

### 3.4 Geometria i cinemàtica dels *sigmoidal quartz-rods*

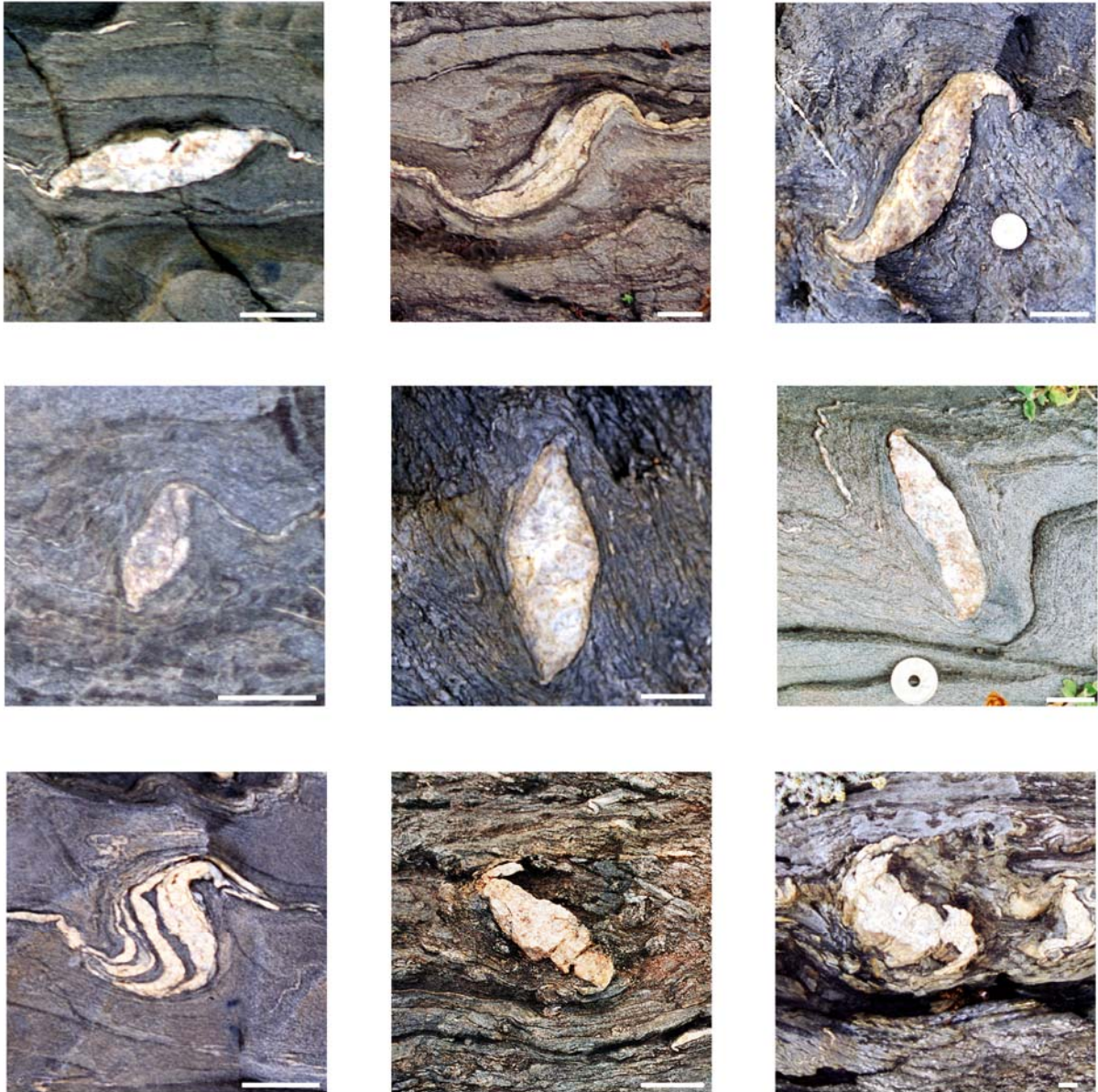
#### 3.4.1 Introducció

Una de les particularitats de l'àrea d'estudi és la presència d'una gran quantitat de cossos massius de quars caracteritzats per formes sigmoidals asimètriques en secció horitzontal, i amb una gran continuïtat al llarg de la secció horitzontal. D'una forma general aquestes estructures se'ls va anomenar *sigmoidal quartz-rods* (Druguet et al., 1997). Al llarg d'aquest treball aquest terme s'associarà al plegament o retreballament de qualsevol cos/vena de quars amb geometria lenticular i fortes variacions d'espessor a nivell lateral. El terme *rod* és aplicat a una gran varietat de cossos massius normalment de quars, que amb independència del seu origen tenen com a principal característica la seva linealitat (cossos molt cilíndrics). Normalment, aquesta geometria és reflex de condicions d'elevada extensió paral·lela al cos amb el desenvolupament de lineacions d'estirament. La geometria en secció és aproximadament el·líptica i en general representen cossos mecànicament competents dins de nivells més incompetents (Ramsay and Hubber, 1983). Segurament aquest concepte no s'adapta del tot bé amb geometria dels *sigmoidal quartz-rods* de camp, doncs en secció vertical són força irregulars i a nivell de geometria potser s'ajusten millor a un el·lipsoïd amb eix llarg en direcció vertical. Potser, fora més correcte emprar els termes *lenses* o *pods* utilitzats per estructures similars per Swanson (1992). Si restituïm la deformació D2, causant del desenvolupament de la geometria sigmoidal asimètrica, la configuració ideal pre-D2 consisteix en un cos massiu "simètric" definit per un parell de corbes biconvexes que en el seus punts de terminació presenten continuïtat lateral en forma de capa d'espessor més fi. Recentment, estructures de boudinage amb aquesta geometria se'ls ha denominat genèricament *drawn boudins* (Goscombe and Passchier, 2003; Goscombe et al., 2004). A nivell de geometria, representen un cas intermedi entre configuracions de capes amb espessor homogeni i cossos lenticulars aïllats. Al llarg del treball, s'utilitzarà la nomenclatura de boudin per la par lenticular massissa, i d'interboudin per la continuació lateral d'espessor més fi, sense cap implicació a nivell genètic. La gènesis dels *sigmoidal quartz-rods* és complexa i variada, i gran part no responen a les primeres interpretacions d'aquesta estructura (com a producte de boudinage per extensió paral·lela a la capa durant la D1). L'espectre dels *drawn boudins* és pot dividir de forma arbitrària en geometries clàssiques *pinch-and-swell* (Ramsay, 1967; Penge, 1976; Lloyd et al., 1982) i boudins lenticulars (Lloyd et al., 1982) o *tapering boudins* (Goscombe et al., 2004), atenent la continuïtat i l'espessor lateral de la continuació de capa. Aquest darrer cas representa geometries aïllades de boudins o amb zones d'interboudin

molt fines, mentre el primer cas és una capa continua amb inflexions dels interboudins suaus. Goscombe et al., (2004) denominaren a l'estructura resultant del plegament o retreballament dels *drawn boudins* com *ramp-folded*, per la disposició asimètrica dels boudins i dels interboudins. No sempre la geometria en corba biconvexa dels límits dels boudins és perfectament simètrica. És normal diferències en la posició dels seus punts d'inflexió, generant una transició cap a formes de *drawn boudins* asimètrics, o bé, sí és molt marcada *shearbands boudins* (Goscombe and Passchier, 2003; Goscombe et al., 2004). Al camp, aquestes estructures han sigut descrites com asimètrics *pinch-and-swell* o *pull-aparts* asimètrics del tipus 2A (Hanmer, 1986; Hanmer and Passchier, 1991). No obstant totes aquestes consideracions de geometria i nomenclatura, s'utilitzarà de forma general la terminologia de *sigmoidal quartz-rods*, amb preferència per aquelles geometries més semblants a boudins aïllats o connectats amb un interboudin llarg i d'espessor fi. Per a situacions intermèdies de venes de quars d'espessor irregular s'emprarà el terme clàssic de geometria *pinch-and-swell* o capa d'espessor inhomogeni.

### 3.4.2 Descripció geomètrica 2D

Durant la D2 aquests cossos foren retreballats atenent la variabilitat inicial de la geometria de la capa i donant lloc tant al desenvolupament d'estructures de plegament com d'estructures lligades a la dinàmica de partícules competents. A la zona d'estudi de Puig Culip, aquests cossos presenten una forma allargada i asimètrica en secció subhoritzontal (la secció YZ de el·lipsoïd de deformació finita). De manera preferencial presenten una geometria similars als plecs asimètrics, amb disposició de la part dels boudins en els flancs curts. Molts cops es presenten formant cossos aïllats, però normalment s'observen formant conjunts de múltiples boudins amb una distribució variable tant del grau de separació entre ells com del grau d'aprimament de l'interboudin. La part més massissa de quars varia entre formes de boudins el·líptics/allargades amb relacions d'aspecte entre 2-6, a conjunts on el boudin és format per un conjunt de segments de venes de capes o amb aspecte bandejat (Fig. 3.31). Normalment, dins d'aquests cossos no s'observa cap desenvolupament de la S2 i són formats per cristalls de quars de mida centimètrica. Això concorda amb un comportament de cos rígid o amb taxes de deformació finita baixes. Molts cops les terminacions dels boudins presenten segments de capa de quars trencats que amb la D2 es disposen donant formes plegades. L'angle d'obliquïtat o de rotació respecte a la  $S_{0/1}$  és molt variable, amb un rang entre 0 a 150°. En general, els angles de rotació més elevats són observats en les zones de transició o de major deformació. Normalment, el sentit de rotació aparent respecte la  $S_{0/1}$  és senestre.



**Fig. 3.31** Exemples de camp de sigmoïdal *quartz-rods*. Observar la variació de formes (aïllats o amb continuació en forma de capa, boudin compacta o format per un conjunt de venes, geometria sigmoïdal o recta). S'han ordenat respecte la rotació finita de l'eix llarg respecte la  $S_0/1$  (a les fotografies aquesta és disposa horitzontal). El rang de variació és molt ampli, variant entre  $0^\circ$  fins a  $150^\circ$ . La barra d'escala són 2cm.

L'aparent rotació dels boudin i la seva magnitud pot ser fàcilment estimada per aquells que presenten continuïtat lateral (Fig. 3.31 a, b i d), però és més incerta per a situacions de boudin aïllats i amb intensa crenulació (Fig. 3.31e,f). En aquests casos podrien ser interpretades com a inestabilitats lligades al medi multicapa. Però, la disposició semblant amb aquells que tenen continuïtat de capa, el diferent ordre de magnitud amb les estructures de l'encaixant i/o l'asimetria dels elements estructurals al seu voltant fan interpretar-les de forma general com a

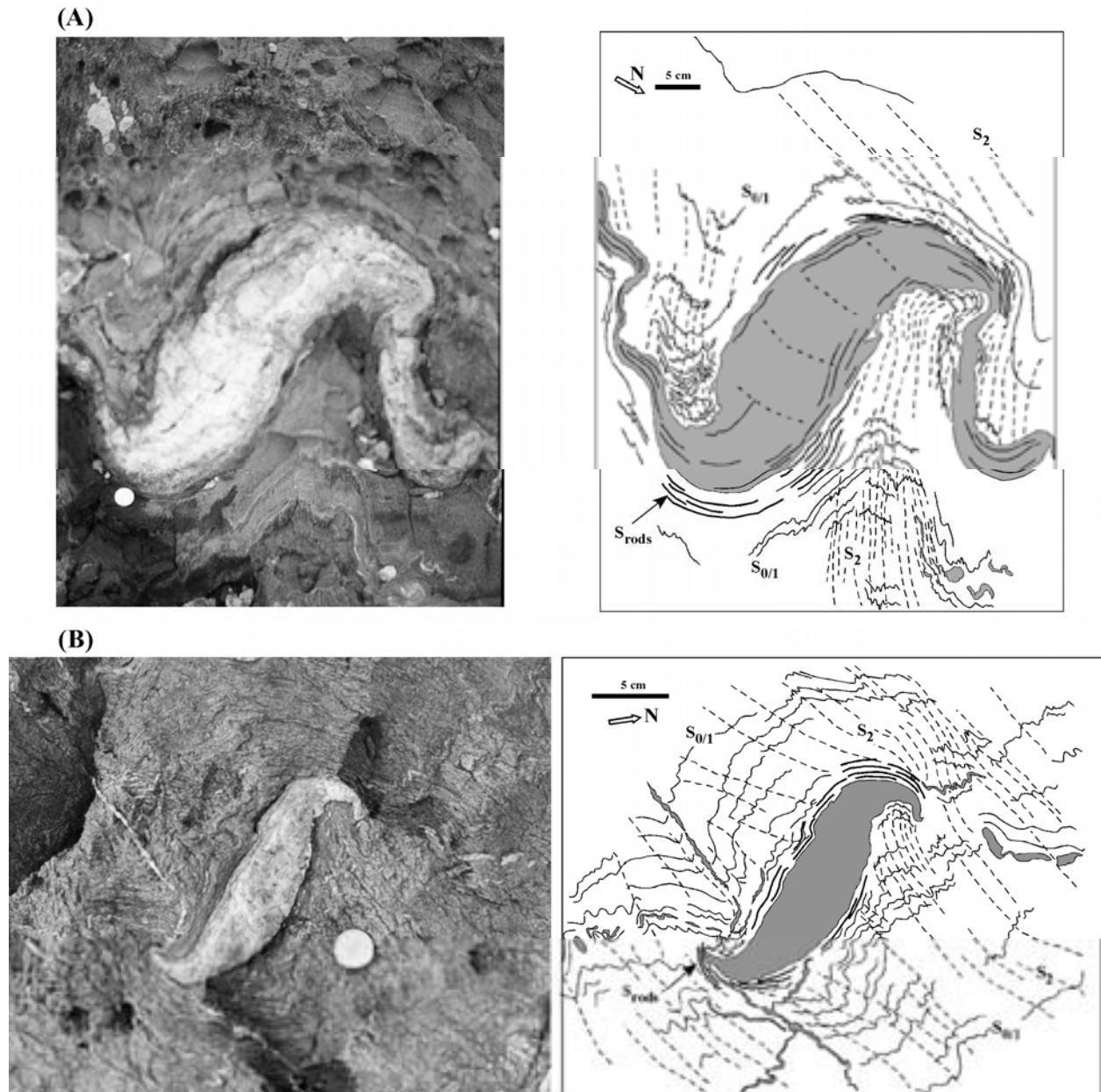
estructures “actives”. Aquest aspecte és de màxima importància alhora de futures interpretacions i serà ampliat en seccions posteriors.

La geometria *sigmoidal quartz-rods* en general recorden a un plec de simetria “S”, amb formes similars als porfiroclastes del tipus  $\delta$  (Passchier and Trouw, 1996), i aproximadament responen a geometries monoclíiques. Molt cops el boudin no és totalment recte i presenta una geometria plegada. Bàsicament aquests plecs es disposen a les parts marginals del boudin, donant la típica geometria sigmoïdal (Fig. 3.31c,g). Sempre hi ha un desenvolupament diferenciat entre l’arc extern i intern, i per tant no representen merament plecs d’arrossegament induïts per la rotació dels boudins. La concentració d’esforços a les zones apicals o marginals dels boudins, deu facilitar el seu desenvolupament com la seva fragmentació.

S’han observat els *sigmoidal quartz-rods* tant en nivells de metagrauvaques com metapelítes, encara que una gran part és desenvolupen al llarg dels contactes entre aquestes litologies (Fig. 3.31b). Per aquestes situacions hi ha la tendència a desenvolupar-se simetries triclíiques segurament lligades al diferent comportament mecànic entre les litologies de l’encaixant. De forma general, el màxim de rotacions s’observen per a litologies metapelites, però no és evident i elevades rotacions poden ser observades per a qualsevol litologia. Dins una mateixa localitat, on sembla factible una distribució homogènia de la deformació, la dispersió de la distribució de rotacions dels *rods* és en general elevada. És freqüent de trobar cossos amb relació axial similars però amb rotacions molt diferents. Segurament és un indicati sobre el desenvolupament heterogeni de l’estructura, possiblement relacionat amb condicions de contorn, aspectes de distribució de la geometria inicial i/o d’interacció entre pertorbacions.

Durant la deformació D2, els *rods* és varen comportar de forma general com a cossos mecànicament competents. Associats al seu desenvolupament és va generar la modificació de l’orientació dels elements estructurals planars com la S1 i la S2. La distribució d’aquests elements és asimètrica amb la presència de gradients de la disposició i intensitat en el desenvolupament de la S2. Aquests aspectes són similars tant en situacions amb continuïtat lateral de capa com a boudins totalment aïllats (Fig. 3.32). Els trets més significatius són:

- La S2 presenta una forma sigmoïdal i asimètrica al voltant dels *rods*, semblant a la refracció al voltant d’un plec. La S2 al aproximar-se a aquests cossos presenten una disposició general d’aparent rotació senestre i consistent amb la inferida per la part dels boudins. De forma local en els arcs interns dels boudins, la S2 presenta una disposició de



**Fig. 3.32** Fotografia i esquema de camp de la distribució dels elements estructurals al seu voltant per (a) amb continuïtat lateral i (b) aïllat. En general, la distribució és per a tots dos casos molt semblant. La S<sub>2</sub> presenta una forta variació al aproximar-se als boudins, amb tendència a concentrar-se als arcs interns i dispersar-se a la seva part central. En els arcs interns és possible diferenciar una foliació local que retreballa la S<sub>0/1</sub> i associada a la rotació del boudin i/o resistència a la deformació (S<sub>rods</sub>). Observar les relacions de tall d'obliquïtat dels *rods* amb la S<sub>0/1</sub>.

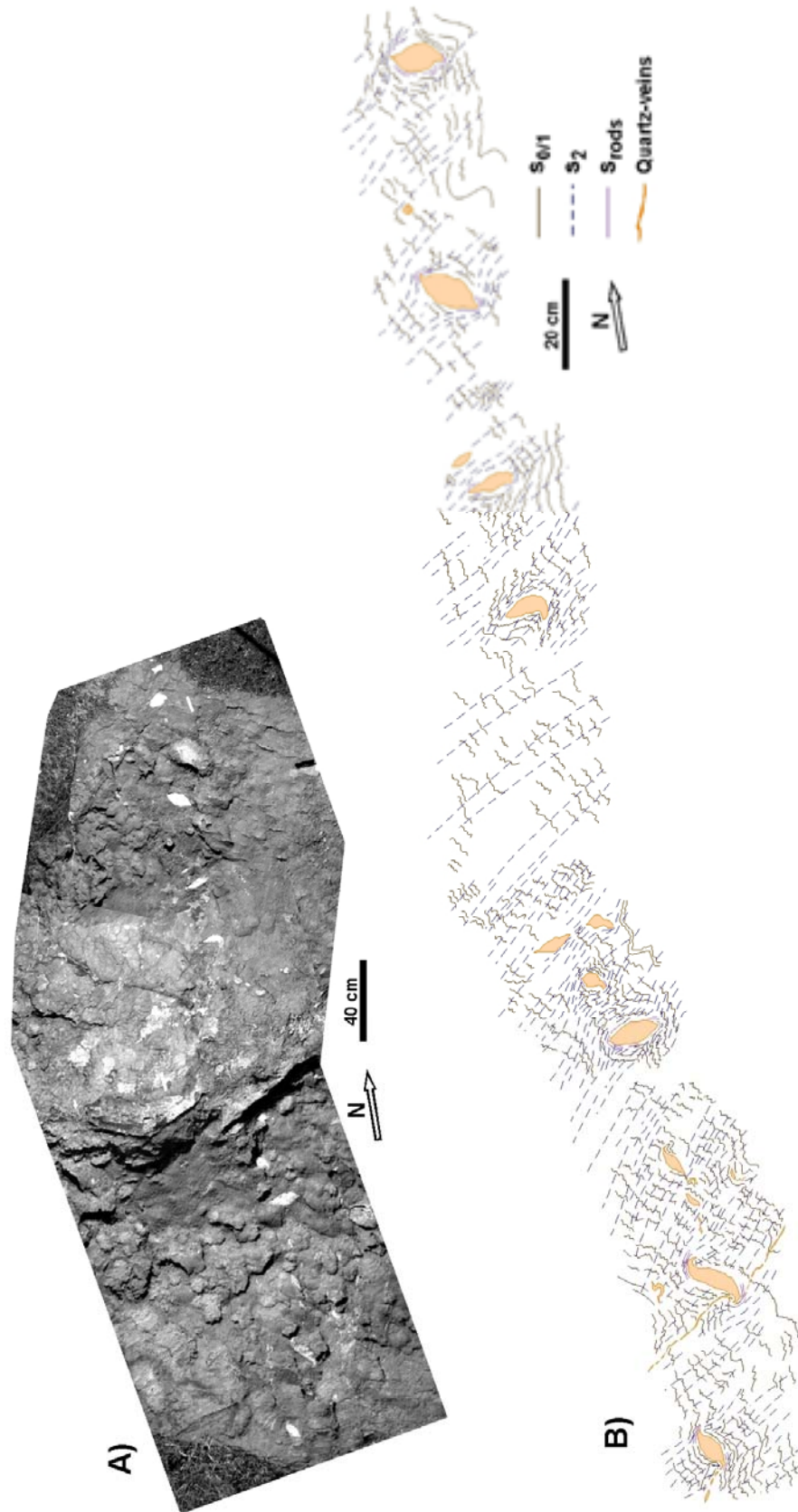
rotació en sentit oposat a la rotació dels boudins. Mostra una orientació d'aparent rotació dextral. Això s'observa tant en els típics *rods* amb continuïtats laterals com en els aïllats. No ha de representar tan sols l'efecte de la localització de la xarnera al marge dels boudins. Podria ser indicatiu d'un increment de les components d'aixafament durant la deformació o de l'increment més efectiu de les components de coaxials amb el progrés de la deformació (Fossen i Tikoff 1993). Però segurament és més factible d'associar amb la

cinemàtica al voltant d'un cos rígid o al desenvolupament asimètric d'una inestabilitat de plec. És produeix una partició de la deformació amb la possibilitat de zones als arcs interns amb sentits de vorticitats oposats al sentit de rotació dels *rods* respecte la  $S_{0/1}$ .

