

ANÁLISE CINEMÁTICA E DINÂMICA DA REDE DE FRACTURAS IDENTIFICADA NA REGIÃO DE STA COMBA DA VILARIÇA – POCINHO (NE PORTUGAL)

A. Mateus¹, M. Andrade¹, J. Cabral¹, F. Monteiro Santos²

¹ Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, 1749-016 Lisboa.

² Departamento de Física, Centro de Geofísica, Fac. de Ciências, Univ. Lisboa, R. Escola Politécnica, 58, 1269-102 Lisboa.

Abstract

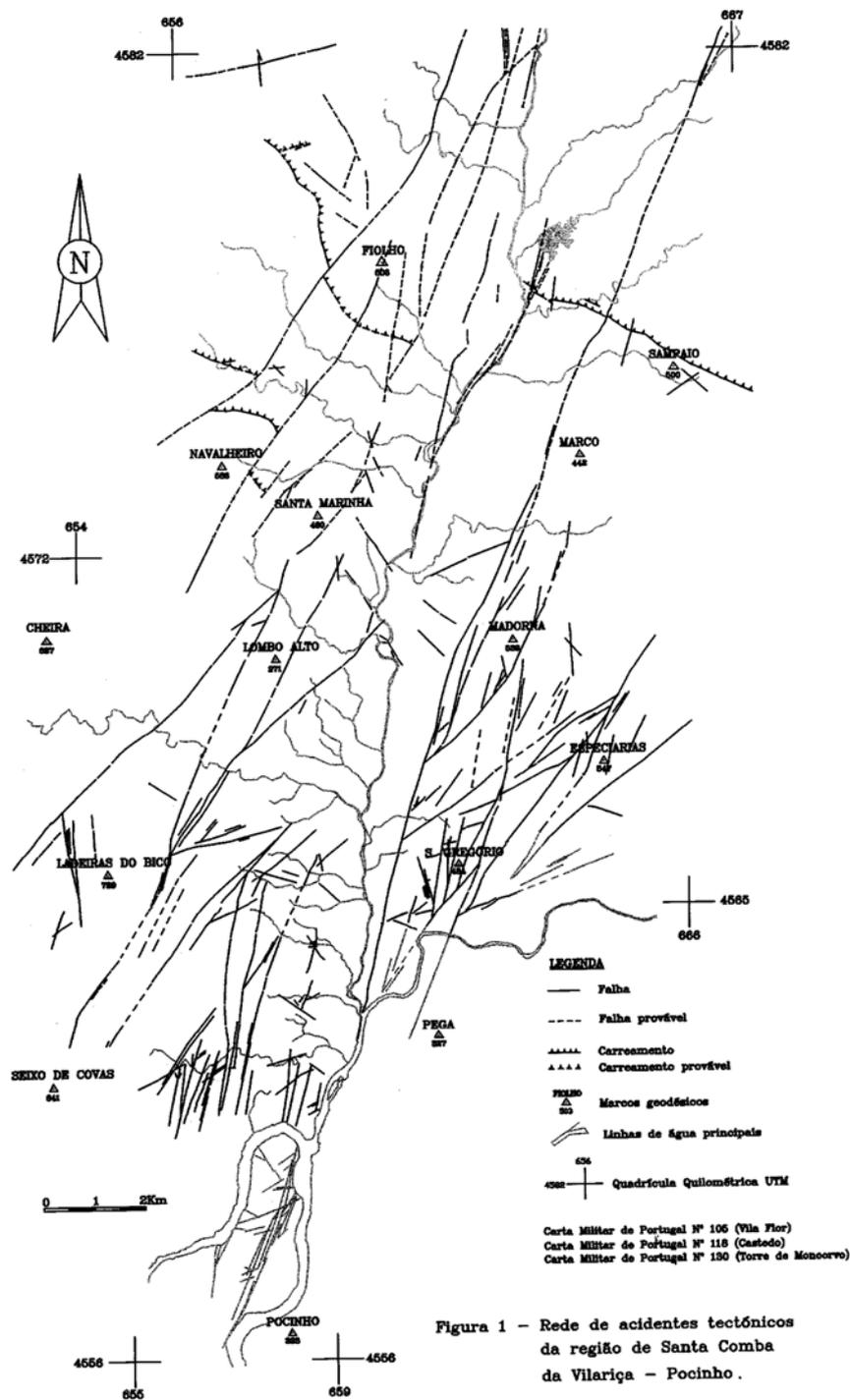
The fracture network mapped in Sta Comba da Vilariça – Pocinho region comprises different tectonic accident families, some of them showing polyphasic movement. A gradual rotation of σ_1 trajectories during the final stages of the Variscan cycle from ESE-WNW – E-W towards NE-SW, can be inferred on the basis of the geometrical analysis of the mapped macrostructures. The relative stability of the early mineral associations found within and nearby the accidents suggests that this σ_1 rotation took place under pressure conditions below 3 kbar and temperatures ranging from 350 to 200°C. The general reactivation experienced by the main families of accidents occurred during the Alpine cycle under a stress field with σ_1 oriented near N-S and in P-T conditions lower than 1 kbar and 150°C, respectively. This interpretation is generally compatible with the solutions obtained from the dynamic analysis of the striated movement planes.

