i fer evident quina part ha estat erosionada i quina es troba en profunditat en l'actualitat. Així es pot visualitzar fàcilment quin és el grau de constrenyiment del resultat final.

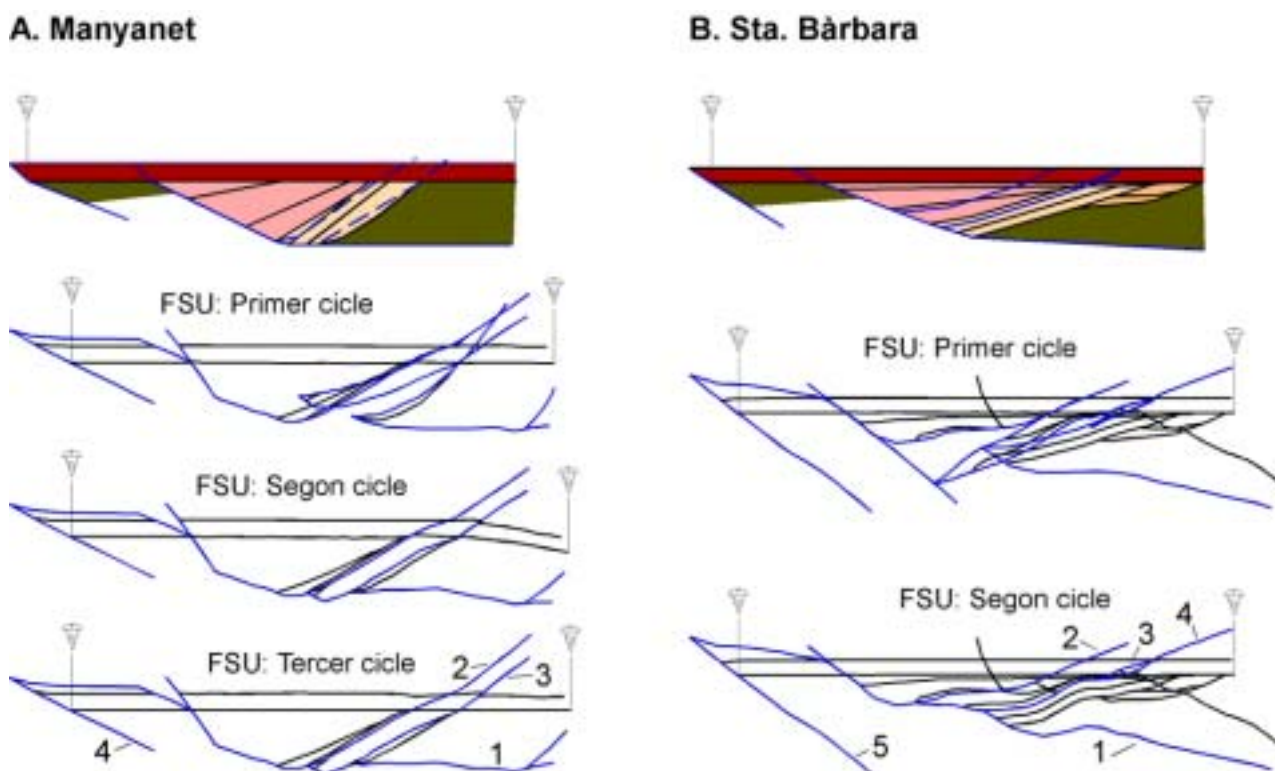


Fig. 5.25.- Cicles de restitució per FSU de les seccions de Manyanet i Sta. Bàrbara. El paral·lelisme entre el sostre i la base del Buntsandstein en la restitució de la secció de Sta. Bàrbara fa innecessari un tercer cicle.

La restitució per FSU de les seccions de Manyanet i Sta. Bàrbara presenta la mateixa problemàtica que la de Coll de Fades, i per tant també s'ha hagut d'utilitzar més d'una etapa de restitució. En els dos casos, però, sorgeixen problemes en la primera fase que han de ser solucionats abans de passar a la segona per tal de minimitzar-ne els efectes, i obtenir uns resultats analitzables. En el cas de la secció de Manyanet, el transport associat al retroencavalcament 3 és significatiu, i això implica que els angles de falla en la secció abans de restituir siguin molt diferents. Aquest canvi d'angle es reflecteix clarament en la restitució, comportant una superposició de part del Buntsandstein, que es tradueix, després del segon cicle de FSU en una inclinació de la part posterior de la restitució acompanyada d'un augment de longitud amb pèrdua de potència (fig. 5.26 A). En canvi, en la secció de Coll de Fades el problema el genera el sinclinal de bloc inferior del retroencavalcament 2. Al triar com a superfície de referència la base del Keuper, que no presenta aquest

sinclinal, el FSU no el desplega, i conseqüentment, tampoc condiciona el desplegament de la part inferior d'aquesta làmina, fet que comporta l'aparició d'irregularitats en la restitució final (fig. 5.26).

Un cop realitzades aquestes consideracions s'ha continuat la restitució de les seccions, realitzant les correccions allà on fossin possibles, i obtenint-se els resultats que es presenten a la figura 5.26. En la restitució de la secció de Manyanet cal tenir en compte que no s'ha aplicat cap correcció entre el primer i el segon cicle. En general, la solució és acceptable, però la superposició que es produeix durant la primera etapa de desplegament es tradueix en un escurçament d'un 1.5% i en un allargament del 2.5% en la segona, acompanyat d'una disminució de la potència al final del procés. De totes formes, la inflexió replà – rampa se

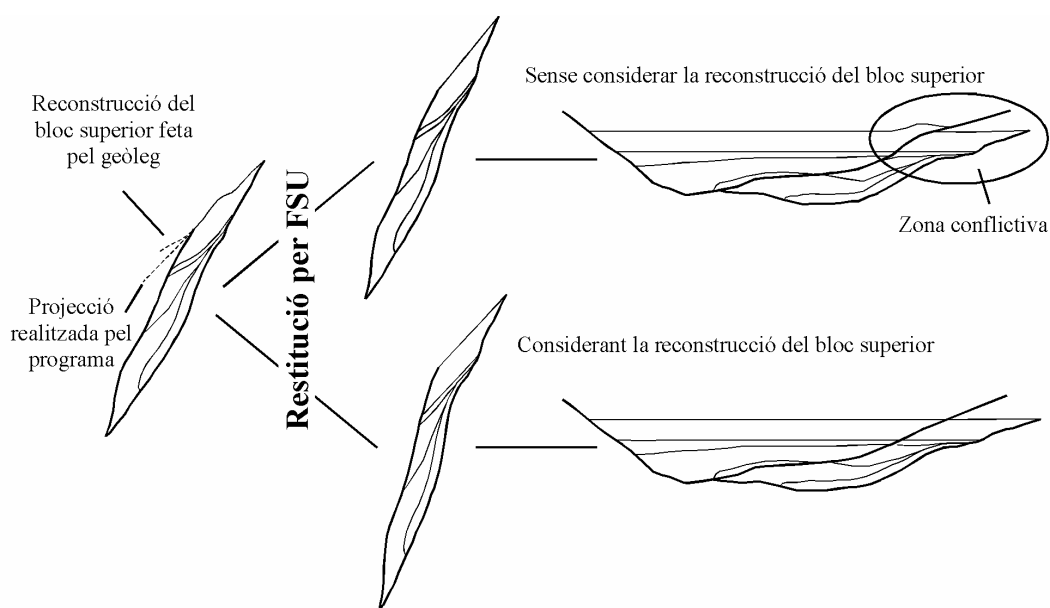


Fig. 5.26.- Il·lustració de l'efecte de no considerar la prolongació d'una estructura més enllà del fragment que es restitueix. En aquest cas, la facilitat de reconstruir la part que falta, permet solucionar el problema. Tot i així, la part més allunyada de la superfície de referència continua estant poc constrenyida, i segueix essent necessària una segona etapa de restitució.

situa 1m (0.1%) per sobre del calculat en la restitució de partida i a partir d'aquest punt, el traçat de l'encavalcament continua més o menys paral·lel al previst. Pel que fa a la rampa de l'encavalcament d'Erta en creuar el Buntsandstein es poden considerar vàlids els 30° deduïts per LLU si considerem que el *pin* utilitzat en la part superior és perpendicular a aquest nivell, sense considerar la orientació del pla axial de l'anticlinal de rampa, i per tant obviant la cisalla angular. En aquest cas, però, l'error acumulat a la part posterior de la restitució, com a conseqüència del desplegament cíclic, no ens permet veure si aquesta cisalla es manifesta en forma d'un augment de longitud del sostre del Triàsic inferior.

El traçat curvilini de l'encavalcament d'Erta en aquesta restitució té el mateix origen que en la restitució de la secció de Coll de Fades. És a dir, es tracta d'una conseqüència de no haver aplicat la segona etapa de desplegament al fragment situat entre les falles 1 i 2 (fig. 5.25 A). De la mateixa forma que en el cas anterior, aquesta restitució significaria una compensació de la superfície a la base de la formació Peranera amb la subseqüent rotació de les superfícies situades per sota. Aquest procés suposa un augment de la inclinació dels

retroencavalcaments, que es correspon amb un augment de l'angle de rampa en creuar el Buntsandstein, originat per la cisalla paral·lela a les capes. D'aquesta forma, el resultat final seria molt més pròxim a l'obtingut per LLU i a la secció *target*, reforçant la seva validesa.