- No existeix continuïtat de la  $S_2$  a través dels *rods*, ni a les parts dels boudins on no es percep el desenvolupament de cap foliació, ni per a les zones d'arc intern o extern (Fig 3.32). En aquesta darrera zona, s'observa una diferència d'orientacions de la foliació entre l'arc extern i intern de més de  $90^\circ$ . Aquest últim fet millor s'aprecia en aquells *rods* localitzats als límits entre litologies. A les parts dels boudins es pot observar un sistema de fractures ortogonals amb disposició obliqua al seus límits i que no continuen a l'encaixant. En general el sistema paral·lel a la  $S_2$  de l'encaixant és troba molt millor desenvolupat.
- Convergència de les trajectòries de la  $S_2$  als arcs interns i externs. Al voltant de l'arc extern hi ha el desenvolupament d'una foliació penetrativa amb disposició subparal·lela als límits dels plects i al  $S_{0/1}$ . Aquesta foliació és desenvolupa en general al voltant dels *rods* seguint la forma d'aquests cossos però asimètricament distribuïda. El seu màxim desenvolupament és a les zones de curvatura externes, mentre als arcs intern no s'observa. L'amplada de banda és reduïda, essent molt local. Parcialment retreballa la  $S_2$ , però sembla més una substitució local de l'orientació d'aquesta. Retreballa la  $S_{0/1}$  i l'aprofita pel seu desenvolupament. Aquesta foliació s'ha interpretat com associada a la rotació i efecte rígid dels *rods* ( $S_{rods}$ ). El grau de desenvolupament i d'extensió depèn de la mida absoluta i de la litologia (disminueix amb l'augment de competència del material). L'origen d'aquesta foliació ha d'anar lligada a la modificació del flux per la rotació dels boudins i al relloc al llarg de la  $S_{0/1}$ , com a conseqüència de l'augment de les components angulars de la deformació ( $\dot{\gamma}$ ). Qualitativament, aquestes han de representar zones amb un elevat grau de no coaxilitat. El desenvolupament de la  $S_2$  disminueix al apropar-nos als costats llargs dels boudins, originant que la disposició de la  $S_{0/1}$  al llarg d'aquests costats sigui recta i sense presentar crenulacions D2.

Totes aquestes observacions també són visibles a nivell de conjunt de *rods*, on la disposició del elements estructurals com dels boudin semblen indicar sentits de cisalla paral·lels a la  $S_{0/1}$  i de vorticitat senestres (Fig. 3.32). A nivell de conjunt, la geometria típica és al desenvolupament de geometries imbricades amb sentits sintètics de rotació (Fig. 3.33). Però la disposició no és en general simple podent-se observar elevades diferències de rotació per a cossos amb relacions





**Fig. 3.33** (a) Fotografia i (b) esquema de camp d'un conjunt de sigmoïdal quartz-rods. La disposició dels elements estructurals són semblant. Observar la diferència d'orientacions i l'aparent independència respecte la relació axial dels cossos. També la possibilitat de plegament de boudins. L'encaixant són metapelites molt crenulades d'una zona de xarnera d'escala decamètrica (U.T.M. 525.065, 4685.810).

axials semblants. Un bon exemple d'aquestes complicacions són mostrades a la Fig. 3.33. En un primer anàlisi qualitatiu sembla consistent la orientació de tot el conjunt de *rods* i disposició de la S2. A nivell de detall però, xoca tant la possibilitat de plegament d'un boudin com la disposició subparal·lela a la S2 d'una sèrie de petits cossos amb relacions axials elevades. No semblen associades a interacció entre pertorbacions. La interpretació més plausible d'aquests aspectes ha de tendir a un control de les pertorbacions de l'encaixant en la disposició d'aquests boudins, lligats a la gènesis d'aquests cossos o reflexes de la disposició geomètrica 3D que no podem observar.

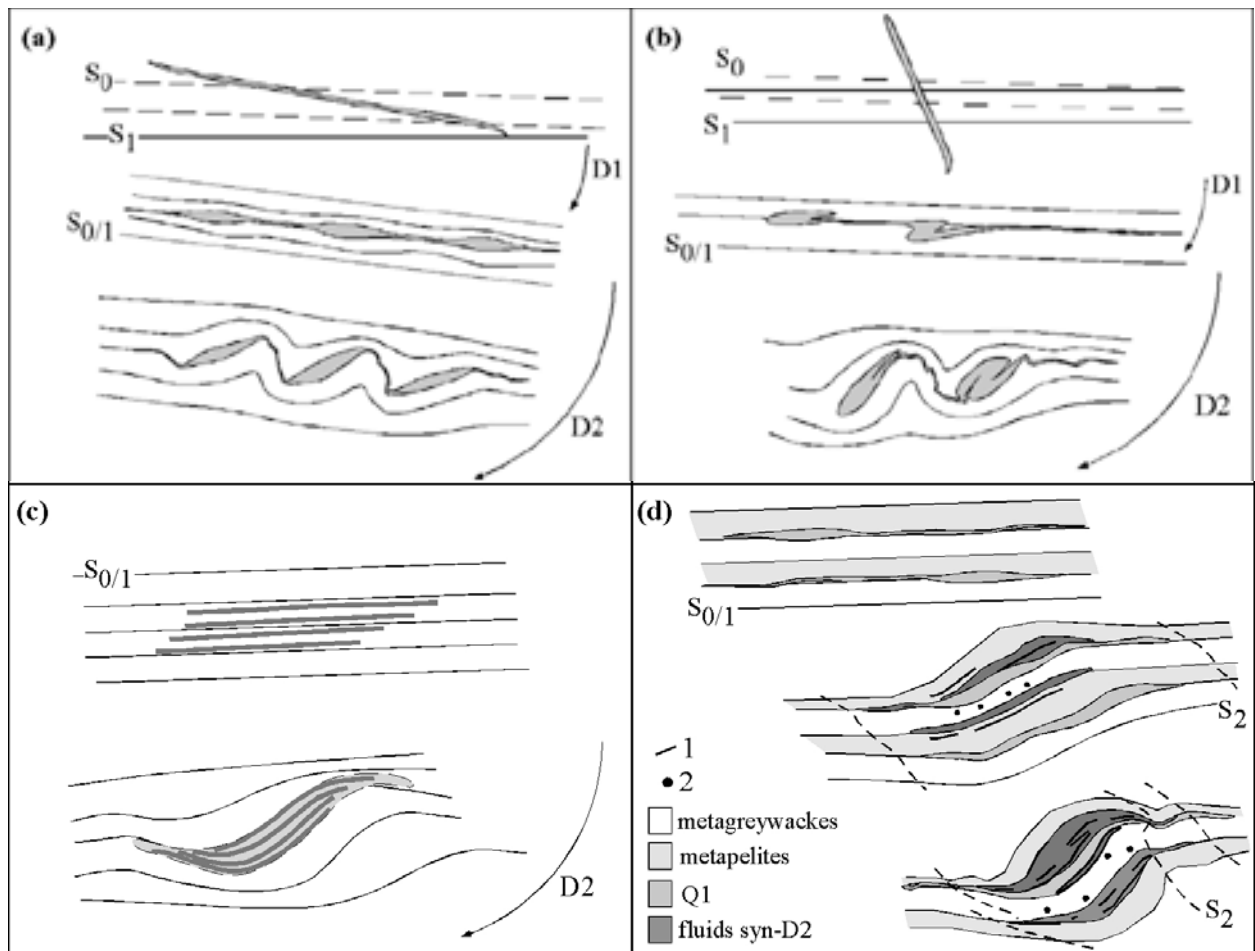
### 3.4.3 Origen dels *rods*

Els quartz-*rods* presenten mides molt variables que poden anar des de centimètriques fins a mides mètriques, abastant un ampli rang de valors la relació axials ( $R_i$ ) dels boudins, però, el rang majoritari de  $R_i$  dels sigmoïdal *quartz-rods* és entre 2 a 6. Són minoritaris els exemples amb secció circular ( $R_i=1$ ), mentre aquells amb  $R_i \gg 6$  el grau d'asimetria és molt dèbil.

La mida absoluta planteja un problema: quin és l'origen d'aquests cossos. En general, la gènesis d'aquesta estructura ha estat explicada com a venes de quars originades abans o durant la D1, i sistemàticament plegades o allargades segons la seva orientació (Carreras i Druguet 1994, Druguet et al. 1997). En general, representarien el producte de *boudinage* o "necking" de les venes Q1 durant la D1. Aquesta interpretació té al seu favor l'observació de venes amb geometria de boudin i interboudin, ben definible a escala centimètrica. Però, com s'expliquen els cossos de grans dimensions?. Donada les seves mides s'haurien d'observar als nivells metapsammítics i/o metapelítics els efectes de les zones de *pinch & swell* i, a part haurien d'estar relacionats amb altres cossos similars. Cap de les dues coses són observades, ni cap amortiment de la  $S_{0/1}$  per efecte del *boudinage*, ni tampoc cap relació amb altres cossos doncs en general sempre s'observen aïllats. Tampoc pot ser interpretat com antigues zones de xarnera de la deformació D1. Abans de qualsevol interpretació cinemàtica o de la pròpia modelització del desenvolupament dels sigmoïdal *quartz-rods* és necessari comprendre els seus possibles orígens. A partir de les observacions de camp, s'han inferit cinc possibles factors per explicar la seva gènesis:

- 1) L'origen clàssic a partir del *boudinage* de les venes de quars durant la D1. Les parts més massives es varen comportar com cossos més competents durant la D2, plegant-se amb arranjaments asimètrics (Fig 3.34a).





**Fig. 3.34** Esquema interpretatiu de la gènesis i evolució dels *quartz-rods* durant la D2. (a) Origen clàssic mitjançant boudinage o “necking” de venes de quars durant la D1. Durant la D2 representen cossos competents que enregistren preferencialment components de rotació. (b) Corresponen a zones de xarnera dels plec F1 que es comporten com a cossos competents durant la D2. (c) Originats per un efecte multicapa entre un conjunt de venes de quars molt pròximes. Al final donen una geometria bandejada. (d) *Quartz-rods* poligenètics. Desenvolupats en part per la precipitació de fluids durant la D2. Originen un “metamorfisme de contacte” de l’encaixant, amb la blastesi i recristalització dels minerals com biotita, granats, amfibols, etc.

- 2) Representen zones de xarneres de plecs F1. Encara que a escala mètrica no s’observen estructures relacionades amb la D1, a escala centimètrica és possible distingir estructures F1 a les venes de quars. Aquests plecs, típicament són molt isoclinals i durant la D2 es podrien comportar com una zona més competent. Això pot explicar perquè en molts d’aquests cossos només s’observa continuïtat per un dels seus extrems.
- 3) Originats a partir de la formació de dominis mecànicament rígids en zones amb gran abundància de venes Q1. Durant la D2 es desenvolupà la nucleació preferent d’instabilitats en aquestes zones, segurament afavorides per les condicions de pèrdua d’àrea i partició de la deformació entre l’encaixant i les venes de quars. Així en molts *rods* s’observen traces de la S1 i traces de la litologia de l’encaixant.

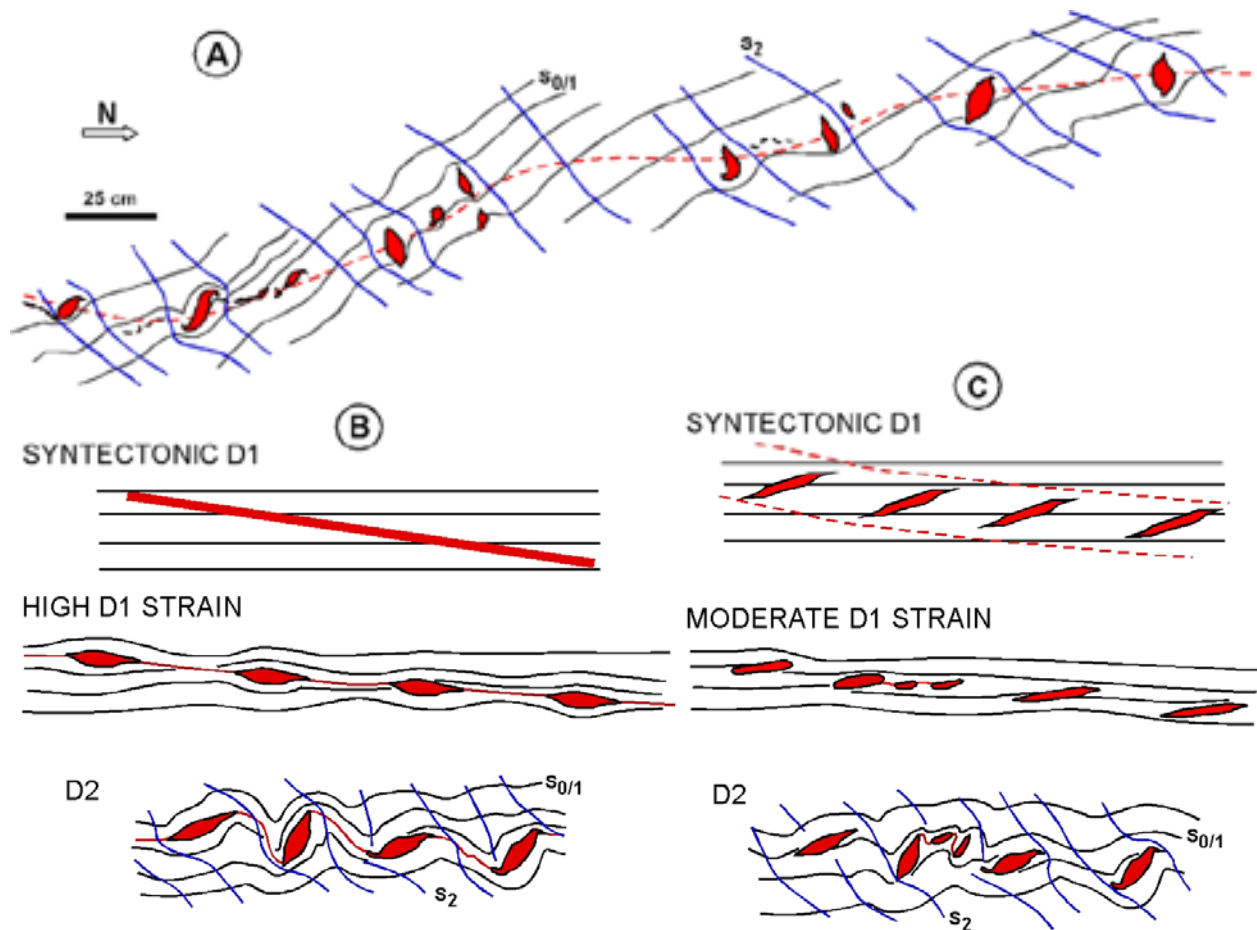
- 4) La seva formació total o parcialment és sincinemàtica amb la D2. El seu origen és conseqüència de la mobilitat de fluids i la preferent precipitació d'aquests (Fig 5.1d).; Segurament, les venes i boudins Q1 han d'actuar com a nuclis preferents de precipitació o cristallització juntament amb el desenvolupament dels plecs F2. A partir de cossos inicials Q1, hi ha un increment de la seva mida durant la D2. Mentre en els altres casos són sempre majoritàriament formats per quars, aquests és caracteritzen per ser polimineralògics (sobretot de quars i feldspat sòdic), amb restes aïllades de l'encaixant o traces de la  $S_{0/1}$  dins d'aquests cossos. Molt sovint s'observen reaccions hidrotermals al llarg del contacte amb l'encaixant, generant-se entre d'altres abundants granats en els nivells més psamítics, mentre que als nivells pelítics s'originen amfibols i la recristallització de la biotita. Mecànicament s'han comportat com a cossos rígids, representant focus d'inestabilitats al voltant dels quals s'han desenvolupat gradients de deformació similars als observats en els altres casos. Segurament aquest pot ser l'origen dels *rods* de quars de mides mètriques que s'observen associats a les xarxes de plecs F2 mètrics.
- 5) Finalment no s'ha de descartar que la geometria lenticular i aïllada sigui una herència de la morfologia d'emplaçament de les venes i dics de quars durant la D1 o D2. Recentment gran part dels cossos pegmatítics amb geometries de boudinage han estat reinterpretats com a morfologies primàries (Bons et al., 2004), lligades a la intrusió i col·lapse dels fluids a llarg de discontinuïtats planars. Però, a nivell de sigmoïdal *quartz-rods* no s'observa una elevada continuïtat dels conjunts, ni geometries de cantonades dels boudins ni cap estructura de sutura d'interconnexió entre els diferents cossos. Geometries irregulars retreballades per la D1 haurien de ser molt abundants, però de difícil identificació pel caràcter polifàsic de la deformació.

Els diferents orígens possibles dels *rods* impliquen almenys, una distinció entre aquells que són pre-D2 i aquells que són sincinemàtics amb la D2. Els primers dos factors d'origen clarament representen casos pre-D2, mentre el cas quart ho és sin-D2. Aquells cossos amb aquest darrer origen no han estat utilitzats per cap dels anàlisi de caracterització de la cinemàtica, doncs no hi ha cap relació coherent entre la relació axial d'aquests cossos amb la deformació i la rotació que enregistren. En canvi el tercer cas vàlid al representar una geometria pre-D2 és de difícil utilització alhora de caracteritzar la seva relació axial i separar dels casos de plecs multicapes de l'encaixant. Els darrer dels factors representaria una modificació de la interpretació de la D1

sense una modificació de la gènesis de la morfologia amb la deformació D2. Encara que potser no és del tot correcte la utilització generalitzada dels termes boudins i interboudins, perquè van associats a unes condicions de gènesis determinada, s'abúsarà d'aquesta terminologia per la descripció geomètrica dels *rods* amb independència de la seva gènesis. Això ens permetrà simplificar els termes alhora de sistematitzar la geometria i els paràmetres que condicionen el desenvolupament d'aquesta estructura.

Aquesta sèrie de factors ens permet interpretar amb certa coherència l'origen dels *quartz-rods* de camp a nivell individual i per a situacions de conjunt interconnectats. Però, per a conjunts de cossos aïllats i amb continuïtat de fins un parell de metres, no és tan senzilla la seva interpretació. Un esquema i anàlisi estructural d'un d'aquests conjunts és mostrat a la Fig. 3.35. En general mostren un arranjament asimètric amb una disposició de l'envolvent de tot el conjunt lleugerament obliqua a la  $S_{0/1}$  ( $<20^\circ$ ) i amb petites variacions de la seva direcció entre N-S a NW-SE. A nivell d'aflorament, l'angle d'obliquïtat entre els límits de la part més massissa dels *rods* i la  $S_{0/1}$  és entre 10 a  $30^\circ$ , lleugerament superior a la de l'envolvent. Localment, a les zones d'arc interna dels sigmoïdal *quartz-rods*, aquest angle pot arribar a ser pròxim a ortogonal (veure Fig. 3.32). Indicaria una posició variable respecte a la  $S_{0/1}$ , amb cert caràcter inicialment ja sigmoïdal. Alguns dels *rods* amb morfologies més primes i allargades, sense geometria sigmoïdal i disposicions paral·leles a la  $S_2$  presenten angles d'obliquïtat amb la  $S_{0/1}$  entre 60 a  $90^\circ$ . Altra característica important és que la  $S_{0/1}$  és continua al llarg de les zones entre els boudins. Una sutura que interconnecti a tot el conjunt no és visible, però sí que s'observa a nivell local.

La interpretació clàssica d'aquest aflorament ha estat a partir d'una dic de quars emplaçat sintectònicament i boudinat durant la D1, que posteriorment és plegat durant la fase D2 (Fig. 3.35b). A nivell d'interpretació qualitativa no és problemàtica, però un anàlisi de més detall posa de manifest alguns inconvenients. Geomètricament no concorda la continuació de la  $S_{0/1}$ , ni que s'observi una adaptació d'aquesta foliació a la zona d'interboudin ni tampoc s'observi una superfície de sutura. Podria ser que tingués un origen més precoç i que durant la D1 i D2 ha estat intensament retreballada, esborrant part d'aquestes evidències. Però el menys concordant d'aquesta interpretació és la deformació necessari pel seu desenvolupament. A nivell qualitatiu, no obstant l'escurçament moderat de la D2 (aprox. 55%), no hi ha solapament dels boudins. Una primera estimació de l'allargament associat és d'un 350% sense restituir la D2. Si aquesta és extreta, almenys impliquen allargament entre un 700-850%. Implica relacions axials de l'el·lipse



**Fig. 3.35** (a) Esquema de camp de la Fig. 3.33. (b) Esquema interpretatiu suposant un origen a partir de boudinage d'un dic de quars. La deformació associada a la D1 ha d'implicar condicions d'alta deformació. (c) Esquema d'interpretació a partir d'un conjunt de venes de quars aïllades i retreballades durant la D1. Veure text principal.

seccional de deformació ( $R_s$ ) entre 40-50!. I suposar la D1 com una deformació d'elevada intensitat, almenys a nivell local, on al S1 hauria de ser molt penetrativa a la roca i contraria a la conservació del bandejat composicional primari dels materials.