Resumo

A rede de fracturas identificada na região de Sta Comba da Vilariça – Pocinho compreende diferentes famílias de acidentes tectónicos, algumas das quais registam movimentação polifásica. Uma rotação gradual das trajectórias de σ_1 durante os estádios finais do ciclo Varisco de ESE-WNW a E-W para NE-SW, pode ser inferida com base na análise geométrica das macroestruturas cartografadas. A estabilidade relativa das várias associações minerais reconhecidas ao longo ou no seio dos corredores de movimento, sugerem que tal rotação se processou em condições de pressão <3kbar e temperaturas variáveis entre 350-200°C. A reactivação generalizada das principais famílias de acidentes ocorreu durante o ciclo Alpino sob um campo de tensões com σ_1 próximo de N-S, em condições P-T <1 kbar e <150°C, respectivamente. Esta interpretação é globalmente compatível com as soluções obtidas através da análise dinâmica dos planos de movimentação estriados.

1. Nota introdutória

A região de Sta Comba da Vilariça – Pocinho compreende uma importante rede de acidentes, destacando-se, a Norte, os carreamentos transmontanos (e estruturas subsidiárias) e, a Sul, o conjunto de desligamentos que limitam a depressão tectónica da Vilariça (fig.1). Os primeiros, separando os Domínios Autóctone, Parautóctone e Alóctone Inferior do NE transmontano, correspondem geralmente a faixas de esmagamento intenso com espessura métrica, rumo geral variável entre NW-SE e WNW-ESE e pendor forte (> 60°) para NE ou NNE; estas estruturas não serão objecto de análise no presente estudo. Os acidentes do segundo conjunto integram uma complexa rede de fracturas que, especialmente bem preservada nas rochas graníticas: 1) manifesta forte assimetria, destacando-se a larga predominância dos sistemas frágeis esquerdos NNE-SSW e NE-SW; e 2) compreende grupos escalonados de falhas NNE-SSW que limitam patamares tectónicos discrepantes e cuja disposição, em conjunto com os efeitos da erosão diferencial, contribui para a distinta expressão geomorfológica das escarpas que limitam a oriente e ocidente a depressão tectónica de Vilariça (e.g. Cabral, 1985, 1989). A compreensão dos factores que concorreram para o desenvolvimento desta rede de fracturas e, conseqüentemente, para o estabelecimento das suas principais características geométricas, requer, contudo, a definição de critérios úteis à discriminação das diferentes famílias de estruturas que nela se inserem. Tal afigura-se ainda de significativa importância na análise dos sucessivos quadros geodinâmicos que se estabeleceram desde o Paleozóico na região em estudo, determinando a reactivação polifásica de muitas das estruturas frágeis cartografadas, em particular as de rumo geral NNE-SSW. É, pois, este o principal objectivo do presente trabalho, recorrendo à análise dos dados obtidos durante as várias campanhas de campo recentemente efectuadas (1996/98) em conjunto com as informações adquiridas em trabalhos anteriores (e.g. Ribeiro, 1974; Cabral, 1985; Silva *et al.*, 1991; Mateus, 1996; Mateus & Ribeiro, 1991).



