

# CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE SISTEMAS DE FENDAS ASSOCIADAS A DOBRAMENTOS VARISCOS NA SERRA DO MARÃO.

Louro, M.<sup>1</sup>, Coke, C.<sup>1</sup> e Mateus, A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Secção de Geologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Apartado 202, 5001 Vila Real Codex

<sup>2</sup> Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, C2, Piso 5, Campo Grande, 1700 Lisboa

## Resumo

A análise da distribuição de valores dos parâmetros geométricos característicos de padrões naturais de fractura constitui um meio poderoso de obter informações com aplicação em diversas abordagens de inegável interesse tecnológico. O desenvolvimento do padrão de fracturas estudado é correlativo dos dobramentos atribuíveis à primeira fase de deformação varisca. Identificam-se quatro famílias distintas de fendas, para as quais a distribuição dos valores de espaçamento (S) entre estruturas da mesma família é log-normal, enquanto que a dos valores de espessura (E) segue uma lei de potência do tipo  $N = E^{-D}$ , em que (D) é a dimensão fractal. Deste modo, o valor S característico de cada família é dado pela moda da distribuição; a dimensão fractal determinada para as distribuições de valores E discrimina diferentes associações entre fendas e microestruturas à escala do grão.

## Introdução

Nos últimos anos vários têm sido os autores que se têm debruçado sobre as distribuições de valores admitidas pelos parâmetros geométricos característicos de padrões de fractura naturais, por forma a objectivar a sua utilização em abordagens diversas de cariz tecnológico, de onde se destacam as modelações de reservatórios naturais fracturados. As conclusões que daqui decorrem são, contudo, bastante discutíveis, porquanto os resultados obtidos não têm sido sistematicamente avaliados à luz das características primárias (mecânicas, em particular) do meio rochoso em que a fracturação se desenvolve e/ou dos mecanismos de deformação conducentes à cedência frágil macroscópica. Assim, por exemplo, alguns autores apontam para o *espaçamento* entre fracturas constituintes de padrões naturais distribuições do tipo log-normal (Narr & Suppe, 1991), exponenciais negativas (Priest & Hudson, 1976; Villaescusa & Brown, 1990), ou mesmo normais (Huang & Angelier, 1989), não mencionando, pelo menos de forma clara, qual o significado geológico de tais funções estatísticas. Outros, como Gumiel (1998), analisando padrões de fractura bastante complexos, mostram que tal análise geométrica pode ser utilizada como uma medida da evolução do padrão de fracturas se complementada por outro tipo de informação geológica (como por exemplo a natureza dos precipitados minerais que preenchem as fracturas); distinguem-se então os sistemas de fracturas muito homogêneos, por vezes bastante evoluídos, com distribuições tendencialmente log-normais, dos que compreendem descontinuidades espaçadas de modo variável, para os quais a distribuição do parâmetro se ajusta razoavelmente a funções hiperbólicas. Também a distribuição dos valores de *espessura* dos filonetes e veios constituintes de redes naturais de fracturação tem sido analisada, por vezes com o intuito de colocar em evidência relações de dependência entre este parâmetro geométrico e os fenómenos geológicos que determinam a natureza composicional dos precipitados minerais observados (e.g. Sanderson *et al.*, 1994; Gumiel, 1998). Nestes casos, as distribuições dos valores de espessura seguem de perto funções hiperbólicas que, de modo geral, reflectem a natureza auto-semelhante da geometria evidenciada pelas estruturas frágeis que compõem o padrão de fracturas. Conjuntos de filonetes e/ou veios gerados na dependência de diferentes mecanismos de deformação, geralmente assistidos por quantidades significativas de fluidos, diferem nos parâmetros escalares D e C da função exponencial  $N(t) = C \times t^{-D}$ , onde  $N(t)$  representa o número de estruturas com espessura superior a t, e C corresponde a uma constante de proporcionalidade que depende do número de estruturas considerado. O expoente D, definido desta maneira, constitui uma medida da irregularidade e fragmentação do conjunto analisado, ou seja, a sua *dimensão fractal* (e.g. Mandelbrot, 1982; Turcotte, 1997).

O presente trabalho visa a caracterização do padrão de fracturas associado a uma dobra que se desenvolve na Unidade dos Quartzitos com Ferro a Sul do v.g. Marão, inserindo-se em um conjunto mais vasto de estudos sobre redes de fracturação em distintos contextos geológicos que têm vindo a ser efectuados no âmbito do projecto de investigação REDIBER-PBICT/P/CTA/2113/95.