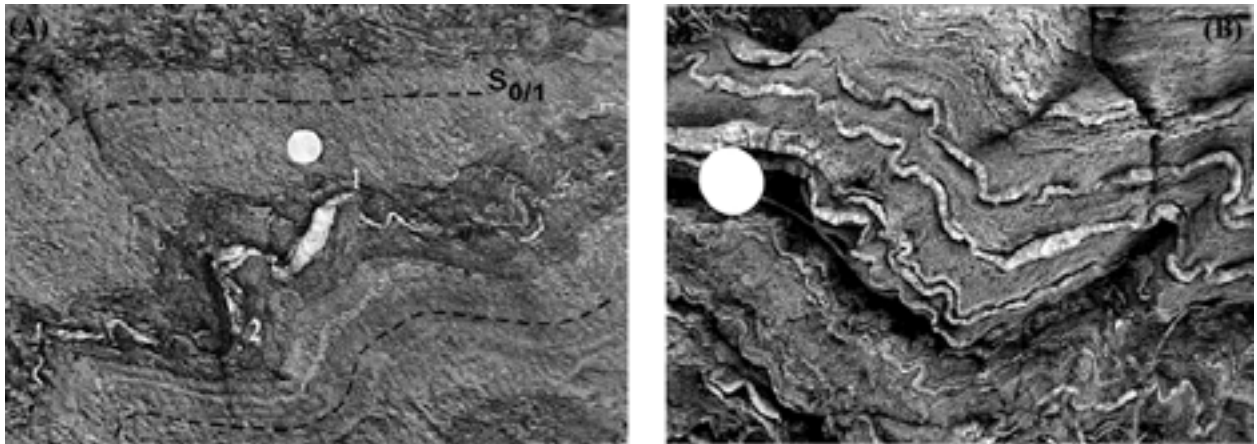
Una interpretació alternativa és mostrada a la Fig. 3.35c, on l'origen inicial dels *quartz-rods* s'ha suposat a partir d'un conjunt de venes de tensió aïllades i no interconnectades. Segurament presenten una geometria corba als seus extrems. En general a baix angle, encara que algunes presentarien una major obliqüitat, amb disposicions semblants a les venes tensionals descrites per Hudleston (1989) o Swanson (1992). Permet explicar l'absència de superfície de sutura i el pas de la  $S_{0/1}$  a través dels "interboudins". Durant la D1 són retreballades, donant geometries lleugerament sigmoïdals i lenticulars, i amb la possibilitat de desenvolupament local de boudinage. Pera aquestes consideracions, l'estirament local al llarg de les superfícies de sutura detectades indicarien valors entre un 100-150%, o  $R_s=4-6$ . Aquesta valors són més coherents

indicant una deformació D1 moderada, segurament intensificada per la natura de l'encaixant metapelític i amb un suposable comportament més incompetent respecte els nivells de metagrauvaques. Durant la D2 la natura inicial no simètrica i sigmoïdal dels límits dels boudins, explicaria la possibilitat de plegament dels extrems dels boudins o, fins i tot, dels propis boudins.

#### **3.4.4 Relació entre els sigmoïdals *quartz-rods* i l'encaixant. Natura de la pertorbació.**

Alhora de plantejar un estudi geomètric de més detall és necessari plantejar quina és la relació a nivell de superposició de pertorbacions entre els *quartz-rods* i l'encaixant (veure capítol 1.4). Encara és més necessari per la natura anisòtropa i bandejat composicional de la seqüència metasedimentària. Per poder comprendre el seu desenvolupament, s'haurà d'identificar quins són els aspectes de disposició, geometria etc. propis al plegament de capes inhomogènies i aïllar aquelles possibles distorsions originades pel domini de pertorbacions de l'encaixant. S'han d'identificar condicions dels *quartz-rods* on es comporten activament, d'aquelles situacions no actives ja sigui per fluxos distribuïts (per exemple plecs) o localitzats (bandes de transposició S2). Donat que la modelització numèrica és centrada en el plegament de capes aïllades i mecànicament actives (*single-layers*), s'han de reconèixer i definir una sèrie de criteris per seleccionar les estructures de camp que millor s'aproximen a aquestes condicions: capa única activa.

L'increment del grau de localització i la disharmonia de la geometria dels sigmoïdals *quartz-rods* respecte l'encaixant o altres venes de quars, s'han interpretat com a indicis d'independència respecte a un comportament multicapa (Fig. 3.36a, b). Sobretot a nivell de comparació entre les longituds d'ona de les pertorbacions de l'encaixant i dels *rods*. Longituds de pertorbacions dels *rods* entre 3-4 vegades majors a la de l'encaixant són tractades com a situacions actives. Altres criteris, són el desenvolupament d'una foliació induïda per la rotació i/o el caràcter més resistents dels *rods* o la localització de gradients de distribució i de la intensitat de la S2. L'amortiment de la deflecció de la Ss/1 associada al desenvolupament dels *rods* és en part funció de la relació axial d'aquests cossos ( $Ri$ ), i presenta una àrea d'influència entre 2 a 3 cops la llargada dels cossos (Fig. 3.37). La seva disposició és el·líptica i coincident amb l'eix llarg dels boudins o disposició de flanc curt. La propagació de les inestabilitats en el medi també és controlada pels canvis litològics. D'aquesta forma la deflecció és ràpidament amortida amb els canvis de litologia (sobretot amb els nivells metapelítics). El caràcter heterogeni de la distribució de materials origina diferències en la seva simetria a cadascun dels dos costats dels *rods*. Això fa que les zones afectades sempre siguin relativament petites i que en general l'origen dels plecs



**Fig. 3.36** (a) Vena de quars aïllada dins un nivell metapelític. Mentre el boudin (1) mostra un independència respecte les pertorbacions de l'encaixant i és pot considerar com una estructura "activa", per el (2) la seva geometria és condicionada pel plecs de l'encaixant. Aquest darrer cas representa una estructura "no activa" i no serà utilitzada per l'anàlisi de la cinemàtica i la deformació a partir de *quartz-rods*. (b) Efecte multicapa per la proximitat de les venes de quars i de l'encaixant. Tampoc no seran emprades per futurs anàlisi. Únicament condicions de capa aïllada i activa.

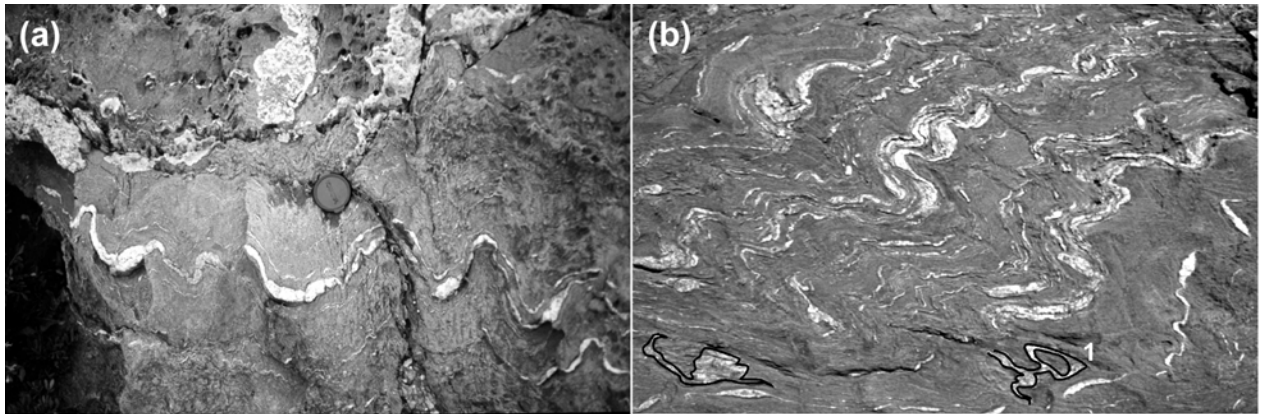


**Fig. 3.37** Variació de les inestabilitats al voltant d'un *quartz-rod* en un nivell metagrauwàquic. Aquestes normalment són ràpidament amortides a l'encaixant amb àrea d'influència entre 2-3 cops la longitud d'aquests cossos. Observar que la pertorbació no es troba associada al plegament multicapa de la seqüència metasedimentària.



mètrics i decamètrics no siguin el reflex de la rotació d'aquests cossos; encara que es deuen beneficiar d'aquestes inhomogeneïtats en el medi a l'hora de nuclear-se. Ni tampoc una explicació subordinada de la rotació dels *rods* per la rotació dels seus flancs.

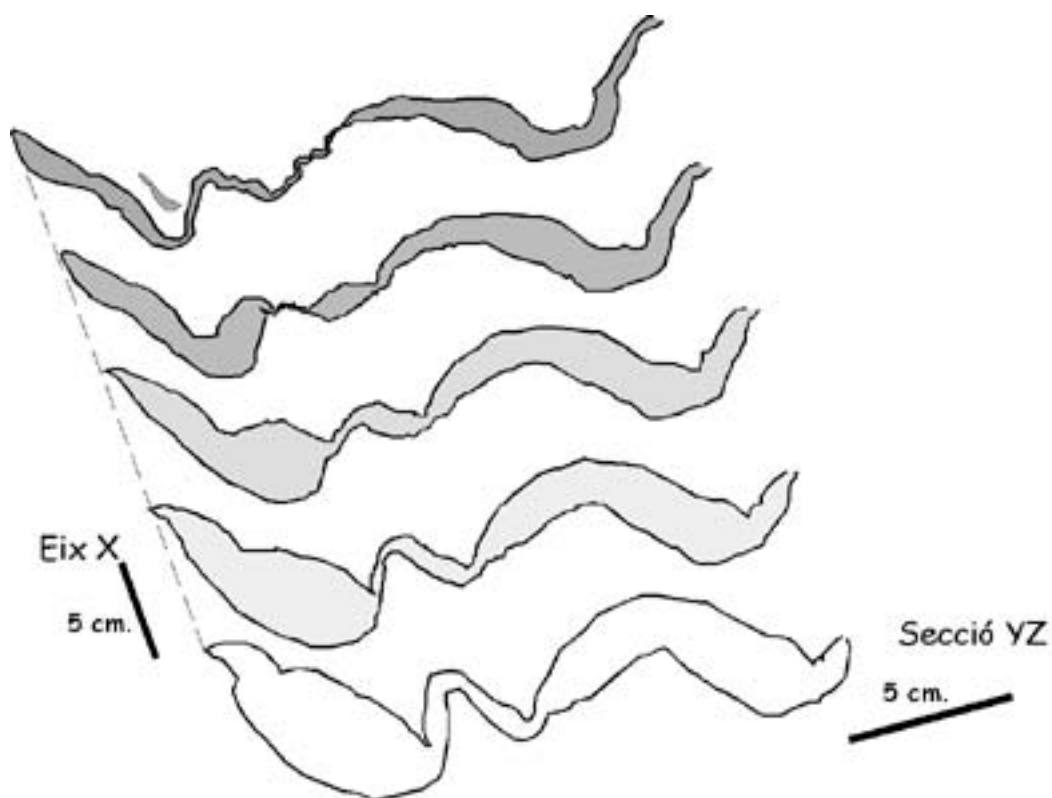
En general, aquests aspectes són dependents de l'espessor i longitud absoluta dels quartz-rods, de l'alternança del gruix de la seqüència metasedentària, el grau de desenvolupament de la crenulació S2 i de la relació volumètrica de venes de quars dins la roca. Per a espessor de les venes  $b < 2-3$  cm, la disposició de l'estructura és altament controlada per l'encaixant. Els *rods* mostrats a les figures anteriors són exemples de situacions relativament actives i independents de l'encaixant. Però, també abunden exemples de geometries no actives o altament complexes que no seran utilitzades pel futur anàlisi geomètric ni la seva modelització (Fig. 3.38).



**Fig. 3.38** (a) Exemple de camp de vena de quars plegada harmònicament amb l'encaixant. S'han interpretat com "no actives". (b) Organització complexa en una zona de xarnera. Hi han efectes des de efectes multicapa, sentits de rotació oposats o la presència de venes de quars amb orientació horitzontal (marcada amb corba negra i n°1). Observar el plec d'interferència F2.

### 3.4.5 Geometria tridimensional.

Des d'un principi s'ha assumit que els *rods* representaven una estructura caracteritzada per la seva linealitat en vertical. La manca de seccions verticals al camp fa difícil poder establir la geometria tridimensional real dels *quartz-rods*. Mentre en secció horitzontal presenten una geometria sigmoïdal i lenticular, quan són visibles en vertical tenen una tendència a ser molt més allargats i fusiformes, amb geometries que recorden a estructures *pinch-and-swell*. També s'observa una carència de disposicions asimètriques. Es poden aproximar a una geometria de cilindre aixafat de longitud axial curta. La figura 3.39 mostra un esquema de diferents seccions perpendiculars a l'eix dels boudins per a un exemple real de vena de quars Q1 d'espessor centimètric. Una seqüència de talls permet observar la variació d'espessor d'aquests cossos en la

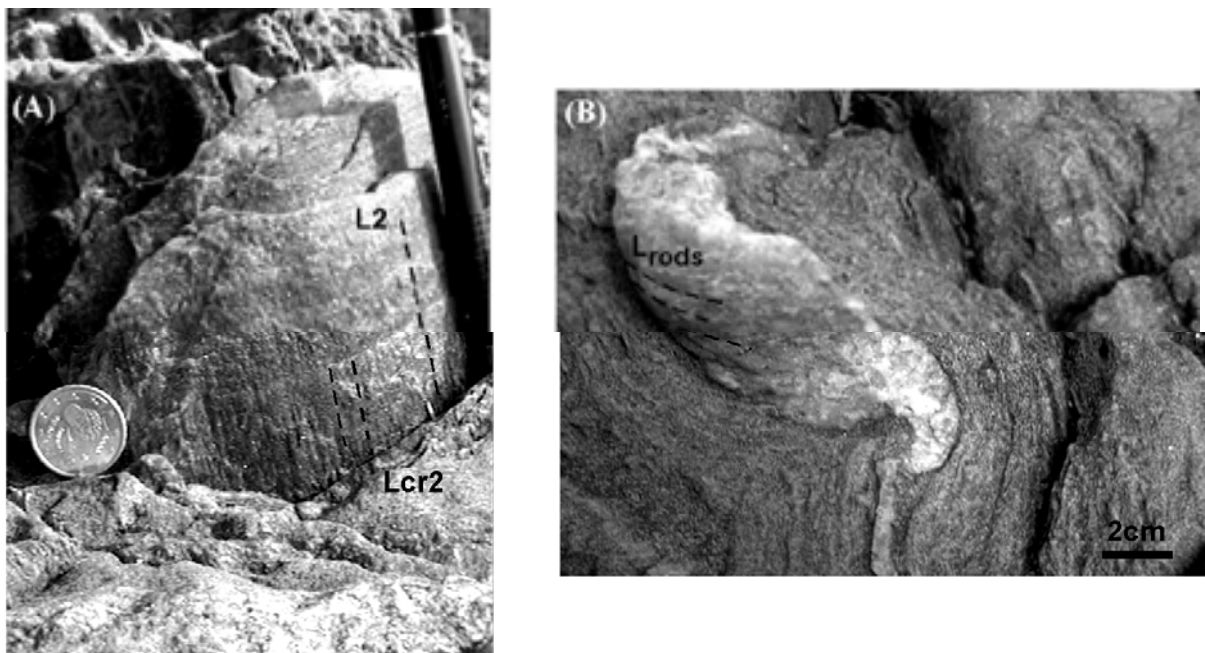


**Fig. 3.39** Esquema d'un exemple de camp de la variació de la geometria en secció dels *quartz-rods* al llarg de l'eix dels boudins (aproximadament amb una orientació subvertical).

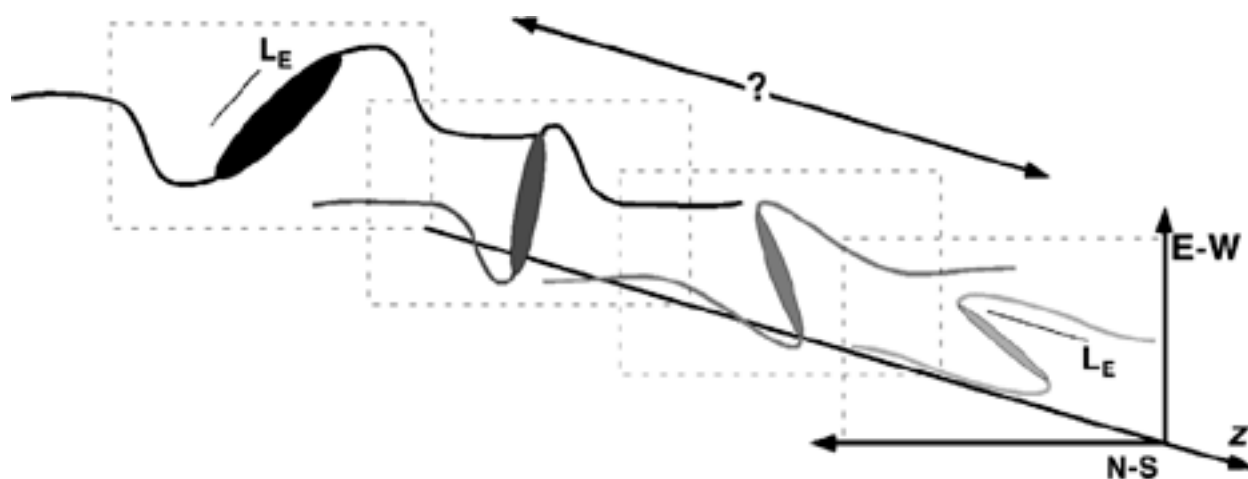
direcció vertical. Aproximadament, els eixos dels plecs F2 s'adapten a la geometria dels boudins, amb variació d'orientacions verticals fins a moderadament inclinades amb angles de *pitch* entre  $\pm 30-40^\circ$  respecte el sentit de cabussament.

La variació d'espessor origina també una modificació de la relació axial ( $R_i$ ) dels boudins. Per l'exemple mostrat, en una distància de  $\sim 20$ cm passem d'un boudin d'espessor  $b \sim 3$ cm i relació axial  $R_i \sim 3$ , a un segment de capa irregular amb espessor  $b \sim 0.5$ cm i  $R_i > 10$ . L'angle de rotació dels flanc del plec també varia, incrementant-se amb l'aprimament de la capa i la proximitat a una estructura de plegament. Això genera incertesa sobre els significat i l'objectivitat de les dades tant de relacions axials com d'angle de rotació dels *rods* que puguem mesurar a la secció horitzontal. A nivell qualitatiu, els *quartz-rods* de mida de desenes de cm. sembla que la continuïtat en vertical és lleugerament major, de la mateixa forma que la seva rotació. De forma qualitativa, la tendència dels *rods* a ser uns cossos cilíndrics o més esfèrics pot ser detectada atenent l'amplada de la zona de deformació afectada per a la rotació d'aquestes partícules. Per a relacions entre 2 a 3 vegades la longitud de l'eix màxim, haurien de ser força cilíndrics, doncs per a geometries esfèriques o el·lipsoïdals aquesta és molt restringida al seu voltant, i amb longituds inferiors a una vegada la llargada de l'eix (Cox 1970).

L'estudi de les seccions verticals permet observar la disposició de la lineació d'estirament. En general, en la superfície dels *rods* és pot observar una lineació d'estirament d'orientació similar a la lineació de crenulació dels plecs F2 de l'encaixant (Fig.3.40a), però de forma similars a les venes de quars Q1 aquesta és plegada pels plecs F2 associats als *rods*. Aquesta també és obliqua als eixos dels boudins. A nivell d'interpretació lògica hauria de representar la L1, però no s'acaba d'entendre la seva relació amb la deformació D2 i els eixos dels plecs F2. A detall sembla la crenulació de les capetes que formen la vena de quars. Per a situacions de *rods* d'espessor fi (<1cm), la disposició és tal com s'ha explicat prèviament. Per a *rods* de majors dimensions (>4cm), la disposició de la lineació és subhoritzontal i subparal·lela a la direcció de màxima rotació (Fig.3.40b). És adaptativa a la seva geometria. Les zones on millor s'observa és als arcs externs de l'encaixant dels *rods* de mides mètriques. El fet del caràcter sincinemàtic amb la D2 d'aquests últims, fa interpretar la lineació com associada a la rotació dels *rods* durant la D2. A nivell interpretatiu i més qualitatiu (Fig. 3.41), la variació d'espessor absolut i potser, de la relació axial dels sigmoïdal *quartz-rods* sembla que origina una variació de la rotació total, amb decreixement cap a situacions de morfologia de partícules aïllades, i de la disposició de la lineació d'estirament (Le). Aquesta darrera varia des d'orientacions verticals i paral·lels al sentit de cabussament per a espessors prims, fins a orientacions subhoritzontals i angles de *pitch* de fins a 90° amb el sentit de cabussament. Sembla que certa partició de la deformació o del seu



**Fig. 3.40** (A) Imatge de camp de la zona d'arc extern dels *quartz-rods*. Es pot observar un lineació d'estirament (L2) i de crenulació (Lcr2) paral·lela als eixos dels plecs F2. (B) Detall de les cares dels boudins amb el desenvolupament de lineacions subhoritzontals (Lrods).



**Fig. 3.41** Esquema interpretatiu entre rotació finita, mida del boudin i desenvolupament de la lineació associada a la D2. Representen vistes en planta, amb direcció vertical paral·lela a l'eix Z. La variació geomètrica inicial afavoreix la possibilitat d'efectes locals i de partició de la deformació D2.

comportament és produït en direcció vertical acomodant-se a una dualitat entre domini aparent de l'extensió paral·lela als eixos dels plects o domini de la rotació del cos. Finalment, insistir en aquesta dependència a nivell qualitatiu de la mida absoluta dels cossos. A nivell qualitatiu i d'observació de camp ja s'observa un comportament diferent amb l'increment absolut de l'espessor. Això també succeeix amb les venes de quars plegades on l'amplificació dels plects disminueix per aquelles més fines (d'espessor mm) i s'incrementa la influència de la crenulació de l'encaixant. Per a cossos de mida molt gran, la deformació normalment és complexa, amb disposicions i creixement sintectònic, fent la seva utilització inviable. Gran part de les dades de la caracterització geomètrica i cinemàtica es farà per a sigmoïdals *quartz-rods* de mides mitjanes entre 2-10cm.

