

8

Definició d'eines per a la
quantificació de la deformació i
del número de vorticitat cinemàtic.
Aplicació a la zona d'estudi de
camp.

"Everything should be made as simple as possible..., but no simpler "

Atribuïda a Albert Einstein

8.1 Introducció

Al llarg dels darrers quatre capítols s'ha abordat la modelització numèrica i experimental del plegament (o retreballament) de capes amb espessor no homogeni. D'una forma progressiva s'ha anat progressant l'estudi des de l'escala de la interfase (capítol 4), a la d'una pertorbació aïllada centrada a una capa (capítol 5) fins al rol de múltiples pertorbacions desenvolupades sincrònicament i la influència dels paràmetres geomètrics essencials (capítols 6 i 7). L'objectiu del present capítol és essencial dins la present memòria. Al llarg d'aquest capítol s'abordarà el plantejament d'eines per l'anàlisi tan qualitatiu com quantitatiu de la cinemàtica i de la deformació a partir de les estructures de camp. Per tal de definir-les és primordial identificar i seleccionar aquells aspectes o paràmetres més sensibles a la variació de la deformació (essencialment a la components de deformació finita i del seu grau de no coaxialitat) i, molt important, que siguin plausibles d'inferir mitjançant els exemples de camp. Per tal de fer-ho, primer de tot s'exposarà una síntesi dels conceptes més importants observats al llarg de la modelització numèrica i analògica. Després es presentaran els aspectes d'anàlisi qualitatiu que són plausibles d'inferir mitjançant estructures genèriques com els sigmoïdal *quartz-rods*, com són la seva utilització com indicadors cinemàtics i per comprendre la relació entre variables geomètriques que condicionen el seu desenvolupament. A continuació s'exposaran les tres eines proposades per l'anàlisi quantitatiu de la deformació. Es farà una descripció de les bases conceptuals per a la definició, de l'extensió necessària mitjançant nous models numèrics alhora d'incrementar les seves capacitats d'aplicació i de les seves restriccions alhora de la seva utilització real. Finalment s'exposarà la seva aplicació a la zona d'estudi que ens conduirà a un intent d'interpretació estructural de la cinemàtica global de la deformació D2 per a la zona de Puig Culip.

8.2 Síntesi dels conceptes observats mitjançant la modelització

La modelització ens ha permès de constatar i visualitzar la gran complexitat en el plegament de capes d'espessor no homogeni. Aspectes relacionats amb la localització primària són essencials en el seu desenvolupament, però també el grau d'interacció entre aspectes geomètrics de configuració o entre els nivells d'escala i tipus de pertorbacions amplificades. Un resum dels principals aspectes aportats per cadascun dels diferents nivells de l'estudi és la següent:

Capítol 4: Influència de les interfases.

- La presència d'asimetries entre les interfases condicionen la geometria final dels plecs desenvolupats. D'aquesta forma el paràmetre d'asimetria longitudinal (ϕ) originava l'arranjament ordenat asimètric dels boudins, mentre el paràmetre d'asimetria transversal (A') era capaç d'originar disposicions dels boudins com a zones de xarnera o el propi plegament d'aquests. Tots dos aspectes reafirmen el rol de la forma inicial de les pertorbacions en el desenvolupament dels plecs, fins i tot, a nivell de configuració de la geometria de les interfases de la capa.

Capítol 5: Pertorbacions aïllades.

- La presència d'una pertorbació inicial aïllada també ens fixa la geometria final desenvolupada. Però, la capacitat de rotació o amplificació dels boudins serà condicionada al desenvolupament de plecs marginals o perifèrics als boudins, Aquests darrers plecs poden arribar a inhibir la rotació dels boudins.
- La variació de l'espessor de l'interboudin (T_i) s'ha mostrat com un paràmetre eficaç per interpretar la modificació de geometries i tendències entre capes d'espessor homogeni i configuracions de partícula aïllada. La transició mecànica és ràpida i es produeix per a valors de $T_i=0.05-0.10$. Això origina un domini general dels processos de *buckling*.
- L'increment de la relació axial (R_i) dels boudins origina un decreixement de la seva capacitat de rotació. Però és una relació no simple, i que és altament dependent de la cinemàtica i la relació de longitud d'ona/espessor del boudin respecte la capa envolvent.
- L'increment de components coaxials paral·leles a la capa afavoreixen la rotació dels boudins. Per a situacions de capa pròximes al pla de cisalla i condicions de cisalla simple únicament són plausibles rotacions de boudins per a $R_i \leq 2$ i $T_i < 0.10$. Això es tradueix que la component essencial per explicar la rotació dels boudins és la coaxial mentre la de cisalla paral·lela a la capa és secundària. La conseqüència és una independència entre la geometria i l'escurçament final de la capa respecte el número de vorticitat cinemàtic de la deformació (Wk').
- S'observa una relació entre el sentit de rotació dels boudin i el de cisalla paral·lela a la capa. Això condiciona la relació d'orientació entre l'eix llarg dels boudins i l'eix de màxima extensió (λ_1) al voltant del boudin o la distribució de les zones de màxima i mínima deformació. També condiciona la nucleació de la

zona de xarnera dels plecs i la diferencia de rotació entre els boudin i els flancs dels plecs marginals.

Capítol 6: Models experimentals amb materials analògics.

- Demostració física o real del desenvolupament d'aquest tipus d'estructures. S'ha pogut constatar la variabilitat de solució a partir d'una configuració inicial similar o demostrar l'efecte del paràmetre ϕ .
- Relació qualitativa de la influència dels paràmetres T_i i D_i en la geometria final desenvolupada.
- Caracterització heterogènia tant espacial com temporal de les pertorbacions. Efectes del desenvolupament d'arranjament asimètrics o la rotació dels boudins en la distribució de les raons principals de la cinemàtica.
- La geometria final és dependent de condicionants externs com és la possibilitat de lliscament entre la capa i la matriu. També de la variació de la rotació de l'envolvent de la capa.
- Situacions d'extensió paral·lela a les capes originen una caiguda de la capacitat de rotació i plegament. Gran part de la deformació és acomodada per deformació homogènia. Tant sols és possible l'amplificació de les pertorbacions si es produeix una partició estructural en la direcció d'extensió, com per exemple boudinage/fractura, localització variable, lliscament capa/matriu, etc.

Capítol 7: Múltiples pertorbacions

Segurament els models numèrics amb múltiples pertorbacions ens ha permet un avanç més substancial en l'estudi d'aquestes estructures, sobretot per la generalització tant de les configuracions geomètriques inicials com de les raons de cinemàtica i d'orientació de la capa. Destaquen per la seva importància els següents aspectes:

- L'espai de configuracions geomètriques inicials (R_i , D_i i T_i) és pot dividir en quatre modes d'inestabilitats principals (comportament de partícules aïllades, plegament *pich-and-swell*, tren de boudins plegat i capa plegada). La configuració inicial no sempre ens determina la geometria final de les pertorbacions desenvolupades, doncs depèn de essencialment del paràmetre T_i .
- Es pot establir un espai d'organització similar dels models respecte les variables de l'angle d'orientació de la capa (α) i l'angle entre els eigenvectors del flux (β).

Aquesta relació ens permet definir trajectòries d'equivalències geomètriques (EVT) que uneixen resultats amb geometries similars però amb condicions de cinemàtica i orientació diferents. Dins aquest espai, l'orientació de capa paral·lela al pla de cisalla és una disposició essencial, doncs ens permet visualitzar gran part de l'espai de solucions possibles. Però, només aquelles solucions sintètiques amb el sentit de cisalla de la deformació.

- El desenvolupament sistemàtics d'arranjaments asimètrics no és inherent a una geometria inicial *pinch-and-swell*, sinó que és altament dependent del paràmetre Ti . També de la cinemàtica i de l'orientació de la capa. La transició entre els dos extrems de configuracions implica una variació del grau d'asimetria de les estructures que es desenvolupen. L'asimetria no és el reflex de condicions de deformació no coaxials sinó la conseqüència de diferències en la velocitat de rotació entre l'envolvent de la capa i els boudins.
- La probabilitat d'una organització asimètrica de l'estructura s'incrementa amb l'augment del grau de no coaxilitat de la deformació i la paral·lelització al pla de cisalla.
- Els efectes de grau de no linealitat (n) del material o el contrast de viscositat (m) són secundaris per a situacions de capa altament competent ($m \gg 25$). En canvi, la presència de lliscament al llarg de la interfase entre la capa i la matriu pot originar també el desenvolupament d'arranjaments asimètrics, però el sentit de rotació dels boudins és oposat als de la situació de contacte coherent.
- Donada la no presència d'una pertorbació inicial predefinida dins d'aquests models, la geometria final dels plects desenvolupats són conseqüència de la cinemàtica imposada durant el procés de selecció i amplificació de les pertorbacions. Això es produeix durant els estadis inicials de la deformació (fins a $\varepsilon \sim 0.10-0.15$) i origina que per condicions no estacionaries l'estructura final no reflecteixi gran part de la cinemàtica. És a dir i en general, el plegament de capes amb geometries *pinch-and-swell* no és sensible a modificacions del caràcter no coaxial de la deformació. És incapaç de reflexar aquestes modificacions desenvolupant les geometries previstes a partir de models amb condicions estacionaries.

No tots aquests aspectes són vàlids alhora d'utilitzar-los per a situacions de camp real. Molts es troben associats a paràmetres no mesurables mitjançant les observacions de

camp, i la seva aplicació encara que funcional a nivell numèric no ho és en un sentit pràctic. Altres són de mesura complexa i només mesurables de forma qualitativa, com podria ser la distribució de la deformació al voltant dels sigmoïdal *quartz-rods*. Però, què és mesurable al camp? En general, la informació geomètrica de l'estructura és la més simple i factible de fer-ho, com també la disposició dels elements estructural. Qualsevol dels mètodes quantitativs que és vulguin plantejar s'hauran d'abordar mitjançant aquests paràmetres. Dos graus d'aplicació de la informació de la modelització: una a nivell qualitatiu i altra a nivell més quantitativu.

8.3 Criteris per l'anàlisi qualitatiu

Uns dels objectius plantejats dins el present estudi és comprendre el desenvolupament de plects a partir de geometries de capes amb espessor no homogeni. Per aconseguir-ho s'ha plantejat un estudi extens i rigorós a nivell de mecànica de medis continus. Potser, per a gran part dels geòlegs estructurals no és trivial comprendre la necessitat d'abordar estudis a nivells mecànics. En general, s'accepta que un anàlisi cinemàtic més deductiu és més que suficient. Però, comprendre els processos de localització, de selecció i amplificació d'instabilitats, d'interacció entre pertorbacions, etc. són claus (i crec que essencials) alhora d'establir una relació entre geometria final de les estructures i la cinemàtica de la deformació. Fins i tot a un nivell d'estudi qualitatiu. Dins aquest nivell hi ha dos grans aspectes d'anàlisi: quin ús podem fer com a indicador cinemàtic i quines són les variables geomètriques inicials que condicionen la geometria final dels sigmoïdal *quartz-rods*.

8.3.1 Utilització com a indicador cinemàtic.

Un indicador cinemàtic és qualsevol estructura amb disposició asimètrica que ens pot arribar a donar informació sobre el sentit de cisalla de la deformació. Aquest últim aspecte és el darrer nivell d'una sèrie de consideracions sobre les components angulars o rotacionals de la deformació. Per a qualsevol indicador s'ha de diferenciar i intentar establir: (1) el sentit de rotació relatiu respecte al sistema de referència (informació sobre la vorticitat), (2) el sentit de cisalla paral·lel a la capa i finalment, (3) el sentit de cisalla de la deformació (informació sobre el número de vorticitat cinemàtica i el grau de no coaxilitat de la deformació).

El sentit de rotació relatiu dels boudins és obvi a partir de l'obliquïtat d'aquests respecte l'envolvent de la capa. Ens centrarem en els criteris per inferir el sentit de cisalla

paral·lel a la capa per a situacions d'escurçament de la capa. Els criteris més sensibles són (Fig. 8.1):

- Disposició relativa entre l'eix llarg dels boudins (a) i l'orientació de l'eix de màxima extensió λ_1 (2D, models numèrics) o el pla XY de deformació. Per a situacions de rotació del boudin sintètic al sentit de cisalla paral·lel a la capa l'angle amb les cares dels boudins és elevat. En canvi per a situacions de rotació antitètica, el boudin i l'eix de màxima extensió són subparal·lels amb un angle d'obliquïtat baix.
- El grau de refracció de XY és molt més elevada per a condicions sintètiques, sobretot a les zones de xarnera on la diferència d'orientacions entre les regions d'arc intern i extern poden arribar a ser de 90° . Als arcs externs es desenvolupa una XY subparal·lela a la xarnera. En canvi per a situacions antitètiques no hi ha refraccions gaires elevades i la disposició és semblant a tota la perifèria de l'estructura.
- La disposició de les zones de màxima i mínima deformació és diferents segons la relació amb el sentit de cisalla. Per a situacions sintètiques els màxims es situen a les regions d'arc intern i extern. Les zones de mínima deformació corresponen a la part central de les cares dels boudins. En canvi per a situacions antitètiques les zones de màxima deformació són localitzades als arcs interns i paral·leles a les cares dels boudins, mentre les zones d'arc extern corresponen a zones de baixa deformació. El criteri a camp pot ser establert mitjançant el grau de desenvolupament i persistència de la foliació XY .
- La localització de la zona de xarnera és coincident (o molt pròxima) amb el colls dels boudins per a sentit sintètic. En canvi per a situacions antitètiques aquesta és localitzada desplaçada respecte als colls dels boudins i es desenvolupa dins el segment d'interboudin. Aquest criteri és molt subjectiu i incrementa la seva fiabilitat per a relacions axials de boudins petites ($R_i < 4$). En altres situacions no és unívoc.
- La longitud d'ona resultant associada al flanc dels boudins és molt menor per a situacions sintètiques que antitètiques. La diferència de rotació relativa entre els flancs s'incrementa per a aquest darrer cas. La capacitat de rotació dels boudins disminueix amb els sentits de rotacions antitètics, mentre que el flanc del plec

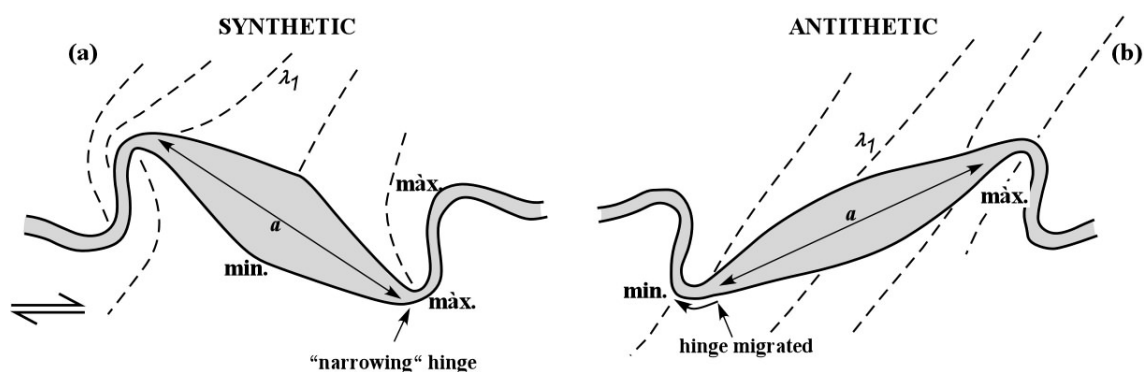


Fig. 8.1 Esquema dels principals elements sensibles alhora d'establir el sentit de cisalla a partir d'una estructura "pinch-and-swell" plegada. (a) Configuració de boudin amb rotació sintètica a la cisalla paral·lela a la capa. (b) Configuració de boudin antitètica. Els principals elements sensibles són: distribució i refracció de l'eix màxim (λ_1) o el pla XY , distribució zones de màxima i mínima deformació finita i la disposició de la inflexió de la xarnera respecte els extrems dels boudins.

associat incrementa la seva rotació i acomoda gran part de l'escurçament paral·lel a la capa.

Els diferents criteris són mostrats a l'esquema de la Fig. 8.1. Cap d'aquests criteris són unívocs, i la coherència de la interpretació s'incrementa amb l'augment de la concordança dels diferents criteris. S'ha de vigilar alhora de la seva aplicació per a situacions amb disposició de la capa a un angle elevat amb el pla de cisalla. Per aquestes situacions, els models mostraven sentits d'asimetria contraris al de rotació de l'envolvent de la capa. Per aquestes disposicions, la geometria dels boudins és similar a l'antitètica, però el sentit de cisalla inferit paral·lel a la capa és oposat. És lògic si tenim en compte que l'asimetria que observem és un reflex de la diferencia de rotacions relatives entre l'envolvent de la capa i els boudins (Ishii, 1992). La fiabilitat de la indicació cinemàtica és major per a situacions paral·leles al pla de cisalla.

Altres factors que s'han d'avaluar són la possibilitat de lliscament entre la matriu i la capa o la presència inicial d'asimetries longitudinals (ϕ). El primer factor origina la rotació oposada dels boudins respecte al de cisalla. La geometria i distribució de la deformació és similar que el cas antitètic. Les zones de xarnera són relativament suaus, amb poca curvatura per a situacions sense escurçament paral·lel a la capa. La presència d'asimetries inicials no modifica els criteris qualitatius, però pot arribar a originar una sistemàtica elevada de la disposició asimètrica dels boudins no lligada amb la pròpia cinemàtica de la deformació. Detectar aquest paràmetre mitjançant la geometria final no

és simple, doncs la pròpia dinàmica del desenvolupament de l'estructura genera cert desfasament entre les zones de màxima curvatura dels arcs interns i externs.

Alhora d'establir el sentit i/o el grau de no coaxilitat, la definició de criteris a partir de la geometria d'aquestes estructures no és tan senzill. Si atenem a la distribució de formes de l'espai d'organització dels models, el camp de sentits d'asimetries sintètics amb la cinemàtica de la deformació són equivalents a les geometries descrites prèviament com a sintètiques. Segons les dades de distribució dels models numèrics, sempre l'asimetria dels boudins és indicadora del grau de no coaxilitat de la deformació. Sempre i quan el supòsit que deformació sigui compatible amb condicions de cisalla subsimple del tipus *broadening* i, *a priori*, condicions de deformació plana. Per a deformació coaxials o amb envolvent de capa allunyades amb el pla de cisalla les geometries desenvolupades tendeixen a ser similars a les antitètiques, amb disposició de *XY* paral·lela a l'eix llarg dels boudins. Altres aspectes que ajuden a una interpretació qualitativa dels sentit de no coaxilitat és la distribució de les formes dels plecs amb el canvi d'orientació (Fig.8.2a). El desenvolupament de plecs amb formes "S" són equivalents al camp sintètic del plegament de capes *pinch-and-swell* (veure Fig. 7.34). La paral·lelització amb les *ISA* afavoreixen a les formes "M" de plecs i el camp de baixa probabilitat d'arranjament asimètric dels boudins. Finalment, per a situacions cap a condicions d'extensió el desenvolupament de formes "Z" i el camp amb disposició antitètica. El reconeixement de la variació de formes és un complement als mètodes d'estimació de la *Wkm* mitjançant la distribució de formes de les venes o capes (Hutton, 1982; Passchier, 1986; Wallis, 1992). Altra aspecte relacionat és la probabilitat de desenvolupament d'arranjament asimètrics. Si inicialment no es van donar condicions d'asimetries longitudinals, l'increment d'estructures asimètriques i imbricades són compatibles amb condicions de deformació no coaxials. S'ha de vigilar molt amb condicions no estacionaries i retreballament actiu o positiu de les pertorbacions que pot emascarar el grau de no coaxilitat finita de la deformació. És un exemple d'asincronia entre geometria i cinemàtica.

Si intentem aplicar els criteris exposats fins ara a la situació de camp, podem observar que gran part dels boudins corresponen a geometries i disposicions dels elements planars similars als interpretats com a sintètics (comparar Fig. 8.1 amb les geometries de camp de la Fig. 3.32). El sentit de rotació senestre dels boudins és sintètica amb el de cisalla paral·lela a la capa. Aquesta interpretació és consistent amb l'efectuada al llarg

del capítol de descripció de camp. La interpretació qualitativa del grau de no coaxilitat però és més complexa. Segons els resultats numèrics, aquestes geometries sempre són sintètiques amb el sentit de cisalla de la deformació. Per tant, el grau de no coaxilitat de la deformació D2 per a dominis de baixa deformació i flancs llargs és senestre per a un sistema paral·lel a la S0/1. Això és també concordant amb la distribució tant de les geometries dels plecs de les venes de quars (Fig. 8.2a) com de la distribució esperable a partir de la inferència de múltiples solucions (Fig. 8.2b). Per a situacions de domini del sentit dextral, la geometries pronosticades pels models numèrics no concorden amb les observacions de camp, on paral·lela a la S0/1 s'haurien d'observar formes "M" o paral·lela a l'eigenvector d'escurçament formes amb sentit d'asimetria oposades als actuals. La presència del bandejat composicional i/o la S0/1 sembla compatible amb al pla efectiu de cisalla principal de la deformació D2 per a condicions de baixa deformació. Això és coherent amb les dades de models experimentals amb límits reològics (Treagus and Sokoutis, 1992). El grau de no coaxilitat no és estimable. S'haurà d'intentar a partir del desenvolupament d'eines d'anàlisi quantitatiu.

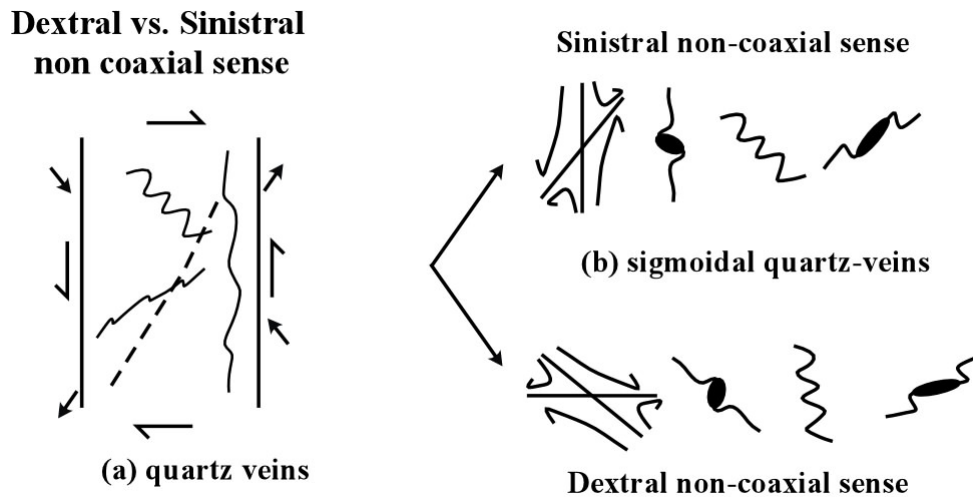


Fig. 8.2 Anàlisi qualitatiu del grau de no coaxilitat. (a) Esquema sintètic amb la variació de les geometries de les venes de quars plegades ("S", "M" i "Z") respecte la seva orientació. S'han representat els eixos principals d'escurçament i extensió (fletxes) i els sentits de cisalla per un sistema de referència paral·lel a la S0/1. Per determinar el sentit de no coaxilitat s'han d'establir la mida relativa dels camps de rotació de les línies materials. (b) Solució dual pels sigmoïdal *quartz-rods*. S'ha representat l'esquema teòric de configuracions a partir d'una condició senestral no coaxial paral·lela a la S0/1 i dextral no coaxial amb límits de banda E-W. Les observacions de camp concorden pel cas de deformació no coaxial senestre.

8.3.2 Anàlisi qualitatiu de les variables que condicionen la geometria final dels sigmoïdal *quartz-rods*.

Al llarg de l'estudi experimental i numèric s'ha pogut constatar que la configuració inicial de la distribució *pinch-and-swell* de la capa és el factor que exerceix un major control en la geometria final de la capa dels models. El reconeixement d'un conjunt de modes d'instabilitats principals (veure secció 7.8) o la divisió en diverses categories geomètriques (Fig. 3.51), ens aporten una base de conceptes molt potent alhora de comprendre i interpretar l'ampli ventall de formes que s'observen al camp. Originalment, la definició de les categories geomètriques de camp no varen néixer com un procés inductiu a partir de les observacions de camp. Algunes s'havien inferir però no totes. Sinó que en gran part varen ser inferides a partir dels resultats dels models numèrics i la divisió dels quatre modes principals d'instabilitats. Aquest conjunt de modes o categories són en darrer terme conseqüència de la interacció dels paràmetres geomètrics essencials T_i , D_i i R_i . La divisió i l'ús d'aquests termes ens donen l'oportunitat d'un anàlisi ràpid i funcional alhora d'identificar els principals elements de l'estructura i inferir part de les causes que han originat a nivell mecànic l'ordenament estructural que observem al camp.

Una exemple d'aquesta capacitat d'interpretació és descrita a partir de l'anàlisi de la Fig. 8.3. Aquesta figura il·lustra un exemple magnífic de la complexitat de les estructures desenvolupades a partir de venes de quars amb distribució d'espessor irregular. A primer cop d'ull, l'ordenament i el tipus d'estructures que es poden reconèixer sembla caòtic i sense cap pauta d'ordenament bàsic. Els boudins es disposen en orientacions diferents amb el desenvolupament als interboudins d'un conjunt variable d'estructures. Podem observar exemples de múltiples pertorbacions de plegament petites, pertorbacions de plegament d'elevada amplitud, interboudin com a flanc de plec i associat al boudin, interboudin amb una longitud d'ona, etc. Aquesta diversitat de geometries són el reflex del control mecànic de la longitud i espessor dels interboudins. La variació entre l'interboudin marcat com 0 a 6 és la conseqüència d'un progressiu increment tant de la longitud de l'interboudin com del seu espessor. És el reflex mecànic de l'adequació de les longitud d'ona a la geometria inicial i tot el ventall de possibilitats per acomodar d'una forma "eficaç" la deformació. La capacitat de rotació dels boudin depèn en gran part de la selecció d'aquestes pertorbacions i la seva relació a nivell d'escala de pertorbacions. Les rotacions més elevades és produeixen quan el boudin és dins la longitud d'ona dels plecs. És per aquest casos quan el boudin presenta

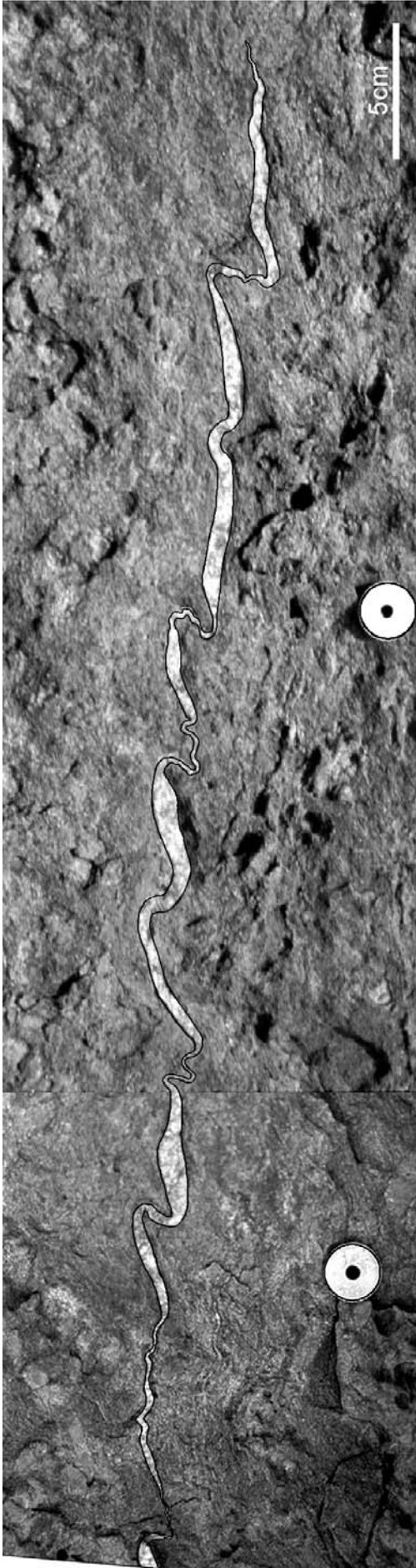


Fig. 8.3 Exemple de camp d'una vena de quars amb distribució de l'espessor irregular. A priori, la geometria final pot semblar complexa i sense cap pauta d'ordenament. Però, si apliquem part dels conceptes observats mitjançant els models numèrics simplistes, podem arribar a comprendre gran part de les cuses que originen les geometries que observem. D'aquesta forma la variació d'estructures entre els interboudins 0 a 6 és explicable mitjançant el increment del paràmetre Di . La irregularitat de la geometria de la capa condicions la localització de la deformació preferent als interboudins. En el segment 8 es pot observar l'efecte de capa de longitud finita i nucleació d'inestabilitats de plegament al llarg d'una geometria de boudin amb relació axial massa gran. Consultar text principal per a més detalls

unes relacions axials més elevades i pròximes a les condicions de capes d'espessor semblant (per exemple "boudin" entre 9-2 o 4-1). Per a situacions amb geometries més pròximes a boudins, la capacitat de rotació és molt menor (cas de boudins entre 2-4 o 1-6). Aquestes observacions són coherents doncs per a boudins amb $Ri > 4$, la capacitat de rotació d'aquests és reduïda i s'afavoreix el desenvolupament de plecs marginal com és el cas de l'interboudin 4. També queda constatat per la diferència de rotació entre els flancs amb boudin o sense, on per aquest darrer cas la rotació finita és molt major i pot superar els 120-140°. En canvi els boudins no superen els 20-30°. L'asimetria dels plecs és marcada per l'orientació dels interboudins i representa una geometria oposada a la tendència dels plecs de l'encaixant i observada per a tota la zona. A la fotografia no s'aprecia la foliació S2 però la seva disposició és semblant al de boudin amb sentit sintètic, però s'infereix un elevat grau de coaxialitat. Altres aspectes que es poden inferir és l'efecte de partició de la deformació al llarg de la capa. Per a segments de capes entre boudins (com nº 4 ó 6), les pertorbacions es troben més amplificades i desenvolupades que en segments de capes aïllats i fora de l'efecte de la distribució d'espessor irregular (nº 7). El caràcter més resistent dels boudins origina una intensificació de la deformació als interboudins. Finalment observar el caràcter finit de la vena de quars (extrem dret) i el desenvolupament d'instabilitats de plegament al llarg dels boudins amb relació axial més elevada (nº 8).

No obstant la simplicitat inherent dels models numèrics, tant a nivell geomètric com de propietats reològiques o de les condicions de contorn, la capacitat d'aplicació dels conceptes derivats és prou elevada. Fins i tot, a partir d'una definició de configuracions essencialment periòdiques i simples com són les dels models numèrics, és possible establir conceptes bàsics que ens permeten abordar la descripció i interpretació d'estructures naturals complexes i pròximes a la realitat del medi geològic inherentment "brut". La idealització simplista dels models numèrics i analògics és prou funcional per abordar l'estudi d'estructures complexes i completar el seu estudi amb un anàlisi qualitatiu a nivell de mecànica i cinemàtica.

Finalment constatar que no tot pot ser explicat a partir dels models numèrics. Així, per exemple les causes de la disposició del segment de capa entre 4 i 1 no és entesa. Teòricament s'hauria de plegar amb el desenvolupament d'una longitud d'ona menor, però no és així. Segurament ha de relacionar-se amb la geometria tridimensional d'aquests cossos i és un dels factors que continuaran complicant la seva interpretació. També aspectes no analitzats com l'anisotropia i el rol d'interacció de les pertorbacions

a diferents nivells d'escala ho compliquen encara més. Però aquesta base definida a partir d'aquest estudi sembla en gran part aplicable a la zona d'estudi de camp. El següent avanç ha de ser plantejar eines d'anàlisi quantitatives.

8.4 Eines per l'anàlisi quantitatiu

8.4.1 Idealització. Factors bàsics per l'anàlisi quantitatiu.

Alhora de poder definir eines funcionals per l'anàlisi de la cinemàtica de la deformació, cal simplificar i idealitzar l'estructura. En gran part, això ja s'ha realitzat en el moment de definir la configuració dels models numèrics i experimentals. La forma inicial de la capa s'ha suposat com a aproximable a una geometria *pinch-and-swell*. Però també s'han d'explicitar aquells conceptes derivats a partir dels resultats de la modelització que ens permetin fer una sèrie de supòsits alhora de definir les eines d'anàlisi d'una manera funcional. Les hipòtesis i consideracions que s'ha realitzat són les següents:

- (1) Condició d'una pertorbació inicial aïlla amb un angle d'inclinació (φ_0) respecte l'envolvent de la capa. L'angle inicial és per a tots els casos $\varphi_0=1.43^\circ$. No obstant ser tan petit, representa un angle d'obliquïtat finit i condiciona el sentit de rotació preferent del boudin. L'angle escollit és aproximadament pròxim a la condició de trencament entre el domini d'amplificació cinemàtica i dinàmica de la pertorbació (Schmalholz and Podladchikov, 2002). S'han realitzat els models per a les dues condicions de sentit de rotació dels boudins respecte al sentit de cisalla imposat per la cinemàtica. La situació d'una pertorbació inicial i aïllada implica la condició més favorable al seu desenvolupament i suposa condicions de velocitat d'amplificació i rotació màximes.
- (2) La generalització d'orientacions i cinemàtica s'ha tractat a partir del concepte de trajectòries d'equivalència geomètrica (*EVT*). La situació de màxima informació és l'orientació paral·lela al pla de cisalla. S'ha definit el paràmetre β^* com l'angle d'equivalència o de referència de la no coaxialitat. Per a un conjunt de solucions que defineixen una *EVT*, el valor associat β^* és l'angle entre els eigenvectors (β) de la solució amb orientació de la capa paral·lela al pla de cisalla. És a dir, de tot l'espai de cinemàtica i orientacions únicament té sentit la condició de capa paral·lela al pla de cisalla (α_0) i condicions de deformació monoclinica $0 \leq Wkm \leq 1$. Una implicació associada és que tant sols és vàlid per a estructures del camp de rotació de boudin sintètic amb el de cisalla. No té representació el camp antitètic.

- (3) El rang de valors d'espessor normalitzat d'interboudin més interessant són per a $T_i < 0.20$. Aquests valors representen els camps de comportament de partícula i plegament *pinch-and-swell*. Per simplificar la informació i la seva representació, s'ha escollit un valor de referència $T_i = 0.10$ com a mesura comparativa. Per a situacions amb $T_i < 0.10$ el valor implicarà una infravaloració de la deformació mentre situacions inverses una sobrevaloració.
- (4) La capacitat de rotació dels boudins és molt dependent de la relació axial dels boudins (R_i). S'han escollit com a marc de referències els valors $R_i = 2$ i $R_i = 4$. Aquests dos valors s'han seleccionat a partir de la distribució de R_i i α de les dades de camp. Respectivament representen condicions d'elevada i baixa rotació dels *quartz-rods* amb la deformació.
- (5) Condicions de materials amb propietat lineals, i contrast de viscositat (m) entre la capa i la matriu de 100. Aquest valor s'ha escollit atenent l'elevat contrast de propietats de les venes de quars i l'observació en els models numèrics que per a valor de $m \gg 20$ la rotació finita és aproximadament similar, amb una variació del seu valor petita.
- (6) Finalment no s'han considerat la possibilitat de lliscament entre la capa i la matriu. En tot moment és suposarà un contacte coherent entre la matriu i la capa. Tampoc és considerat l'efecte d'asimetries transversals de la capa (A'). En canvi, les asimetries longitudinals (ϕ) representen un efecte secundari, doncs en gran part la seva influència és inclosa en el supòsit de pertorbació inicial.

D'aquesta sèrie de supòsits els més important són el primer i el segon, i neixen del desenvolupament dels models numèrics dels capítol 5 i 7. El primer implica la definició bàsica dels models de treball, mentre la segona hipòtesis té la càrrega de deducció més elevada doncs s'ha de suposar com a vàlid el concepte d'EVT i d'organització geomètrica de l'espai de solucions (veure apartat 7.5)

Els altres conceptes són merament addicionals, per intentar reduir els paràmetres independents, i en general no són crítics alhora de validar la definició de les eines d'anàlisi quantitatiu. En veritat, es podria considerar qualsevol valor de l'espectre T_i i R_i , o fins i tot situacions de plecs desenvolupats en capes d'espessor homogeni. Però la sensibilitat com a marcador d'escurçament i, sobretot, del grau de no coaxialitat de la deformació disminueix quan ens allunyem dels valors proposats anteriorment. Implícitament, un aspecte crític que si que condiciona prefixar alguns paràmetres és que

la validesa de la interpretació quantitativa és dependent del bon ajust geomètric de les dades de camp als valors prefixats.

8.4.2 Models numèrics. Ampliació.

Com s'ha explicat anteriorment, la base per la definició de les eines d'anàlisi quantitativa seran les dades provinents dels models numèrics realitzats en el capítol 5. Un problema que s'havia detectat era a nivell "tècnic" amb la limitació de la deformació final pel col·lapse de la geometria dels elements de la malla. Això limitava els resultats a valors de deformació naturals ε entre 0.6 a 1.2. Els valors menors corresponen a condicions de flux coaxial, o amb elevades taxes d'escurçament paral·lel a la capa, mentre que per a fluxos no coaxials s'aconseguien deformacions més elevades. Aquest aspecte limita la comparació entre els diferents models, i no és plausible una normalització de la deformació respecte l'escurçament paral·lel a la capa, doncs hi ha el problema de convergència de solucions. Condicions d'alta deformació potser no són del tot necessàries per la zona d'estudi, però requerides per incrementar la funcionalitat de les eines que pugin arribar-se a proposar. Per superar aquest entrebanc es va decidir realitzar una extensió dels models numèrics a partir de tècniques de regeneració de la malla dels models. Aquesta possibilitat no és disponible a l'aplicació numèrica utilitzada (FLAC2D, veure www.itascacg.com) i té l'agreujant que el tipus de malla que utilitza (estructurada en files i columnes) no és gaire compatible amb tècniques de regeneració simples. Es podrien realitzar remallats continus a partir d'una conversió de la malla inicial a tipus "staggered" amb la definició de marcadors independents que enriqueixen la malla de diferències finites. Aquest tipus de tècniques són les que utilitzen gran part dels programes numèrics aplicats a l'estudi de processos geodinàmics a escala litosfèrica que utilitzen com a base l'esquema de solució explícit per diferències finites dels entorns FLAC (Poliakov and Hermann (1994); Gerya and Yuen (2003); Gerbault et al., (2002)). Però, aquestes tècniques són molt complexes i fora dels límits cognitius del doctorant i no s'han pogut implementar a l'aplicació numèrica. Donat el interès essencial de l'estudi en la geometria final de la capa, s'ha optat per a tècniques simples de regeneració de malles adaptatives a la geometria de la capa. Però aquest procés és inviable a partir de malles estructurades com les de FLAC2D. Per això, s'han realitzat els models a partir de l'aplicació FLAC3D (veure www.itascacg.com). Aquest programa numèric permet definir el model a partir de malles no estructurades essent més flexible la seva definició. Però també té problemes, doncs tampoc presenta cap

funció de regeneració de malles ni tant sols de generació automàtica durant el preprocessament inicial dels models. S'ha solucionat aquest problema mitjançant la combinació a nivell de preprocessament amb les aplicacions ANSYS-ED (www.ansys.com) o GID (<http://gid.cimne.upc.es>). Aquestes permeten una definició de malla a partir d'un entorn gràfic automatitzat. La solució es fa mitjançant FLAC mentre els processos de preprocessament i generació de malles a partir d'una de les altres. Per simplificar el procés s'ha automatitzat amb funcions l'exportació i importació de les dades de geometria de la capa i dels elements de la malla entre ambdues aplicacions. El procés no és totalment automatitzat i requereix la intervenció manual alhora d'obrir els fitxers de definició i controlar la qualitat final de la malla. Únicament s'ha regenerat la malla de les regions de la matriu, mentre els elements que defineixen la capa s'han mantingut iguals. Sempre els errors de col·lapse del model es troben associats a les regions de matriu amb elevada distorsió. S'han establert refinament de la malla al voltant de la capa i en aquelles zones més problemàtiques com són els arcs externs i interns dels plecs. El remallat del model s'ha efectuat per a intervals de deformació ε entre 0.4 a 0.6, i aproximadament tot el procés (exportació fins a reinici a FLAC3D) es realitza en una hora.

Les condicions de contorn i deformació aplicades als models FLAC3D són idèntiques a FLAC2D. El tipus de model reològic com les seves propietats també són iguals. L'única transformació és a nivell tècnic de definició de la malla i l'ús d'elements de 8-nodes i no de 4-nodes com era el cas bidimensional. La deformació és plana.

Abans de reiniciar el model s'han interpolat els valors dels tensors d'esforços, deformació infinitesimal i finita de l'antiga malla a la nova malla. Això s'ha realitzat a partir dels centres de gravetat dels elements i els nodes de la malla. Aquesta interpolació pot generar difusió dels valors antics però en general són molt reduïdes. Per a minimitzar efectes transients i deixar reequilibrar-se mecànicament els models, s'ha reiniciat el model amb un pas de solució petita que s'incrementa de forma progressiva fins a igualar-se amb el pas de temps genèric dels models numèrics (un cicle de solució equival a un temps de 20 anys).

Exemples de la variació de la geometria dels resultats són mostrades a les Fig. 8.4, 8.5 i 8.6. Respectivament representen l'exemple del procés d'amplificació d'una configuració inicial amb $Ri=2$ i condicions de cisalla pura (Fig. 8.4) i no coaxial (Fig. 8.5), i la comparació per aquesta darrera cinemàtica els resultats d'una configuració inicial amb $Ri=4$ (Fig. 8.6).

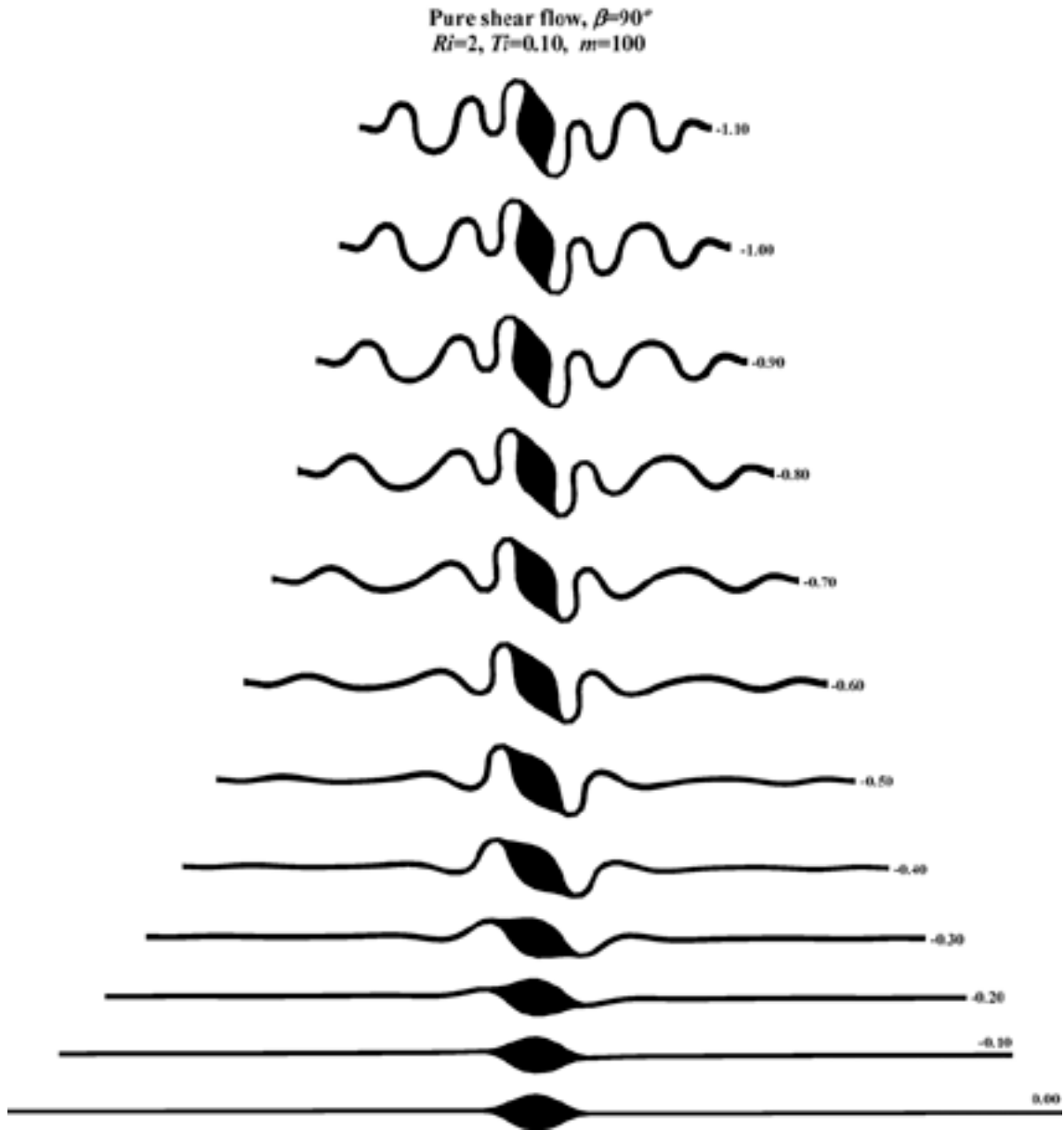


Fig. 8.4 Evolució del plegament d'una capa-boudin amb una configuració inicial definida $Ri=2$ i $Ti=0.10$, i condicions de cisalla pura. S'han utilitzat tècniques de regeneració de malles adaptatives. Observar la propagació dels folds al llarg de capa totalment planar i l'estancament del boudin per a rotacions elevades ($>70^\circ$). El valors de deformació natural (ϵ) és indicat a la dreta (el signe indica escurçament paral·lel a la capa).