2. Principais famílias de acidentes

Os dados actualmente disponíveis permitem dividir a população inicial de acidentes medidos (em número de 353 – fig.1) em três grandes conjuntos, a saber: (1) *Zonas de cisalhamento semi-dúctil – semi-frágil* que, contemplando 18% do banco de dados, comporta

dois subconjuntos principais constituídos, respectivamente, por estruturas isentas de critérios denunciadores de reactivação tardia e por estruturas reactivadas; (2) *Estruturas frágeis variscas*, compreendendo a maioria dos dados adquiridos (44%) e passíveis de agrupamento em dois subconjuntos principais consoante a existência, ou não, de critérios de campo que atestem cabalmente a sua subsequente reactivação (sendo o último subconjunto dividido em vários grupos de acordo com estilo tectónico e a idade relativa da reactivação); e (3) *Acidentes activos durante o Plio-Quaternário*, agregando cerca de 38% das estruturas consideradas neste estudo e para as quais existem critérios que fundamentem a sua actividade neotectónica.

Dos 64 segmentos de *zonas de cisalhamento semi-dúctil – semi-frágil* observados, apenas 47 se apresentam estriados e preservam critérios cinemáticos de leitura não ambígua. A apreciação geral do conjunto de dados disponível para este tipo de estruturas mostra que as famílias percentualmente mais importantes e cinemática esquerda apresentam direcções próximas de N40-50E e N70-80E, enquanto as de movimentação direita adquirem predominantemente rumos compreendidos entre N10W e N10E. Habitualmente, estes acidentes desenvolvem-se em domínios periféricos das fácies graníticas precoces e ocorrem na dependência mais ou menos directa de cisalhamentos dúcteis esquerdos com orientação geral WNW-ESE a W-E, raramente retomados em regime frágil, e por isso não assinalados no mapa patente na fig.1. Os corredores ENE-WSW de cedência semi-dúctil são relativamente frequentes, apesar da sua extensão lateral ser, por norma, reduzida. Os corredores NNE-SSW de cedência semi-dúctil ou semi-frágil são mais comuns (podendo, em muitas circunstâncias, a sua orientação inflectir para rumos próximos de N-S ou mesmo NNW-SSE) e apresentam sempre desenvolvimento heterogéneo onde a distribuição dos planos C-S permite inferir, regra geral, movimentação direita. Em qualquer dos casos, o desenvolvimento de bandas metassomáticas em domínios adjacentes a estes acidentes tectónicos, aparenta constituir um guia de campo útil ao seu reconhecimento. Estas bandas, geralmente simétricas e de extensão variável, encontram-se, por norma, enriquecidas em quartzo (endurecido), turmalina e moscovite (frequentemente deformada), traduzindo o estabelecimento de processos metassomáticos em condições de relativa alta temperatura na dependência de fluidos tardi-magmáticos. Tal assinatura mineralógica contrasta com a que sublinha os segmentos das zonas de cisalhamento alvo de reactivação tardia, sendo esta última vulgarmente caracterizada pela presença de paragénese mineral dominadas pela associação quartzo leitoso (não deformado) + ilite ± clorite ou essencialmente constituídas por minerais de argila (que, não raras vezes, agregam microclastos de quartzo e/ou de turmalina), se a reactivação decorreu em condições de mais baixa temperatura. Do ponto de vista estrutural, a reactivação (polifásica) das zonas de cisalhamento em condições supracrustais traduz-se pelo desenvolvimento de numerosos planos estriados, domínios de cataclase e/ou de *fault gouge*. O estilo tectónico geralmente adquirido pelos segmentos das zonas de cisalhamento ENE-WSW e NNE-SSW retomados durante os eventos tectónicos tardios é, respectivamente, de falha esquerda inversa e de desligamento esquerdo.

A rede de fracturas em estudo é dominada por *estruturas frágeis variscas* de direcção variável e que, no banco de dados disponível, correspondem a 279 medições, 84 das quais dizem respeito a planos estriados. As famílias mais importantes desenvolvem-se segundo rumos compreendidos entre NNE-SSW a NE-SW (apesar das direcções NNW-SSE e ENE-WSW serem comuns em certos domínios da região cartografada) e correspondem, por norma, a acidentes sujeitos a reactivação polifásica, frequentemente sublinhados por diferentes tipos de rochas de falha e/ou por precipitados de natureza siliciosa predominante. Deste modo, a caracterização mineralógico-textural dos preenchimentos de falha que sublinham os vários troços dos acidentes em causa, bem como o reconhecimento do tipo e natureza mineralógica das estrias que se encontram preservadas nos planos de movimento (não raras vezes constituindo diferentes gerações e, por isso, testemunhando distintos incremen-