### 3.4.6 Descripció geomètrica de la transició entre formes de plects i partícules aïllades.

Un dels aspectes essencials de les morfologies de les venes de quars Q1 és la seva elevada irregularitat i variació del seu espessor. Durant la deformació D2 és produït el retreballament d'aquestes venes, amb el desenvolupament d'estructures clàssiques de plegament o respostes pròpies a la dinàmica de partícules rígides. Però també, a nivell de camp podem observar exemples de configuracions intermèdies entre aquests dos extrems (Fig.3.42). Hi ha una variació gradual i consistent entre tots dos extrems, amb formes que recorden a plects o a cossos aïllats. La transició es pot definir mitjançant la variació de l'espessor entre els boudins. La gran qüestió que se'ns planteja és com la configuració inicial de les capes afecta al desenvolupament de les estructures associades a la D2. Primer de tot és necessari una primera descripció qualitativa de les principals tendències del sistema. Aquests aspectes ens permetran identificar les pautes





**Fig. 3.42** Exemple de camp de la transició entre capes d'espessor homogeni i partícules aïllades. El pas de la fotografia (a) a (e) representa aproximadament un decreixement de la relació d'espessor de l'interboudin ( $Ti$ ). Observar que a nivell geomètric implica un increment del grau d'asimetria de les estructures. L'amplada de la foto (b) representen 30 cm., la (d) 6 cm. i la (e) 20 cm.

generals i seran la font d'inspiració per a la posterior definició dels models numèrics i analògics. La Fig. 3.42 és un molt bon exemple de la variació d'estructures amb la distribució heterogènia de l'espessor. Les fotografies es troben ordenades segons l'espessor de l'interboudin, amb reducció d'aquest de dalt cap a baix de la figura. Primer de tot, reafirmar la variació coherent i consistent de les geometries desenvolupades amb la variació d'espessor. La relació entre causa-efecte a nivell de reducció d'espessor però no és tan simple, doncs també han d'intervenir altres factors de configuració com la distància entre pertorbacions o les relacions axials dels boudins. Atenent l'exemple, amb la disminució d'espessor passem de geometries de plecs "simètrics" a arranjaments finals de les pertorbacions molt asimètriques. Aquesta disposició és sintètica amb l'asimetria dels plecs desenvolupats a l'encaixant. Aquest aspecte encara és més evident per l'exemple Fig. 3.42b. En els segments de venes d'espessor més homogeni (a l'esquerra de la fotografia) els plecs són pròxims a la classe 1b (Ramsay, 1967), amb formes de "M" i amb orientació del pla axial subparal·lel a la  $S_2$  i obliqua a l'envolvent de la capa. En canvi els segments de capa amb geometries de boudins i interboudins mostren una disposició altament asimètrica i consistent, amb la disposició sistemàtica de la part dels boudins en el flanc curt dels plecs de l'encaixant. Almenys per aquest exemple, la variació d'espessor potencia el desenvolupament d'arranjaments asimètrics definits a partir de la imbricació dels boudins. L'asimetria és una expressió de la configuració primària de la capa, però ho és també de la cinemàtica de la deformació? Una pregunta oberta que no és de fàcil resposta amb les dades de camp. Altra observació més complexa és referent a la rotació dels flancs de les pertorbacions. Amb la disminució d'espessor sembla que disminueix la rotació final dels boudins respecte al flanc equivalent dels plecs amb espessor homogeni. Però no és clara doncs representen exemples de diferents llocs i per tant amb deformació finita variable. Un aspecte més clar és la dependència amb la relació axial dels boudins. Amb l'increment de  $Ri$  disminueix la rotació final. (Fig. 3.42c, boudins situats a l'esquerra). D'aquest mateix exemple és més evident la major rotació dels flancs dels plecs d'espessor homogeni que els boudins. Per una unitat de longitud d'ona de plec amb configuració de boudin i interboudin, la rotació dels boudins respecte l'envolvent de la capa és menor a la rotació dels flanc associat a l'interboudin (Fig. 3.42b). Els flanc més rotacional és aquest darrer. Això origina una disposició de la  $S_2$  altament refractada i amb geometria de ventall a d'aproximar-se a aquests flancs. Per contra, la  $S_2$  respecte als



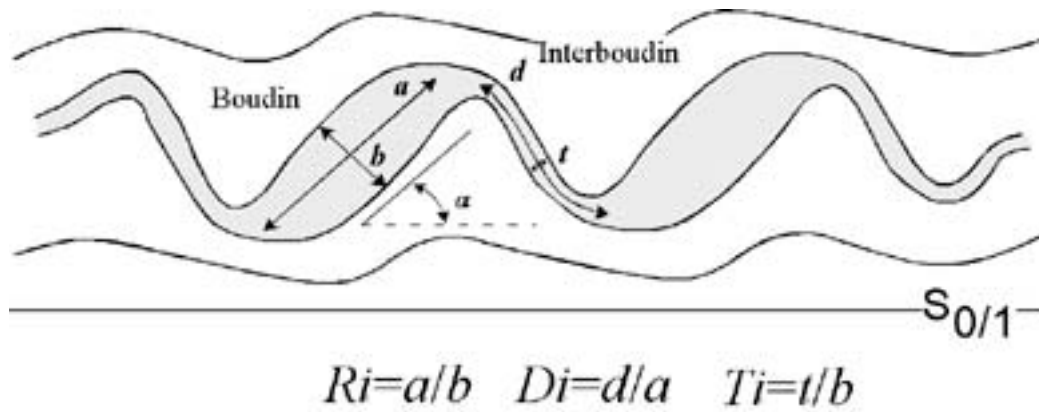
boudins és normal als seus límits. Per a situacions pròximes a partícules aïllades no és tan evident quina és la part més rotacional (Fig. 3.42d, e). La zona de xarnera dels plecs és localitzada a la proximitat dels colls dels boudins, podent arribar a plegar els extrems dels boudins. No representa una simple inflexió d'arrossegament com en partícules aïllades (Hudleston and Lan, 1994b), sinó és una autèntica zona de xarnera amb diferenciació geomètrica entre l'arc extern i intern. Amb la disminució de l'espessor de l'interboudin la curvatura de la xarnera cada cop és més abrupte i puntual.

Alhora d'un tractament quantitatiu, la configuració de les estructures de camp s'han idealitzat a una geometria “*pinch-and-swell*” formada per l'alternança de boudins i interboudins (Fig. 3.43). Per a una comparació més efectiva entre estructures i adimensionar el problema s'han definit el següent conjunt bàsic de paràmetres de configuració,

- 1) Relació axial dels boudins ( $Ri$ ). S'ha definit com el quocient entre la longitud i l'espessor dels boudins. S'ha aproximat la geometria dels boudins a una el·lipse.
- 2) Espessor normalitzat de l'interboudin ( $Ti$ ). S'ha definit a partir de la relació d'espessor mig entre l'interboudin i el boudin. Representa un paràmetre de relació entre parells de boudins.
- 3) Longitud normalitzada de l'interboudin ( $Di$ ). S'ha definit com la relació entre la longitud de l'interboudin i el boudin. També és un paràmetre de relació entre parells de boudins.
- 4) Angle de rotació de l'eix llarg del boudin respecte l'envolvent de la capa ( $\alpha$ ). També s'ha mesurat l'angle de rotació de l'interboudin ( $\alpha_{\text{thin limb}}$ ).
- 5) Angle d'obliquïtat de la  $S_2$  respecte a l'envolvent de la capa ( $\theta$ ). Aquests dos darrers paràmetres són equivalents a l'angle respecte la  $S_{0/1}$ , doncs únicament s'ha utilitzat venes  $Q_1$  paral·leles a la  $S_{0/1}$ .

A part de la mesura d'aquests paràmetres de configuració geomètrica, addicionalment també s'ha recollit informació de l'orientació dels elements estructurals ( $S_{0/1}$ ,  $S_2$ , envolvent de capa, etc.), litologia de l'encaixant, geometria i tipus genètic de *rods*, localització estructural i domin, etc.

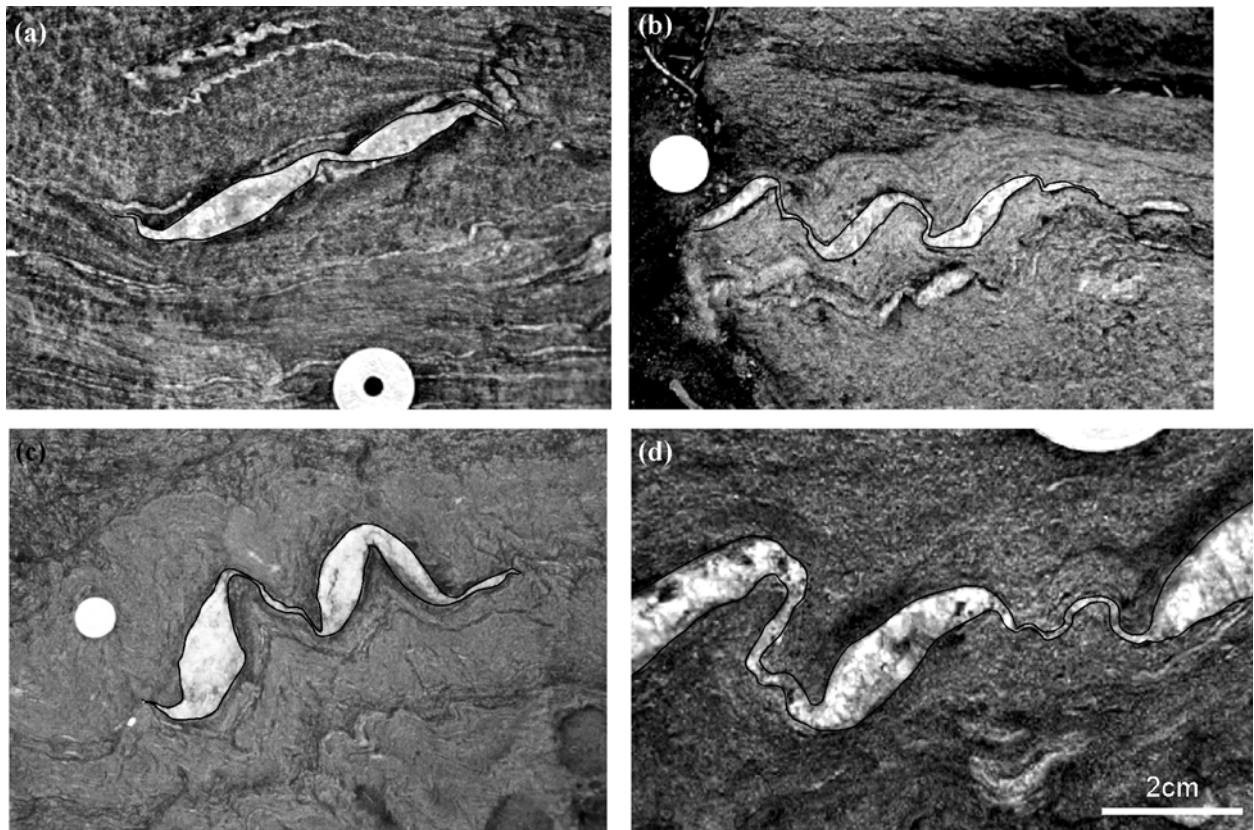
De tots aquests paràmetres, el trienni  $Ri$ ,  $Di$  i  $Ti$  són els bàsics per a poder descriure la geometria d'aquestes estructures. Una descripció dels efectes dels dos darrers factors és a continuació exposada.



**Fig. 3.43** Esquema idealització de l'estructura amb els paràmetres geomètrics que la defineixen  $Ri$ ,  $Di$ ,  $Ti$  i l'angle d'inclinació de l'eix a dels boudin  $\alpha$  respecte l'envolvent  $S_0/1$ .

#### 3.4.6.1 Influència del paràmetre $Di$

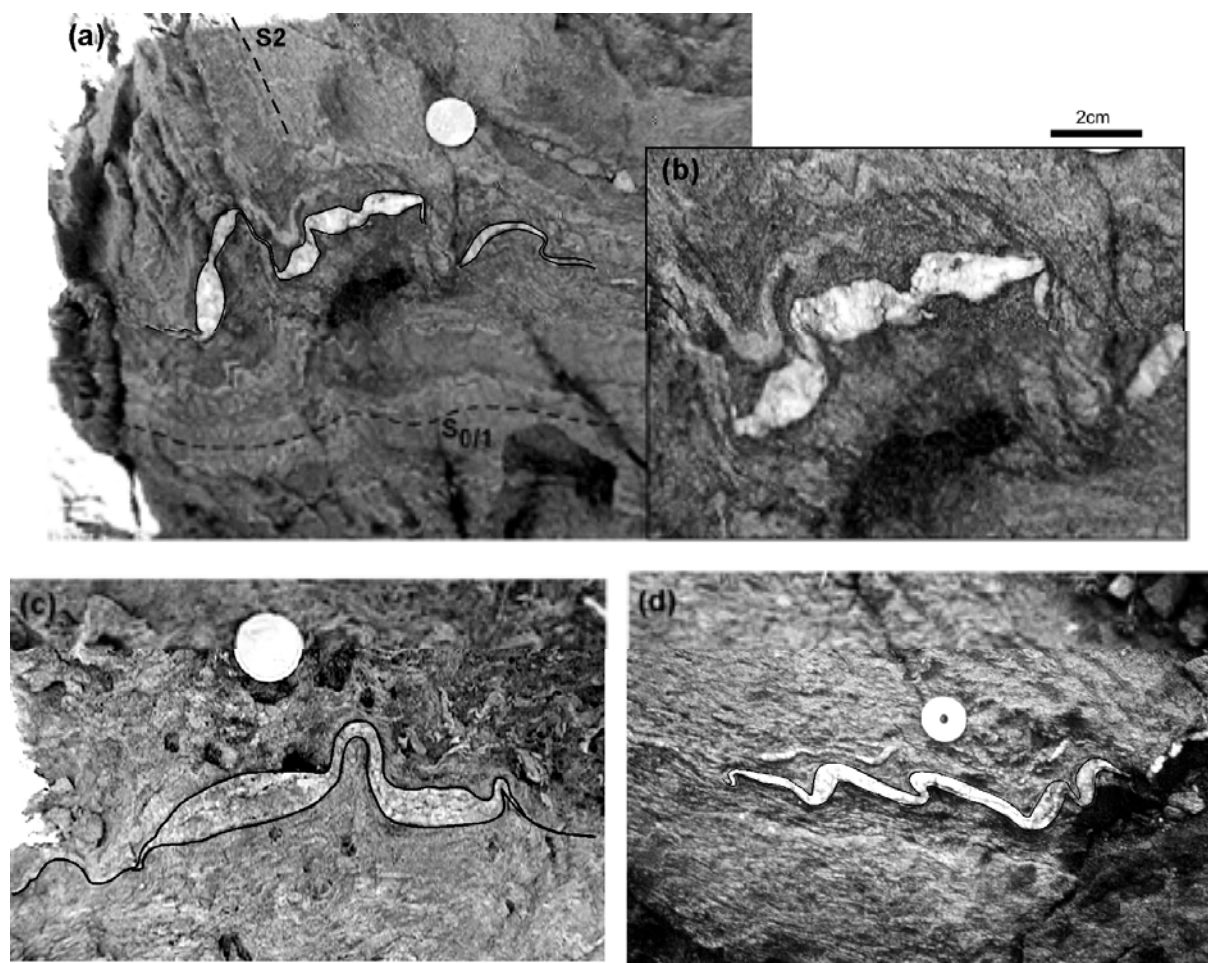
A gran trets ens permet comparar la relació de longitud d'ona entre els boudins i els interboudins. Indirectament és una expressió de la proximitat entre els boudins. La disminució d'aquest paràmetre ha de potenciar a la interacció entre boudins o pertorbacions, mentre valors elevats indiquen situacions de boudins aïllats. Una comparació dels seus efectes en la geometria final és mostra a la Fig. 3.44 per a valors de  $Ti=0.10-0.20$ . En general s'observa el desenvolupament d'arranjaments asimètrics amb imbricació dels boudins però la geometria final és dependent del valor de  $Di$ . Per a situacions de  $Di$  petits (Fig. 3.44a,  $Di<0.25$ ), on l'interboudin és de longitud curta, no hi ha la rotació dels boudins respecte l'envolvent de la capa sinó una aparent rotació solidaria de tot el conjunt. Es poden observar geometries asimètriques a l'interboudin però en general són dèbils. Per a valors una mica més grans de  $Di\sim 0.25-0.5$ , la geometria ja és imbricada i asimètrica, però els boudins mostren geometries plegades (Fig. 3.44b). La localització de la xarnera no és a la zona del coll del boudin sinó que és situada a la part dels extrems dels boudins. Les part més primes dels boudins són plegades i donen aquest aspecte sigmoïdal a la geometria final. Si continuem incrementant el valor de  $Di$ , disminueix el plegament dels extrems dels boudins i la zona de xarnera es localitza als seus colls (Fig. 3.44c,  $Di=0.5-1.0$ ). L'interboudin i el boudin corresponen als diferents flancs del plec i, per tant, hi ha coincidència entre la geometria inicial (pre-D2) amb la final. Per a valor de  $Di>1.0$ , la longitud de l'interboudin és suficientment llarga per desenvolupar múltiples inestabilitats de plegament, i cert comportament independent entre els boudins i l'interboudin (Fig. 3.44d).



**Fig. 3.44** Efecte de la variació de la longitud normalitzada de l'interboudin ( $D_i$ ). Veure text per a una explicació.

### 3.4.6.2 Influència del paràmetre $T_i$

Una primera descripció qualitativa d'aquest paràmetre s'ha realitzat al llarg de la descripció de la Fig. 3.45. Segurament és tracta del paràmetre que més condiona la geometria final d'aquestes estructures. Mostrar els seus efectes no és simple, doncs aïllar solucions per a relacions de longitud d'interboudin constant no és simple. Valors de  $T_i$  petits originen el desenvolupament sistemàtic d'arranjaments asimètrics (Fig.3.42d,e i Fig. 3.44). El seu increment origina el desenvolupament d'estructures no asimètriques ni imbricades ( $T_i > 0.4$ ). Sense relació amb la configuració inicial ni la selecció de les longituds d'ona inicials La geometria final depèn del valor de  $D_i$ . Valors petits originen o la rotació solidaria del conjunt o el seu plegament (Fig. 3.45a,b). Aquestes recorden a trens de boudins plegats (parell de boudins de la dreta de la Fig. 3.44c), però també gran part de l'escurçament pot ser acomodat per deformació homogènia (Fig. 3.45b). Si la distància de separació és el suficientment gran és poden desenvolupar plecs independents als boudins. Molts cops mostren una única longitud d'ona entre boudins sense aparent rotació d'aquests (Fig. 3.45). L'efecte de distribució de la  $T_i$  al llarg d'una capa pot arribar a ser complex, sobretot per explicar la selecció de pertorbacions i la relació entre flancs

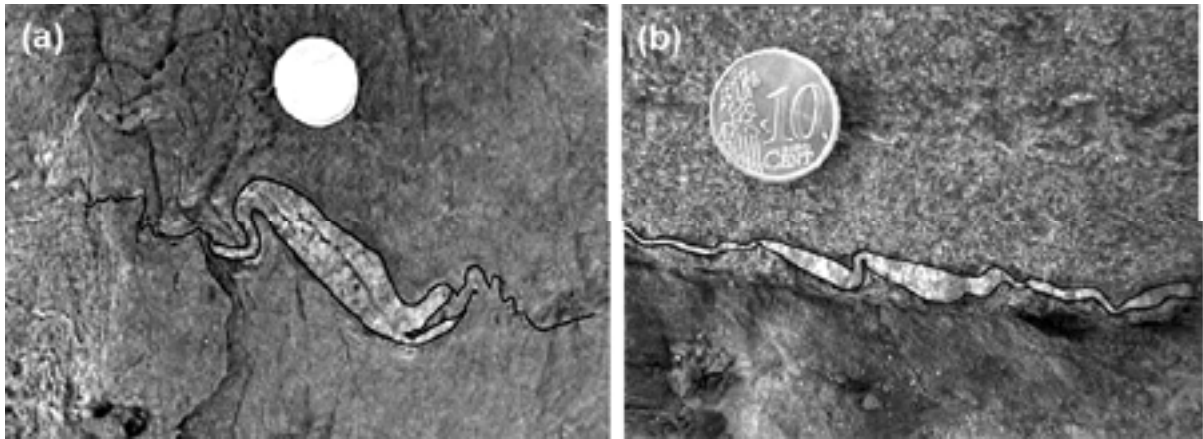


**Fig. 3.45** Exemples de camp de la influència de l'espessor de l'interboudin ( $Ti$ ). L'increment d'aquest tendeix a una pèrdua de l'asimetria de l'estructura. Per a longituds petites d'interboudin la deformació s'acomoda a partir de la rotació conjunta del sistema (a) o per elevada deformació homogènia (a, i detall en b). Si l'interboudin és suficientment llarg, es desenvolupa una única longitud d'ona (c). (d) Exemple d'arranjament amb ordenació complexa on es pot comprovar com per a mateixa disposició de flanc curt, l'interboudin rota més que un boudin.

curts i llarg (Fig. 3.45d). La localització de l'interboudin al flanc curt tendeix a mostrar rotacions molt més elevades que respecte a situacions on ho és el boudin.