Almenys al referent a les geometries els resultats, aquestes són molt semblants a les observacions de camp dels sigmoïdal *quartz-rods*; fins i tot per a zones d'elevada deformació on s'observaven geometries amb elevades rotacions i convergència dels boudins i dels flancs dels plecs marginals. A nivell qualitatiu aquests resultats en permeten inferir sobre la possibilitat d'un límits de rotació pels boudins. Inicialment la deformació és acomodada activament per la pertorbació predefinida. Es produeix la ràpida rotació del boudin i el desenvolupament dels plecs marginals (per exemple fins a

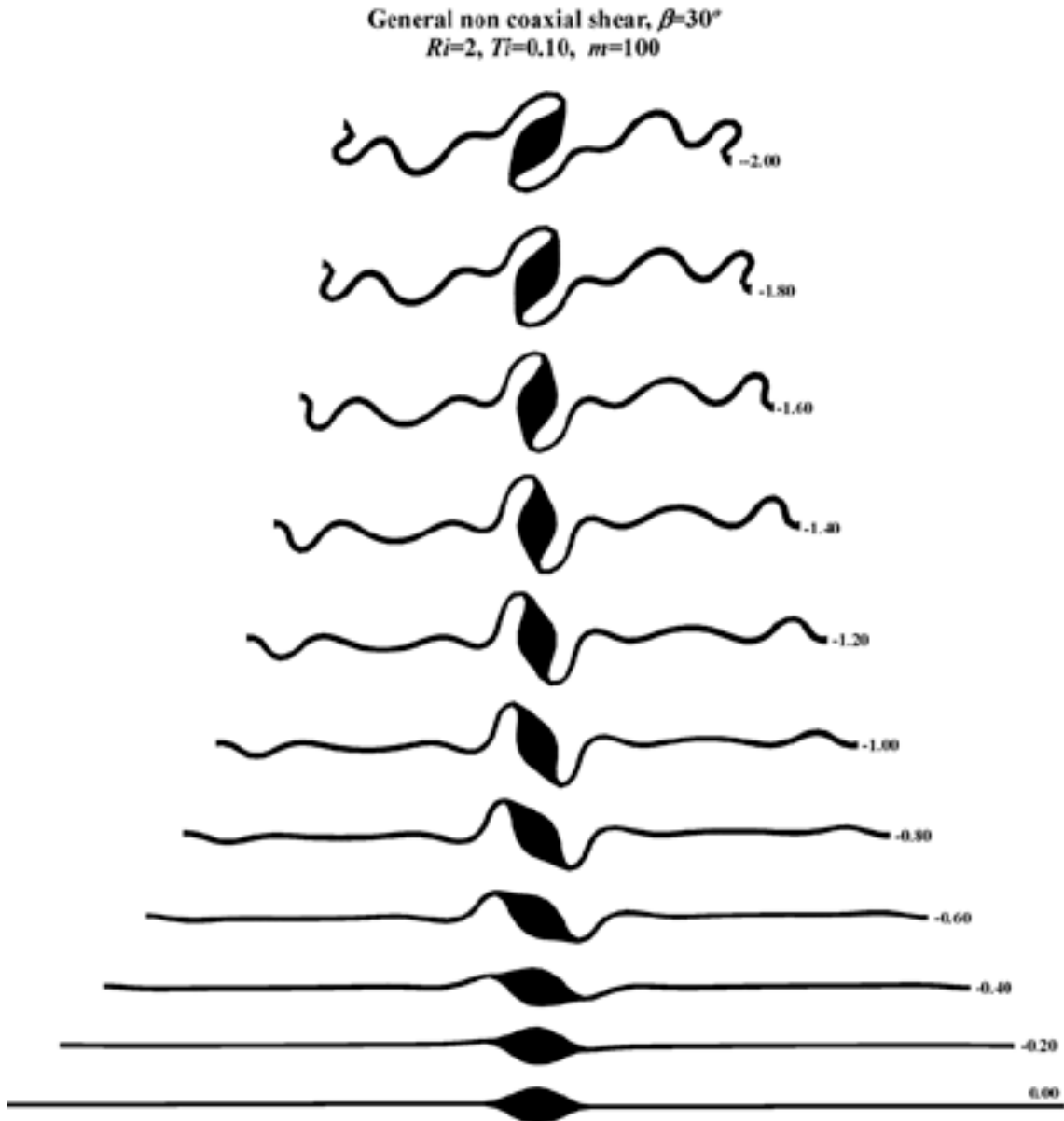


Fig. 8.5 Evolució del plegament d'una capa-boudin amb una configuració inicial definida $Ri=2$ i $Ti=0.10$, i condicions de cisalla subsimple amb $\beta=30^\circ$. Observar la geometria altament rotacional de la pertorbació i la tendència a paral·lelitzar-se amb l'eigenvector extensional. El valors de deformació natural (ε) és indicat a la dreta (el signe indica escurçament paral·lel a la capa). El mètode simple de remallat permet desenvolupar models fins a elevades deformacions ($\varepsilon=2.0$).

$\varepsilon=0.50-0.60$ de la Fig. 8.4). Però per a deformacions més elevades hi ha la tendència a inestabilitzar-se tota la capa i a la nucleació de noves pertorbacions de plegament. Aquestes són el reflex de la capacitat no efectiva del sistema per a continuat acomodant la deformació per amplifació i/o rotació de la pertorbació inicial. Les noves inestabilitats representen plectes de propagació que assumeixen el paper d'acomodadors de la deformació per amplifació. També poden representar inestabilitats generades a partir de les condicions de contorn, com clarament ho són les desenvolupades als

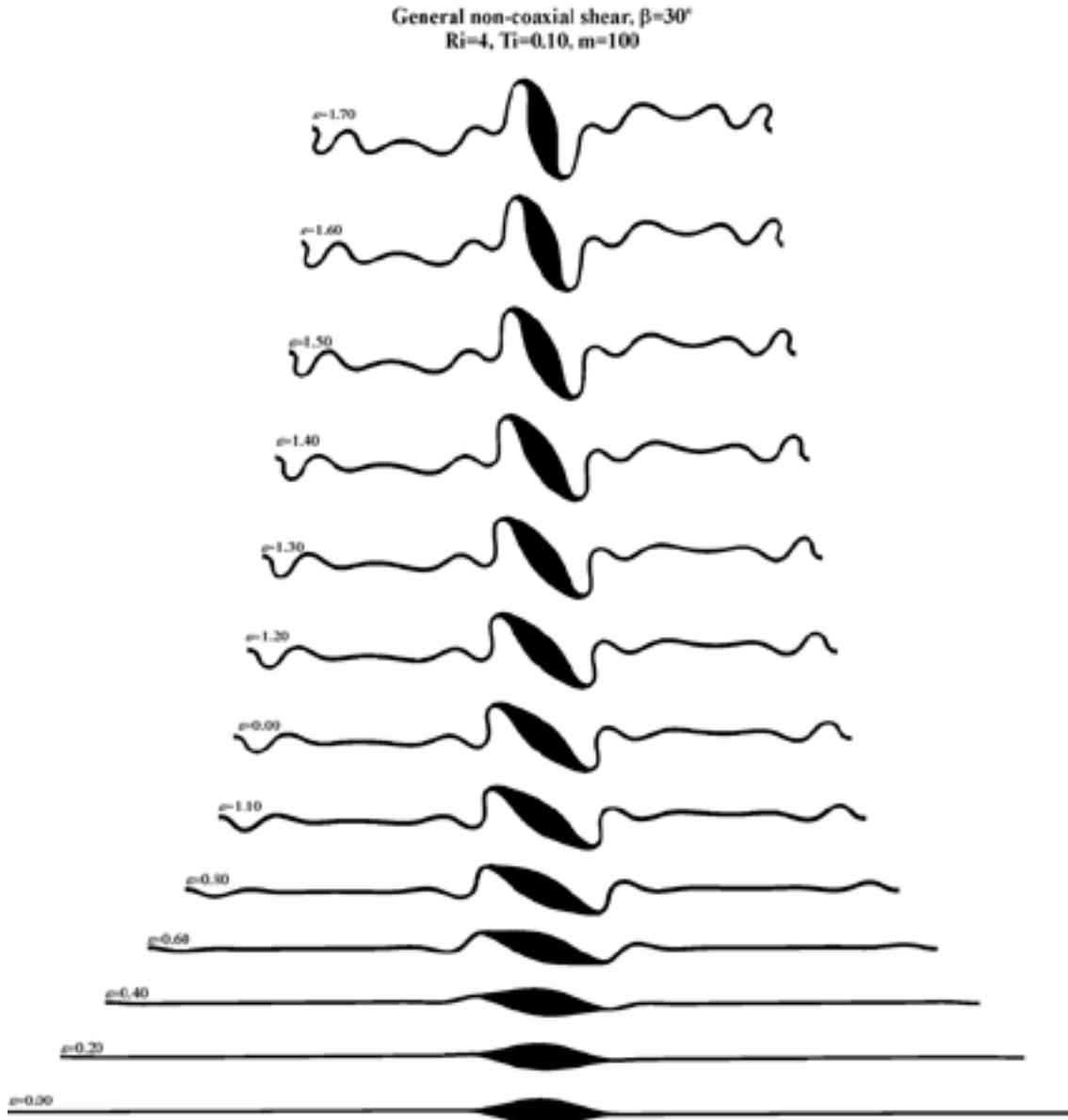


Fig. 8.6 Evolució del plegament d'una capa-boudin amb una configuració inicial definida $Ri=4$ i $Ti=0.10$, i condicions de cisalla subsimple amb $\beta=30^\circ$. Comparar els resultats amb els de la condició $Ri=2$ (Fig. 8.5). L'increment de la relació axial del boudin redueix la capacitat de rotació, segurament afavorida pel desenvolupament de plects marginals d'elevada amplitud. El valors de deformació natural (ε) és indicat a l'esquerra de la figura (el signe indica escurçament paral·lel a la capa).

extrems de les capes per a situacions no coaxials (Fig. 8.5 o 8.6). Independentment del seu origen, comporten el bloqueig o reducció de la velocitat de rotació del boudin. Pel cas de cisalla pura, això es produeix per a rotacions finites $\alpha \sim 60-70^\circ$. A partir d'aquest moment la rotació del boudin continua però a baixa velocitat aproximant-se de forma progressiva capa a una orientació paral·lela a l'eigenvector extensional de la deformació (ξ_1). Aquesta observació és també vàlida per a situacions no coaxials, i no s'ha observat en cap dels models numèrics (almenys fins a $\varepsilon=2.0$, límit de màxima deformació) cap situació on el boudin creua l'orientació de ξ_1 . És més, l'increment de la relació axial

dels boudin (cas de $Ri=4$) afavoreix a velocitats menors i orientacions de bloqueig encara més prematures. La possibilitat de creuament d'aquesta orientació per part del flanc del plec marginal, i generalitzant per a qualsevol plec en una capa d'espessor homogeni, si que sembla factible atenent els resultats dels models i l'angle de creuament s'incrementa amb la relació axial dels boudins. Això fins i tot per a condicions de cisalla pura, on el flac dels plecs acaba dibuixant geometries elàstiques. A nivell mecànic és conseqüència de la convergència de pressió entre la matriu disposada en les regions d'arc interns i els flancs dels plecs.

Aquestes observacions fan establir una nova conjetura de cara a la definició de les eines d'anàlisi quantitativ, on no existeix la possibilitat general de creuar l'orientació de l'eigenvector extensional per a deformacions estacionaries sense rotacions externes com són les dels models numèrics. Cal recordar, que dins els supòsits de definició de les eines d'anàlisi cal afegir totes les consideracions que són implícites a la definició dels models numèrics com són les condicions de contorn (estacionaries, cisalla no coaxials monocliniques, no rotació externa o component d'espín, etc.) o de les propietats i definició de la reologia del medi (elastoviscós lineal, propietats constants amb el progrés de la deformació, etc.).

A nivell "purista", l'efecte de propagació de noves inestabilitats al llarg de la capa s'ha de considerar com un error, doncs trenquen el supòsit d'una única pertorbació sense cap competència per part d'altres. Es genera una distorsió a l'escala de temps entre deformació aplicada i acomodada a la matriu i la que equival a nivell de geometria final de la pertorbació. El desenvolupament d'aquestes inestabilitats però són inevitables i hauran de ser tractades com inherents als procés mecànic d'amplificació de la pertorbació inicial. També ajuden a explicar i visualitzar el procés d'estancament o cessament de la inestabilitat de plegament.

8.4.3 Definició de les eines per l'anàlisi quantitativ.

Aquesta llarga, i pesada, exposició sobre les hipòtesis, supòsits i consideracions a partir dels quals es plantegen els mètodes d'anàlisis quantitativs, és al meu parer, totalment necessària alhora d'una correcta i objectiva explicitació d'aquests. Ara ens cal abordar la identificació d'aquells paràmetres geomètrics mesurables al camp que siguin més sensibles i aptes per la quantificació d'aquelles raons d'interès. Per aquest estudi, aquestes són la deformació finita i una estimació del número de vorticitat cinemàtic (Wkm) o del grau de no coaxilitat de la deformació (Wkm'). La primera s'ha plantejat

d'expressar a partir de la deformació natural ε . La segona és més complexa i s'ha decidit expressar mitjançant β^* , que s'ha definit com l'angle entre els eigenvectors de la deformació de la solució d'un conjunt *EVT* amb orientació de la capa paral·lela al pla de cisalla. És a dir, és igual a l'angle β d'un model amb capa paral·lela al pla de cisalla. Únicament $\beta^*=\beta$ quan la rotació de l'envolvent de la capa sigui nul·la (condició de capa paral·lela a l'eigenvector compressiu). β^* és un paràmetre incert i l'estudi s'ha de completar amb una estimació de la relació d'orientació de la capa amb els eixos de la deformació finita i infinitesimal o amb la variació de geometries amb els canvis d'orientacions dels marcadors. Això té la seva lògica doncs el número de vorticitat és definit com la variació de velocitats angulars d'un parell de línies ortogonals respecte l'acumulació de la deformació finita. Amb el temps, segurament fora més correcte modificar el paràmetre β^* pel valor de cisalla angular finita paral·lela a la capa (γ_1). Aquest darrer terme es pot expressar com,

$$\gamma_{layer} = \frac{2\varepsilon}{\tan \beta^*} \quad (8.1)$$

El problema d'emprar aquest paràmetre com marcador de les component no coaxials, és l'evidència segura que per una mateixa *EVT* aquest valor no és constant sinó variable. La relació angular clau alhora d'*EVT* similars és la diferència de velocitats angulars entre l'orientació paral·lela i normal a la capa. De moment en aquest treball s'utilitzarà el paràmetre β^* al ser considerat provisionalment el més simple.

Quins paràmetres mesurables al camp podem utilitzar per estimar els valors de ε i β^* ? És la gran qüestió. Donat el caràcter geomètric d'aquest estudi, s'hauran de buscar paràmetres d'aquest tipus i si fos possible el més simple possible. Per a l'estudi de quantificació de la deformació a partir de plecs s'han utilitzat les relacions entre l'amplitud, la longitud d'ona i l'espessor de la capa (veure apartat 3.3.3). Implícitament aquestes relacions ja han estat emprades doncs són combinacions dels paràmetres de relació axial del boudin (R_i) i de les relacions normalitzades de l'espessor (T_i) i longitud de l'interboudin (D_i). Donat la definició de pertorbació aïllada, aquest darrer terme no serà utilitzat per l'anàlisi quantitatiu. Però cal afegir més informació doncs la combinació de T_i i R_i només ens donen una informació insuficient de la geometria de les inestabilitats desenvolupades. L'única informació que ens resta d'afegir respecte als plecs és la raó d'amplitud. Però no és factible de fer-ho com una mesura directa. La forma més eficaç d'expressar-la és mitjançant l'angle de rotació dels flancs de la

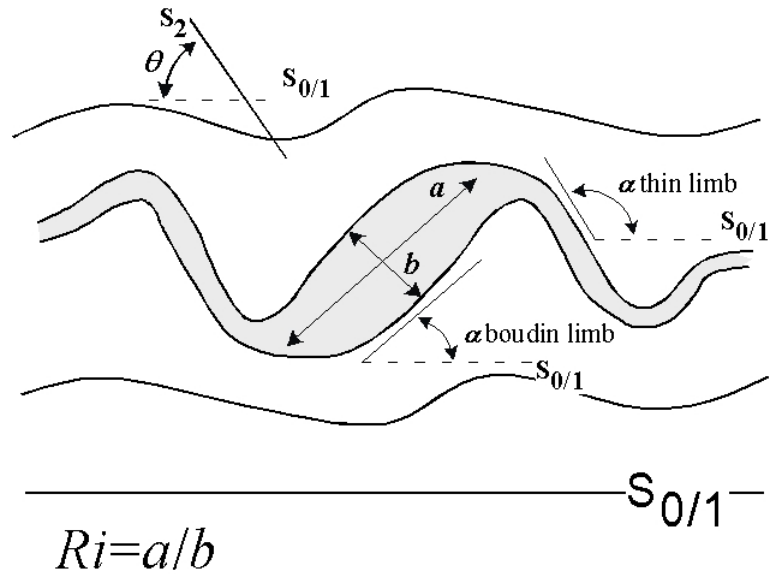


Fig. 8.7 Esquema ideal amb la definició dels principals paràmetres geomètrics utilitzats per a la definició dels diagrames per a la quantificació de la deformació.

pertorbació. Un angle de rotació associat al boudin (α), però també és pot fer el mateix per a mesurar l'orientació del flanc del plec marginal ($\alpha_{\text{thin limb}}$). Aquestes mesures s'han realitzat respecte l'envolvent de la capa. Altra raó externa al desenvolupament de la capa és l'orientació del pla XY respecte l'envolvent de capa. Com aproximadament totes les configuracions dels sigmoïdal *quartz-rods* de camp són paral·leles a la $S_{0/1}$, és equivalent a la mesura de l'angle entre la S_2 i la $S_{0/1}$. Aquest paràmetre s'ha denominat θ i s'ha definit com l'angle entre la $S_{0/1}$ i la S_2 mesurat en sentit antihorari. Un esquema de la definició i relació dels diferents paràmetres estimables al camp és mostrada a la Fig. 8.7. Notar que no hi ha una abundància dels paràmetres factibles alhora de la quantificació i s'haurà d'utilitzar de la informació màxima disponible. Però, si és possible la quantificació, observar la simplicitat de definició i mesura d'aquests paràmetres geomètrics. A partir de la combinació d'aquests paràmetres de camp s'han proposat tres mètodes per a la quantificació de la deformació.

8.4.3.1 Mitjançant la diferència de rotació dels flancs. Mètode individual i escala temporal interna.

Un dels aspectes geomètrics més visibles d'aquestes estructures és el grau d'asimetria entre la rotació del boudin i la rotació del flanc del plec marginal. Per a condicions de $Ti \sim 0.10$, aquesta variació és primordialment dependent de Ri . Però per a situacions de Ri constant, la variació d'asimetria és funció de la cinemàtica de la deformació. El primer mètode que és proposa per a la quantificació de la deformació és a partir de la

diferència d'orientacions dels dos flancs. El requisit és conèixer com és la variació dels paràmetres d'orientació α amb la deformació i el grau de no coaxialitat. Per a poder estimar-ho s'ha construït un diagrama cartesià en funció de β^* i α (Fig.8.8). Dins d'aquest s'han representat per corbes la variació d'orientació per a un valor de deformació natural constant. És a dir, el gràfic és compost per un conjunt de corbes $\alpha(\beta^*)$ per a una $\varepsilon=k$. El rang de variacions de les corbes és entre $0.2 \leq \varepsilon \leq 1.0$, amb equidistància de 0.1. Les corbes de la part superior corresponen a les de l'interboudin mentre les inferiors als boudins. S'han realitzat per a relacions axials de $Ri=2$ i $Ri=4$. Únicament s'han calculat per a situacions de rotació sintètiques amb el sentit de cisalla de la deformació. L'estimació pràctica consisteix en la mesura inicial de l'angle dels dos flancs (α_{boudin} i $\alpha_{thin\ limb}$). Llavors és tracen un parell de rectes horitzontals en el diagrama (segons la Ri) segons el valor de l'angle d'orientació. Com la deformació finita de tots dos flancs ha de ser la mateixa, és tracen un conjunt de línies que uneixen els punts de tall dels dos conjunts de corbes i rectes horitzontals amb valor $\varepsilon=k$. Això genera un conjunt de rectes inclinades que varien la seva pendent fins a una recta disposada paral·lela a l'eix α i amb valor de β^* constant a tots dos flancs. L'estimació dels valors (ε, β^*) és fa a partir d'aquesta darrera recta.

La informació inferida correspon a la mesura de deformació per a una dada puntual de camp. La informació necessària únicament depèn de la geometria de l'estructura i no intervé en cap cas altres dades mesurades externament. És per això que l'escala temporal de la mesura de deformació és interna, doncs depèn únicament del desenvolupament de l'estructura. Diferències originades per la partició de la deformació entre la capa competent i la matriu no tenen influència en aquest mètode.

Un dels problemes associats a la seva utilització pràctica és la necessitat de fer convergir una recta amb β^* constant. Això molt cops és complex, doncs petites desviacions de les mesures originen no convergència de les rectes. Un factor d'ajuda és el canvi de sentit de sentits d'aquestes rectes que ens permet inferir una estimació aproximada. Altra aspecte problemàtic és el solapament de les corbes dels interboudins i dels boudins que impedeixen continuar el diagrama per $\varepsilon > 1.0$. També la geometria convexa/còncaves de les corbes pot arribar a generar una incertesa o dualitat de solucions. Finalment la convergència de les corbes dels interboudins amb l'increment de la deformació (veure Fig. 8.8 per a $Ri=4$) inhibeix la seva utilització pràctica per a $\varepsilon > 1.0$. Per complementar aquesta eina d'anàlisi s'hauria de desenvolupar el diagrama per a situacions de rotació del boudin antitètica. Però la menor rotació dels boudins per

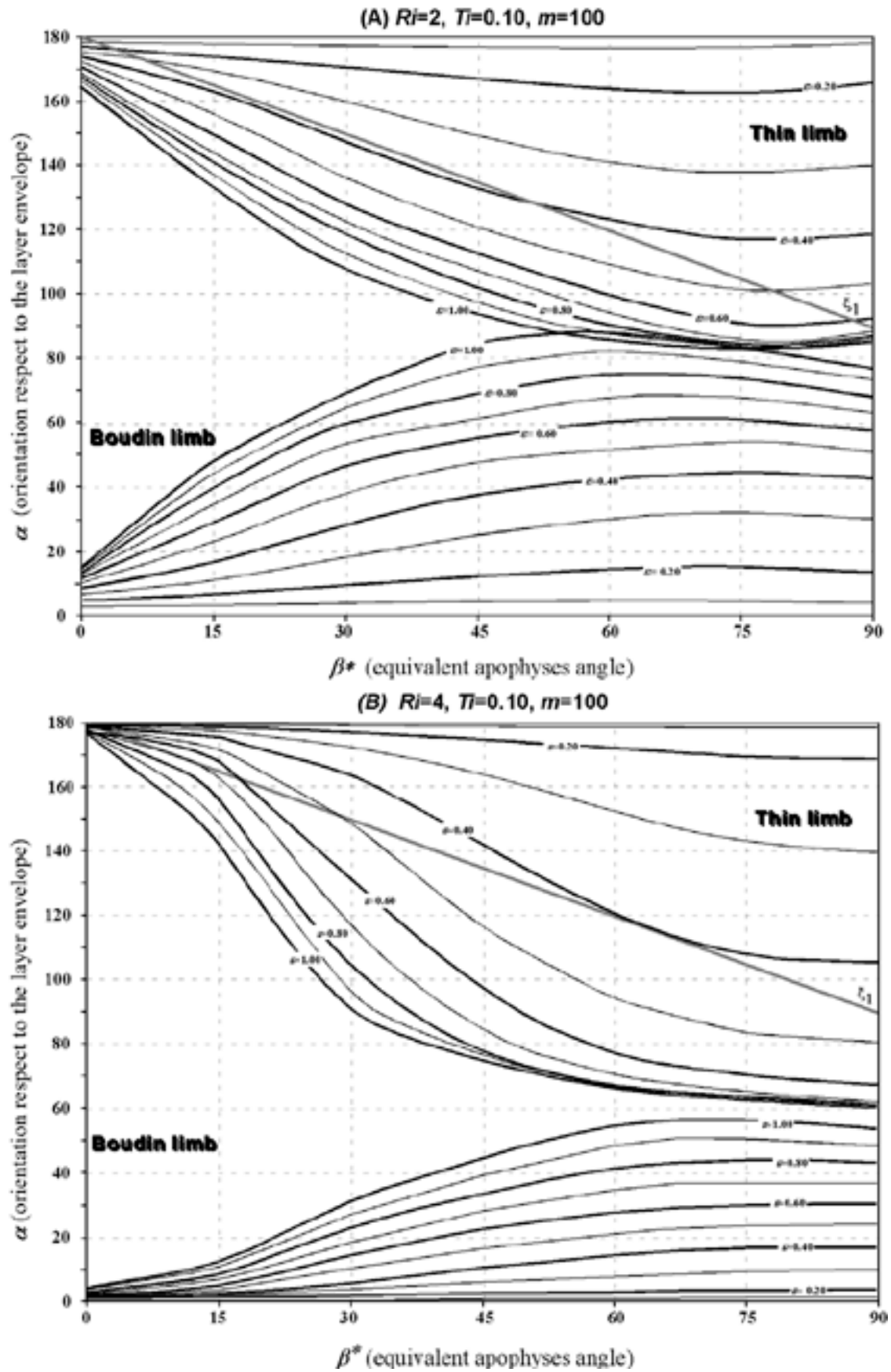


Fig. 8.8 Diagrames base per a l'estimació de ϵ i β^* mitjançant la diferència d'orientació entre el boudin i el flanc de capa de menor espessor. (a) $Ri=2$ i (b) $Ri=4$. Les corbes són l'orientació per a diferents valors de la deformació natural (ϵ). El mètode consisteix en trobar per a quin valor de ϵ , el parell de dades de camp defineixen una recta on β^* és constant.

aquestes situacions, ha d'originar un increment dels solapaments de les corbes de rotació dels flancs de l'interboudin.

No obstant tota aquesta sèrie d'aspectes, tornar a insistir que la dada d'estimació de ε i β^* obtinguda s'ha realitzat mitjançant dades pròpies de l'estructura, i per tant representen una estimació a partir d'un sistema de referència temporal (o de deformació) intern a l'estructura .

8.4.3.2 Mitjançant l'orientació del boudin i del pla XY. Mètode individual i escala temporal externa.

En aquest segon mètode l'estimació de ε i β^* es basa a partir de la variació d'orientació de l'eix llarg dels boudins i de l'orientació del pla XY de la deformació, o en el cas bidimensional dels models de l'eix de màxima deformació λ_1 . L'estimació també es realitza de forma gràfica. La base del mètode és similar a l'anterior, i és fonamenta en un diagrama cartesià en funció de β^* i α . En ell s'han representat dos conjunts de corbes: (1) variació de l'orientació del boudin ($\alpha=f(\beta^*)$) per a diferents valors de deformació natural ($0.1 \leq \varepsilon \leq 1.0-2.0$, amb interval de corbes entre 0.1 a 0.2), i (2) variació de l'orientació de pla XY (θ) en funció de β^* i α , és a dir $\theta=f(\beta^*, \alpha)$. Per fer-ho s'han representat per a un rang de valors de $20^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. Exemples d'aquests diagrames són mostrats a la Fig. 8.9 i 8.10, respectivament per a $Ri=2$ i $Ri=4$. Per a tots dos $Ti=0.10$. En aquestes figures es poden observar que s'han representat tant els sentits de rotació sintètics com antitètics dels boudins (camp inferior de color gris amb $\alpha < 0$). Les corbes negres corresponen a $\alpha(\beta^*)$ mentre les grises són les corbes $\theta(\beta^*, \alpha)$. Per $\varepsilon > 1.0$ s'han representat per a condicions sintètiques (corbes discontinues). Aquestes provenen de dades numèriques i d'interpolació per a condicions coaxials. L'estimació de la deformació i cinemàtica és fa directament a partir de la representació com un punt del parell de dades de camp (α, θ). Per a situacions de rotacions antitètiques i condicions altament no coaxials, l'estabilitat de rotació dels boudins en sentit oposat al de cisalla no és estable i és produeix la rotació en sentit oposat, és adir sintètic. Per aixó no s'han pogut representar en els diagrames.

També s'han calculat diagrames similars per a partícules rígides aïllades (Fig.8.11, (a) $Ri=2$ i (b) $Ri=4$ per a $Ti=0.00$). Aquestes s'han calculat a partir de les equacions de Gosh and Ramberg (1976). L'angle inicial d'orientació és $\varphi_0=1.43^\circ$. Observar que la geometria de les corbes tant les α com les θ són diferents a les Fig. 8.9, 8.10 i 8.11.

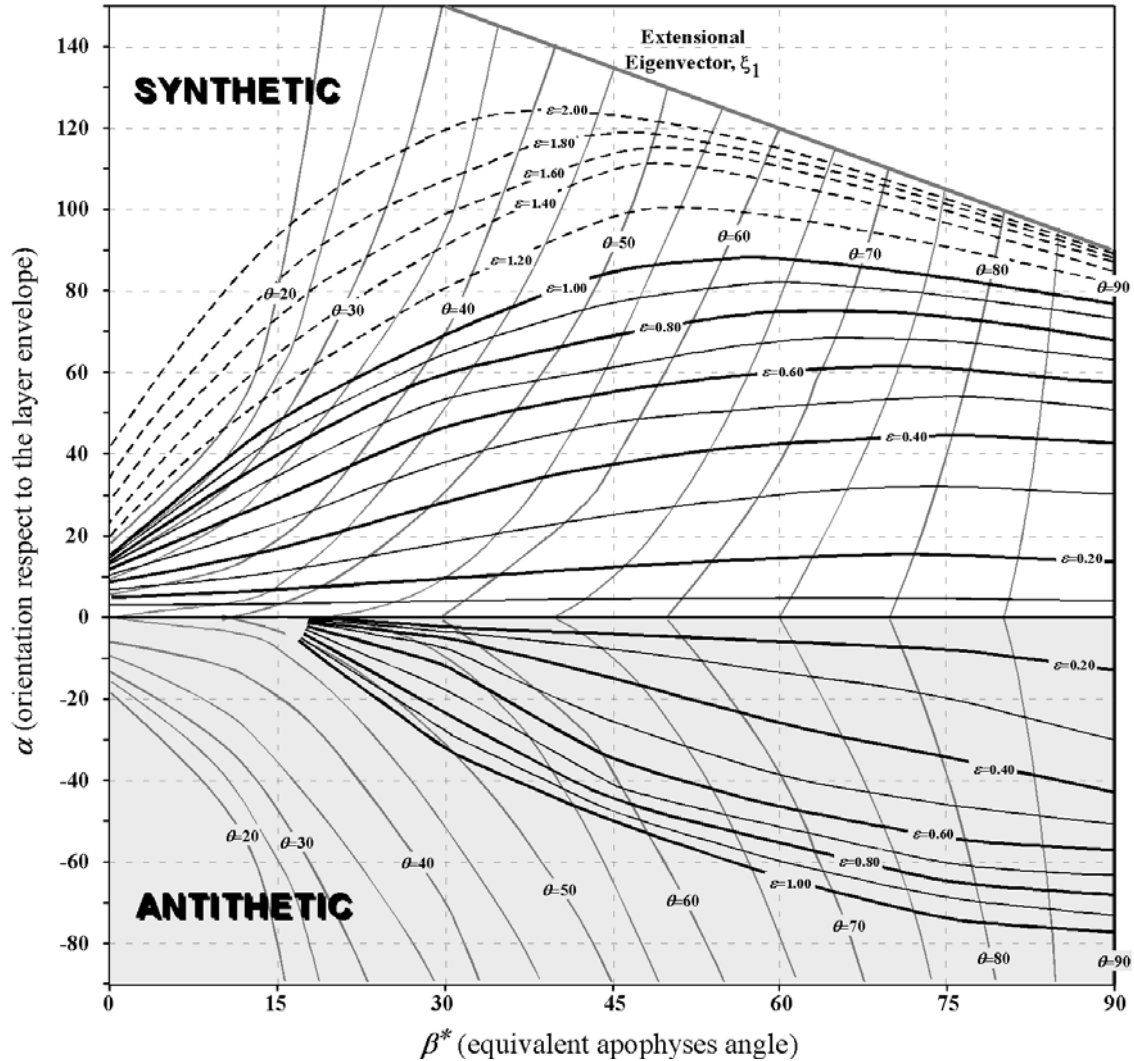


Fig. 8.9 Diagrama per a l'estimació de ϵ i β^* mitjançant la combinació d'orientació del boudin i de del pla XY de deformació. Diagrama definit mitjançant les dades dels models numèrics per a $Ri=2.0$. Les corbes negres defineixen la variació d'orientació dels boudins (α). Mentre les corbes grises defineixen l'orientació del pla XY (θ). S'han representat per a situacions de rotació sintètica i antitètica (camp gris amb valors α negatius). La seva utilització és fa mitjançant la projecció directa del punt de dades (α, θ).

Sempre s'han de calcular les θ en funció de les noves α , el que fa tediós la construcció d'aquests diagrames. Potser fora més pràctic una representació cartesiana (β^*, ϵ). Comparar també la diferència de rotació dels boudins per a tots dos casos, i com la condició de connectivitat de capa afavoreix a rotacions finites elevades per a baixes deformacions.

Aquest segon mètode és més funcional que l'anterior, però implícitament s'ha d'assumir que la progressiva variació d'orientació dels boudins i XY és sincrònica. Per als models numèrics aquesta sempre es compleix. Però, poden existir problemes d'asincronia entre l'escala d'acumulació de la deformació i la lligada al desenvolupament de l'estructura.

Per això s'ha denominat temporal externa, doncs es barregen paràmetres no associats directament i que poden arribar a evolucionar de forma no coherent. Aquestes desviacions poden trobar-se lligades a processos de partició de la deformació per efecte de capes de longitud finita (Schmid, 2002) o associades a deformacions no estacionaries.

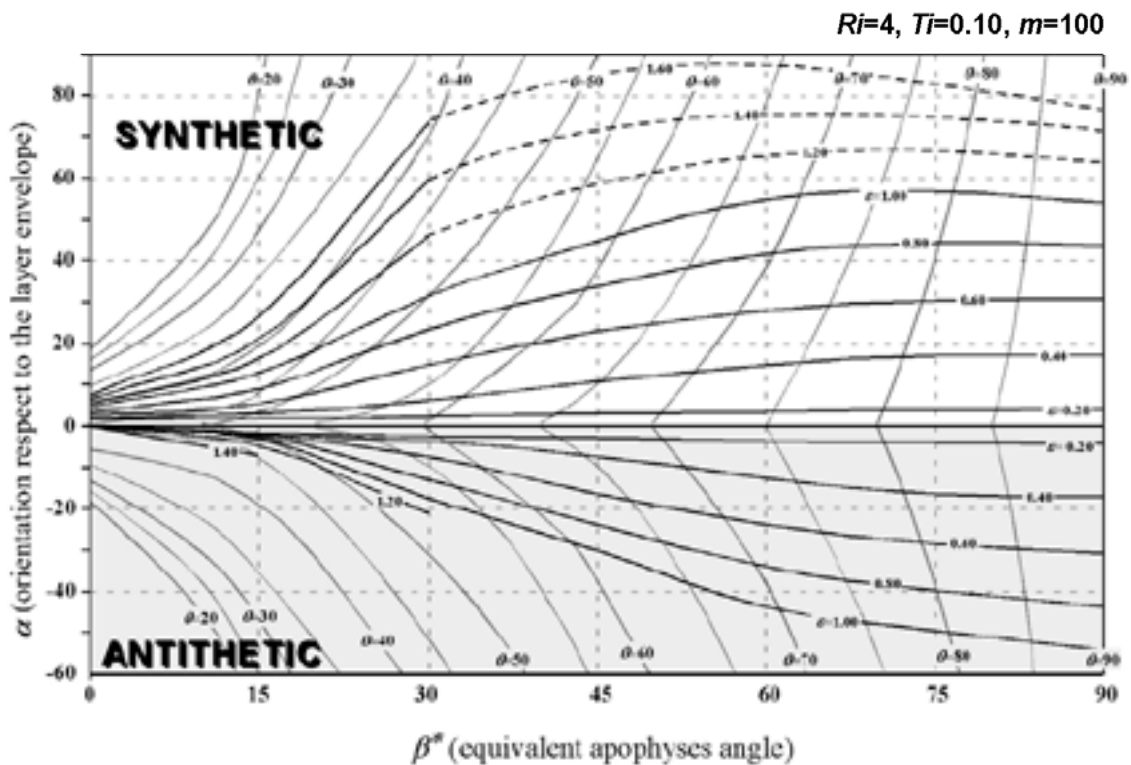


Fig. 8.10 Diagrama per a l'estimació de ϵ i β^* mitjançant la combinació d'orientació del boudin i de del pla XY de deformació. Diagrama definit mitjançant les dades dels models numèrics per a $Ri=4$. Les corbes negres defineixen la variació d'orientació dels boudins (α). Mentre les corbes grises defineixen l'orientació del pla XY (θ). S'han representat per a situacions de rotació sintètica i antitètica (camp gris amb valors α negatius). La seva utilització és fa mitjançant la projecció directa del punt de dades (α, θ). De cara a una aplicació pràctica, es recomana l'ús combinat de més d'una Ri de referència dels boudins.

8.4.3.3 Mitjançant l'orientació del boudin i del pla XY . Mètode global i escala temporal externa.

Aquest darrer mètode representa una generalització de l'anterior, amb l'objectiu de poder utilitzar les dades de camp obtingudes a partir de les corbes de distribució dels sigmoïdal *quartz-rods* en funció de l'orientació i la relació axial dels boudins (veure les Fig. 3.56 i 3.57). Les dades d'entrada són similars al cas anterior (α, θ), però ara no provenen directament de dades mesurades individualment, sinó establertes a partir de les corbes de distribució. És a dir, les dades provenen d'un tractament "estadístic" d'aquestes distribucions basada en la determinació de la mitjana de rotació del conjunt

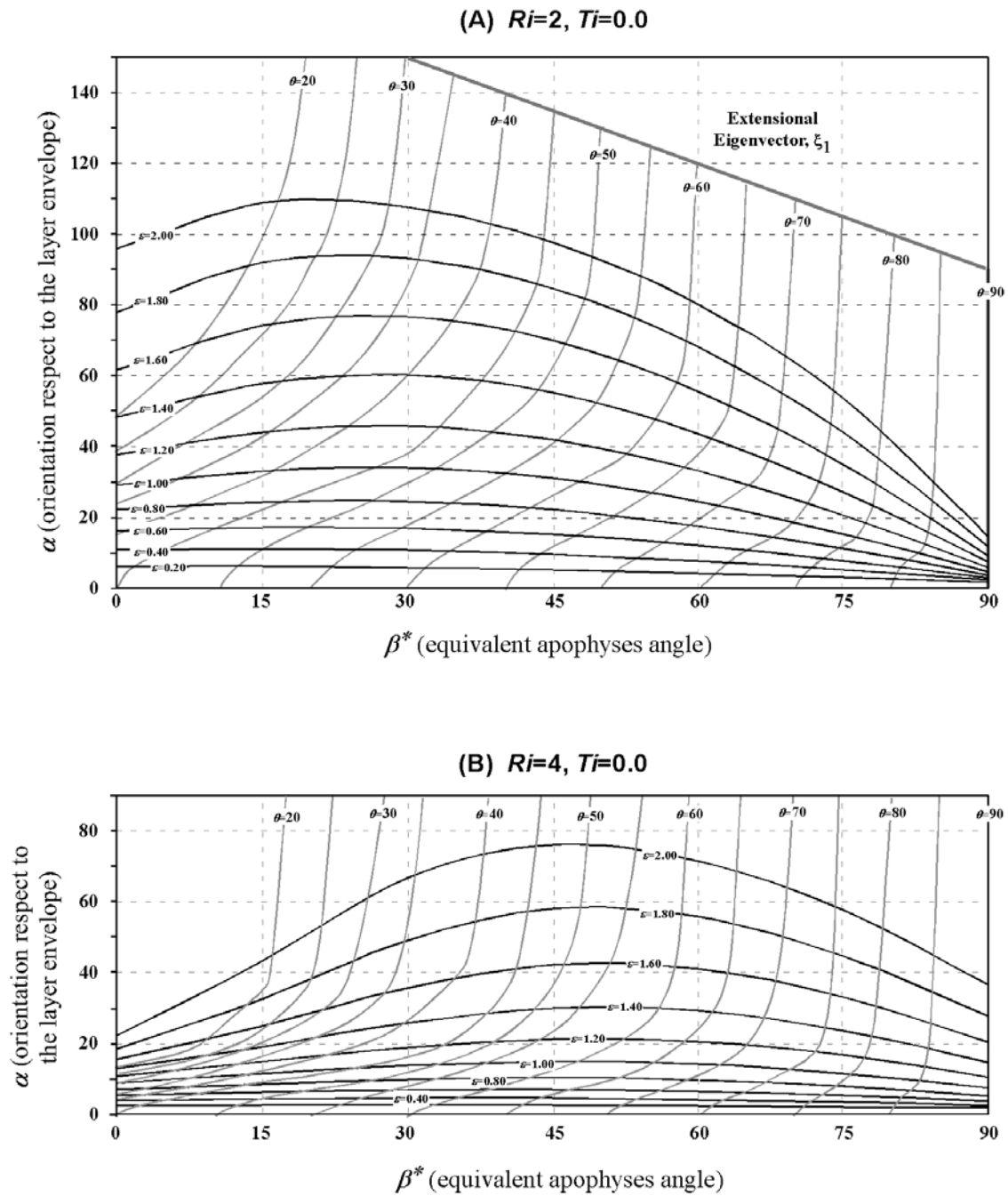


Fig. 8.11 Diagrames similars als anterior però definits per a partícules aïllades amb $Ri=2$ i $Ri=4$.

de dades i l'establiment d'un rang de màxima i mínima rotació de les dades. Aquest trienni de dades s'han d'establir per a una Ri constant. Com més endavant veurem, la millor forma d'obtenir les mesures és interpolant corbes de màxima, mitjana i mínima rotació al llarg dels diagrames Ri vs. α . El format del diagrama per a l'estimació és idèntic a l'anterior, i format per un conjunt de corbes del tipus $\alpha(\beta^*, \epsilon=k)$ i $\theta(\beta^*, \alpha)$ en un espai cartesià (β^*, α) (Fig. 8.12). Però, s'ha afegit dos tipus de nova informació provinent dels resultats dels models aleatoris (capítol 7),

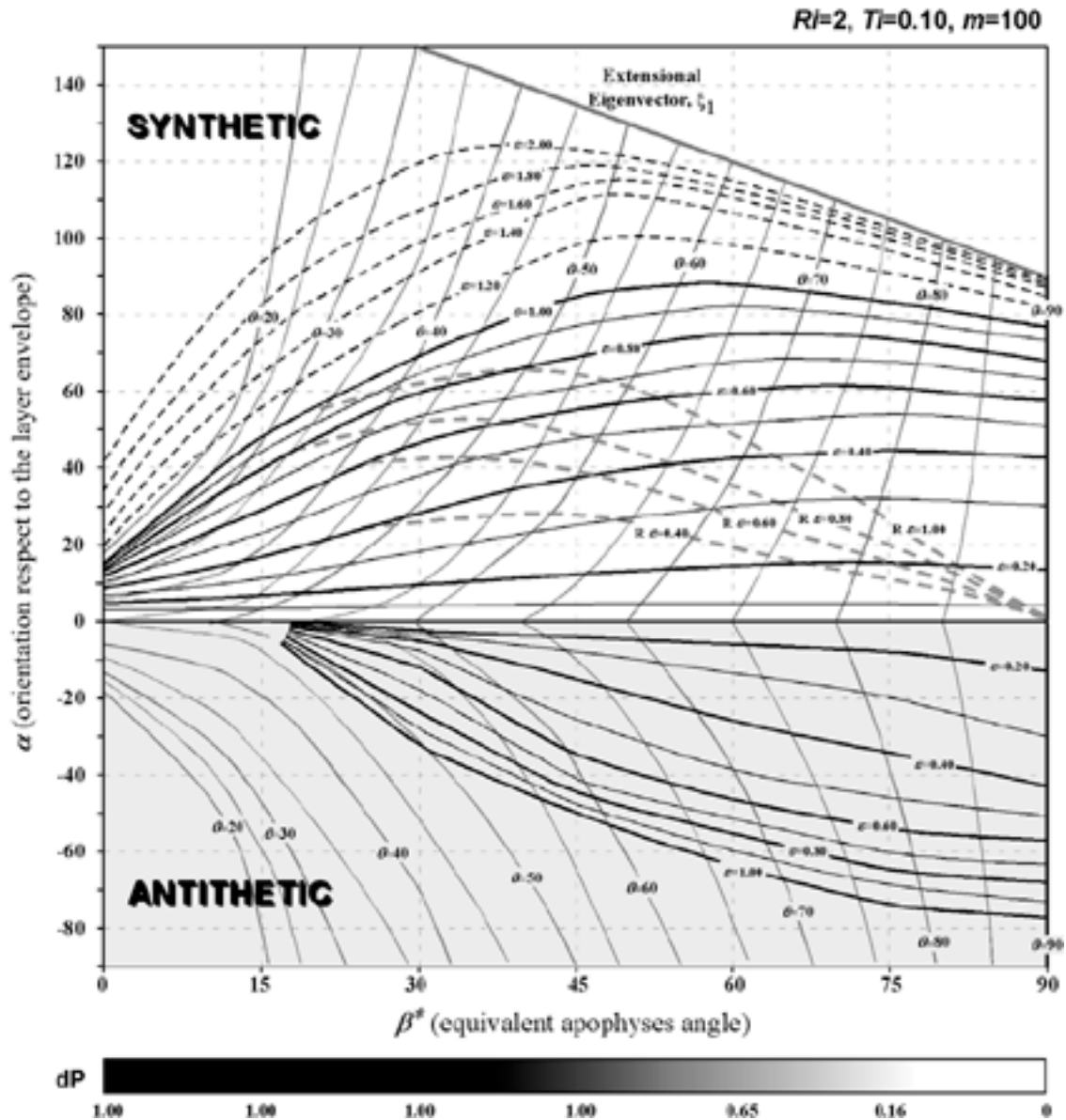


Fig. 8.12 Diagrama definit per a l'estimació de ε i β^* a partir de conjunt de poblacions de dades per a $Ri=2$ i $Ti=0.10$. La base del diagrama és el de la Fig. 8.9, però s'han afegit les corbes de variació de l'orientació mitjana dels boudins respecte β^* (corbes gruixudes amb traç de color gris, per a diferents valors de ε), i una barra amb la probabilitat d'arranjaments asimètrics (dP).