tos de cedência frágil em diferentes condições de temperatura), afigura-se determinante à definição de critérios úteis à discriminação dos vários eventos de reactivação e sua cronologia relativa. Assim, os planos de movimento correlativos de determinado evento tectónico: *i*) apresentarão sentidos de movimento geometricamente compatíveis, incluindo a possibilidade de constituírem pares conjugados ou grupos cuja distribuição apresenta simetria ortorrômbica (Aydin & Reches, 1982; Krantz, 1988); *ii*) encontrar-se-ão sublinhados por paragénese minerais similares do ponto de vista composicional e em termos de deformação (em particular quando a estrutura se desenvolve em litologias congéneres); e *iii*) e estabelecem com as restantes estruturas e outros marcadores idênticas relações geométricas.

O traçado das grandes estruturas frágeis variscas de direcção compreendida entre N-S e NNE-SSW é, com frequência, condicionado pelo desenvolvimento prévio das zonas de cisalhamento anteriormente referidas. Os troços não sujeitos a reactivação subsequente, embora escassos, preservam critérios cinemáticos que permitem inferir um estilo tectónico de desligamento direito predominante durante eventos tectónicos aparentemente correlativos da cedência frágil como desligamentos esquerdos de muitas estruturas ENE-WSW a E-W (actualmente subsidiárias das grandes zonas de falha). A este respeito importa salientar que tal correlação encontra também fundamento na natureza mineralógica similar e nas características microestruturais congéneres apresentadas pelos precipitados hidrotermais que sublinham estes acidentes. O mesmo acontece com os preenchimentos das estruturas NE-SW, reconhecíveis a qualquer escala e predominantemente distensivas, cujo desenvolvimento deverá ser síncrono do sistema conjugado acima mencionado.

A reactivação polifásica tardia dos acidentes NNE-SSW como desligamentos esquerdos, explicando a sua envergadura actual e, *a priori*, correlativa da retoma das estruturas distensivas NE-SW segundo um estilo tectónico similar, conduz geralmente à génese de diversas rochas de falha, de onde se destacam os protocataclasitos e as brechas de cimento ferruginoso relativamente friável. Os segmentos de falha reactivados em condições térmicas inferiores são, por norma, sublinhados por *fault gouge*. O agrupamento de acidentes percentualmente mais significativo compreende efectivamente estruturas que, por norma, limitam domínios brechóides e/ou de cataclase mais ou menos evidente, estando em alguns casos sublinhadas por faixas de *fault gouge* de possança milimétrica(-centimétrica).

O total de medições efectuadas que dizem respeito a *estruturas com actividade neotectónica* cifra-se em 133, das quais apenas 90 dizem respeito a planos estriados. A idade plio-quadernária dos movimentos associados a estas estruturas é fundamentalmente indicada pela observação de deslocamentos em depósitos sedimentares que preenchem a depressão da Vilariça, ou pelo contacto tectónico entre os sedimentos detriticos terciários e/ou quadernários com as rochas constituintes das unidades cartográficas paleozóicas. Importa ainda notar que a esmagadora maioria destes planos estriados não têm expressão cartográfica e correspondem a estruturas observadas em dois troços da zona de falha principal aflorantes em Quinta Vale Meão (a NNW de Pocinho) e Quinta da Terrincha (a W de Horta da Vilariça), beneficiando de todo um conjunto de valas recentemente abertas para a realização de novos acessos e/ou construção de outras infraestruturas. As estruturas que integram este conjunto de acidentes e que apresentam expressão cartográfica correspondem, por norma, a zonas de esmagamento intenso, vulgarmente friáveis (se bem que em alguns casos sublinhadas por abundante *fault gouge*), onde dificilmente se reconhecem estrias de qualquer tipo.