## Elementos geológico-estruturais

As formações metassedimentares (localmente metavulcânicas) aflorantes no ramo Sul da Serra do Marão apresentam geralmente dobramento forte e heterogêneo atribuível à primeira fase de deformação Varisca ( $D_1$ ), a qual se desenvolve de forma progressiva em regime transpressivo esquerdo. A geometria apresentada pelas dobras permite, regra geral, atribuir a sua génese a mecanismos de carácter misto do tipo deslizamento flexural (*flexural slip*) e fluência flexural (*flexural flow*). As dobras  $D_1$  apresentam, normalmente, eixos com atitudes próximas de  $10^\circ; N60^\circ W$ , clivagem de plano axial e vergência para NE. Existem, contudo, algumas estruturas vergentes para SW na frente do Cavalgamento da Ribeira das Cestas e a SW do v.g. Marão. Tal é o caso da dobra estudada (fig. 1a), afectando uma sequência constituída por alternâncias de níveis quartzíticos (com espessura centimétrica a métrica) e níveis pelíticos (com espessura centimétrica a decimétrica). Mercê do comportamento mecânico diferencial, bem como à diferença de espessura dos estratos, o dobramento resulta desarmónico; os níveis pelíticos são usualmente alvo de forte laminação nos domínios de flanco, apresentando espessamento considerável na zona de charneira; efeitos de espessamento são também observáveis em alguns níveis de quartzito, particularmente quando estes ocorrem na vizinhança de estratos pelíticos mais espessos, conduzindo por vezes à sua rotura e sobreposição. O eixo desta dobra tem atitude geral  $6^\circ; N60^\circ W$  e a clivagem, apresentando pendor elevado, toma a direcção média  $N56^\circ W$ ; as lineações de intersecção  $S_0/S_1$  e de estiramento são subparalelas ao eixo da dobra.

Na superfície de estratificação de um dos níveis de quartzito, identificaram-se quatro famílias de fendas de quartzo com inclinação pronunciada ( $>65^\circ$ , com excepção de algumas das estruturas representativas da família B) e rumos distintos (fig. 1b):  $N70^\circ E$  (família A);  $N55^\circ W$  (família B);  $N10^\circ E$  (família C) e  $N40^\circ E$  (família D). O desenvolvimento das fendas inclusas na família B aparenta correlacionar-se com a progressão do dobramento, uma vez que estas ocorrem quer no arco externo dos estratos, em domínios de charneira, quer ao longo dos flancos, apresentando aí geometria sigmóide graças ao deslizamento flexural. A génese das fendas da família A afigura-se posterior, relacionando-se preferencialmente com a tracção paralela ao eixo da dobra (estiramento em *b*). No decurso deste incremento evolutivo ter-se-ão formado essencialmente três conjuntos de fendas: um, gerado na dependência do *necking* experimentado pelos *boudins* dos estratos mais competentes; os restantes dois, induzidos por movimentação cisalhante conducente ao desenvolvimento incipiente de sistemas conjugados com direcção próxima de N-S (direito) e  $N40^\circ-50^\circ E$  (esquerdo). As fendas constituintes das famílias C e D deverão ter sido geradas em condições de deformação progressiva, provavelmente sob regime cisalhante direito; as fendas da família D, representam as estruturas mais antigas.

A caracterização microestrutural dos precipitados siliciosos que se dispõem ao longo das várias fendas e do quartzito que as enquadra, reforçando as indicações sobre a cronologia relativa indicada para as várias famílias, revela ainda que estas constituem o principal registo geológico da circulação de soluções sobresaturadas em sílica durante os eventos de cedência síncronos de  $D_1$ ; tal fluido, de origem local, foi muito provavelmente gerado no decurso da solução sob pressão do quartzito, processo particularmente eficiente nos domínios da dobra sujeitos a maior achatamento. Em virtude do seu endurecimento intracristalino forte e heterogêneo, os preenchimentos siliciosos grosseiros dispostos ao longo das estruturas constituintes da família B são passíveis de correlação com os primeiros estádios de circulação/precipitação e subsequente deformação. Os precipitados contidos em fendas da família C testemunham os derradeiros eventos de circulação/precipitação, porquanto compreendem agregados de cristais micro-milimétricos incipientemente endurecidos ou isentos de qualquer efeito óptico denunciador de cedência intracristalina. As fendas integradas nas restantes famílias são sublinhadas por agregados quartzosos que, regra geral, apresentam estilos de deformação intermédios entre os dois casos extremos referidos.