- La condició d'una pertorbació inicial finita inhiuix la possibilitat d'observar desviacions de les dades obtingudes, siguin a nivell de rotació finita o del sentit de rotació. Per a situacions coaxials, el grau de dispersió de les dades dels models aleatoris era elevada, amb l'opció de divergència del sentits de rotació dels boudins i, fins i tot, de no rotació (veure Fig. 7.43). Aquesta informació pot ser integrada al diagrama a partir de corbes que indiquin la variació mitjana, màxima i mínima de les dades de rotació. Les dues darreres ja són representades, doncs representen, respectivament, els sentit de rotació sintètic i antitètic dels diagrames. La variació de la mitjana de rotació ($R \varepsilon=k$), s'han estimat i traçat al

diagrama per a un rang de ε entre 0.20 i 1.0 (corbes gruixudes a traç de color gris de la Fig. 8.12).

- Altra efecte observat amb els models aleatoris és la probabilitat de desenvolupar arranjaments asimètrics no és constant amb β . Per a orientacions de capa paral·lela al pla de cisalla, l'increment de les components coaxials o les de deformació longitudinal originava una geometria final amb poca probabilitat de ser asimètrica. En canvi per a situacions no coaxials era tot el contrari, amb possibilitat d'ordenacions asimètriques dels boudins sistemàtiques. Aquesta informació s'ha adjuntat al diagrama a partir d'una barra que mostra la variació de probabilitat d'arranjament asimètric (dP , part inferior del diagrama). Aquesta informació és només qualitativa, i no condiciona les dades inicials de l'anàlisi, però ens pot servir per a comparar l'arranjament previst a partir de l'estimació i l'arranjament real que observem al camp. Podem comparar la coherència entre estimació i realitat. Desviacions dels resultat no han d'indicar errors de l'anàlisi sinó que hi ha un ampli ventall de possibilitats. Des d'efectes d'una asimetria longitudinal inicial a situacions de retreballament positiu, siguin per condicions no estacionaries o efectes de rotació externa de les ISA. Indiscutiblement també pot representar fonts d'error del diagrama o de les condicions assumides inicialment en els models.

La Fig. 8.12 mostra el diagrama d'estimació elaborat per a una partícula amb $Ri=2$ i $Ti=0.10$. No obstant la complexitat de corbes i barres la seva aplicació pràctica és més simple del que pot arribar a semblar inicialment. La Fig. 8.13 mostra per a una partícula amb $Ri=4$ i $Ti=0.10$. Observar que la variació de corbes però també de la probabilitat d'imbricació dels boudins. Els problemes associats aquest mètode son semblants a l'anterior. Representa la barreja de dades diferents, una lligades al desenvolupament dels plects i l'altra a la deformació enregistrada pel medi. Si hi han desviacions de les condicions de compatibilitat de la deformació és molt probable que els temps de deformació siguin asincrònics.

8.4.3.4 Restriccions dels mètodes qualitatiu.

En gran part s'ha anat discutint durant la descripció de cadascun dels mètodes qualitatiu, però torna a insistir en les condicions bàsiques assumides: els models numèrics simulen el plegament de capes aïllades en un medi homogeni i isòtrop, per a

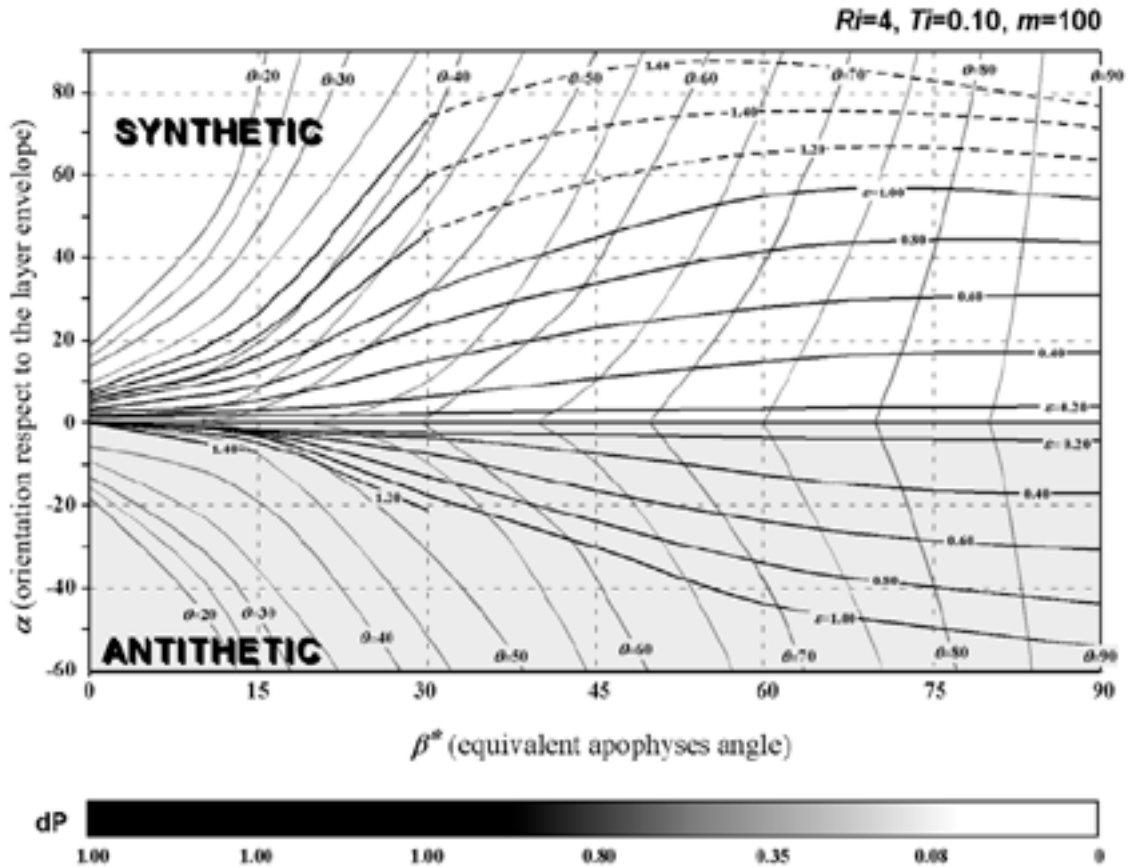


Fig. 8.13 Diagrama per a l'estimació de ε i β^* a partir de conjunt de poblacions de dades per a $Ri=4$ i $Ti=0.10$. Els elements representats són similars al cas anterior (Fig. 8.12).

condicions de cinemàtica de la deformació monocliniques i condicions de deformació planes. Els models poden semblar complexos, però són més lluny del contrari, doncs representen condicions de reologia, geometria i condicions de contorn altament simples. A priori, el paràmetre ε estimat a partir dels diagrames ha de ser menys problemàtic, mentre el paràmetre estimat β^* s'ha d'analitzar amb molta cautela. Per les incerteses associades en la seva definició però també pels supòsits que implica (l'existència d'una organització espacial dels resultats i de les *EVT* o trajectòries d'equivalència geomètriques).

Però també per aspectes lligats amb les condicions de la geometria inicial (asimetries longitudinals, obliquïtat inicial dels boudins respecte la capa, etc) o de la cinemàtica de la deformació (sigui no estacionaria, etc.), s'han de tenir sempre en compte. En general, el grau d'arranjament ha de ser un reflex de la cinemàtica de la nucleació i les relacions entre geometries finals, disposició de la *XY*, etc. i poden arribar a ser molt complexos. Per això de la insistència de la relació d'escala temporal entre estructura i medi confinant. Un exemple clar és la manca d'informació de la deformació acomodada abans de la nucleació de l'estructura.

La validesa de les estimacions pot se funció de la coherència o similitud de solucions dels diferents mètodes. Sobretot entre els individuals. En canvi el mètode global pot existir desviacions, doncs representa la comparació entre dades puntuals o locals de la deformació, i un tractament generalitzat i estadístic de les dades.

Però, un aspecte positiu de tots aquests diagrames és que esdevenen una representació gràfica o visual de gran part dels conceptes treballats i estudiats al llarg del treball. Sobretot en el darrer, amb la integració final dels aspectes de persistència de rotacions i probabilitat d'arranjament asimètrics.

Finalitzada la definició ara ens resta la part més importat: provar la seva aplicació pràctica, observar el seu caràcter funcional i validar/discutir per mètodes independents la validesa de les estimacions efectuades.

8.5 Anàlisi quantitatiu de la zona d'estudi a partir de sigmoïdal *quartz-rods*.

L'aplicació pràctica de les eines definides a l'anterior apartat s'ha realitzat a la zona d'estudi de camp i descrita amb detall al llarg del capítol 3. L'anàlisi s'ha dividit en dues parts. A la primera és mostrarà un exemple d'ús dels mètode individuals i la discussió a partir de cercles de Mohr de les incerteses al voltant de l'estimació de la deformació obtinguda. La segona part consistirà en l'aplicació del mètode global a partir de les dades de camp obtingudes prèviament. És farà un anàlisi per separat de la deformació per a regions de flanc llarg i curt dels plecs mètrics/decamètrics. Finalment és farà una integració de les dades i discussió dels resultats obtinguts.

Abans d'iniciar-ho, cal plantejar la idoneïtat de les estructures de camp per aquest tipus d'anàlisi. Recordar que les observacions i mesures de camp s'han realitzat per a condicions de capa activa, on les venes de quars o els sigmoïdal *quartz-rods* poden considerar-se com a capes aïllades i amb baixa influència de la natura anisòtropa de l'encaixant. Aquest filtre previ i indispensable, ja s'ha aplicat inicialment al camp.

Les mesures provenen de zones de baixa deformació, on la diferenciació dels elements estructurals, efectes no estacionaris o externs es poden almenys acotar o minimitzar. Però, hi han dos aspectes que sempre haurem de considerar. Un és referència a l'anisotropia de la seqüència metasedimentària. No obstant la selecció de dades dels tipus *single-layer*, sempre hi haurà cert efecte i apart no podem suposar un medi isòtrop i homogeni com representa la matriu. La manca d'una modelització completa, doncs falta la influència d'un medi anisòtrop o compost, no ens permet detectar possibles efectes no deduïbles dins l'esquema inicial de perturbacions. La tendència a crenulació

ha de produir un efecte positiu a la rotació dels boudins. L'altra aspecte crític de camp és que la deformació no és plana en la secció d'estudi. Tota la modelització numèrica s'ha efectuat per aquest supòsit. Com afecta l'extensió vertical a les dades?. S'haurà de discutir com reconciliar les mesures estimades i la geometria de deformació del camp.

8.5.1 Estimació ϵ i β^* amb mètodes individuals. Interpretació mitjançant cercles de Mohr.

La Fig.8.14 mostra l'exemple utilitzat per portar a terme l'ús dels mètode individuals per a l'estimació de ϵ i β^* . És un exemple magnífic de camp i amb una disposició geomètrica molt semblant als obtinguts a partir dels models numèrics (per exemple Fig. 8.3 o 8.4). És pot observar el caràcter rotacional del boudin respecte l'envolvent de la capa, el desenvolupament dels flancs del plec marginal o l'amplificació de pertorbacions de plegament al llarg del segment de capa. La zona de xarnera és localitzada aparentment a la regió del coll de boudin. Observar que no representa un plec d'arrossegament o un *flanking-fold* desenvolupat al voltant un cos més resistent, sinó que és una autèntica zona de xarnera amb variació de curvatura entre l'arc extern i l'intern. Tampoc no representa un porfiroclast del tipus "d", doncs la capa no és una envolvent de fragmentació/recristal·lització del porfiroclast. A nivell de paràmetres geomètrics, la relació axial és aproximadament tres ($Ri \sim 3$), l'espessor normalitzat d'interboudin és 0.15 ($Ti \sim 0.15$) i la pertorbació es pot considerar aïllada amb $Di \gg 1$. L'encaixant són metagrauques homogènies amb direcció N-S de la S0/1. La pertorbació associada al desenvolupament del plec és ràpidament esmorteïda a l'encaixant. Els angles de rotació del boudin i del interboudin són similars amb valors respectius de $\alpha_{\text{boudin}} \sim 70^\circ$ i $\alpha_{\text{interboudin}} \sim 80^\circ$ (segons la definició dels diagrames aquest darrer angle equival a $180 - \alpha_{\text{interboudin}}$). El desenvolupament de la S2 és baixa i discontinua, amb un angle d'obliquïtat amb la S0/1 de $\theta \sim 62^\circ$. La disposició és a un elevat angle del boudin, i qualitativament coherent amb un sentit de rotació del boudin sintètic amb el de cisalla. A partir d'aquest conjunt de dades ja són suficients per l'estimació de ϵ i β^* . La Fig. 8.15 mostra l'anàlisi i l'estimació obtinguda a partir del mètode de diferència de rotació dels flancs. S'han representat les línies de suport per a valors de ϵ de 0.7 a 1.0. La línia que impliqui igual β^* és la inferida com a valor vàlid de l'estimació. Segons això el valor de $\epsilon \sim 0.80$ i $\beta^* \sim 48^\circ$. Aquests valors indicarien moderada deformació (>50% d'escurçament màxim) i condicions *a priori* no coaxials mixtes amb sentit senestre per a un sistema de referència paral·lel a la S0/1. L'exemple



Fig. 8.14 Exemple de camp del sigmoïdal *quartz-rods* utilitzat per a la quantificació de la deformació mitjançant els mètode individuals. Les coordenades UTM de l'aflorament són 525.195, 4685.805.

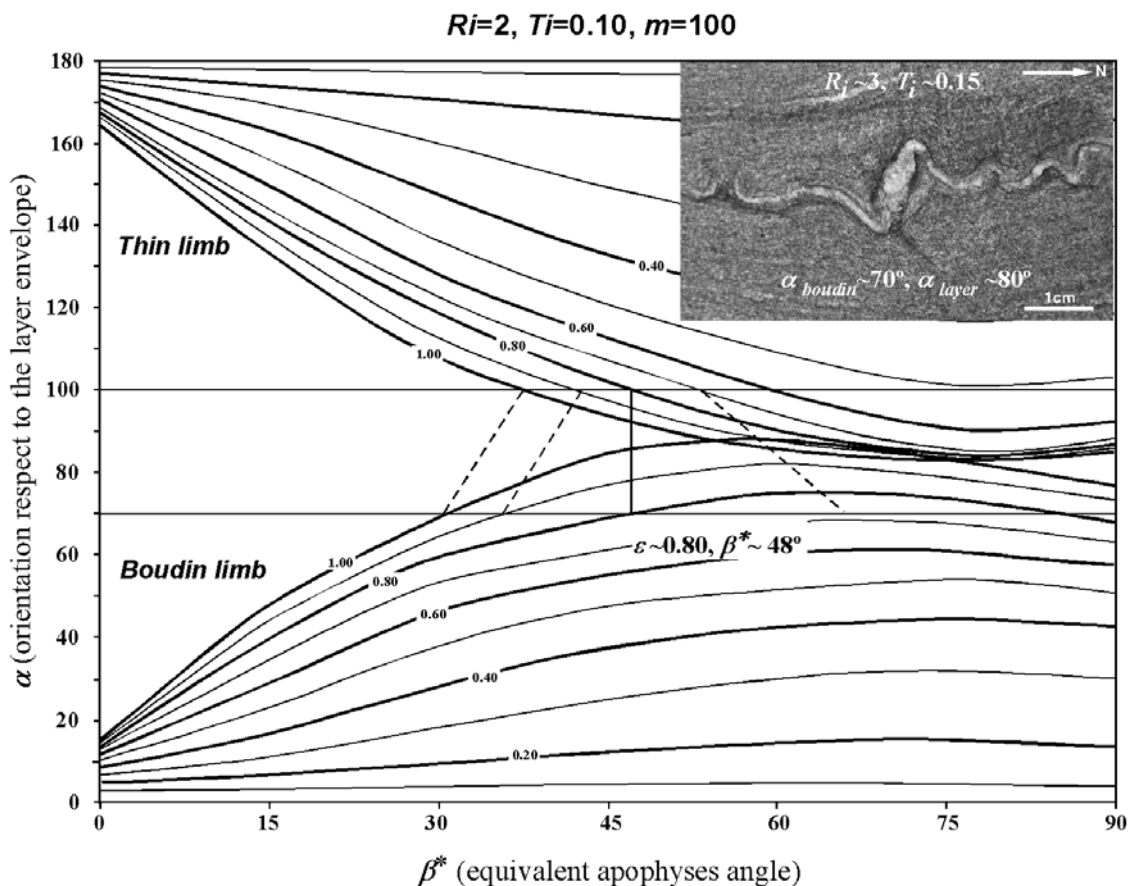


Fig. 8.15 Estimació de ϵ i β^* mitjançant el mètode d'orientació dels flancs. A la part superior de la figura s'indiquen els valors d'orientació del boudin i la capa respecte l'envolvent. S'han representat les rectes d'unió per a diferents deformacions naturals. El valor estimat de la deformació correspon a la recta amb condició β^* constant. Per l'exemple de camp els valors són de $\epsilon=0.80$ i $\beta^*=48^\circ$. La configuració geomètrica de l'estructura de camp té uns valors lleugerament superiors als emprats per a la definició del diagrama. Pot originar una sobrevaloració tant de la deformació com de la raó de vorticitat.

exposat és molt coherent, però en general trobar una recta amb $\beta^* = \text{constant}$ no és immediat. És més senzill i vàlid d'aplicar per exemples associats a baixes deformacions. La Fig. 8.16 mostra els diagrames amb els resultats obtinguts a partir del mètode combinat d'orientació del boudin i la XY , que correspon a la S_2 de camp. S'ha mostrat l'anàlisi per a una configuració hipotètica de partícula aïllada i amb $T_i = 0.10$. Per a $T_i = 0.00$ els valors estimats són $\varepsilon \sim 1.80$ i $\beta^* \sim 60^\circ$, mentre que per a $T_i = 0.10$ són $\varepsilon \sim 0.70$ i $\beta^* \sim 55^\circ$. Observar la diferència de deformació que impliquen si suposem les dues situacions. Per explicar la rotació dels sigmoïdal *quartz-rods* emprant mètode basats en partícules rígides hem d'assumir taxes d'escurçament per a les zones de menor deformació superiors a un 75%. Aquestes són incompatibles amb les mesures de camp amb venes de quars que indiquen escurçaments per aquestes zones de fins un 50%. En canvi a partir de les mesures suposant un model de plegament de capa d'espessor no homogeni, els resultats pels dos mètodes són semblants amb un valor $\varepsilon \sim 0.70-0.80$ i $\beta^* \sim 48-55^\circ$. A nivell de comparació amb les dades dels plec de les venes de quars, els resultats són coherents a nivell de deformació, encara que lleugerament superiors a partir de l'estimació amb els *quartz-rods*. Una gran pega dels dos mètodes és trobar exemples de camp que s'ajusten a nivell de geometria amb els dels diagrames. En general l'increment de R_i respecte al de referència ha d'originar una rotació final del boudin menor, mentre que l'increment de T_i afavoreix majors rotacions. Pel cas dels exemples segurament hi ha una sobrevaloració de la deformació per l'efecte de $T_i > 0.10$. Però la desviació és dins el rang tolerable de les mesures d'estimació ($\varepsilon \pm 0.1$). Construir diagrames per cadascuna de les geometries de camp és impracticable i incoherent, per això la tendència a generar i utilitzar un conjunt reduït de diagrames.

El rang de valors de β^* són molt semblants $\sim 48-55^\circ$, no obstant les dues formes diferents de fer-ho. Sembla coherent l'estimació i el valor amb les inferències de camp, on els nivells metagrauàquics es comporten més competents i mostren menor obliquïtat de la S_2 respecte els límits de capes. Però, com s'ha expressat anteriorment cal abordar l'anàlisi d'incertesa del paràmetre β^* . Aquest s'ha fet a partir de representacions de cercles de Mohr polars del tensor de deformació finita. Tres nivells d'incertesa: relacionada amb el pla de cisalla, la presència de components de rotació externes i amb les condicions de deformació no planes. La representació de l'anàlisi i resultats són mostrats a la Fig. 8.17. Primerament s'ha representat el cercle de Mohr per a les dades estimades ($\varepsilon \sim 0.70$ i $\beta^* \sim 55^\circ$). Per tal de fer-ho s'ha calculat la relació axial de l'el·lipse de deformació (R_s) i els valors dels seus eixos (X i Z). Si suposem que la $S_0/1$

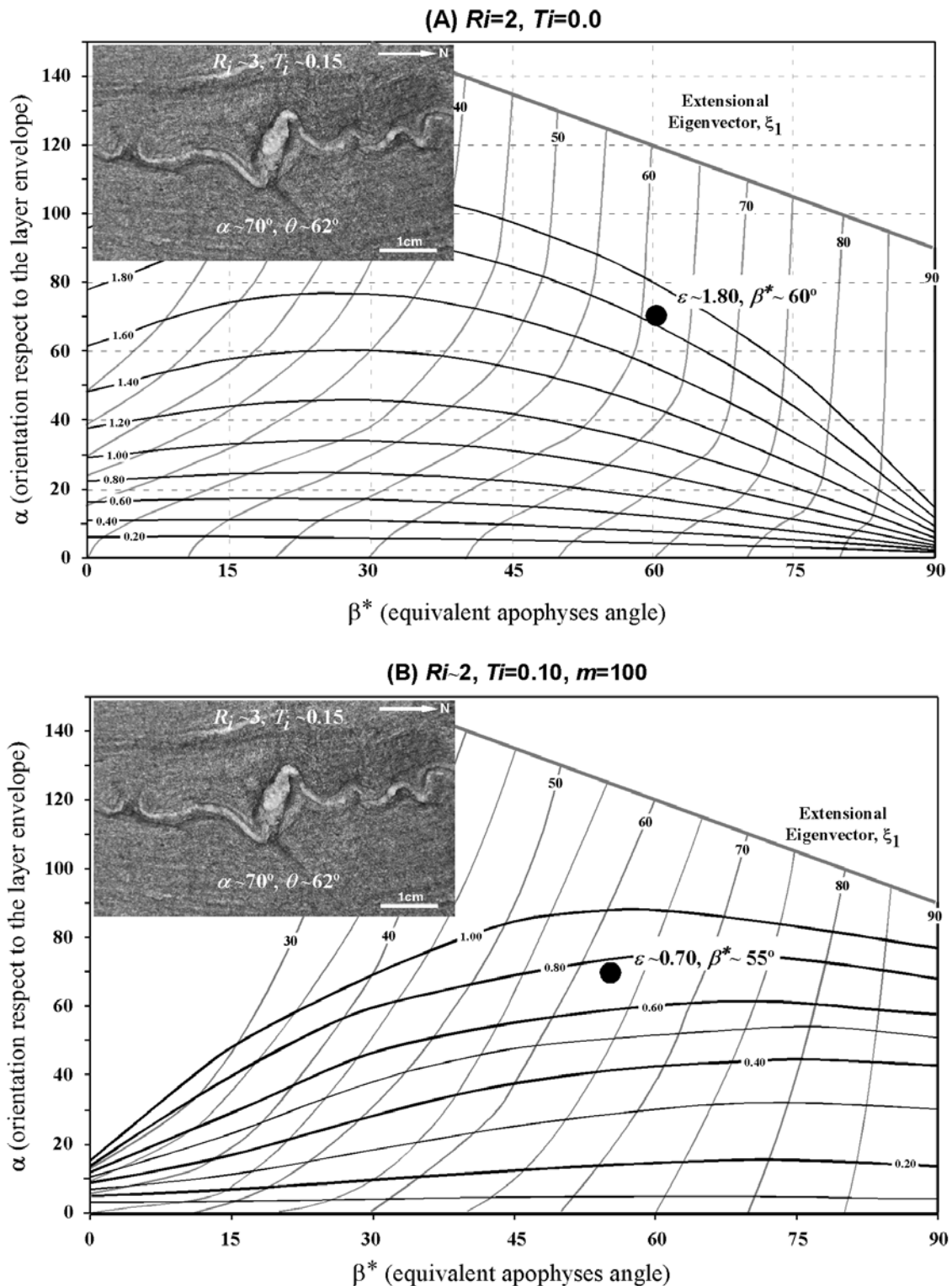


Fig. 8.16 Estimació de ε i β^* mitjançant el mètode combinat d'orientacions del boudin (α) i del pla XY (θ). A la part superior de la figura, s'indiquen ambdós valors. (a) Per a una partícula aïllada amb $Ri=2$. (b) Per a $Ri=2$ i $Ti=0.10$. Observar la diferència del valor de deformació finita estimada pels dos casos. Mitjançant la consideració de sistema amb configuració boudin-capa, s'obtenen valors raonables i dins els previstos mitjançant conjunt de vens de quars. Observar la similitud dels valors obtinguts per ambdós mètodes individuals.

és paral·lela al pla de cisalla, podem assumir que representa l'eigenvector mitja d'escurçament de la deformació (ξ_1). Per aquesta situació $\beta^*=\beta$, i el número de vorticitat cinemàtic és $Wkm=-0.55$ (el signe -, indica sentit senestre). Si considerem no efectes d'espín, el grau de no coaxialitat és $Wkm'=Wkm$ (Fig. 8.17A). Aquesta interpretació és consistent amb l'orientació de la S2.

Un primer nivell d'incertesa és en referent al pla de cisalla. El valor de β^* ens dona la informació d'un conjunt de configuracions equivalents (EVT) que abracen gran de les condicions no coaxials. Una solució coaxial o de cisalla pura no és plausible atenent a la diferencia de geometria de l'estructura. Per aquestes condicions la S2 hauria de ser subparal·lela als eixos dels boudins cosa que no és observable al camp. Altra aspecte és la discontinuïtat de l'espai per a condicions coaxials i pròximes amb el progrés de la deformació. Per a la condició de $\beta^*=55^\circ$, la solució és equivalent per a cisalla simple a la situació inicial de capa a un angle $\alpha_0=20^\circ$ respecte al pla de cisalla (Fig. 7.34). Per

(A) Exemple d'aplicació d'anàlisi cinemàtic

(1) Dades inicials obtingudes a partir del diagrama de deformació (Fig. 8.16B)

$$\epsilon \cong 0.70, \beta^* \cong 55^\circ$$

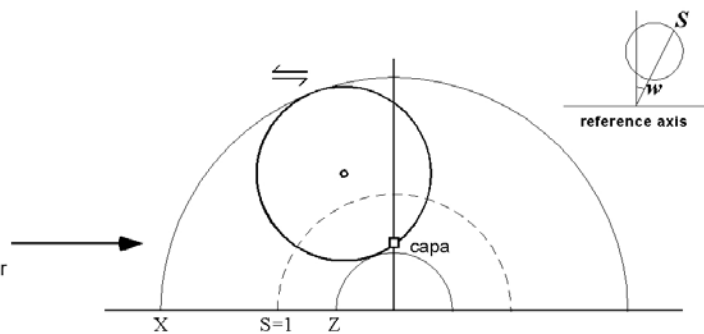
El·lipse de deformació equivalent

$$Rs \cong 4.0; X \cong 2, Z \cong 0.5$$

Anàlisi cinemàtic

Supòsit capa és paral·lela a l'eigenvector d'escurçament (ξ_2), $d\omega/dt=0$.

$$\beta^* = \beta \cong 55 \rightarrow Wk \cong -0.5$$



(B) Incerteses relacionades amb la cinemàtica

(1) Incertesa relacionada amb el paràmetre β^*

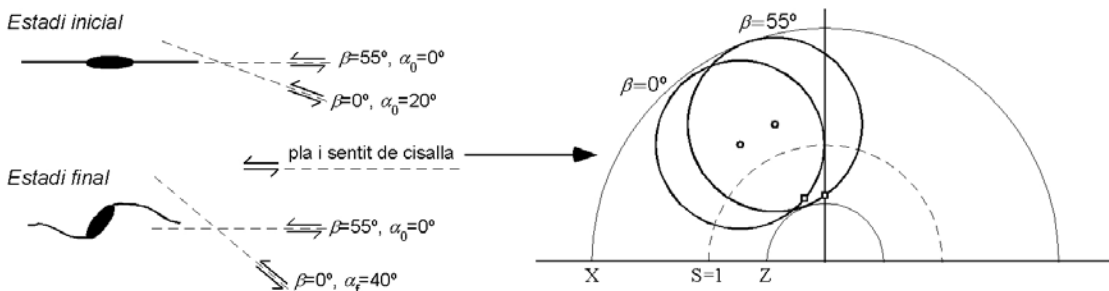
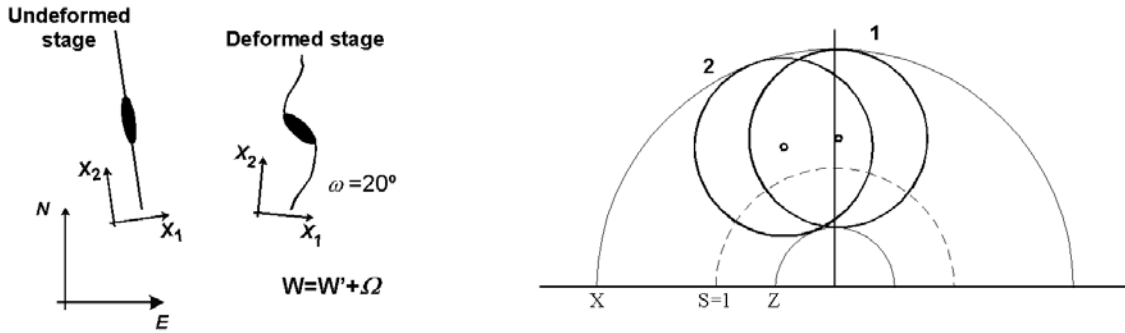


Fig. 8.17 Pàgina següent.

(2) Incertesa relacionada amb condicions d'espín (Ω)



Sistemes de referència (1) extern ($N-S$) i (2) intern (X_i)

Sistema referència intern $\rightarrow Wk \approx 0.5$ ($W = \Omega$)

Sistema referència extern $\rightarrow Wk \approx 0.05$ ($W = W'$)

(3) Incertesa relacionada amb condicions de no deformació plana ($\Delta A < 0$)

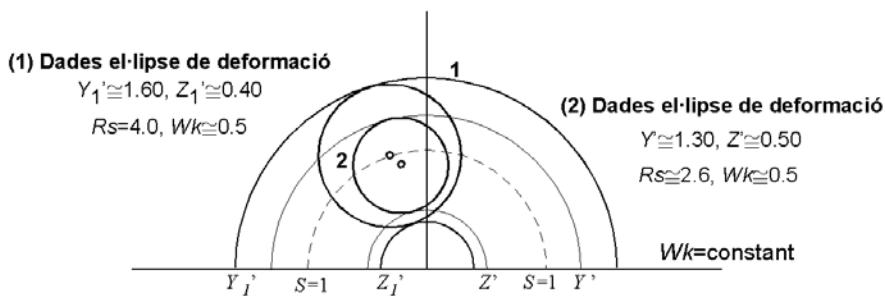
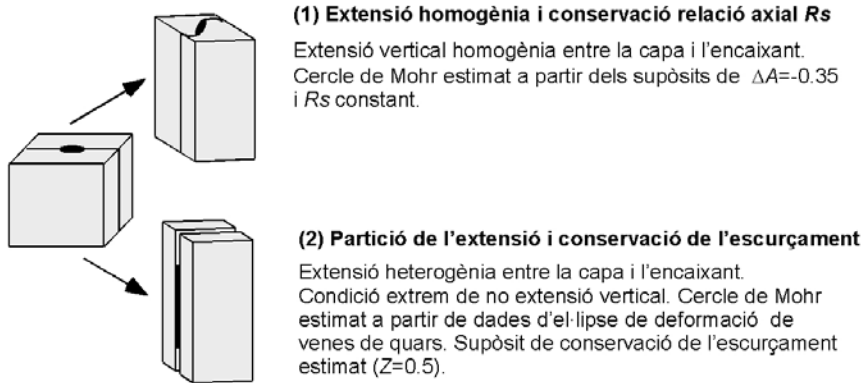


Fig. 8.17 Flux de treball mitjançant la representació dels cercles de Mohr per a realitzar l'anàlisi cinemàtic i la reducció de les incerteses associades amb el paràmetre β^* . (A) Càlcul dels paràmetres de l'el·lipse de deformació finita (R_s , X , Z). Estimació del número de vorticitat cinemàtica (Wkm) a partir del supòsit $\beta^* = \beta$. (B.1) Anàlisi de la incertesa de β^* respecte l'orientació del pla de cisalla. Pel cas de camp i baixes deformacions, sembla coherent suposar que la $S0/1$ equival al pla de cisalla principal. (B.2) Anàlisi de la incertesa de β^* respecte a les components de rotació externa. La condició de rotació dextral de camp origina una reducció del grau de no coaxialitat de la deformació. L'orientació de l'exemple de camp és aproximadament N350. (B.3) Anàlisi de la incertesa respecte a les condicions de deformació no planes del camp. Dos supòsits extrems: (1) extensió vertical homogènia entre la capa i la matriu, i (2) partició de l'extensió vertical en el *quartz-rod*. Per aquesta darrera consideració, els valors s'ajusten millor amb els valors inferits mitjançant venes de quars. El rang d'estimació de l'el·lipse de deformació vindria definit pels valors d'aquestes dues consideracions, amb $Wkm \approx -0.5$ (signe negatiu indica cisalla senestre).

és paral·lela al pla de cisalla, podem assumir que representa l'eigenvector mitja d'escurçament de la deformació (ξ_1). Per aquesta situació $\beta^*=\beta$, i el número de vorticitat cinemàtic és $Wkm=-0.55$ (el signe -, indica sentit senestre). Si considerem no efectes d'espín, el grau de no coaxilitat és $Wkm'=Wkm$ (Fig. 8.17A). Aquesta interpretació és consistent amb l'orientació de la S2.

Un primer nivell d'incertesa és en referent al pla de cisalla. El valor de β^* ens dona la informació d'un conjunt de configuracions equivalents (EVT) que abracen gran de les condicions no coaxials. Una solució coaxial o de cisalla pura no és plausible atenent a la diferencia de geometria de l'estructura. Per aquestes condicions la S2 hauria de ser subparal·lela als eixos dels boudins cosa que no és observable al camp. Altra aspecte és la discontinuïtat de l'espai per a condicions coaxials i pròximes amb el progrés de la deformació. Per a la condició de $\beta^*=55^\circ$, la solució és equivalent per a cisalla simple a la situació inicial de capa a un angle $\alpha_0=20^\circ$ respecte al pla de cisalla (Fig. 7.34). Per aquesta situació, l'angle final entre el pla de cisalla i la capa són 40° , amb disposició NE-SW i una angle d'obliquïtat amb la S2 de camp de 22° en sentit antihorari. Si suposem l'orientació del pla de cisalla constant, la capa ha rotat 20° en sentit antihorari. La representació del cercle de Mohr és mostrada a la Fig.8.17B-1. Aquestes consideracions no obstant que vàlides i compatible, implica que el pla de cisalla creua la S0/1 i no aprofita ni el bandejat composicional ni la S0/1. A nivell d'interpretació sembla més coherent, i almenys condicions de baixa deformació, suposar que el pla de cisalla efectiu és pròxim a la S0/1 i/o els contactes entre materials amb comportament mecànicament lleugerament diferent.

Un segon nivell més complexa és els dubtes sobre les components d'espín (Ω) ó rotació externa. Durant l'anàlisi de la Wkm mitjançant venes de quars ja s'havia abordat aquesta problemàtica. La gran qüestió és conèixer si ha rotat l'envolvent de la capa amb la deformació, i si s'hagués produït, s'ha d'estimar quanta d'aquesta rotació és troba associada a la cinemàtica de la deformació i quanta a factors externs com rotació mecànica de flancs de plecs, variació de les condicions de la cinemàtica de la deformació, etc. Un sistema de referència fixat a la S0/1 s'ha de considerar com a intern però pot rotar amb la deformació respecte a un altra sistema. Si suposem que no s'ha produït components externes, llavors $\Omega=0$, i les components de cisalla angular (W) i components angulars induïdes per la cisalla (W') són iguals, $\mathbf{W}=\mathbf{W}'$ (Jiang, 1994a,b; Jiang and White, 1995; Jiang, 1999). El grau de no coaxilitat és l'obtingut prèviament ($Wkm=-0.55$). Però si suposem un sistema de referència extern, per exemple geogràfic,

hem d'inferir la rotació de la S0/1 al llarg de la deformació D2. És indubtable que l'increment de la deformació origina una rotació externa des d'orientacions N-S a orientacions aproximadament E-W. Per tant una component de rotació dextral és pot arribar a considerar per a zones de major deformació. Per a zones de menor deformació dependrà de l'orientació inicial de la S0/1. Si suposem una rotació dextral de la S0/1 de $\omega=20^\circ$, la representació del cercle de Mohr se'ns desplaça cap a la dreta (Fig. 8.17B-2). L'increment de rotació dextral de la S0/1, sigui per cinemàtica o externa, origina un increment de les components dextrals de la deformació que s'oposen al sentit de cisalla senestre paral·lel a la S0/1. A nivell del número de vorticitat de la deformació (W_{km}) s'origina un increment del grau de coaxilitat que per aquest cas és $W_{km}=+0.05$. El signe positiu és per indicar domini del camp de rotació de les línies amb sentit dextral. El sistema teòric correcte per fer l'estimació és aquell que no impliqui variació de l'orientació de les ISA o es trobi fixat a aquestes (Means et al., 1980). Per a condicions reals de camp aquestes inferències o supòsits no són abastables i han de considerar-se en general, excepte potser condicions de cisalla simple amb límits molt rectes i elevada localització. Un cas esporàdic lluny de la generalitat de casos. Observar que els efectes de l'orientació del pla de cisalla o els efectes de rotació externes tenen una traducció similar. Increment de les components no coaxials senestres són equivalents a rotacions externes en aquest sentit, mentre el cas invers increment les components coaxials i/o un canvi de sentit de la cisalla dextral. Aquest canvi no és únicament de sentit, sinó també d'orientació del pla de cisalla. Pel primer cas domini orientacions N-S, mentre el darrer cas E-W.

El darrer nivell de l'anàlisi de la cinemàtica és referent a les condicions d'observació de les dades de camp que impliquen pèrdua d'àrea. La condició de deformació plana dels models numèrics no és compleix. Mitjançant els models amb materials analògics s'ha observat un efecte de pèrdua de la capacitat de plegament o d'amplificació de les pertorbacions si es conservava la condició de compatibilitat de deformació entre matriu i capa (veure apartat memòria 6.4.4). Gran part de la deformació s'acomoda per escurçament i extensió homogènia. En canvi, per a situacions de partició i lliscament la solució observada tendeix a ser similar a la condició de cisalla pura, amb desenvolupament irregular de plecs, però mecànicament amplificables. Aquestes observacions són també semblants a l'efecte del plegament de capes amb extensió paral·lela a l'eix del plec (Griera et al., 2002; Griera, 2004). L'amplificació i geometria és dependent de la relació axial seccional, originant que per un mateix angle de rotació

dels flancs o d'amplitud normalitzada l'escurçament necessari sigui molt major amb l'increment de la pèrdua d'àrea de la secció.

A nivell mecànic podem establir dues condicions extrems alhora de reduir l'incertesa de la condició de pèrdua d'àrea (ΔA) (Fig. 8.17B-3),

- L'extensió vertical és homogènia entre la capa i la matriu. Suposa que no hi ha possibilitat de partició de cap mena (localització, lliscament, etc.). L'el·lipse de deformació finita pot ser inferida a partir de considerar el valor mig de pèrdua d'àrea per a zones de baixa deformació $\Delta A = -0.35$, i suposar que la relació axial de l'el·lipse de deformació inferida inicialment és constant ($R_s = 4$). Per aquestes consideracions, els eixos de l'el·lipse seccional són $Y' = 1.60$ i $Z' = 0.40$.
- L'extensió vertical no és homogènia a la capa i a la matriu, i es produeix una partició de la deformació entre l'encaixant i els sigmoïdal *quartz-rods*. La dinàmica de l'estructura és únicament resposta a l'escurçament de la capa i no es produeix extensió en la direcció X . L'el·lipse seccional de deformació finita pot ser estimada mitjançant les suposicions de conservació de l'escurçament màxim inicialment inferir ($Z' = 0.50$), i del valor mig de pèrdua d'àrea per a zones de baixa deformació $\Delta A = -0.35$. Per aquestes consideracions, la relació axial de l'el·lipse seccional de deformació finita és $R_s = 2.6$ mentre el valor de l'eix $Y' = 1.30$. El cercle de Mohr que representa l'estat de deformació és mostrat a la Fig. 8.17B-3-2.

En principi la variació d'àrea no ha d'afectar a l'estimació de la W_{km} . Quin dels dos supòsits es més vàlid? La definició de tots dos impliquen condicions límits. La desviació en valors entre tots dos no és gaire gran a nivell d'escurçament finit (entre 50 a 60%). Però a nivell de R_s la variació és més elevada, amb implicacions pel primer cas de condicions de moderada deformació ($R_s = 4.0$), mentre el segon cas impliquen condicions de baixa deformació ($R_s = 2.6$). Podem comparar els resultats obtinguts pels dos supòsits amb les tendències observades mitjançant venes de quars (Fig. 3.28). D'aquell anàlisi, per a zones de baixa deformació els valors de R_s varien entre dos a tres ($R_s = 2-3$). Sembla més coherent l'opció de certa independència entre la capa plegada i l'encaixant metagrauàquic. L'efecte de lliscament ha de ser considerat local i limitat. Segurament la geometria irregular en 3D i en general no cilíndrica d'aquests cossos pot facilitar una partició geomètrica de l'extensió vertical. Amb acomodació preferent en zones de menor espessor i comportament més independent per a les regions dels

boudins. Això podria explicar la variació local de les lineacions en els sigmoïdal *quartz-rods*, on localment s'observen lineacions amb disposició subhoritzontals a les cares del *rods* de major mida.

No obstant la simplicitat de les dades de camp necessàries, aquestes han permès una estimació i interpretació en gran part coherent. L'el·lipse de deformació finita té uns valors aproximadament de $R_s=4-2.4$, $Y'=1.60-1.30$ i $Z'=0.50-0.40$, i un rang de variació de la Wkm' entre -1 a +0.05, amb una major probabilitat cap al valor de -0.5 si suposem rotacions de la S0/1 mínimes.

8.5.2 Estimació ε i β^* amb el mètode global. Interpretació de l'el·lipse seccional mitjançant cercles de Mohr.

Les limitacions originades per la necessitat de trobar exemples que s'ajustin geomètricament als diagrames individuals, poden ser superades mitjançant el diagrama global. La base d'aquest són els diagrames de distribució de la rotació finita dels *quartz-rods* (α) respecte la seva relació axial (Ri) que s'havien calculat en el treball de camp (Fig. 3.56 i 3.57). Aquestes dades corresponien a un conjunt de *quartz-rods* amb rang aproximat de valors de Ti entre 0.0 i 0.20. S'havien mesurat diferenciant la disposició dins els plecs mètrics, entre flanc curt/xarnera o flanc llarg, i per aquest darrer cas s'havia diferenciant la litologia de l'encaixant, classificant-los segons nivells metapsammítics, multicapes o metapelítics. Tractarem primer les dades a nivell de disposició, estimant els valors de ε i β^* , per finalitzar amb una integració de les dades dels dos flancs i la seva interpretació mitjançant cercles de Mohr.

A partir del gràfics de distribució de les dades Ri vs. α s'han estimats els valors màxim, mínim i la mitja per a situacions amb $Ri=2$ i $Ri=4$ (Fig. 8.18). La mitja s'ha calculat a partir del promig del conjunt de dades que varien en una unitat a la Ri objectiu (per exemple per $Ri=2\pm 1$). Tots aquests valors en determinen un rang d'orientacions de les dades de camp. Les dades obtingudes són mostrades a la taula 8.1. D'igual forma s'han calculat els angles θ entre la S0/1 i la S2 per les diferents litologies. S'ha estimat en forma de rang similar a α , calculant una valor màxim, mínim i mitjà de l'angle θ . Cadascuna de les mitjanes s'han calculat a partir d'un conjunt superior a 25 dades. Els valors obtinguts també són mostrats a la taula 8.1. El rang de valors definits per la combinació ($\alpha_{m\grave{a}x.}$, $\alpha_{m\grave{i}n}$) i ($\theta_{m\grave{a}x.}$, $\theta_{m\grave{i}n}$) més la mitja de valors s'han representat als diagrames globals per a $Ri=2$ i $Ri=4$ (Fig. 8.19). S'han diferenciat les diferents litologies. Els valors estimats poden ser llegits directament a partir d'aquest diagrama i

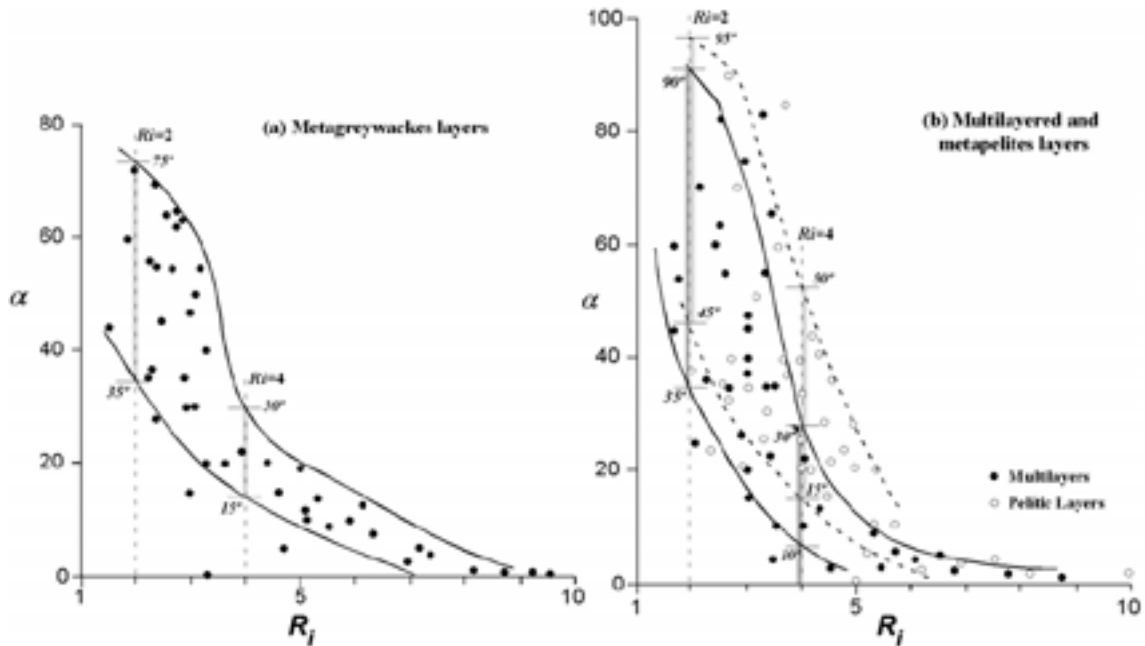


Fig. 8.18 Gràfiques de distribució de l'orientació dels *quartz-rods* α respecte el valor de la seva relació axial R_i . (a) Capes metagrauvaques. (b) Seqüència alternada (multicapa) i nivells de metapelites. S'han marcat els valors de α màxim i mínim per a les relacions axials $R_i=2$ i 4 .