3. Análise cinemática e dinâmica

A presente análise cinemática e dinâmica tem por base uma população de superfícies estriadas que corresponde a cerca de 66% da totalidade de planos medidos durante os levantamentos geológicos realizados até ao momento. O banco de dados foi organizado informaticamente, englobando indicações precisas sobre os locais (estações) onde se proce-

deu à aquisição dos dados utilizados e respeitando os critérios de campo que fundamentam o agrupamento de estruturas geneticamente relacionadas. A determinação das configurações de tensão que se ajustam aos vários agrupamentos de acidentes recorreu à rotina BRUTE3 do *software* devido a Hardcastle (1989), onde o cálculo das tensões desviacionais normalizadas e da razão $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ se processa com base em métodos de inversão que têm em conta os constrangimentos impostos pelo critério de cedência de Mohr-Coulomb. Atribuiu-se ao coeficiente de fricção o valor de 0.40 e assumiu-se uma coesão nula, porquanto a maioria dos acidentes aparenta resultar da reactivação de anisotropias pré-existentes (retomadas em níveis crustais relativamente superficiais); nenhum valor foi considerado para a pressão de fluidos. A projecção dos planos estriados no diagrama de Mohr em função dos valores de R , recorrendo à rotina FLUMO do programa desenvolvido por Sperner *et al.* (1993), permitiu averiguar a plausibilidade mecânica das soluções de tensão encontradas.

3.1. Síntese dos resultados obtidos

Os resultados decorrentes da análise dinâmica efectuada podem ser sumarizados do seguinte modo:

- 1) Os segmentos das zonas de cisalhamento semi-dúctil – semi-frágil isentos de evidências de reactivação subsequente afiguram-se compatíveis com um campo de tensões em que σ_1 , σ_2 e σ_3 se orientam, respectivamente, $20^\circ, S53^\circ E$, $39^\circ, S54^\circ W$ e $44^\circ, N16^\circ E$ (fig.2), se bem que o ajuste mecânico obtido não se afigure muito favorável. Tal inconsistência pode, contudo, ser aparente e, em termos gerais, imputável ao facto da natureza semi-dúctil – semi-frágil da deformação acomodada pelos acidentes em causa não ser cabalmente tida em consideração pelo critério de cedência de Mohr-Coulomb imposto à rotina de cálculo; efectivamente, o deslizamento só é fortemente condicionado por σ_n quando se processa em regime friccional. Ainda assim, a orientação obtida para σ_1 revela-se compatível com a que se infere a partir dos filonetes precoces de quartzo endurecido + turmalina \pm feldspato (subverticais ou com pendor forte para SE, apresentando rumo geral variável entre N50W e N70W).
- 2) As estruturas frágeis variscas aparentemente isentas de reactivação tardia formam dois sistemas compatíveis com campos de tensão distintos. No primeiro, $\sigma_1 = 10^\circ, N80^\circ E$, $\sigma_2 = 70^\circ, N38^\circ W$ e $\sigma_3 = 17^\circ, S7^\circ E$. No segundo, ajustável à maioria dos dados disponíveis, $\sigma_1 = 50^\circ, N45^\circ E$, $\sigma_2 = 40^\circ, S48^\circ W$ e $\sigma_3 = 2^\circ, S43^\circ E$ (fig.3). Apesar dos valores obtidos para R (≈ 1) denunciarem atitudes mal constrangidas para σ_1 e de σ_2 , não deixa de ser significativo o facto dos filões subverticais quartzosos de direcção geral NE-SW abundarem na região em estudo, bem como o facto da maioria dos segmentos reactivados de zonas de cisalhamento semi-dúctil – semi-frágil se revelar compatível com um campo de tensões similar se bem que apresente $R = 0.5$.
- 3) O agrupamento de acidentes percentualmente mais significativo (incluindo zonas de cisalhamento semi-dúctil – semi-frágil reactivadas em regime frágil e estruturas frágeis variscas retomadas tardiamente) é compatível com um campo de

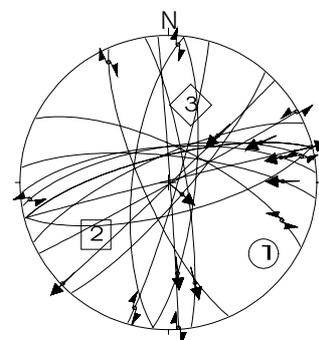


Fig2.