Tal com passa amb les restitucions descrites prèviament, la de la secció de Sta. Bàrbara dona bons resultats per a la part horitzontal, però es distancia significativament de la secció inicial en profunditat (fig. 5.25 **B**). La longitud de la base del Buntsandstein sofreix un augment d'un 0.3%, molt satisfactori si es té en compte els diversos cicles de desplegament, i la profunditat del *cutoff* de la base de la formació Erill Castell es troba 76m (10.5%) menys profunda que a la restitució *target*, on coincideix amb la inflexió de l'encavalcament. En aquest cas, la secció es veu afectada per un possible error en el càlcul de l'angle de rampa de l'encavalcament d'Orri en la secció inicial ja que es va dibuixar consistent amb el de la resta de seccions, és a dir, de 45°. Si considerem que el nou angle hauria de ser de 30°, com he obtingut en les seccions anteriors, la coincidència entre la rampa de bloc superior i la de bloc inferior de l'encavalcament d'Erta en el Buntsandstein desapareixerà, o implicarà un escurçament del sostre d'aquest nivell respecte a la base, resultat de la cisalla angular corresponent.

Pel que fa a la irregularitat del traçat de l'encavalcament d'Erta, torna ser aplicable el procés suggerit per a les seccions de Coll de Fades i Manyanet. O sigui, que cal realitzar una compensació de la superfície en excés del bloc superior al contacte entre les formacions Peranera i Erill Castell que a la seva vegada es transmetria a parts més profundes de la secció.

En aquest cas, doncs, per validar la secció caldrà efectuar algunes correccions que incorporin l'augment important de la profunditat de la inflexió de l'encavalcament d'Erta i el canvi d'angle de l'encavalcament d'Orri amb el conseqüent augment de la longitud del sostre del Buntsandstein.

L'alt grau de control de l'estructura del tall d'Aragüés ha estat aprofitat per valorar quina és la importància de l'elecció d'un o altre nivell com a superfície de referència, i quin és l'efecte de restituir una estructura si només es consideren els elements estructurals presents en el tall, o si en canvi es té en compte l'efecte de deformacions superposades. És a dir, en el cas d'Aragüés, com canvia el resultat obtingut si només es restitueixen les escates que formen l'estructura o si abans es restitueix el plegament de tot el conjunt (sinclinal de Bernera) que es va produir per l'emplaçament més tardà del mantell de Gavarnie subjacent (fig. 5.27). Per altra banda, ja que aquest algoritme està definit per a sistemes d'encavalcaments emplaçats per lliscament flexural, també s'utilitza el procés per avaluar la interpretació d'Alonso i Teixell (1992) referent a la superposició d'una deformació heterogènia als mecanismes de cisalla flexural.

En tots els casos el procés s'ha realitzat utilitzant *pins* paral·lels al pla axial dels plecs de rampa, com a superfície de referència la base del Terciari (fig. 5.27 **B** i **D**) o les calcàries ilerdianes (nivell intermedi de les calcàries de terciàries, fig. 5.27 **C** i **F**), i com a superfície *target* la resultant de desplegar-les per LLU.

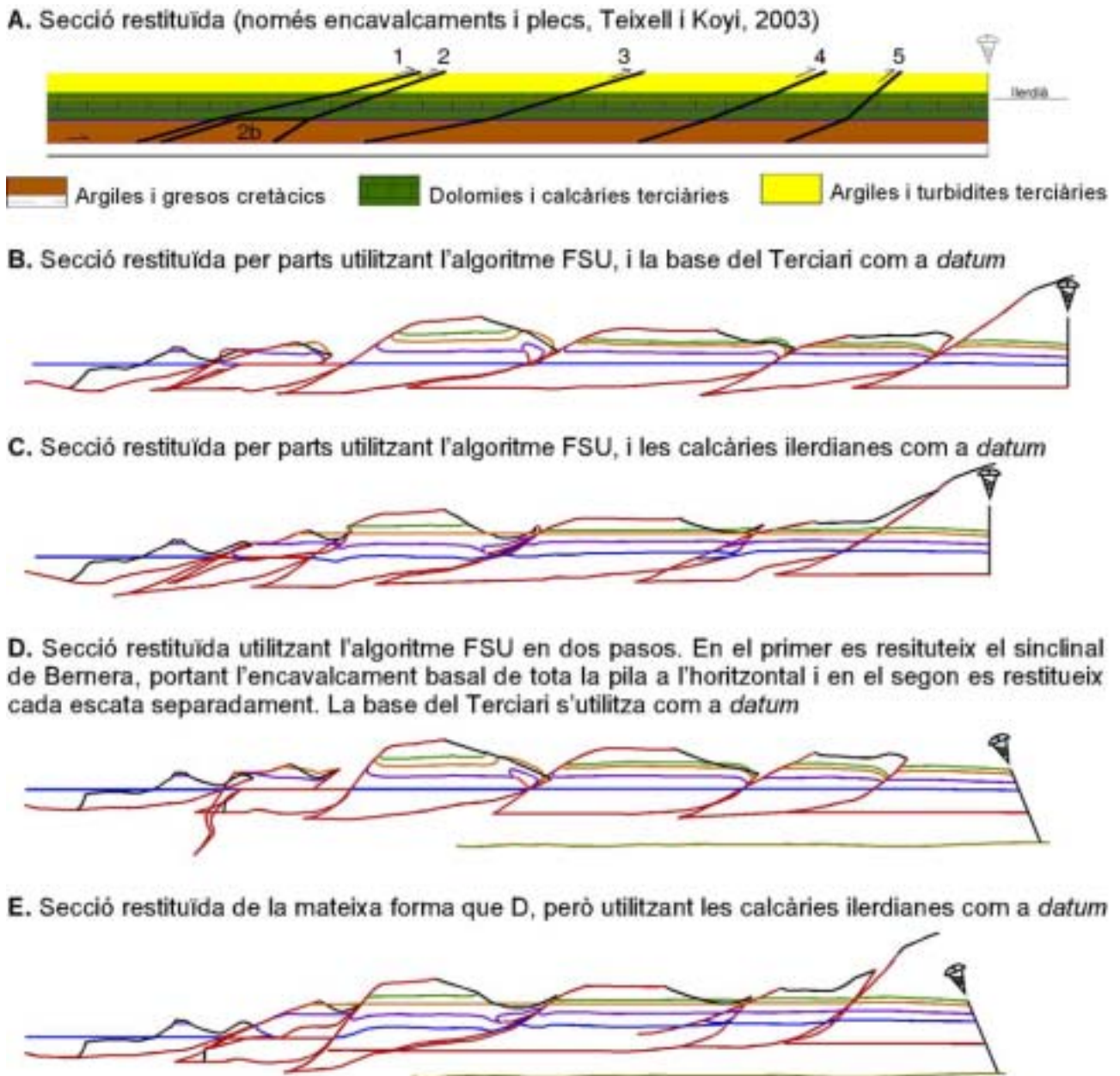


Fig. 5.27.- Restituïció de la secció d'Aragües utilitzant diferents superfícies de referència i sense desplegar el sinclinal de Bernera (**B i D**) i desplegant-lo (**C i E**). En totes les seccions s'ha utilitzat una superfície *target* horitzontal i els pins paral·lels al pla axial.

Al contrari del que seria d'esperar en una seqüència planoparal·lela plegada exclusivament per lliscament flexural, els resultats són molt irregulars, sobretot a les proximitats de les rampes. En general, s'observa que en les restitucions en les que s'ha utilitzat la base del Terciari com a superfície de referència el desplegament de la resta de nivells disminueix en pujar en la sèrie, mentre que en les altres restitucions es produeix un sobredesplegament de les capes inferiors. Per altra banda, el traçat de les falles resultant de les restitucions és també molt irregular, i la correspondència entre el bloc inferior i el bloc superior d'un mateix encavalcament no és completa, i apareixen buits i zones de superposició en allunyar-nos de la superfície de referència. El cas més evident és el del replà de bloc superior de l'encavalcament 2 que mai coincideix amb el de bloc

inferior, que sempre és més llarg, i fins i tot arriba a generar un buit important en la restitució en dues fases utilitzant com a nivell de referència les calcàries terciàries (fig. 5.27 E). L'explicació a aquest desajust es troba en el poc constrenyiment que es té en la restitució del *horse* basal sobre l'encavalcament 2, ja que no conté cap marcador, i per tant, cal decidir on es troba la inflexió rampa – replà de bloc inferior. Part de la diferència en el grau de desplegament en funció del nivell de referència és deu a que quan s'utilitza la base del Terciari, que no presenta anticlinals de rampa, la projecció que el programa realitza per completar la restitució no genera el desplegament de les estructures que té per sobre (fig. 5.27 B i D). En canvi, en utilitzar la base de les calcàries ilerdianes, que en estar plegades constitueixen un referent més bo per al plegament flexural, continua produint-se un sobredesplegament (fig. 5.27 C i E), fent evident que en l'emplaçament d'aquesta pila d'encavalcaments el lliscament flexural no era l'únic mecanisme de deformació, i que part dels plecs estan generats per algun altre mecanisme, confirmant les tesis d'Alonso i Teixell (1992) sobre la superposició de plegament flexural i deformació heterogènia en els *forelimbs*, juntament amb una partició de la deformació entre plecs d'inflexió de falla i plecs de propagació de falla en funció dels materials.

En analitzar les diferents restitucions, s'observa que l'escurçament entre la *pin-line* frontal i el límit caudal de la base dels encavalcaments depèn del nivell de referència triat, de tal forma que quan més alt és aquest, menor és l'escurçament, tant per a les restitucions que desfan primer el sinclinal de Bernera, com les que no ho fan. A més, el nivell de referència també condiciona el grau de desplegament del *forelimb*, que és major quan més alt sigui el nivell. En els casos en què no s'ha fet prèviament el desplegament del Sinclinal de Bernera (fig. 5.27 B i C), l'augment de longitud respecte a la restitució de Teixell i Koyi (2003) és del 4.4% per a la base del Terciari i del 2.2% per a les calcàries ilerdianes. Part de la variació entre una i altra ($\pm l = 7.8\%$) és deguda a la superfície de referència utilitzada per juxtaposar les escates en l'encavalcament 2. En utilitzar com a superfície de referència la base del Terciari el seu *cutoff* de bloc superior s'ha juxtaposat a la inflexió rampa – replà del *horse* subjacent (2b), generant un espai buit en el Terciari entre els blocs superior i inferior de l'encavalcament 2. En canvi, quan he utilitzat les calcàries ilerdianes com a superfície de referència, la seva juxtaposició ha generat una superposició dels gresos cretacs dels blocs superior i inferior. Per veure quin pes té en la variació de l'escurçament aquesta part de la restitució, he reconstruït l'encavalcament 2 de la figura 5.27 C utilitzant el *cutoff* de la base del Terciari, i la divergència en el resultat és molt menor però encara existeix una petita diferència ($\pm l = 3\%$).

