

BRILHA J.B.R., SEQUEIRA BRAGA M.A., PROUST D., DUDOIGNON P. (1998) - "A disjunção colunar na chaminé vulcânica de Penedo de Lexim (Complexo Vulcânico de Lisboa) – Morfologia e Génese". *Comunicações do Instituto Geológico e Mineiro*, tomo 84, fasc. 1, B164-B167.

A disjunção colunar na chaminé vulcânica de Penedo de Lexim (Complexo Vulcânico de Lisboa) – Morfologia e Génese

JOSÉ B.R. BRILHA*, M.A. SEQUEIRA BRAGA*, D. PROUST**, P. DUDOIGNON**

Palavras-Chave: Disjunção colunar; chaminé vulcânica; tefrito; fracturação.

Resumo: A disjunção colunar na chaminé vulcânica do Penedo de Lexim é caracterizada por apresentar um Índice de Hexagonalidade de 1.03 o que lhe confere um padrão de fracturação próximo do 'maturo'. O facto do processo de arrefecimento ter ocorrido a 2000 m de profundidade induziu alguns factores que condicionaram decisivamente a génese da disjunção colunar, pelo que as colunas do Penedo de Lexim apresentam características que se distinguem dos prismas que ocorrem em escoadas sub-aéreas.

Key-words: Columnar jointing; volcanic neck; tephrite; fracturation.

Abstract: The columnar jointing in the Penedo de Lexim volcanic neck is characterized by a Hexagonality Index of 1.03, indicating the mature nature of the fracturation pattern. The evolution of the cooling process in depth (2000 m) is responsible for the development of columns with some different aspects in relation to prisms of sub-aerial lava flows.

INTRODUÇÃO

A ocorrência de disjunção colunar como estrutura natural tem suscitado a curiosidade dos investigadores desde finais do século passado. Alguns exemplos tornaram-se mesmo importantes pólos de atracção turística como é o caso da "Calçada dos Gigantes" na Irlanda do Norte e da "Torre do Diabo" na Califórnia.

A formação de disjunção colunar em rochas vulcânicas é um assunto que suscita alguma controvérsia, em especial no que diz respeito à sua génese e desenvolvimento da morfologia (por exemplo, AYDIN & DeGRAFF, 1988; BUDKEWITSCH & ROBIN, 1994; LONG & WOOD, 1986). Porém, parece ser consensual que a causa da disjunção colunar se relaciona com a contracção térmica da lava provocada pelo seu arrefecimento. Embora esta estrutura possa ocorrer em vários tipos de rochas (filões e diques de rochas intrusivas, chaminés vulcânicas, depósitos piroclásticos consolidados ou não, etc.) a quase totalidade dos trabalhos publicados limita-se ao estudo destas estruturas em escoadas lávicas sub-aéreas. A "Calçada de Gigantes" constitui um dos casos mais conhecidos em que a geometria das secções transversais prismáticas é bastante regular, com uma grande percentagem de hexágonos. Na verdade, se bem que se atribua esta forma à disjunção colunar, a maior parte dos afloramentos apresenta um predomínio de formas pentagonais (BUDKEWITSCH & ROBIN, 1994). Muitos autores justificam a ocorrência de prismas de secções hexagonais com base na teoria de que o hexágono é a forma geométrica mais estável em condições de ruptura de uma dada superfície. Trabalhos recentes no estudo da evolução do padrão das estruturas colunares defendem que as formas hexagonais ocorrem após uma evolução prolongada no processo de construção da disjunção prismática.

Ao longo deste trabalho irá ser apresentado parte de um estudo efectuado no Penedo de Lexim (BRILHA, 1997) sendo apenas discutida a disjunção colunar observável no referido afloramento – morfologia dos prismas e sua relação com as condições físicas prevalentes durante a génese da fracturação.

ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

O Penedo de Lexim, localizado a cerca de 30 km a Norte de Lisboa, pertence ao Complexo Vulcânico de Lisboa. Este Complexo representa um conjunto magmático do Cretácico Superior que compreende basaltos alcalinos juntamente com traquibasaltos, traquitos e riolitos (PALACIOS *et al.*, 1988). O afloramento (com 55 ± 18 Ma, de acordo com MATOS ALVES *et al.*, 1980) é uma chaminé vulcânica constituída por um tefrito maciço apresentando disjunção colunar regular. A rocha possui uma textura porfírica com fenocristais de olivina, piroxena e ulvospinela. A matriz é constituída por microcristais de olivina, piroxena, ulvospinela e plagioclase. A mesostase é definida pela associação de calcite, apatite, feldspato alcalino, plagioclase, analcite, natrolite e interestratificados clorite/esmectite. Estes minerais hidratados (zeólitos e minerais de argila) não são formados

* Departamento de Ciências da Terra, Universidade do Minho, *Campus* de Gualtar, 4710-057 Braga Codex, Portugal (jbrilha@dct.uminho.pt)

** U.R.A. 721 "Argiles, Sols et Altérations", Université de Poitiers, 86022 Poitiers Cedex, France

por uma alteração hidrotermal nem pela meteorização, resultando das fases finais do processo de cristalização fraccionada (BRILHA, 1997).

A solubilidade da água no magma é uma função da pressão, de acordo com a equação $P^{1/2} = 3.124XH_2O + 0.444$ (MACPHERSON, 1984). O teor em água das amostras estudadas permitiu calcular que a solidificação do magma de Lexim terá ocorrido a uma profundidade de 2000 m (para uma pressão de 600 bar e uma densidade média de 2.9 g/cm³). Este teor de água das amostras de Lexim está de acordo com a sua composição isotópica em oxigénio, típica para basaltos alcalinos. O afloramento do Penedo de Lexim representa assim uma porção do preenchimento da conduta vertical do antigo aparelho vulcânico (com 30 m de diâmetro) que terá solidificado em profundidade (2000 m).

Os processos de cristalização e de prismação foram condicionados pelo arrefecimento lento e pela elevada pressão litostática existente a 2000 m de profundidade (BRILHA *et al.*, 1995; BRILHA *et al.*, 1997; BRILHA, 1997). A ocorrência de fenocristais de olivina, piroxena e ulvospinela revela a existência de uma cristalização intratélúrica. Por outro lado, a presença de microcristais de olivina com hábitos cristalinos típicos de arrefecimentos muito rápidos sugere que parte da cristalização ocorreu durante um curto período de tempo contemporâneo com a ascensão da lava desde a câmara magmática até um determinado nível da conduta vertical, o nível actual de exposição. Finalmente, a lava completou o seu processo de solidificação a baixas velocidades de arrefecimento, tendo cristalizado sem formação de vidro vulcânico. O episódio da fracturação térmica do tefrito de Lexim não se resumiu à formação das juntas e consequente disjunção colunar. Estudos petrográficos de pormenor permitiram identificar e classificar sete tipos diferentes de fracturas e microfracturas, que se distinguem principalmente pela sua geometria (BRILHA *et al.*, 1994).

ASPECTOS MORFOLÓGICOS DOS PRISMAS

A observação mesoscópica do Penedo de Lexim, permite verificar a existência de zonas com prismação bem regular e de outras zonas praticamente maciças. O contacto entre estas duas zonas é brusco. Em termos gerais, as colunas encontram-se inclinadas para Norte com ângulos da ordem de 60-70°. Apesar de ocorrerem prismas regulares tanto na base como no topo do afloramento, as colunas não são contínuas. Estas terão, no máximo, comprimentos de cerca de 5m, sendo interrompidas por zonas maciças. O diâmetro das colunas não varia de modo significativo ao longo do afloramento, possuindo valores da ordem de 40-50 cm.

Quanto às características das faces laterais das colunas, salienta-se o facto de elas se encontrarem sempre revestidas por um material de cor branca, fundamentalmente constituído por zeólitos. Não se observa qualquer estriação ou bandeamento nas faces dos prismas, como é usual em prismas de escoadas sub-aéreas. Registou-se porém que, raramente estas faces laterais são absolutamente planas, apresentando ondulações.

