

## Desligamentos interplaca e intraplaca em cadeias deformadas: exemplos no bordo SW dos Variscides Ibéricos

José Romão<sup>1</sup>, António Ribeiro<sup>2</sup>, Eurico Pereira<sup>1</sup>, Paulo Fonseca<sup>2</sup>, José Rodrigues<sup>1</sup>, António Mateus<sup>2</sup>, Fernando Noronha<sup>3</sup>, Rui Dias<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geologia, INETI, Apart. 7586, 2721-866 Alfragide, [manuel.romao@ineti.pt](mailto:manuel.romao@ineti.pt); [eurico.pereira@ineti.pt](mailto:eurico.pereira@ineti.pt); [jose.feliciano@ineti.pt](mailto:jose.feliciano@ineti.pt)

<sup>2</sup> Centro e Depart. de Geol., Fac. de Ciências, U. Lisboa, [aribeiro@fc.ul.pt](mailto:aribeiro@fc.ul.pt), [pefonseca@fc.ul.pt](mailto:pefonseca@fc.ul.pt), [amateus@fc.ul.pt](mailto:amateus@fc.ul.pt)

<sup>3</sup> Dept. Geologia and CEGUP, Fac. de Ciências, Univ. do Porto, [fmnoronh@fc.up.pt](mailto:fmnoronh@fc.up.pt)

<sup>4</sup> Depart. de Geociências, Univ. de Évora and Centro de Geofísica, Évora, [rdias@uevora.pt](mailto:rdias@uevora.pt)

**Abstract:** The interplate versus intraplate nature of Strike-Slip Deformed Belts (SSDB) is discussed on the basis of kinematics, deep structure and dynamics of the vertical coupling/decoupling deformation regimes at lithospheric level. Two variscan SSDB exemplify the intraplate model for the Tomar-Badajoz-Córdoba shear zone (TBCSZ) and the interplate model for the Porto-Tomar-Ferreira do Alentejo (PTFA) dextral transform. The TBCSZ is a Cadomian suture reactivated as an intracratonic rift evolving to a transpressive sinistral flower structure during the Variscan cycle. The PTFA dextral transform connects the SW-Iberia suture between Iberia and Avalonia with the NW-Iberia suture between Iberia and Armorica.

**Keywords:** *Interplate and intraplate strike-slip deformed belts, kinematics deep structure, vertical coupling/decoupling regimes, SW Iberia Variscides*

**Resumo:** A natureza interplaca versus intraplaca dos desligamentos nas cadeias deformadas é discutida com base na cinemática, estrutura profunda e dinâmica dos regimes de deformação de emparelhamento/desemparelhamento vertical ao nível da litosfera. Apresentam-se dois exemplos de desligamentos na Cadeia Varisca Ibérica: o modelo intraplaca para a Zona de Cisalhamento Tomar-Badajoz-Córdoba (ZCTBC) e o modelo interplaca para a transformante direita Porto-Tomar-Ferreira do Alentejo (ZCPTFA). A ZCTBC é uma sutura Cadomiana reactivada como um *rift* intracratónico que evolui para uma estrutura em flor em regime transpressivo esquerdo. A ZCPTFA conecta a sutura SW-Ibérica entre a Ibéria e Avalónia com a sutura NW-Ibérica entre Ibéria e Armórica.

**Palavras-chave:** *desligamentos interplaca e intraplaca em cadeias deformadas, cinemática da estrutura profunda, regimes de emparelhamento/desemparelhamento, Variscides do SW da Ibéria*

### Introdução

Os desligamentos nas cadeias montanhosas deformadas ocorrem, quer no limite das placas (interplacas) como falhas transformantes, quer no seu interior (intraplacas). Nos últimos anos foram publicados numerosos estudos sobre esta temática em domínios caracterizados por tectónica activa ou em antigos orógenos. Atendendo a critérios estruturais e geodinâmicos, as falhas transformantes podem ser caracterizadas em função da sua conexão com fronteiras de placas divergentes ou convergentes. Assim, nas cadeias deformadas, os desligamentos interplacas ou conectam faixas de deformação intraplaca em regime convergente ou divergente, respectivamente em extensão ou compressão, ou ocorrem em faixas conjugadas, que são responsáveis por um encurtamento interno do orógeno e pelo seu mecanismo de arqueamento.