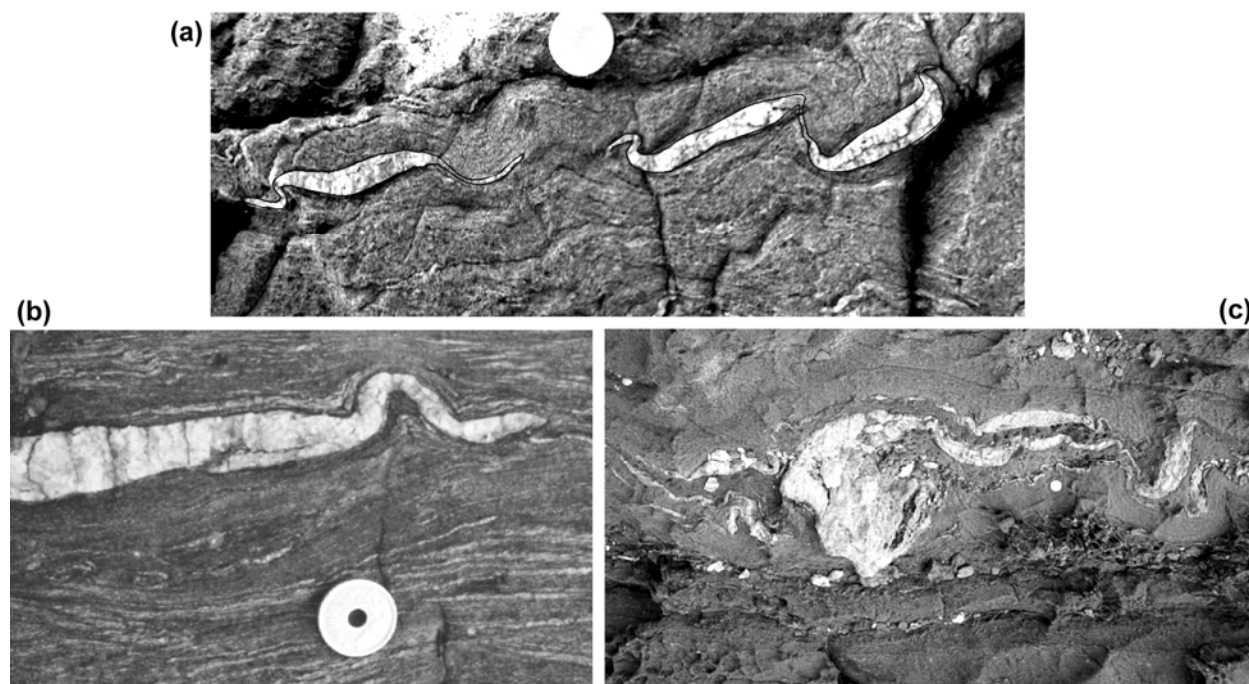
### 3.4.6.3 Geometries anòmales

A un primer cop d'ull, el conjunt de sigmoïdal *quartz-rods* i de les venes de quars mostren una disposició altament asimètrica amb sentit de rotació senestre respecte a la S0/1. Fins i tot es pot arribar a considerar sistemàtic. Una observació més detallada ens permet observar desviacions de la configuració dominant. Així per exemple, l'increment del valor  $Ti$  i la homogeneïtzació de les venes de quars tendeix a disminuir la seva simetria. Però, també és possible observar desviacions per a valors de  $Ti$  baixos, on es produeix la rotació aparent dels boudins en sentit dextral (Fig. 3.46a) o el desenvolupament d'un arranjament imbricat asimètric dextral (Fig. 3.46b). Aquests



**Fig. 3.46** Exemples de camp de sentits de rotació dels boudins dextrals respecte la  $S_0/1$ , tant (a) a nivell individual com (b) de conjunt. Per aquest darrer cas observar la marcada diferència de rotació aparent entre boudin i interboudin.

casos són minoritaris per a situacions aparents de capa aïllada (<5% de les observacions). L'angle de rotació dels boudins són molt menors (fins a angles  $\alpha < 20^\circ$ ) que per a les situacions "normals"; en canvi la rotació de l'interboudin per aquesta casos és molt més elevada, incrementant-se la diferència entre l'angle de rotació del parrell boudin i interboudin. Segurament el seu desenvolupament respon a control de la configuració inicial o de l'estructura. Per exemple, molt cops és possible intuir una diferència en la geometria entre les interfases limitants dels boudins (boudin de l'esquerra Fig. 3.47a). No hi ha una coincidència entre les zones de màxima curvatura amb un desfasament de la seva posició. Altres geometries anòmales són boudins amb els dos extrems plegats en el mateix sentit (Fig. 3.47a, boudin de la dreta), o que el boudin representa la zona de xarnera del plec. Molts cops l'angle de rotació final dels boudins són dependents dels desenvolupament de plecs marginals localitzats als seus extrems. L'increment de la relació axial dels boudin tendeix a afavorir-ne, i un comportament irrotacional del boudins. Això també és similar amb l'increment del plegament de l'interboudin. L'increment de la deformació o l'amplificació de la crenulació tendeixen a originar disposicions anòmales (veure Fig.3.38), però relacionades amb efectes multicapa, d'interferència de perturbacions de diferent o mateix ordre. Finalment, efectes locals com desenganxament de la seqüència metasedimentària, disposicions subhoritzontals de les venes de quars, o sobretot la proximitat a *rods* poligenètics originen morfologies i relacions difícilment traduïbles a nivell cinemàtic (Fig. 3.47c). En general hi ha un pauta d'elevada variació de geometries i relacions amb els plecs F2, però amb una tendència principal a un arranament "ordenat". Aquest mostra una dependència a nivell de dominis de deformació.



**Fig. 3.47** Exemples de geometries anòmales. (a) Desfasament entre els punts d'inflexió de les superfícies limitants del boudin (cas del situat a la esquerra) o disposicions dels boudins a la zona de xarxera dels plecs (cas de la dreta). (b) Localització de plecs als extrems dels boudins origina una modificació de la rotació d'aquests, amb increment a una tendència a situacions irrotacionals. (c) Exemple de *quartz-rods* poligenètics. Una relació simple entre la seva disposició i la cinemàtica de la D2 és inviable. Observar en el costat dret un exemple de plec de desenganxament dins la seqüència metasedimentària.

### 3.4.7 Disposició dels sigmoïdal *quartz-rods* a les zones de baixa i alta deformació.

A part dels aspectes de la configuració dels sigmoïdal *quartz-rods*, cal plantejar-se quina és la seva relació i disposició amb els elements estructurals de la D2. Com s'ha explicat prèviament, la D2 té un caràcter molt heterogeni amb el desenvolupament de gradients i dominis amb diferent intensitat de deformació. Les possibilitats de treball amb els conjunts de *rods*, varia entre els dominis de baixa i alta deformació. Per a una futura sistematització i quantificació de la cinemàtica és necessari relacionar els paràmetres de geometria dels *rods* amb els elements estructurals, tals com la posició dins els plecs mètrics F2 o la seva relació d'orientació amb la S2 ( $\theta$ ). Mentre això és relativament senzill per als dominis de baixa deformació, l'increment de la deformació origina la pèrdua dels elements de referència i impossibilita un anàlisi més detallat i acurat de l'estructura.

#### 3.4.7.1 *Rods* desenvolupats en zones de baixa deformació. Influència plecs decamètrics

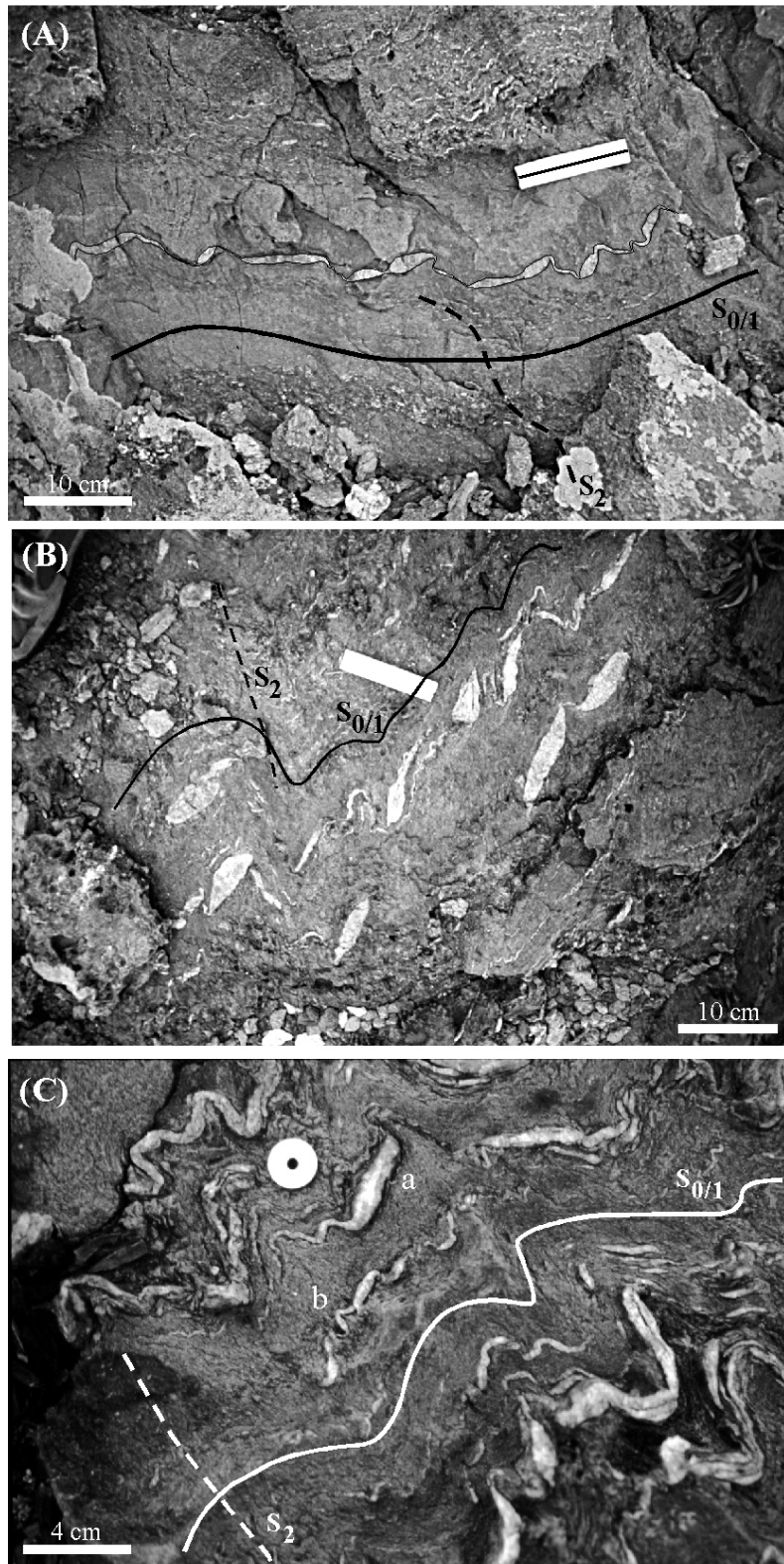
Les zones de baixa deformació són caracteritzades pel desenvolupament de plecs asimètrics a escala mètrica i decamètrica, amb una distribució de la deformació influïda per la natura litològica



dels materials. En general són plecs que mostren un fort engruiximent del flanc curt i de la zona de xarnera respecte al flanc curt. L'asimetria d'aquests plecs és similar als dels *quartz-rods*, amb coincidència amb els flanc curts. La menor deformació permet una millor observació i reconeixement dels diferents elements. Fins ara, totes les observacions i descripcions representen exemples d'aquestes zones. La organització dels *quartz-rods* és diferent segons la posició dins els plecs mètrics.

Els flancs llargs presenten una direcció N-S amb cabussaments verticals cap al est. La S0/1 és presenta plegada amb escurçaments entre un 30-40%. La orientació de la S2 depèn de la litologia dels materials. En general presenta un direcció NE-SW, però l'angle d'intersecció amb la S0/1 ( $\theta$ ) varia entre 65°-55° pels nivells de metagrauvaques, a valors entre 45-35° per a les metapelites. El sentit d'obliquïtat és antihorària respecte a la normal de la S0/1 (Fig. 3.48a). Els *rods* presenten una disposició preferencialment asimètrica, amb sentits de rotacions senestres respecte a la S0/1 i angles variable fins a un màxim de 70°-90°. S'observa una dependència de la rotació final respecte la relació axial de la partícula, però la dispersió de les dades és molt elevada. L'orientació de la S2 és a un elevat angle respecte a l'eix llarg dels boudins. Les rotacions necessàries per a la paral·lelització dels *rods* amb la S2 són com a mínim entre 140° a 120°. La rotació finita dels boudins i interboudins és molt variable, però en general és lleugerament superior pels interboudins.

En els flancs curts dels plecs mètrics, també s'observa una tendència asimètrica de l'arranjament dels boudins (3.48b). L'orientació d'aquests flancs és aproximadament NW-SE. Presenta una morfologia d'engruiximent amb forta reducció de la longitud d'ona respecte al cas dels flancs llargs. En general l'aspecte de la zona de xarnera és similar als flancs curts, i la descripció d'aquest darrer també és vàlida per a les zones de xarneres. La orientació de la S2 és independent de la litologia amb angles d'obliquïtat amb la S0/1 entre  $\theta=75-90^\circ$ . El sentit d'obliquïtat és horària respecte a la normal de la S0/1. La disposició dels *rods* és més variable, amb la possibilitat de rotacions tant dextrals com senestrals respecte la S0/1, encara que aquestes últimes són les més abundants i amb valor més elevat (fins a 75°, mentre en sentit dextral no superen els 30°; Fig. 3.52). Molts boudins mostren geometries de plegament, representant zones de xarnera d'aquests plecs. L'orientació de l'eix màxim dels *rods* té una tendència a paral·lelitzar-se amb la S2 amb l'increment del valor de la rotació final (Fig. 3.48b). La diferència de rotació entre els boudins i els interboudins és elevada, amb valors molt més elevats per aquest darrer cas. Això origina una disposició més asimètrica i plecs de l'interboudin més



**Fig. 3.48** Disposicions dels *quartz-rods* en els plecs d'escala mètrica. (A) Arranjament asimètric en flanc llarg. (B) Arranjament asimètric en zona de flanc curt-xarnera. Observar la diferència d'orientació entre la S<sub>0/1</sub>, S<sub>2</sub> i els boudins. També la diferència de rotacions entre les posicions de flanc curts i llarg dels plecs. (C) Detall de la complexitat de les zones de xarnera i flanc curt amb el desenvolupament de la crenulació. És possible observar des d'exemples amb disposició del boudin al flanc i amb geometria asimètrica (sensetra o dextra), fins a disposats en zones de xarnera.

tancats i desenvolupats. El millor desenvolupament de la crenulació origina un arranjament més complex i variable, amb la superposició de pertorbacions i geometries tipus “M”.

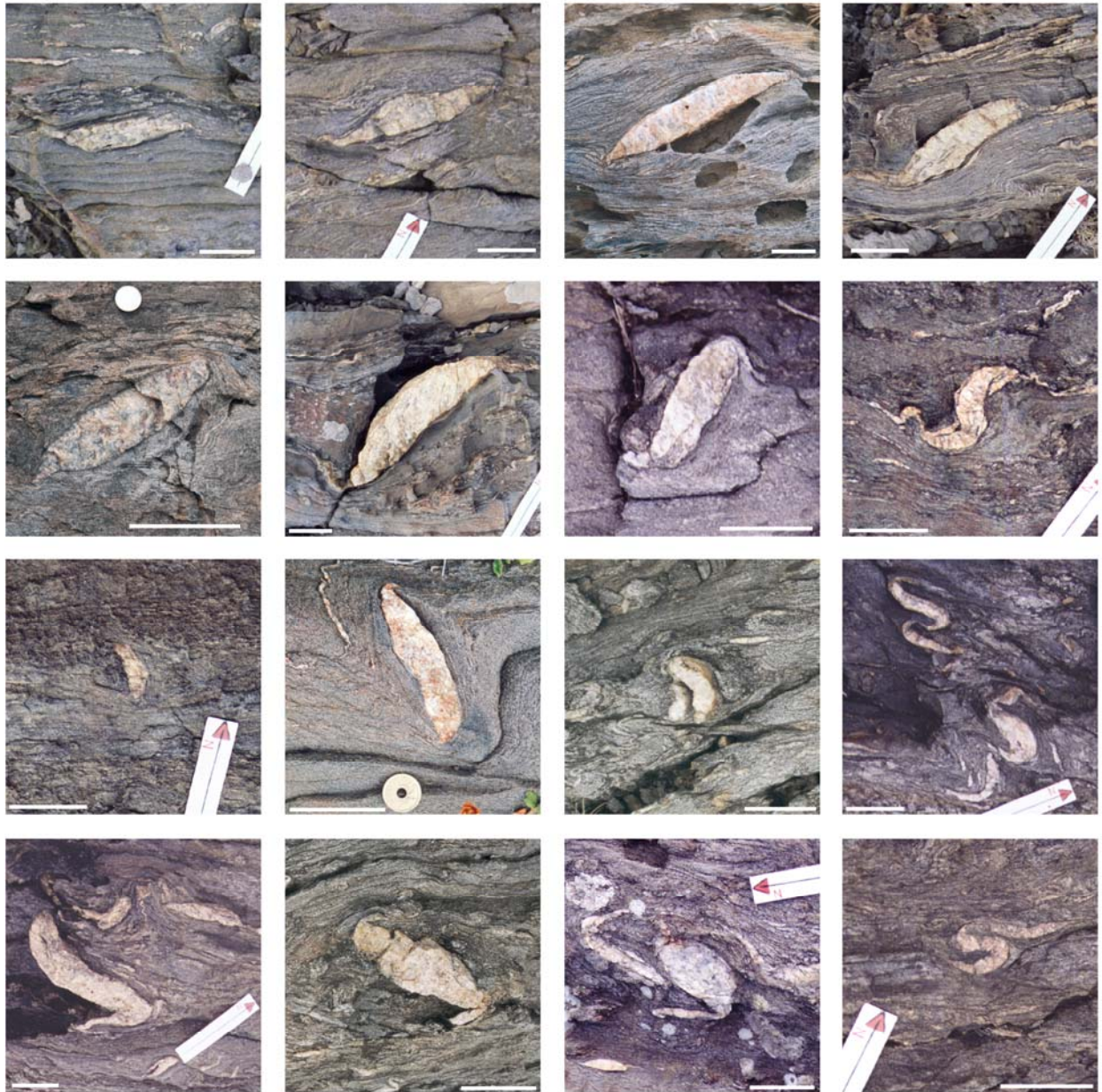
La sistematitzat de l'asimetria relativa dels *rods* en tots dos flancs ha estat interpretada com a una evidència que els plecs d'escala mètrica foren generats amb posterioritat al desenvolupament dels *rods* sigmoïdals (Druguet et al., 1997). Però, notar que la relació d'orientació dels *rods* respecte a la S2 no és equivalent en ambdós flancs. Mentre al flanc llarg, la S2 és a un angle elevat de l'eix llarg dels boudins i són necessàries elevades rotacions per a la seva paral·lelització, als flancs curts la S2 és disposa a una angle baix d'obliquïtat respecte l'eix dels boudins. De la mateixa forma la geometria dels plecs d'interboudin és diferent.

#### 3.4.7.2 *Rods desenvolupats en zones d'alta-moderada deformació.*

L'increment de la deformació D2 origina la rotació dextral dels elements estructurals i una reducció de l'angle entre la S0/1 la S2. A nivell d'acomodació de la deformació, hi ha una progressiva variació de condicions d'escurçament a extensió finita paral·lela a la S0/1.

El inici del desenvolupament de bandes de transposició, i el retreballament i partició de l'estructura complica la interpretació d'aquestes zones. A nivell de *rods*, hi ha un ventall ampli tant de geometries com d'orientacions respecte a la S0/1 externa i/o la S2 (Fig.3.49). No s'observa cap relació entre la relació axial d'aquests cossos i l'angle de rotació final. Sembla una distribució totalment aleatòria. És possible observar des de *rods* amb orientació paral·lela a la S0/1 ( $\alpha \sim 0-20^\circ$ ) fins a disposicions d'aquests que impliquen rotacions molt elevades ( $\alpha > 140^\circ$ ). Si que s'observa una relació entre la geometria dels *quartz-rods* i la seva orientació, que es poden resumir en una sèrie de grups bàsics,

- Un primer grup caracteritzats per a *quartz-rods* sense geometria sigmoïdal i on no l'interboudin no es troba plegat sinó que té una disposició recta, sense cap mena d'inflexió en els extrems dels boudins. Mecànicament responen com a cossos competents doncs molts cops en el extrems tallen la S0/1. Mostren evidències d'independència amb l'encaixant, amb no harmonia amb les zones de xarnera de l'encaixant. Corresponen a *quartz-rods* amb disposicions molt paral·leles amb la S0/1, amb angles entre  $0^\circ$  a  $30^\circ$ . La geometria d'aquests cossos recorden a cossos com els *mica-fish* o els porfiroclastes tipus “ $\sigma$ ” (Passchier and Trouw, 1996).
- Progressivament, hi ha una transició cap a *quartz-rods* amb geometries sigmoïdals i semblants a les descrites per a les zones de menor deformació ( $\alpha > 20-30^\circ$ ). Sentit



**Fig. 3.49** Exemples de camp de sigmoïdal *quartz-rods* situats en les zones de deformació moderada-alta i inici de la transposició de la S0/1. Els exemples es troben ordenats en referència a l'angle entre el boudin i la S0/1. Aquesta en les fotografies presenta una disposició horitzontal. Veure text per descripció variació geometria de l'estructura.

