

Análise microtextural: princípios, procedimentos e caracterização micromorfológica de grãos de quartzo

Pedro J. M. Costa¹, César Andrade² e Maria da Conceição Freitas³

Resumo: Cada ambiente sedimentar é caracterizado por uma dinâmica peculiar e por condições específicas de energia que se traduzem em atributos de natureza estrutural, estratigráfica, textural e composicional dos sedimentos. Algumas características são impostas no local da deposição, outras são herdadas da área ou material-fonte e outras ainda serão impostas durante o transporte. Sendo as microtexturas superficiais muito sensíveis a modificações dos parâmetros ambientais, é expectável que a superfície de cada grão de quartzo corresponda a um palimpsesto, no qual as microtexturas mais recentes correspondam essencialmente às condicionantes impostas pelo último episódio de remobilização ou de remodelação da superfície do grão.

O capítulo inclui um atlas de microtexturas, comentadas, obtidas em grãos de quartzo colhidos em diferentes locais da costa algarvia, que ilustram o conjunto de microtexturas mais frequentes em ambientes litorais e peri-litorais.

A reorganização das 18 marcas/atributos microtexturais aqui descritas em 5 tipos fundamentais (rolamento, superfícies recentes, marcas de percussão, dissolução e partículas aderentes) parece suficiente para diferenciar os ambientes e discriminar assinaturas microtexturais impressas pelo transporte dos grãos. O número de grãos de quartzo da mesma classe granulométrica necessários à caracterização microtextural de uma amostra de areia é, no mínimo, de 12 e, preferivelmente, ≥ 30 .

A aplicação de análise microtextural em estudos sedimentares tem sido especialmente orientada no sentido de determinar a origem dos grãos de quartzo e identificar os processos activos até à sua deposição ou os pós-deposicionais, com incidência especial nos episódios de imobilização (pedogénese), transporte em contextos recentes, fluviais e glaciais.

Palavras-chave: Microtexturas, Proveniência, Sedimentologia, Ambientes costeiros, Exoscopia

Abstract: Each sedimentary environment is characterized by a peculiar dynamic setting and by specific energetic conditions which are reflected in structural, stratigraphic, textural and compositional attributes of the sediments. Some of those characteristics are imprinted in the depositional area, others are inherited from the source region or source material and others are carved during sediment transport. The fact that superficial microtextures are very sensitive to changes in environmental parameters, favours the perspective of quartz grains surfaces as palimpsests in which the most recent microtextures correspond to the later episode of remobilization or transformation of the grain surface.

In this work, we discuss the principles, methodologies and applications of microtextural analysis to provenance studies, using images obtained at the Scanning Electron Microscope.

¹ Centro de Geologia da Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Edifício C6, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal. E-mail: ppcosta@fc.ul.pt

² Centro de Geologia da Universidade de Lisboa e Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Edifício C6, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal. E-mail: candrade@fc.ul.pt

³ Centro de Geologia da Universidade de Lisboa e Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Edifício C6, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal. E-mail: cfreitas@fc.ul.pt

The reorganization in 5 main groups (i.e. roundness, fresh surfaces, percussion marks, dissolution and adhering particles) – out of the 18 microtextural attributes de-scribed herein – appears to be sufficient to differentiate and discriminate microtextural signatures imprinted during grain transport; the number of quartz grains, from the same granulometric class, necessary to microtextural characterization is somewhere between 12 (minimum) and 30 (preferably).

This chapter also includes a commented atlas of microtextures that illustrate the most common microtextures collected in litoral and peri-litoral environments. The atlas was obtained using quartz grains collected from different locations in the Algarve coast.

Microtextural analysis has been applied to sedimentary studies focusing in the establishment of source materials, in the identification of active mechanisms during sediment deposition or even post-depositional processes with particular emphasis in imobolization episodes (pedogenese). Furthermore, sediment transport in present-day, fluvial and glacial environments have also applied microtextural analysis.

Keywords: Microtextures, Provenance, Sedimentology, Coastal environments, Exoscopy

1. Introdução

A aplicação da análise microtextural em estudos sedimentológicos - com utilização de imagens obtidas ao Microscópio Electrónico de Varrimento (MEV) - foi iniciada por Kuenen (1959), Biederman (1962), Porter (1962) e Krinsley e Takahashi (1962). Por microtexturas entendem-se os aspectos de micro-relevo (observáveis ao microscópio) na superfície de partículas constituintes de um sedimento detrítico, as quais são independentes da forma, dimensão ou esfericidade da partícula. Esta análise, também designada por exoscopia, fundamenta-se em princípios semelhantes aos da morfoscopia (p. ex. Carvalho 1966), ou seja, assume que algumas microtexturas podem ser herdadas da rocha-mãe mas outras são impostas pelos processos sedimentares que reactivaram a superfície do grão no decurso da sua história. A investigação de microtexturas implica observação de imagens ampliadas até $\times 10^4$, em contraste com a ampliação máxima de $\times 10^2$ conseguida pela lupa binocular. Os trabalhos de análise microtextural têm incidido principalmente em grãos de quartzo - mineral utilizado devido à sua ubiquidade em sedimentos terrígenos (p. ex. Krinsley e Doornkamp 1973), embora alguns estudos se debrucem sobre minerais pesados (p. ex. Mahaney 2002). Apesar de avanços contínuos, os resultados ainda não são consensuais na comunidade científica devido, por um lado, a alguma subjectividade introduzida pelo operador, mesmo que treinado, quando caracteriza as microtexturas e, por outro, a conflitos de opinião sobre a génese de algumas microtexturas. No entanto, diversos trabalhos recentes (p. ex. Williams *et al.* 1998, Mahaney *et al.* 2001, Costa *et al.* 2012a, Costa *et al.* 2013, Vos *et al.* 2014) demonstram progresso na aplicação desta metodologia e têm contribuído para a afirmação da análise microtextural como uma técnica de apreciável utilidade, nomeadamente em estudos de proveniência.