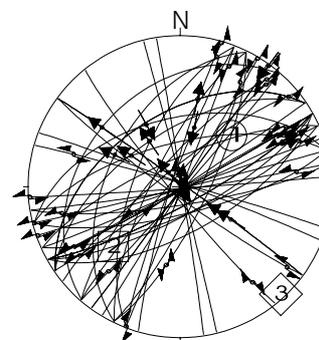
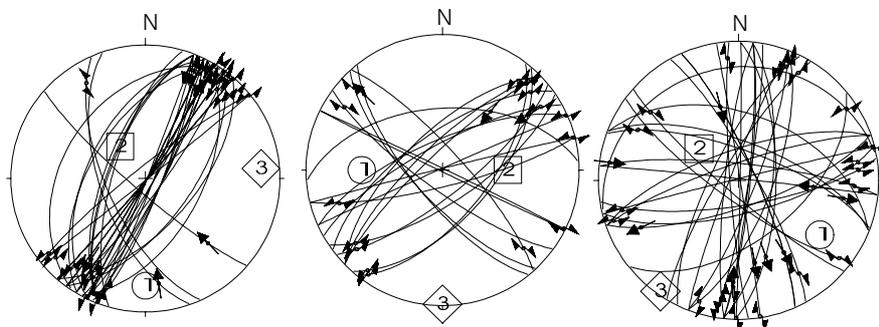


Fig.3.

Fig.4.



tensões em que $\sigma_1=20^\circ, N$, $\sigma_2=70^\circ, S$ e $\sigma_3=0^\circ, E-W$, para o qual a solução mecânica se afigura bastante plausível.

- 4) A análise dinâmica das estruturas com actividade neotectónica revela a possibilidade destas se repartirem fundamentalmente por três subconjuntos de falhas compatíveis com os seguintes campos de tensão (fig.4): (i) $\sigma_1=20^\circ, S$, $\sigma_2=65^\circ, N28^\circ W$ e $\sigma_3=14^\circ, N85^\circ E$; (ii) $\sigma_1=10^\circ, W$, $\sigma_2=80^\circ, E$ e $\sigma_3=0^\circ, N-S$; (iii) $\sigma_1=30^\circ, S56^\circ E$, $\sigma_2=60^\circ, N51^\circ W$ e $\sigma_3=2^\circ, S35^\circ W$ (esta última pior constringida).

4. Discussão e principais conclusões

A rede de fracturas identificada na região de Sta Comba da Vilariça – Pocinho, especialmente bem preservada nas rochas graníticas, integra diferentes famílias de acidentes tectónicos, algumas das quais sujeitas a movimentação polifásica. Tal é particularmente notório para as zonas de cisalhamento semi-dúctil – semi-frágil, podendo também ser colocado em evidência para os acidentes de rumo geral NNE-SSW, muito embora os troços destes últimos isentos de critérios atribuíveis a reactivação sejam, de facto, escassos na região. A análise geométrica das macroestruturas em conjunto com as informações fornecidas pelas associações mineralógicas que se estabelecem no seio das faixas adjacentes aos acidentes tectónicos, ou ao longo do seu traçado, sugere fortemente a existência de condições propícias à rotação gradual das trajectórias de σ_1 durante os estádios finais do ciclo varisco de ESE-WNW a E-W para NE-SW, sob condições de pressão inferiores a 3 kbar e temperaturas decrescentes entre os 350 e 200°C (o que se afigura consistente com o levantamento crustal pós-Westfaliano). A reactivação generalizada das principais famílias de acidentes em condições de baixa temperatura (<150°C) e pressão (< 1kbar), sob um campo de tensões com σ_1 segundo a direcção geral N-S, deverá então ter ocorrido durante os episódios compressivos associados ao ciclo Alpino. Esta reactivação contribuirá de forma decisiva para a assimetria da rede de fracturas, porquanto se retomam preferencialmente os acidentes NNE-SSW e ENE-WSW, agora com cinemática esquerda e esquerda inversa, respectivamente.

A interpretação precedente, na linha do modelo global apresentado por Marques & Mateus (1998), é, na sua essência, coerente com as soluções obtidas através da análise dinâmica dos planos de movimento estriados. As discrepâncias encontradas são facilmente atribuíveis às limitações dos métodos de inversão utilizados na estimativa das diversas configurações de tensão, já que estes últimos são extraordinariamente sensíveis aos efeitos de mistura de conjuntos de dados relativos a populações diacrónicas de acidentes tectónicos (e.g. Hardcastle, 1989, e referências citadas). A este respeito, acresce mencionar que o recurso aos métodos de inversão pressupõe que os vectores de deslizamento considerados em cada população de acidentes resultam da acção de um campo de tensões homogéneo no espaço e no tempo, negligenciando assim as eventuais perturbações tensoriais devidas, por exemplo, a heterogeneidades materiais diversas e à interacção mecânica entre segmentos constituintes da mesma zona de fraqueza estrutural (compreendendo, ou não, anisotropias planares pré-existent); daqui resulta necessariamente um cuidado especial na interpretação deste tipo de soluções, como aliás foi recentemente sublinhado por Pollard & Saltzer (1993).