A evolução cinemática exigida pela dinâmica dos regimes das Placas Tectónicas nos limites das placas e nos orógenos intraplaca requer que as transformantes e desligamentos evoluam necessariamente, para integrar componentes de convergência em regimes de transpressão ou de divergência em regimes de transtensão. Ambas as situações incluem partição do deslocamento e da deformação. Esta evolução coloca em evidência a questão da acomodação convergente das componentes de deslocamento vertical em falhas inversas (transpressão) ou extensão em falhas normais (transtensão), o que conduz ao conceito de emparelhamento e desemparelhamento vertical nos desligamentos das cadeias montanhosas deformadas e ao seu possível modo de combinação. Este pode ocorrer por emparelhamento vertical completo seccionando a totalidade da litosfera num contexto de interplaca ou por emparelhamento vertical parcial.

Estudos sobre transformantes activas, em particular a Falha de San Andreas, conduziram alguns autores a proporem um modelo de desligamento, em que o deslocamento é distribuído ao longo de toda a largura na zona de movimento no limite da placa, que pode ser expresso por

dados geodéticos. Neste caso, o desligamento passa em profundidade a uma zona de cisalhamento, contínua e dúctil sub-horizontal, com a mesma largura na plastosfera.

A partir destas observações, alguns autores inferiram a presença de uma zona de fixação (*attachment*) sub-horizontal, que marca a transição do movimento contínuo em profundidade para discreto à superfície, evidenciado pela presença de desligamentos de blocos rígidos na esquizosfera (Tikoff *et al.*, 2004). A presença de zonas de *attachment* sub-horizontais em cadeias deformadas poderá ser diagnosticada a partir de modelos de distribuição da deformação (Teyssier & Cruz, 2004). Um mecanismo alternativo foi proposto (Handy *et al.*, 2005) por zonas de acomodação, baseado na ideia que o desemparelhamento pouco resistente e infracrustal na crosta viscosa não impossibilita a transmissão vertical de tensão normal e cisalhante na litosfera, desde que através de mecanismos específicos de deformação, o desemparelhamento não seria homogêneo e isotrópico, mas heterogêneo e anisotrópico. Assim, as zonas de acomodação poderiam existir não só no limite da esquizosfera/plastosfera, mas também no interior da própria plastosfera.

### **Metodologia e resultados de aplicação à ZCTBC e à ZCPTFA**

O significado geodinâmico dos desligamentos em cadeias deformadas, que são abordadas neste artigo, deve ser confrontado por dois métodos independentes: por um lado, através da cinemática e análise da deformação das estruturas e, por outro, através de imagens sísmicas da sua continuação em profundidade. Evidências definitivas relativas à descontinuidade da superfície material de referência deslocada, eventualmente, por desligamentos nas cadeias deformadas devem ser interpretadas com cuidado, como consequência, da distribuição da tensão que os origina. Esta distribuição conduz à controvérsia entre *attachment* versus a interpretação de zonas de acomodação. As imagens sísmicas podem ser usadas, apenas, no exemplo do ZCTBC, porque não existe actualmente nenhum perfil profundo que acesse a ZCPTFA.

A ZCTBC, de movimentação sinestra, é uma estrutura em flor que está localizada próximo do limite Zona Ossa Morena, ZOM/Zona Centro-Ibérica, ZCI (Ribeiro *et al.*, 2007). A sua zona axial corresponde a uma antiga cadeia montanhosa constituída por migmatitos, orto e paragneisses, intercalados de lenticulas de eclogitos anfibolitizados (Simancas *et al.*, 2003). Estas rochas preservam idades cadomianas (Salman, 2004) que foram afectadas por fusão parcial durante a fase inicial da orogenia varisca e está relacionada com eventos extensionais que ocorreram no Paleozóico inferior. Todas estas características indicam que as rochas de alto grau preservadas no interior da ZCTBC representam um substrato Cadomiano retrabalhado.