Les restitucions per FSU en les que s'ha aplicat una primera operació de desplegament del sinclinal de Bernera (fig. 5.27 D i E) també mostren un augment de la longitud restituïda de la base del Terciari de 5.6% i 1.6%, respectivament, tot i que la diferència entre les restitucions és menor ($\pm l = 4\%$). Però el canvi més destacable entre aquestes restitucions i les anteriors és la inclinació cap a l'avantpaís del límit frontal que implica una disminució de l'escurçament horitzontal en pujar en la sèrie en una mateixa restitució, que en els dos casos es troba pròxim a una diferència de l'1% entre la base del Terciari i la base del grup d'Hecho. Aquesta variació correspondria a una cisalla angular de 22° generada durant la formació del sinclinal de Bernera, i també comporta un augment de l'angle de falla en desplaçar-nos cap al nord de la reconstrucció.

Per valorar quin és el motiu de la diferència en l'escurçament entre les dues restitucions he repetit el procés de reconstrucció de l'encavalcament 2 en la figura 5.27 E, utilitzant el *cutoff* de la base del Terciari per a juxtaposar les escates, i en aquest cas, la diferència en l'escurçament amb la restitució C, disminueix fins a un 0.6%, és a dir, és pràcticament idèntic, i implica que el valor de l'escurçament no depèn del nivell de referència. No obstant, continua apareixent un espai buit a la rampa de l'encavalcament 2 en creuar el Terciari, que és més gran que els generats en les restitucions prèvies.

En síntesi, la diferència en l'escurçament calculat si s'utilitzen o no dues fases sembla apuntar que una part d'aquest es produeix durant la formació del sistema imbricat, i una altra durant el replegament d'aquesta, fet que suggereix que durant la segona etapa es reactiven les superfícies d'encavalcament per acomodar part de la deformació flexural associada al segon plegament. Aquesta suggerència vàlida per a aquesta secció, no té perquè ser aplicable en altres contextos, com es discutirà en l'apartat referent a modelització cinemàtica d'aquesta tesi.

Un problema que es repeteix en totes les restitucions per FSU, i també per SSU com es veurà més endavant, és l'aparició sistemàtica de zones de buits i superposicions en les proximitats de les falles, en allunyar-nos de les superfícies de referència i sobretot en la reconstrucció de l'encavalcament 2 i el seu *horse* basal (2b). És evident que aquesta situació no és gens desitjable, i per tal de buscar-hi una solució, o com a mínim, trobar-hi una explicació, he efectuat un segon grup de restitucions en les que he utilitzat com a superfícies de referència i *target* el traçat d'una mateixa falla en el bloc superior i en el bloc inferior. Aquest procediment és similar a l'utilitzat per al segon cicle de les seccions de la zona de les Nogueres (fig. 5.28), i a partir d'aquest punt l'anomenaré **restitució falla sobre falla**. Les dues restitucions elaborades segons aquest mètode es diferencien en el desplegament del sinclinal de Bernera. En la primera, he desplegat per FSU la làmina més meridional de la pila utilitzant un *pin* perpendicular a l'estratificació i una superfície *target* horitzontal. Subseqüentment, he restituït falla sobre falla les làmines adjacents utilitzant sempre *pins* paral·lels al pla axial dels plecs de rampa. En la segona he restituït per FSU tota la pila a un *target* horitzontal i posteriorment he procedit a la restitució falla sobre falla de les làmines encavalcants, seguint el mateix procediment que en l'anterior. En els dos casos he utilitzat el *cutoff* de la base del Terciari per ubicar les escates.

La primera diferència entre les dues reconstruccions és la inclinació del seu límit frontal (fig. 5.28). En el primer cas, aquest experimenta una rotació cap a l'avantpaís com a conseqüència de la obliquïtat entre les superfícies de referència i *target* (a diferència de les reconstruccions de la figura 5.27, on la superfície *target* era subparal·lela a la de referència i després del desplegament calia rotar tot el bloc). Aquesta rotació és de 6.4°, i implica una augment de longitud respecte a la figura 5.27A del 8.2% per la base del Terciari i del 8.5% per la base del grup d'Hecho. En el segon cas, la rotació del límit frontal és de 22° cap al nord, i té la mateixa explicació que en les restitucions de les figures 5.27 D i E. Això produeix un augment de la inclinació de les falles a la part posterior del sistema. En aquest cas, l'augment de longitud respecte a la restitució de Teixell i Koyi (2003) és del 10%, el doble de l'obtingut per als models equivalents amb l'estratificació com a superfície de referència.

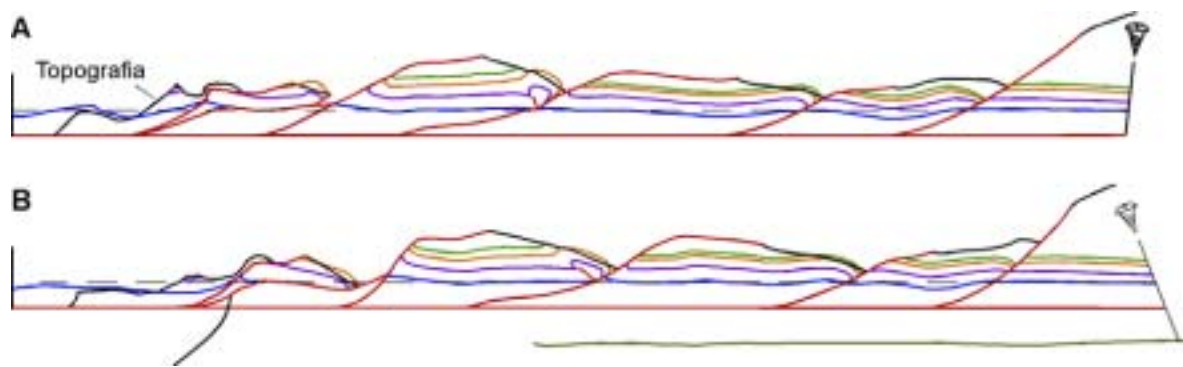


Fig. 5.28.- Reconstruccions falla sobre falla de la secció d'Aragüés. **A:** Restitució per parts mitjançant FSU, sense desplegar el sinclinal de Bernera. **B:** Reconstrucció en dos cicles de desplegament. En el primer, corresponent al sinclinal de Bernera, es restitueix l'encavalcament basal del sistema a una superfície *target* horitzontal (*datum*), utilitzant un *pin* paral·lel al pla axial del plec. En el segon es restitueix per FSU cada una de les làmines. En línies discontinües s'indica l'elevació regional de la base del Terciari.

En els dos casos s'observa una millora important de la restitució, sobretot pel que fa a l'entroncament de les rampes a l'encavalcament basal. En canvi, a la part superior de les rampes, la correspondència entre els blocs superior i inferior segueix essent escassa, ja que al utilitzar com a superfícies de referència la base del Terciari, que no presenta plects tan ben desenvolupats, els anticlinals de rampa suprajacents no es despleguen durant el procés. Per tant no es pot produir ni una correspondència aproximada entre els *cutoff* de bloc superior i inferior de cada marcador.

Tot i aquesta problemàtica en les zones de falla, la solució a la part central de les làmines és satisfactòria ja que els diferents marcadors es mantenen a una alçada regional més o menys homogènia, que només es veu alterada en les proximitats dels encavalcaments 4 i 5 en la restitució **A** i el 5 en la restitució **B** (fig. 5.28). Això suggereix que els angles de rampa en creuar els gresos cretacis en la secció de Teixell i Koyi (2003) haurien de ser més baixos, tal com es pot apreciar en la restitucions de la figura 5.27 **B** i **C**, on l'angle de rampa de bloc superior està condicionat per l'horitzontalitat imposada a les bases del Terciari i de les calcàries ilderdianes, i és menor que l'angle de rampa en el bloc inferior.

A pesar de la informació referent a l'estructura general que aquesta restitució aporta, la qüestió referent al replà de bloc superior de l'encavalcament 2 sobre el *horse* basal (2b) continua sense resoldre's. Per tant, sembla que es tracta d'un problema d'interpretació de l'estructura de la secció original, i requereix una discussió més àmplia que es desenvoluparà en la part final d'aquest apartat d'anàlisi dels algoritmes de restitució en talls de camp, integrant la informació obtinguda aplicant totes les tècniques de restitució que ofereix el programa 2DMove.

En resum, la restitució de seccions utilitzant l'algoritme FSU és molt més laboriosa, però alhora molt més completa, que amb l'algoritme LLU. L'avantatge principal del FSU és que preserva la longitud de les línies paral·leles a la superfície de referència, les àrees i els angles, permetent la restitució de superfícies obliqües, com poden ser falles, estrats inclinats, o superfícies irregulars com la topografia o els paleorelleus. Però per altra banda, l'algoritme requereix un major constrenyiment de les estructures reals, ja que la influència que

tenen la superfície de referència, l'orientació i ubicació del *pin* i la superfície *target* són molt més crítiques que en la restitució per LLU. Això és particularment cert per a la part dels blocs que es troba fora de la zona constrenyida per la superfície de referència (fig. 5.11). Aquestes situacions requereixen un "esforç extra" per part de l'usuari, que ha de trobar solucions alternatives com poden ser l'aplicació de diversos cicles de desplegament o la reconstrucció de la part de l'estructura no present al bloc restituït. Aquestes operacions impliquen una anàlisi estructural en profunditat, per a la qual el propi algoritme FSU és una eina vàlida, ja que la seva aplicació sistemàtica, canviant les variables, aporta molta informació a la comprensió dels mecanismes de deformació que han actuat en la formació d'una estructura, fins al punt que l'algoritme FSU és més útil com a eina analítica que per a la veritable restitució de talls geològics.