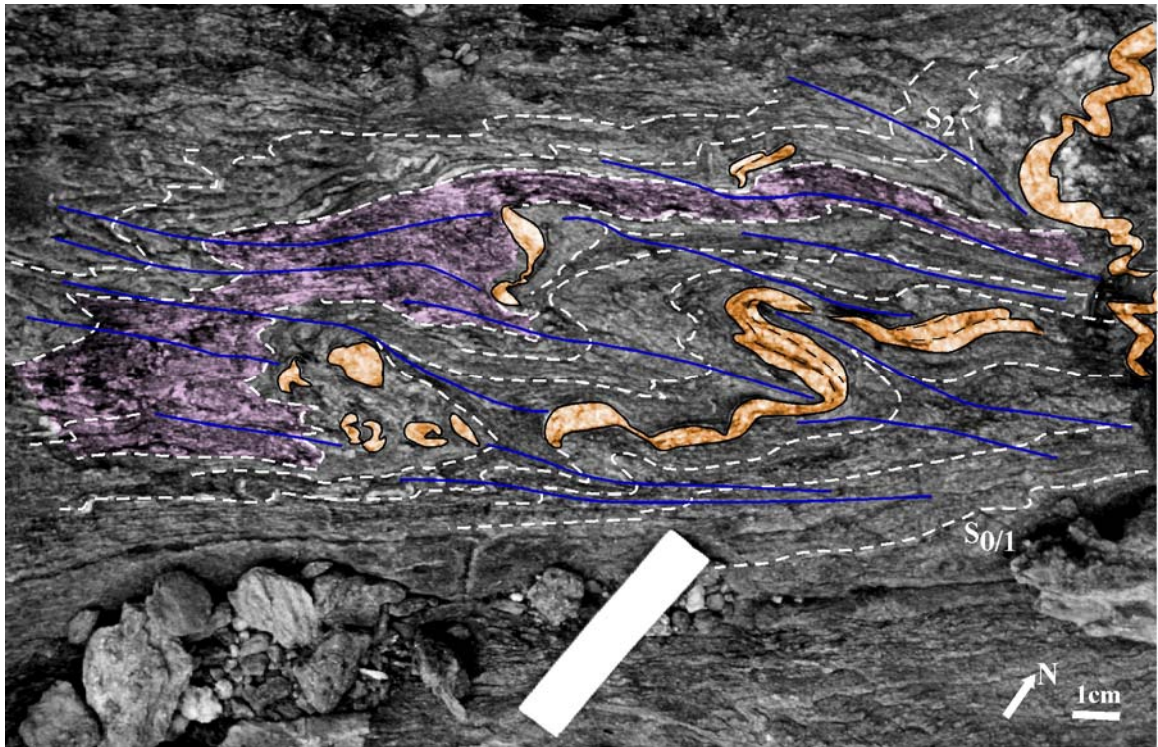
d'asimetria senestre. Però, l'increment de l'angle amb la S0/1 origina el plegament dels boudins, fins i tot per aquells amb geometries de partícula aïllada. S'observa quan l'eix llarg és pròxim o ha creuat la direcció de màxima deformació finita ( $\alpha = 70-100^\circ$ ). És a dir, formen un angle elevat amb les foliacions de crenulació i/o transposició.



- Un darrer grup el formen aquells *quartz-rods* amb geometries sigmoïdals però amb rotacions respecte a la S0/1 molt elevades ( $\alpha > 120-140^\circ$ ). La geometria és asimètrica i els plecs marginals dels boudins presenten una forma isoclinal. Tots dos flancs són paral·lels. Presenten gradients elevats de deformacions, amb desenvolupament de la S2 adaptada a la geometria dels cos. Es troben associats a plecs d'escala decamètriques amb desenganxament de les zones de xarnera de l'encaixant. Normalment els seus efectes són locals, amb el desenvolupament d'una banda d'alta deformació que els "aïlla" de l'encaixant. Presenten geometries similars als porfiroclastes tipus "δ".

Intentar explicar aquesta tendència dels *quartz-rods* com una estructura independent o dominant respecte a les pertorbacions de l'encaixant no sembla coherent. Segurament estem observant la influència del tancament de les zones de xarnera dels plecs mètrics i la localització d'extensió paral·lela als seus flancs. La Fig. 3.50 mostra un exemple entre la relació dels *quartz-rods* i aquests plecs. Es pot observar que la seva geometria respon a la diferent posició relativa en aquests plecs. *Quartz-rods* situats en zones de flanc amb extensió mostren el primer grup de geometries, amb formes que recorden al desplegament de plecs (*quartz-rods* situats a la part dreta i central de la figura). Indicarien retreballament de l'estructura durant l'increment de la deformació, amb sentit de rotació dextral respecte l'envolvent S0/1. Observar que hi ha lliscament senestre entre les capes de quars per acomodar la rotació aparent dextral. Si suposem un lliscament discontinu entre aquests plans (Ramsay, 1967), i valors de lliscament entre 4-3 mm i espessor de les capes de quars 3-2 mm, l'angle aparent de la rotació dextral podria ser com a màxim entre  $45^\circ-55^\circ$ . Aquells *quartz-rods* disposats pròxims a les zones de xarnera dels plecs F2 mostren geometries plegades, amb formes semblants a un "croissant". En canvi els situats en els flancs curts corresponen aquells amb rotacions model elevades. Observar que és similar al desenvolupament de zones de flancs més competent amb components de rotació "rígida" semblant als *rods*. La presència d'aquest n'afavoreix. El desenganxament i disharmonia entre nivells pelítics i més competents és evident a partir de la Fig. 3.50.

El grau de dependència entre els *quartz-rods* i els plecs de l'encaixant és molt elevada per ser tractada independent i impossibilita un estudi cinemàtic dels *rods* com és farà als dominis de baixa deformació. El grau de superposició és massa elevat per diferenciar efectes propis dels *quartz-rods*, no obstant que la localització i desenvolupament d'aquests plecs cm-dam. es troben estretament associats al desenvolupament dels *quartz-rods* durant als primers estadis de deformació de la D2.



**Fig. 3.50** Detall de la relació de camp entre els plecs de l'encaixant i la geometria dels quartz-rods. Disposicions en flanc curt mostren evidències de sentit de rotació dextral respecte la S0/1. Els disposats en flanc llarg mostren elevades rotacions senestres amb desenvolupament de geometries sigmoïdals. Observar la variació de la S2 (corbes de color blau) i la tendència a la rotació rígida de les xarxes dels plecs de l'encaixant.

### 3.4.8 Anàlisi i interpretació dels sigmoïdals quartz-rods.

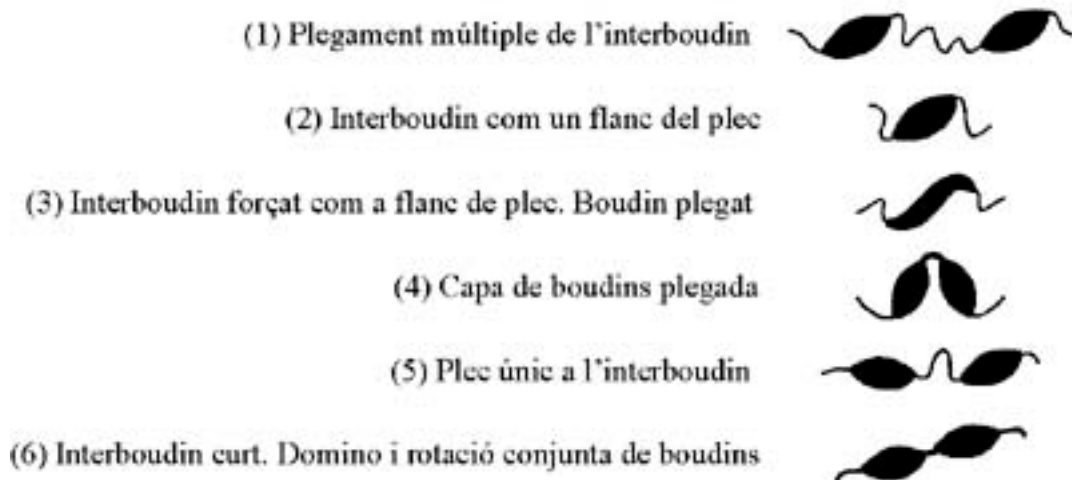
#### 3.4.8.1 Geometries bàsiques. Divisió de l'espectre $T_i$ , $D_i$

En aquesta secció s'establirà una divisió de les geometries tipus que defineixen l'espectre de transició entre estructures desenvolupades en capes d'espessor homogènies i geometries de partícules aïllades. Per fer-ho, s'ha generat una base de dades dels paràmetres  $R_i$ ,  $T_i$  i  $D_i$  dels conjunts de quartz-rods del camp. Aquesta s'ha realitzat bàsicament mitjançant fotografies digitalitzades. Els paràmetres  $T_i$  i  $D_i$  representen la relació entre parells de boudins. És per això, que un boudin dins un conjunt té associats dos valors d'aquests paràmetres, atenent als dos boudins situats a ambdós costats. Per intentar minimitzar efectes multicapes, únicament s'han utilitzat aquells que presenten independència amb l'encaixant i poden aproximar-se a condicions de capa aïllada. La base de dades presentada en aquesta memòria és definida exclusivament mitjançant les fotografies de capes *pinch-and-swell* plegades mostrades al llarg de les figures 3.42, 3.44-3.46 i 3.48. L'objectiu és relacionar la configuració de la capa inhomogènia amb l'estructura desenvolupada. A partir de les observacions qualitatives dels efectes dels paràmetres  $D_i$  i  $T_i$  s'han definit sis categories bàsiques (Fig. 3.51):



- Geometries de capes amb plegament múltiple de l'interboudin (*multiple interboudin folding*). Els boudins són sintètics, però l'interboudin acomoda part de la deformació per plegament independent als boudins. No es forma un tren de plecs dependents exactament de les longitud d'ona de la configuració ideal *pinch-and swell*. L'arranjament és ordenat i asimètric.
- Geometries de capes amb interboudin com a flanc de plec (*interboudin fold limb*). Els plecs són funció de la relació de longituds entre boudin i interboudin. En un flanc d'aquest es disposa el boudin mentre l'altre és tot el segment d'interboudin. Tot el conjunt forma la longitud d'ona del plec. L'arranjament és ordenat i asimètric.
- Geometries de capes amb interboudin forçat com a flanc de plec (*forced interboudin fold limb*). Els plecs són funció de la relació entre boudin i interboudins, però el boudin és plegat en els seus extrems, originant una forma sigmoïdal. L'arranjament és ordenat i asimètric.
- Geometries de capes plegada amb boudins (*folded boudin layer*). Els plecs no mostren relació amb configuració de boudin i interboudin. Els boudins constitueixen flancs d'un mateix plec, es troben plegats o representen la zona de xarnera dels plecs. No arranjamnt dels boudins asimètrics.
- Geometries de capes amb una longitud d'ona a l'interboudin (*single interboudin fold*). És una variació del primer cas on l'interboudin és plegat amb una única longitud d'ona. Els

**Categories d'estructures de plegament de capes no homogènies**



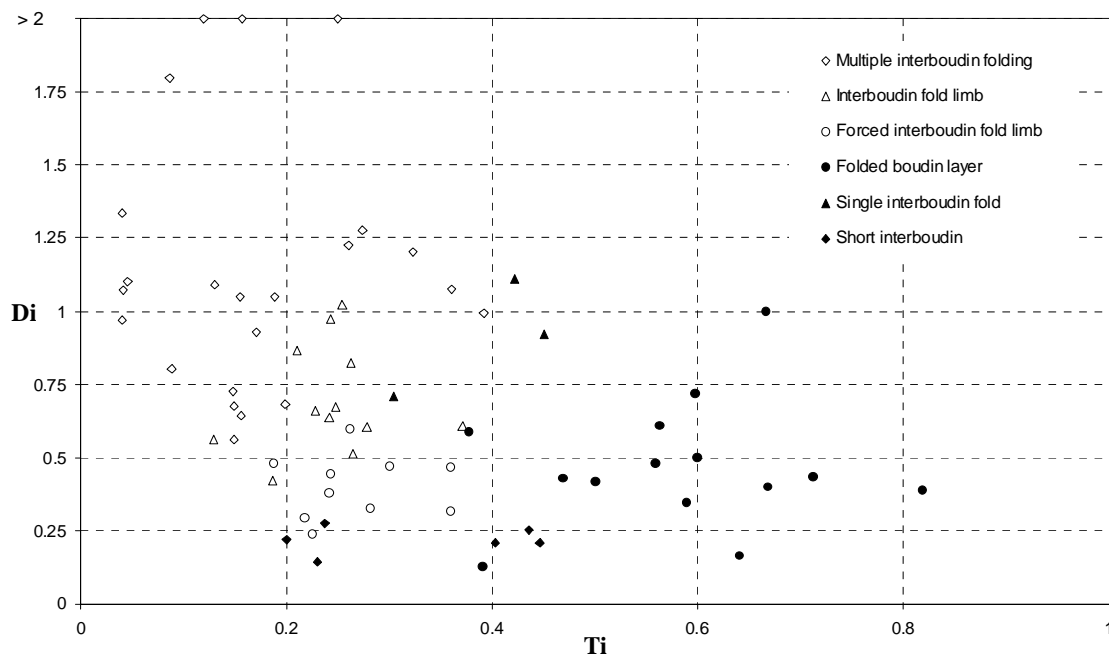
**Fig. 3.51** Esquema de les categories principals d'estructures de plegament de capes amb espessor no homogeni. Addicionalment s'han d'afegir els termes extrems de plecs desenvolupats en capes d'espessor homogeni i geometries de partícules rígides.

boudins mostren disposicions paral·leles amb l'envolvent de capa o sentits de rotació oposats.

- Geometries de capa “domino” i rotació conjunt de boudins (*short intereboudin*). Agrupa a totes aquelles geometries on no s'observa una localització en funció de la configuració pinch-and-swell. Això pot ser per rotació conjunt de l'envolvent o per acomodació de la deformació per engruiximent de la capa i col·lapse entre boudins (similar al retreballament d'una configuració de boudins del tipus “domino”; Goscombe et al., 2004). Aquestes geometries corresponen a situacions de longitud d'interboudin curt.

Addicionalment a aquestes geometries cal afegir-hi les configuracions de partícula aïlla (o sense continuïtat de capa en els extrems dels boudins) i de plects desenvolupats en capa d'espessor homogeni. Les geometries observades s'han intentat agrupar a cadascuna de les diferents categories. La Fig. 3.52 mostra la distribució de les dades a l'espai definit pels paràmetres  $D_i$  i  $T_i$ . No obstant que la distribució dels camps també ha de ser dependent de la  $R_i$ , s'ha considerat aquest terme com a secundari i més rellevant alhora de la rotació finita dels boudins. D'altra forma, observar que  $R_i$  és implícitament contingut en la definició de  $D_i$  i  $T_i$  (Fig.3.43). L'espectre de les dades és molt ampli i variable. Comentar que representa una selecció de dades, i que la dispersió d'exemples de camp pot ocupar tot l'espai. Les dades referents a capes plegades i boudins aïllats no s'han plotejats, encara que representen les situacions extremes de  $T_i$ . Una primer observació es pot fer en referència a la tendència a disposicions dominants asimètriques de l'estructura. Bàsicament per a valors  $T_i > 0.4$ , les estructures desenvolupades no presenten una tendència simètrica (dades Fig. 3.52 i 3.54 amb tramat fosc). L'efecte del valor  $D_i$  no és tan evident. Valors massa baixos de longitud d'interboudin impossibiliten la selecció de l'arranjament, disminuint el límit d'aquesta tendència fins a valors de  $T_i \sim 0.2$ . Aquestes distribucions confirmen les evidències que l'asimetria de gran part dels plects de les venes de quars del camp són un reflex de la variació de l'espessor de la capa. És evident que la disposició de la foliació de pla axial en molts casos és obliqua a l'envolvent de capa, amb gradients de deformació asimètrics respecte als plects. Però per asimetria del plec ens referim a una selecció de longituds d'ona diferents entre els flancs del plec. També fer notar, que les dades provenen de condicions pròximes a capa aïllada, i els exemples amb possibles efectes de multicapa han estat no seleccionats.

Per a una millor visualització i interpretació de les dades s'han traçat els límits aproximats que separen les dades de les diferents categories bàsiques (Fig. 3.53). En general hi ha solapament



**Fig. 3.52** Gràfica amb la distribució de les dades de geometries dels sigmoïdal *quartz-rods* en funció de  $Di$  i  $Ti$ .

dels camps, i ens indicaria la possibilitat de transició entre les geometries bàsiques. Però, no totes les transicions entre categories són plausibles. Depèn de la seva localització dins l'espai  $Ti$  vs.  $Di$ . Algunes ja havien estat inferides qualitativament, com la variació entre plects múltiples i únic plec a l'interboudin. És en gran part funció del de la longitud normalitzada de l'interboudin amb transició entre valors 0.5-1.0. D'igual forma entre els camps d'interboudin forçat i rotació conjunta de boudins. Aquesta transició era mostrada a la Fig. 3.44. Altres transicions no tan evidents és el cas de "geometries de capes amb una única longitud d'ona" que pot ser considerada la transició entre "capes de boudins plegades" i "capes de plegament múltiple". Donat el grau de solapament entre els camps de "capes amb interboudin com a flanc de plec" i "capes amb interboudin forçat com a flanc de plec", i la seva similitud geomètrica s'han agrupat en un únic camp denominat "capes *pinch.and-swell* plegades". Aquesta nomenclatura respon al representar l'exemple d'estructura que millor reflexa la configuració inicial de la capa, i on la selecció de les pertorbacions sembla que és funció de les longitud d'ona dels boudin i interboudins. D'aquesta forma es poden definir un conjunt de sis grans camps que divideixen l'espectre  $Ti-Di$ ,

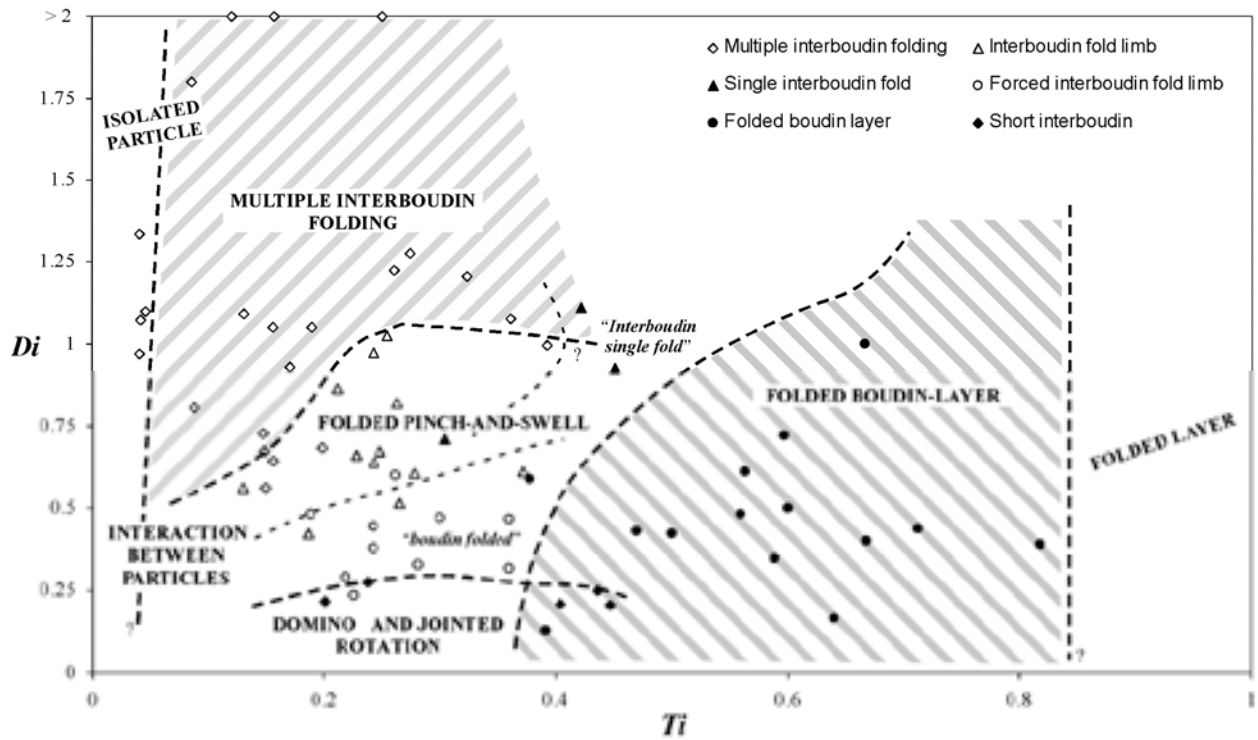


Fig. 3.53 Divisió de l'espectre  $T_i$  vs.  $D_i$  en els principals camps geomètrics. Veure text per a un explicació.

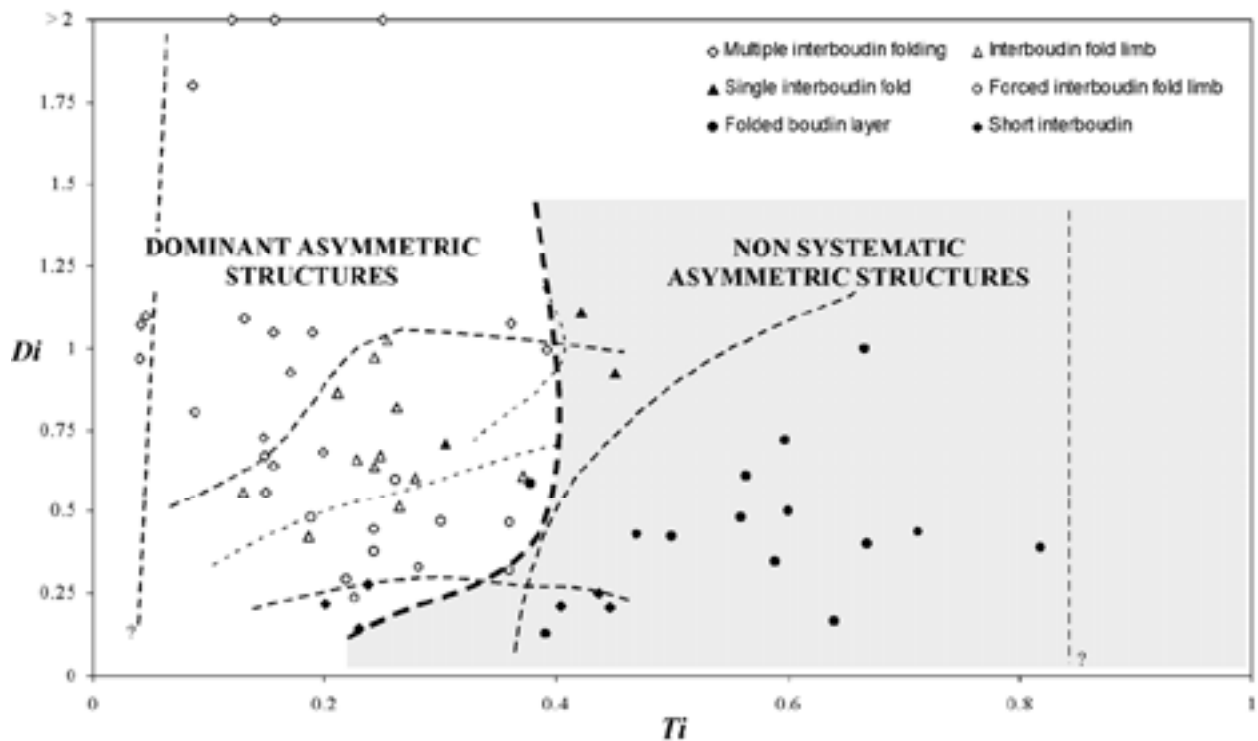


Fig. 3.54 Divisió de l'espectre  $T_i$  vs.  $D_i$  entre els camps d'estructures amb geometries dominants asimètriques i aquelles sense una disposició sistemàtica asimètrica. L'increment de  $T_i$  condiciona la geometria de les estructures.