Sendo a análise das secções transversais dos prismas importante na definição da geometria das fracturas e do seu avanço na frente de arrefecimento para um dado instante (BUDKEWITSCH & ROBIN, 1994), procedeu-se à digitalização de fotografias das secções transversais dos prismas do Penedo de Lexim. Para cada secção foi calculado o quociente (r) entre o eixo maior/eixo menor de uma elipse que melhor se ajusta à secção poligonal, quociente este que reflecte a anisometria dos polígonos. Quando r se aproxima de 1, os polígonos denominam-se isométricos. Para os vinte prismas representados, a média aritmética de r é 1.21 ± 0.14 . Para comparação refere-se que a média aritmética de duzentos prismas amostrados na Calçada de Gigantes (Irlanda), um dos exemplos onde o número de polígonos hexagonais é maior, é de 1.187 ± 0.121 (BUDKEWITSCH & ROBIN, 1994). Deste modo, o padrão da prismação deste afloramento considera-se mais isométrico que o padrão dos prismas do Penedo de Lexim.

BUDKEWITSCH & ROBIN (1994) definem o Índice de Hexagonalidade de um padrão poligonal pela seguinte fórmula:

$$\square N = \sqrt{(f_5+f_7) + 4(f_4+f_8) + 9(f_3+f_9) + 16f_{10} + 25f_{11} + \dots}$$
 m que f_n é a fracção de polígonos de n lados. Este índice indica o desvio do valor ideal (6 lados); quanto maior o valor, menor a correspondência com padrões hexagonais. Para 89 secções poligonais de Lexim, com um valor médio de 5.52 lados por polígono, $\square N$ é igual a 1.03. Este índice calculado para 153 polígonos do afloramento da Calçada de Gigantes é de 0.78, sendo 5.93 o número médio de lados por polígono. Estes autores referem que este valor corresponde ao índice mais elevado calculado para padrões naturais 'maturos'; inversamente, valores de 1.33 correspondem a padrões totalmente aleatórios. Verifica-se assim que, de acordo com o Índice de Hexagonalidade, a prismação do Penedo de Lexim aproxima-se de um padrão 'maturo' embora esteja ainda longe de um padrão tipicamente hexagonal.

EVOLUÇÃO DA PRISMAÇÃO

Relativamente ao desenvolvimento da fracturação por contracção térmica, é necessário definir a que temperatura se inicia este processo e como se caracteriza o seu avanço à medida que a lava na conduta vertical arrefece e solidifica.

Estabelecimento do limite elástico da lava / temperatura de propagação da fractura

No processo de arrefecimento do corpo ígneo, quando é atingida uma dada temperatura, a tensão provocada pela contracção térmica excede a resistência da rocha à tracção, originando a fracturação. A definição desta temperatura de fracturação tem sido discutida amplamente na bibliografia, encontrando-se limitada por valores entre 1065-600°C. Para o caso da chaminé de Lexim, importa não esquecer que a lava em questão arrefeceu a 2000 m de profundidade. Este facto introduz no processo o factor pressão litostática que influencia a temperatura de formação da fracturação. ROVETTA (1993) refere que com o aumento da pressão confinante se assiste a uma diminuição da temperatura de fracturação, uma vez que a tensão tem de ultrapassar o aumento de resistência da rocha à deformação. Esta é uma das principais diferenças quando se compara este processo com o que ocorre em escoadas sub-aéreas. Para o caso de Lexim, admitiu-se a temperatura de 700°C a partir da qual se iniciou a fracturação. Esta escolha foi suportada ainda pelos dados petrográficos, tendo em conta a tipologia dos preenchimentos das fissuras precoces, as primeiras microfracturas a desenvolverem-se durante o processo de arrefecimento do tefrito de Lexim (BRILHA, 1997).

Desenvolvimento do avanço da fractura em direcção à lava mais quente

O estudo da propagação das fracturas que conduzem à formação de disjunção colunar tem sido levado a cabo por diversos autores (por exemplo, DeGRAFF & AYDIN, 1993; REITER *et al.*, 1987; AYDIN & DeGRAFF, 1988; ROVETTA, 1993; BUDKEWITSCH & ROBIN, 1994). Estes diversos trabalhos permitiram concluir que: i) O avanço das fracturas é feito por incrementos originando estrias ou bandas nas faces dos prismas; ii) A espessura das bandas nas faces das colunas aumenta com o aumento do seu diâmetro; iii) O aumento da velocidade de solidificação conduz a menores incrementos e, conseqüentemente, a prismas mais pequenos. A análise destas estrias permite concluir acerca da direcção e modo de crescimento das colunas. Foi assim possível concluir que, numa determinada escoada basáltica, os prismas da parte superior avançam descendentemente e os prismas da zona inferior avançam no sentido do topo da escoada, sempre perpendicularmente à frente de arrefecimento. O avanço das fracturas ocorre sempre a partir da extremidade de uma fractura pré-existente e na mesma direcção da anterior. Este facto é, na verdade, o responsável pela formação de uma estrutura colunar.