Trabalhos de campo recentes revelaram que a ZCTBC tem uma extremidade apontada para NW na região de Abrantes. De facto, o ramo NE da ZCTBC, com vergência para NE, está conectado com o seu ramo SW, com vergência para SW, por meio de uma dobra em bainha a grande escala, cujo nariz aponta para NW (Fig. 1). Esta macro estrutura é consequência do efeito barreira da ZCPTFA, uma transformante interplaca que impede a sua propagação na direcção NW, que vai implicar um aumento progressivo das idades de arrefecimento dos litótipos afectados por eventos tectono-metamórficos variscos para NW (Quesada & Dallmeyer, 1984). Sugere-se assim que a ZCTBC actuou como desligamento intraplaca durante o ciclo Varisco, obliterando parcialmente a sutura do início do ciclo Cadomiano, que vai controlar, posteriormente, o desenvolvimento do *rift* intracratónico no Paleozóico inferior.

A estrutura profunda e a cinemática da ZCTBC durante o ciclo Varisco (Ribeiro *et al.*, 2007) constitui um bom exemplo de emparelhamento e desemparelhamento ao longo da litosfera, incluindo o conceito de *attachment* (Tikoff *et al.*, 2004; Teyssier & Cruz, 2004) ou de zonas de acomodação (Handy *et al.*, 2005). Ao longo de grande parte do seu traçado, desde o sector de Abrantes a NW até ao de Hinojosa del Valle–Hornachos a SE (Fig. 1), a zona axial ou Unidade Central da ZCTBC é uma estrutura subvertical com regime cinemático de desligamento esquerdo, que separa dois ramos de uma estrutura em flor, transpressiva e com vergências opostas. A extremidade NW do sector de Abrantes e do sector com foliação deitada de Hinojosa del Valle–Hornachos corresponde a uma zona de *attachment* ou zona de acomodação com sentido de cisalhamento de topo para NW. Nestas zonas, o regime de desligamento frágil na

esquiosfera evolui para um regime dúctil na plastosfera, com cisalhamento subhorizontal para NW compatível com regime de desligamento esquerdo dominante.

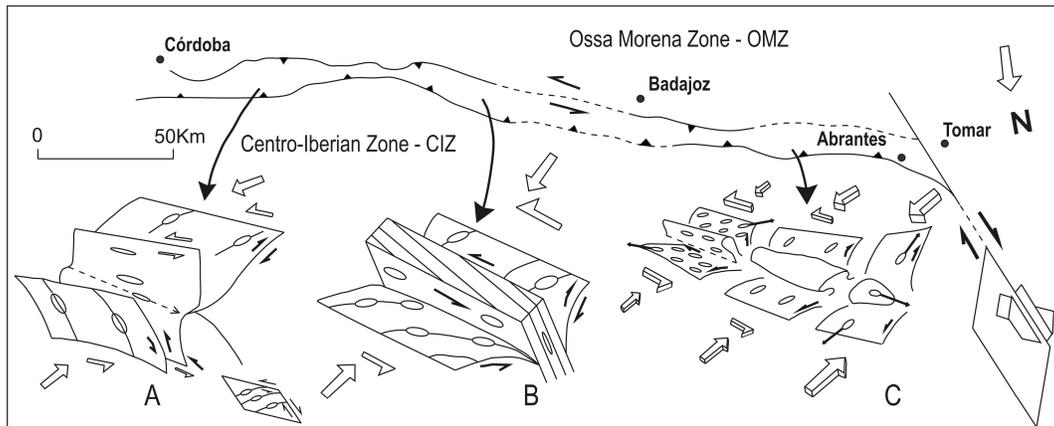


Figura 1. Kinematics and deep structure of the TBCSZ, from SE to NW: A – Hinojosa del Valle–Hornachos Sector, attachment or accommodation zone; B – Badajoz–Portalegre Sector, flower structure with transpressive left-lateral regime; C – Abrantes Sector (NW tip of TBCSZ) and interference domain with PTFZCZ (Ribeiro *et al.*, 2008).