No sub-capítulo 5 do presente estudo apresenta-se um atlas de microtexturas compilado a partir de amostras recolhidas no litoral português.

2. Princípios da microscopia electrónica de varrimento

O desenvolvimento do microscópio electrónico de varrimento possibilitou o progresso da análise microtextural a partir da segunda metade do séc. XX. O MEV possibilita ampliações até 100 000 vezes e, comparado com um microscópio convencional (que tem limitações focais), oferece maior profundidade de campo, possibilitando a visualização tridimensional de objectos microscópicos.

Para analisar a superfície de um grão no microscópio electrónico de varrimento (Figura 1), a partícula é colocada num porta-amostras com capacidade de rotação nas três direcções do espaço. Acima da câmara que contém o porta-amostras e alinhada com ela, encontra-se uma coluna de lentes e deflectores electromagnéticos e, no topo dessa estrutura, a fonte de radiação (um filamento de tungsténio ou uma fonte de hexaboreto de Lantânio (LaB_6)). Esta fonte emite um feixe electrónico primário, o qual percorre de forma ordenada (segundo as direcções x-y) e sistemática a superfície da amostra, de acordo com uma malha de discretização previamente fixada, assegurando que a distância entre linhas de varrimento sucessivas é suficientemente pequena para resolver detalhes da microtopografia da superfície.

A interferência do feixe primário com a superfície da amostra provoca a re-emissão de



Figura 1. Imagem do microscópio electrónico de varrimento (JEOL – JSM 52000LV) utilizado na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL). É visível (à esquerda) o porta-amostras (PA) cuja movimentação é feita através de três parafusos - Pf), a coluna electro-magnética (CE) e a fonte electrónica (FE). Ao centro, é visível um pequeno monitor e o painel de controlo, onde se ajusta, por exemplo, a resolução e a energia do feixe.

Figure 1. Photograph of a Scanning electron microscope (JEOL – JSM 52000LV) used at the Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. It is possible to observe (left) the stub (the micrometers that serve to adjust the position of the stub), electromagnetic structure and the electronic source. In the middle of the photograph is possible to observe a small monitor and the control panel, where it is possible to adjust, for instance, the resolution and the energy of the beam.

electrões secundários, raios X e calor (Goldstein *et al.* 1981, Slayter e Slayter 1992) e o feixe secundário é usado para produzir imagens da superfície. À medida que o feixe primário percorre a amostra, os electrões secundários são recolhidos sequencialmente por um cristal cintilador e amplificados por um tubo fotomultiplicador. O feixe secundário, ou é injectado num tubo catódico que produz imagens semelhantes às de um aparelho de televisão convencional ou, em modelos mais recentes, convertido em informação digital.

Como o feixe de electrões secundários tem baixa energia (normalmente inferior a 50 eV), não é provável que penetre mais do que 50 Å na amostra, minimizando assim os efeitos de ressonância. As características da emissão secundária e respectiva intensidade resultam da intensidade e do ângulo com que o feixe primário de electrões incide na superfície da amostra.

A ampliação conseguida pelo MEV, obtida através da razão entre a dimensão da ima-

gem final e a dimensão percorrida pelo feixe primário na superfície da amostra varia, em termos práticos, com o ângulo de incidência do feixe primário, cujo diâmetro condiciona a máxima resolução da imagem, a qual depende ainda da resolução do monitor utilizado para visualização, tipicamente mais baixa. Na realidade, o feixe é manipulado para produzir uma imagem cuja qualidade depende da distância focal (tipicamente da ordem de 10 mm - Watt 1985, Krinsley *et al.* 1998) e da intensidade da fonte electrónica.

Para evitar a acumulação de cargas eléctricas na superfície a analisar, que criam artefactos na imagem, os grãos de minerais não metálicos são previamente revestidos com uma película (espessa de alguns nanómetros) de carbono, ouro ou ouro-paládio. A principal, e talvez única, desvantagem das imagens obtidas com MEV, é que são sempre monocromáticas, o que impossibilita o reconhecimento de espécies minerais através da cor natural ou de cores de interferência.

O registo fotográfico pode ser feito em película de 35 mm ou maior (normalmente 120 mm), e, mais recentemente, em suporte digital, obtido a partir de gravação directa para a memória ou disco de um computador. Alguns MEVs estão equipados com um sistema de espectrometria EDS (Energy Dispersive Spectrometry) e possibilitam também a determinação semi-quantitativa da composição química (catiónica) das amostras observadas (Allaby e Allaby 1990).