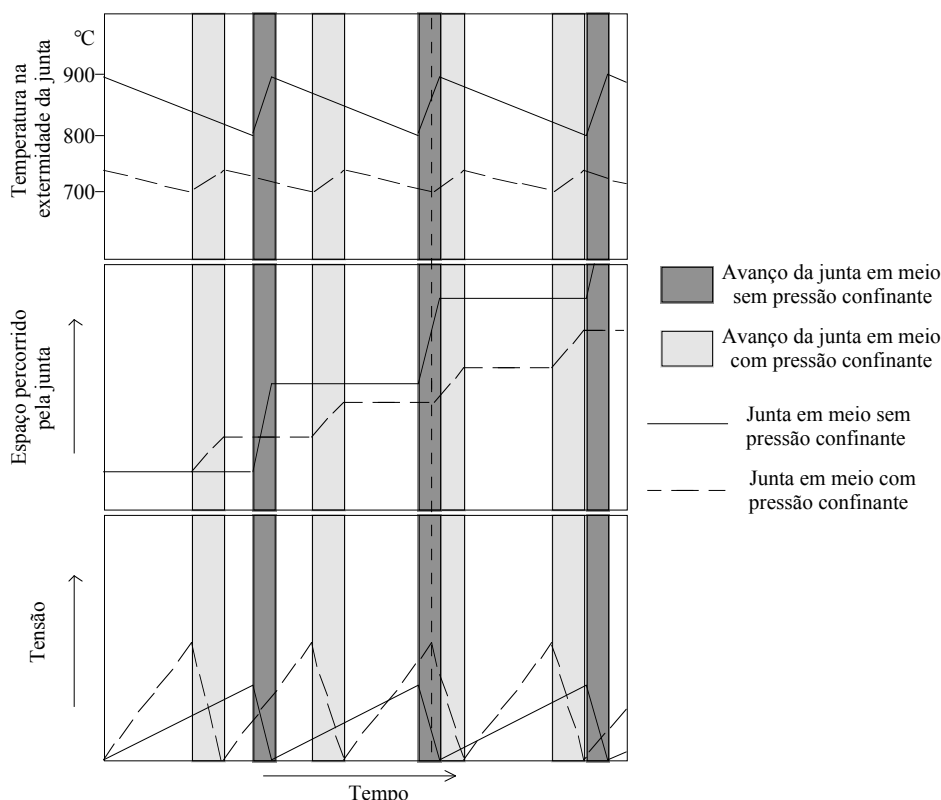


Figura 1 - Relação entre a temperatura na extremidade de uma junta, o espaço percorrido por esta e a tensão acumulada sob influência ou não de pressão confinante. O cenário com pressão confinante pode ser exemplificado pela chaminé do Penedo de Lexim.

O avanço incremental deve-se a três razões essenciais: i) Diminuição da tensão associada à contracção térmica devido aos pequenos deslocamentos da fractura; ii) Avanço da fractura em direcção a material mais quente, logo menos frágil, aproximando-se da interface da fusão; iii) Diminuição da tensão acumulada na extremidade da fractura, motivada pelo seu arredondamento, logo após a sua paragem junto da lava mais quente e fluida (*joint tip blunting*).

A morfologia dos prismas do Penedo de Lexim indica que o seu processo de formação tenha sido um pouco diferente deste modelo geral. A não ocorrência de bandas ou estriações nas faces dos prismas sugere que o avanço das fracturas tenha sido contínuo, e não por incrementos como se verifica em ambientes sub-aéreos. Por outro lado, se considerarmos 700°C para temperatura de fracturação, este baixo valor implica que a lava esteja já num estágio mais avançado de cristalização, isto é, mais próximo de um verdadeiro comportamento tipo sólido. Deste modo, não haverá a paragem do avanço da fractura em zonas mais dúcteis da lava, tal como ocorre nos processos de fracturação de escoadas subaéreas, onde a temperatura de fracturação é mais alta existindo um contacto franco entre zona dúctil/zona frágil.