A interpretação do perfil sísmico IBERSEIS (Simancas *et al.*, 2003) favorece o conceito de acomodação, em vez de *attachment*, para toda a estrutura enraizada no “corpo reflectivo”, localizado na interface crosta média/inferior, a não ser que este corpo seja devido a processos intrusivos, posteriores aos principais deslocamentos na ZCTBC (Carbonell *et al.*, 2004). Em qualquer caso, a presença de um *attachment* ou zona de acomodação na parte mais profunda da ZCTBC favorece um modelo de regime de desligamento interplaca ou intraplaca dominante, com parcial mas forte emparelhamento vertical em toda a litosfera. Portanto, as rochas preservadas da sutura (unidades metamórficas de alto grau e ofiólitos remanescentes) devem ser herdadas de um ciclo anterior, Cadomiano, e resultaram de um processo geodinâmico rápido de subducção/obducção. Conclui-se que o regime cinemático durante o ciclo Varisco é compatível com todas as outras provas para a evolução policíclica da estrutura principal.

A ZCPTFA, de orientação N-S, é uma transformante que separa a Placa Finisterra da Ibéria (Ribeiro *et al.*, 2007) e conecta a sutura Varisca do SW da Ibéria, entre a ZOM do Terreno Ibérico e o Terreno Sul Português (TSP) como parte da placa Avalónia. É uma zona de deformação concentrada, com largura variável, que depende do nível estrutural exposto (varia de 10km nos níveis mais baixos e 2km nos mais altos), caracterizada, na generalidade, por traçado rectilíneo e movimento de desligamento dextro dominante. Contudo, cartografia recente (Romão *et al.*, 2006) permitiu o reconhecimento de uma geometria em *restraining bend* com importante componente de carreamento para S e SW dos terrenos da ZCI sobre a placa Finisterra na região de Oliveira de Azeméis, localizada a 30km a SE do Porto.

A placa Finisterra é composta por sequências polimetamórficas neoproterozóicas muito semelhantes na composição às que afloram a SE na ZOM. A presença de clastos destas sequências, em conglomerados deposicionais na parte superior do Grupo das Beiras da ZCI de idade câmbria a neoproterózoica, mostra que a placa Finisterra foi a fonte dos sedimentos da CIZ do Terreno Ibérico e implica que ambos os domínios foram geograficamente próximos no início do Ciclo de Wilson Varisco, antes da principal placa se deslocar ao longo da transformante ZCPTFA (Ribeiro *et al.*, 2008). O seu deslocamento dextro, avaliado na ordem dos  $70\pm 10$ m durante o regime dúctil, é baseado na trajectória sigmoidal dos granitos sintectónicos, localizados no lado oriental da transformante. A este deslocamento devemos adicionar movimentação frágil, algo menor, que ocorreu entre o Carbonífero superior e o Pérmico inferior, quando a cinemática da zona de cisalhamento varia de desligamento para cavalgamento puro nas fases de deformação tardi-variscas (Ribeiro *et al.*, 2007). Os dados geofísicos existentes, nomeadamente a gravimetria e magnetometria apontam para um forte

contraste entre as duas placas separadas pela transformante (Almeida *et al.*, 2001; Almeida *et al.*, 2004).

## Discussão e conclusões

Vamos agora tentar avaliar o significado geodinâmico de dois exemplos de desligamentos em cadeias montanhosas deformadas: os das ZCTBC e ZCPTFA. Primeiro, discutem-se as relações geométricas entre ambas as zonas de cisalhamento e, posteriormente, a sua interferência. A realização de cartografia estrutural na zona de interferência de ambas as zonas, na região a SW de Abrantes, permitiu concluir que a ZCPTFA corta a ZCTBC, sugerindo uma maior profundidade para a primeira zona de cisalhamento.