3. Procedimento laboratorial

A análise microtextural é, regra geral, reservada para partículas da dimensão das areias obtidas de um sedimento detrítico. A amostra inicial, heterométrica do ponto de vista textural e heterogénea do ponto de vista composicional, deve ser lavada utilizando apenas água. Alguns autores (p. ex. Vos *et al.* 2014) sugerem, nesta fase, a utilização de uma mistura de ácido clorídrico (diluído a 15%) e desfloculante (p. ex. solução aquosa de pirofosfato de sódio a 50g/L) para remover partículas aderentes e revestimentos da superfície dos grãos. No entanto, a aplicação deste procedimento pode levar à eliminação de evidências relevantes em determinados contextos sedimentares.

Uma vez lavada e seca, realiza-se peneiração da amostra para separar a fracção dimensional a analisar - tipicamente é usada a fracção 1-3 ϕ , ou seja 500-125 μm). Desta fracção escolhem-se de forma aleatória, à lupa binocular, os grãos a analisar. A experiência dos autores indica 12 grãos da mesma espécie mineral como valor mínimo, embora seja aconselhável elevar este número para um valor próximo de 30.

Cada grão separado é posteriormente revestido com ouro ou carbono em equipamento específico (Figura 2). Finalmente, as amostras são montadas no porta-amostras e levadas ao MEV, onde são obtidas imagens que retratam a micromorfologia dos grãos.

4. Procedimento analítico, classificatório e interpretativo

Ao procedimento laboratorial, segue-se uma análise visual das imagens onde são identificadas e classificadas as microtexturas impressas nas superfícies dos grãos. A identificação das microtexturas é obtida por comparação visual e fundamenta-se em trabalhos de referência, como o atlas de Mahaney (2002) ou a compilação de Costa (2012), cujos resultados



Figura 2. Exemplo de uma câmara para mineralização com ouro (laboratório da FCUL).
Figure 2. Example of a chamber where the samples are mineralized with gold (FCUL laboratory).

são revistos e detalhados no sub-capítulo 5. Cada grão é caracterizado com base num conjunto de marcas e atributos microtexturais impressos na superfície e observados nas imagens obtidas ao MEV. Existe um conjunto alargado de microtexturas que, em casos específicos, se podem revelar determinantes na interpretação sedimentológica e são sumariamente apresentadas adiante e exemplificadas na Figura 3.

Cada grão é objecto de uma análise e descrição semi-quantitativa, que se inicia com a identificação das microtexturas na imagem. Em seguida, o grão é caracterizado quanto a cada marca microtextural e aos atributos dissolução e precipitação por um número inteiro que varia em função da fracção da superfície por ela ocupada: [0] - ausente (isto é, 0% da superfície do grão ocupada por determinada microextura) a [5] (>75% da superfície do grão ocupada por determinada microtextura). Relativamente aos restantes atributos, o rolamento é também quantificado numa escala de 0 a 5 e o relevo numa escala de 1 a 3.

Por atributo/marca microtextural calculam-se estatísticas de tendência central (p. ex. mediana) e dispersão (quartis, desvio-padrão) para a totalidade dos grãos que constituem a amostra, os quais se assumem representativos do sedimento total. Estes dados alimentam por sua vez a análise estatística dos conjuntos amostrais (p. ex. análise grupal, factorial e de componentes principais) e a interpretação sedimentológica. Os autores do presente trabalho têm utilizado com sucesso o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis (Kruskal e Wallis 1952) para assegurar a significância estatística dos resultados no que respeita ao valor da mediana e adoptaram um nível de significância de 0.05.

A problemática associada ao número de grãos necessários para validar interpretações é um aspecto crucial desta técnica. Vários trabalhos referem 10 grãos como valor mínimo necessário para interpretar resultados microtexturais (p. ex. Mahaney 2002), embora a confiança nos resultados aumente com o incremento do número de grãos por amostra;

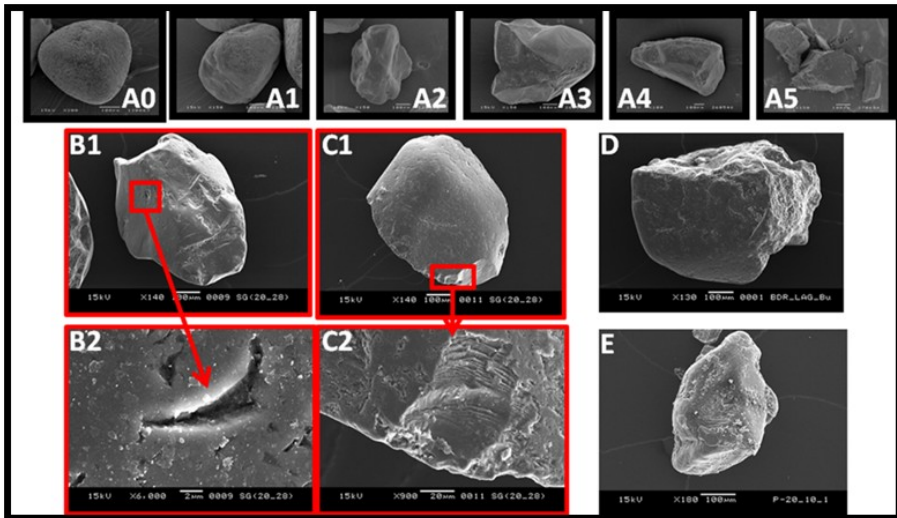


Figura 3. Exemplos de microtexturas. A0 a A5- rolamento. B1- marcas de percussão. B2 – detalhe de uma marca de percussão. C1- superfície recente. C2- detalhe de uma superfície recente. D- dissolução (visível na face direita do grão). E- partículas aderentes (visíveis no centro do grão). Adaptado de Costa *et al.* (2012a).