A figura 1 sintetiza, esquematicamente, os diversos aspectos do mecanismo de fracturação em meios sujeitos ou não a pressão confinante. Consideremos o exemplo do avanço de uma junta em meio com pressão confinante. À medida que a temperatura vai baixando na extremidade da junta, a tensão nela acumulada vai aumentando; neste intervalo de tempo não se regista qualquer avanço da junta. Quando a tensão acumulada excede a resistência da rocha, a fractura avança subitamente para zonas mais quentes diminuindo a respectiva tensão. Este ciclo repete-se ao longo do tempo e é semelhante para o caso de juntas em meio sem pressão confinante. As principais diferenças no avanço de juntas nestes dois tipos de meios são: i) Menor temperatura de fracturação em meios com pressão confinante; ii) Menor espaço percorrido em cada novo avanço e iii) Maior tensão acumulada na extremidade das juntas nos mesmos meios.

O arrefecimento em profundidade, a que esteve sujeita a lava da chaminé do Penedo de Lexim (originando assim um aumento da pressão confinante), é responsável pela ausência de bandas/estrias típicas nas faces dos prismas de escoadas sub-aéreas. Outra consequência relaciona-se com a direcção do eixo maior das colunas que, como se sabe, deveria ser perpendicular à frente de arrefecimento. As colunas, com uma inclinação de 70°, sugerem que a direcção de avanço das juntas tenha sido influenciada pela existência da pressão litostática, não permitindo que o seu avanço se tenha processado perpendicularmente à frente de arrefecimento.

REFERÊNCIAS

- AYDIN A. & DeGRAFF J.M. (1988) - Evolution of polygonal fracture patterns in lava flows. *Science* **239**, 471-476.
- BRILHA J.B.R. (1997) – Cinética de cristalização e de alteração pós-magmática de uma chaminé basáltica do Complexo Vulcânico de Lisboa. Modelização do arrefecimento e do mecanismo de fracturação em profundidade. Tese de doutoramento. *Universidade do Minho/Université de Poitiers*, 177p. (resumo em: <http://www.dct.uminho.pt>).
- BRILHA J.B.R. *et al.* (1994) - Study of the fissuration infillings composition in a columnar basalt from Portugal. *Abs. of the Intern. Volcanol. Cong. - IAVCEI*, Ankara, Turkey (resumo em: <http://delta.ci.uminho.pt/ct/port/papers/infillings.html>).
- BRILHA J.B.R. *et al.* (1995) - Interestratificados clorite/saponite e saponite formados por alteração hidrotermal de olivinas em basaltos continentais de Portugal. *Res. do III Cong. de Geol. dos Países de Língua Port.*, Niterói, Brasil (resumo em: <http://www.dct.uminho.pt>).
- BRILHA J.B.R. *et al.* (1997) - High cooling rate habits of olivine in a volcanic neck. *Abs. of the IAVCEI General Assembly*, Puerto Vallarta, México (resumo em: <http://www.dct.uminho.pt>).
- BUDKEWITSCH P. & ROBIN P.-Y. (1994) - Modelling the evolution of columnar joints. *Jour. Volcanol. Geoth. Res.* **59**, 219-239.
- DeGRAFF J.M. & AYDIN A. (1993) - Effect of thermal regime on growth increment and spacing of contraction joints in basaltic lava. *Jour. Geophys. Res.* **98(B4)**, 6411-6430.
- LONG P.E. & WOOD B.J. (1986) - Structures, textures and cooling histories of Columbia River basalt flows. *Geol. Soc. Amer. Bull.* **97**, 1144-1155.
- MACPHERSON G.J. (1984) - A model for predicting the volumes of vesicles in submarine basalts. *Jour. Geol.* **92**, 73-82.
- MATOS ALVES C.A *et al.* (1980) - O complexo basáltico de Lisboa. *Comun. Serv. Geol. Portugal* **66**, 111-134.
- PALÁCIOS T. *et al.* (1988) - Petrogénese do Complexo Vulcânico de Lisboa: evidência isotópica. *Geociências* **3(1-2)**, 115-122.
- REITER M. *et al.* (1987) - Thermo-mechanical model for incremental fracturing in cooling lava flows. *Tectonophysics* **142**, 241-260.
- ROVETTA M.R. (1993) - A similarity model of incremental fracture growth in submarine hydrothermal systems. *Jour. Geophys. Res.* **98(B3)**, 4173-4182.