Do ponto de vista cinemático, as zonas de cisalhamento são distintas. A ZCPTFA apresenta uma geometria de falha transformante do Tipo Trinidad (Tikoff *et al.*, 2004), onde as placas se movem paralelamente ao seu limite, em relação a um referencial profundo, e parece ocorrer coincidência entre os seus limites litosférico e astenosférico, representando um emparelhamento vertical completo. Esta situação é expressa cartograficamente por um traçado rectilíneo do limite da placa e a sua flexão na *restraining bend* de Oliveira de Azeméis, que pode ser explicada por uma rotação à volta de um eixo vertical.

Isto contrasta com a ZCTBC, uma estrutura em flor vertical e transpressiva, com uma importante componente de compressão em toda a zona de cisalhamento, o que implica a presença de uma zona de acomodação ou *attachment*. Esta zona é originada por convergência das paredes do cisalhamento caracterizadas por cavalgamentos de vergências opostas em ambos os lados da zona de cisalhamento. Esta geometria resultou de uma cinemática semelhante à da falha transformante de San Andreas com movimento oblíquo na fronteira dos dois blocos envolvidos (Tikoff *et al.*, 2004), expressando desemparelhamento vertical parcial. Esta conclusão é apoiada pelas imagens sísmicas do perfil IBERSEIS (Simancas *et al.*, 2003) e prova de forma indirecta a origem mais profunda para ZCPTFA do que para ZCTBC.

A natureza interplaca da ZCPTFA versus a da intraplaca da ZCTBC é, primeiro, suportada por critérios específicos relativos à sua cinemática e estrutura profunda e, depois, pelo contexto geral da sua evolução geodinâmica durante os ciclos de Wilson Cadomiano e Varisco no SW das Variscidas Europeias (Ribeiro *et al.*, 2007). De facto, o decaimento do deslocamento do desligamento para valor nulo na extremidade NW da ZCTBC, a SW de Abrantes, é devido à sua interferência com o deslocamento da falha transformante activa em toda a ZCPTFA. Esta situação, permanece inexplicável no modelo interplaca para a ZCTBC. Contudo, este dispositivo é compatível com o deslocamento oblíquo na estrutura profunda, herdado por partição da deformação entre as componentes de desligamento puro e cavalgamento puro, que foi induzida por subducção oblíqua da TSP abaixo da ZOM na sutura SW da Ibéria.

A história do deslocamento e o significado geodinâmico de ambas as zonas de cisalhamento são distintos. A ZCPTFA desempenha o papel de transformante, pelo menos, desde o Câmbrico até ao Pérmico inferior, estando relacionada com a abertura e o fecho do oceano Paleotetis no interior do conjunto Armorica-Ibérica e com o fecho do oceano Rheic entre as placas Ibéria e Avalónia (Ribeiro *et al.*, 2007). A ZCTBC é provavelmente uma sutura cadomiana (Ribeiro *et al.*, 2007; Ribeiro *et al.*, 2008) que evolui para um *rift* intracratónico abortado no fim do Câmbrico e retomado como um desligamento intraplaca durante a orogénese Varisca.

O deslocamento, de direcção N-S e dextro, de toda a ZCPTFA é compatível com encurtamento NW-SE, na ZCTBC, durante o regime convergente e transtensão NW-SE durante o regime divergente anterior. Durante esta evolução, os deslocamentos em toda a ZCTBC são compatíveis com os da ZCPTFA, mostrando que ambos são controlados pelos movimentos no limite das placas durante o ciclo de Wilson Varisco. Este modelo inclui uma pequena componente de extensão na ZCPTFA que desempenha possivelmente o papel de uma incipiente transformante próximo da fronteira Câmbrico-Ordovícico (Ribeiro *et al.*, 2007).