Figure 3. Examples of microtextural features. A0 to A5 – roundness. B1 – percussion marks. B2 – detail of percussion mark. C1 – fresh surface. C2 – detail of fresh surface. D – dissolution (visible on the right face of the grain). E – adhering particles (visible in the centre of the grain). Adapted from Costa *et al.* (2012a).

porém, os elevados custos financeiros envolvidos na utilização do MEV obrigam geralmente a minimizar este número.

Os autores do presente estudo, avaliaram a variabilidade da mediana correspondente a cada atributo/marca microtextural, obtida para uma dada amostra, com o aumento do número de elementos considerados, concluindo que, para um número de grãos superior a 12, o valor da mediana permanece geralmente num intervalo com amplitude inferior a 1, pouco significativo no sistema de classificação adoptado; a consideração de um número de 20 grãos garante permanência da mediana no mesmo intervalo em todos os atributos/marcas microtexturais (Figura 4).

5. Microtexturas

O estudo de sedimentos arenosos de diversos locais da zona costeira do Algarve conduziu à compilação e organização de um atlas de microtexturas observadas em grãos de quartzo (Tabela 1). Este atlas organiza, ilustra e descreve as microtexturas detectadas referindo, sempre que possível, os processos geradores e ambientes sedimentares em que ocorrem.

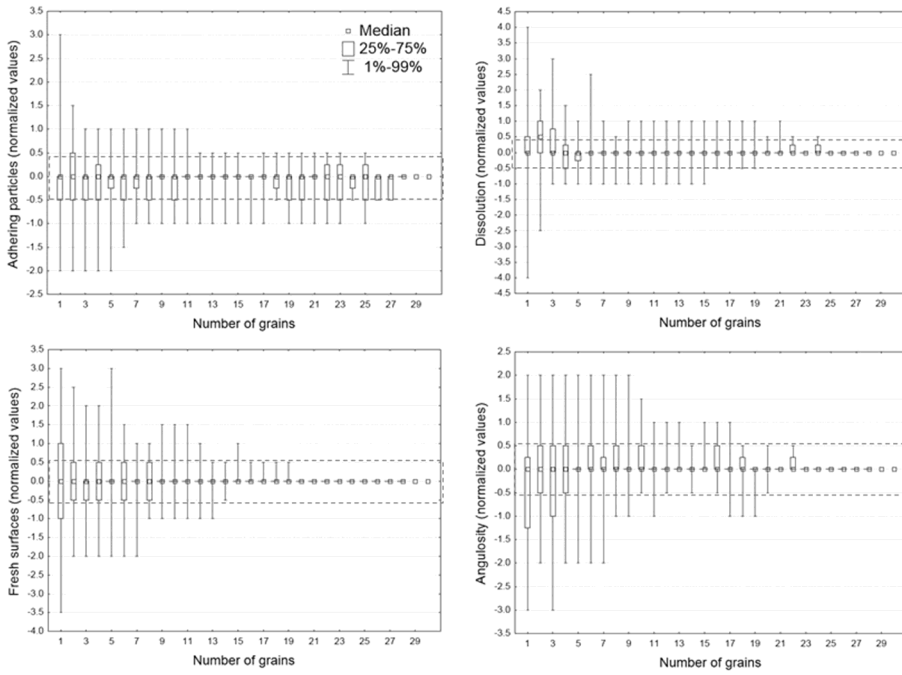


Figura 4. Avaliação empírica do número mínimo de grãos necessários para obter representatividade estatística. Para cada amostra e atributo/marca microtextural, calculou-se o valor mediano global (medtot) usando a totalidade dos grãos analisados (N). Seguidamente, um novo conjunto de valores medianos (medpart) foi estabelecido através do aumento sucessivo de 1 unidade (grão) ao número de grãos envolvidos na computação daquela estatística. Os resultados foram normalizados (mednorm) subtraindo cada valor de medpart da respectiva medtot. Os resultados mostram a variabilidade do valor da mednorm em todas as amostras analisadas. Pode observar-se que a dispersão decresce rapidamente com o aumento do número de grãos. Tendo em consideração o intervalo de medtot ± 0.5 (linha a tracejado) como indicador da estabilização do valor da mediana, é possível indicar que o número de grãos necessários para esta abordagem classificatória semi-quantitativa é da ordem de 20 (Costa *et al.* 2012b).