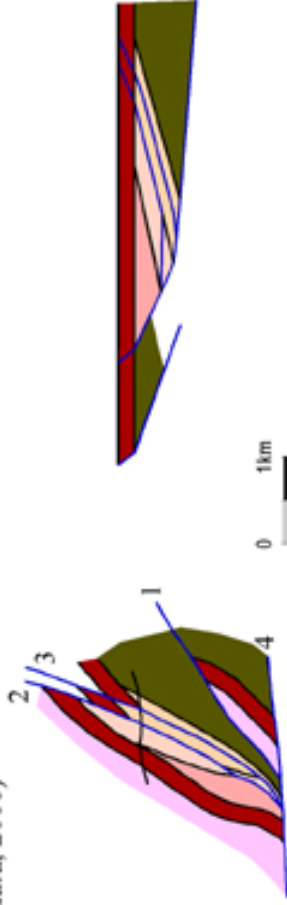
Restitució amb Simple Shear Unfolding (Restore)

El principi bàsic que regeix aquest algoritme és l'assumpció que el desplaçament de tots els punts d'una secció es fa segons un sistema de línies de flux paral·leles (el desplaçament dels punts continguts en una mateixa línia de flux és idèntic). Tal com he indicat en l'anàlisi del funcionament d'aquest algoritme en la restitució de models de sorra, el seu mecanisme de deformació no és l'habitualment descrit en contextos de plects i encavalcaments. Tanmateix, com també he dit, la seva aplicació no deixa de ser útil analíticament.

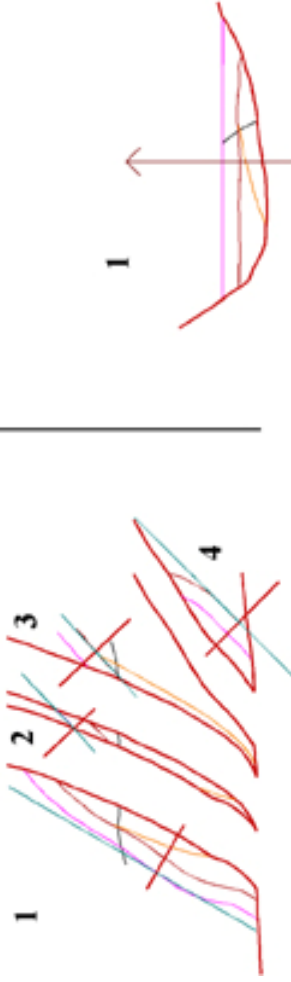
Els resultats obtinguts en la restitució per parts de la secció de Sta. Bàrbara seguint el mètode descrit per als models de sorra són molts similars als obtinguts en el primer cicle de FSU, i es diferencien en la longitud final de la restitució que és de 4956m, un 4.4% menys que per FSU, i en el patró de superposicions i buits. La diferència en la longitud final es deu principalment a que aquest mètode no conserva la longitud de les capes. En aquesta secció, la utilització de *pins* perpendiculars a l'estratificació i la superfície *target* garanteix l'obtenció del valor d'escurçament màxim possible, equivalent a la distància entre els dos extrems de la superfície de referència, segons una línia perpendicular al *pin*, i no té cap influència en el valor de la cisalla angular. Per altra banda la restitució amb SSU és una primera aproximació al pes del plegament flexural respecte l'escurçament total. La restitució també aporta informació sobre la distància vertical entre superfícies obliqües i confirma una vegada més que la profunditat de l'encavalcament basal havia estat infravalorada en la interpretació inicial, si bé la cisalla paral·lela a les capes del Triàsic inferior resultaria en una disminució de la profunditat dels elements de la part inferior de l'estructura en els extrems de cada fragment restituït per separat. En la solució que es presenta, l'augment de profunditat de l'encavalcament basal és de 175m (39%), idèntic a l'obtingut per LLU.

Una altra de les característiques d'aquesta reconstrucció que coincideix amb la feta per FSU és la localització de la zona de dispersió per poc constrenyiment a l'entorn de la inflexió de l'encavalcament d'Erta, que en aquest cas afecta una àrea molt menor (fig. 5.23 7 i 4.29 5). Aquest resultat podria reforçar, juntament amb els resultats del segon cicle de restitució per FSU, l'assumpció de l'existència de lliscament flexural en les capes estefano-permianes. Tot i el resultat obtingut, no he procedit a l'aplicació de diferents cicles de restitució perquè interpreto que l'aplicació repetitiva d'aquest mecanisme en aquest context no és analitzable estructuralment.

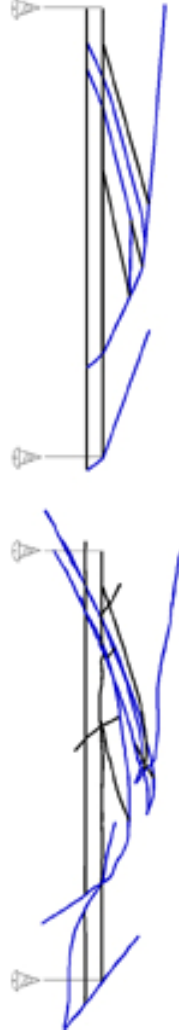
1. Secció restituida manualment pel mètode de preservació de la longitud de línies (Saura, 2000)



2. Separació per parts de la secció
3. Restitució de les superfícies de referència a la superfície *target* i rotació



4. Situació de les parts en la seva ubicació inicial. Eliminació de *pins* i superfícies *target*.



5. Valoració de pèrdues i guanys d'àrea en la secció restituida utilitzant l'algoritme SSU (A) i d'aquesta secció respecte a la restitució de partida (B)

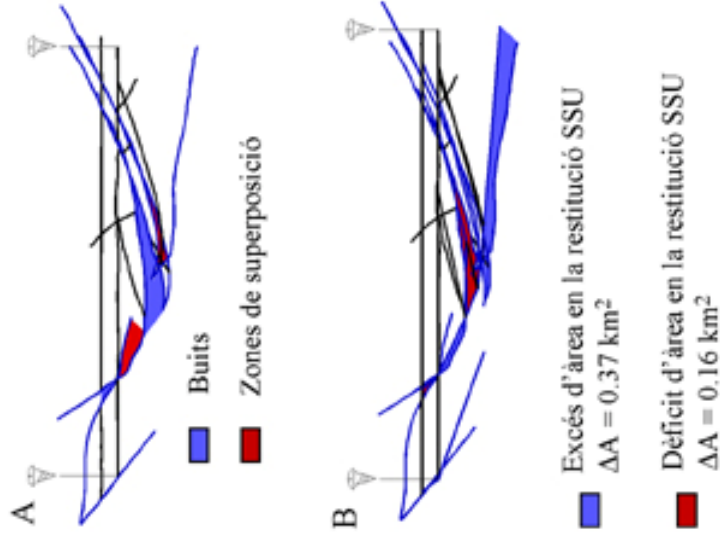
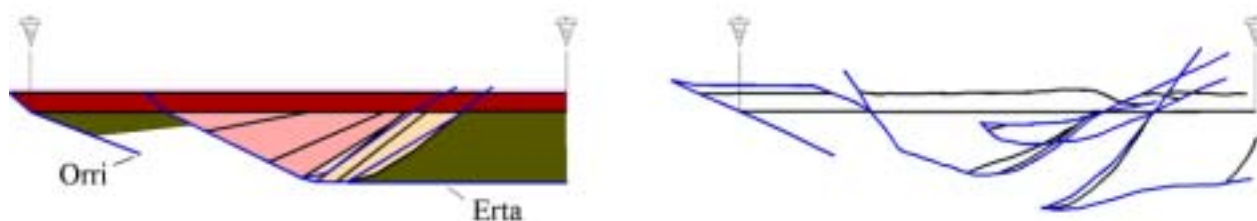


Figura 5.29.- Restitució per *Simple Shear Unfolding* (SSU) de la secció de Coll de Fades. El pas 3 només s'ha exemplificat amb un dels fragments de la secció, però el procés ha estat el mateix per a tots els altres.

Les restitucions de les seccions de Manyanet i Sta. Bàrbara (fig. 5.30) presenten característiques similars a les descrites per a la de Coll de fades, tot i que les divergències amb les restitucions per FSU respectives són majors. La reconstrucció de la transversal de Manyanet presenta una àrea total de superposició i buits, 0.22km² i 0.7 km² respectivament, més elevada que la que s'obtenia en el primer cicle de FSU, degut a que les correccions efectuades en aquesta no s'han fet en la restitució per SSU. El constrenyiment és per tant inferior, comportant un augment de la desviació en el resultat en allunyar-nos del fragment controlat de la superfície de referència, que en aquest cas no només afecta a la part que es troba per sota la discordança pre-triàsica, sinó que també condiona el traçat del sostre del Buntsandstein. D'altra banda, el funcionament del mecanisme, que calcula el desplaçament de tots els punts a partir del *pin* i les superfícies de referència i *target* sense considerar la distància entre un punt donat i la superfície de referència, no produeix sobredesplegaments de la magnitud dels generats pel mecanisme FSU.