- **Geometries pròpies de la dinàmica de partícules.** Per a valors de  $T_i \ll 0.10$ . S'ha inferit el seu límit a partir del rang de distribució de les presents dades, i per tant de caràcter temporal. La variació del paràmetre  $D_i$  ha d'originar una subdivisió entre comportaments mecànics pròxims a partícula aïllada o controlat per la interacció entre partícules. Desenvolupament d'estructures asimètriques.
- **Geometries de plegament múltiple de l'interboudin.** Limitat aproximadament a valors de  $T_i < 0.4$  i  $D_i > 0.5-1.0$ . Ha de ser factible una transició amb el de partícules rígides. Segurament, la partició de la deformació que origina el plegament de l'interboudin ha de possibilitar un comportament dels boudins pròxim al d'una partícula aïllada. Aquest disminuirà amb l'increment de  $T_i$ . Per a l'exemple de camp, presenta un arranjament asimètric. Segurament el conjunt de sigmoïdal *quartz-rods* "aïllats" responen aquests dos primers camps.
- **Geometries de capes plegades *pinch-and-swell*.** Limitat per a valors de  $0.10 < T_i < 0.4$  i  $0.25 < D_i < 0.5-1.0$ . Representen l'estructura que millor reflexa la configuració inicial irregular. L'adequació de les longituds d'ona origina el plegament dels extrems dels boudins. És un comportament més pròxim a la situació de plec que no pas al d'una partícula rígida. A nivell de camp desenvolupa geometries asimètriques, amb segurament màxim de rotació dels boudins respecte als casos anteriors.
- **Geometries de capes "domino" i rotació conjunt de boudins.** Els seus límits de desenvolupament són per a valors  $D_i < 0.25$  i  $0.10 < T_i < 0.4$ . És equivalent a la categoria de forma prèviament definida. A nivell de camp no desenvolupa estructures asimètriques.
- **Geometries de capes plegades amb boudins.** Definida per a valors aproximats de  $T_i$  entre 0.4 i 0.8. Per aquestes situacions la geometria dels plecs mostra una independència amb la distribució dels boudins i no desenvolupa una estructura ordenada. Per a valors més baixos molts cops la xarxa és localitzada a la zona d'interboudin i els boudins representen flancs oposats del plec, però l'increment de  $T_i$  potencia el plegament dels boudins i a una distribució no correlada amb la previsible configuració inicial.
- **Geometries de capa plegades.** Per a valors de  $T_i > 0.8$  i on no és mesurable o intuïble una configuració inicial de la capa irregular. Per a venes de quars D2, no és clara una resposta asimètrica i la tendència aparent és a plecs "simètrics". No és evident la resposta asimètrica de les venes Q1 sigui relacionat per desenvolupament actiu d'instabilitats asimètriques o per la influència de l'encaixant.

Si donem més importància al paràmetre  $Ti$ , l'espai  $Ti-Di$  és pot simplificar a quatre modes principals: estructures lligades a la dinàmica de partícules, capes plegades amb boudins, capa plegades d'espessor constant i un darrer camp format per la combinació dels altres tres camps amb rang de distribució entre  $0.10 < Ti < 0.4$ . Aquest darrer camp seria més general i agruparia a totes aquelles estructures amb geometries *pinch-and-swell* plegades. La seva variació és en gran part lligada a la adequació de les pertorbacions a l'espai de l'interboudin. Implícitament representa un reflex de la relació de longitud d'ona/espessor de les pertorbacions, i de l'ordre de superposició d'aquestes. La Fig. 3.55 mostra una correlació entre la geometria dels plecs i la relació entre la longitud d'arc/espessor de l'interboudin ( $Lp/H$ ). Aquesta quantitat ja és continguda dins la definició dels paràmetres geomètrics bàsics mitjançant la relació,

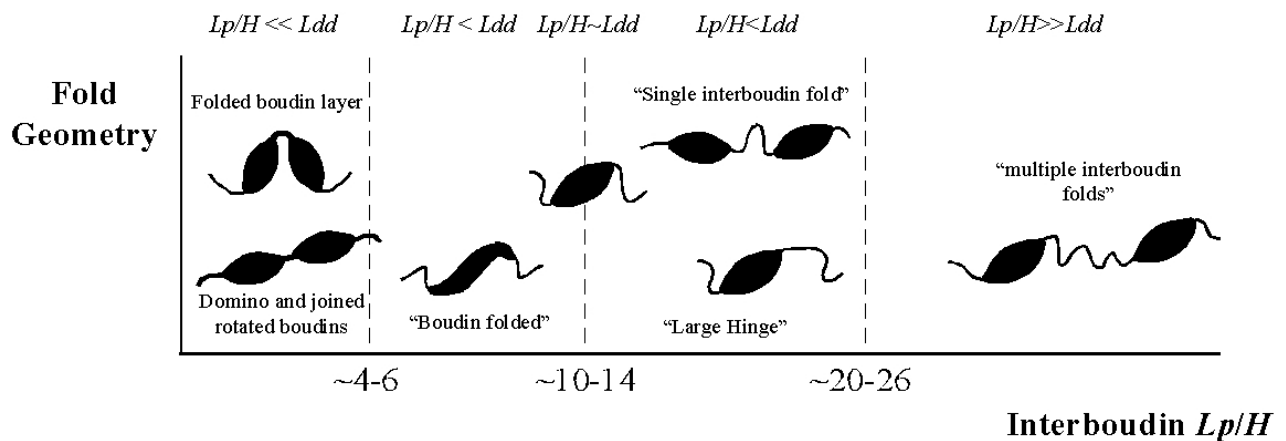
$$Lp/H = 2Ri \frac{Di}{Ti} \quad (3.1)$$

A nivell de teoria de plegament, la mesura de la  $Lp/H$  és la base per a l'estimació de la longitud d'ona dominant ( $Ldd$ ) i del contrast de viscositat en el moment de la nucleació dels plecs (Hudleston and Lan, 1993). Sempre els seu valor és menor a la longitud d'ona inicial dels plecs com a conseqüència de la deformació homogènia de la capa.

Les diferents categories de geometries es distribueixen aproximadament en funció d'aquesta  $Lp/H$ . Configuracions de capes amb boudins plegats o que han rotat conjuntament corresponen a les geometries amb valors de  $Lp/H$  menors. Amb l'increment d'aquest es disposen progressivament els camps amb “interboudin forçat”, “interboudin com a flanc de plec” i els lligats als desenvolupament d'una o múltiples longituds d'ona dins l'interboudin (Fig. 3.55). La disposició  $Lp/H$  d'aquests camps ha de ser funció de les propietats mecàniques del medi. Sobretot, en referència a l'espectre d'amplificació de pertorbacions. L'adequació de la configuració inicial *pinch-and-swell* a les longitud d'ones afavorides pel procés de *buckling* facilitarà la preservació d'aquestes longitud d'ona inicials. És a dir, el desenvolupament d'un tren de plecs que sigui reflex de la configuració inicial *pinch-and-swell* hauria de ser indicatiu d'un bon ajust d'aquesta geometria amb les  $L/H$  més afavorides de l'espectre d'amplificació. Aquelles amb capacitat d'acomodar de forma eficaç la deformació. Sinó, es produeix el desenvolupament de geometries independents a la configuració *pinch-and-swell*, originada per una longitud d'interboudin massa curta o llarga. Llavors es produeix la nucleació i amplificació de noves pertorbacions amb més capacitat d'acomodar la deformació. Segurament l'aspecte més crític són  $L/H$  massa curta, doncs longitud massa llarga poden adaptar geometries anòmales (com xarneres planes, etc.). Per tant, el rang de  $Lp/H$  amb geometries “perfectes” haurien de ser un reflex de la



longitud d'ona dominant i una estimació qualitativa del contrast de propietats entre la capa competent i el medi encaixant en el moment de la nucleació. Els valors de  $Lp/H$  que limiten els camps són mostrats a la Fig. 3.55. Per a geometria perfecta el seu valor orientatiu és  $Lp/H=10-14$ . Si idealitzem el medi com a viscos lineal i un escurçament mitjà paral·lel a la  $S0/1$  entre un 25-30%, mitjançant el diagrama de Schmalholz and Podladchikov (2002) és pot estimar un contrast de viscositat ( $m$ ) entre 70-150. Minimitzant els efectes de deformació homogènia, el contrast seria entre  $m=50-100$  ( $Ldd=12-16$ ). Implica un contrast de moderat a alt entre les venes de quars i la seqüència encaixant metasedimentària.



**Fig. 3.55** Esquema de la variació de la  $Lp/H$  de l'interboudin i la geometria dels plects. Els valors de transició entre les estructures són indicats. Aquesta variació hauria de ser funció de les propietats mecàniques de les venes de quars i el seu contrast amb l'encaixant. Pel cas d'estudi, el contrast de viscositat en el moment de la nucleació hauria de variar entre  $m=50-100$  (o  $Ldd=12-16$ ).

### 3.4.8.2 Mesura del número de vorticitat cinemàtica en dominis de baixa deformació.

Diferents mètodes han estat proposats per a estimar el número de vorticitat cinemàtic ( $Wkm$ ) a partir de les rotacions de cossos rígids (Schoneveld, 1977; Ghosh, 1987; Passchier, 1987; Vissers, 1989; Simpson and De Paor, 1993; Masuda et al. 1995). Bàsicament es poden agrupar en dos procediments diferents:

- L'estimació del grau de no coaxialitat mitjançant la distribució de l'orientació de les partícules en funció de la seva relació axial (Ghosh, 1987; Vissers, 1989; Beam and Fisher, 1999; Masuda et al. 1995). Consisteix en la comparació del diagrama de rotació total de les partícules respecte a les corbes teòriques de rotació finita per a deformacions no coaxials (Ghosh and Ramberg, 1976). En general, la seva aplicació és incerta amb múltiples solucions compatibles. El mètode és més factible si es coneix la deformació

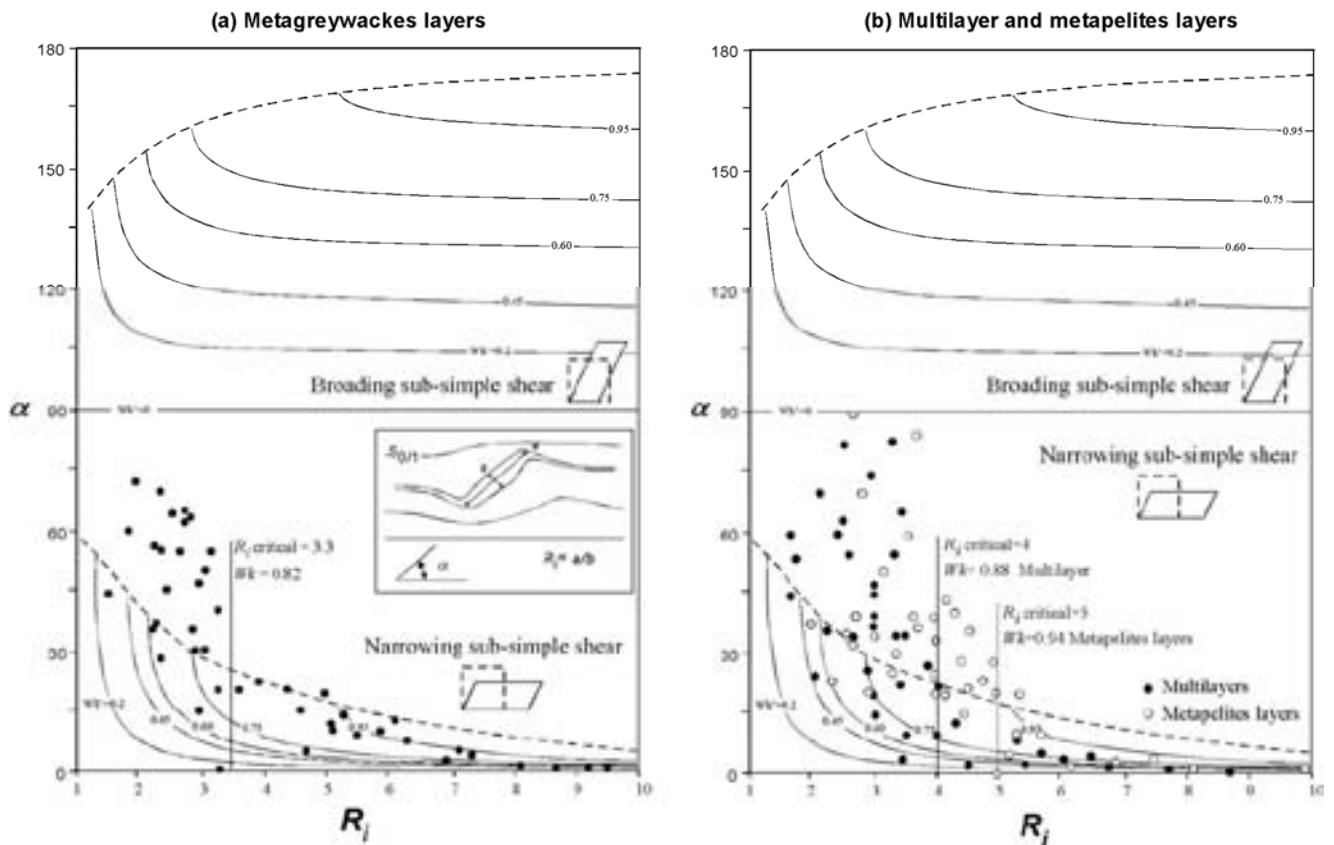
finita. Llavors es poden estimar les corbes per a diferent  $Wkm$  que impliquen aquesta deformació. Una estimació més ràpida és mitjançant partícules esfèriques o cilíndriques, doncs la seva rotació finita és directament proporcional de la deformació angular. S'ha de mesurar la rotació finita respecte a les ISA per una estimació correcta del grau de no coaxialitat ( $Wk'$ ), sinó representarà una estimació del número de vorticitat cinemàtica extern ( $Wk$ ).

- Estimació quantitativa a partir de la distribució de partícules rígides rotades i la detecció de posicions d'estancament (Passchier, 1987; Simpson, 1992; Simpson and De Paor, 1993). Aquest mètode es basa en el fet que per a condicions de cisalla subsimple ( $0 \leq Wk < 1$ ), la rotació d'una partícula rígida pot arribar a ser nul·la. Aquesta condició depèn de la orientació, relació axial de la partícula i de la  $Wk$ . D'aquesta forma la població de partícules rígides es poden descomposar en dos grups: aquelles amb rotacions permanents i que corresponen a relacions axials baixes, i un segon grup d'objectes estancats que correspon a aquells amb relacions axials elevades. L'estimació de la  $Wk$  es realitza a partir de determinar la relació axial que separa els dos camps (*cutoff-point* de Paschier, 1987). La informació pot ser complimentada a partir de la variació de relació axial i orientació de la geometria dels porfiroclastes (Simpson and De Paor, 1993).

Els requisits d'aquests mètodes són condicions de relativa deformació homogènia i per un període durant el qual la deformació pot ser considerada com estacionària. Únicament per aquestes situacions l'anàlisi cinemàtic és justificat i la mesura de vorticitat cinemàtica té alguna mena de sentit. També, s'ha de complir que la mida de grau de la matriu sigui significativament menor a la dels cossos rígids, que la dispersió d'orientacions i formes dels cossos sigui elevada i que la deformació finita acumulada sigui el suficientment elevada per arribar a les posicions d'estancament. En general, aquests requeriments són més fàcil que es compleixin per a zones de cisalla d'elevada deformació i amb límits planars, on el flux pot ser considerat raonablement homogeni i la seva cinemàtica estacionària. Dificilment són vàlids per a zones de baixa i moderada deformació com són les condicions de camp. És justament en aquestes regions per una distribució elevada de la deformació i manca de localització on és més complicat assumir condicions d'estacionarietat i homogeneïtat de la deformació. En gran part seran controlades entre altres per les propietats mecàniques del material, pel desenvolupament de les diferents pertorbacions i/o el grau tant de partició com de relació entre les pertorbacions. Això limita l'aplicabilitat d'aquests mètodes a l'àrea d'estudi.

Segurament les zones on els requisits d'aquests mètodes puguin ser més assumibles siguin les zones de flanc llarg i xarnera d'escala mètrica dels dominis de baixa deformació. El desenvolupament d'instabilitats decamètriques és baix i en general presenten una disposició dels elements estructurals força similar. Es podria arribar a assumir que la orientació de cisalla principal és disposada paral·lela a la S0/1 i fixar el sistema de referència de la cinemàtica paral·lela a la orientació de la S0/1. Les mesures necessàries per aplicar aquests mètodes són la relació axial del *quartz-rods* ( $R_i$ ), i l'angle ( $\alpha$ ) que forma l'eix llarg dels boudins ( $a$ ) i la traça de la S0/1 envoltent (Fig.3.56). Com prèviament s'ha explicat, sempre hi ha certa influència de l'anisotropia i del bandejat composicional dels materials. No tota la població de *quartz-rods* serà apte per l'anàlisi, sobretot les que responen a un comportament passiu o extern.. Per a reduir els seus efectes, únicament s'han d'utilitzar aquells *quartz-rods* que no es trobin associats a pertorbacions harmòniques de l'encaixant, desenvolupin una foliació associada a la rotació i/o comportament més competent dels *rods* ( $S_{rods}$ ) i que generin al seu voltant gradients d'orientació de la S2. Tampoc no s'utilitzaran els *rods* originats sincinemàtics amb la D2. De l'anàlisi de la deformació finita mitjançant venes de quars homogènies s'ha deduït un control de la litologia dels materials encaixants. També de la disposició de la S2. Per això, per a les zones de flanc llarg s'ha diferenciat en tres grups de materials: nivells de metagrauvaques, nivells metapelítics i alternances d'espessor centimètrics d'aquestes litologies (Fig.3.56a,b). Aquest darrer grup, denominat multicapa, també engloba a tots aquells *quartz-rods* situats en els contactes entre les capes. Per a les zones de xarneres no s'observa diferències importants i s'han representat dins un mateix diagrama (Fig.3.57). L'espessor d'interboudin normalitzat és per a tots els casos  $T_i < 0.20$  i gran part de les dades equivalent a condicions de  $0 < T_i < 0.10$ . Dels diagrames es pot observar que la dispersió de les dades és molt elevada, amb grans variacions de l'angle d'orientació dels boudins per a una mateixa  $R_i$ . Però, l'efecte d'aquest paràmetre sempre més clar, i en general, amb l'increment de la relació axial dels boudins s'observen rotacions finites menors. Per a situacions de  $R_i > 6$  aquestes poden considerar-se despreziables i els boudins es comporten com a cossos irrotacionals. Aquesta tendència general amb un increment substancial amb la reducció de  $R_i$  són pròpies de condicions no coaxials o rotacionals (veure apartat 2.2.3).