Litologia ↓	$R_i=2$			$R_i=4$			θ $n > 25$		
	Màx.	Mitja	Min.	Màx.	Mitja	Min.	Màx.	Mitja	Min.
FLL psammític	75°	60°	35°	30°	22°	15°	65°	61°	54°
FLL multicapa	90°	66°	35°	30°	22°	10°	55°	52°	47°
FLL pelític	95°	70°	45°	50°	33°	15°	44°	42°	38°
FX	75°	20°	-30°	55°	20°	-15°	~90°	82°	78°

Taula. 8.1 Taula de valors amb les orientacions dels boudins (α) per a $R_i=2$ i 4 , i orientació del pla XY (θ). S'han diferenciat per la posició dins els plecs (FLL: flanc llarg, FX: flanc curt/xarnera) i la litologia. Els valors de la mitja s'han calculat a partir de les dades situades dins el rang $R_i \pm 1$. Els valors de la mitja d'orientació de XY s'ha calculat per a tots els casos a partir d'un conjunt de més de 25 dades puntuals.

s'han resumit a la taula 8.2. A gran trets el rang màxim de variació de la deformació és $\epsilon=0.60-1.25$, amb valors màxim per a litologies pelítiques i valors mínim per a les litologies psammítiques. Aquesta tendència és similar per a totes dues relacions axials dels *quartz-rods*. Si comparem els resultats per a una mateixa litologia són també similars. Tant sols hi ha desviacions per a les litologies metapelítiques. Els valors de l'angle equivalent de l'apòfisi de flux β^* varia entre 20° i 50°, amb valors màxims per a litologies més competent i mínims per les metapelites. Hi ha una correlació negativa entre deformació i els valors de β^* . La probabilitat d'arranjament asimètrics prevista

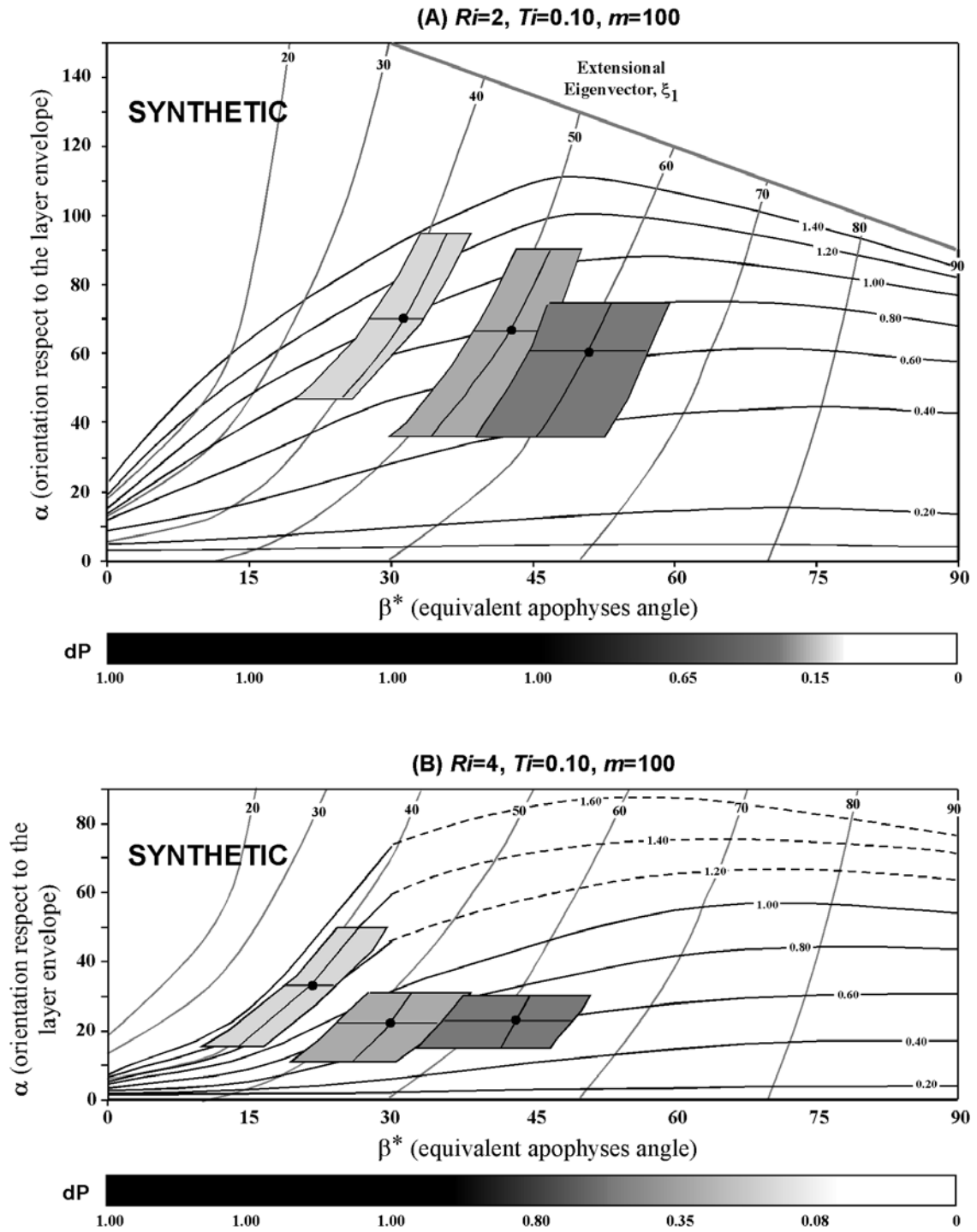


Fig. 8.19 Representació de les dades provinents de la taula 8.1 per a condicions de flanc llarg. (A) $Ri=2$ i (B) $Ri=4$. El camp de color gris fosc representa les dades provinents de nivells metapsammítics, gris intermig de nivells multicapa i gris clar de metapelites. El punt fosc és la representació dels valors mitjans. El valor de probabilitat d'asimetria (dP) s'ha estimat amb la barra inferior dels diagrames.

Litologia FLL	Ri=2 (mitja)			Ri=4 (mitja)		
	ε	β^*	dP	ε	β^*	dP
Pelítics	1.00	30°	1.0	1.25	20°	1.0
Multicapes	0.80	40°	1.0	0.80	30°	1.0
Psammitics	0.65	50°	~0.90	0.60	45°	~0.80
	ε	β^*	dP	ε	β^*	dP
FX (mitja)	0.90	80°	~0.15	?	80°	~0.08
FX (màx. syn.)	~1.00	>75°	x	~0.95	>75°	x
FX (màx. anti)	~0.35	>75°	x	~0.40	>75°	x

Taula. 8.2 Taula amb els valors mitjans obtinguts de deformació natural (ε), angle equivalent entre eigenvectors (β^*) i probabilitat d'arranjament asimètric (dP) a partir del mètode d'estimació amb poblacions de dades. Veure diagrama Fig. 8.19 i 8.21 per a la representació dels diferents camps. FLL: flanc llarg; FX: flanc curt/xarnera; x: no estimable.

(dP) és elevada amb valors >0.8. Aquesta probabilitat concordaria amb l'asimetria dominant i la tendència a arranjaments asimètrics dels *quartz-rods* del camp, sistemàtiques almenys per a zones de flanc llarg i dominis de baixa deformació. A nivell qualitatiu, les dades estimades advoquen per a condicions de deformació no coaxials. El grau de partició de la vorticitat entre els nivells de metapelites i metagrauvaques és baix, amb valors de la intensitat de rotació Wkm més elevada pels materials més incompetents. Una estimació quantitativa del grau de partició ($\Phi = \gamma_{metapelitica} / \gamma_{metagrauvaques}$) és pot fer mitjançant l'equació (8.1) i els valors estimats per a ε i β^* . El seu valor és $\Phi < 3.5$, indicant un baix contrast de les propietats de cisalla entre ambdós materials.

D'igual forma que pels flancs llargs, s'ha estimat la deformació per a les regions de flanc curt/xarnera. La distribució de les dades indiquen situacions de rotacions en tots dos sentits, però el sentit majoritari és senestre respecte la S0/1 (Fig.8.20). La disposició de la S2 no és perpendicular als boudins, sinó que tendeix a ser paral·lela a l'eix llarg dels boudins. Les dades que acoten els camps de α i θ per a Ri=2 i 4 són mostrats a la taula 8.1. A partir d'ells s'han traçat els camps sobre el diagrama global (Fig. 8.21) i s'han estimat els valors de ε i β^* que s'han afegit a la taula 8.2. Per aquest cas no només s'ha hagut d'estimar el valor mitjà, sinó també els valors màxims associats a la màxima rotació en tots dos sentits de rotació, antitètic i sintètic. Aproximadament, els valors màxim sintètic i el de la mitja coincideixen tant el valor de deformació natural com el de β^* . Els valors associats a la rotació màxima en sentit antitètic el valor de β^* és similar, però els valors de ε estimats són sensiblement menors als observats prèviament (per aquest cas $\varepsilon \sim 0.40$ mentre el cas anterior eren $\varepsilon \sim 1.0-0.9$). A priori aquesta diferència

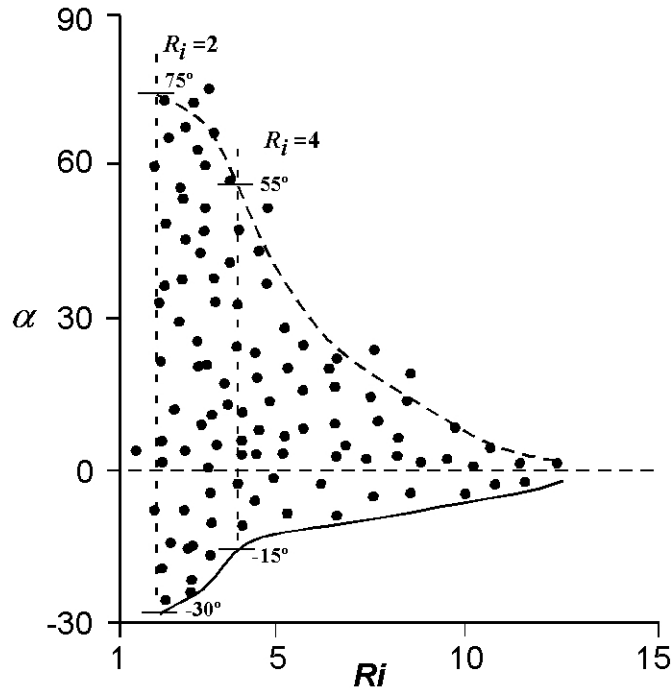


Fig. 8.20 Gràfica de la distribució de l'orientació dels *quartz-rods* (α) respecte el valor de la seva relació axial (Ri) per a zones de flanc curt i xarneres. S'han marcat els valors de α màxim i mínim per a les relacions axials $Ri=2$ i 4. S'observen dades en ambdós sentits de rotació respecte la S0/1, però continua aparentment dominant el camp de rotació senestre.

sembla massa elevada per trobar-se associada amb errors de mesura o del mètode. Si comparem els valors sintètics són d'un ordre semblant als obtinguts pel cas de flanc llarg. Per tant, s'haurien de buscar interpretacions per explicar que el grup de dades antitètiques enregistren deformacions substancialment menor. A nivell de probabilitat d'arranjament prevista (dP) aquesta és molt baixa amb valors que no superen 0.15. A nivell d'interpretació, no hauríem d'observar un arranjament dominant sinó que hauria de ser esporàdic amb tendència similar en tots dos sentits de rotació. Per aquest cas aquesta previsió no concorda amb les observacions de camp, on s'observa una tendència dominant de sentits de rotació dels boudins senestres (veure Fig. 3.48b). Mitjançant el diagrama de la Fig. 8.20 és pot establir una probabilitat entre un 70-80% per aquest sentit. No obstant, l'arranjament és més complex que en els flancs llarg, i és normal observar geometries anòmales com boudins plegats o efectes associats a la crenulació de l'anisotropia. Aquests resultats indiquen una incoherència entre l'esperable a partir dels models numèrics i les observacions de camp. Més endavant ens haurem de plantejar una explicació plausible d'aquest fet. Abans de continuar s'ha de resoldre el número de vorticitat Wkm associats per a tots dos casos. Per la situació de flanc llarg sembla coherent una interpretació senestre atenent els aspectes qualitatiu de S2 normal al boudin, concentració de la deformació i geometria dels plecs. En canvi no és tan clar pel

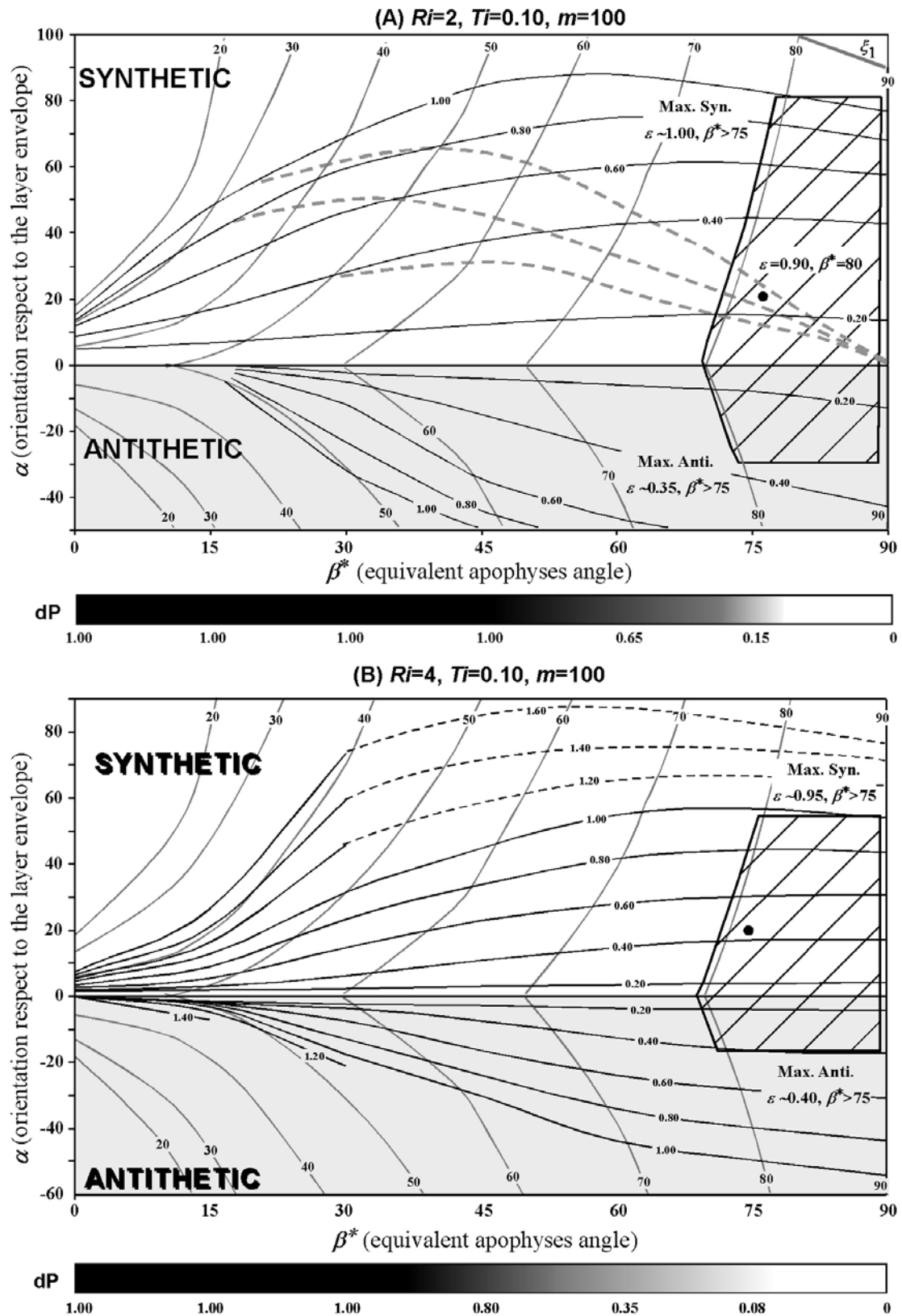


Fig. 8.21 Representació de les dades provinent de la taula 8.1 per a condicions de flanc curt/xarnera. (A) $Ri=2$ i (B) $Ri=4$. El camp de dispersió de les dades és molt major. A part del valor mitjà, s'han determinat els valors màxims per a situacions de rotació sintètic i antitètic. La variació d'estimació entre aquestes dues darreres situacions són molt diferents, mostrant una asincronia en els valors de deformació natural (ϵ).

flanc curt. La S2 és disposa subparal·lela als eixos dels boudins i la geometria dels plecs és diferent, amb disposició més rotacional ple flanc del plec marginal. Ens trobem amb geometries més semblants al cas antitètic i concordant amb coaxilitat elevades (o orientacions que siguin equivalents). Atenent aquests aspectes, la interpretació més lògica és suposar un sentit de cisalla paral·lel a les capes dextral. Això també fora concordant amb un supòsit de plec *flexural* on la rotació dels flancs origina el desenvolupament de cisalles amb sentits oposats al de rotació (Ramsay, 1967). No obstant observar que el grau de no coaxilitat podria ser baix amb una tendència altament coaxial.

Si considerem litologies multicapes als flancs curts, la deformació acumulada al flanc llarg i curt és aproximadament molt semblant. El valor és lleugerament inferior per a flancs llargs ($\epsilon \sim 0.8$). Les diferències de β^* són importants amb angles que indicarien situacions pròximes al pla de cisalla per flancs llarg, mentre per a flancs curts/xarnera indicarien situacions que s'han nucleat pròximes a les ISA i que han continuat rotant essent actualment pròximes a l'orientació de les FSA. No sembla il·lògic la diferència si atenem a condicions més efectives de les components coaxials amb afavoriment de plecs de crenulació que poden ajudar a donar un suplement de rotació dels boudins. També la rotació externa del flanc llarg podria explicar ser la causa d'una menor acumulació de deformació. Però el seu valor ja és lleugerament superior a l'estimat a partir de les venes de quars.

Mentre pel cas anterior teníem un problema d'incertesa del paràmetre β^* , si suposem condicions essencialment homogènies entre els flancs curts i els llargs podem superar part de les limitacions. De forma anàloga amb el cas anterior el que primer s'ha estimat és l'el·lipse seccional equivalent al valor de ϵ estimat. Els valors calculats a l'igual que la seva representació en un espai de Mohr polar són mostrats a la Fig. 8.22A. Els valors de la relació axial de les el·lipses seccionals són alts ($R_s = 5-6$), indicant deformacions moderades amb màxim escurçament entre un 60-55%. El primer nivell d'estudi és suposar un sistema de referència intern a la S0/1 per a les dues situacions de flanc curt i llarg. Per aquest cas $\beta^* = \beta$, i els números de vorticitat cinemàtica són corresponentment $W_{km} \sim -0.77$ pel flanc llarg i $W_{km} \sim -0.17$ pel flanc curt (Fig.8.22b-1). Per a un sistema de referència extern la vorticitat cinemàtica és de sentit oposada però sobretot amb grau de no coaxilitat diferent. Si suposem condicions de deformació i cinemàtica semblant, clarament les mesures hauran de convergir cap un nou valor. El segon estatge de l'anàlisi és la integració de les dades en un únic cercle de Mohr. S'ha considerat

constants els escurçament paral·lels a la S0/1 de les dues situacions i s'ha establert el sistema de referència paral·lel al flanc llarg. L'objectiu amb això darrer és facilitar la construcció del nou cercle. L'angle d'obliquïtat mitja entre flancs curts i llargs per a zones de baixa deformació és aproximadament 60°. Donat el sistema de referència, el flanc curt amb la deformació ha rotat fins a formar aquest angle final ($\omega = -60^\circ$ respecte al flanc llarg). Si marquem aquesta informació podem estimar un cercle global que incorpora part de la informació estimada anteriorment (Fig.8.22B-2). Els valors de l'el·lipse de deformació finita són $R_s \sim 5.6$, $X \sim 2.35$ i $Z \sim 0.42$. El número de vorticitat cinemàtica s'ha incrementat amb $Wkm \sim -0.87$ i $\beta \sim 30^\circ$. Implicarien condicions altament no coaxials amb sentit de cisalla senestre i situacions de *broading* (escurçament paral·lel al pla de cisalla definit). A partir d'aquesta estimació l'angle inicial del flanc curt seria

Integració dades dels dos flancs: anàlisi cinemàtic

(A) Dades inicials

Flanc llarg (F_{II}) $\rightarrow \epsilon \cong 0.60, \beta^* \cong 40^\circ$, senestral
 Flanc curt (F_C) $\rightarrow \epsilon \cong 0.90, \beta^* \cong 80^\circ$, dextral

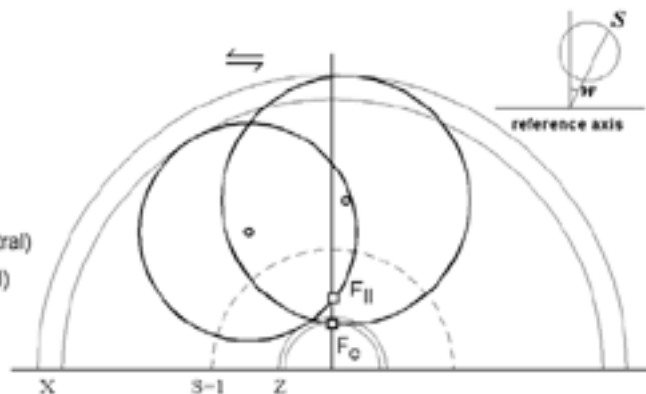
El·lipses de deformació equivalents ($R_s = e^{2\epsilon}$)
 Flanc llarg $\rightarrow R_s \cong 5.0; X \cong 2.25, Z \cong 0.45$
 Flanc curt $\rightarrow R_s \cong 6.0; X \cong 2.45, Z \cong 0.40$

(B) Anàlisi cinemàtic.

Nivell 1 d'estudi

Supòsits: la capa és paral·lela a l'eigenvector d'escurçament ($\hat{\epsilon}_2$), $dw/dt=0$

Flanc llarg $\rightarrow \beta^* = \beta \cong 40^\circ \rightarrow Wk \cong -0.77$ (senestral)
 Flanc curt $\rightarrow \beta^* = \beta \cong 80^\circ \rightarrow Wk \cong +0.17$ (dextral)



Nivell 2 d'estudi

Supòsits: el sistema de referència és paral·lel al flanc llarg. Rotació absoluta del Flanc curt $w = -60^\circ$.

El·lipse de deformació (sense correcció ΔA):
 $R_s \cong 5.6; X \cong 2.35, Z \cong 0.42$
 $\beta \cong 30^\circ, Wk \cong -0.87, \alpha_0$ Flanc curt $\cong +15^\circ$

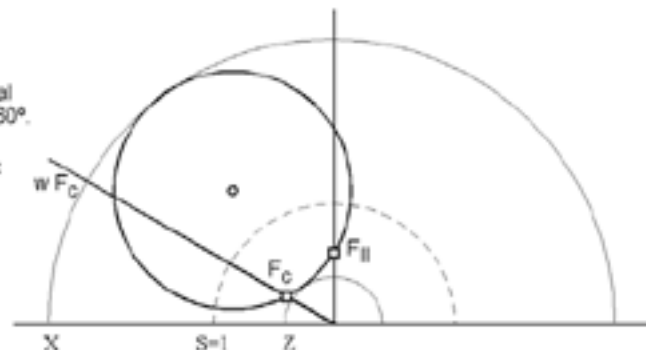


Fig. 8.22 Anàlisi cinemàtic mitjançant la integració dels valors obtinguts per a situacions de flanc llarg i curt. L'estimació de la deformació s'ha establert mitjançant un anàlisi de diferents nivells. (A) Dades inicials i càlcul de l'el·lipse seccional equivalent. (B.1) Representació del cercle de Mohr deformació finita en el supòsit $\beta^* = \beta$. (B.2) Representació del cercle de Mohr assumint una condició de deformació homogènia entre les zones de flanc curt i llarg.

Continuació

Nivell 3 d'estudi

Supòsits:

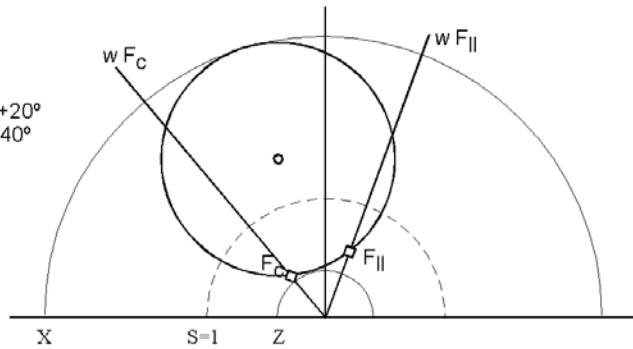
- La direcció inicial de la foliació S1 és N170.
- Orientació flanc llarg N010. Rotació absoluta, $w=+20^\circ$
- Orientació flanc curt N130. Rotació absoluta, $w=-40^\circ$
- No components d'espín ($\Omega=0$).

El·lipse de deformació (sense correcció ΔA):

$$Rs \cong 5.6 ; X \cong 2.35, Z \cong 0.42$$

$$\beta \cong 65^\circ, Wk \cong -0.42$$

$$\alpha_o \text{ Flanc curt} \cong +10^\circ, \alpha_o \text{ Flanc llarg} \cong -5^\circ$$



Nivell 4 d'estudi

Supòsits:

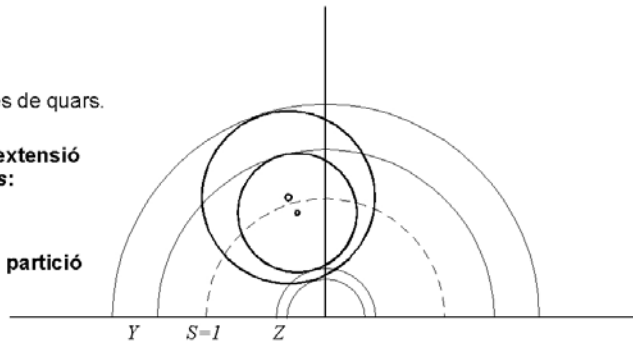
- Deformació no plana, $\Delta A = -0.40$
- $Rs \cong 3-4$, a partir el·lipse de deformació de venes de quars.

(1) El·lipse de deformació per a condicions d'extensió homogènia i conservació de la relació axial Rs :

$$Rs \cong 5.6 ; Y \cong 1.83, Z \cong 0.33$$

(2) El·lipse de deformació per a condicions de partició de l'extensió i conservació de l'escurçament:

$$Rs \cong 3.4 ; Y \cong 1.42, Z \cong 0.42$$



(C) Estimació final de la deformació ($\Delta A = -0.40$)



$3.4 < Rs < 5.6$
$1.42 < Y < 1.83$
$0.33 < Z < .42$
$-0.87 < Wk < -0.42$

Fig. 8.22 (continuació) (B.3) Estimació de l'el·lipse de deformació dels efectes de les components externes. S'ha assumit una orientació inicial de la S0/1 N350. (B.4) Integració dels efectes de deformació no plana. S'ha estimat l'el·lipse seccional per als supòsits d'extensió homogènia capa/matriu i per a condicions de partició. (C) Resum de les dades estimades sota el supòsit de $\Delta A = -0.40$.

de 15° respecte al flanc llarg. A nivell físic haurien de ser 0° , al ser inicialment el medi planar. Però, no es plausible doncs implicarien condicions heterogènies, que a la realitat constants els escurçament paral·lels a la S0/1 de les dues situacions i s'ha establert el sistema de referència paral·lel al flanc llarg. L'objectiu amb això darrer és facilitar la construcció del nou cercle. L'angle d'obliquïtat mitja entre flancs curts i llargs per a zones de baixa deformació és aproximadament 60° . Donat el sistema de referència, el flanc curt amb la deformació ha rotat fins a formar aquest angle final ($\omega = -60^\circ$ respecte al flanc llarg). Si marquem aquesta informació podem estimar un cercle global que incorpora part de la informació estimada anteriorment (Fig.8.22B-2). Els valors de l'el·lipse de deformació finita són $Rs \sim 5.6$, $X \sim 2.35$ i $Z \sim 0.42$. El número de vorticitat

cinemàtica s'ha incrementat amb $W_{km} \sim -0.87$ i $\beta \sim 30^\circ$. Implicarien condicions altament no coaxials amb sentit de cisalla senestre i situacions de *broadening* (escurçament paral·lel al pla de cisalla definit). A partir d'aquesta estimació l'angle inicial del flanc curt seria de 15° respecte al flanc llarg. A nivell físic haurien de ser 0° , al ser inicialment el medi planar. Però, no es plausible doncs implicarien condicions heterogènies, que a la realitat segur que ho són, però no són vàlides si atenem la condició de deformació homogènia imposada. Però aquest angle és pot considerar com l'angle de la pertorbació inicial o amplificada durant els primer estadis d'amplificació exponencial. Observar que amb la integració de les dades s'elimina la incertesa condicionada pel paràmetre β^* .

El següent nivell de l'anàlisi i interpretació de la cinemàtica és abordar l'efecte de les rotacions externes del sistema de referència S0/1. Com s'ha repetit més d'un cop, l'increment de deformació origina la rotació dextral (en secció horitzontal) de la S0/1 i S2. S'ha d'establir la possibilitat de rotació del flanc llarg i quan és el seu valor. De forma anàloga al cas anterior, cal deduir l'orientació inicial de S0/1 al inici de la D2. Els supòsits que s'han realitzat són similars als efectuats per a l'estimació de la W_{km} mitjançant venes de quars (veure apartat 3.3.4 o Fig. 3.29): l'orientació inicial de les capes era aproximadament N170-160 i es considerarà un sistema de referència geogràfic. Atenent aquests supòsits, els angles de rotació finita d'ambdós flancs (W_{Fl} , W_{Fc}) poden ser estimats a partir de la seva direcció mitjana final en zones de baixa deformació, aproximadament N010° pels flancs llargs i N310°-300° pels flancs curts. Si no és consideren components addicionals externes ($\Omega=0$, és a dir la rotació dels flanc són lligades a la cinemàtica de la deformació), el cercle de Mohr pot ser estimat a partir dels valors de canvi de longitud i rotació final del parrell de línies que representen ambdós flancs (Fig.8.22B-3). D'aquesta forma els valors de l'el·lipse de deformació finita són similars al cas anterior ($R_s \sim 5.6$, $X \sim 2.35$ i $Z \sim 0.42$). El nou cercle de Mohr és disposa més cap a la dreta respecte l'anterior, indicant un increment de les components coaxials. Si calculem l'angle entre les línies de no rotació (aquelles que tallen l'eix de referència vertical o y), aquest s'ha incrementat a $\beta \sim 65^\circ$ i el número de vorticitat cinemàtica és $W_{km} \sim -0.42$. L'angle inicial suposat de la pertorbació de plegament continua essent de 15° .

El darrer nivell de l'anàlisi és corregir les condicions de deformació no plana de l'àrea d'estudi. De forma anàloga s'han considerat els mateixos dos supòsits: situacions d'extensió homogènia o de partició entre els *quartz-rods* i l'encaixant. Per a materials

multicapes s'ha suposat una pèrdua d'àrea de la secció horitzontal $\Delta A = -0.40$. Aquest valor és lleugerament superior al cas anterior, però en aquell cas els materials de l'encaixant eren metagrauvaques. La representació del cercle de Mohr i els valors estimats per a R_s , Y i Z són mostrats a la (Fig.8.22B-4).

Si combinem els diferents nivell d'anàlisi, podem definir el rang de valors de l'el·lipse de deformació finita estimada per la D2 (secció horitzontal de camp) mitjançant els *quartz-rods* com:

$$3.4 \leq R_s \leq 5.6$$

$$1.42 \leq Y \leq 1.83$$

$$0.33 \leq Z \leq 0.42$$

$$-0.87 \leq W_{km} \leq -0.42$$

Per validar aquesta estimació podem comparar-la amb els obtinguts mitjançant l'anàlisi de la deformació finita amb venes de quars (apartats de la memòria 3.3.3 i 3.3.4). Els valors estimats mitjançant els *quartz-rods* tenen un tendència a ser superiors als previstos per a regions de baixa deformació, que presenten mesures més pròximes a la banda baixa de deformació dels valors estimats ($R_s \sim 3.4$). Si considerem la coherència de resultats entre tots dos anàlisi, la interpretació sembla indicar que els *quartz-rods* no han d'acomodar de forma homogènia l'extensió vertical i que ha d'originar cert grau de partició de l'extensió que possibilita rotacions molt més elevades. La partició inhibeix una acomodació homogènia de l'extensió al llarg de la capa i pot possibilitar situacions amb comportament a l'esperable a deformacions planes. Aquesta inferència és semblant a l'observada mitjançant l'anàlisi cinemàtica amb els mètodes individuals. No crec que a tots els *quartz-rods* passi aquesta situació, sinó els seus efectes és potenciaran amb l'increment de la mida absoluta. Aquestes consideracions representen una possible interpretació però no és la única. També pot ser responsable l'efecte del medi anisòtrop i el desenvolupament de plects de crenulació F2. Altres possibles efectes són un ajustament no perfecte de T_i amb la configuració geomètrica a partir de la qual s'ha definit el diagrama, efectes tridimensionals irreconeixibles com relacionats a la irregularitat geomètrica de les venes de quars o els efectes laterals de pertorbacions que poden arribar a induir major/menor rotacions als boudins, etc. Una possible diferenciació passa necessàriament per una ampliació de l'estudi mitjançant modelització numèrica i analògica, i noves observacions de camp centrades en cadascun

dels possibles aspectes. Són consideracions complexes, de difícil diferenciació i fora de l'àmbit viable d'aquesta memòria.

Per finalitzar, constatar la possibilitat pràctica dels mètodes proposats i la seva coherència de resultats observats amb altres mètodes independents. El seu estudi pot possibilitar un anàlisi complet a nivell cinemàtic, si s'assumeixen i es discuteixen una sèrie d'incerteses relacionades amb components de rotacions externes o de deformació no plana. Les restriccions a nivell pràctic d'aquest darrer mètode és molt menor que els anteriors, al extrapolar les dades per a *Ri* mitjançant les distribucions de les mesures de camp. Un aspecte conceptual restrictiu d'ambdós mètodes és la viabilitat de les EVT. Recordar que l'increment de deformació condiciona un trencament de les equivalències com diferenciació de l'orientació de la *XY* respecte l'envolvent de la capa. Per a les situacions de camp no semblen crítiques, si inferim un control de l'anisotropia en la disposició de pla de cisalla principal. Però, situacions generals d'orientació són de més difícil previsió.

8.6 Interpretació i discussió global dels conceptes de camp. Model cinemàtic per a la D2.

En aquest darrer apartat s'intentarà fer una síntesi i integració de les observacions de camp i els resultats dels diferents anàlisis quantitius. Primerament, és plantejaran aquells aspectes no resolts, com són la discrepància entre la probabilitat d'arranjament asimètric estimat i l'observada al camp, o els efectes de la rotació externa en la disposició dels elements estructurals i dels boudins. Seguidament, s'organitzarà la informació per intentar interpretar el progrés de la deformació D2 i les seves conseqüències a nivell d'estructures. Per a concloure, s'exposarà un esquema simple de la cinemàtica de la deformació D2 per a la zona de Puig Culp.

Un aspecte que s'havia deixat penjat, feia referència a la discrepància entre la probabilitat d'arranjaments asimètrics previstos a nivell teòric i els observats al camp. Aquesta discrepància era màxima per a les regions de flanc curt/xarnera. El rang d'estimació final de l'angle entre les apòfisis del flux és $\beta=30^{\circ}-65^{\circ}$. L'orientació inicial del flanc llarg varia entre 0° a 5° respecte al pla de cisalla, amb un sentit dextral de rotació amb el progrés de la deformació. Per aquests valors de β , la probabilitat d'imbricació dels boudins és elevada, amb $dP=1$. El desenvolupament del flanc curt el podem imaginar com una tendència progressiva a incrementar l'obliquïtat amb el flanc

llarg o la condició original planar. L'angle inicial necessari per a suposar condicions de deformació homogènies és de $\sim 15^\circ$. Per aquestes orientacions inicials, lleugerament obliqües al pla de cisalla, la probabilitat és molt menor que el cas anterior; els valors són $dP < 0.20$ (veure Fig. 7.34 per estimar l'*EVT* equivalent i Fig. 8.19 per la *dP*). Aquest valor és similar a l'inicialment estimat (Fig. 8.21), doncs la definició d'orientació de capa és una funció de β^* . Per tant, no s'ha resolt amb l'anàlisi cinemàtic la discrepància inicialment observada, i les cinemàtiques estimades tampoc poden justificar aquestes observacions.

Una possible interpretació d'aquesta diferència passa per tornar a analitzar que reflexa la probabilitat dels arranjaments imbricats. En els models numèrics, la selecció de les pertorbacions que condicionen la geometria final de la capa, es produeix durant els primer estadis de la deformació. Segons eren les raons de velocitat de deformació paral·lela i normal a la capa és produïa una selecció diferent. Així, per a condicions altament no coaxials i pròximes al pla de cisalla s'originaven estructures imbricades; mentre, per a situacions paral·leles a les *ISA* la capacitat d'organització del sistema era molt baixa i es desenvolupava geometries sense preferències d'asimetria. Per a condicions no estacionaries, s'ha demostrat numèricament que la capacitat de retreballar i seleccionar pertorbacions concordants amb les noves condicions de la cinemàtica és molt baixa. Almenys per a situacions amb escurçament paral·lel a la capa, es produeix normalment un retreballament positiu o actiu de les pertorbacions preexistents (veure Fig. 7.51). Aquestes continuen acomodant la deformació sense modificacions a nivell d'organització interna, encara que a nivell extern les raons estructurals si que es readapten a les condicions de deformació infinitesimal i finita. D'aquesta forma, la geometria final dels plecs no són únicament el reflex d'un procés de localització primari o genètic (configuració inicial de la capa), sinó també del tipus de cinemàtica durant el moment de la nucleació. I segurament aquests conceptes són la clau per entendre aquesta discrepància de la *dP*.

L'organització anòmala del conjunt de *quartz-rods* per a flancs curts/xarnera són un reflex de la cinemàtica de la deformació abans de la nucleació dels plecs mètrics o deca mètrics. Quan és produeix el plegament de l'encaixant, abans ja ha començat un desenvolupament dels plecs associats als *quartz-rods*. El plegament i la rotació cap a les *ISA* de flux, produeix un retreballament positiu de les pertorbacions ja formades, juntament amb la nucleació de noves inestabilitats. Aquestes darreres són les associades amb disposicions "anòmales", o justament les previsibles a nivell teòric. En són

exemples els boudins plegats, boudins disposats com a zona de xarnera o disposats amb sentit de rotació dextral respecte la $S_{0/1}$. En canvi, les primeres continuen evolucionant cap a orientacions paral·leles a la S_2 , mostrant geometries típicament antitètiques. La seva nucleació respon sintèticament, però la rotació relativa del flanc origina un increment de la coaxilitat externa i situacions de cisalla dextrals paral·leles a la $S_{0/1}$. Aquests aspectes són mostrats a la Fig.8.23. El ritme de distribució dels diferents *quartz-rods* ha de ser considerat com complex i "caòtic", amb la possibilitat de nucleació durant tota la deformació i la presència de pertorbacions afavorides des d'un principi (per geometria, disposició anòmala, etc.). Per això, de l'elevat rang de dispersió de les orientacions dels boudins. Quan es produeix la nucleació dels plects mètrics/decamètrics? És difícil de precisar. Segurament no pot succeir amb deformacions gaires elevades, doncs les venes de quars sintectòniques Q2 ja tallen a plects F2, o la deformació enregistrada per aquests plects és molt elevada (veure Fig. 3.15 o 3.29). S'ha de produir durant els primers estadis, però després d'una deformació suficient per a induir una selecció majoritària de la geometria de les pertorbacions dels *quartz-rods* (segurament, $\epsilon \ll 0.15$). Indirectament, aquesta situació ens condiona que els primers estadis de deformació poden considerar-se similars als inferits pels flancs llargs, amb una cinemàtica no coaxial i senestre paral·lela a la $S_{0/1}$.

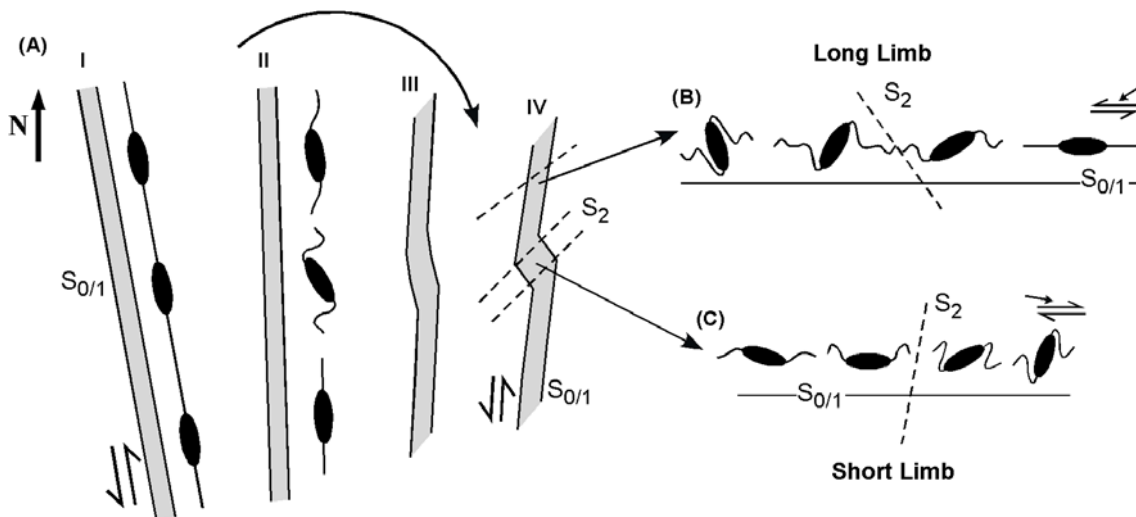


Fig. 8.23 (A) Esquema interpretatiu de la seqüència d'esdeveniments alhora del desenvolupament dels sigmoïdals *quartz-rods*. (I, II) Condicions inicials de deformació no coaxial senestre paral·lela a la $S_{0/1}$. Es produeix la nucleació i amplificació de pertorbacions, però amb ritmes d'amplificació molt variable. (III, IV) L'increment de deformació i la rotació dextral de la $S_{0/1}$ possibiliten la posterior nucleació i amplificació dels plects a l'encaixant anisòtrop. (B) Esquema sintètic de les geometries de rods observats al flanc llarg. Són compatibles amb sentits de rotació senestres, encara que la seva distribució d'orientacions és molt variable. (C) Esquema de les geometries principals dels flancs curts. Geometries variables tant en sentit com en disposició dins l'estructura. Les condicions de deformació indicarien sentit dextral paral·lel a la $S_{0/1}$ amb engruïment de la capa.

Un darrer aspecte a comentar és l'efecte de la rotació dextral dels elements estructurals amb l'increment de la deformació. Actualment no hi ha cap mètode de camp pràctic que sigui capaç d'inhibir els efectes de la component d'espín (Jiang, 1999). Almenys, la combinació entre els mètodes proposats i la representació del cercle de Mohr possibilita una explicitació dels seus efectes, i limita el rang de les possibles solucions. Sempre quedarà condicionada a la interpretació dels valors inicials d'orientació que s'assumeixin. Aquesta rotació de la S0/1 pot ser condicionada per la pròpia cinemàtica de la deformació, però també pot respondre a components de rotacions externes que indueixen rotacions rígides en el sistema. Un clar exemple d'aquest darrer cas és la rotació del flanc d'un plec (veure Fig. 2.9). Anteriorment s'ha mostrat que l'increment de rotacions externes origina un decreixement de la component no coaxial senestre (Fig. 8.17 o 8.22). El valor de rotacions ω és incert, perquè és dependent de l'orientació de la S0/1 que s'assumeixi a l'inici de la D2. Aquesta rotació dextral no només s'expressa en una modificació de la Wk' de la deformació, sinó que també té implicacions a nivell de la variació de l'orientació dels eixos cinemàtics de la deformació i, per tant, podrien arribar a modificar l'arranjament del conjunt de *quartz-rods*.

La Fig. 8.24 mostra un esquema on és discuteix a nivell de cinemàtica els efectes de la rotació de la S0/1. Aquesta figura és basa en una discussió similar de Jiang and White (1995), sobre la relació entre la cinemàtica i el desenvolupament de les fabrics S/C. La base de tot l'anàlisi és entendre com les components de rotació de les línies materials ($\dot{\gamma}$), i les components de cisalla, que indueixen el grau de no coaxilitat de la deformació (Wi), són modificades amb la presència de components d'espín externes ($Ws = \Omega$). El supòsit inicial és un flux \mathbf{L} definit paral·lelament a la S0/1 dels flancs llargs dels plecs (Fig. 8.24A). S'ha considerat semblant a l'estimat anteriorment, no coaxial senestre amb escurçament paral·lel al pla de cisalla. Per a aquestes condicions podem representar les ISA i l'eigenvector extensional de la deformació (ξ_1). Donat que no coneixem la participació de les components d'espín, el cercle de Mohr de la deformació infinitesimal ens indica la intensitat de rotació de la deformació (Wk , o número de vorticitat cinemàtica externa). Podem plantejar tres casos diferents atenent al valor de Ω (Fig. 8.24B),

- *Cas I*, $\Omega=0$.