**Agradecimentos:** Este artigo é uma contribuição para o projecto IBERSUT (POCI/CTE-GIN/56445/2004).

## Referências

- Almeida, E.P., Pous, J., Monteiro Santos, F.A., Fonseca, P., Marcuello, A., Queralt, P., Nolasco, M.R., Mendes Victor, L.A. (2001). Electromagnetic imaging of a transpressional tectonic in SW Iberia. *Geophysical Research Letters*, 28, 3, 439-442.
- Almeida, E.P., Monteiro Santos, F.A., Mateus, A., Heis W., Pous, J., (2005). Magnetotelluric measurements in SW Iberia: new data for the Variscan crustal structures. *Geophysical Research Letters*, 32, L08312, doi: 10.1029/2005GL022596.
- Carbonell, R., Simancas, F., Juhlin, C., Pous, J., Pérez-Estaún, A., Gonzalez-Lodeiro, F., Muñoz, G., Heise, W., Ayarza, P. (2004). Geophysical evidence of a mantle derived intrusion in SW Iberia. *Geophys. Res. Lett.*, 31: L11601.
- Handy, M. R., Babist, J., Wagner, R., Rosenberg, C. and Konrad, M. (2005). Decoupling and its relation to strain partitioning in continental lithosphere. insight from the Periadriatic fault system (European Alps). In: D. Gaspais, J. Brun, P. Cobbold (Eds.). *Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics*. The Geological Society, London, 243: 249-276.
- Quesada, C., Dallmeyer, R.D. (1984). Tectonothermal evolution of the Badajoz-Córdoba shear zone (SW Iberia): characteristics and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  mineral age constraints. *Tectonophysics*, 231 195-213.
- Ribeiro, A., Munhá, J., Dias, R., Mateus, A., Pereira, E., Ribeiro, L., Fonseca, P., Araújo, A., Oliveira, T., Romão, J., Chaminé, H., Coke, C., Pedro, J. (2007). Geodynamic evolution of SW Europe Variscides. *Tectonics*, 26: TC6009.
- Ribeiro, A., Munhá, J., Mateus, A., Fonseca, P., Pereira, E., Noronha, F., Romão, J., Rodrigues, J. Castro, P., Meireles, C., Ferreira, N., (2008). Mechanics of thick-skinned Variscan overprinting of Cadomian basement (Iberian Variscides). Société Géologique de France. Manuscrito submetido para publicação.
- Romão, J., Rodrigues, J.F., Pereira, E., Ribeiro, A. (2006). Relações tectonostratigráficas entre o terreno Ibérico (ZCI e ZOM) e o terreno Finisterra no W e SW da Ibérica. In J. Mirão e A. Balbino (Coords) *Livro de Resumos do VII Cong. Nac. Geol.*, Vol. I. Por uma visão de conjunto (pp. 123-126), Estremoz, Univ. Évora.
- Salman, K. (2004). The timing of the Cadomian and Variscan cycles in the Ossa-Morena Zone, SW Iberia: granitic magmatism from subduction to extension. *J. Iberian Geology*, 30: 119-132.
- Simancas, J. F., Carbonell, R., González Lodeiro, F., Pérez Estaún, A., Juhlin, C., Ayarza, P., Kashubin, A., Azor, A., Martínez Poyatos, D., Almodóvar, G. R., Pascual, E., Sáez, R. and Expósito, I. (2003). The crustal structure of the transpressional Variscan orogen of SW Iberia. The IBERSEIS deep seismic profile, *Tectonics*, 22/6: 1062.
- Teyssier, C., Cruz, L. (2004). Strain gradients in transpressional to transtensional attachment zones. In: J. Grocott, K.J.W. McCaffrey, G. Taylor, B. Tikoff (Eds.), *Vertical Coupling and Decoupling of the Lithosphere*. The Geological Society, London, Special Publications, 227: 101-115.
- Tykoff, B., Russo, R., Teyssier, C. and Tommasi, A. (2004). Mantle-driven deformation of orogenic zones and clutch tectonics. In: J. Grocott, K.J.W. McCaffrey, G. Taylor, B. Tikoff (Eds.), *Vertical Coupling and Decoupling of the Lithosphere*, The Geological Society, London, Special Publications, 227: 44-64.