Figure 4. Empirical evaluation of the minimum number of grains required to be representative of each sample. For each sample and microtextural attribute a global median value (medtot) was calculated using the total number of grains analysed (N). Next, a new set of median values (medpart) was calculated by successively increasing by 1 the number of grains involved in the computation, from 1 to N. The results were normalized (mednorm) subtracting each medpart from medtot. Results showing the variability of mednorm in all samples are presented in the figures above. It can be observed that the dispersion rapidly decreases with increasing number of grains. Taking the range of medtot ± 0.5 (dashed lines) as indicative of stabilization of the median value, the number of grains required in this semi-quantitative approach is of the order of 20 (Costa *et al.* 2012b).

Localização	Amostra	Ambiente/Depósito sedimentar
Boca do Rio	BDR Alv Dir	Aluvial
Boca do Rio	BDR Face de Praia	Face de praia
Boca do Rio	BDR SS3	Tsunami
Martinhal	Mart 4	Tsunami
Martinhal	Mart 5	Tsunami
Martinhal	Mart 6	Tsunami
Salgados	SG 14 (0.20-0.28)	Tempestito?
Salgados	GalS3	Fundos submarinos proximais
Salgados	SG Duna	Duna
Salgados	SG Praia	Face de praia
Praia do Barranco	PB Berma	Berma de praia
Praia do Barranco	PB Duna F	Duna
Praia do Barranco	PB Duna T	Duna
Praia do Barranco	PB Duna_Trep_Mrg	Duna

Tabela 1. Listagem das amostras utilizadas para a compilação do atlas de microtexturas observadas em grãos de quartzo.

Table 1. Sample list of the grains used to compile the atlas on micro-textures observed in quartz grains.

5.1 Atlas de microtexturas

5.1.1 Atributos microtexturais

a) **Rolamento** – O rolamento foi classificado com base na tabela de comparação visual de Powers (1953) que quantifica este atributo entre 0 e 1, utilizando uma escala não linear. No caso presente, os grãos foram classificados de 0 a 5 (Muito rolado a Muito anguloso) quanto ao rolamento, com base no aspecto tridimensional.

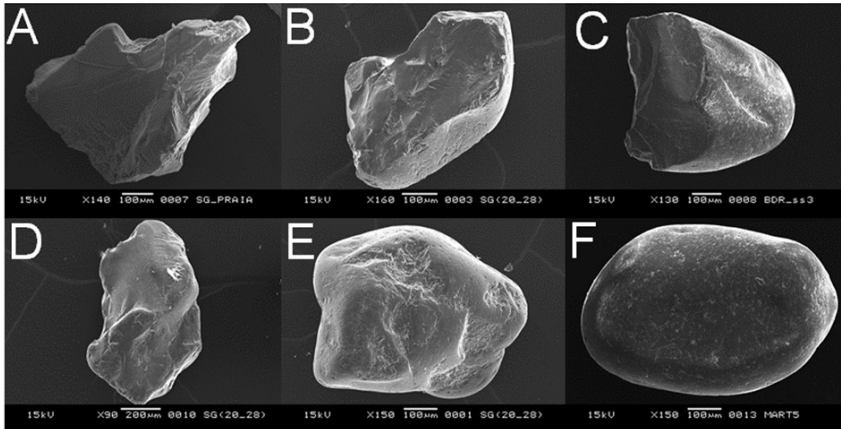


Figura 5. Exemplos de grãos que apresentam rolamento diferente. A- Muito anguloso. Amostra SG_Praia. B - Angular. Amostra SG_14_20_28. C - Sub-anguloso. Amostra BDR_SS3. D - Sub-rolado. Amostra SG_14_20_28. E - Rolado. Amostra SG_14_20_28. F - Muito rolado. Amostra MART_5.

Figure 5. Examples of grains with different roundness. A- Very angular. Sample SG_Praia. B - Angular. Sample SG_14_20_28. C - Sub-angular. Sample BDR_SS3. D - Sub-rolled. Sample SG_14_20_28. E - Rounded. Sample SG_14_20_28. F - Very rounded. Sample MART_5.

b) Relevo - O relevo foi caracterizado avaliando o vigor da microtopografia exibida pela superfície do grão, ou seja, a magnitude dos desníveis altimétricos, sendo classificado como Baixo, Médio e Alto (a que correspondem os valores de 1 a 3, respectivamente).

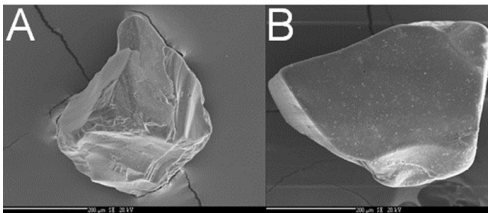


Figura 6. A - Grão com relevo alto. Amostra PB_Duna_Trep_Mrg. B - Grão com relevo baixo. Amostra PB_Berma.

Figure 6. A - Grain with high relief. Sample PB_Duna_Trep_Mrg. B - Grain with low relief. Sample PB_Berma.