No hi han components externes i la S0/1 dels flancs llargs equivalen a la direcció de l'eigenvector d'escurçament (ξ_2). El grau de no coaxilitat (Wk') és igual a la

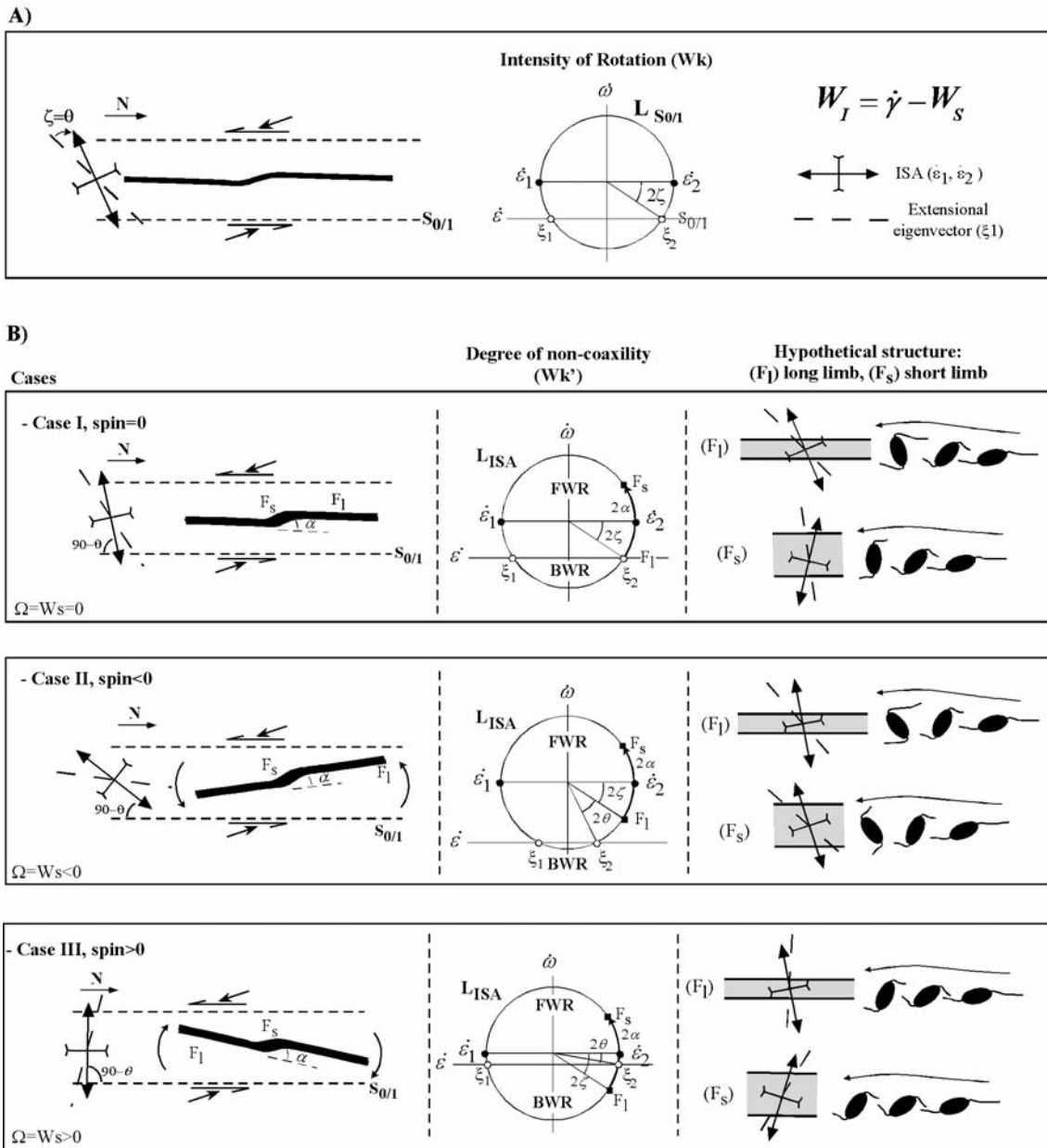


Fig. 8.24 Efecte de les components d'espín en la variació de la cinemàtica de la deformació (Wk'). (A) Situació inicial pròxima a les de camp, amb el desenvolupament de plecs i condicions de deformació no coaxial senestres. S'ha representat L com a cercle de Mohr i l'equació de la relació entre les components de la vorticitat. (B) Casos hipotètics per a $\Omega=0$, $\Omega<0$ i $\Omega>0$. S'ha representat un esquema de la disposició de les ISA i de l'eigenvector d'extensió respecte a l'orientació dels plecs. D'igual forma s'ha visualitzat el cercle de Mohr del flux associat. L'increment de components dextrals origina un decreixement del grau de no coaxialitat i condicions coaxials rotacionals. Esquema de la configuració dels *rods* hipotètica. Veure text per una descripció més detallada. (*FLL*: flanc llarg; *FX*: flanc curt/xarnera; α : angle entre flancs; ζ : angle $S_{0/1}$ i ISA d'escurçament; θ : angle d'orientació de l'eigenvector extensional respecte a la direcció de cisalla resumida, N-S).

intensitat de rotació de la deformació. L'orientació de les ISA i ξ_1 són representades juntament amb un esquema global de la disposició d'un plec mètric. La rotació del flanc curt origina una paral·lelització a la ISA d'escurçament i, per tant, un increment de la velocitat de deformació paral·lela al flanc. També origina que el valor de cisalla transversal al flanc sigui dextral. Això queda reflectit a un esquema

hipotètic de la disposició dels *quartz-rods* pels flancs llargs i curts. Pel primer, el camp de rotació senestre disponible pels *rods* és molt gran fins arribar a l'orientació de ζ_1 ($>140^\circ$). La disposició de les ISA indiquen condicions no coaxials amb sentit de cisalla senestre. En canvi, per a situacions de flanc llarg (vigilar que a la Fig.8.24B no s'ha dibuixat amb la seva orientació real!), és produeix una disminució del camp de rotació dels boudins, fins arribar a ser lleugerament major de 90° . La disposició de les ISA indicarien respecte la S0/1, cisalla dextral amb una geometria de deformació d'aspecte molt coaxial. Però produïda per a condicions de flux no coaxial. Aquest exemple s'ajusta força bé a les observacions de camp sobre la disposicions dels boudins en els flancs curts i llargs dels plecs mètrics de la zona.

- *Cas II, $\Omega < 0$.*

Per aquest cas el sentit de rotació externa és similar al d'intensitat de rotació. Per a una rotació final de les línies constant ($\dot{\gamma}$), $\Omega < 0$ origina un increment de les components de cisalla interna de la cinemàtica, i per tant de la Wkm' de la deformació. A nivell del cercle de Mohr origina un desplaçament en vertical. Per aquestes condicions l'orientació de la S2 és molt paral·lela als límits de la S0/1, amb orientació de les ISA també a baix grau. Per a tots dos flancs el sentit de cisalla paral·lel a la S0/1 és senestre. La disposició teòrics dels *rods* ha de permetre camps de rotacions sintètics fins a la ζ_1 més elevats per a tots dos flancs. Conceptualment hauria de ser molt més probable el desenvolupament d'arranjaments asimètrics del conjunt de *quartz-rods*. A nivell de comparació amb les observacions de camp, el flanc curt no mostra una relació d'orientació de la S2 obliqua als seus límits sinó que és normal o amb lleugerament desviada en el sentit contrari (cap a la dreta de la normal de la capa). No obstant la simplicitat d'aquests conceptes teòrics, representa un nou suport a una interpretació on el flanc curt no presenta elevades vorticitats o capacitat de rotació.

- *Cas III, $\Omega > 0$.*

Per aquest darrer cas la component d'espín és de sentit contrari al de la cisalla paral·lela a la S0/1. El seu efecte és contrari al cas anterior. Per a condicions de $\dot{\gamma}$ constant, la component d'espín origina una disminució del grau de no coaxialitat. Segons la intensitat de rotació L inicial o la rotació rígida externa podem, fins i tot, passar a sentits de cisalla interna de la deformació oposats al de $L_{S0/1}$. El sentit de

cisalla paral·lel als flancs són de signe oposats amb reducció de la possibilitat de rotació dels boudins. La geometria hipotètica de tots dos flancs no concorden amb les observacions de les zones de baixa deformació, fet que ens faria pensar que almenys per aquestes zones, no sembla necessari afegir components de rotació rígida dextrals importants.

El conjunt dels possibles efectes que origina una component d'espín és de gran interès per a la zona d'estudi. No obstant la heterogeneïtat espacial de la deformació D2, sembla consistent que l'increment de la deformació és associada a una rotació dextral dels marcadors planars (Carreras and Druguet, 1994). Des d'una disposició N-S de la S0/1 per a les zones de menor deformació, a una disposició E-W per a les de màxima deformació. Aquestes darreres es troben situades lleugerament més al Nord de la zona d'estudi de Puig Culip (veure Fig.3.8). Si suposem contant $\dot{\gamma}$, l'increment de la rotació externa ens ha d'originar una modificació del grau de vorticitat de la deformació. Segons els conceptes cinemàtics exposats anteriorment, la progressiva rotació dextral dels marcadors amb la deformació ha d'originar un increment de les components dextrals de la deformació. Això, almenys a nivell instantani de deformació L i si considerem constant $\dot{\gamma}$. A nivell pràctic de camp i/o d'anàlisi de la deformació finita acumulada, però no és tan simple. Quanta rotació és externa?, ó quina és l'orientació inicial que s'ha de prendre?

Si revisem els resultats obtinguts mitjançant els *quartz-rods*, per a les zones d'orientació N-S les condicions de la deformació finita poden aproximar-se com a no coaxials, amb extensió vertical, sentit de cisalla senestre respecte a la S0/1 i escurçament paral·lel a la S0/1 (per a la secció d'estudi horitzontal). Si considerem que representen orientacions pròximes a la inicial, o minimitzem els efectes de la rotació dextral, aquestes situacions equivalen a condicions de grau de no coaxilitat senestre (Wkm'). Si acceptem una cinemàtica constant, l'increment de rotació i disposicions més cap al NE-SW de la S0/1 ha d'originar una modificació de la deformació instantània. Per aquest cas, un increment de les components dextrals de la deformació és tradueixen amb un augment del grau de coaxilitat de la deformació. Segons sigui, (1) el grau acumulat de deformació finita i (2) l'eficiència de les noves condicions de no coaxilitat, la *fabric* finita podrà o no reflexar aquestes modificacions. A nivell de camp, les zones de moderada i alta deformació corresponen a regions amb fort tancament dels plecs i al desenvolupament d'un bandejat de transposició. A nivell de deformació finita, un dels canvis observats és la

reversibilitat de les condicions de deformació paral·leles a la S0/1: de situacions amb escurçament finit paral·lel a la S0/1 passem a situacions d'extensió paral·lela.

També comporta un major domini de la S2 que arriba a ser la *fabric* dominant, i una atenuació del contrast de la S2 entre els nivell de metagrauvaques i metapelites, tant a la variació de la seva orientació com a la seva intensitat (veure capítol 3). Mitjançant venes de quars, l'estimació del grau de no coaxilitat de la deformació per a zones de moderada deformació era $Wkm' \sim 0.17-0.25$ (Fig. 3.29), amb sentit de no coaxilitat dextral. Els supòsits d'orientació de la S0/1 a l'inici de la D2 eren similars tant per les venes de quars com per al cas dels sigmoïdal *quartz-rods*, amb direcció N350° i cabussament subvertical. A nivell qualitatiu la distribució dels *quartz-rods* en zones de transposició era molt complexa (Fig. 3.58), amb la constatació de boudins amb sentits de rotació dextrals respecte la S0/1; però, encara dominaven els que presentaven sentits de rotació senestres. Efectes de partició de la deformació entre les zones antigues de xarnera i flanc llarg compliquen una interpretació fonamentada. Segurament tendeixen cap a un increment del grau de coaxilitat de la deformació; però no és evidenciada a nivell dels elements de la deformació finita i sense gaire suport d'evidències per demostrar-ho. Però, al meu parer no semblaria indicar en cap cas un increment de la no coaxilitat senestre de la deformació.

Si considerem com a vàlids i representatives les mesures de Wkm per a zones de baixa i moderada deformació de la D2, l'increment de la deformació s'ha d'interpretar com una modificació del grau de no coaxilitat de la deformació instantània i finita. A part del discutit fins ara, també té al seu favor la variació de la geometria de l'el·lipsoide de deformació finita i la seva tendència cap a condicions de "pur aixafament". Aquesta tendència contrasta amb les zones de menor deformació, on s'observen d'el·lipsoïds de deformació amb geometries d'aixafament però amb tendències cap a situacions constrictorials (Fig. 3.28).

A les regions de màxima deformació D2 situats més al Nord i pròximes a la costa, hi ha un domini de la S2 amb transposició generalitzada i orientació de les estructures E-W. Aquestes regions no han estat analitzades ni quantificades al llarg d'aquesta investigació. Si atenem al model interpretatiu sobre l'efecte de la rotació dextral, per aquestes zones s'han de preveure deformacions D2 tant infinitesimals com finites que han d'indicar condicions de deformació no coaxials dextrals. Amb orientació de la S2 i S0/1 pròximes als límits de la banda de deformació i de l'orientació previsible de l'eigenvector extensional. Druguet (1997), mitjançant la disposició de venes de quars i

dics de pegmatites obtingué valors de Wkm que indiquen condicions subsimples dextrals a la secció horitzontal. Aquests valors avalarien la hipòtesi interpretativa; però s'ha de vigilar, doncs és desconegut si representa un valor d'intensitat de rotació o de la vorticitat externa, o pel contrari sí ho és del grau de no coaxialitat. No queda especificat dins el treball de Druguet (1997).

Els efectes d'una component d'espín o de rotació externa són aparentment simples de comprendre a nivell cinemàtic i, sobretot per a deformacions instantànies (Fig. 8.24). L'explicació del canvi de sentit de cisalla és lligada a la variació d'orientació relativa dels elements estructurals respecte als límits de la zona de deformació o dels eixos de deformació instantània. Per a una deformació no coaxial dextral, quan un marcador creua l'orientació de la ISA d'escurçament és produïx una reversibilitat en el sentit de cisalla paral·lel a aquest marcador, passant de sentit dextral a senestral (Means, 1994). En canvi, quan creuen la ISA d'extensió és produïx el cas contrari, un canvi de sentit de cisalla de senestre a dextre. L'explicació és lligada a la variació de les velocitats angulars de les línies respecte a les de les ISA del flux. Velocitats de rotació més elevades de les línies originen sentits de cisalla instantanis oposats als de la condició de contorn. Aquesta condició és implícita en molts tipus d'estructures geològiques, com poden ser la reversibilitat del sentit de cisalla al llarg d'una fractura (Exner et al., 2004), la variació de la geometria dels plecs d'arrossegament o els flanking-folds (Ildefonse and Mancktelow, 1994; Grassemán et al., 2003), la variació de les *fabrics* S/C, les fractures Riedels (Twiss and Moores, 1992), el sentit de lliscament entre boudins asimètrics (Passchier and Druguet, 2002), etc. Però, no és un efecte circumscrit a estructures puntuals, sinó també és previst a nivell teòric per a medis anisòtrops o amb sistemes multicapes (Ishii, 1992; Jiang, 1994a,b). Per a un medi anisòtrop, encara que el grau d'anisotropia sigui baixa, una orientació a un elevat angle respecte als límits de la zona de deformació no tant sols originen un sentit de cisalla paral·lel a l'anisotropia contrari al del sentit de les condicions de contorn, sinó que també del grau de no coaxialitat de la deformació (Fig.1 de Jiang, 1999). Això és evident a partir del mecanisme de plegament per *flexural-flow* o *flexural slip* (Ramsay, 1967). L'amplificació del plec genera una zona de cisalla paral·lela a les capes amb sentit oposat a la rotació dels flancs. El màxim de cisalla esdevé a la zona d'inflexió del flanc, mentre a la zona de xarnera la deformació és coaxial. Druguet (1997) invocà al mecanisme de *flexural flow* per a interpretar la diferència entre el sentit de cisalla mitjançant l'asimetria dels indicadors cinemàtics (cisalla senestre paral·lela a la $S_0/1$) i el sentit de cisalla dextral de la banda

E-W d'alta deformació. No obstant la validesa de la interpretació, aquesta té un gran handicap en la distribució de la cisalla interna: aquesta ha d'esdevenir màxima per a les zones de màxima deformació de la banda, mentre per a les zones de baixa deformació els seus efectes són mínims. Això costa de fer concordar amb les dades de camp, on s'observa un aparent decreixement del grau de no coaxialitat de la deformació amb la rotació de la S0/1 i S2. D'altra banda, també és crític les propietats d'un medi natural que pot donar una resposta d'aquest tipus. En general s'accepta que un medi anisòtrop i/o un bandejat litològic amb propietats mecàniques contrastes poden desenvolupar respostes similars a un *flexural flow* (Hudleston et al., 1996). La cisalla interna és generada pel desplaçament relatiu del bandejat composicional per a compensar la vorticitat generada per la rotació del conjunt. Un fet necessari és la continuïtat espacial i temporal del bandejat o l'anisotropia al llarg de la deformació. Els materials de camp no són litològicament continus, ni el seu contrast és gaire elevat (<3 i per a zones de flanc llarg!). D'altra banda, la S1 no és pot considerar com una *fabric* altament penetrativa i ben marcada, com tampoc les condicions mecàniques dels medi són constants amb el progrés de la deformació. La deformació D2 és desenvolupà durant el pic màxim del metamorfisme progradant, i sembla lògic que per processos de recristal·lització i neoblastesi els materials haurien de convergir o disminuir les seves diferències de propietats mecàniques. Però sobretot, la crenulació de la S0/1 i el desenvolupament de la S2 han d'originar una modificació de les propietats mecàniques del medi que amb el progrés de la D2 ha de cessar qualsevol possible resposta del tipus *flexural-flow*. Per tant invocar aquest mecanisme no sembla almenys coherent amb les interpretacions i observacions de camp.

S'opta per una interpretació on els efectes de la deformació no coaxial senestre paral·lela a la S0/1, representen la descomposició de les condicions de contorn en un medi anisòtrop. La seqüència proposada d'esdeveniments per a la zona d'estudi és mostrada de forma esquemàtica a la Fig. 8.25-A. Els esquemes representen la secció horitzontal i s'han dibuixat assumint un progressiva pèrdua d'àrea compatible amb les observacions de camp. L'estadi I constitueix la geometria pre-D2, amb disposició del bandejat composicional i de la foliació S1 amb disposició subvertical i direcció NNW-SSE. Aquesta condició inicial és semblant a la inferida per Druguet (1997). Durant l'estadi II, és produeix el inici de desenvolupament de les estructures D2, com els plects F2 o la rotació/plegament dels sigmoïdal *quartz-rods*. Durant aquest s'infereix una cinemàtica pròxima a l'observada en les zones de baixa deformació, amb condicions no

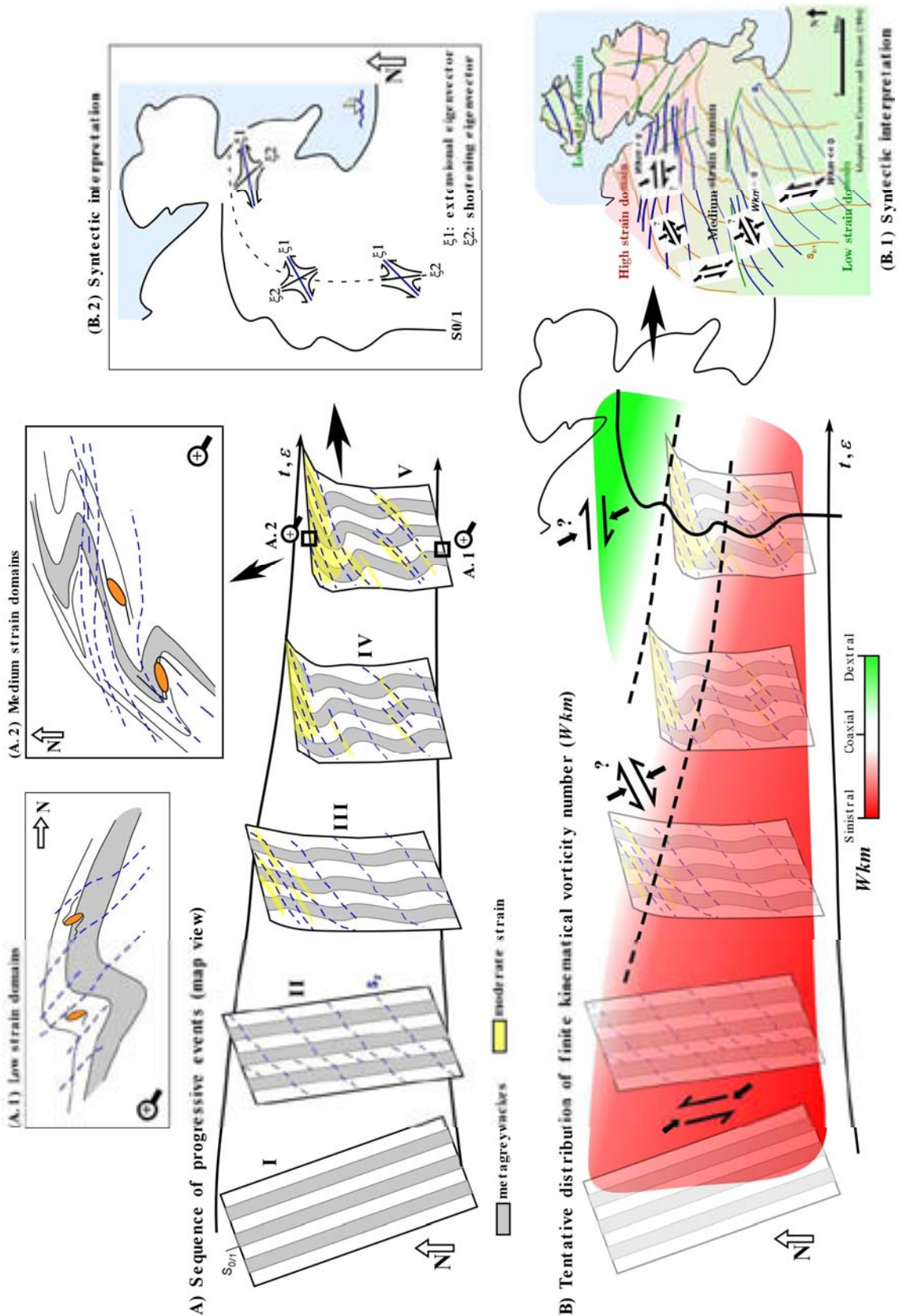


Fig. 8.25 (A) Esquema interpretatiu de la seqüència d'esdeveniments proposada per a la zona d'estudi. A nivell global, el progrés de la fase D2 origina una deformació heterogènia amb gradient d'intensitat de la deformació cap al Nord. L'evolució entre zones de moderada i baixa deformació és en part asincrònica i no progressiva. (A.1 i A.2) Detalls de la distribució dels sigmoidal *quartz-rods* en zones de baixa i moderada deformació, i la seva relació amb els plecs de l'encaixant i la S2. (continuació pàgina següent).

(continuació) (B) Esquema hipotètic de la distribució del grau de no coaxilitat en la zona. Inicialment l'estructura respon a una deformació no coaxial senestre. La progressiva rotació dextral dels marcadors i paral·lelització amb els límits de la banda de màxima deformació origina un increment del grau de no coaxilitat dextral. (B.1 i B.2) Interpretació sintètica del grau de no coaxilitat i representació dels eigenvectors de flux. La variació és lligada a una modificació de l'angle β i de la mida dels camps de rotació senestres i dextrals.

coaxials senestres amb pla principal de cisalla paral·lel a la S0/1 i escurçament paral·lel a aquest. La deformació i intensitat de la foliació S2 és particionada entre els nivells de metagrauques i metapelites, amb diferent orientació i grau de desenvolupament segons la litologia. Però el grau de partició de la deformació és baixa, amb sentits en tots dos materials sintètics i donant lloc a una deformació essencialment distribuïda. El caràcter d'aquesta és pròxima a condicions de *flattening* amb pèrdua moderada d'àrea i extensió en sentit vertical. És pogué iniciar la rotació dextral de la S0/1, de forma homogènia en tot el conjunt de materials. Durant l'estadi III, s'inicià la nucleació i desenvolupament dels plecs de la mesoescala juntament amb l'emplaçament del conjunt de venes de quars sintectòniques (Q2). Aquestes han de respondre a esclatxes de tensió controlades per les condicions instantànies de la deformació i la influència del medi bandejat i anisòtrop. Sincrònicament al desenvolupament de plecs s'inicià un heterogenització de la rotació dextral amb increment de la seva intensitat cap a la part Nord. Això originà el inici d'una distribució de la deformació no homogènia, amb el desenvolupament d'un gradient d'intensitat cap al Nord, i la diferenciació d'evolució entre les zones actuals de baixa i moderada/alta intensitat de la deformació D2. Durant els estadis IV i V és produeix en les zones de baixa deformació la intensificació de la deformació D2 associada amb l'amplificació dels plecs de la mesoescala i el desenvolupament de la crenulació S2. És produeix una localització progressiva de la deformació mitjançant bandes d'intensificació dels plecs F2. Mentre la zona més activa de deformació és situada a les regions més al Nord, amb intensificació de la rotació dextral de la S0/1 i el desenvolupament de transposició dels flancs llargs i plecs isoclinals F2. Mentre a les zones de baixa deformació el conjunt de *quartz-rods* continuen responen de forma compatible amb un sentit de cisalla senestre a la S0/1, en zones de moderada deformació aquests responen de forma bimodal amb el retreballament d'algunes orientacions a sentits dextrals respecte la S0/1 (esquemes A.1 i A.2 de la Fig. 8.25). A nivell de geometria de la deformació, el desenvolupament de la banda d'orientació E-W ha d'anar associada amb deformacions pròximes a condicions més pròximes a *plane strain*, encara que la geometria de l'el·lipsoïd de deformació finita és pròxima situacions d'aixafament ideal. Durant l'estadi IV la D2 és converteix

en la *fabric* dominant en algunes regions, representant mecànicament l'anisotropia principal dins la roca.

A nivell de cinemàtica de la deformació la progressiva rotació de la S0/1, juntament amb el desenvolupament de la S2 i la paral·lelització d'aquests dos conjunts estructurals, produeix una modificació del sentit de cisalla enregistrat en els materials a la secció horitzontal. La distribució inferida del número finit de vorticitat cinemàtic és mostrada a la Fig. 8.25-B. Per a condicions inicials amb orientacions NNW-SSE de la S0/1, molt obliqües als límits de la futura banda d'alta deformació, el grau de no coaxilitat és senestre i paral·lel al pla S0/1. La Wkm inferida és entre -0.87 a -0.42 (Fig. 8.22). Per aquestes situacions, la S0/1 és una direcció d'escurçament pròxima a l'orientació inferida de l'eigenvector d'escurçament de la deformació (veure subesquemes B1 i B2 de la Fig.8.25). La rotació i crenulació de la S0/1 origina una pèrdua del caràcter no coaxial senestre de la deformació i l'increment de components coaxials (o dextrals). Per a zones de moderada/alta deformació la Wkm inferida és entre 0.25-0.17 (veure Fig. 3.29). El sentit de la deformació és no coaxial dextral, pròxims a condicions coaxials rotacionals. Per a les zones d'alta deformació, amb disposicions E-W no s'ha estimat la deformació però es preveuen no coaxials dextrals. Amb valors inferiors al rang obtingut per Druguet (1997) ,amb $Wkm < 0.82-0.92$. Aquests valors serien compatibles amb el sentit i intensitat de rotació de la banda E-W d'alta deformació D2. La interpretació pot semblar *a priori* complexa, però és realment molt simple. Tant sols representa la variació de l'angle entre els eigenvectors de la deformació (idealitzant condicions de *plane strain*) lligada a la orientació de la S0/1. La situació inicial de la S0/1 a un angle elevat respecte al límit de la futura banda d'alta deformació i el caràcter anisòtrop del material condicionà una descomposició de les condicions de contorn com a un flux no coaxial senestre paral·lel al bandejat composicional i la S0/1. L'orientació de l'eigenvector d'escurçament és amb direcció N-S i condicionada pel caràcter anisòtrop del material. L'increment de la deformació origina un pèrdua de la influència de l'anisotropia inicial i una progressiva tendència cap a condicions de deformació finita similars a les de les condicions d'alta deformació. Per aquestes condicions el pla de cisalla és orientat E-W i paral·lel als límits de la banda de deformació. Observar la diferencia en orientació dels plans de cisalla, i la conseqüent variació en el seu sentit de cisalla. Però tots dos són compatibles amb una deformació d'escurçament màxim aproximadament NW-SE, amb màxima extensió subvertical i condicions de pèrdua d'àrea moderada per a la secció d'estudi. Condicions constants a

nivell de cinemàtica no semblen compatibles entre les zones d'alta i baixa deformació. L'organització i disposició dels sigmoïdal *quartz-rods* semblen únicament plausibles d'explicar mitjançant condicions no coaxials senestres. En canvi, per a situacions d'alta deformació i retreballament dels materials, sembla difícil explicar un sentit de no coaxilitat oposat a la cinemàtica de la deformació. S'haurien d'assumir condicions pròximes a *flexural-flow* i sense evolució de les propietats mecàniques dels materials, aspectes que no semblen concordar amb les observacions de camp, ni amb les mesures qualitatives i quantitatives de camp. Sembla més coherent considerar una evolució del grau de no coaxilitat de la deformació entre zones d'alta i baixa deformació, condicionada amb la variació de l'angle entre els eigenvectors inferits de la deformació com a conseqüència de la progressiva reorientació dels elements estructurals respecte als eixos de la deformació. D'altra forma, recordar que aquest caràcter de cisalla és menor comparat a les components coaxials de la deformació.

Implícitament implica un asincronia del caràcter de la deformació entre zones d'alta i baixa deformació, i inhibeix una interpretació de deformació progressiva en sentit estricte. El caràcter d'aquesta és altament heterogeni i variable, no obstant les condicions de contorn siguin aproximadament constants. Una variació a la interpretació proposada és assumir dues fases independents dins la D2. Una primera fase que originà el desenvolupament de la cisalla senestre paral·lela a la S0/1, mentre una fase posterior originà la localització de la banda d'alta deformació dextral amb direcció aproximada E-W ó NW-SE. Interpretacions d'aquest tipus són implícites en els treballs de Druguet et al., (1997) i Bons et al., (2004; veure Fig.2 d'aquest treball). No obstant la plausibilitat formal d'aquestes interpretacions, el caràcter sincrònic i relacionat entre el desenvolupament de les estructures D2 i la rotació dextral queda demostrat mitjançant les observacions de camp efectuades. No hi ha evidències per a deslligar aquests efectes, i sembla plausible d'explicar dins un únic procés global, donat el caràcter distribuït i heterogeni de la deformació D2 i la no presència de límits clars entre aquestes subfases. D'altra forma, s'ha de reconèixer que la progressiva localització preferent de la deformació a la regió més al Nord, produeix una diferenciació de la deformació. Però, tot el seu conjunt sembla compatible amb un regim de deformació transpressiu global amb escurçament màxim NNW-SSE, extensió subvertical, pèrdua d'àrea de la secció horitzontal i secció de màxima asimetria subhoritzontal (és a dir, amb vector de vorticitat subparal·lel a la direcció d'extensió finita). El gradient heterogeni de deformació sembla plausible d'explicar a partir del procés de distribució i

localització de la deformació associat a la variació d'orientació de la S0/1 i al desenvolupament del plec sigmoïdal de la macroescala, sense necessitat de modificar el règim de la deformació. Tampoc sembla necessari advocar al desenvolupament de la banda d'alta deformació a l'emplaçament del conjunt de dics pegmatítics. Dins la zona d'estudi quantitatiu no s'observa l'associació de dics pegmatítics amb zones d'alta deformació. No hi han evidències a nivell estructural per necessitar de justificar la inflexió i localització de la banda d'alta deformació originada per l'emplaçament dels dics pegmatítics. Segurament, l'emplaçament ha d'originar a una major localització i manifestació de la deformació D2, doncs ha d'originar una afebliment mecànic del material per l'increment de temperatura i, sobretot, la circulació de fluids. Però no sembla la causa que origina el seu desenvolupament, doncs sembla que presenta una història molt més llarga i associada a condicions preclímax metamòrfic, tal com sembla indicar l'evolució de l'estructura.

A nivell tridimensional, no hi han evidències de camp per a poder interpretar la cinemàtica de la deformació paral·lela a la direcció d'extensió (secció vertical de camp). No s'ha pogut reconèixer ni el desenvolupament d'estructures asimètriques, ni tant sols reconèixer processos de partició de l'extensió entre les venes de quars/encaixant. Sembla molt agosarat realitzar o reafirmar cap interpretació de camp, doncs no hi ha cap fonament ni evidència real (o contrastada) per a la seva interpretació. Atenent aquests aspectes, no hi ha cap evidència que confirmi un sentit revers paral·lel a la S0/1 tal com s'interpreta en els treball de Druguet (1997; 2001).

No obstant el gran esforç a nivell d'anàlisi de camp, tant quantitatiu com qualitatiu, una explicació mecànica al desenvolupament de la deformació D2 a la zona de Culip, i en general dins l'àrea del Cap de creus o el Varisc del Pirineus, encara és lluny de ser considerat acceptable. La deformació D2 de Culip és complexa i variable, amb tendències no estacionaries. La informació cinemàtica d'aquesta s'ha obtingut mitjançant venes de quars i els sigmoïdals *quartz-rods*. Mitjançant els models numèrics s'ha pogut constatar la poca sensibilitat d'aquestes estructures a enregistrar el canvis de les condicions de la deformació. Abordar el funcionament mecànic d'una regió amb deformació distribuïda i, en general poc localitzada, és molt més complex que abordar l'estudi d'una o d'un conjunt discret de bandes de cisalla. La variació del caràcter cinemàtic tant a l'espai com en el temps, complica molt una interpretació coherent i fonamentada amb la integració de dades de camp i teòriques. Són necessàries dades mitjançant indicadors més sensibles a la variació de la deformació, que ens pugin

aportar informació del caràcter instantani o puntual de la deformació. Però, no és una qüestió simple donada la dificultat d'interpretar els marcadors cinemàtics a nivell qualitatiu i sobretot quantitatiu, i les dificultats de trobar els suficients per abordar un estudi d'aquest tipus. Però, entendre el processos de deformació lligats a zones de deformació distribuïdes, passen molt cops per primer entendre com és la mecànica i el significat cinemàtic que ens poden aportar els marcadors presents a la zona. En aquest cas els sigmoïdal *quartz-rods*, ens ha permès establir una millor descripció quantitativa de la deformació D2 de la zona de Puig Culip. Sembla factible el seu ús com a indicador cinemàtic tant qualitatiu com quantitatiu, sobretot a nivell de deformació i el grau de no coaxialitat. També la seva aplicació en altres contextos, sempre i quan les condicions de deformació siguin compatibles a les assumides en els models numèrics. Finalment recalcar la importància relativa de les zones de baixa localització de la deformació (o distribuïda), alhora d'acomodar de forma efectiva la deformació. Per el cas d'estudi, per un segment d'un kilòmetre de terreny, l'escurçament quantificat és >>50% (mitja d'un 60%). Potser no són tan vistoses com les bandes de cisalla, ni amb la significació a nivell de transport i límits a nivell crustals. Però, emmagatzemen més informació que la tradicional variació d'orientació dels elements estructurals, com informació a nivell d'acumulació i d'evolució de la deformació. Encara romanen molts aspectes per a descobrir sobre els processos que controlen el desenvolupament d'orògens a partir l'estudi a l'escala d'aflorament de camp i la seva comprensió mitjançant tècniques de modelització experimental o numèriques.

9

Conclusions i comentaris finals.

“My principal objection to this Hypothesis rests on the author’s method. This, is my opinion, is not scientific, but takes the familiar course of an initial idea, a selective search through the literature for corroborative evidence, ignoring most of the facts that are opposed to the idea, and ending in a state of auto-intoxication in which the subjective idea comes to be considered an objective fact.”

Edward Berry sobre la hipòtesis de deriva continental d’Alfred Wegener (a partir d’Oreskes, 1999).

En aquest darrer capítol es presenta un sumari de les conclusions principals d'aquest estudi. Un dels objectius principals de tot aquest treball d'investigació és intentar millorar el coneixement sobre els factors principals que controlen el plegament de capes d'espessor no homogeni. A partir d'aquests factors s'ha intentat abordar la relació entre l'asimetria de les estructures desenvolupades amb la vorticitat cinemàtica de la deformació. Per tal d'aconseguir-ho s'ha establert una metodologia d'estudi basada en la combinació de descripció i anàlisi de camp detallat juntament amb modelització numèrica i experimental amb materials analògics. La definició d'un marc de conceptes basats en la mecànica de medis continus ens han permès un anàlisi més acurat tant de la distribució de les principals raons de la cinemàtica com sobretot, de l'evolució geomètrica de les inestabilitats desenvolupades en els models. Aquest marc de conceptes és el que posteriorment ens han permès una definició d'eines aplicables al camp per a poder estimar de forma senzilla tant la deformació finita (ε) com el número de vorticitat de la deformació (Wkm). Durant els capítol anteriors, ja s'ha discutit i especificat les conclusions específiques de cadascun d'ells, per la qual cosa només es presenten aquelles conclusions més generals relacionades amb les preguntes obertes durant el primer capítol introductor de la memòria (veure pàgines, 26-27).

9.1 Sobre el plegament de capes d'espessor no homogeni i la seva relació amb la vorticitat cinemàtica.

- S'ha modelitzat, descrit i demostrat la plausibilitat d'una transició mecànica de les estructures desenvolupades en medis heterogenis entre configuracions inicials definides per partícules aïllades i capes d'espessor homogeni. És compatible una transició entre la dinàmica de partícules aïllades i la mecànica de plegament de capes. Almenys és vàlid per a les condicions dels models numèrics, simulats com a un medi elastoviscós i per a condicions de contorn monoclíiques.
- Una forma eficaç d'expressar aquesta transició és mitjançant el paràmetre geomètric d'espessor normalitzat d'interboudin Ti . Configuracions de partícules aïllades representen valors de $Ti=0$, mentre el seu progressiu increment ens permet definir configuracions mixtes de partícules connectades a capes de menor espessor, fins a $Ti=1$ que ens defineix una capa d'espessor homogeni. A les configuracions intermèdies se'ls ha denominat sistemes capa-partícula o capes

amb geometria “*pinch-and-swell*”. Idealment corresponen a una geometria de capa definida per boudins i interboudins.

- Pels sistemes estudiats, la transició entre inestabilitats dominades pels processos partícules aïllades i plegament és totalment asimètrica i abrupte, i es produeix aproximadament per a valors de $Ti < 0.1$. Això origina un control predominant dels processos de plegament de capes pel mecanisme de “*buckling*” (almenys pels models estudiats en aquest treball). Un correcte estudi mecànic passa per l’aplicació dels conceptes bàsics de la teoria de plegament i la descripció dels efectes durant els tres estadis principals de plegament: nucleació/selecció, amplificació i cessament de les inestabilitats. D’altra banda comporta que les inestabilitats desenvolupades i objectes d’estudi responen a processos de bifurcació, amb possibilitat d’elevada variació de les solucions obtingudes i, en general, altament influïdes per la configuració de la pertorbació preestablerta en el sistema.
- Per a condicions generals, la configuració geomètrica d’aquests sistemes pot ser definida mitjançant la combinació de tres paràmetres essencials: Ti (espessor de l’interboudin), Ri (relació axial dels boudins) i Di (longitud normalitzada d’interboudin). La combinació d’aquests paràmetres ens permet definir un ampli ventall de configuracions inicials dels models, i abordar per primer cop l’estudi mecànic de la influència de la variació de l’espessor d’una capa competent en la nucleació i amplificació de les inestabilitats desenvolupades.
- A gran trets, la geometria final desenvolupada és dependent de la combinació d’aquests tres paràmetres, però sobretot de Ti que és el factor principal que controla el tipus d’inestabilitats desenvolupades. En general, Ri i Di són secundaris encara que per a situacions $Ri > 4$ la capacitat de rotació d’un boudin connectat amb una capa és pràcticament no efectiva.
- S’han establert quatre modes principals de comportament mecànic de les inestabilitats: (1) Comportament similar a una partícula aïllada (per a situacions de $Ti < 0.10$), (2) Plegament de capes amb geometries “*pinch-and-swell*” (per a situacions de $0.10 < Ti < 0.30$), (3) Capes amb geometria de trens de boudins plegats (valors de $0.30 < Ti < 0.75$) i (4) capes plegades ($Ti > 0.75$). Tant sols els dos primers modes d’inestabilitats aporten suficient informació per a un anàlisi de la cinemàtica de la deformació. El rang de valors amb més informació és el

pròxim a $Ti < 0.1$, doncs per aquestes situacions es combina tant les tendències asimètriques i sensibles a la cinemàtica de les partícules com s'observen velocitats d'amplificació de les pertorbacions pròpies als processos de plegament. És a dir, la velocitat de rotació dels boudins són molt majors que les esperades a partir teoria de partícules rígides. Això permet explicar les observacions d'elevada rotació dels sigmoïdal *quartz-rods* per a condicions de baixa a moderada deformació finita.

- La geometria final desenvolupada no tant sols depèn de la configuració inicial de les capes, sinó també tant de la cinemàtica de la deformació com de l'orientació de la capa respecte als eixos de la deformació. Per a una configuració inicial similar, segons sigui la combinació d'aquests darrers dos aspectes obtindrem una geometria final diferent. L'orientació de la capa i la cinemàtica de la deformació no són independents, i segons la combinació d'aquests podem obtenir solucions equivalents. Això ens ha permet identificar i definir un espai d'autoorganització similar de les solucions obtingudes dels models mitjançant els paràmetre α_0 (orientació inicial de la capa) i β (angle entre els eigenvectors de la deformació, $\propto Wk$). D'aquest espai s'han definit les trajectòries d'equivalència (*EVT*) i s'ha identificat l'orientació paral·lela al pla de cisalla com a claus alhora d'una definició posterior dels mètodes d'estimació de la deformació.
- Altres factors geomètrics que poden influir en la geometria final de les estructures desenvolupades són els paràmetres d'asimetria longitudinal i transversal de capes (respectivament ϕ i A'). El primer condiona sobretot l'asimetria de l'arranjament del conjunt de boudins, mentre l'altra controla la disposició dels boudins dins l'estructura (com per exemple si són disposats com a flanc dels plecs o a les zones de xarnera, o si es produeix el plegament dels boudins). Aquests aspectes poden arribar a originar el desenvolupament consistent d'asimetries per a condicions de flux coaxial i paral·lel a l'eigenvector compressiu.
- La definició progressiva de l'escala de la configuració dels models numèrics ens han permès d'una forma eficient establir l'estudi en un marc amb dificultat incremental. D'aquesta forma s'ha pogut establir les principals influències de les interfases de la capa, d'un sistema definit per una pertorbació preestablerta i única, i finalitzar per a un sistema general de multipertorbacions sense una

preselecció d'aquestes. Els resultats no presenten dades redundants sinó donen aspectes molt concrets dins d'aquest estudi.

- La definició de models amb pertorbacions aleatòries s'han mostrat altament eficaços alhora d'establir un estudi dels efectes d'interacció entre les pertorbacions i el caràcter d'estabilitat de la solucions obtingudes. Els processos de nucleació i selecció són complexos, amb possibilitat de bifurcació de les solucions obtingudes per a sistemes sense una pertorbació preestablerta. Els processos d'interacció entre pertorbacions poden arribar a controlar la geometria final desenvolupada o modificar substancialment la solució esperada a partir de models amb una única pertorbació. El desenvolupament de plecs marginals associats als boudins són un clar exemple. Si internament el sistema afavoreix la seva amplificació, la pertorbació associada als boudins és atenuada, i no és produeix rotació activa dels boudins. Conseqüència d'aquests aspectes neix la necessitat de definir un marc d'estabilitat de les rotacions i de probabilitat en el desenvolupament d'arranjaments asimètrics per tal d'establir futures eines d'anàlisi de la deformació a partir d'estructures naturals.
- La relació entre l'asimetria de les pertorbacions i el número de vorticitat de la deformació (Wk) no és trivial. S'ha demostrat que en gran part, l'asimetria és influència de la diferencia de velocitats de rotació entre l'envolvent de la capa i les pertorbacions que es desenvolupen, i no directament de la Wk . Mitjançant els models numèrics s'han pogut establir els criteris bàsics per a diferenciar entre situacions de rotacions dels boudins sintètiques i antitètiques, i emparar aquestes estructures com a indicadors de sentits de cisalla. Aspectes lligats a la distribució i refracció de la direcció de màxima extensió, o en referència a la geometria i disposició dels plecs respecte als boudins, poden ser utilitzats com a criteris per establir la cinemàtica.
- La influència del grau de no coaxilitat de la deformació igualment és complexa i no unívoca. En general l'increment del grau de no coaxilitat afavoreix el desenvolupament d'arranjaments asimètrics estables. Però aquest darrer aspecte sempre és dependent de la relació d'orientació entre la capa i la ISA d'escurçament.
- La modelització de la influència del paràmetre Ti ens ha permès observar que en condicions generals de cisalla, per a sistemes de capa competent aïllada i

immersa en un medi isòtrop dúctil no hi ha el desenvolupament general de plecs asimètrics. Tant sols s'ha observat el desenvolupament d'asimetries en capes d'espessor homogeni per a situacions d'orientació obliqua al pla de cisalla. Per aquest cas l'asimetria és antitètica al sentit de cisalla de la condició de contorn. Aquesta tendència a no desenvolupar perturbacions asimètriques va en contra del mite generalitzat dins la geometria estructural que l'aplicació d'un esforç de cisalla paral·lel a una capa és suficient pel desenvolupament de plecs asimètrics. Aquesta premissa sembla no vàlida. Aquesta interpretació és consistent amb la variació de les geometries de les estructures observades per el rang de valors de Ti de l'estudi, on l'increment de Ti origina una pèrdua de l'asimetria de les perturbacions desenvolupades. Pels models d'estudi, el desenvolupament d'asimetries és lligat a l'increment de la heterogeneïtat de l'espessor de les capes, i per tant a la selecció primària de longituds d'ona de perturbacions diferenciades. Aquestes observacions són consistents amb les tendències geomètriques observades per al conjunt de venes de quars del camp. Per a condicions de perturbacions actives i no controlades per l'encaixant (tals com s'han assumit aquests dades), no és evident el desenvolupament de geometries asimètriques en els plecs. La distribució al seu voltant si que ho és d'asimètrica, però no la diferenciació entre els flancs dels plecs a nivell de longitud o espessor. Això pot implicar que moltes de les geometries asimètriques dels plecs són induïdes per la distribució d'esforços en el medi encaixant anisòtrop.