A. Manyanet



B. Sta. Bàrbara

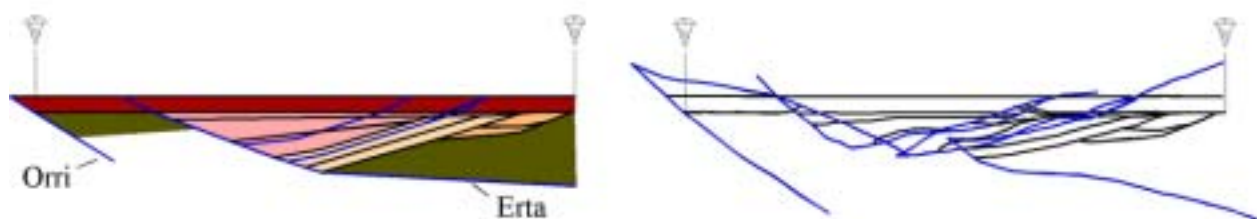


Fig. 5.30.- Restitució per SSU de les seccions de Manyanet i Sta. Bàrbara (dreta) i comparació amb les seccions inicials (esquerra). Els resultats són similars als obtinguts en el primer cicle de FSU (fig. 5.26), tot i que el patró de buits i superposicions varia lleugerament.

Pel què fa a la longitud de la base del Triàsic aquesta és de 5895m, 196m més curta que a la restitució inicial, implicant un escurçament per plegament flexural del 3.25%, tot i que les superposicions que s'observen a nivell del Triàsic podrien indicar que aquest valor ha de ser major (fig. 5.30 A). En referència a la profunditat de l'encavalcament basal aquesta és de 793m, 3m més que a la restitució inicial (0.3%), com ja s'ha observat en les restitucions d'aquesta secció utilitzant els altres algoritmes, i per tant, reforça novament la profunditat calculada inicialment a Saura (2000).

En definitiva, els resultats obtinguts en la restitució del tall de Manyanet per SSU no aporten molta informació nova, i inclús poden ser la font d'algun error de càlcul si no s'analitzen detalladament i es

comparen amb les restitucions fetes amb altres algoritmes. En aquest cas encara és més evident que un segon cicle de restitució per SSU no aportaria cap dada valuosa analíticament.

La reconstrucció de Sta. Bàrbara (fig. 5.30 **B**) no es desvia tant dels resultats obtinguts per FSU, i el Buntsandstein conserva la seva potència constant pràcticament en tota la restitució, a excepció de les zones de *cutoff* de bloc inferior de les falles 1 i 2, fent evident una vegada més la rellevància de l'elecció de la superfície de referència. En aquest cas l'àrea de superposició és de 0.24km^2 i la buida de 0.08km^2 , molt menors que les que es generaven en utilitzar l'algoritme FSU.

La longitud de la base del Triàsic és de 6492m, un 0.2% més curta que en la restitució inicial i un 1.8% més curta que en el primer cicle de FSU. Tot i que la diferència entre els diferents mètodes és molt poca, cal tenir present que en aquest cas la reconstrucció s'ha fet utilitzant els *cutoff* del sostre del Buntsandstein, el que s'ha traduït en un augment de la longitud final. Tot i així, els valors obtinguts semblen indicar que en aquesta transversal, l'escurçament associat al plegament és menor que en els altres casos.

La diferència entre la profunditat de la inflexió replà – rampa de l'encavalcament d'Erta en la restitució per SSU i la *target* és més difícil de valorar. Mentre que en la darrera aquest punt coincideix amb el *cutoff* de la base de la formació Erill Castell, en la primera aquests dos punts no coincideixen, de tal forma que en la restitució per FSU el *cutoff* de la base de la conca es troba a 553m de profunditat i la inflexió a 689m. Aquesta darrera és la que més s'aproxima al valor de la restitució inicial, ja que només es troba 31m per sobre (4.3%), que tenint en compte les característiques de la reconstrucció, es tracta d'una aproximació molt bona.

Tot i que aquesta reconstrucció s'aproxima més a la inicial que la feta amb l'algoritme FSU, ja he dit que aquesta secció presenta problemes de partida relacionats amb l'angle de rampa que afecten la solució final proposada, i per tant, requereix modificacions en el tall geològic per a poder validar-la. Aquestes correccions seran presentades en la part final d'aquest apartat d'anàlisi de seccions de camp.

En els assaigs de restitució del tall d'Aragüés utilitzant l'algoritme SSU he diferenciat dos grups, en funció dels passos seguits per al desplegament de l'estructura. En el primer grup (fig. 5.31 **A**) la restitució s'ha fet per desplegament directe i rotació individual de cada làmina de la pila, utilitzant la base del Terciari i la de les calcàries ilerdianes com a superfície de referència. En el segon (fig. 5.31 **B**), he utilitzat dues fases de desplegament. En la primera, corresponent al sinclinal de Bernera, he utilitzat un *pin* subparal·lel al pla axial d'aquest, l'encavalcament de Larra com a superfície de referència, i una superfície *target* horitzontal. En la segona fase he restituït per parts el sistema imbricat utilitzant a **B1** la base del Terciari com a superfície de referència i una superfície *target* horitzontal, a **B2** les calcàries ilerdianes com a superfície de referència i una superfície *target* horitzontal i a **B3** una restitució falla sobre falla.

Els resultats del primer grup indiquen que l'escurçament total de l'estructura corresponent a plegament, tant associat a la primera fase com a la segona, és del 16% per a la base del Terciari i del 26.3% per a les calcàries ilerdianes (respecte a les figures 4.27 **B** i **C**). Aquests valors són superiors als obtinguts per Teixell i Koyi (2003) que són del 3 % i del 11%, respectivament. Tanmateix, aquestes dades cal prendre-les com a

orientatives, ja que si s'observa en detall, es pot apreciar l'aparició de problemes com el descrit en la figura 5.16 **B**, al *cutoff* de l'encavalcament 3 (fig. 5.31 **A2**). A més, l'aplicació repetitiva d'aquest algoritme pot exagerar molt els problemes originats per l'elecció de les superfícies *target* i els *pins*. En qualsevol cas, el que sí que és evident és la localització d'una zona de difícil restitució al replà de l'encavalcament 2 sobre el seu *horse* basal.

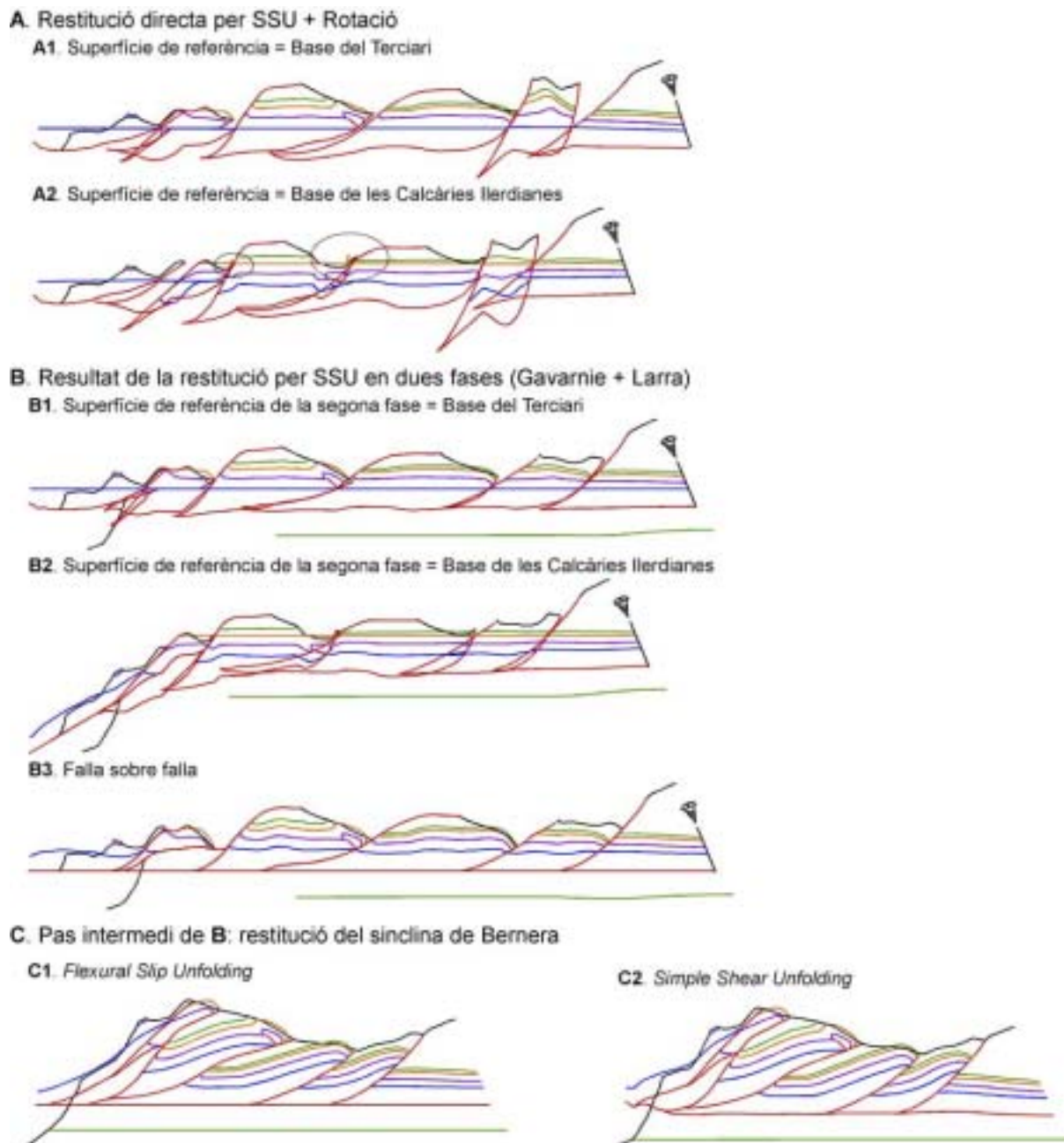


Fig. 5.31.- Restitucions per SSU del tall d'Aragüés utilitzant diferents seqüències de desplegament i superfícies de referència. En la sèrie **A** he utilitzat pins perpendiculars a l'estratificació i a la superfície target, i en a sèrie **B** he utilitzat un pin paral·lel al pla axial del plegament generat per sinclinal de Bernera i perpendicular a la superfície target en la primera fase i pins verticals en la segona. **C.**- Comparació de la restitució del sinclinal de Bernera per FSU i SSU.