Todas as microtexturas que se seguem foram caracterizadas do ponto de vista quantitativo com base na proporção da superfície que ocupavam relativamente à superfície visível na imagem, de acordo com a seguinte classificação:

- 0 - Ausente da superfície do grão.
- 1 - Ocupando até 10% da superfície do grão.
- 2 - Ocupando 10 a 25% da superfície do grão.
- 3 - Ocupando 25 a 50% da superfície do grão.
- 4 - Ocupando 50 a 75% da superfície do grão.

c) Dissolução – Esta microtextura, originada por processos de natureza (bio?)química, corresponde ao grau de dissolução exibido pela superfície do grão. Os efeitos mais visíveis da dissolução são a destruição de superfícies recentes, de arestas e saliências angulosas da superfície do grão e a formação de uma rede de cavidades, regra geral mais largas que fundas, com distribuição espacial aleatória ou alinhadas segundo fracturas ou planos de clivagem. As cavidades podem alargar e coalescer e as paredes limitrofes são finas, com desenvolvimento planar sinuoso a crenulado. A generalidade dos autores associa esta microtextura a meteorização química da massa mineral.

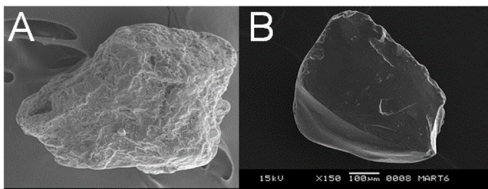


Figura 7. A - Grão com grau de dissolução 5. Amostra MART_4. B - Grão com grau de dissolução 1. Amostra MART_6.

Figure 7. A - Grain ranked 5 in dissolution. Sample MART_4. B - Grain ranked 1 in dissolution. Sample MART_6.

d) Precipitação - Esta microtextura, também de natureza (bio?)química, corresponde à presença de revestimento ou cobertura da superfície original por partículas minerais (por

exemplo: sílica ou óxidos de ferro) geradas a partir de precipitação de solutos, durante a diagenese ou pedogênese. O revestimento pode ter a forma de mantos mais ou menos contínuos ou de áreas ou pontos discretos com maior concentração dos precipitados, cujo hábito não respeita o *fabric* da generalidade do grão. O pré-tratamento dos grãos com soluções ácidas e desfloculantes pode remover estas microtexturas.

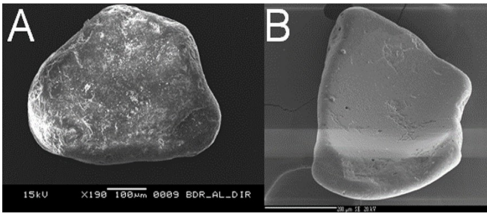


Figura 8. A - Grão com grau de precipitação 5. Amostra BDR_ALV_DIR. B - Grão com grau de precipitação 0. Amostra PB_Berma.

Figure 8. A - Grain ranked 5 in precipitation. Sample BDR_ALV_DIR. B - Grain ranked 0 in precipitation. Sample PB_Berma.

e) Grãos estalados – Grãos que se apresentam estalados ou partidos, permitindo reconstituir a forma inicial. Resultam normalmente de choque violento entre grãos durante o transporte. Parte destes fragmentos podem conduzir à formação posterior de partículas aderentes.

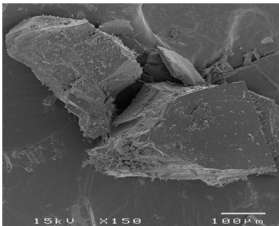


Figura 9. Grão estalado. Amostra GALS3.

Figure 9. Cracked grain. Sample GALS3.

5.1.2 Marcas microtexturais

f) Superfícies recentes – Esta microtextura identifica faces ou partes da superfície do grão, com aspecto “jovem”, livres de evidências de remobilização por dissolução química, precipitação ou impacto mecânico posterior. Em muitos casos estas superfícies associam-se a marcas de fractura ou de abrasão, recentes, responsáveis pela sua (recente) exposição.

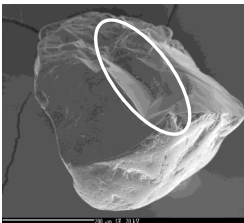


Figura 10. Grão com superfície recente (elipse a branco). Amostra SG_Praia.

Figure 10. Grain with fresh surface (within the ellipsoid). Sample SG_Praia.

g) Partículas aderentes – Esta microtextura corresponde à presença de micropartículas exóticas encravadas em côncavos da superfície dos grãos de quartzo mas também se aplica para designar fragmentos bem circunscritos da superfície do grão que se apresentam protuberantes relativamente à superfície da partícula, ocasionalmente pedunculados, e cujo aspecto preserva a *fabric* da superfície. Esta microtextura é interpretada como resultado da captura de diminutos fragmentos de matéria mineral produzidos por impacto mecânico, ou dissolução, a curta distância (ver descrição de grãos fracturados).

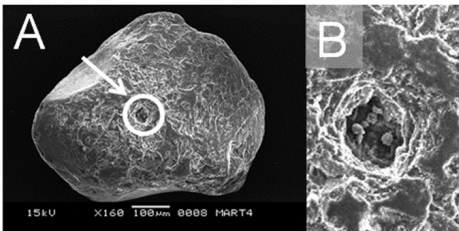


Figura 11. Grão com partículas aderentes (círculo e seta a branco - foto A) e ampliação de detalhe (foto B). Amostra MART_4.