- La influència del grau de no linealitat del material no és essencial, i la variació de geometria que produeix respecte al cas elastoviscós lineal base d'aquest estudi no sembla important. En genera origina un increment de la dispersió de les solucions, lleugeres modificacions en la geometria de les xarneres i en la deformació homogènia acumulada, i l'afavoriment del desenvolupament de plecs marginals als boudins. Altres aspectes mecànics com el lliscament localitzat entre capa/matriu modifica el sentit d'asimetria o la distribució de les raons de la cinemàtica esperades mitjançant les condicions de contacte coherent. A nivell de cinemàtica variacions de pèrdua d'àrea originen també desviacions en el comportament previst de l'estructura.
- Els plecs desenvolupats a partir de capes d'espessor no homogeni dels models, mostren una insensibilitat a les variacions del grau de no coaxialitat de la deformació de contorn. Mentre la selecció inicial de perturbacions és en part

dependent de l'orientació de la capa i Wk de la deformació, un cop seleccionades aquestes són independents, a nivell de geometria, de les modificacions de la Wk al llarg de la deformació. És produeix un “retreballament positiu” de les pertorbacions preexistents sense una modificació d'aquestes per adaptar-se a les noves condicions de flux. Aquestes observacions són lògiques si atenem la influència de l'amplitud finita de les pertorbacions en processos de plegament. Això ens permet establir la hipòtesis que en gran part la geometria final observada en aquests sistemes és un reflex de la cinemàtica durant el moment de la nucleació de les pertorbacions.

- No obstant la complexitat dels resultats dels models de plegament de capes d'espessor no homogeni, s'han pogut reconèixer un conjunt d'aspectes conceptuals i paràmetres geomètrics òptims per tal de definir eines d'estimació de la deformació i la Wk a partir d'exemples de camp. Tres mètodes s'han proposat:

- (1) Mètode individual i escala temporal interna. Basat en la diferència de rotació entre els flancs definits pel boudin i el plec marginal.
- (2) Mètode individual i escala temporal externa. Basat en l'orientació del boudin i del pla XY de deformació finita.
- (3) Mètode global i escala temporal externa. Basat en la variació d'orientació dels boudins i de l'orientació de pla XY de deformació finita per a una població de dades de camp.

La base de tots aquests mètodes són una sèrie de diagrames de contorns i la mesura d'un conjunt de paràmetres geomètrics simples com són l'orientació dels flancs respecte a l'envolvent de capa o la foliació.

La definició d'aquestes eines ha passat per un desenvolupament previ de models numèrics amb regeneració de malla per tal de poder arribar fins a solucions d'elevada deformació (fins a $\varepsilon \sim 2$).

9.2 Sobre aspectes i interpretació de les estructures tectòniques de camp.

Un dels objectius fonamentals del present treball és comprendre quina és la informació que podem extreure a partir de la geometria dels sigmoïdal *quartz-rods*, sobretot en referència a la deformació finita i al grau de no coaxialitat de la deformació. Aquesta informació ens ha de facilitar la posterior interpretació de la deformació D2 associada a la zona del Cap de Creus. Per arribar a aquestes fites s'ha realitzat una cartografia i

descripció detallada de l'estructura d'un sector concret de Puig Culip, amb especial èmfasis en les venes de quars i *quartz-rods* com a indicadors potencials. Aquest estudi ens ha permès definir el marc de referència i és el fons d'inspiració per a la modelització numèrica i experimental amb materials analògics. Les conclusions principals de l'estudi de camp i la integració dels conceptes derivats mitjançant la modelització són els següents:

Sobre les venes de quars

- S'ha establert una descripció i diferenciació temporal dels principals conjunts de venes de quars (Q1, Q2 i Q3). També s'ha demostrat la variació de la geometria dels plecs F2 en venes de quars respecte a la seva disposició vertical. La paral·lelització dels eixos d'aquests plecs respecte la direcció d'extensió genera un increment del caràcter cilíndric dels plecs. En canvi per a disposicions subhorizontals els plecs mostren geometries de superposició altament no cilíndriques, indicant la possibilitat de condicions de pèrdua d'àrea d'aquesta secció i, fins i tot, condicions constrictives. Aquestes observacions són coherents amb els valors posteriorment obtinguts mitjançant la quantificació de la deformació.

Sobre els sigmoïdal quartz-rods

- S'ha establert una descripció detallada tant de la variació geomètrica dels sigmoïdal *quartz-rods*, com de la variació dels elements estructurals al seu voltant. D'aquesta forma s'ha pogut observar la variació d'orientació dels *quartz-rods* entre zones de flanc i flanc curt, o la complexitat de distribució en les regions d'alta deformació i transposició. La geometria principal és a mostrar formes de plecs amb "S", amb disposició de la S2 subperpendiculars als boudins, amb fortes refraccions entre les zones d'arc intern i extern, i al desenvolupament d'una foliació local associada al comportament competent i rotacional dels *quartz-rods*.
- També s'ha reconegut l'origen divers d'aquestes estructures, essent més complex que la interpretació tradicional de simples venes de quars boudinades durant la D1 que foren plegades durant la D2. Molts dels *quartz-rods* responen a conjunts de venes extensionals sigmoïdals plegades o el seu origen és

sincinemàtic amb la deformació D2 (efectes multicapes o cristal·lització de fluids sin-D2).

- La sistematització de l'estudi de la variació geomètrica dels *quartz-rods* respecte als paràmetres T_i i D_i ens ha permès dividir aquest espai en un conjunt de categories geomètriques bàsiques (veure pàgina 194). Aquestes concorden amb els modes d'instabilitats bàsics establerts mitjançant els models numèrics. També s'observa una disminució de l'asimetria de les estructures amb l'increment del valor de T_i , passant de geometries de plecs sistemàticament asimètrics (valors de $T_i < 0.4$) a geometries que no ho són.
- Els *quartz-rods* mostren un orientació preferent asimètrica amb rotació senestre respecte la S0/1. L'angle d'obliquïtat respecte l'envolvent o la S0/1 és molt variable podent-se observar fins a rotacions màximes de 150°. Aquesta elevada rotació és dependent de la relació axial dels boudins, el paràmetre T_i i de la disposició dins la mesoestructura de camp (flancs de plecs llargs, flancs curts/xarnera o zones de transposició). No sembla coherent una interpretació lligada a condicions d'elevada vorticitat doncs les deformacions necessàries ($\epsilon > 1.8$) són molt superiors a les esperades en un domini de baixa deformació, sinó sembla que és regida per l a l'efecte de la continuïtat de capes i del plegament de l'encaixant anisòtrop.

Sobre la quantificació de la deformació

- S'ha realitzat una quantificació de la deformació finita i del grau de no coaxilitat (W_{km}) de la deformació D2 de la zona mitjançant dos mètodes geomètrics independents: un associat al plegament de les venes de quars mentre un segon mètode lligat al desenvolupament dels sigmoïdal *quartz-rods*. Aquesta dualitat de mètodes ens permetrà validar la solució estimada mitjançant els mètodes proposats a partir de la modelització.
- La quantificació de la deformació mitjançant el plegament de venes de quars s'ha realitzat a partir d'un mètode nou d'anàlisi basat en la combinació dels mètodes de Schmalholz and Podladchikov (2002) i Talbot (1970). La seva aplicació al camp ens ha permès estimar la variació de la intensitat de deformació i la geometria de l'el·lipsoïd de deformació finita al llarg de l'àrea d'estudi. Els valors principals obtinguts són:

- El gradient de deformació s'incrementa cap al Nord, amb valors d'escurçament màxim (Z) variant entre 50% per a les zones de baixa deformació fins a un 75% per a les zones de moderada deformació i inici d'un bandejat de transposició D2.
 - Els el·lipsoïds presenten geometries de “*flattening*”, amb pèrdua d'àrea de la secció d'estudi entre un 35% a un 50%, amb eix de màxima extensió (X) subvertical.
 - La distribució de la deformació és molt heterogènia, i dependent de les propietats mecàniques dels materials per als dominis de menor deformació. Però, el grau de partició entre nivell metapelítics i les metagrauvaques és baix, amb contrast de viscositat com a màxim de 3.
 - L'increment de deformació no és explicable a partir de deformació progressiva i condicions de flux estacionaries. La deformació entre baixes i moderada deformació impliquen una variació de les condicions de flux, almenys a nivell de geometria de l'el·lipsoïd de deformació. Les zones de major deformació presenten condicions més pròximes a “aixafament ideal”, implicant condicions infinitesimals que podrien haver estat pròximes a condicions de deformació plana. Aquest caràcter no estacionari de la deformació ho corrobora el paràmetre de la dilatació cinemàtica promig (\dot{A}) que varia entre valors de -0.25 en les zones de bixa deformació a valors de fins -0.60 per a les de major deformació.
-
- S'ha estimat de forma puntual la Wkm mitjançant la variació de la deformació longitudinal i angular d'un parell de venes de quars plegades. L'anàlisi s'ha establert mitjançant cercles de Mohr a partir dels resultats obtinguts de l'estimació de l'el·lipse de deformació. Per a zones de moderada deformació el número de vorticitat cinemàtica estimat indica condicions pròximes a coaxials rotacionals ($Wkm \sim 0.17-0.25$) amb sentit de cisalla dextral i pla de cisalla d'orientació E-W.
 - L'aplicació pràctica del mètode proposat sembla funcional i permet una quantificació generalitzada de l'àrea a partir de localitzats discretes. No obstant implica una gran dedicació de temps, doncs és necessari mesurar les relacions de geometries d'un conjunt elevat de plecs. Addicionalment, tot aquesta data pot

ser reutilitzada per un anàlisi geomètric dels plecs i realitzar una estimació de les propietats mecàniques dels materials.

- La quantificació de la deformació mitjançant els sigmoïdal *quartz-rods* s'ha realitzat a partir de les eines desenvolupades al llarg d'aquest estudi. Això només s'ha realitzat per a dominis de baixa deformació. Els valors obtinguts de deformació natural (ϵ) i número de vorticitat (Wkm) mitjançant els tres mètode d'anàlisi són semblants i coherents amb els obtinguts mitjançant venes de quars. Els valors obtinguts indiquen relacions axials de l'el·lipse seccional entre 2.4 a 5.6, amb rang de variació de la Wkm entre -0.47 a -0.87 . A nivell de deformació, el desenvolupament dels sigmoïdal *quartz-rods* s'ajusta a una deformació no coaxials senestre amb pla de cisalla paral·lel a la $S0/1$, corresponen a una direcció pròxima a l'eigenvector d'escurçament. El màxim ajust entre els valors obtinguts per als dos mètodes és per a situacions de lliscament i/o partició de la extensió vertical entre els sigmoïdal *quartz-rods* i l'encaixant. L'anàlisi diferencial de poblacions de dades en funció de la litologia i la posició dins els plecs mètrics (flanc curt, flanc llarg) han permès constatar la baixa diferència de comportament mecànic entre els nivells de metagrauvaques i metapelites, com observar l'anomalia d'arranjament dels *quartz-rods* disposats en flanc curts. L'ús de les eines desenvolupades a la zona d'estudi posen de manifest la seva funcionalitat i senzillesa d'aplicació alhora d'estimar la deformació i la Wk en medis naturals.
- Les dades obtingudes al llarg de l'estudi semblen confirmar el caràcter de la D2 com una deformació transpressiva altament distribuïda i heterogènia, amb domini de les components coaxials. La secció horitzontal d'estudi representa el pla de màxima asimetria estructural (VNS), amb disposició del vector de vorticitat inferit paral·lel a la direcció d'extensió X . Aquest eix X és disposa subvertical, amb reducció d'àrea entre un 35% a un 50% a la secció horitzontal. La màxima direcció d'escurçament és NNW-SSE amb valors d'escurçament mínims entre un 50% a un 75%. El sentit de cisalla de la banda d'alta deformació E-W és dextral. Aquests resultats són semblants als interpretats per estudis previs (Druguet, 1997; 2001). Però els resultats indiquen que l'increment de deformació lligada a la rotació dextral dels elements estructurals es troba associada amb una modificació del grau de no coaxilitat de la deformació,

passant de condicions no coaxials senestres en els dominis de baixa deformació a dextrals en els dominis d'alta deformació. Aquesta variació sembla que es troba lligada a la modificació del pla de cisalla principal: d'orientacions paral·leles a la $S_0/1$ i direcció N-S, a disposicions E-W i subparal·leles als límits de la banda d'alta deformació. També origina una variació de l'angle β entre els eigenvectors de la deformació i de la mida dels camps de rotació senestre i dextral de les línies materials. Aquest efecte és predit per la teoria de deformació en medis anisòtrops o medis definits per un bandejat composicional (Ishii, 1992; Jiang, 1994a,b).

- Finalment, constatar la coherència entre les estructures descrites al camp i els resultats de la modelització numèrica i analògica. No obstant la simplicitat de la geometria dels models, la reologia del medi o les condicions de contorn, hi ha una gran similitud entre les observacions de camp i els resultats prevists mitjançant els models.

9.3 Sobre la metodologia d'investigació.

Amb el progrés d'aquest estudi, s'ha anat confirmant la importància de la metodologia de treball alhora d'abordar qualsevol investigació. És estrany trobar dins les conclusions de qualsevol tesi comentaris sobre la metodologia aplicada, però crec que tant important és el mètode o la forma d'abordar l'estudi com l'objecte concret de l'estudi. Potser per un projecte de tesi, tant significant pot arribar a ser el progrés del judici crític i avaluació dels mètodes com les pròpies conclusions dins l'àmbit disciplinar (en aquest cas la Geologia Estructural), però sobretot, no s'ha de caure en la "tecnocràcia" actual o l'abús inconscient de les eines actuals sense una comprensió dels seus fonaments.

La base fonamental d'aquest treball és una metodologia basada en dos grans eixos: estudis de camp detallats i la modelització mitjançant la combinació de mètodes teòrics, numèrics i analògics. Amb aquesta metodologia s'ha volgut superar les restriccions imposades per la manca de treballs previs de camp, teòrics o de modelització associades al plegament de capes amb distribució de l'espessor no homogeni. Els principals comentaris sobre el mètode de treball proposat són els següents,

- La metodologia emprada s'ha mostrat eficient alhora de plantejar temes d'elevada complexitat, com són processos dependents de múltiples variables o amb possibilitats de bifurcació de la solució, o aquells temes no abordats anteriorment per treballs previs. Una modelització a nivell mecànic basada en diferents aproximacions (teòrica, numèrica i analògica) és factible i necessària si l'objectiu final és una comprensió dels processos que controlen el desenvolupament de les estructures.
- Les diferents aproximacions aporten dades diferenciades i compatibles entre elles, sense representar dades redundants. Cadascuna de les aproximacions tenen aspectes positius però també desavantatjosos. La solució analítica o teòrica aporta el marc de conceptes i identifica el paràmetres que controlen el procés específic d'estudi. Per altra banda és limitat a configuracions geomètriques simples i només vàlid per a condicions infinitesimals. Els mètodes numèrics possibiliten la solució per a un ampli ventall de geometries i condicions de contorn, podent-ne arribar a resultats no predictibles per investigacions analítiques o fora de la intuïció científica i fàcilment sistematitzables. Però, només ens aporten una solució concreta per una configuració determinada, és difícil arribar a determinar les relacions analítiques que caracteritzen el procés mecànic i representa una solució d'un medi virtual definit a partir d'un conjunt de paradigmes i algoritmes preestablerts per l'estat de coneixement actual. Finalment, els models analògics és la representació d'un medi físic real però que s'infereix que respon mecànicament de forma similar als naturals. No és pot sistematitzar les solucions, ni les seves solucions són viables per a la definició d'eines per a la quantificació dels processos. És limitat a una interpretació qualitativa però és comporta sense cap restricció a nivell de paradigmes ni algoritmes funcionals. Tot el conjunt ens condueix a una comprensió mecànica dels processos i ens permet superar la restriccions simplistes dels models cinemàtics.
- Però, és essencial, i necessària, una definició i descripció de les estructures reals objectes d'estudi. Perquè representen la font d'inspiració i de contrast per validar la correcció dels resultats de la modelització (el millor laboratori és sempre el camp). Però per altra banda per no perdre la connexió amb la realitat dels medi geològic doncs és l'objectiu final de qualsevol estudi de modelització. Primer les observacions, després la modelització.

- S'ha de reconèixer que la connexió entre els resultats de la modelització i els de camp no és simple. Tampoc ho és la definició d'eines aplicables al camp i basades en els resultats obtinguts dels models. Al llarg d'aquest treball tant les tendències geomètriques dels models com les eines proposades semblen que són concordants amb les observacions de camp. No obstant la simplicitat dels models, l'ajust dels aspectes principals identificats semblen que són coherents. Així per exemple, l'espectre de geometries previstes pels models numèrics i observades a partir de les dades de camp.
- L'aplicació d'aquesta metodologia combinada però implica un consum molt elevat de temps, incrementant-se si un dels objectius és comprendre els aspectes principals que hi han al darrere de cadascun dels mètodes. No és similar el *set-up* que hi ha en un model analògic que en un model numèric. També s'incrementa la complexitat de gestió si és vol combinar els seus resultats, i no tractar-los com a peces aïllades o inconnexes.
- Si prenem de referència el present treball, la metodologia emprada té una relació entre producció i dedicació de temps clarament negativa. Una mica comprensible si tenim en compte el punt inicial d'arrencada, on era nul·la l'experiència tant a nivell de modelització analògica com de modelització numèrica dins el grup de recerca. Tampoc era operatiu l'equip de modelització experimental ni s'havien adquirit els recursos necessaris pel futur desenvolupament dels models numèrics. Tot s'ha desenvolupat sincrònicament al present treball. Intentar obtenir els objectius darrers de tot aquest estudi (noves dades per ajudar a la interpretació de la deformació D2 de camp) comporta un treball molt llarg, constant i complicat a tots els nivells. S'ha de ser més realista amb els objectius definits i aquests han de ser concordants amb les capacitats del grup de recerca, i d'aquesta forma seran factibles de desenvolupar-se al llarg de la durada d'un projecte de tesis.
- A més cal d'afegir que la metodologia bàsica de l'estudi s'inscriu dins un patró de mètode inductiu. No obstant la validesa d'aquest mètode d'aprenentatge, clarament és un mètode dependent de temps i no sembla el més adequat si l'objectiu primordial és la producció. Cal definir millor tant la base inicial de partença, com les hipòtesis de treball de l'estudi, però sobretot, els objectius

finals del treball. Potser caldria tendir cap un mètode amb traces més deductives, i per tant limitar l'autogeneració dels objectius d'estudi després de la recollida, descripció i interpretació de dades.

9.4 Comentaris finals

M'agradaria finalitzar aquesta llarga memòria amb una sèrie de recomanacions personals de cara a estudis futurs. Aquests comentaris són una ampliació dels exposats en l'anterior apartat sobre les conclusions de la metodologia d'investigació emprada.

El treball presentat en aquesta memòria és complex, tant a nivell de conceptes com de la metodologia associada, i això en deriva aquesta voluminosa i enrevessada memòria. Al llarg d'aquesta, s'ha intentat abordar el plegament de capes d'espessor no homogeni i la relació entre la geometria de les estructures i el seu significat cinemàtic. Aquest estudi és en gran part innovador, doncs hi han molt pocs treballs anteriors sobre el tema. Al finalitzar l'estudi, s'entén que en gran part és per la complexitat d'aquest. Però, també ho és a nivell de la metodologia emprada, almenys dins l'àmbit de la geologia estructural espanyola. Cal remarcar que aquest treball s'ha desenvolupat íntegrament des de la Unitat de Geotectònica del Departament de Geologia de la UAB. El progrés d'aquest estudi és paral·lel a l'adquisició de les tècniques tant de la modelització analògica com numèrica, i sincrònic al desenvolupament del mètode d'investigació, amb readaptació d'aquest a mesura que progressava el coneixement tant de continguts com de les capacitats crítiques d'aquestes metodologies. També s'ha desenvolupat amb els mitjans i capacitats humanes i econòmiques d'un grup de recerca molt reduït. Crec que és un aspecte que cal valorar i explicitar dins la present memòria.

Al llarg del desenvolupament del present treball s'han realitzat molts d'errors, sobretot en la gestió de temps, en la productibilitat associada, en el mètode de treball o en la complicada memòria final. Assumeixo exclusivament la responsabilitat d'aquests. Els dos primers aspectes són de difícil explicació i no entraré en el seu anàlisi. Per altra banda crec que són necessaris tots els apartats i passos fets als llarg de la memòria. Si és vol intentar que un lector amb paciència compregui part dels aspectes tractats a la memòria. Dels errors s'ha d'intentar aprendre, i intentar que generacions posteriors no els realitzi. Per això aquesta sèrie de recomanacions finals:

- S'ha de definir durant l'etapa inicial de forma clara tant els objectius com les hipòtesis de treball associada al desenvolupament de qualsevol projecte de recerca.
- Els objectius han de ser *realistes* i dins les capacitats factibles a nivell del trienni format entre estudiant de doctorat, director de tesis i el grup d'investigació. Això inclou tant les competències a nivell tècnic com a nivell de coneixements. Cada projecte ha de representar un *petit* pas cap endavant, amb l'adquisició de noves capacitats dins les possibilitats reals del grup de recerca.
- La definició incoherent, la manca de perspectiva o la infravaloració del grau de dificultat de l'estudi poden originar objectius difícilment abastables tant a nivell de doctorat com del grup d'investigació. De forma similar, la manca d'un mètode d'estudi que sigui funcional i adequat poden originar un risc elevat de fracàs o de pèrdua de temps massa elevada.
- Els objectius s'han d'adequar al grau d'implicació i interessos per part del trienni executor. L'autoaprenentatge és recomanable, però és més eficient un treball cooperatiu que permetrà redreçar aspectes en el temps d'execució (i en part en producció). Això pressuposa implicació de tots en el correcte desenvolupament del projecte.
- A vegades el mètode pot arribar a fallar, com quan es sobredimensiona la informació que ens pot aportar un mètode. Cadascuna de les tècniques emprades té uns avantatges i desavantatges. S'ha de saber modular i controlar aquests aspectes per un correcte desenvolupament de l'estudi.
- Una gestió eficient de múltiples formes de treball no és simple. A nivell de llenguatge o de configuració de l'estudi, no és el mateix un treball de cartografia, un estudi detallat d'una estructura, els conceptes teòrics i analítics, la modelització numèrica o analògica. Encara que en tot moment es donin voltes al mateix concepte, el llenguatge és molt diferenciat.
- A nivell de la geologia estructural europea es tendeix a mètodes de treballs sense combinació de metodologies. Hi ha una separació entre els estudis de camp i de modelització, però fins i tot entre la modelització numèrica i analògica. Molts cops de forma puntual s'utilitzen altres metodologies però quasi sempre a nivell de mètode "black-box" i supervisats externament.
- En un món tant competitiu, s'ha de saber aprofitar els punts forts d'un grup de recerca. Aquells que normalment donen la qualitat extra d'un treball o estudi.

S'han de potenciar doncs són els aspectes que aportaran qualitat a l'estudi i possibilitaran de competir externament amb altres grups de recerca (si fos un objectiu).

- El tema de qualsevol treball d'investigació hauria de respondre a incerteses o necessitats *reals* tant a nivell dels temes d'investigació del grup o dins l'àmbit de la geologia estructural. Crec que qualsevol recerca ha de tenir un consumidor, sigui a nivell acadèmic o de caire més pràctic.

Per terminar, el present estudi confirma que la investigació dins l'àmbit de la Geodinàmica (a qualsevol escala) requereix d'una modelització mecànica per a un correcte comprensió del processos que originen les estructures o fenòmens que observem al camp. A nivell personal quedaria molt satisfet si el present estudi pot arribar a induir a altres científics a investigar els processos geodinàmics per mètodes semblants als proposats en aquest treball, on és consideri la combinació de modelització mecànica i la mesura meticulosa de les estructures de camp com l'eina clau per l'avanc del coneixement dels processos generadors d'estructures. La natura continua essent el millor laboratori, i on encara es poden arribar a definir problemes importants i poc plantejats; potser no són mediàtics, però molts són claus per a una comprensió correcte de la dinàmica dels processos que han tingut i tenen lloc al nostre planeta Terra.

Bibliografia.

- Abassi, M.R. and Mancktelow, N.S., 1990. The effect of initial perturbation shape and symmetry on fold development. *J. Struct. Geol.*, 12, 273-282.
- Abassi, M.R. and Mancktelow, N. S., 1992a. Single layer buckle folding in non-linear materials-I. Experimental study of fold development from an isolated initial perturbation. *J. Struct. Geol.*, 14, 85-104.
- Anthony, M. and Wickham, J., 1978. Finite-element simulation of asymmetric folding. *Tectonophysics*, 47(1-2), 1-14.
- Arbaret, L., Mancktelow, N. and Burg, J-P., 2001. Effect of shape and orientation on rigid particle rotation and matrix deformation in simple shear flow. *J. Struct. Geol.*, 23, 113-125.
- Astarita, G., 1979. Objective and generally applicable criteria for flow classification. *J. Non-newtonian Fluid Mech.*, 6, 69-76.
- Barnolas, A., and Chiron, J.C., 1996. Synthèse Géologique et Géophysique des Pyrénées, vol. 1: Introduction. Géophysique. Cycle hercynien. Ed. BRGM-ITGE.
- Bastida, F., Aller, J., and Bobillo-Ares, N.C., 1999. Geometrical analysis of folded surfaces using simple functions. *J. Struct. Geol.*, 21, 729-742.
- Beam, E.C. and Fisher, D.M., 1999. An estimate of kinematic vorticity from rotated elongate porphyroblasts. *J. Struct. Geol.*, 21, 1553-1559.
- Bell, T.H., 1981. Foliation development: the contribution, geometry and significance of progressive bulk inhomogeneous shortening. *Tectonophysics*, 75, 273-296.
- Bell, T.H., 1985. Deformation partitioning and porphyroblast rotation in metamorphic rocks: a radical reinterpretation. *J. Metamorphic Geol.*, 4, 421-444.
- Bell, T.H. and Hayward, N., 1991. Episodic metamorphic reactions during orogenesis: the control of deformation partitioning on reaction sites and reaction duration. *J. Metamorphic Geol.*, 9, 619-640.
- Bell, T.H. and Johnson, S.E., 1992. Shear sense: a new approach that resolves conflicts between criteria in metamorphic rocks. *J. Metamorphic Geol.*, 10, 99-124.
- Bell, T.H., Johnson, S.E., Davis, B., Forde, A., Hayward, N. and Wilkins, C., 1992. Porphyroblast inclusion-trail orientation data: eppure non son girate!. *J. Metamorphic Geol.*, 10, 295-307.
- Biermeier, C., Stüwe, K. and Barr, T.D., 2001. The rotation rate of cylindrical objects during simple shear. *J. Struct. Geol.*, 23, 765-776.
- Biot, M.A., 1957. Folding instability of a layered viscoelastic medium under compression. *Proc. R. Soc. Lond. A242*, 444-451.
- Biot, M.A., 1959. Folding of a layered viscoelastic medium derived from an exact stability theory of a continuum under initial stress. *Appl. Math. Q.*, 17, 185-204.
- Biot, M.A., 1961. Theory of folding of stratified viscoelastic media and its implications in tectonics and orogenesis. *Geol. Soc. Am. Bull.* 72, 1595-1620.

- Biot, M.A., 1965. *Mechanics of Incremental Deformations*. John Wiley, New York. 504pp.
- Bjornerud, M., 1989a. Mathematical model for folding of layering near rigid objects in shear deformation. *J. Struct. Geol.*, 11, 245-254.
- Bjornerud, M., 1989b. Toward a unified conceptual framework for shear-sense indicators. *J. Struct. Geol.*, 11, 1045-1049.
- Bjornerud, M and Zhang, H., 1994. Rotation of porphyroblasts in non-coaxial deformation: insights from computer simulations. *J. Metamorphic Geol.* 12, 135-139.
- Bobyarchick, A.R., 1986. The eigenvalues of steady flow in Mohr space. *Tectonophysics*, 122, 35-51.
- Bons, P.D., Barr, T.D., ten Brink, C.E., 1997. The development of d-clasts in non-linear viscous materials: a numerical approach. *Tectonophysics* 270, 29–41.
- Bons, P.D., Druguet, E., Hamann, I., Carreras, J. And Passchier, C.W., 2004. Apparent boudinage in dykes. *J. Struct. Geol.*, 26, 625-636.
- Bretherton, F.P., 1962. The motion of rigid particles in shear flow at low Reynolds number *J. Fluid. Mec.*, 14, 284-301
- Brun, J.P. and Merle, O., 1988. Experiments on folding in spreading-gliding nappes. *Earth and Planetary Science Letters*, 61, 129-139.
- Budd, C.J. Hunt, G.W. and Peletier, M.A., 1999. Self-similar fold evolution under prescribed end-shortening. *Mathematical Geology*, 31, 991-1005.
- Burg, J.B., 1999. Ductile structure and instabilities: their implications for Variscan tectonics in the Ardennes. *Tectonophysics* 309, 1-25.
- Burgers, J.M., 1938. On the motion of small particles of elongated form suspended in a viscous liquid. *Verth. K. Ned. Akad. Wet.* 16, 113-184.
- Butler, R.W.H., Casey, M., Lloyd, G.E., McDade, P., Shipton, Z. and Jones, R., 2002. Vertical stretching and crustal thickening at Nanga Parbat, Pakistan Himalaya: A model for distributed continental deformation during mountain building. *Tectonics* 21(4):1027-1043.
- Carreras, J., 1973. *Petrología y análisis estructural de las rocas metamórficas de la zona del Cabo de creus (prov. De Gerona)*. Tesis, Univ. Barcelona.
- Carreras, J., 1975. Las deformaciones tardi-hercínicas en el litoral septentrional de la península de Cap de Creus (prov. Gerona, España): la génesis de las bandas mioclínicas. *Acta geol. Hisp.*, 10, 109 -115.
- Carreras, J., 1979. Guide to the Cap the Creus mylonite zones. *Int. Conf. on Shear Zones in Rocks*, Barcelona. University of Barcelona.
- Carreras, J., 2001. Zooming on Northern Cap de Creus shear zones. *Journal of Structural Geology* 23, 1457-1487.

- Carreras, J. and Capellà, I., 1994. Tectonic levels in the Palaeozoic basement of the Pyrenees : a review and a new interpretation. *J. Struct. Geol.* 16, 1509-1524.
- Carreras, J. and Druguet, E., 1994. Structural zonation as a result of inhomogeneous non-coaxial deformation and its control on syntectonic intrusions: an example from the Cap de Creus area (eastern-Pyrenees). *J. Struct. Geol.* 16, 1525-1534.
- Carreras, J. and Losantos, M., 1982. Geological setting of the Roses granodiorite, (E.Pyrenees, Spain). *Acta geol. Hisp.* 17, 219-225.
- Carreras, J. and Ortuño, F., 1990. Fundamento geomérico y cinemático de la modelización teórica y experimental de deformaciones no-coaxiales. *Acta Geol. Hisp.*, 25,237- 259.
- Carreras, J. i Casas, J.M., 1987. On folding and shear zone development : a mesoscale structural study on the transition between two different tectonic styles. *Tectonophysics*, 135, 87-98.
- Carreras, J. ,Orta, J.M. i San Miguel, A., 1975. El área pegmatítica del litoral N de la península del Cabo de Creus y su contexto metamórfico y estructural. *Rev. Inst. Geo. Dip. Prov. Barcelona*, 30, 11-34.
- Carreras, J., Druguet, E., Griera, A., (in press). Shear zone-related folds. *Journal of Structural Geology*.
- Carreras, J., Druguet, E., Griera, A., Soldevila, J., 2004. Strain and deformation history in a syntectonic pluton. The case of the Roses granodiorite (Cap de Creus, Eastern Pyrenees) In: Alsop, G.I., Holdsworth, R.E. (eds). *Flow Processes in Faults and Shear Zones*. Geological Society, London, Special Publications, 307-319.
- Carter, N.I. and Tsen, M.C., 1987. Flow properties of continental lithosphere. *Tectonophysics*, 136, 117-163.
- Casey, M. and Huggenberger, P., 1985. Numerical modelling of finite amplitude similar folds developed under general deformation histories. *J. Struct. Geol.*, 7, 103-114.
- Ceriani, S., Mancktelow, N.S. and Pennacchioni, G., 2003. Analogue modelling of the influence of shape and particle/matrix interface lubrication on the rotational behaviour of rigid particles in simple shear. *J. Struct. Geol.*, 5, 2005-2021.
- Chapple, W.M., 1968. A mathematical theory of finite-amplitude rock-folding. *Geol.Soc.Am.Bull.*,79, 47-68
- Chapple, W. M., 1969. Fold shape and rheology: the folding of an isolated viscous-plastic layer. *Tectonophysics*, 7, 97-116.
- Charlez, P.A., 1991. *Rock Mechanics. Vol. 1 Theoretical Fundamentals*. Editorial Technip, 360.
- Cobbold, P.R., 1975. Fold propagation in single embedded layers. *Tectonophysics*, 27, 333-351.

- Cobbold, P.R., 1976. Mechanical effects of anisotropy during large finite deformations. *Bull. Soc. Géol. France*, 28, 1497-1510.
- Corbella, M. 1990. Estudi metal·logènic del camp pegmatític del Cap de Creus. Tesi Llicenc. Univ. Barcelona.
- Cosgrove, J.W., 1976. The formation of crenulation cleavage. *J.Geol.Soc. London*,132, 155-178.
- Cosgrove, J.W., 1980. The tectonics implications of some small-scale structures in the Mona complex of Hole Isle, North Wales. *J. Struct. Geol.*, 2, 383-396.
- Cox, R. G., 1970. The motion of long slender bodies in a viscous fluid. 1, General theory. *J. Fluid Mech.*, 44, 791-810.
- Cruikshank, K.M. and Johnson, A.M., 1993. High-amplitude folding of linear-viscous multilayers. *J. Struct. Geol.*, 15, 79-94.
- Cundall, P.A. and Board, M., 1988. A microcomputer program for modelling large-strain plasticity problem. In: *Numerical Methods in Geomechanics* (edited by Swoboda, C.). Proc. 6th Int. Conf. on numerical methods in geomechanics. Balkema, Rotterdam, 2101-2108.
- Currie, I. B., Patnode, H.W., and Trump. R. P., 1962. Development of folds in sedimentary strata. *Geol.Soc. Am. Bull.* 73. 655-674.
- Czeck, D. M. and Hudleston, P. J., 2003. Testing models for obliquely plunging lineations in transpression: a natural example and theoretical discussion. *J. Struct. Geol.*, 25, 959-982.
- Davy, P., Sornette, A. and Sornette, D., 1993. Experimental discovery of scaling laws relating fractal dimension and the length distribution exponent of faults systems. *Geophys. Res. Lett.*, 19, 361-363.
- De Paor, D.G., 1983. Orthographic analysis of orientation net. *J. Struct. Geol.*, 10, 323-333.
- De Paor, D.G., 1988. Strain determination from three known stretches – an exact solution. *J. Struct. Geol.* 10, 639-642.
- De Paor, D.G. and Simpson, C. 1993. *New directions in Structural Geology*. USGS Shorth Course Notes.
- Druguet, E. 1992. Petrologia del complex migmatític de l'àrea de la Punta de Furallons (Cap de Creus). Tesi Llicenc., Univ. Barcelona.
- Druguet, E. 1997. The structures of the NE Cap de Creus peninsula. Relationships with metamorphism and magmatism. Unpublished PhD. thesis, Univ. Autònoma de Barcelona.
- Druguet, E., 2001. Development of high thermal gradients by coeval transpression and magmatism during the Variscan orogeny: insights from the Cap de Creus (Eastern Pyrenees). *Tectonophysics*, 332, 275-293.
- Druguet, E., and Grier, A., 1998. Strain analysis using deformed quartz veins. *Geogaceta*, 24, 119-122.

- Druguet, E and Hutton, D.H.W., 1998. Syntectonic magmatism and migmatization in a high-strain zone: examples from the Hercynian rocks of the Cap de Creus (Eastern Pyrenees, Spain). *J. Struct. Geol.*, 20, 905-916.
- Druguet, E., Griera, Carreras, J., 2002. Complex pattern of superposed folding in quartzite beds due to progressive non-coaxial deformation. In: Three-dimensional flow, fabric development and strain in deformed rocks and the significance for mountain building processes: new approaches, Penrose Conference, Geological Society of America, Abstract volume, p.37-38
- Druguet, E., Passchier, C.W., Carreras, J., Victor, P., and den Brok, S., 1997. Analysis of a complex high-strain zone at Cap de Creus, Spain. *Tectonophysics* 280, 31-45.
- Einstein, A., 1906. Zur Theorie der Brownschen Bewegung. *Annalen der Physik.*, 19, 180.
- Einstein, A. 1956. Investigations on the Theory of the Brownian Movement (editat per Furth, R.) Dover, New York.
- Elliot, D., 1972. Deformation paths in structural geology. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 83, 2621-2638.
- Eshelby, J.D. 1959. The elastic field outside an ellipsoidal inclusion. *Proceedings of the Royal Society of London Series A- Mathematical and Physical Sciences*, 252(1271), 561-569.
- Exner, U., Mancktelow, N.S., Grasemann, B., 2004. Progressive development of "s"-type flanking folds in simple shear. *Journal of Structural Geology*, 26, 2191-2201.
- Fletcher, R.C., 1974. Wavelength selection in the folding of a single layer with power-law rheology. *Am. J. Sci.* 274, 1029-1043.
- Fletcher, R.C., 1977. Folding of a single viscous layer: exact infinitesimal-amplitude solution. *Tectonophysics*, 39, 593-606.
- Fletcher, R.C., 1982. Coupling of diffusional mass transport and deformation in tight rock. *Tectonophysics*, 83, 275-291.
- Fletcher, R.C., 1991. Three-dimensional folding of an embedded viscous layer in pure shear, *J. Struct. Geol.*, 13, 87-96.
- Fletcher, R.C., 1995. Three-dimensional folding and necking of a power-law layer: are folds cylindrical, and if so, do we understand why?. *Tectonophysics*, 247, 65-83.
- Fletcher, R.C. and Sherwin, J., 1978. Arc lengths of single layer folds: a discussion of the comparison between theory and observation. *American Journal of Science*, 278, 1085-1098.
- Flinn, D. 1979. The deformation matrix and the deformation ellipsoid. *J. of Structural Geology*, 1, 299-307.
- Fossen, H. and Tikoff, B., 1993. The deformation matrix for simultaneous simple shearing, pure shearing and volume change, and its application to transpression-transension tectonics. *J. Struct. Geol.*, 15, 413-422.

- Freeman, B., 1985. The motion of rigid ellipsoidal particles in slow flows. *Tectonophysics*, 113, 163-183.
- Gay, N.G., 1968. Pure Shear and simple shear deformation of inhomogeneous viscous fluids. 1, Theory. *Tectonophysics*, 5, 211-234.
- Gerbault M., Davey F. and Henrys S., 2002. Three dimensional lateral crustal thickening in Continental Oblique Collision: an example from the Southern Alps of New Zealand, *Geoph. J. Int.*, 150-3, 770-779.
- Gerya, T. V. and Yuen, D. A., 2003. Characteristics-based marker-in-cell method with conservative finite-differences schemes for modeling geological flows with strongly variable transport properties. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 140, 295–320.
- Ghosh, S.K., 1966. Experimental tests of buckling folds in relation to strain ellipsoid in simple shear deformations. *Tectonophysics*, 3, 169-185.
- Ghosh, S.K., 1970. A theoretical study of intersecting fold patterns. *Tectonophysics*. 9, 559-569.
- Ghosh, S.K. and Ramberg, H., 1976. Reorientation of inclusions by combination of pure and simple shear. *Tectonophysics*, 34, 1- 70.
- Ghosh, S.K and Sengupta, S., 1973. Compression and simple shear of test models with rigid and deformable inclusions. *Tectonophysics*, 17, 133-175.
- Goldstein, H., 1980. *Classical Mechanics*. Addison-Wesley, London.
- Goodwin, L. and Tykoff, B., 2002. Competency contrast, kinematics, and the development of foliations and lineations in the crust. *J. Struct. Geol.*, 24, 1065-1085.
- Goscombe, B.D., and Passchier, C.W., 2003. Asymmetric boudins as shear sense indicators- an assessment from field data. *J. Struct. Geol.*, 25, 575-589.
- Goscombe, B.D., Passchier, C.W. and Hand, M., 2004. Boudinage classification: end-member boudin types and modified boudin structures. 26, 739-763.
- Grasseman, B. and Stüwe, K., 2001. The development of flanking folds during simple shear and their use as kinematic indicators. *J. Struct. Geol.*, 23, 715-724.
- Grasemann, B., Stüwe, K. & Vannay, J.-C. 2003. Sense and non-sense of shear in flanking structures. *Journal of Structural Geology*, 25, 19-34.
- Gray, N.H. and Busa, M.D., 1994. The three-dimensional geometry of simulated porphyroblast inclusion trails: inert-marker, viscous-flow models. *J. Metamorphic Geol.*, 12, 575-587.
- Griera, A., 1999. Significat geomètric i cinemàtic dels rods de quars asimètrics: anàlisi de camp, experimental i numèric. Treball de Recerca de 3er cicle (unpublished). Universitat Autònoma de Barcelona.
- Griera, A., 2000. Estudio experimental sobre la influencia de la geometría inicial y la formación de sistemas con orientaciones preferentes. *Geotemas* 1(1), 61-66.

- Griera, A., 2004. Modelización numérica del plegamiento de capas oblicuas a la dirección de extensión. *Geotemas* 6(3), 61-64.
- Griera, A., Hudleston, P.J., Carreras J. and Druguet, E., 2002. Development of folds with axes parallel to the finite extension axis: from field analysis to 3D numerical and experimental modelling. In: *Three-dimensional flow, fabric development and strain in deformed rocks and the significance for mountain building processes: new approaches*, Penrose Conference, Geological Society of America, Abstract volume, p. 36-37
- Grujic, D., 1993. The influence of initial fold geometry on Type1 and Type2 interference patterns: an experimental approach. *J. Struct. Geol.*, 15, 293-307.
- Grujic, D. and Mancktelow, N.S., 1995. Folds with axes parallel to the extension direction: an experimental study. *J. Struct. Geol.*, 17, 279-291.
- Hanmer, S., 1984. The potential use of planar and elliptical structures as indicators of strain regime and kinematics of tectonic flow. *Geol. Surv. Cand. Pap.*, 84, 133-142.
- Hanmer, S., 1986. Asymmetrical pull-aparts and foliation fish as kinematic indicators. *J. Struct. Geol.*, 8, 111-122.
- Hanmer S. and Passchier, C.W. 1991. Shear sense indicators: a review. *Geol.Surv.Can.Pap.*, 90-17, 1-72.
- Harris, L.B., 2002. Folding in high-grade rocks due to back-rotation between shear zones. *J. Struct. Geol.*, 25, 223-240.
- Hobbs, B.E. 1972. Deformation of non-newtonian materials in simple shear. In: *Flow and Fracture of Rocks* (edited by Herad, H.C., Borg, I.Y., Carter, N.L. and Raleigh, B.C.). *Am. Geophys. Un. Geophys. Monogr.*, 16, 243-258.
- Hobbs, B.E., Means, W.D. and Williams, P.F., 1976. *An outline of Structural Geology*. John Wiley and Sons.
- Hobbs, B.E. Mühlhas, H.B. Ord, A. Zhang, Y. And Moresi, L., 2000. Fold Geometry and Constitutive Behaviour. In: *Stress, Strain and Structure, A volume in honour of W D Means*. (edited by M.W. Jessell and J.L.Urai). Volume 2, *Journal of the Virtual Explorer*.
- Hudleston, P.J. 1986. Extracting information from folds in rocks. *J. Geol. Education*. 34, 237-245.
- Hudleston, P.J., 1989. The association of folds and veins in shear zones. *Journal of Structural Geology* 11, 949-957.
- Hudleston, P.J. and Holst, T.B., 1984. Strain analysis and fold shape in a limestone layer and implications for layer rheology. *Tectonophysics*, 106, 321-347.
- Hudleston, P.J. and Lan, L., 1993. Information from fold shapes. *J. Struct. Geol.*, 15, 253-264.
- Hudleston, P.J. and Lan, L. 1994. Rheological controls on the shapes of single-layer folds. *J. Struct. Geol.* 16, 1007-1021.

- Hudleston, P.J. and Lan, L., 1995. Strain distribution in single-layer buckle folds in non-linear materials. *Tectonophysics*, 17, 727-738.
- Hudleston, P.J., Treagus, S.H. and Labao, L., 1996. Flexural flow folding: Does it occur in nature?. *Geology*, 24-3, 203-206.
- Hutton, D.H.W., 1982. A tectonic model for the emplacement of the main Donegal granite, NW Ireland. *J.Geol.Soc.London* 139, 615-631.
- Ildfonse, B., Launeau, P., Fernandez, A. and Bouchez, J.L., 1992a. Effect of mechanical interactions on development of shape preferred orientations: a two-dimensional experimental approach. *J. Struct. Geol.*, 12, 73-83.
- Ildfonse, B., Sokoutis, D. and Mancktelow, N.S., 1992b. Mechanical interactions between rigid particles in a deforming ductile matrix. Analogue experiments in simple shear flow. *J. Struct. Geol.*, 14, 1253-1266.
- Ildfonse, B. and Mancktelow, N.S., 1993. Deformation around rigid particles. the influence of slip at the particle / matrix interface. *Tectonophysics*, 221, 345-359.
- Ishii, K. 1992. Partitioning of non-coaxiality in deforming rock masses. *Tectonophysics*, 210, 33-43.
- Itasca Consulting Group, Inc., 1998. *FLAC2D: Fast Lagrangian Analysis of Continua, User Manual, Version 3.40*. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis.
- James, A.I. and Watkinson, A.J., 1994. Initiation of folding and boudinage in wrench shear and transpression. *J. Struct. Geol.*, 16, 883-893.
- Jeffrey, G. 1922. The motion of ellipsoidal particles immersed in a viscous fluid. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 102, 161-179
- Jeng, F.S., Lin, M.L., Lai, Y.C. and Teng, M.H., 2002. Influence of strain rate on buckle folding of an elasto-viscous single layer. *J. Struct. Geol.*, 24, 501-516.
- Jezek, J., Saic, S., Segeth, K., Schulmann, K., 1999. Three-dimensional hydrodynamical modeling of viscous flow around a rotating ellipsoidal inclusion. *Computers and Geosciences* 25, 547-558.
- Jiang, D., 1994a. Vorticity determination, distribution, partitioning and the heterogeneity and non-steadiness of natural deformations. *J. Struct. Geol.*, 16, 121-130.
- Jiang, D., 1994b. Flow variation in layered rocks subjected to bulk flow of various kinematic vorticities: theory and geological implications. *J. Struct. Geol.*, 16, 1159-1172.
- Jiang, D., 1999. Vorticity decomposition and its application to sectional flow characterization. *Tectonophysics*, 301, 243-259.
- Jiang, D., 2001. Reading history of folding from porphyroblasts. *J. Struct. Geol.*, 23, 1327-1335.