El segon grup de restitucions indica que l'escurçament pel plegament del sinclinal de Bernera és de 200m, que representa un escurçament del 6% respecte a la longitud del sistema imbricat (~4% de l'escurçament total).

Els resultats de la segona fase de les dues etapes de desplegament (fig. 5.31 **B**) presenten una problemàtica molt similar a les restitucions equivalents amb l'algoritme FSU, és a dir, el bloc superior i el bloc inferior d'un mateix encavalcament no es corresponen, amb la conseqüent aparició de buits i superposicions, i un desajust en el replà de bloc superior de l'encavalcament 2. A més, en la reconstrucció feta utilitzant les calcàries ilerdianes com a superfície de referència, es genera un profundització del desenganxament basal per darrera de l'encavalcament 3. Quant a l'escurçament per plegament obtingut després de la segona etapa de restitució, els valor resultants són del 15.1% per a la base del Terciari, del 17.8% per a les calcàries ilerdianes i del 16.7% per a la restitució falla sobre falla. Aquestes dades, tot i que continuen sent orientatives degut a l'arbitrarietat en l'elecció dels *pins*, s'aproximen més a les obtingudes per Teixell i Koyi (2003), sobretot si tenim en compte que aproximadament un 4% de l'escurçament correspon al sinclinal de Bernera, i un 2.5 - 4% està associat al replà de l'encavalcament 2. Per tant, crec que aquests resultats suggereixen que la utilització de dues fases de desplegament és més adequada per a l'anàlisi d'aquesta estructura amb SSU.

Finalment, la inclinació del límit frontal de l'estructura en totes les reconstruccions correspon a l'obliquïtat entre aquesta línia i els *pins* escollits, que no són paral·lels a aquest límit en el tall actual. Per tant aquesta inclinació no té cap implicació en termes de cisalla angular, ja que en desplegar tots els punts de la secció es desplacen paral·lelament al *pin* sense que es produeixi cap lliscament a favor de l'estratificació.

En vista dels resultats obtinguts en la restitució per SSU del tall d'Aragüés, no és molta la informació quantitativa que se n'obté, però tot i així, són un bon complement analític dels obtinguts utilitzant els altres algoritmes, sobretot si tenim en compte que aquest mecanisme de desplegament és el que em va fer plantejar la possibilitat d'utilitzar la restitució falla sobre falla, que posteriorment vaig traslladar a l'algoritme FSU. La utilització de la restitució falla sobre falla amb l'algoritme SSU és l'equivalent a la modelització de la deformació pel mètode de cisalla inclinada (IS) amb un angle de cisalla idèntic al de la inclinació dels *pins*.

Conclusions referents a la restitució dels talls de camp

Tal com ja he apuntat en la conclusió de l'apartat d'anàlisi dels models de sorra, la utilització dels algoritmes de restitució del programa 2DMove és principalment una eina d'anàlisi ja que la seva aplicació sistemàtica pot aportar un volum d'informació considerable.

La figura 5.32 i la taula 5.7 mostren un resum de les dades obtingudes amb cada algoritme per a totes les seccions de camp. Es pot veure com, tot i les variacions puntuals de cada restitució, la tendència general és a la consistència. Tanmateix, els resultats de les restitucions amb ordinador aconsellen realitzar algunes correccions puntuals en els talls de camp, que es descriuen seguidament.

La taula 5.8 mostra que per als algoritmes LLU i FSU la desviació en les longituds rarament supera l'1% a la zona de les Nogueres, mentre que en la restitució per SSU la variació és molt superior. Per altra banda, la

variació dels valors de la profunditat de l'encavalcament d'Erta és molt més elevada arribant-se a valors pròxims al 40% (taula 5.7). La diversitat en els resultats pot tenir dos orígens; o bé es tracta d'errors acumulats durant el procediment, o bé d'una mala resolució de l'estructura, ja sigui en la construcció del tall actual o en la seva restitució .

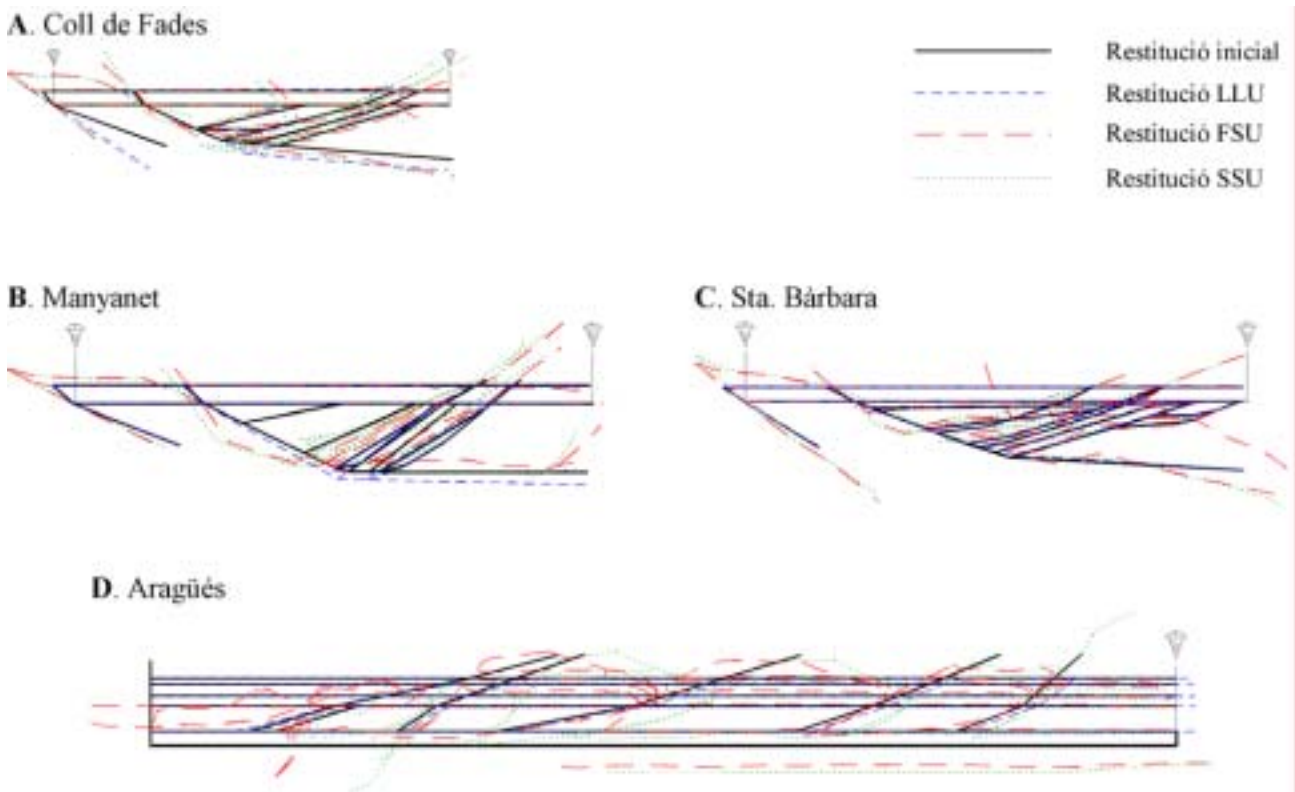


Fig. 5.32.- Superposició de les reconstruccions de totes les seccions de camp utilitzant els diferents algorismes. Per les reconstruccions d'Aragüés per FSU i SSU s'ha representat la restitució en dues fases amb la base del Terciari com a superfície de referència.

En el cas de les restitucions per LLU el motiu de desviació és l'exactitud de les mesures de la longitud de les capes. És a dir, quan es va realitzar les restitucions inicials amb programes d'edició gràfica com el Canvas, es prenen els valors de cada línia amb 1 o 2 decimals, i per tant calia arrodonir les xifres, mentre que en utilitzar el programa, el desplegament és gràfic, és a dir, que es restitueix la longitud exacta de cada línia. Això genera diferències d'ordre mil·limètric que es converteixen en desenes de metres en fer el canvi d'escala. Per exemple, en la secció de Manyanet, una diferència de 0.107 mm correspon a 76m un cop traslladada l'escala. En referència als canvis de profunditat de l'encavalcament d'Erta, a aquesta font d'error cal afegir-hi la dificultat de treballar amb superfícies inclinades que puguin comportar canvis de longitud durant la deformació. En aquest casos, la reconstrucció s'ha de fer pel mètode de preservació de les àrees que dependrà dels canvis d'àrea i de longitud de les línies inclinades. A més, el programa Canvas pot no ser fiable quan es treballa amb superfícies molt petites. Tenint en compte això he considerat que requerien ser corregits aquells en què la variació de longitud es trobi per sobre de l'1% i la del gruix per sobre del 10%,

sempre i quan els valors de la restitució per FSU es trobin dins el rang de variabilitat que es discuteix seguidament.

	Inicial		LLU				FSU				SSU			
	<i>l</i>	<i>Prof.</i>	<i>l</i>	$\pm l(\%)$	<i>Prof.</i>	$\pm P(\%)$	<i>l</i>	$\pm l(\%)$	<i>Prof.</i>	$\pm P(\%)$	<i>l</i>	$\pm l(\%)$	<i>Prof.</i>	$\pm P(\%)$
Coll de Fades	5182	450	5172	-0.2	625	+39	5220	+0.7	575	+28	4956	-4.4	625	+39
Manyanet	6091	790	6015	-0.7	867	+9.7	6242	+2.5	791	+0.1	5895	-3.25	793	+0.3
Sta. Bàrbara	6505	720	6554	+0.7	676	-6.1	6529	+0.3	796	+10.5	6492	-0.2	689	-4.3
Aragüés	5584		5681	+1.7			5907	+5.8			5070	-9.2		

Taula 5.7.- Recopilació de les longituds restituïdes (*l*), de les profunditats de la inflexió replà – rampa de l'encavalcament d'Erta en els talls de la zona de les Nogueres (*Prof.*) i de la variació respecte a la restitució *target*; $\pm l$.- increment de longitud; $\pm P$.- increment de la profunditat de la inflexió replà – rampa.