Figure 11. Grain with adhering particles (white circle and arrow - photo A) and detailed zoom in photo B. Sample MART_4.

h) Fracturas concoidais e lineares – Estas microtexturas correspondem a superfícies (de fractura) lisas, com profundidade de incisão variável que, no primeiro caso, são curvas e sublinhadas por lineamentos também curvos (“ribbed”) e, no segundo, adoptam desenvolvimento rectilíneo. Existem formas intermédias entre estes extremos. Esta microtextura é produzida por impacto mecânico.

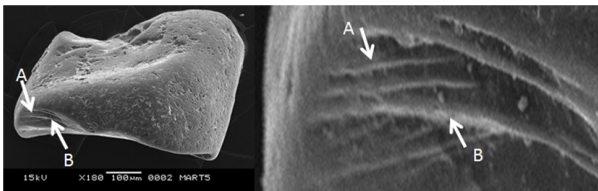


Figura 12. Grão com fracturas lineares (A) e concoidais (B); à direita, ampliação da mesma imagem. Amostra MART_5.

Figure 12. Grain with linear fractures (A) and conchoidal fractures (B). The right image is a detailed zoom in of the left image. Sample MART_5.

i) Fracturas paralelas - Esta microtextura corresponde a conjuntos de lineamentos ou estruturas lineares paralelas entre si e também produzidas por acções mecânicas.

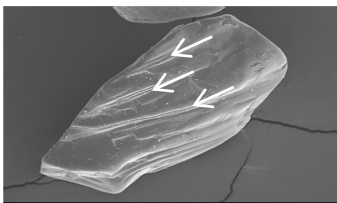


Figura 13. Grão com 3 fracturas paralelas (setas a branco) e paralelas entre si. Amostra BDR_SS3.

Figure 13. Grain with 3 parallel fractures (white arrows). Sample BDR_SS3.

j) Degraus – Esta microtextura corresponde a grupos de patamares separados por faces verticais, semelhantes aos degraus de uma escada. As arestas dos degraus podem ser retilíneas ou arqueadas. Esta marca é interpretada como resultante de impacto mecânico.

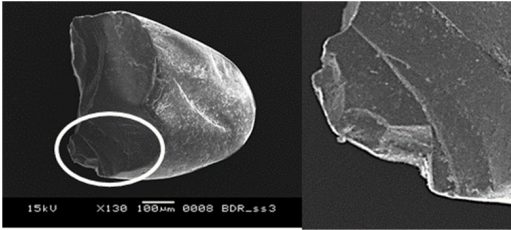


Figura 14. Grão com degraus (círculo a branco); à direita, ampliação da mesma imagem. Amostra BDR_SS3.

Figure 14. Grain with steps (white circle). Right image is a detailed zoom in of the left image. Sample BDR_SS3.

k) Extremidades angulosas – Esta microtextura, também de natureza mecânica, caracteriza-se pela formação e preservação de formas piramidadas, regra geral muito facetadas e ocupando preferencialmente as extremidades do grão.

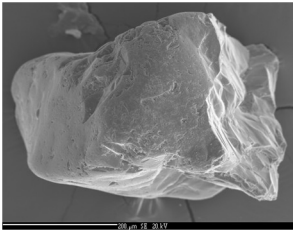


Figura 15. Grão com extremidades angulosas (face direita do grão). Amostra PB_Duna_F.

Figure 15. Grain with angular edges (right facade of the grain). Sample PB_Duna_F.

l) Marcas de arrancamento - Esta microtextura caracteriza-se pela ablação, arranque de uma fracção da matéria mineral do grão por um impacto mecânico violento, deixando uma cicatriz de um arrancamento (recente) na superfície do grão que se prolonga por uma placa protuberante, em consola, ocasionalmente dobrada ou revirada.

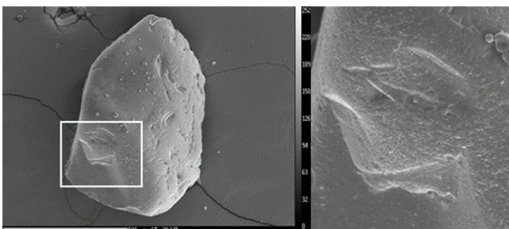


Figura 16. Grão com marca de arrancamento (quadrado branco); à direita, ampliação da mesma imagem. Amostra Mart_4.

Figure 16. Grain with upturned plate (white square). Right image is a detailed zoom in of the left image. Sample Mart_4.

m) Marcas em V - Esta microtextura corresponde a escavações em forma de V na superfície do grão com incisão e dimensões variáveis, simétricas ou assimétricas. Este tipo de microtextura é normalmente associada a choque entre grãos durante transporte de elevada energia, em meio tendencialmente (mas não exclusivamente) aquoso. O incremento do nível energético do transporte resulta em aumento da frequência de ocorrência e das dimensões destas marcas. Ultrapassado um limiar energético (ainda não suficientemente conhecido) a superfície do grão passa a exibir outras marcas, como os degraus, fracturas e superfícies recentes.

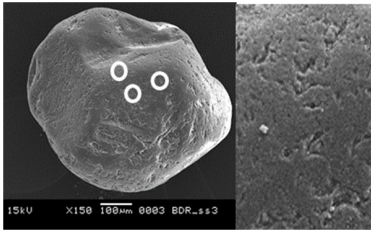


Figura 17. Grão com marcas em V (círculos a branco e ampliação na imagem à direita). Amostra BDR_SS3.