## Caracterização geométrica do padrão de fracturas

O levantamento rigoroso (à escala 1:1) da rede de fendas aflorante em uma área representativa da superfície de estratificação do nível de quartzito referido (fig. 1b), permitiu a medição sistemática dos valores de espessura e de espaçamento entre estruturas segundo *scan-*

*lines* com espaçamento regular (5mm) e rumo perpendicular à direcção média de cada família de fendas. Conforme esperado, o número relativo de medições assim adquiridas para os dois parâmetros geométricos varia de família para família, oscilando entre 292 e 1095 medições para o espaçamento e entre 443 e 1300 medições para a espessura. Estes dados foram posteriormente tratados do ponto de vista estatístico; uma vez que o registo das medições se processou linha a linha, a supressão dos valores correspondentes a linhas intercaladas permitiu variar o intervalo de amostragem para 10, 15 e 20mm. Acresce mencionar também que as fendas apresentam características geométricas distintas nos diferentes domínios da dobra, facto que influencia a amostragem dos parâmetros referidos; efectivamente, estas estruturas são mais abundantes, mais curtas e menos espessas na zona de charneira da dobra, domínio onde preferencialmente se desenvolvem os dispositivos *en échelon*. Os testes efectuados mostram, contudo, que tais aspectos não deverão ter grande significado estatístico na amostragem efectuada.

A análise das distribuições de valores de *espaçamento* revela um carácter tendencialmente log-normal (assimétricas com curtose positiva). Desta forma, a moda de cada distribuição de valores caracterizará cabalmente a respectiva família de fendas, sendo necessário um número mínimo de 125-150 medições (estatisticamente significativo) para cada caso. *Tal significa ainda que o parâmetro espaçamento não é sensível aos mecanismos de deformação responsáveis pela génese das várias famílias de fendas e/ou que estas representam sistemas frágeis relativamente evoluídos.*

A análise do parâmetro *espessura* (E) permite concluir que os valores adquiridos para as diferentes famílias seguem distribuições exponenciais segundo uma lei de potência do tipo  $N=E^{-D}$ , reflectindo a natureza auto-semelhante própria de cada grupo de estruturas incluso no padrão de fracturas. *Tal significa que as fendas menos espessas e sujeitas a menor interacção mecânica com estruturas vizinhas, são as que melhor representam cada família, pelo que os valores D deverão ter significado geológico.* Com efeito, os valores D obtidos com base no ajustamento gráfico das distribuições do parâmetro espessura para os diferentes intervalos de amostragem, revelam que as diferenças entre as leis de potência admitidas por cada família são negligenciáveis ( $< 0.04$ ) e perfeitamente justificáveis à luz dos métodos utilizados no levantamento das estruturas e subsequente medição da sua espessura. Existe, portanto, *autosemelhança estatística* dentro dos intervalos de medição (amostragem) considerados (5-20mm).

A variação de D para as diferentes famílias ( $0.44\pm 0.01$  – A;  $0.24\pm 0.01$  – B;  $0.33\pm 0.02$  – C; e  $0.13\pm 0.01$  – D, em média) aparenta reflectir a acção de mecanismos de deformação distintos sob regimes de cedência global que podem, ou não, ser diferentes; as fendas da família C e D, por exemplo, geradas em condições de deformação progressiva, apresentam dimensão fractal distinta. Por outras palavras, *a dimensão fractal poderá ser sensível às diferentes associações que se estabelecem entre as fendas de determinada família e determinadas microestruturas à escala do grão* (geradas por distintos mecanismos de cedência frágil), conforme preconizam os modelos teóricos desenvolvidos por vários autores (e.g. Pollard *et al.*, 1982).

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da JNICT através do projecto de investigação REDIBER-PBICT/P/CTA/2113/95.

## Referências

- Gumiel P. (1998) Ensayo de modelización geométrica del Stockwork de Riotinto. Huelva (España): Implicaciones en la prospección de otros ejemplos de la Faja Pirítica Ibérica. *IV International Symposium on the Polymetallic Sulphides of the Iberian Pyrite Belt*, Lisboa (18-21 Janeiro): A.19.1-A.19.19
- Huang Q., Angelier J. (1989) Fracture spacing and its relation to bed thickness. *Geol. Mag.*, 126: 355-362.
- Mandelbrot B.B. (1982) *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman, San Francisco.
- Narr W., Suppe J. (1991) Joint spacing in sedimentary rocks. *J. Struct. Geol.*, 13: 1037-1048.
- Pollard D.D., Segall P., Delaney P. (1982) Formation and interpretation of dilatant ecelon cracks. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 93: 1291-1303.
- Priest S.D., Hudson J.A. (1976) Discontinuity spacing in rock. *Int. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomech. Abs.*, 13: 135-148.
- Sanderson D.J., Roberts S., Gumiel P. (1994) A fractal relationship between vein thickness and gold grade in drilling-core from La Codosera, Spain. *Econ. Geol.*, 89:168-173.
- Turcotte D.L. (1997) *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge University Press (2th ed.): 398 pp.
- Villaescusa N.H., Brown E.T. (1990) Characterizing joint spacing correlation using geostatistical methods. In: *Rock Joints* (Barton N. & Stephansson O., eds.), Balkema, Rotterdam, 115-122.