Les restitucions per FSU de la zona de les Nogueres presenten valors molt similars als de LLU a excepció de la secció de Manyanet, on probablement el segon cicle de desplegament ha originat un augment de longitud no realista (taula 5.7). Per altra banda, la variació en la profunditat de l'encavalcament d'Erta és important en tots els casos, i no sempre es produeix en el mateix sentit. Per exemple, la inflexió replà – rampa en la secció de Sta. Bàrbara es troba per sobre de la reconstrucció *target* en el model LLU, mentre que en el FSU es troba més profunda. Tot i que els valors referents a profunditats seran a priori més correctes quan s'utilitzi aquest mecanisme, degut als seus principis teòrics, el resultat final està condicionat per l'orientació i ubicació del *pin*, i en les seccions de la zona de les Nogueres per les dues fases de desplegament, i per tant si la geometria de l'estructura no és molt evident, l'error associat al *pin* pot ser elevat. He considerat que cal corregir les restitucions en què la desviació de longitud estigui per sobre del 5%, i la de gruix per sobre del 10%, amb el benentès que abans s'havia valorat la reconstrucció amb l'algoritme LLU.

Pel que fa a la restitució per SSU, la desviació dels valors és molt variable (taula 5.7), i no indica cap tendència, fent evident una vegada més que aquest algoritme no és aplicable en la restitució d'aquestes estructures contractives, tot i la utilitat com a eina d'anàlisi que ofereix, ja discutida en detall.

Els criteris esmentats per a decidir la conveniència de corregir una secció geològica per a poder-la validar, no només s'han de basar en les dades corresponents a un nivell estratigràfic sinó que cal considerar la secció com a conjunt. També cal tenir en compte altres factors com poden ser variacions consistents dels angles de rampa o de discordança, o irregularitats persistents en el traçat d'una superfície (x.ex.: fig. 5.32). Finalment, quan es realitza una sèrie de talls paral·lels també s'ha de realitzar una validació entre seccions adjacents, per tal de completar la reconstrucció de l'estructura i introduir, encara que sigui per interpolació, la tercera dimensió.

Seguint els criteris definits, considero que cal realitzar correccions en les següents seccions de Coll de Fades (*Prof. LLU* > 10%) i Sta. Bàrbara (longitud FSU >10%). A més, a la restitució de la secció de Manyanet s'haurà de corregir l'angle del replà inferior de l'encavalcament d'Erta, ja que tant amb LLU com amb FSU surt lleugerament inclinat cap al nord (1.2°). Per consistència amb la resta de seccions, la rampa de

l'encavalcament d'Orri en aquest tall ha de ser de 30°, amb els conseqüents canvis d'angle de rampa de la resta d'encavalcaments en creuar el Buntsandstein que això pugui implicar (fig. 5.33).

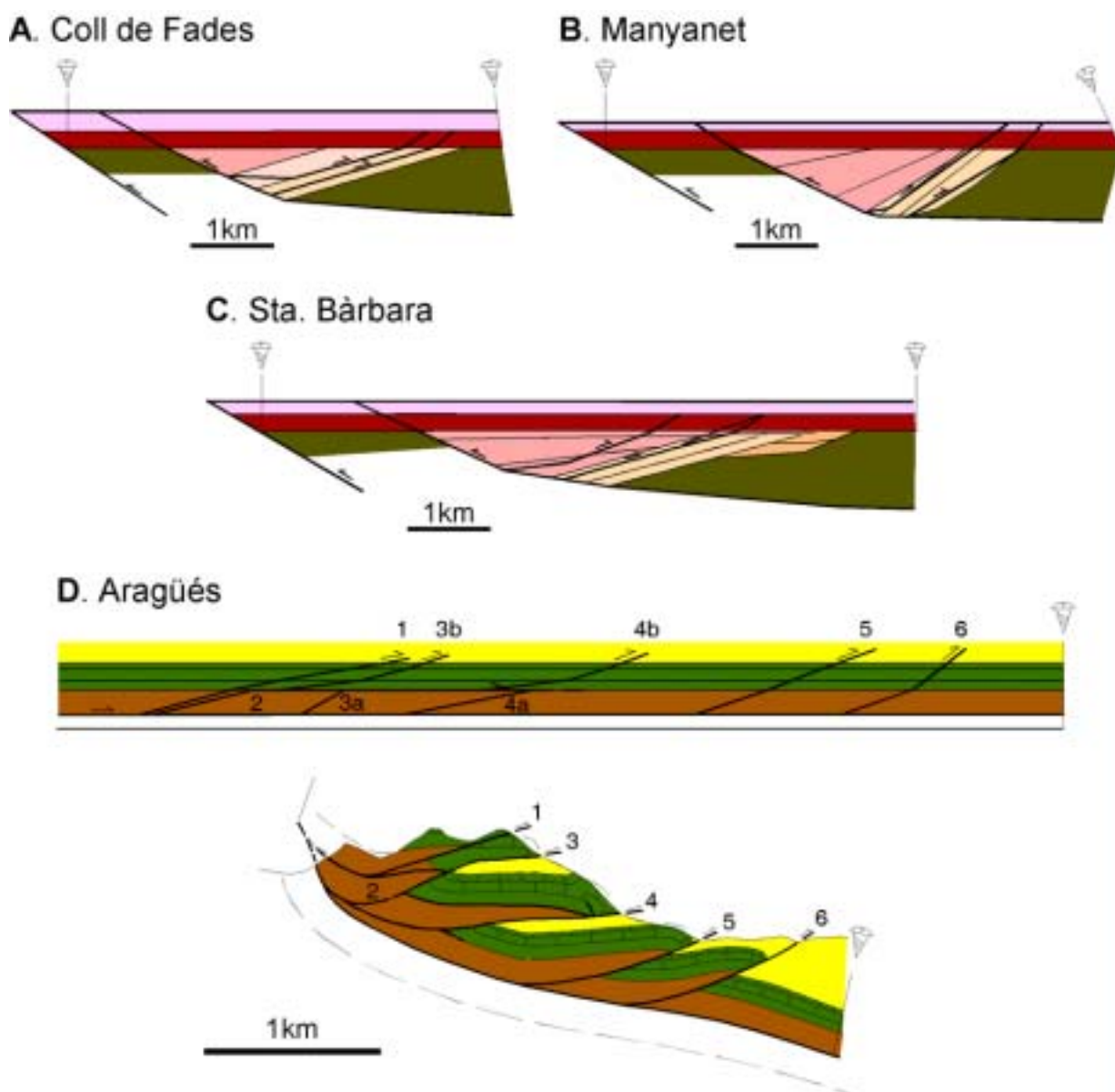


Fig. 5.33.- Restitucions corregides de totes les seccions de camp analitzades en aquest apartat. La figura inferior (D) mostra una correcció sobre el tall actual d'Aragüés de Teixell i Koyi (2003), consistent en afegir un desencanxament entre el Cretaci i el Terciari a l'escata 4. Aquesta correcció implica un canvi en la numeració dels encavalcaments de la figura 5.1.

La persistència d'un augment de la profunditat de la inflexió replà – rampa de la falla límit del semigraben estefano-permià de la secció de Coll de Fades en les diferents restitucions indica que l'error es troba en la construcció de la restitució, i no en la interpretació de l'estructura actual, ja que tant la geometria obtinguda per LLU com la obtinguda per FSU són similars (fig. 5.32). Per tant, mantenint l'angle de rampa obtingut per LLU, se situa el punt d'inflexió a una profunditat de 600m, i per preservar l'àrea, la inclinació resultant per al replà és de 4.7°, amb una segona inflexió a 1580m de la primera i una nova inclinació a partir

d'aquest punt de 2.6°. L'escurçament horitzontal de la base del Triàsic és de 4468m, que representa un 87% respecte a la longitud inicial que és de 5137m (fig. 5.33).

Un cop fetes les correccions esmentades en la secció de Manyanet, la longitud de la restitució és de 6112 m, i l'escurçament horitzontal és de 5072m, un 83% (fig. 5.33).

La diversitat de resultats en la restitució de la secció de Sta. Bàrbara, sobretot pel que fa al traçat de l'encavalcament d'Erta i la profunditat de la seva inflexió (16.6% de diferència entre LLU i FSU) apunta que l'error es troba en la construcció de la secció actual més que en la restitució manual. A més, l'angle de rampa