- Jiang, D. and White, J.C. 1995. Kinematics of flow and interpretation of geological structures, with a particular reference to shear zones. *J. Struct. Geol.*, 17, 1249-1265.
- Jiang, D. and Williams, P.F. 1998 High-strain zones: a unified model. *J. Struct. Geol.*, 20, 1105-1120.
- Johnson A.M., and Page, B.M., 1976. A theory of concentric, kink, and sinusoidal folding and of monoclinic flexuring of compressible. Elastic multilayers. *Art VII, development of folds within Huasna syncline, San Luis Obispo Country, California. Tectonophysics*, 33, 97-143.
- Johnson, A.M., 1977. *Styles of folding*. Elsevier, New York. 406pp.
- Johnson, A.M. and Fletcher, R.C. 1994. *Folding of Viscous Layers*. Columbia University Press, New York. 461pp.
- Jones, R.R. and Holdsworth, R.E., 1998. Oblique simple shear in transpression zones. In: edited by Holdsworth, R.E., Strachan, R.E. and Dewey, J.F., (1998). *Continental transpressional and transtensional tectonics*. Geological Society, London, Special Publications, 135, 35-40.
- Karato, S.I. and Wu, P., 1993. Rheology of the upper mantle: A synthesis, *Science*, 260, 771-778.
- Kenis, I., Urai, J.L., Van Der Zee, W. and Sintubin, M., 2004. Mullions in the High-Ardenne Slate Belt (Belgium): numerical model and parameter sensitivity analysis. *Journal of Structural Geology*, 26, 1677-1692.
- Kirby, S.H. and Kronenberg, A.K. 1983. Rheology of the lithosphere. *Reviews in Geophysics*, 21, 1458-1487.
- Koenemann 2002. Unorthodox Thoughts. *Zeitschrift für Naturforschung, series A*, 56, 794-808.
- Kohonen, T., 1995. *Self-Organizing Maps*. Series in Information Sciences, Vol. 30, Springer, Heidelberg, Second edition 1997.
- Kaus, B. and Podladchikov, Y. 2001. Forward and Reverse Modeling of the three-dimensional viscous Rayleigh-Taylor Instability. *Geophysical Research Letters*, 28, 11095-098.
- Kraus, J. and Williams, P.F., 2001. A new spin on “non-rotating” porphyroblasts: implications of cleavage refraction and reference frames. *J. Struct. Geol.*, 23, 963-971.
- Lacassin, R. and Mattauer, M., 1985. Kilometre-scale sheath fold at Mattmark and implications for transport direction in the Alps. *Nature*, 315, 739-742.
- Lamb, H., 1932. *Hydrodynamics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Lamb, H., 1945. *Hydrodynamics*. Dover Publications, New York, 738pp.
- Lan, L. and Hudleston, P.J., 1991. Finite element models of buckle folds in non-linear materials. *Tectonophysics* 199, 1-12.

- Lan, L. and Hudleston, P.J., 1995. The effects of rheology on the strain distribution in single layer buckle folds. *J. Struct. Geol.* 17, 727-738.
- Lan, L. and Hudleston, P.J., 1996. Rock rheology and sharpness of folds in single layers. *J. Struct. Geol.* 18, 925-931.
- Lin, S. and Jiang, D., 2001. Using along-strike variation in strain and kinematics to define the movement direction of curved transpressional shear zones: an example from northwestern Superior Province, Manitoba. *Geology*, 29, 767-770.
- Lin, S., Jiang, D., Williams, P.F., 1998. Transpression (or transtension) zones of triclinic symmetry: natural example and theoretical modeling. In: Holdsworth, R.E., Strachan, R.A., Dewey, J.F. (Eds.), *Continental Transpressional and Transtensional Tectonics*. Geological Society of London, Special Publications 135, pp. 41–57.
- Lister, G. S. and Williams, P. F. 1983., The partitioning of deformation in flowing rock masses. *Tectonophysics* , 92, 1-33.
- Malvern, L. E., 1969. *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Mancktelow, N.S., 1988. An automated machine for pure shear deformation of analogue materials in plane strain. *J. Struct. Geol.*, 10, 101-108.
- Mancktelow, N.S., 1994. On volume change and mass transport during the development of crenulation cleavage. *J. Struct. Geol.*, 16, 1217-1231.
- Mancktelow, N.S., 1999. Finite-element modelling of single-layer folding in elasto-viscous materials: the effect of initial perturbation geometry. *J. Struct. Geol.*, 21, 161-177.
- Mancktelow, N.S. and Abbassi, M., 1992. Single layer buckle folding in non-linear materials- II. Comparison between theory and experiment. *J. Struct. Geol.*, 14, 105-120.
- Mancktelow, N.S., Arbaret, L. and Pennacchioni, G., 2002. Experimental observations on the effect of interface slip on rotation and stabilisation of rigid particles in simple shear and a comparison with natural mylonites. *J. Struct. Geol.*, 24, 567-585.
- Mandal, N., Samanta, S.K., Chakraborty, C., 2001. Numerical modeling of heterogeneous flow fields around rigid objects with special reference to particle paths, strain shadows and foliation drag. *Tectonophysics* 330, 177-194.
- Manz, R. and Wickham, J., 1978. Experimental analysis of folding in simple shear. *Tectonophysics*, 44, 79-90.
- March, A., 1932. Matematische theorie der regelung nach der korngestalt bei affiner deformation. *Z. Kristallogr.*, 81, 285-298.
- Marques, F.O. and Coelho, S., 2001. Rotation of rigid elliptical cylinders in viscous simple shear flow: analogue experiments. *J. Struct. Geol.*, 23, 609-617.
- Mase, G.E. 1970. *Continuum Mechanics*. Mc Graw-Hill, New York.

- Masuda, T and Ando, S., 1988. Viscous flow around a rigid spherical body: a hydrodynamic approach. *Tectonophysics*, 148, 337-346.
- Masuda, T., Michibayashi, K., Ohata, H., 1995. Shape preferred orientation of a rigid particles in a viscous matrix: re-evaluation to determine kinematic parameters of ductile deformations. *J. Struct. Geol.*, 17, 115-129.
- Masuda, T. and Mizuno, N., 1995. Deflection of pure viscous flow around a rigid spherical body. *J. Struct. Geol.*, 17, 1615-1620.
- Masuda, T and Mizuno, N., 1996a. Deflection of non-Newtonian simple shear flow around a rigid cylindrical body by the Finite Element Method. *J. Struct. Geol.*, 18, 1089-1100.
- Masuda, T and Mizuno, N., 1996b. Computer modelling of mantled porphyroclasts in Newtonian and non-Newtonian simple shear viscous flows. *J. Struct. Geol.*, 18, 1487-1491.
- McKenzie, D., 1979. Finite deformation during fluid flow. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 58, 689 - 715.
- Mc Kenzie, D. and Jackson, J., 1983. The relationship between strain rates, crustal thickening paleomagnetism, finite strain and fault movements within a deforming zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 65, 182-202.
- Means, W.D., 1976. Stress and strain, basic concepts of continuum mechanics for geologists. Springer-Verlag, New-York.
- Means, W.D., 1982. An unfamiliar Mohr circle construction for finite strain. *Tectonophysics*, 89, T1-T6.
- Means, W.D., 1983. Application of the Mohr-circle construction to problems of inhomogenous deformations *Jour. Struct. Geology*, 5, 279-286.
- Means, W.D., 1994. Rotational quantities in homogeneous flow. *Jour. Struct. Geology*, 16, 437-445.
- Means, W.D., Hobbs, B.E., Lister, G.S. and Williams, P.F., 1980. Vorticity and non-coaxiality in progressive deformations. *J. Struct. Geol.*, 2, 371-378.
- Montesi, L. G. J., and M. T. Zuber, 2000. A unified description of localization for application to large-scale tectonics, *J. Geophys. Res.*, 107, 10.1029/2001JB000465
- Mühlhaus, H.B., Bobbs, B.E. and Ord, A., 1994. The role of axial constraints on the evolution of folds in single layers. In: *Cimpyter methods in Geomechanics* (edited by Siriwardane, H.J. and Zaman, M.M.). Balkema, Rotterdam, 223-231.
- Mühlhaus, H.B., Sakaguchi, H. and Hobbs, B.E., 1998. Evolution of three-dimensional folds for a non-newtonian plate in a viscous medium. *Proc. R. Soc. London, series A.* 454, 3121-3143.
- Mura, T., 2000. Some new problems in micromechanics. *Materials Science and Engineering, series A- Structural materials properties, microstructure and processing.* 285(1-2), 224-228.
- Nadai, A. 1963. *Theory of flow and fracture of solids.* McGraw Hill. New York.

- Navidad, M. i Carreras, J. 1992. El magmatismo prehercínico del noreste de la Península Ibérica. En J.G.S.J i R.I.Gutierrez Marco (Eds.), Paleozoico Inferior de Ibero América (pp. 615- 630). Univ. Extremadura.
- Neurath, C. and Smith, R.B., 1982. The effect of material properties on growth rates of folding and boudinage: experiments with wax models. *J. Struct. Geol.*, 4, 215-229.
- Odling, N., 1987. The determination of “buckling rotation” and its application to theoretical and experimental models of buckle folds. *J. Struct. Geol.*, 9, 1021-1028.
- Odonne, F., 1994. Kinematic behaviour of an interface and competence contrast: analogue models with different degrees of bonding between deformable inclusions and their matrix. *J. Struct. Geol.*, 16, 997-1006.
- Oliver, X. and Agelet, C., 2003. *Mecànica de medis continus per a enginyers*. Edicions UPC.Barcelona.
- Oreskes, N. 1999. *The Rejection of Continental Drift Theory and Method in American Earth Science*. 432pp.
- Ottino, J.M., 1989. *The kinematics of mixing: stretching, chaos, and transport*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Passchier, C. W., 1986. Flow in natural shear zones – the consequences of spinning flow regimes. *Earth Planet.Sci.Lett.* 77, 70-80.
- Passchier,C.W., 1987. Stable positions of rigid objects in non-coaxial flow- a study in vorticity analysis. *J. Struct. Geol.*, 9, 679-690.
- Passchier, C.W., 1988. The use of Mohr circles to describe non-coaxial progressive deformation. *Tectonophysics*. 149, 323-338.
- Passchier, C.W. 1990. Reconstruction of deformation and flow parameters from deformed vein sets. *Tectonophysics*, 180, 185-199.
- Passchier, C.W. 1991. The classification of dilatant flow types. *J. Struct. Geol.*, 13, 101-104.
- Passchier, C.W . 1997. The fabric attractor. *J. Struct. Geol.*, 19, 113-127.
- Passchier, C.W . 2001. Flanking structures. *J. Struct. Geol.*, 23, 951-962.
- Passchier, C.W., Druguet, E., 2002. Numerical modelling of asymmetric boudinage. *Journal of Structural Geology* 24, 1789–1804.
- Passchier, C.W. and Simpson, C., 1986. Porphyroclast systems as kinematic indicators. *J. Struct. Geol.*, 8, 831-843.
- Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J. 1996. *Microtectonics*. Springer-Verlag, Heidelberg, 325p.
- Passchier, C.W. and Urai, J.L., 1988. Vorticity and strain analysis using Mohr diagrams. *J. Struct. Geol.*, 10, 755-763.
- Passchier, C.W., Myers, J.S., Kröner, A., 1990. *Field Geology of High-Grade Gneiss Terrains*. Springer-Verlag, Berlin, 150pp.

- Passchier, C.W., Trouw, R.A.J., Zwart, H.J. and Vissers, R.L.M., 1992. Porphyroblast rotation: eppur si muove? *Journal of Metamorphic Geology*. 10, 283-294.
- Penge, J., 1976. Experimental deformation of pinch-and-swell structures. Unpublished M-Sc. Thesis, Imperial College, University of London.
- Pérez-Estaún, A. 1974. On the formation of Asymmetric folds. Unpublished M-Sc. Thesis, Imperial College, University of London.
- Pfaff, V.J. and Johnson, A.M., 1989. Opposite senses of fold asymmetry. *Engineering Geology*. 27, 3-38.
- Pfiffner, O.A. and Ramsay, J. G., 1982. Constraints on geological strain rates: arguments from finite strain states naturally deformed rocks. *J. Geophys. Res.* 87, 311-321.
- Poliakov, A.N.B. and Herrmann, H.J., 1994, Self-organized criticality of plastic shear bands in rocks, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2143-2146.
- Poliakov, A., Cundall, P. Pdladehikov, Y. And Laykhovsky, V., 1993. An explicit inertial method for the simulation of visco-elastic flow: an evaluation of elastic effects on diapiric flow in two –and three- layers models. In: *flow and Creep in the Solar System: observations, modelling and Theory*, (edited by S.K. Runcorn, D.B.S.A.). Proceeding on NATO Advanced Study Institute, 175-195.
- Price, N.J. and Cosgrove, J.W., 1990. *Analysis of Geological Structures*. Cambridge University Press, Cambridge, 502pp.
- Price, N.J., 1967. The initiation and development of asymmetric buckle folds in nonmetamorphosed sediments. *Tectonophysics*, 4, 173-201.
- Ramberg, H., 1952. *The Origin of Metamorphic and Metasomatic Rocks*. University of Chicago Press, Chicago.
- Ramberg, H., 1959. Evolution of ptygmatics folding. *Norsk Geologisk Tidsskrift*. 39, 99-152.
- Ramberg, H., 1960. Relationships between length of arc and thickness of ptygmatically folded veins, *Am. J. Sci.* 258, 1595-1620.
- Ramberg, H., 1962. Contact strain and folding instability of a multilayered body under compression. *Geologische Rundschau*, 51, 405-439.
- Ramberg, H., 1963. Fluid dynamics of viscous folding. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 47, 484-515.
- Ramberg, H., 1975. Particle pats, displacement and progressive strain applicable to rocks. *Tectonophysics*, 28, 1-38.
- Ramsay, J. G., 1967. *Folding and Fracturing of Rocks*. Mc Graw-Hill, New York, 568 p.
- Ramsay, J.G. and Graham, R.H., 1970. Strain variation in shear belts. *Canad. J. Earth. Scien.*, 7, 786-813.
- Ramsay, J.G. and Hubber, M.I., 1983. *The techniques of modern structural geology*, 1. Strain analysis. Academic Press, London, 307 p.

- Ramsay, J.G. and Hubber, M.I., 1987. The techniques of modern structural geology. volume 2: Folds and fractures. Academic Press. London.
- Ramsay, J.G. and Lisle, R.J., 2000. The Techniques of Modern Structural Geology. Volume III. Applications of Continuum Mechanics in Structural Geology, Academic Press, London.
- Ranalli, G. 1987 . Rheology of the Earth. Allen and Unwin. Boston.
- Reiner, M. 1964., The Deborah Numbers. Physics Today 17(1), 62.
- Ridley, J., 1986. Parallel stretching lineations and fold axes oblique to a shear displacement direction- a model and observations. J. Struct. Geol., 8, 647-653.
- Robin, P.Y.F. and Cruden, A.R. 1994. Strain and vorticity patterns in ideally ductile transpression zones. J. Struct. Geol., 16, 447-466.
- Rossetti, F., Ranalli, G., Faccenna, C., 1999. Rheological properties of paraffin as an analog material for viscous crustal deformation. J. Struct. Geol., 21, 413-417.
- Sander, B., 1948. Einführung in die Gefügekunde der Geologischen Körper, Vol. 1. Springer-Verlag, Vienna.
- Sanderson, D.J. and Marchini, W.R.D. 1984. Transpression. J. Struct. Geol., 6, 449-458.
- Schmalholz, S.M. 2000. Finite Amplitude Folding of Viscoelastic Rocks: Importance of Elasticity for Slow Tectonic Motions. Unpublished Ph.D. thesis, ETH Zürich.
- Schmalholz, S.M. and Podladchikov, Y.Y. 1999. Buckling versus folding: importance of Viscoelasticity. Geo. Res. Lett. 26(17), 2641-2644.
- Schmalholz, S.M. and Podladchikov, Y.Y. 2000. Finite Amplitude Folding: Transition from Exponential to Layer Length Controlled Growth. Earth and Planetary Science Letters 181, 619-633.
- Schmalholz, S.M. and Podladchikov, Y.Y. 2002. Strain and Competence Contrast Estimation from Fold Shape. Tectonophysics, 340 (3-4), 195-213.
- Schmid, D., 2002. Finite and infinite heterogeneities under pure and simple shear. Unpublished Ph.D. thesis, ETH Zürich.
- Sengupta, S., 1983. Folding of boudinaged layers. J. Struct. Geol., 5, 197-210.
- Sherwin, J. and Chapple, W. M., 1968. Wavelengths of single-layer folds: a comparison between theory and observation. American Journal of Science., 266, 167-179.
- Simpson, C and De Paor, D.G. 1993. Strain and kinematic analysis in general shear Zones. J. Struct. Geol., 15, 1-20.
- Simpson, C. 1992. Kinematic analysis in general shear mylonite zones. III congreso Geológico de España y VIII congreso Latinoamericano de Geología. Tomo w, 431- 438.
- Smith, R.B., 1975. Unified theory of the onset of folding, boudinage and mullion structure. Bull. Geol. Soc. Am., 86, 1601-1609.
- Smith, R.B. 1977. Formation of folds, boudinage and mullions in non-Newtonian materials.

- Bull. Geol. Soc. Am. 88, 312-320.
- Smith, R.B. 1979. The folding of a strongly non-Newtonian layer. *Am. J. Sci.*, 279, 272-287.
- Smoluchowski, M. 1909. Über ein gewisses-Stabilitätsproblem der Elastizitätslehre. *Akad.Wiss.Krahau.Math. Kl.*, 3-20.
- Sorby 1879.
- Sorby, H. C., 1853. On the Origin of Slaty Cleavage, *Edinburgh New Philos. Jour.*, 55, 137-148.
- Sokoutis, D., 1987. Finite strain effects in experimental mullions. *J. Struct. Geol.*, 9, 233-242.
- Sokoutis, D., 1990. Exeperimental mullions at single and double interfaces. *J. Struct. Geol.*, 12, 365-373.
- Spurk, J., 1997. *Fluid Mechanics Springer.Heidelberg*, 659p.
- Srivastava, D.P and Lisle, R.J., 2004. Rapid analysis of fold shape using Bézier curves. *J. Struct. Geol.*, 26, 1553-1559.
- Stallard, A. and Hickey, K., 2001. Fold mechanisms in the Canton Schist: constraints on the contribution of flexural flow. *J. Struct. Geol.*, 23, 1865-1881.
- Swanson, M.T., 1992. Late Acadian-Alleghenian transpressional deformation: evidence from asymmetric boudinage in the Casco Bay area, coastal Maine. *J. Struct. Geol.*, 14, 323-341.
- Talbot, C.J. 1970. The minium strain ellipsoid using deformed quartz veins. *Tectonophysics*, 9, 47-76.
- Talbot, C.J., 1999. Ductile shear zones as counterflow boundaries in pseudoplastic fluids. *J. Struct. Geol.*, 21, 1535-1551.
- Talbot, C.J. and Sokoutis, D., 1995. Strain ellipsoids from incompetent dykes: application o volume loss during mylonitization in the Singö gneiss zone, central Sweden. *J. Struct. Geol.*, 17, 927-948.
- ten Brik, C.E. and Passchier, C.W., 1995. Modelling of mantled porphyroclasts using non-Newtonian rock analogue materials. *J. Struct. Geol.*, 17, 131-146
- ten Grotenhuis, S. M., Passchier, C.W. and Bons, P.D., 2002. The influence of strain localisation on the rotation behaviour of rigid objects in experimental shear zones. *J. Struct. Geol.*, 485-499.
- Tenczer, V., Stüwe, K. and Barr, T.D., 2001. Pressure anomalies around cylindrical objects in simple shear. *J. Struct. Geol.*, 777-788.
- Tikoff, B. and Fossen, H. 1993., Simultaneous pure and simple shear : the unified deformation matrix. *Tectonophysics*, 217, 267-283.
- Tikoff, B. and Fossen, H. 1995. Limitations of three-dimensional kinematic vorticity analyses. *J. Struct., Geol.*, 17, 1771-1784.

- Toimil, N.C., 2005. Geometría y patrones de deformación de pliegues simétricos desarrollados en capas competentes. Unpublished Ph.D. Thesis, University of Oviedo.
- Treagus, S. H. 1973. Buckling stability of a viscous single-layer system oblique to the principal compression. *Tectonophysics* 19, 271-289.
- Treagus, S.H., 1983. A theory of finite strain variation through contrasting layers, and its bearing on cleavage refraction. *J. Struct. Geol.*, 5, 351-368.
- Treagus, S.H., 1997. Modelling deformation partitioning in folds. In: Sengupta, S. (Ed.). *Evolution of Geological Structures on Micro- to Macro-scales*. Chapman and Hall, London.
- Treagus, S.H., Lan, L., 2000. Pure shear deformation of square objects, and applications to geological strain analysis. *Journal of Structural Geology*, 22, 105–122.
- Treagus, S.H., Lan, L., 2003. Simple shear of deformable square objects. *J. Struct. Geol.*, 25, 1993-2003.
- Treagus, S.H. and Sokoutis, D., 1992. Laboratory modelling of strain variation across rheological boundaries. *J. Struct. Geol.*, 14, 405-424.
- Truesdell, C., 1953. Two measures of vorticity. *Archiv. Rational Mech. Anal.*, 2, 173-217.
- Truesdell, C., 1954. *The Kinematics of Vorticity*. Indiana University Press, Bloomington.
- Turcotte, D.L. and Schubert, G., 1982. *Geodynamics. Applications of continuum physics to geological problems*. John Wiley and Sons, New York.
- Twiss, R.J. and Moores, E.M., 1992. *Structural Geology*. Freeman and Co., New York, 530pp.
- Van der Driessche, J. and Brun, J.P., 1987. Rolling structures at large shear strain. *J. Struct. Geol.*, 9, 691-704.
- Vermilye, J.M. and Scholz, C.H., 1995. Relation between vein length and aperture. *J. Struct. Geol.*, 17, 423-434.
- Vissers, R.L.M., 1989. Asymmetric quartz c-axis fabrics and flow vorticity: a study using rotated garnets. *J. Struct. Geol.*, 11, 231-244.
- Wallis, S.R., 1992. Vorticity analysis in a metachert from the Sanbagawa Belt, SW Japan. *J. Struct. Geol.*, 14, 271-280.
- Watkinson, A.J. and Cobbold, P.R., 1981. Axial directions of folds in rocks with linear/planar directions. *J. Struct. Geol.*, 3, 211-217.
- Weertman, J., 1968. Dislocation climb theory of steady-state creep. *Transactions of the American Society for Metals*, 61, 681-694.
- Weijermars, R., 1991. The role of stress in ductile deformation. *J. Struct. Geol.*, 13, 1061-1078.
- Weijermars, R., 1998. Taylor-mill analogues for patterns of flow and deformation in rocks. *J. Struct. Geol.*, 20, 77-92.

- Weiss, L.E., 1972. The minor structures of deformed rocks. Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg-New York.
- Whiting, A.I.M., and Hunt, G.W., 1997. Evolution of nonperiodic forms in geological folds. *Mathematical Geology*, 29, 705-723.
- Williams, P.F. and Jiang, D., 1999. Rotating garnets. *J. Metamorphic Geol.*, 17, 367-378.
- Williams, P.F. and Jiang, D., 2001. The role of initial perturbations in the development of folds in a rock-analogue. *Jour. Struct. Geol.*, 23, 845-856.
- Williams, J.R., Lewis, R.W. and Zienkiewicz, O.C., 1978. A finite-element analysis of the role of initial perturbation in the folding of a single viscous layer. *Tectonophysics*, 45, 187-200.
- Wilson, G., 1960. The tectonic significance of small scale structures, and their importance to the geologist in the field. *Ann. Soc. Geol. Belg.*, LXXXIV, 424-548.
- Zhang, Y. Hobbs, B.E. Ord, A. and Mühlhaus, H.-B., 1996. Computer simulation of single layer buckling. *J. Struct. Geol.* 18, 643-655.
- Zhang, Y., Mancktelow, N.S., Hobbs, B.E., Ord, A., Mühlhaus, H.B. 2000. Numerical modelling of single-layer folding: clarification of an issue regarding the possible effect of computer codes and the influence of initial irregularities. *J. Struct. Geol.* 22, 1511-1522.
- Zulauf, J. and Zulauf, G., 2004. Rheology of plasticine used as rock analogue: the impact of temperature, composition and strain. *J. Struct. Geol.*, 26, 725-737.

Annexes



A.1.1 Descripció de l'aparell experimental

Tots els experiments han estat realitzats al laboratori de deformació experimental de la UAB a partir del prototipus de cel·la de deformació experimental amb materials analògics (Fig. 1) descrita en detall en (Carreras et al., 2000). El fonament geomètric i cinemàtic fou analitzat per Carreras and Ortuño (1990).

La màquina consisteix en un cel·la disposada en forma de paral·lelogram i amb els costats paral·lels a uns eixos de referència cartesiana X i Y (en la configuració inicial). Aquests costats sempre resten equidistants amb independència de la deformació aplicada.

Les parets de la cel·la no són contínues sinó fetes a partir de la disposició de fines làmines d'acer interdigitades, un costat amb l'altre (en secció, cada costat és com una pinta). Aquesta disposició origina que durant un experiment no existeixi com a un punt material les cantonades de la cel·la.

Per mantenir les condicions de confinament, una sèrie de tires de paper són disposades al voltant del model i per evitar problemes de lliscament en els cantons de la cel·la, quatre cantonades de plàstic de 2mm de gruix són disposades i unides mitjançant un cable d'acer, que passa per l'espai deixat entre les làmines de les parets, a un pes que permet que sempre estigui la cantonada fixada a les pintes de la cel·la.

Els canvis de configuració de la cel·la s'aconsegueixen a partir de tres moviments bàsics, cadascun controlat per un motor elèctric independent: desplaçaments longitudinals al llarg d'un doble pistó (un per eix), i rotacions dextres a partir d'un cargol vis sense fi que fa girar el pistó paral·lel a l'eix Y.

Això permet dues configuracions bàsiques d'experiments (Fig. 2):

- **Tipus 1:** tan sols es produeixen desplaçaments longitudinals. En tot moment, els costats de la cel·la són paral·lels a les línies de no rotació, sense que es produeixi cap modificació dels angles. En aquesta configuració, encara que origina una deformació no coaxial, les condicions de contorn responen a una deformació coaxial no ortogonal (convergència obliqua).
- **Tipus 2:** es produeix la rotació del pistó paral·lel a l'eix Y, i la modificació de les longituds dels quatre costats i dels angles. Representa en sentit estricte una deformació general no coaxial.

La cel·la reposa sobre una placa de coure i és confinada per sobre mitjançant un vidre bilaminat removable, que permet una observació contínua de la part superior del model

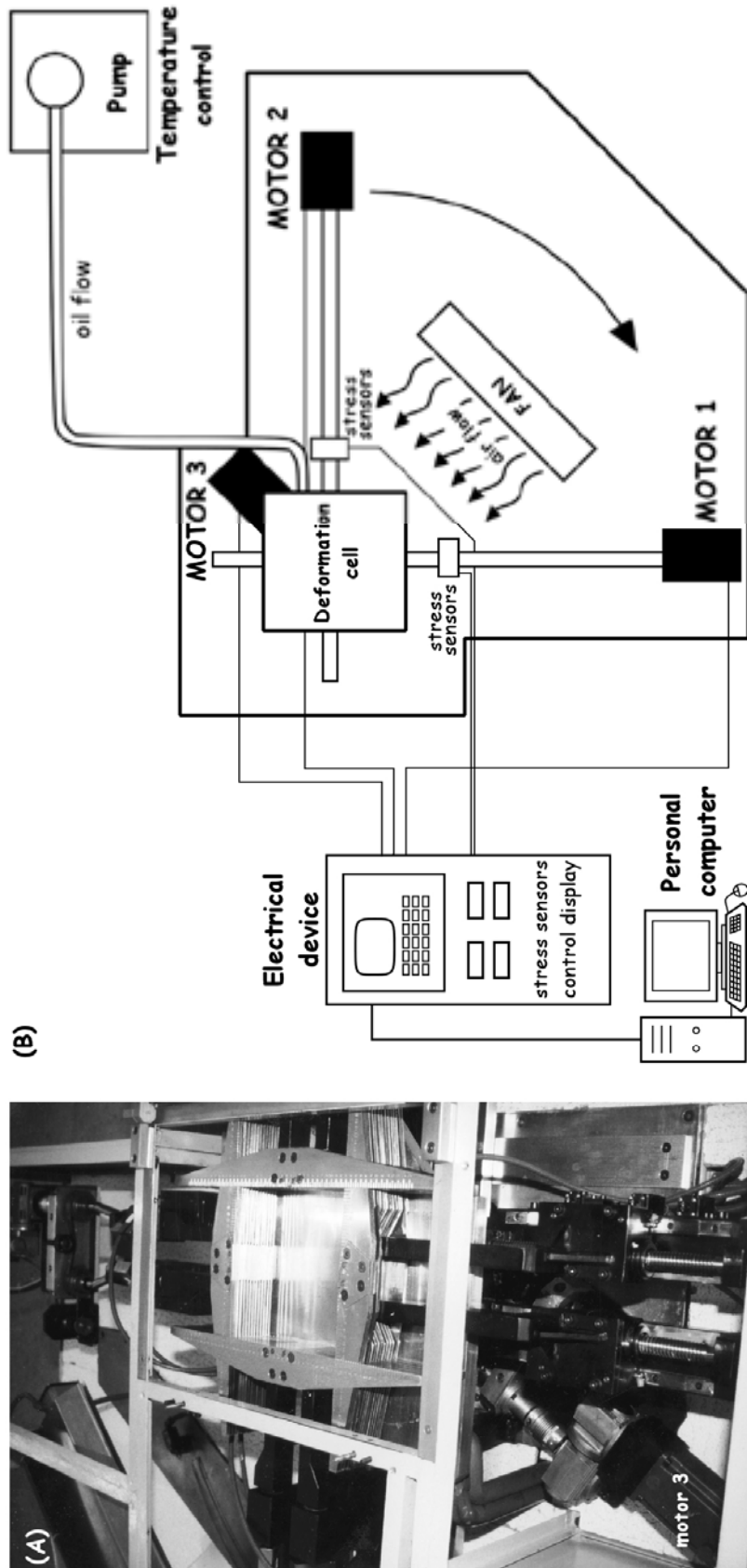


Fig. 1 Imatge de del prototipus de cel·la de deformació experimental amb materials analògics i (b) esquema amb els diferents elements de l'aparell experimental utilitzat en aquest estudi.

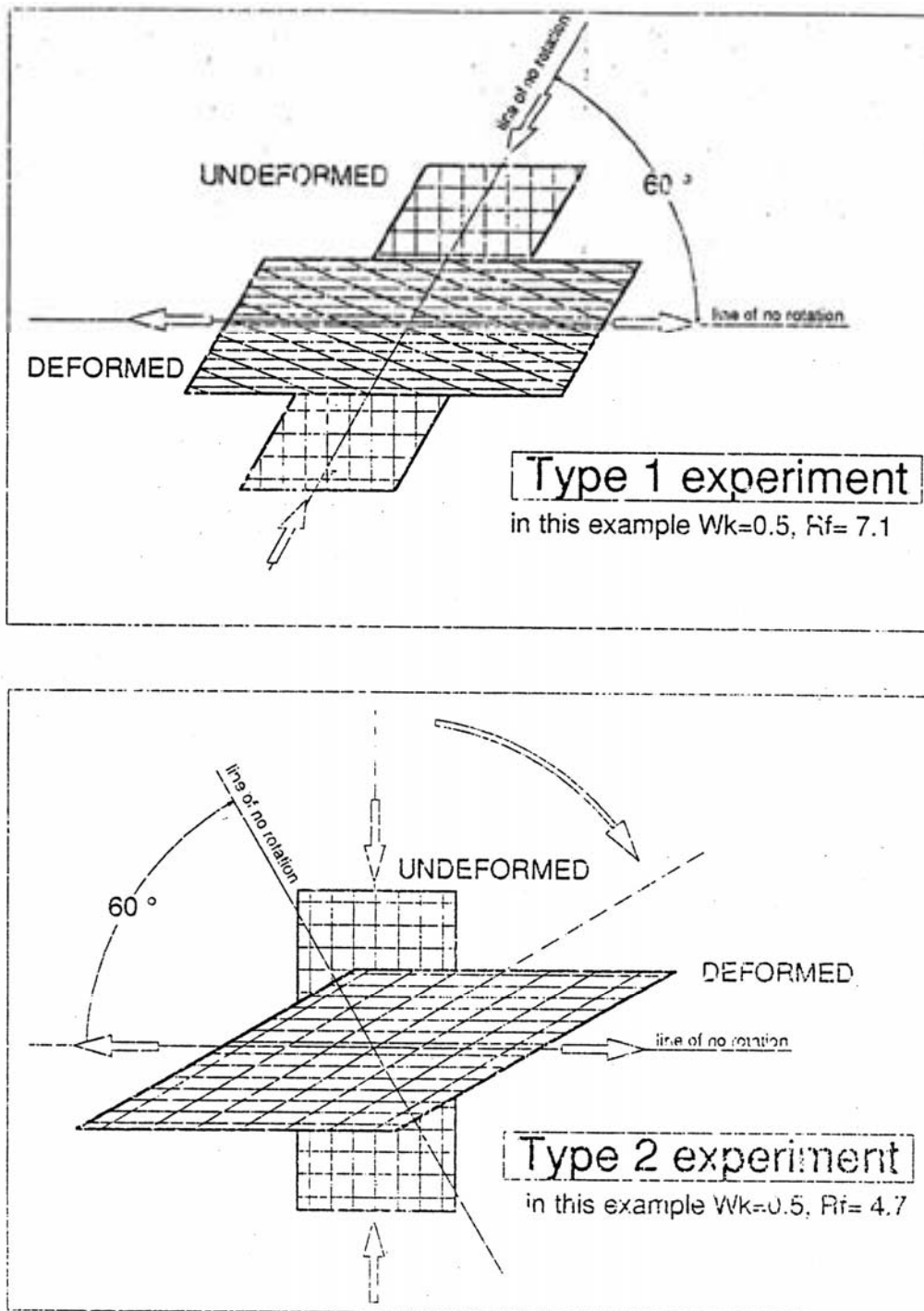


Fig. 2 Configuracions bàsiques de a cel·la experimental. En el tipus 1 tant sols es produeixen desplaçaments longitudinals, conservant-se l'angle entre els costats de la cel·la. En canvi, en el tipus 2 es produeixen tant canvis de longitud com d'angles de la cel·la experimental. Conceptualment tots dos són cinemàticament fluxos no coaxials, però la distribució real dels esforços aplicada per la cel·la és segur que difereixi amb els esperats a nivell teòric.

analògic. La cel·la d'experimentació, pistons i motors resten aïllats tèrmicament del laboratori. El control de la temperatura es realitza amb un circuit de refrigeració situat dins de la placa de coure a partir de la injecció d'oli calent o fred, i mitjançant un ventilador d'aire calent. Quatre cèl·lules de càrrega situades en els pistons permeten un continu control de l'esforç aplicat.

En tot moment les velocitats dels motors són controlades per ordinador, el que permet realitzar experiments en condicions de flux estacionari (*steady-state*) dins l'ampli espectre de vorticitat, com aplicar deformacions no estacionàries, ja sigui per la variació de la velocitat de deformació (*strain-rates*), la variació de la vorticitat o de l'àrea del model (Fig. 3).

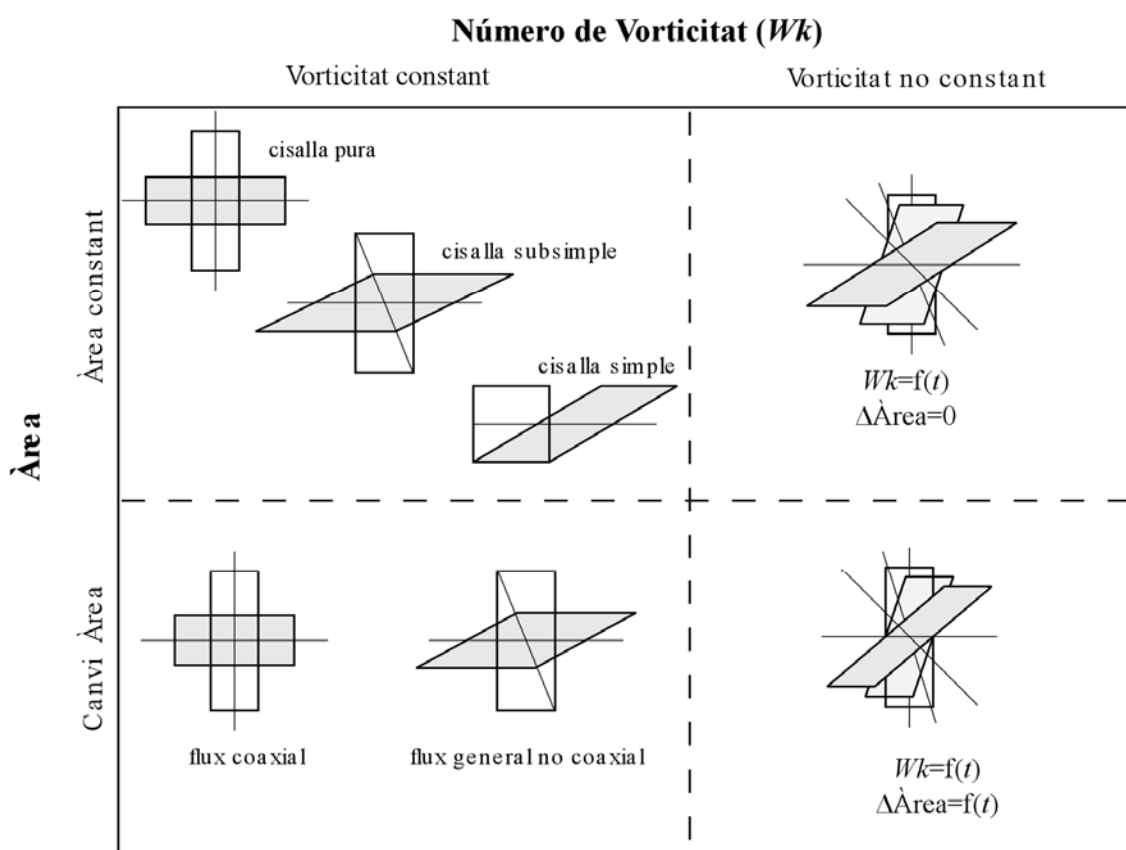


Fig. 3 Configuracions bàsiques de la cel·la experimental. En el tipus 1 tan sols es produeixen desplaçaments longitudinals, conservant-se l'angle entre els costats de la cel·la. En canvi en el tipus 2 es produeixen tant canvis de longituds com d'angles.

A.1.2 Construcció dels models

L'elaboració d'un model analògic suposa una elaboració llarga i complexa, com a conseqüència de la metodologia necessària per a la fabricació dels diferents elements i el temps que s'ha d'emprar per fer-ho. No obstant, la validesa per extrapolar a la natura els resultats obtinguts, serà en funció del grau d'aproximació dels factors cinemàtics, geomètrics i reològics a les condicions reals en la que es va produir l'estructura estudiada. Per les condicions que volem reproduir, es pot considerar que les forces d'inèrcia (perquè les deformacions es produeixen en taxes de velocitat molt baixes) i els efectes de la gravetat (pel volum que volem reproduir) són despreciables. Els factors a escalar seran els geomètrics i els reològics.

Com l'objectiu és estudiar la cinemàtica dels *rods* durant la D2, i no la fase de boudinage que podria haver originat l'estructura, els models s'han realitzat amb la geometria prèvia de *pinch and swell* (sistema boudin-cap).

La forma més directa de realitzar les geometries requerides amb parafines, és a partir de l'elaboració de motlles de fusta o plàstic amb la forma desitjada. No obstant, això no ha estat plausible per la dificultat en l'elaboració d'aquests motlles i per la necessitat de gran quantitat de configuracions diferents. S'ha optat per una tècnica indirecta, a partir de l'elaboració del negatiu de la geometria requerida. Un esquema dels diferents passos per fer un motlle és mostrada a la figura 6.5. En unes safates de fusta (30x60x3 cm d'alçada) s'han enganxat uns perfils del mateix material semiel·líptics deixant uns espais entre ells (en funció de la relació axial del cos el·líptic (Ri) i l'espai entre ells (Di) que vulguem reproduir). Si aboquem la parafina que utilitzarem per la matriu, després de deixar refredar i tallar, obtindrem unes peces de 10 cm d'alçada que presenten una cara, amb la forma que ens interessava. Si unim dues d'aquestes peces, i segons l'espai que deixem entre elles (Ti), obtindrem la forma negativa del sistema boudin-cap. Aboquem directament la parafina de punt de fusió més alt, que ha estat tenyida per augmentar el contrast visual (< 0.5 % volum colorant), dins l'espai lliure deixat entre les peces. Així s'aconsegueix una elaboració senzilla, força ràpida i amb l'avantatge d'una millor unió entre la matriu i la capa ja que en el cas contrari d'una elaboració independent i posterior unió de les dues parts, encara que s'apliqui durant l'experiment una pressió confinant, es produeix en el contacte matriu-cap grans quantitats de components de lliscament que es volen evitar al màxim.

En uns motlles de fusta (30x15x15 cm d'alçada) s'orienten aquestes peces i s'aboca de nou la matriu. La fusió parcial de la matriu de la peça garanteix una perfecta cohesió amb la nova matriu. Només resta polir el motlle a les dimensions requerides (28cm x 14cm x 10cm d'alçada). A la part superior s'ha inscrit una xarxa (0.7x0.7 mm de dimensió) i s'ha pintat amb aerosol acrílic per facilitar el posterior tractament numèric. Abans de posar el model a la màquina s'ha cobert la part superior amb una capa d'un mil·límetre d'espessor de parafina més tova. Per minimitzar el fregament amb les parets de la cel·la, s'ha lubricat el model amb abundant vaselina, menys a la part superior que s'ha lubricat amb glicerina, perquè al ser transparent ajuda a una millor observació durant l'experiment.

Com a conseqüència de la mala conducció del calor de la parafina, són necessàries un mínim de 12h d'escalfament del model abans de poder-lo deformar. El temps mínim necessari per realitzar cada experiment és de quatre dies (3 d'elaboració + 1 d'experiment).

Fig. 4 Esquema dels diferents passos per l'elaboració d'un model analògic.

- 1) En una safata de fusta disposem els elements segons la geometria necessària.
- 2) Aboquem parafina de matriu.
- 3) Després de deixar refredar, al tallar la parafina obtindrem unes peces que representen el negatiu de l'estructura.
- 4) Ajuntem dues d'aquestes peces i aboquem a l'espai buit entre aquestes, parafina de punt de fusió superior.
- 5) Orientem aquestes peces, segons el model a fer, dins uns motlles grans de fusta a on tornem a abocar parafina de matriu.
- 6) Deixem refredar almenys 24h, i polim el motlle a les dimensions requerides.
- 7) Inscrivim una xarxa a la part superior (amb quadrats de 0.7x 0.7 mm de dimensió).
- 8) Ho pintem amb aerosol acrílic.
- 9) Al polir ens quedarà la xarxa dibuixada sobre el motlle.
- 10) Disposem una capa fina de matriu sobre el motlle, i el model ja està enllestit!