Resta compreender o verdadeiro significado das diversas soluções encontradas para as estruturas com actividade neotectónica e distribuição vincadamente localizada. Os planos estriados considerados correspondem muito provavelmente a estruturas sismogénicas geradas à superfície topográfica, sendo portanto correlativos de episódios de ruptura superficial no acidente principal (*i.e.* correlativos de rupturas co-sísmicas para magnitudes $M \geq 6$). Nestas circunstâncias, as *slip-lines* podem variar de modo significativo, pelo que os diferentes campos de tensão deduzidos com base em distintos conjuntos de planos

estriados podem apenas reflectir variações das condições de fronteira estabelecidas durante a ruptura superficial; este será um assunto a considerar em investigações futuras. Complementarmente, e face ao contexto geológico das estações em que se efectuaram as observações, não se pode excluir a possibilidade de parte dos dados utilizados incorporarem informações cinemáticas relativas a estruturas secundárias fortemente constringidas por efeitos geométricos locais, algo que também influenciará as soluções obtidas para os campos de tensão. Pelo exposto, se depreende que as soluções obtidas para as estruturas com actividade neotectónica dificilmente são passíveis de extrapolação para o quadro regional.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projecto *Estudos de Magneto-telúrica na falha Manteigas-Vilariça-Bragança*, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia – Ministério da Ciência e Tecnologia.

Referências

- Aydin, A. & Reches Z. 1982. Number and orientations of fault sets in the field and in experiments. *Geology*, 10: 110-112.
- Cabral, J.M. 1985. Estudos de neotectónica em Trás-os-Montes Oriental. Provas de Apt.Ped. e Cap.Científica. Dep. Geol. Fac. Ciências da Univ. Lisboa, 125 p.
- Cabral, J.M. 1989. An example of intraplate neotectonic activity, Vilariça Basin, Northeast Portugal. *Tectonics*, 8: 285-303.
- Hardcastle, K.C. 1989. Possible paleostress tensor configurations derived from fault-slip data in Eastern Vermont and Western New Hampshire. *Tectonics*, 8:265-284.
- Krantz, R.W. 1988. Multiple fault sets and three-dimensional strain: theory and application. *J. Struct. Geol.* 10: 225-237.
- Mateus, A. 1996. A variabilidade composicional das micas potássicas dioctaédricas como indicador das condições P-T de deformação; ensaio de aplicação às fácies graníticas sinorogénicas adjacentes ao segmento Sul do troço transmontano da Falha da Vilariça (NE de Portugal). *Gaia*, 13: 9-41.
- Mateus, A. & Ribeiro A. 1991. Scaling analysis of fracture patterns adjoining the Vilariça strike-slip fault zone, NE Portugal: a geometric approach to fault nucleation and growth modelling. *Canad. Mineral.*, 29: A81.
- Marques, F.O. & Mateus, A. 1998. Have NNE-SSW transcurrent shear zones always been sinistral in the Variscan basement? 4ª Conf. Anual do Grupo de Geologia Estrutural e Tectónica, *Geologos*, 2: 73-76.
- Pollard, D.D. & Saltzer, S.D. 1993. Stress inversion methods: are they based on fault assumptions? *J.Struct.Geol.* 15: 1045-1054.
- Ribeiro, A. 1974. Contribution à l'étude tectonique de Trás-os-Montes Oriental. Mem 24, Serv.Geol. Portugal, Lisboa, 168 p.
- Silva, A.F.; Rebelo, J.A. & Ribeiro, M.L. 1989. Carta Geológica de Portugal, 1:50000. Notícia Explicativa da Folha 11-C: Torre de Moncorvo. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 65 pp.
- Sperner, B.; Ratschbacher L. & Ott, R. 1993. Fault-striae analysis: a Turbo Pascal program package for graphical presentation and reduced stress tensor calculation. *Computers & Geosciences*, 19: 1361-1388.