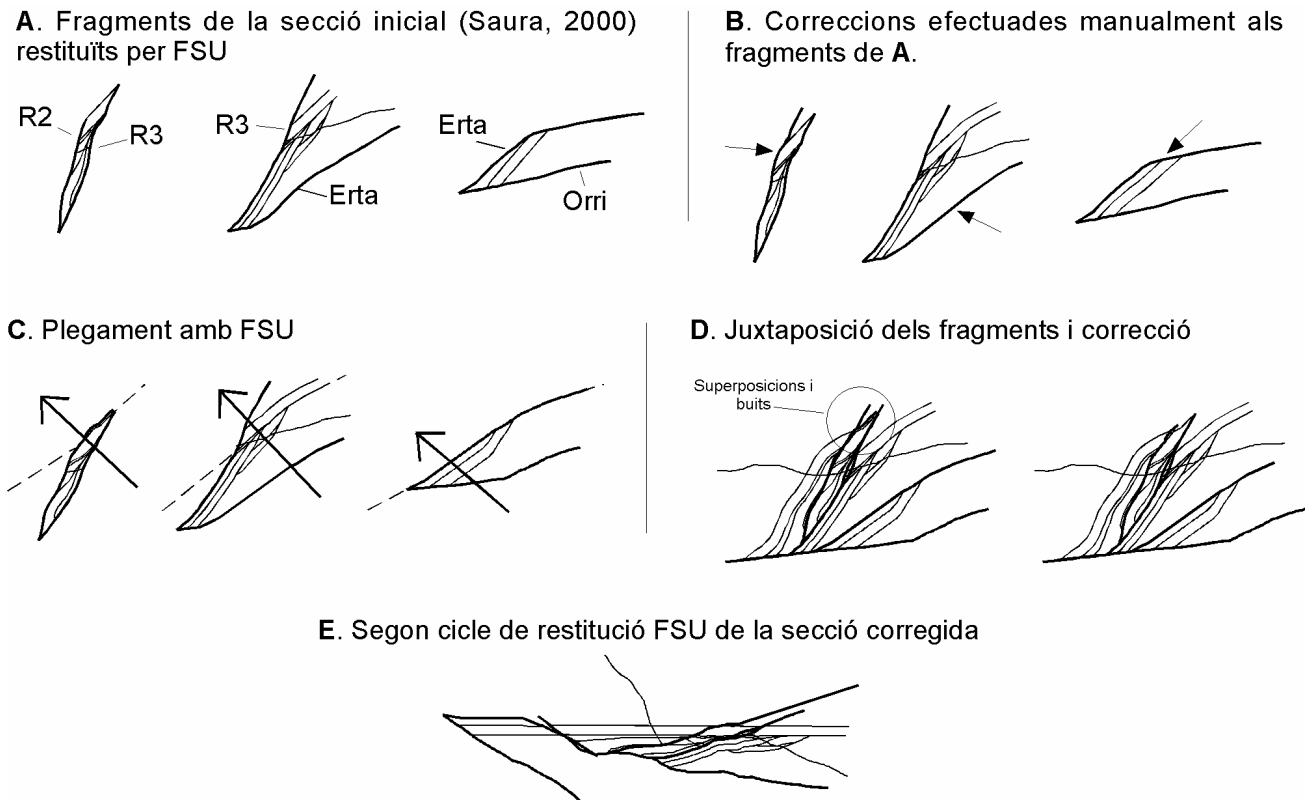


Fig. 5.34.- Procés seguit per a la correcció de la secció inicial de Sta. Bàrbara. **A.-** Fragments utilitzats per corregir la secció; R2: retroencavalcament 2; R3: retroencavalcament 3. **B.-** Les fletxes indiquen les zones on s'ha efectuat les correccions. **C.-** Utilització de l'algoritme FSU en avanç per a plegar els fragments corregits. Les línies discontinues representen les superfícies *target* utilitzades, que són per als fragments de l'escata d'Erta, les superfícies de referència utilitzades per a la restitució inicial (A), i per a la unitat d'Orri, el nou traçat de l'encavalcament d'Erta. **D.-** En juxtaposar els fragments he hagut de corregir el bloc superior de R2 per sobre de la base del Keuper. **E.-** La restitució per FSU de la nova secció dona millors resultats que la de la secció inicial (fig. 5.26) i permet acceptar les correccions efectuades.

de l'encavalcament d'Orri surt d'aproximadament 45° en tots els algorismes, i per tant cal reduir-lo. Una primera aproximació a la correcció consisteix en utilitzar l'algoritme FSU en un sentit invers, és a dir, corregir la reconstrucció i posteriorment deformar-la, utilitzant les superfícies *target* inicials com a superfícies de referència i viceversa (fig. 5.34).

Les correccions s'han efectuat en el resultat del primer cicle de restitució FSU del tall de camp inicial (Saura, 2000) abans de la rotació (fig. 5.34 A), i han consistit a 1) redibuixar la unitat d'Orri amb un angle de

cutoff de 30° per al Buntsandstein, 2) modificar el traçat del retroencavalcament 2 per tal que sigui paral·lel al 3 en el seu tram superior, i 3) homogeneïtzar la inclinació del replà inferior de l'encavalcament d'Erta en el bloc més septentrional (fig. 5.34 B). Seguidament he plegat amb l'algoritme FSU les parts modificades, utilitzant la base del Triàsic en les restitucions modificades com a superfície de referència, i el traçat de la mateixa superfície en la secció inicial com a superfície *target* (fig. 5.34 C). El següent pas ha estat reconstruir la secció de camp juxtaposant els fragments deformats obtinguts en el pas anterior. Aquesta juxtaposició comporta l'aparició de buits i superposicions, que obliguen a efectuar més correccions a la nova secció de camp (fig. 5.34 D). L'últim pas consisteix a comparar la nova secció de camp amb la inicial per constatar que la part coneguda de la secció (dades de superfície) no hagi canviat. Com que això és complex, he donat la secció per validada i he procedit a la restitució per LLU (fig. 5.34 E).

En la restitució final (fig. 5.33 C), la longitud de la base del Triàsic és de 7732m, 1203m més llarga que la restitució FSU inicial (taula 5.6) com a conseqüència bàsicament de la prolongació cap al nord del límit caudal del Buntsandstein en la nova secció de camp. La profunditat de la inflexió replà – rampa de l'encavalcament d'Erta en la nova restitució FSU és de 473 m, i la seva ubicació ha canviat ja que ara es troba a l'entroncament del retroencavalcament 2, i en la restitució inicial es trobava a la base de la conca estefano-permiana (veure fig. 5.22 C). En la nova restitució la base de la conca es troba a 631m de profunditat, i la profunditat de l'encavalcament d'Erta en el límit septentrional de la nova restitució es de 950m. L'escurçament horitzontal d'aquesta transversal és de 6154m que correspon a un 79.6%.

En analitzar les diferents restitucions de la secció d'Aragüés, és evident que l'origen de la diversitat de resultats es troba en la resolució de la relació entre el replà que l'encavalcament 2 fa a la base del Terciari (fig. 5.1 D) i la resta d'encavalcaments del sistema. La primera causa d'error podria ser una no preservació de l'àrea del *horse* 2b de la secció a les restitucions, però en mesurar-les s'obté que, a excepció de la reconstrucció inicial (Teixell i Koyi, 2003), totes les altres mantenen l'àrea d'aquest element, indicant que la longitud deduïda del replà de bloc inferior de l'encavalcament 2 i el seu gruix són correctes.

La següent aproximació al problema passa per reconsiderar l'angle de la rampa de bloc superior de l'encavalcament 2 per sobre del replà (fig. 5.21), tenint en compte que en la majoria de restitucions el buit es troba en aquest tram. La inflexió de l'encavalcament 2 al sostre de les dolomies terciàries en la restitució LLU (fig. 5.21), deduït a partir de les longituds restituïdes de la base i el sostre d'aquest nivell, ha estat el punt de partida per a la reinterpretació de l'estructura. Enlloc de dibuixar aquesta inflexió, he prolongat la falla cap al nord conservant-ne la inclinació deduïda en les calcàries terciàries, fins a entroncar-se en el replà superior del *horse* 2b. A partir d'aquest punt no es pot continuar prolongant l'encavalcament perquè les dimensions del *horse* són correctes, i per tant, el traçat de l'encavalcament 2 (fig. 5.21) no és continu en la nova restitució, a diferència del que s'observa en la secció actual. Això implica que el replà de la base del Terciari és anterior a la formació de l'encavalcament 2, i per tant és propaga cap a la làmina 3 i té un desplaçament associat idèntic a la distància entre els dos trams de l'encavalcament 2 en la nova restitució.

Aquest canvi en la seqüència de formació dels encavalcaments implica una nova numeració respecte a la de la figura 5.1, que és la que es mostra en la figura 5.33 i s'utilitzarà a partir d'ara.

La base del Terciari en la làmina encavalcant 4 s'observa en la seva totalitat al camp, i per tant no se li pot aplicar un increment de longitud. Això implica que el *cutoff* d'aquesta superfície en l'encavalcament 4 també s'ha de desplaçar cap al nord, fet que comporta un canvi d'inclinació. Si aquest canvi d'angle només es realitza per al tram de l'encavalcament que creua el Terciari, assumint que el replà del sostre del gres del Marboré també es propaga en la làmina encavalcant 5, podem definir dos trams per a l'encavalcament 4 (4a i 4b, fig. 5.33) separats per la mateixa distància que els encavalcaments 3a i 3b. Aquesta operació genera un augment de la superfície de les dolomies terciàries en la restitució del bloc inferior de l'encavalcament 4, idèntic a l'augment d'àrea que s'observa al camp associat a l'engruiximent de xarnera d'aquesta formació, en l'anticlinal de rampa de l'encavalcament 4. Aquest engruiximent està associat a un petit retroencavalcament que he aprofitat per compensar l'escurçament associat a l'encavalcament 2 (fig. 5.33), definint-ne el punt de contorn, i generant en el bloc inferior una geometria molt similar a la que s'observa al camp, en la rampa de bloc inferior de l'encavalcament 3 a la vessant oest del riu Ossia (Alonso i Teixell, 1992). Més enllà d'aquest punt, les escates 5 i 6 resten tal com estaven interpretades en la restitució *target*.

En síntesi, la seqüència d'emplaçament de les làmines encavalcants de la pila d'Aragüés (fig. 5.33) comença amb la formació de l'encavalcament 1, seguida de l'emplaçament de l'encavalcament 2 que forma un replà que es propaga més enllà del traçat actual de l'encavalcament 4, generant en el seu punt de contorn un petit plec lliscat associat a un retroencavalcament. Posteriorment es formen en seqüència de bloc inferior els encavalcaments 3 i 4, que tallen el replà de l'encavalcament 2, i els encavalcaments 5 i 6 finalitzen el creixement de l'estructura. Això pot implicar que en l'encavalcament 4, la transició en el sentit d'avanç tectònic de capes no plegades a capes plegades, que Alonso i Teixell (1992) i Teixell i Koyi (2003) interpreten com un canvi en el mecanisme de plegament d'un únic encavalcament, podria ser deguda a una estructura formada en dues etapes.