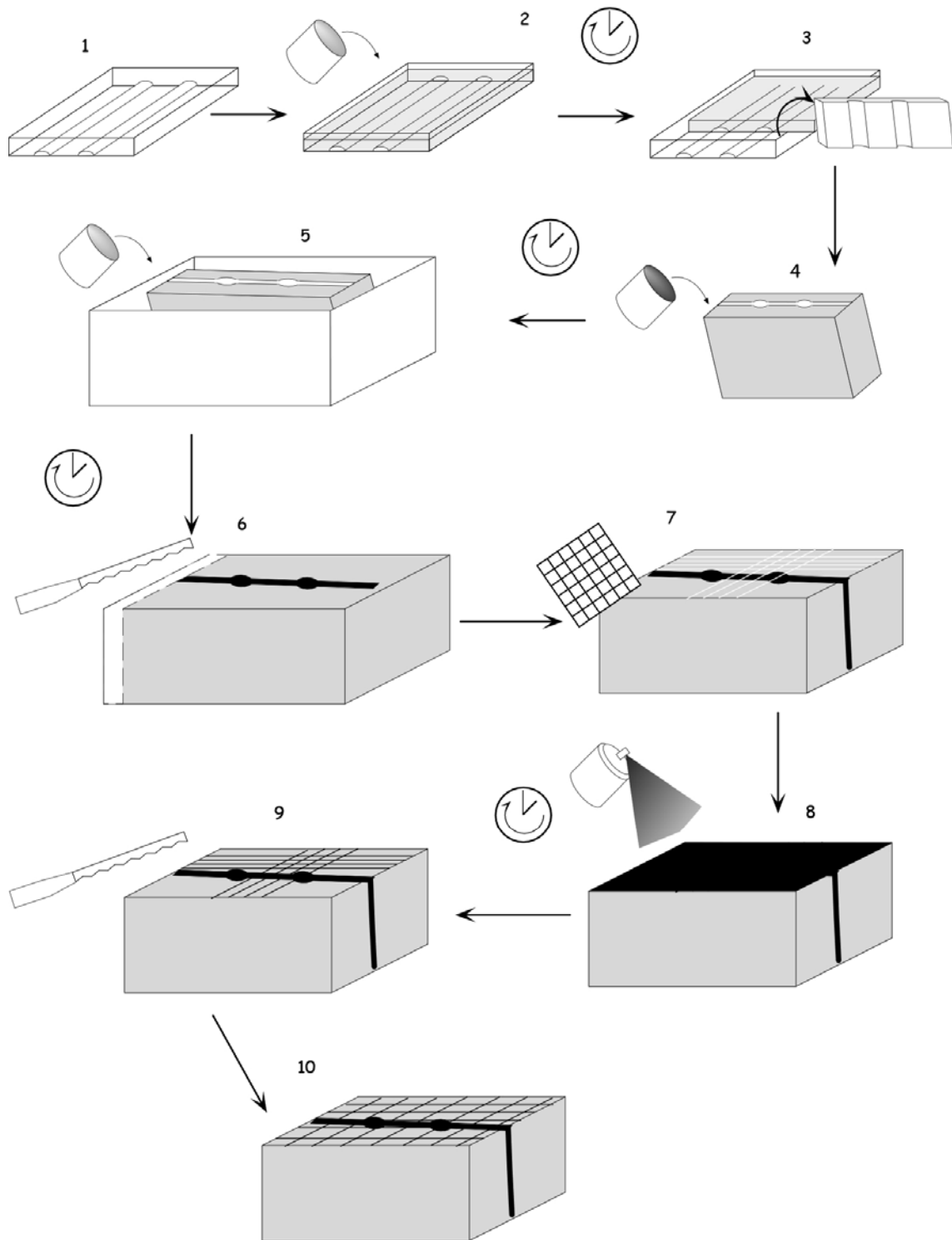


Fig. 4 (veure pàgina anterior)

Al llarg del projecte s'ha anat perfeccionant les tècniques de construcció i anàlisi dels models. Com a prova d'això és la millora substancial entre l'aspecte dels models a l'inici de l'estudi i al final (Fig. 5)

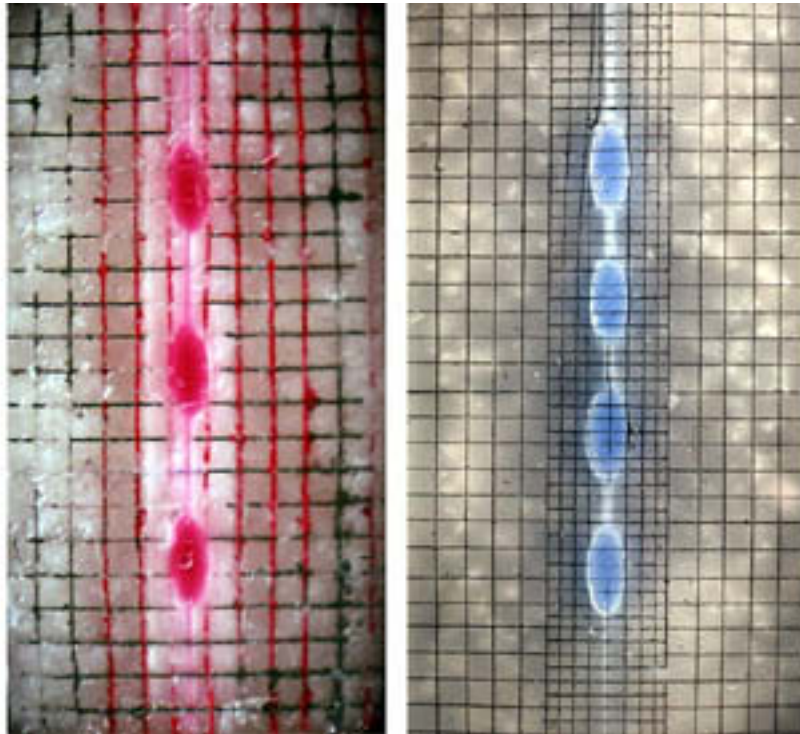


Fig. 5 Comparació entre l'aspecte inicial d'un model experimental a l'inici de l'estudi i al final d'aquest. S'ha millorat enormement en la construcció i en la geometria de les capes, però sobretot en la inscripció de la malla d'anàlisi que pot arribar a ser definida inferior a intervals de 5mm.

A.1.3 Quantificació de la deformació dels models experimentals

Per poder determinar els diferents paràmetres de la deformació és necessari generar una base de dades dels desplaçaments d'un conjunt de punts materials el màxim d'àmplia possible. Aquests punts han d'estar identificats i diferenciats pels diversos intervals enregistrats. Els punts materials utilitzats han estat els nodes de la xarxa inscrita al model. Cal recordar que una translació no produeix cap canvi de forma i s'ha fixat com a punt de referència comú el centre del model, assignant-li les coordenades (0,0). Les posicions (x, y) dels diferents nodes (respecte un sistema de referència extern (X, Y) fixat pels eixos a la màquina i paral·lel a les cares del model) han estat aconseguïdes a partir del tractament digital de del registre fotogràfic dels experiments. S'ha fet a partir del programa NIH-Image 1.6, un software de tractament digital d'imatges desenvolupat i distribuït gratuïtament pel National Institute of Health dels Estats Units (<http://rrsb.info.nih.gov/nih-image/>).

A.1.3.1 Determinació del tensor del gradient de deformació \mathbf{F}

És el càlcul de la deformació finita o acumulada entre dos intervals. Per tant, no és una mesura de les propietats cinemàtiques del flux a el interval calculat. Sigui un punt P de coordenades inicial \mathbf{x}_0 en el sistema prèviament definit. La posició del punt P , a l'estat deformat \mathbf{x}_t , serà igual a la suma de la coordenades inicials \mathbf{x}_0 més el vector de desplaçament \mathbf{u}_j (Fig. 6a i 6b),

$$x_i = x_i^0 + u_i = x_i^0 + \frac{\delta u_i}{\delta x_j^0} x_j^0 \quad (1)$$

Expressat en forma de matriu, dóna:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{\delta u_1}{\delta x_1^0} & \frac{\delta u_1}{\delta x_2^0} \\ \frac{\delta u_2}{\delta x_1^0} & 1 + \frac{\delta u_2}{\delta x_2^0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^0 \\ x_2^0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Aquesta és la matriu de transformació de coordenades, que és directament equivalent a la matriu \mathbf{F} i a la utilitzada per Ramsay and Huber (1983, apèndix B),

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \quad (3)$$

Podem calcular la deformació finita directament a partir de tres elongacions conegudes (Ramsay, 1967; De Paor, 1988); és dir, a partir de tres punts independents, o dos si es considera un punt de referència fix. Així podríem calcular directament \mathbf{F} a partir dels canvis de longitud i d'angle d'un dels costats de la xarxa. Però l'error associat a aquest càlcul és molt alt. Si s'utilitzen més punts com a dades, el sistema d'equacions resta sobreestimat (més equacions que incògnites) i es fa necessària la utilització d'un operador numèric per resoldre aquest sistema d'equacions lineals.

$$\begin{pmatrix} {}^1x_1 \\ \vdots \\ {}^nx_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{\delta u_1}{\delta x_1^0} & \frac{\delta u_1}{\delta x_2^0} \\ \frac{\delta u_2}{\delta x_1^0} & 1 + \frac{\delta u_2}{\delta x_2^0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^1x_1^0 \\ \vdots \\ {}^nx_1^0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

S'ha resolt a partir del criteri de mínims quadrats (Lawson and Hanson (1974), o a qualsevol text de càlcul numèric), que ens permet trobar els valors de \mathbf{F} (a , b , c i d) que

millor s'ajusten per cada paral·lelogram, formats a partir de quatre nodes de la xarxa ($n=4$).

Els diferents paràmetres que caracteritzen la deformació finita poden ser directament calculats a partir de les equacions mostrades en el capítol 2.

A.1.3.2 Determinació del tensor del gradient de velocitats

Calcular aquest tensor ens permetrà conèixer com és la cinemàtica del flux en un instant donat. Però per determinar \mathbf{L} , és necessari conèixer les velocitats associades a cada partícula en els diferents temps. Això, no és una dada que puguem obtenir directament a partir del tractament de les imatges. Com que coneixem la posició \mathbf{x}_i^t a diferents temps de l'experiment, es podria calcular una velocitat promig. Però aquest valor no té sentit si l'objectiu és calcular les velocitats en un temps concret.

Els nodes de la xarxa representen un conjunt de punts materials dels quals la posició \mathbf{x}_i^t en un específic moment (t) és coneguda (Fig. 6c i 6d). Per tant tenim dades discretes de posició en temps discrets. Si el interval de temps entre registres és petit, el que obtindrem serà una aproximació a la trajectòria de la funció posició continua en el temps. Si assumim que aquestes trajectòries són suaus, podem interpolar la posició de cada partícula com una funció del temps,

$$x = x(t) \quad (5)$$

Aquestes aproximacions s'han fet a partir de polinomis de grau 3, dues funcions per cada node, ja que s'han tractat les direccions ($i=1,2$) per separat,

$$x_i^t = \sum_{n=0}^3 (c_n)_i t^n \quad (6)$$

El càlcul dels diferents coeficients del polinomi $(c_n)_i$ poden ser realitzats partir de mínims quadrats. Amb la utilització de grau 3 és suficient per un bon ajust. Ara que ja coneixem les trajectòries de les partícules per qualsevol instant, les velocitats poden ser calculades a partir de la derivada respecte el temps,

$$v_i^t = \sum_{n=0}^3 (c_n)_i t^{n-1} \quad (7)$$

A partir d'aquesta equació podem generar una base de dades de velocitats per diferents intervals de temps.

El tensor \mathbf{L} ens relacionava la posició d'un punt amb la velocitat de la forma,

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\delta v_1}{\delta x_1} & \frac{\delta v_1}{\delta x_2} \\ \frac{\delta v_2}{\delta x_1} & \frac{\delta v_2}{\delta x_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

podem calcular \mathbf{L} d'una manera similar a \mathbf{F} , a partir del sistema d'equacions lineals que formen els quatre nodes d'un element de la xarxa pel criteri de mínim quadrats. Aquesta forma de càlcul de \mathbf{L} és similar a la utilitzada per Bons et al. (1993).

Així podem obtenir \mathbf{F} i \mathbf{L} , per cada element de la xarxa. Tots aquests càlculs s'han fet a partir de fulls de càlcul *Excel* i el programa de matemàtica simbòlica *Mathematica*. Una restricció que comporta aquesta forma de càlcul, és la suposició que la deformació dins d'aquest element és homogènia. Per a xarxes d'elements petits es pot assumir aquesta homogeneïtat de la deformació. A partir d'aquests tensors es poden calcular els quatre paràmetres necessaris per caracteritzar tant la deformació finita (Rf , Wm i l'orientació de λ_1) com la instantània (\dot{S} , Wk , \dot{A} i orientació de \dot{s}_1). La distribució d'aquests paràmetres dins d'un model s'ha fet a partir de gràfics de contorn.

A.1.3.3 Determinació d'instabilitats mecàniques

L'existència d'un contrast reològic (una capa, partícula,..) dins un medi sotmès a una deformació homogènia, provoca la generació d'instabilitats mecàniques (causant el plegament de la capa o la rotació de la partícula), generant una heterogeneïtat en la distribució del flux deformatiu. Seria interessant poder diferenciar, i així visualitzar, quins són els efectes que produeix una inestabilitat, sobretot per estudiar aquestes heterogeneïtats quan es superposen a una deformació homogènia (Ramberg, 1961; Cobbold, 1977; Mancktelow, 1991). Es poden calcular els tensors \mathbf{F}_p o \mathbf{L}_p , associats a les pertorbacions, a partir de la descomposició tensorial de \mathbf{F} i \mathbf{L} calculats tenint en compte com hagués estat aquest tensor si no existís la inestabilitat (i.e. si la deformació fos homogènia, \mathbf{F}_h o \mathbf{L}_h). S'ha de recordar que mentre pel tensor del gradient de velocitats l'operació de descomposició és additiva ($\mathbf{L} = \mathbf{L}_h + \mathbf{L}_p$), pel tensor del gradient de deformació l'operació és un producte no commutatiu ($\mathbf{F} = \mathbf{F}_p \cdot \mathbf{F}_h$, i $\mathbf{F}_p = \mathbf{F} \cdot \mathbf{F}_h^{-1}$) (Mancktelow, 1991).

També es important visualitzar en gràfics vectorials la distribució de desplaçaments originats per la inestabilitat. Aquests vectors representen la unió entre la posició final dels nodes i la que haurien d'ocupar si la deformació hagués estat homogènia. Es poden fer tant respecte al centre de referència (0,0) com situant-lo en una partícula determinada (per exemple per estudiar el camp de desplaçaments al voltant d'un cos el·líptic).

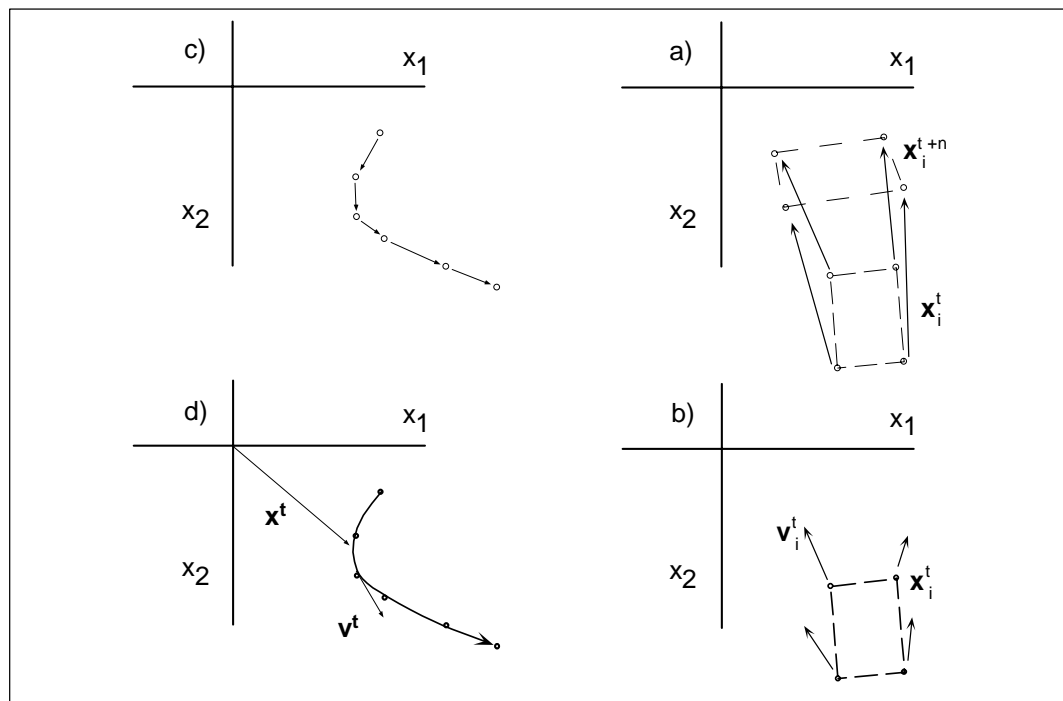


Fig. 6 Diferència del càlcul entre els tensors \mathbf{F} i \mathbf{L} . Mentre per \mathbf{F} només calen dades de posició dels nodes dels paral·lelograms per diferents intervals de temps (a), per determinar \mathbf{L} són necessàries dades de posició i de velocitat per un temps discret (b). L'aproximació de la trajectòria d'un node es fa a partir de la mesura de la seva posició per intervals de temps discrets. (c) Posició de la partícula per diferents temps durant la deformació. (d) Ajust d'una equació polinòmica de grau 3, per les diferents direccions \mathbf{x}_i , que descriuen la posició (\mathbf{x}) com una funció contínua dependent del temps. El vector de velocitat (\mathbf{v}) és la tangent a la trajectòria, fent que sigui possible assignar una \mathbf{v} a cada partícula per qualsevol temps (figures c i d modificades a partir Bons et al., 1993).

Referències addicionals

- Bons, P.D., Jessell, M.W., Passchier, C.W., 1993. The analysis of progressive deformation in rock analogues. *J. Struct. Geol.* 15, 403-411.
- Carreras, J. and Ortuño, F., 1990. Fundamento geomérico y cinemático de la modelización teórica y experimental de deformaciones no-coaxiales. *Acta Geol. Hisp.*, 25,237- 259.
- Carreras, J. Julivert, M. and Soldevila, J., 1992. A new deformation stage for analogue modelling of structures developed under coaxial and non-coaxial (general shear) strain paths.
- Cobbold, P.R. 1977. Description and origin of banded deformation structures. I. Regional strain, local perturbations and deformation bands. *Can. J. Earth Sci.*,14, 1721- 1731.
- De Paor, D.G., 1988. Strain determination from three known stretches – an exact solution. *J. Struct. Geol.* 10, 639-642.
- Lawson, C. L. i Hanson, R. J. 1974. *Solving Least Squares Problems*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Mancktelow, N.S. 1991. The analysis of progressive deformation from an inscribed grid. *J. Struct. Geol.*, 13, 859-864.
- Ramberg, H. 1961. Contact strain and folding instability of a multilayered body under compression. *Geol. Rdsch.* 51,405-439.

Annex B. Descripció de la metodologia numèrica

(1) Exemple d'arxiu DAT per a FLAC2D.

Aquest arxiu permet generar un model bidimensional d'una capa immersa dins una matriu. Les funcions de formes incloses permeten generar un tren d'inclusions amb aspecte geomètric definit a partir dels paràmetres A , ϕ , R_i , T_i , D_i , etc. Aquest arxiu en permet definir la configuració inicial dels diferents models dels capítols 5.

```

;-----
; Modelling of folding of a layer with an
; initial pinch-and-swell geometry
; For FLAC2D
; Initial version: 12/07/01
; Mean Characteristics:
; - Multigrid in y-direction.
; - General non coaxial flows with pure
;   shear components non-ortogonal to the
;   shear plane.
; - General orientation of the layer.
; Optional rheologies: linear and
; power-law elastoviscous.
; Implemented fish routines of automatic
; output of data as function of strain.
; version 4.03: 01/08/02
; - Possibilities of multilayered systems.
;-----

new
title
2D-folding of heterogeneous layers

set echo off
configure creep extra 4
set large

;-----
; Fish function with geometry, size of
; the model, output control, etc
;-----

def input

; -----
; Configuration of the model geometry
; -----

; (1) orietation of the layer envelope
; respect to the x-axis (trigonometric
; sense)
alfa=0
alfa_r=alfa*degrad

; (2) number of layers
n_capes= 3

; (3) geometry of the instability
a=0.8 ; ratio amplitude/thickness
phi=0 ; longitudinal layer asymmetries
aal=a ; transversal layer asymmetries
aa2=aal

; (4) model size
dim_x =80

```

```

dimb_y =44 ; always multiple of 4
gratio=1.01

; (5) Specific information of every
; layer
; layer 1
t_1=2
t_la1 = t_1/(cos(alfa*degrad))
A_t1=a*t_la1; absolute amplitude

; layer 2
t_2=2
t_la2 = t_2/(cos(alfa*degrad))
A_t2=a*t_la2; absolute amplitude
;layer 3
t_3=2
t_la3 = t_3/(cos(alfa*degrad))
A_t3=a*t_la3; absolute amplitude

; (6) wave length of perturbations
w_b=10
w1= w_b/(t_2-(2*A))
A1= A/4*(t_2-(2*A))
; (7) Definition of y-elements in every
; zone
n_le=3; n° of element by unit of thickness
n_ry=4
n_emy=2

; (8) Output control
;(8.1)Output base of filenames
name='wk0'
is=0 ;support for filenames
iss=2

; (8.2) Control of the run-function
step_total=45600
dstep = 200
tstep=0
f_step = step_total/dstep

; (8.3) Controls of the output fish
; function. In function of the natural
; strain

; SAV data (all the mechanical data)
short = 0 ; first naturalstrain to save
dshort = 0.2; strain interval

; ASCII data
short_1 = 0 ;
dshort_1 = 0.05; strain interval

; -----
; Internal model calculations
; -----

; mesh inputs size and distribution
t_refL= (t_1+t_2+t_3)
t_max= max(t_1,t_2)
t_max= max(t_2,t_3)
t_ref=2*t_max
t_ext=(dimb_y-(2*t_ref)-t_refL)/3
t_mid=((dimb_y)/2)-(t_ref+t_ext+(t_refL/2))
n_lx =2 ; n° elements in x-direction

; ----
; Grid size

```

Annex B. Descripció de la metodologia numèrica.

```

; x direction
z_xg= n_lx*dim_x;
z_xext=z_xg/4
z_xmid= z_xg/2

; y direction
z_yref= (3*t_ref)/n_ry
z_yext= t_ext/n_emy
z_ymid= z_yext
z_ygL=(t_1+t_2+t_3)*n_le
z_yg= z_ygL+2*(z_yref+z_ymid)+2

; real dimension of the model
t_refaL=t_refl/(cos(alfa*degrad))
t_refa = t_ref/(cos(alfa*degrad))
dim_ys=(t_ext+t_mid)
dim_y = (2*t_refa) + t_refaL
dim_y = dim_y + 2*dim_ys
dim_y = dim_y +(dim_x * tan(alfa*degrad))
dim_yb= dim_y -
(dim_ys+((t_refl+(2.0*t_ref))/(cos(alfa*deg
rad))))
t_extb= (dim_yb * t_ext)/dim_ys
t_midb= (dim_yb * t_mid)/dim_ys

; Support for x,y coord. system
p_1= -dim_y/2.0
p_2= p_1+t_extb
p_3= p_1 + t_ext
p_4=p_2 + t_midb
p_5= p_1 + dim_ys
p_6=p_4+t_refa
p_7=p_5+t_refa
p_8=p_6+t_refaL
p_9=p_7+t_refaL
p_10=p_8+t_refa
p_11=p_9+t_refa
p_12=p_10+(dim_ys-t_ext)
p_13=-p_2

dim_x2= -dim_x/2.0
dim_x22 = -dim_x2
dim_y2 = -dim_y/2.0
dim_y22 = -dim_y2
dim_z2 = -dim_z/2.0
dim_z22 = -dim_z2

;-----
; Information of i,j coord. system
migp=z_xg+1
njgp=z_yg+1

; z_ext
ez_lx=z_xmid+2
ez_2x=ez_lx+z_xext-1
ez_ly=z_yg-z_yext+1
egp_i1=ez_lx
egp_i2=ez_2x+1
egp_j1s=1+z_yext;
; z_mid
mgp_j1=z_ymid+1
mgp_i2=z_xmid+1
; z_ref
rgp_j1=mgp_j1+1
rgp_j2=rgp_j1+z_yref
l_j2=l_j1+z_ygL+rgp_j2
rgp_j4=rgp_j3+z_yref+l_j2
; layer 1

l11j=rgp_j2
l12j=l11j+(n_le*t_1)-1
;layer_2
l21j=l12j+1
l22j=l21j+(n_le*t_2)-1
;layer_3
l31j=l22j+1
l32j=l31j+(n_le*t_3)-1
; null zones
sup_1=ez_ly-1
p_14=dim_y22
xx=dim_x

; size of arrays
x_igp =(z_xg+1)*2*(n_capes-1)
m_igp=z_xg+1
n_jgp=z_yg+1

end
;-----
; End of INPUT fuction
;-----

input

;-----
; Model Generation
;-----

grid z_xg, z_yg
model el
model null i=1,migp j=egp_j1s
model null j=sup_1
model null i=mgp_i2 j=1,z_yext
model null i=mgp_i2 j=ez_ly,z_yg
model null i=egp_i2 j=1,z_yext
model null i=egp_i2 j=ez_ly,z_yg
model null reg z_xg,1
model null reg z_xg,z_yg

gen (0,p_1) (0,p_2) (dim_x,p_3) (dim_x,p_1)
rat 1,1 i=egp_i1,egp_i2 j=1,mgp_j1
gen (0,p_2) (0,p_4) (dim_x,p_5) (dim_x,p_3)
rat=1,0.9 i=1,mgp_i2 j=1,mgp_j1
gen (0,p_4) (0,p_6) (dim_x,p_7) (dim_x,p_5)
rat 1,0.85 j=rgp_j1,rgp_j2
gen (0,p_6) (0,p_8) (dim_x,p_9) (dim_x,p_7)
rat=1,1 j=rgp_j2,l_j2
gen (0,p_8) (0,p_10) (dim_x,p_11)
(dim_x,p_9) rat 1,1.18 j=l_j2,rgp_j4
gen (0,p_10) (0,p_12) (xx,p_13) (xx,p_11)
rat 1,1.11 i=1,mgp_i2 j=ez_ly,njgp
gen (0,p_12) (0,p_14) (dim_x,p_14)
(dim_x,p_13) i=egp_i1,egp_i2 j=ez_ly,njgp

attach as from 1,1 to mgp_i2,1 bs from
egp_i1,mgp_j1 to egp_i2,mgp_j1
attach as from 1,mgp_j1 to mgp_i2,mgp_j1 bs
from 1,rgp_j1 to migp,rgp_j1

attach as from 1,rgp_j4 to migp,rgp_j4 bs
from 1,ez_ly to mgp_i2,ez_ly
attach as from 1,njgp to mgp_i2,njgp bs
from egp_i1,ez_ly to egp_i2,ez_ly

;-----
; Properties and rheology of the model
;-----

```


Annex B. Descripció de la metodologia numèrica.

```

def reoprop
; Kinematics (s-1)
;volumetric stretching rate
stretch_rate_vol=5e-14
beta=45;Angle between eigenvectors
rst_rate=1; area constant

;-----
; Properties in Pa and Pa·s

Rlm=20;Effective viscosity ratio between
layer & matrix
Elm=2; Elastic contrast (G'= K')
bulk_matrix=2e10
shear_matrix=1e10
Lviscous_matrix=1e19; effective viscosity
for the bulk KII
n_matrix=1
n_layer=1
density_m=2700

; Layer_1
Rlm1=1
Elm1=1
n_layer1=n_matrix
model_l1=model_m
Af_l1 =Af_matrix
Angle_an1 = angle_an_m

; Layer_2
Rlm2=Rlm
Elm2=Elm
n_layer2=n_layer
model_l2=model_l1
Af_l2 =Af_layer
Angle_an2 = angle_an

; layer_3
Rlm3=1
Elm3=1
n_layer3=n_matrix
model_l3=model_m
Af_l3 =Af_matrix
Angle_an3 = angle_an_m

; Conditionals
if n_matrix<=0 then
  n_matrix=1
end_if
if n_layer<=0 then
  n_layer=1
end_if
if n_layer1<=0 then
  n_layer1=1
end_if
if n_layer2<=0 then
  n_layer2=1
end_if
if n_layer3<=0 then
  n_layer3=1
end_if

; Evaluate Kinematics variables
wk=cos(beta*pi/180); Bulk vorticity number

stretch_rate=(stretch_rate_vol)*((1+rst_rate)/2.0)
t1=(1+rst_rate)^2
t2=(2*(wk^2))/(1-(wk^2))
t3=1+rst_rate^2

; calculate strain-rates
strain_rate_x=sqrt((stretch_rate^2)/(t1+t2*t3))
strain_rate_y=-strain_rate_x*Rst_rate
strain_rate_z=-(1-Rst_rate)*strain_rate_x
t1=((strain_rate_x^2)+(strain_rate_y^2))/(1-(wk^2))
shear_rate_xy=sqrt(2*(wk^2)*t1)

; units change to MPa and Years
any_srx=strain_rate_x*3600*24*365
any_sry=strain_rate_y*3600*24*365
any_srz=strain_rate_z*3600*24*365
any_srxy=shear_rate_xy*3600*24*365

; Properties constants change to MPa
density_m=density_m*1.0e6
mbulk_m= bulk_matrix/1.0e6
mshear_m= shear_matrix/1.0e6
mlviscous_m= Lviscous_matrix /
(3600*24*365*1.0e6)
nexpm= (1.0-n_matrix)/(2.0*n_matrix)
KII= -1*(any_srx*any_sry - (any_srxy)^2)
Alnm= (0.5/mlviscous_m)*KII^nexpm
A_matrix= (Alnm)^(n_matrix)

;Layer properties
; layer_1
visc_l1=mlviscous_m*Rlm1
bulk_l1=mbulk_m*Elm1
shear_l1=mshear_m*Elm1
nexpl= (1.0-n_layer1)/(2.0*n_layer1)
Aln1= (0.5/visc_l1)*KII^nexpl
A_l1= (Aln1)^(n_layer1)
; layer_2
visc_l2=mlviscous_m*Rlm2
bulk_l2=mbulk_m*Elm2
shear_l2=mshear_m*Elm2
nexpl= (1.0-n_layer2)/(2.0*n_layer2)
Aln1= (0.5/visc_l2)*KII^nexpl
A_l2= (Aln1)^(n_layer2)
; layer_3
visc_l3=mlviscous_m*Rlm3
bulk_l3=mbulk_m*Elm3
shear_l3=mshear_m*Elm3
nexpl= (1.0-n_layer3)/(2.0*n_layer3)
Aln1= (0.5/visc_l3)*KII^nexpl
A_l3= (Aln1)^(n_layer3)

;----- MATRIX -----
; automatic model selection

if n_matrix=1 then
command
  model visc
  prop density=density_m bulk=mbulk_m
  prop shear=mshear_m visc=mlviscous_m
end_command
else
command
  model power

```

Annex B. Descripció de la metodologia numèrica.

```

prop density=density_m bulk=mbulk_m
shear=mshear_m
prop n_l=n_matrix a_l=A_matrix
end_command
end_if

;----- LAYER -----
; automatic model selection

;layer_1

If n_layer1=1 then
command
model visc j=l11j,l12j
prop density=density_m bulk=bulk_l1
shear=shear_l1 j=l11j,l12j
prop visc=visc_l1 j=l11j,l12j
end_command
else
command
model power j=l11j,l12j
prop density=density_m bulk=bulk_l1
shear=shear_l1 j=l11j,l12j
prop n_l=n_layer1 a_l=A_l1 j=l11j,l12j
end_command
end_if

;layer_2
If n_layer2=1 then
command
model visc j=l21j,l22j
prop bulk=bulk_l2 j=l21j,l22j
prop visc=visc_l2 shear=shear_l2
j=l21j,l22j
end_command
else
command
model power j=l21j,l22j
prop bulk=bulk_l2 shear=shear_l2
j=l21j,l22j
prop n_l=n_layer2 a_l=A_l2 j=l21j,l22j
end_command
end_if

;layer_3
If n_layer3=1 then
command
model visc j=l31j,l32j
prop density=density_m bulk=bulk_l3
shear=shear_l3 j=l31j,l32j
prop visc=visc_l3 j=l31j,l32j
end_command
else
command
model power j=l31j,l32j
prop density=density_m bulk=bulk_l3
shear=shear_l3 j=l31j,l32j
prop n_l=n_layer3 a_l=A_l3 j=l31j,l32j
end_command
end_if
end

; -----
; End of Reoprop function
reoprop

model null i=1,migp j=egp_j1s
model null j=sup_1
model null i=mgp_i2 j=1,z_yext

model null i=mgp_i2 j=ez_ly,z_yg
model null i=egp_i2 j=1,z_yext
model null i=egp_i2 j=ez_ly,z_yg
model null reg z_xg,1
model null reg z_xg,z_yg

;-----
; center the model in x=0
ini x add dim_x2

;-----
; Generation of large perturbations
;-----

loop i (1, migp)
loop j (l11j,l32j+1)

ddl=x(xx1,j)
if i<= xx1 then
xx12=(x(i,j)-x(xx1,j))
y_ch=A1/(1+(xx12/W1)^2)
y(i,j)=y(i,j) + y_ch
else

if i < xx2 then
phi_2=-atan(a1/ddl)
phi_2g=phi_2/degrad
sup1=cos(phi_2)*x(i,j)
sup2=sin(phi_2)*y(i,j)
sup3=-sin(phi_2)*x(i,j)
sup4=cos(phi_2)*y(i,j)
x(i,j)=sup1+sup2
y(i,j)=sup3+sup4

else
xx22=(x(i,j)-x(xx2,j))
y_ch=-A1/(1+(xx22/W1)^2)
y(i,j)=y(i,j) + y_ch
end_if
end_if

end_loop
end_loop
end

;-----
; End of large perturbation generation
;-----
amp_fold

; -----
; Capture initial geometry for finite
; strain analysis
; -----
def out_0
float y_0
int m_igp n_jgp
array x_0 (m_igp,n_jgp)
array y_0 (m_igp,n_jgp)

; capture gps positions situated into the
; model middle zone.
loop i (1, igp) loop j (rgp_j1,rgp_j4)
x_0(i,j)=x(i,j)
y_0(i,j)=y(i,j)
end_loop
end_loop
; end function out_0

```

Annex B. Descripció de la metodologia numèrica.

```

end

;-----
; End of Def_out Fish function
;-----

out_0

;-----
; function VELOCITIES
; Applies a Velocity boundary condition
; version: 10/06/00 type: While_stepping
;-----

def velocities
while_stepping

; side X
loop j (1,jgp) ; part central
  xvel (1,j) =(any_srx*x(1,j)+ any_srxy
*y(1,j))*crtedel
  xvel (igp,j)=( any_srx* x(igp,j)+ any_srxy
*y(igp,j))*crtedel
  yvel (1,j) =( any_sry*y(1,j))*crtedel
  yvel (igp,j)=( any_sry*y(igp,j))*crtedel
end_loop

loop j (1,egp_jls)
  sup1=mgp_i2
  xvel (sup1,j)=(any_srx*x(sup1,j)
+any_srxy*y(sup1,j))*crtedel
  xvel (egp_i1,j) =(any_srx*x(egp_i1,j)+
any_srxy*y(egp_i1,j))*crtedel
  xvel (egp_i2,j)=( any_srx* x(egp_i2,j)+
any_srxy*y(egp_i2,j))*crtedel
  yvel (sup1,j) =(any_sry*y(sup1,j))*crtedel
  yvel (egp_i1,j) =(any_sry*y(egp_i1,j))
*crtedel
  yvel (egp_i2,j)=(any_sry*y(egp_i2,j))
*crtedel
end_loop

loop j (ez_ly,jgp)
  xvel (mgp_i2,j) =(any_srx*x(mgp_i2,j)+
any_srxy*y(mgp_i2,j))*crtedel
  xvel (egp_i1,j) =(any_srx*x(egp_i1,j)+
any_srxy*y(egp_i1,j))*crtedel
  xvel (egp_i2,j)=( any_srx* x(egp_i2,j)+
any_srxy*y(egp_i2,j))*crtedel
  yvel (mgp_i2,j)=(any_sry*y(mgp_i2,j))
*crtedel
  yvel (egp_i1,j)=(any_sry*y(egp_i1,j))
*crtedel
  yvel (egp_i2,j)=(any_sry*y(egp_i2,j))
*crtedel
end_loop

;side Y
loop i (egp_i1,egp_i2)
  xvel(i,1)=(any_srx*x(i,1)+any_srxy*y(i,1))
*crtedel
  xvel(i,jgp)=(any_srx*x(i,jgp)+any_srxy
*y(i,jgp))*crtedel
end_loop

; End of the function VELOCITIES
end
velocities

; Fix gps velocities
;fix X-sides
fix x y i=1
fix x y i=mgp

fix x y i=mgp_i2 j=1,egp_jls
fix x y i=mgp_i2 j=ez_ly,njgp
fix x y i=egp_i1 j=1,egp_jls
fix x y i=egp_i1 j=ez_ly,njgp
fix x y i=egp_i2 j=1,egp_jls
fix x y i=egp_i2 j=ez_ly,njgp
; fix Y-sides
fix x i=egp_i1,egp_i2 j=1
fix x i=egp_i1,egp_i2 j=njgp

; Creep parameters
set maxdt=20.0 mindt=1e-1
set fobl=5.0 fobu=50 umul=0.5 lmul=1.10
lat=150
set crdt=auto

;-----
; Function: sup_step
; control run of the models and output of
; data
;-----
def sup_step
array curv_1(x_igp)
loop nn (1,f_step)

;-----
; Sub-routine Out_data
; version: 09/05/01 type: recursive command
;-----

if step >= tstep then
strain_new
=(stretch_rate_vol*crttime*3600*24*365)/2

if strain_new>=short_1 then

loop i (1,igp)
curv_1(i)=string(x(i,l11j))+',' +string(y(i,
l11j))
end_loop

loop i (1,igp)
curv_1(i)=string(x(i,l21j))+',' +string(y(i,
l21j))
end_loop

loop i (1,igp)
curv_1(i+igp)=string(x(i,sup1))+',' +string(
y(i,sup1))
end_loop

loop i (1,igp)
curv_1(i+igp*2)=string(x(i,l31j))+',' +strin
g(y(i,l31j))
end_loop

loop i (1,igp)
curv_1(i+igp*3)=string(x(i,l32j+1))+',' +str
ing(y(i,l32j+1))
end_loop

```

```
filename =name+'c'+string(iss)+'.alb'
status = open(filename, 1, 1)
status = write(curv_1,x_igp)
status = close
short_1=short_1+dshort_1
iss=iss+2
end_if

if strain_new >= short then
  filename = 's'+name+string(is)+'.sav'
  command
  set output @filename
  save @filename
  end_command
  short = short + dshort
  is=is+1
end_if

tstep=tstep+dstep

end_if
;-----
; end of routine OUTPUT_DATA
;-----

  command
    print strain_new
    step dstep
  end_command

end_loop
end
; end of SUP_STEP funtion

sup_step
```

A.3.1 Taula de dades dels el·lipsoïds calculats per a la zona de Puig Culip.**Abreviatures**

Nº ref: número de referència de la parada.

UTM X, UTM Y: coordenades UTM de la parada

X', Y', Z': magnitud dels eixos de deformació finita.

L'eix X' per sistema s'ha escollit vertical, mentre l'eix Y' i Z' representen els eixos de la secció horitzontal.

Strain I: Intensitat de deformació de Nadai (1963).

Lode's: paràmetre de Lode.

Phi MIG: angle mig entre la línia de no deformació finita i l'orientació de la S2. Mesurada en la secció horitzontal.

I+dA : raó del canvi d'àrea de la secció horitzontal.

nº ref.	UTM X	UTM Y	X'	Y'	Z'	Strain I.	Lode's	phi MIG	I+dA
1	525.050	4685.873	1.90	2.29	0.23	1.81	1.18	12	0.53
2	525.045	4685.870	1.90	2.22	0.24	1.77	1.15	12	0.53
3	525.056	4685.878	1.97	2.02	0.25	1.69	1.02	13	0.51
4	525.045	4685.904	1.83	2.06	0.26	1.63	1.12	14	0.55
5	525.035	4685.879	1.71	2.11	0.28	1.58	1.23	14	0.58
6	525.069	4685.840	1.68	2.12	0.28	1.56	1.26	15	0.60
7	525.068	4685.879	1.61	2.19	0.28	1.56	1.36	15	0.62
8	525.030	4685.852	1.72	2.05	0.28	1.55	1.20	15	0.58
9	525.065	4685.883	1.66	2.01	0.30	1.48	1.22	15	0.60
10	525.028	4685.901	1.63	1.94	0.32	1.41	1.21	16	0.61
11	525.102	4685.820	1.91	1.63	0.32	1.40	0.83	15	0.52
12	525.015	4685.881	1.52	2.05	0.32	1.41	1.39	17	0.66
13	525.077	4685.857	1.93	1.59	0.33	1.38	0.78	15	0.52
14	525.050	4685.725	1.61	1.88	0.33	1.36	1.20	17	0.62
15	525.115	4685.770	1.74	1.73	0.33	1.35	0.99	16	0.57
16	525.056	4685.835	1.89	1.56	0.34	1.33	0.78	16	0.53
17	525.157	4685.742	1.89	1.56	0.34	1.33	0.78	16	0.53
18	525.049	4685.874	1.58	1.86	0.34	1.32	1.22	17	0.63
19	525.132	4685.743	1.82	1.58	0.35	1.30	0.83	16	0.55
20	525.105	4685.757	2.06	1.39	0.35	1.32	0.56	15	0.49
21	524.998	4685.858	1.64	1.75	0.35	1.29	1.09	17	0.61
22	525.155	4685.730	2.06	1.39	0.35	1.32	0.55	15	0.48
23	525.068	4685.870	1.57	1.79	0.36	1.27	1.18	18	0.64
24	525.074	4685.771	1.76	1.60	0.36	1.27	0.87	17	0.57
25	525.156	4685.820	1.98	1.42	0.36	1.29	0.62	15	0.51
26	525.125	4685.794	1.68	1.66	0.36	1.26	0.98	17	0.59
27	525.061	4685.863	1.86	1.50	0.36	1.26	0.74	16	0.54
28	525.172	4685.804	2.00	1.39	0.36	1.28	0.57	15	0.50

Annex C. Dades el·lipsoïds de deformació i esquema estructural Puig Culip

29	525.072	4685.842	1.86	1.48	0.36	1.26	0.72	16	0.54
30	525.078	4685.756	1.65	1.63	0.37	1.22	0.98	18	0.60
31	525.052	4685.806	1.88	1.43	0.37	1.23	0.67	16	0.53
32	525.130	4685.771	1.94	1.38	0.37	1.23	0.59	16	0.52
33	525.105	4685.765	1.66	1.61	0.37	1.21	0.96	18	0.60
34	525.158	4685.753	1.75	1.51	0.38	1.20	0.80	17	0.57
35	525.108	4685.740	1.88	1.40	0.38	1.21	0.63	16	0.53
36	525.170	4685.784	1.88	1.40	0.38	1.21	0.63	16	0.53
37	525.108	4685.760	1.62	1.60	0.38	1.17	0.98	18	0.62
38	525.160	4685.765	1.99	1.29	0.39	1.20	0.47	15	0.50
39	525.080	4685.826	1.77	1.44	0.39	1.16	0.73	17	0.56
40	525.159	4685.750	1.77	1.44	0.39	1.16	0.73	17	0.56
41	525.156	4685.742	1.98	1.27	0.40	1.17	0.45	15	0.51
42	525.030	4685.821	1.67	1.49	0.40	1.12	0.84	18	0.60
43	525.049	4685.848	1.79	1.39	0.40	1.12	0.66	17	0.56
44	525.097	4685.756	1.74	1.41	0.41	1.11	0.72	18	0.58
45	525.078	4685.756	1.79	1.36	0.41	1.11	0.63	17	0.56
46	525.190	4685.821	1.96	1.24	0.41	1.13	0.42	15	0.51
47	525.083	4685.853	1.65	1.46	0.41	1.09	0.87	19	0.61
48	525.100	4685.764	1.74	1.39	0.41	1.09	0.68	18	0.57
49	525.080	4685.738	1.87	1.29	0.41	1.11	0.50	16	0.53
50	525.099	4685.765	1.87	1.29	0.41	1.11	0.50	16	0.53
51	525.073	4685.757	1.80	1.37	0.42	1.09	0.62	17	0.56
52	525.197	4685.790	1.91	1.25	0.42	1.11	0.45	16	0.52
53	525.111	4685.739	1.94	1.22	0.42	1.11	0.40	15	0.52
54	525.097	4685.756	1.93	1.22	0.42	1.10	0.39	15	0.52
55	525.081	4685.800	1.79	1.32	0.42	1.07	0.58	17	0.56
56	525.078	4685.756	1.49	1.58	0.43	1.05	1.09	20	0.67
57	525.006	4685.855	1.93	1.21	0.43	1.09	0.39	15	0.52
58	525.074	4685.771	1.82	1.28	0.43	1.07	0.51	17	0.55
59	525.142	4685.748	1.74	1.33	0.43	1.05	0.62	18	0.57
60	525.006	4685.855	1.82	1.27	0.43	1.06	0.50	17	0.55
61	525.149	4685.751	1.82	1.27	0.43	1.06	0.50	17	0.55
62	525.065	4685.810	1.66	1.39	0.43	1.03	0.74	19	0.60
63	525.157	4685.741	1.70	1.35	0.44	1.03	0.66	18	0.59
64	525.049	4685.771	1.85	1.24	0.44	1.06	0.45	16	0.54

Annex C. Dades el·lipsoïds de deformació i esquema estructural Puig Culip

65	525.055	4685.817	1.78	1.28	0.44	1.04	0.54	17	0.56
66	525.105	4685.702	1.84	1.24	0.44	1.05	0.44	16	0.54
67	525.090	4685.720	1.84	1.24	0.44	1.05	0.44	16	0.54
68	525.071	4685.788	1.78	1.28	0.44	1.03	0.53	17	0.56
69	524.971	4685.955	1.78	1.28	0.44	1.03	0.53	17	0.56
70	525.110	4685.740	1.57	1.43	0.44	1.00	0.85	20	0.64
71	524.981	4685.880	1.74	1.29	0.45	1.01	0.57	18	0.58
72	525.094	4685.784	1.86	1.20	0.45	1.03	0.39	16	0.54
73	525.085	4685.840	1.54	1.42	0.46	0.96	0.86	20	0.65
74	525.043	4685.836	1.72	1.26	0.46	0.97	0.52	18	0.58
75	524.967	4685.906	1.80	1.19	0.46	0.98	0.39	16	0.55
76	525.064	4685.901	1.75	1.23	0.47	0.97	0.47	17	0.57
77	525.078	4685.792	1.81	1.17	0.47	0.97	0.35	16	0.55
78	525.050	4685.895	1.65	1.27	0.48	0.92	0.58	19	0.61
79	525.090	4685.808	1.65	1.27	0.48	0.92	0.57	19	0.61
80	525.074	4685.769	1.64	1.25	0.49	0.90	0.55	19	0.61
81	525.099	4685.756	1.59	1.29	0.49	0.89	0.66	20	0.63
82	524.985	4685.805	1.55	1.31	0.49	0.88	0.70	20	0.64
83	525.069	4685.848	1.58	1.28	0.49	0.88	0.64	20	0.63
84	525.155	4685.774	1.78	1.13	0.50	0.91	0.29	15	0.56
85	525.066	4685.800	1.73	1.15	0.50	0.89	0.34	16	0.58
86	524.960	4685.935	1.62	1.22	0.51	0.86	0.51	19	0.62
87	525.195	4685.805	1.60	1.23	0.51	0.85	0.54	19	0.63
88	525.101	4685.700	1.59	1.21	0.52	0.83	0.52	19	0.63
89	525.160	4685.751	1.56	1.22	0.52	0.81	0.56	20	0.64
90	525.040	4685.793	1.75	1.09	0.52	0.86	0.22	14	0.57
91	524.994	4685.821	1.38	1.38	0.52	0.79	1.00	23	0.72
92	524.966	4685.930	1.61	1.17	0.53	0.81	0.42	18	0.62
93	525.089	4685.782	1.46	1.25	0.55	0.74	0.68	22	0.69
94	525.082	4685.778	1.52	1.20	0.55	0.75	0.54	20	0.66
95	525.085	4685.762	1.32	1.29	0.59	0.66	0.93	25	0.75
96	525.002	4685.824	1.41	1.14	0.62	0.60	0.49	21	0.71

A3.2 Esquema estructural Puig Culip.