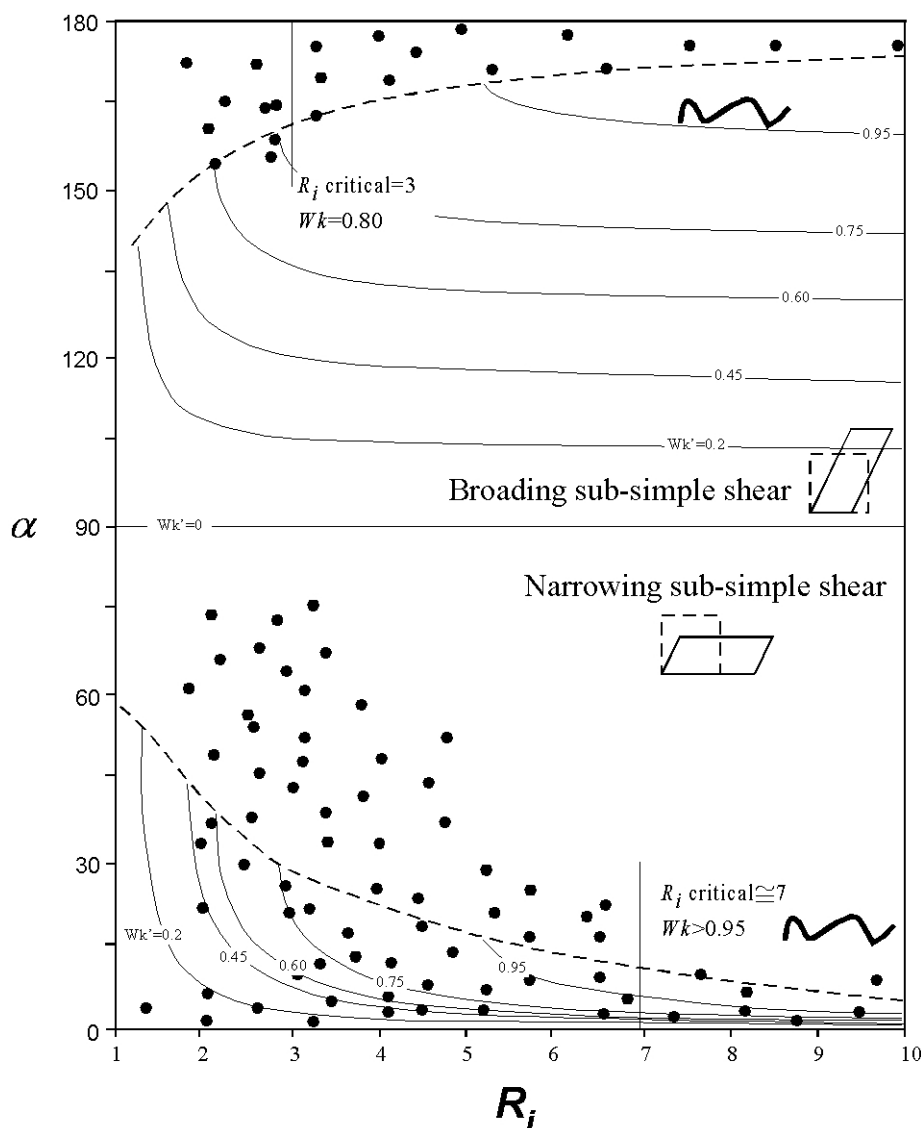
Si comparem els diagrames per a flancs llargs i xarneres, la distribució de tots dos és similar en valors màxims, però mentre per a flancs llarg únicament s'han observat sentits de rotacions senestres mentre als flancs curts també s'han observat sentits dextrals respecte la S0/1. El numero de dades amb aquest sentit i el valor màxim de rotació que implica és sempre menor al



**Fig. 3.56** Diagrames de la distribució de les dades d'orientació ( $\alpha$ ) respecte la relació axial dels boudins ( $R_i$ ) per a situacions de flanc llarg. (a) Litologia de l'encaixant metagrauwaques i (b) multicapes i metapelites. El sentit de cisalla de referència és senestre. S'han marcat els cutt-off points i indicat la  $Wk$  que impliquen.

sentit senestre. Per a condicions de flanc curt, per a valors de  $R_i$  molt elevada és produeix normalment el plegament dels boudins.

Aquests diagrames no poden representar la base per a una estimació estadística de l'orientació dels boudins. Sempre és probable de trobar *quartz-rods* amb qualsevol  $R_i$  sense una aparent rotació respecte la  $S_0/1$ . Amb la reducció de  $R_i$ , la tendència general és a presentar rotacions però, no és viable ni lògic definir un angle mínim de rotació perquè no té sentit físic real. En canvi la tendència de la rotació màxima i la seva relació amb la  $R_i$ , si que sembla *a priori* més significativa. Aquestes observacions descarten el mètode comparació respecte les corbes de distribució teòriques per l'elevada dispersió de les dades. Tampoc no és plausible una mesura directa del valor de rotació finita per a  $R_i=1$ , doncs no hi han dades per aquesta situació. Una estimació a partir de la distribució de les dades indicarien valors màxims de  $\alpha > 90^\circ$  per qualsevol dels diagrames, i confirmaria situacions d'elevada vorticitat cinemàtica si atenem les mesures prèvies de deformació finita amb  $\epsilon$  entre 0.8 a 1.0. Sembla únicament viable el segon mètode



**Fig. 3.57** Diagrama de variació de l'orientació dels boudins respecte la relació axial per a situacions de flancs curts i xarneres. Sentit de cisalla senestre. S'han indicat els valors de la relació axial crítica per a situacions de cisalla subsimple amb aprimament (narrowing) i engruiximent (broadening).

d'estimació mitjançant les orientacions d'estancament. Per fer-ho s'han representat les corbes d'angle límits per a diferents graus de no coaxialitat ( $Wk=0, 0.2, 0.45, 0.60, 0.75$  i  $0.95$ ). Per a condicions de cisalla simple ( $Wk=1$ ) hi hauria rotació de tots els cossos excepte per a  $R_i$ . S'han representat per a condicions amb escurçament (*narrowing subsimple shear*) i extensió (*broadening subsimple shear*) perpendicular al pla de cisalla (Marques and Coelho, 2003). El valor de  $R_i$  del *cutoff-point* ens ho determina el moment que la població de dades supera l'envolvent global de posicions d'estancament (corbes a traços de les Fig. 3.56 i 3.57).

Aquest mètode d'estimació de la  $Wkm$  és similar a l'utilitza't prèviament per Druguet et al. (1997) per estimar la  $Wkm$  a partir dels *quartz-rods* del camp. Aquests autors obtingueren un

valor de  $Wkm \sim 0.9$ . No varen realitzar cap distinció ni segons la litologia de l'encaixant ni cap restricció de les dades a utilitzar ni dels dominis de deformació. D'aquesta forma varen utilitzar de forma conjunta dades tant de zones de baixa com d'alta deformació. El *cutoff-point* el varen obtenir mitjançant les corbes per a situacions de cisalla subsimple del tipus *narrowing*. Si realitzem una estimació de la  $Wkm$  de forma similar s'obtenen uns valors de  $Ri$  crítics entre 3.3 a 5 per a flancs llargs mentre per a flanc curts és de  $\sim 7$  (Taula 3.1). Això impliquen situacions d'elevada no coaxilitat de la deformació  $0.82 < Wkm < 0.95$ . Aquests valors són similars als obtinguts per Druguet et al. (1997). Però, cal vigilar o jutjar el que implica les condicions de contorn assumides. Situacions de *narrowing* impliquen extensió paral·lela al pla de cisalla. Aquesta circumstància és inadmissible per a les condicions de camp, on la S0/1 mostra evidències d'escurçament finit i plegament. Per tant, les condicions de cisalla subsimple han de considerar escurçament paral·lel al pla de cisalla de referència i s'han d'utilitzar les corbes que impliquen situacions de cisalla subsimple amb extensió paral·lela a la S0/1 (*broadening subsimple shear*). En aquestes situacions no podem estimar el *cutt-off point* per als casos de flancs llargs. La deformació finita de la roca és baixa com arribar a les condicions d'estancament. Mentre per a casos de zones de xarnera es podria estimar una condició de  $Wkm \sim 0.80$  a partir de la població de dades amb sentits aparents dextrals. La distribució de les dades té és sentit si ho comparem amb la disposició de la S2. Els valors de l'angle d'obliquïtat agut entre la S0/1 i la S2 ( $\theta$ ) és entre  $60^\circ$  a  $35^\circ$  per a flancs llargs. Els valors més elevats són per condicions de l'encaixant més competent. Si assumim que la S2 representa l'element estructural més pròxim a l'eigenvector extensional o *fabric attractor* de Passchier (1997), els boudins necessitarien rotacions senestres de més de  $120^\circ$  per a paral·lelitzar-se amb la S2 actual. Per a situacions de flanc curt,  $\theta = 90-75^\circ$  i la rotació necessària són entre  $90$  a  $75^\circ$  en sentit senestre i el complementari en sentit de rotació els boudins dextral. Això podria implicar sentits de cisalla paral·lels a la S0/1 contraris entre els flancs llargs i curts. Sigui com sigui, podem agafar el valor de les rotacions màximes dels *quartz-rods* i estimar la deformació necessària a partir de les equacions teòriques de rotació de partícules rígides (Ghosh and Ramberg, 1976). Aquest mínim és per a condicions pròximes a cisalla simple però impliquen situacions d'elevada deformació amb  $\epsilon > 1.8$  o, de forma equivalent relacions axials de l'el·lipse seccional de deformació finita  $Rf$  més gran que 16!. Aquestes deformacions no concorden amb les estimacions a partir de les venes de quars amb  $\epsilon$  entre 0.8 a 1.0, ni les pròpies descripcions de camp. Per aproximar-nos a aquests valors hauríem d'assumir condicions de cisalla súper simple, fet que tampoc concorda amb la història deformacional dels materials. A més s'han de considerar que representarien estimacions per a condicions de



Flanc Llarg (Litologia)	Narrowing s.s.		Broading s.s.	
	R crític	Wkm	R crític	Wkm
Metagrauvaques	3.3	0.82	?	?
Multicapa (ML)	4	0.88	?	?
Metapelites	5	0.94	?	?
	R crític	Wkm	R crític	Wkm
Flanc Curt	7	0.95	3	0.80

**Taula. 3.1** Taula amb els valors de relació axial crítiques i estimació dels número de vorticitat cinemàtica (*Wkm*) per a situacions de flanc llarg i curt. Les mesures per a condicions de *narrowing subsimple shear* han de ser considerades com a no vàlides.

deformació plana. Per a condicions amb pèrdua d'àrea, les velocitats de rotació dels cossos disminueixen i foren necessàries majors deformacions finites per explicar les orientacions finals de l'estructura (Freeman, 1985; Passchier, 1987). D'aquesta forma, la interpretació més viable de la distribució de les dades és a indicar una estructura amb un arranjament molt rotacional o d'elevada vorticitat. Pel camp sembla que domina sentit senestre respecte la S0/1; però és incert el significat i la relació amb la cinemàtica de la deformació. *A priori* i a nivell qualitatiu indicarien una vorticitat cinemàtica respecte la S0/1 senestre, però no és plausible una estimació quantitativa. Més si atenem a la seva desviació respecte a la situació de partícula rígida i segurament la seva tendència cap a una estructura regida pel procés de *buckling* o plegament.

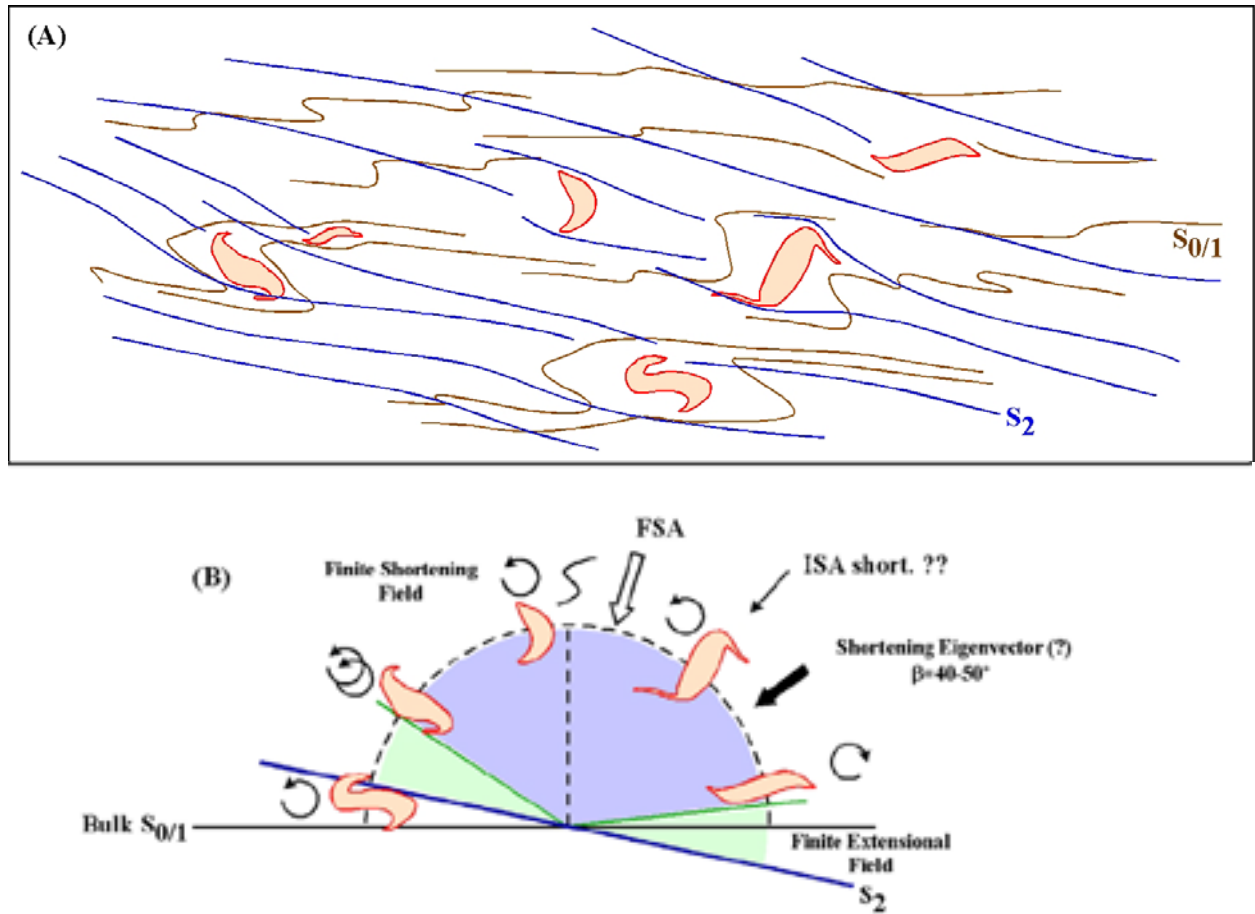
### 3.4.8.3 Interpretació del número de vorticitat cinemàtica en dominis d'elevada deformació

Els mètodes d'estimació de la *Wk* de l'apartat anterior no són aplicables per a zones de deformació moderada-alta. L'efecte de rotació externa de la *fabric*, i tant el desenvolupament heterogeni com d'una foliació de transposició compliquen l'assumpció de condicions estacionaries i zones de relativa deformació homogènia. I per tant no té sentit un anàlisi quantitatiu de la cinemàtica de la deformació. Però a nivell interpretatiu, una qüestió que ens podem plantejar és si es pot establir una relació entre la variació de la geometria dels *quartz-rods* i aspectes de la cinemàtica de la deformació d'aquestes zones. No obstant la simplicitat de la qüestió, portar-ho a la pràctica és molt complex. Tres grans grups de geometries s'havien diferenciat (apartat 3.4.7.2). Un primer grups amb *quartz-rods* amb geometries similars als *mica-fish* i sentit de rotació respecte la S0/1 dextral, un segon grup amb geometries similars als de baixa deformació però també amb boudins plegats i un darrer grups amb *quartz-rods* que mostraven rotacions finals molt elevades i geometries semblants a porfiroclastes tipus "δ". Un

esquema ideal de la distribució d'aquests grups i la seva relació amb la S0/1 i la S2 és mostrada a la Fig. 3.58a. Per l'elevada intensitat de la deformació d'aquestes zones, amb  $\epsilon_s > 1.5$ , podem assumir que la S2 és pròxima a l'eigenvector "finit" de la deformació i que representa la posició d'*attractor* de la *fabric*. L'escurçament finit màxim (FSA) el podem assumir normal a la S2 i amb una orientació NNW-SSE. Els boudin plegats representen cossos que han creuat l'orientació de la FSA i en romanen pròxims (Fig. 3.58b). En canvi, els *quartz-rods* tipus "δ" no obstant presentar una orientació que també han creuat la FSA no presenten plegament del boudin. Han acomodat la deformació a partir d'elevades rotacions, segurament per tal de paral·lelitzar-se a la S2. Segurament l'efecte controlador és la cerca d'una posició més estable respecte a la direcció d'escurçament o de repulsió de la cinemàtica (Passchier, 1997). Aquesta cerca ho fan mitjançant rotacions respecte la S0/1 senestres. Aquest camp és el que mostra una disposició major a partir de les dades de camp i podria ser el sintètic. Per altra banda, els boudins amb formes de *mica-fish* han de representar situacions on s'ha afavorit una rotació dextral. Han d'estar situats amb una disposició on l'efecte de repulsió de l'eigenvector d'escurçament ha afavorit una rotació cap aquest sentit. Entre aquests cossos i els boudins plegats haurien d'estar tant l'eigenvector d'escurçament com la ISA d'escurçament. Pel sentit de rotació dominant, la ISA ha de situar-se a un angle més obtús respecte la S0/1. D'aquesta forma, pel sistema de referència fixat a la S0/1, el sentit de vorticitat seria senestre. Què pot marcar aquestes orientacions? Segurament les geometries similars a zones de baixa deformació i amb forta adaptació de la S2 al seu voltant. Podrien representar geometries d'estancament subparal·leles a l'eigenvector compressiu. L'angle respecte la S2 és pot inferir entre 40° a 60°. Si es realitza una estimació de la *Wkm* a partir d'aquest angle, suposant equivalent a l'angle entre "eigenvectors", la deformació interpretada a partir d'aquests elements seria subsimple no coaxial amb sentit senestre. Però, s'han d'afegir les components de rotació externa de la *fabric* de sentit dextral. A nivell de la *Wkm* equivalen a una disminució i un increment de la coaxilitat per a condicions de rotacionalitat. Però és incert.

Per finalitzar, l'aspecte segurament més rellevant de la informació de la Fig.3.58 i d'aquesta descripció especulativa, és que la geometria d'aquests *rods* no responen a una disposició inicial subparal·lel a la S0/1. Representa el retreballament d'una dispersió d'orientacions dels *rods*. Representa el retreballament d'un arranjament estructural dels primers estadis de la S2, on els *quartz-rods* ja s'havien començat a plegar i adquirir una geometria "similar" als de les zones de baixa deformació. L'efecte de la rotació dextral (cinemàtica o externa) implica una diferenciació

de la cinemàtica entre zones de baixa i moderada deformació. Una acomodació de la deformació



**Fig. 3.58** (A) Esquema interpretatiu de la relació entre la geometria dels sigmoïdals *quartz-rods* i els elements estructurals en zones d'alta deformació. (B) Inferència respecte a les direccions principals de la deformació D2.

a ritmes diferents però també a nivell de cinemàtica i d'estructures. El mode d'acomodar la deformació en les zones de baixa deformació, mitjançant la crenulació i plegament generalitzat no han de representar els estatges inicials de les zones d'alta deformació. Aquests normalment és per transposició del flanc llarg i l'aixafament dels plecs F2. Donada la tendència a una distribució de la deformació sense elevada localització i partició en dominis, la progressió dels *quartz-rods* és "sincrònica" en els dominis però a velocitats o ritmes d'amplificació diferents. La sensibilitat de l'estructura als canvis de cinemàtica serà qui ens condicionarà la possibilitat de poder interpretar l'evolució de la cinemàtica. Com més endavant és veurà, els sigmoïdal *quartz-rods* o el plegament de venes d'espessor no homogeni no són capaços d'enregistrar la variació de la cinemàtica i normalment la seva geometria és en gran part controlada per la cinemàtica associada al moment de nucleació i selecció de pertorbacions (veure capítol 7). No equival a la cinemàtica del moment de fossilització de l'estructura (Jiang and White, 1995). Segurament, les zones d'alta deformació han d'anar associades a un increment de la coaxilitat de la deformació

(zones més al Nord de l'àrea reduïda d'estudi), amb una tendència cap a cinemàtiques amb pla de cisalla E-W i sentits de no coaxilitats dextrals.

### 3.5 Comentari final

Els diferents aspectes tractats al llarg d'aquest capítol són una evidència de la complexitat que representen els sigmoïdal *quartz-rods* i la necessitat d'abordar un estudi de modelització de la seva dinàmica, alhora de poder utilitzar com a marcadors de la deformació. Però, la seva idoneïtat com a indicador cinemàtic tant qualitatiu com quantitatiu s'haurà d'analitzar profundament, doncs les incerteses associades a partir de les dades de camp són molt elevades. La relació entre rotacionalitat d'aquests cossos i el significat cinemàtic és *a priori* incert. D'igual forma també el grau d'aplicabilitat, donada la complexitat de camp de la deformació si un s'endinsa en el seu detall.

A nivell de síntesi de camp, la descripció i anàlisi de les venes de quars ens han permès una millor quantificació de la D2 per a zones de baixa deformació. S'ha posat de manifest el caràcter heterogeni d'aquesta deformació amb increment de la seva intensitat cap al Nord. També condicions de pèrdua d'àrea en la secció horitzontal i extensió en la direcció vertical. Els valors d'escurçament màxim varien entre un 50% per a les zones de menor deformació i amb disposició dels materials N-S, fins a valors superiors a un 70% per aquelles zones de moderada deformació i desenvolupament de bandes de transposició. La relació entre aquests dominis no és simple, i no sembla coherent assumir una deformació progressiva en sentit estricte. Hi ha evidències, com la variació de la geometria de l'el·lipsoïd estimat, la diferent forma d'acomodar localment la deformació o la distribució desigual dels sigmoïdal *quartz-rods* que advocarien per aquest fet. El número de vorticitat ( $Wk$ ), o fins i tot el grau de no coaxilitat ( $Wk'$ ), entre aquestes zones sembla diferents; però no s'ha pogut establir una diferenciació clara.

Mitjançant les observacions de camp s'ha establert i visualitzat com és la variació de la geometria de les estructures D2 entre configuracions de capes d'espessor homogeni i partícules aïllades. S'ha dividit l'espectre de geometries en funció de la relació de tres paràmetres bàsics:  $Ri$ ,  $Ti$  i  $Di$ . Aquesta transició posa de manifest que el grau d'asimetria de les estructures és funció de la configuració inicial. D'aquesta forma el desenvolupament de plecs asimètrics per a capes aïllades (*single-layers*) no sembla evident. Almenys, sinó hi ha influència dels plegament del sistema multicapa de l'encaixant. Tots aquests aspectes són la base per la inspiració dels models numèrics i experimentals que es desenvoluparan en els següents capítols. Amb un darrer objectiu, generar eines que ens permetin obtenir informació addicional per a la interpretació del camp.