Figure 17. Grain with v-marks - percussion marks (examples within the white circles and detailed zoom in the right image). Sample BDR_SS3.

n) Marcas em crescente - Esta microtextura corresponde a escavações em forma de crescente na superfície do grão. Ocorre frequentemente associada às marcas em V, com as quais partilha génese e limites de existência. Este tipo de microtextura é normalmente associada a choque entre grãos.

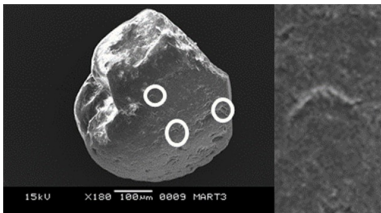


Figura 20. Grão com marcas em crescente (círculos a branco e ampliação na imagem à direita). Amostra BDR_SS3.

Figure 20. Grain with crescentic marks (examples within the white circles and detailed zoom in the right image). Sample BDR_SS3.

o) Marcas de abrasão – Microtextura que indica erosão da superfície, produzindo estrias, alinhamentos e outras lineações em consequência de fricção, arrancamento ou desgaste provocado por choque entre grãos.

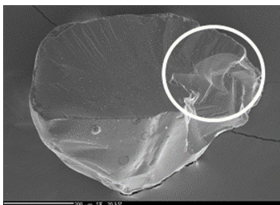


Figura 21. Grão com marcas de abrasão (círculo branco). Amostra PB_Duna_T.

Figure 21. Grain with abrasion mark (white circle). Sample PB_Duna_T.

p) Crateras – Microtextura identificável pela ocorrência de depressão (fechada ou aberta) na superfície do grão, causada por impacto mecânico.

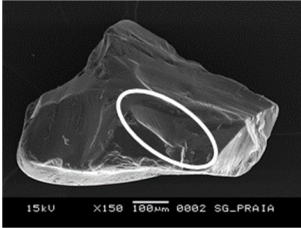


Figura 22. Grão com cratera (círculo branco). Amostra SG_Praia.
Figure 22. Grain with crater (white circle). Sample SG_Praia.

q) Cavidades lineares – Depressões lineares escavadas na superfície do grão, de origem mecânica (?), semelhantes às produzidas por um cinzel. Em tilitos, são interpretadas como estrias resultantes de arraste da partícula contra um elemento duro e resistente.

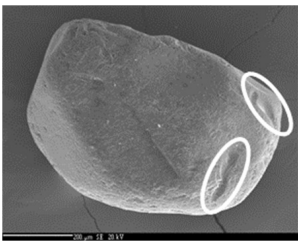


Figura 23. Grão com cavidades lineares (círculos brancos). Amostra PB_Berma.
Figure 23. Grain with linear grooves (white circles). Sample PB_Berma.

r) Cavidades profundas - Depressões profundas, bem circunscritas, tipicamente mais fundas que largas. A gênese não é consensual mas, para os autores, relaciona-se com corrosão e dissolução localizadas, provavelmente em regiões da rede cristalina mais permeáveis à hidrólise.



Figura 24 . Grão com cavidade profunda (círculo branco). Amostra SG_Duna.
Figure 24 . Grain with deep grooves (white circle). Sample SG_Duna.

s) **Cavidades circulares** - Depressões com contorno circular e pouco escavadas na superfície do grão, tidas como de origem química. Em contraste com as crateras, a superfície das cavidades circulares apresenta marcas de dissolução ou partículas aderentes. Na nossa opinião, podem também instalar-se ou retomar uma marca anterior, de feição mecânica.

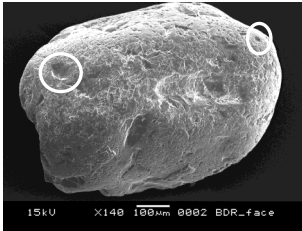


Figura 25. Grão com cavidades circulares (círculos brancos). Amostra BDR_Face.

Figure 25. Grain with circular grooves (white circles). Sample BDR_Face.

6. Conclusão

Neste capítulo descrevem-se de forma sintética os princípios e procedimentos aplicados na análise microtextural de grãos de areia quartzica, recorrendo à análise de imagens obtidas por microscopia eletrónica de varrimento.

Apresenta-se uma descrição dos procedimentos adoptados pelos autores, desde o processamento laboratorial das amostras às metodologias de análise e de interpretação das imagens obtidas ao microscópio electrónico; estes procedimentos permitem uma abordagem objectiva, semi-quantitativa, aos resultados de análise microtextural, que possibilita a sua combinação com outros parâmetros sedimentológicos, também quantificáveis, melhorando a compreensão e interpretação do, intrinsecamente complexo, sistema sedimentar. O capítulo inclui um conjunto de ilustrações comentadas, sob a forma de um pequeno atlas, separando marcas e atributos microtexturais, com o objetivo de tornar as descrições mais intuitivas e facilitar a tarefa de identificação de microtexturas em imagens de grãos de quartzo.

Das 18 microtexturas descritas e ilustradas, cinco tipos fundamentais (rolamento, superfícies recentes, marcas de percussão, dissolução e partículas aderentes) são suficientes, regra geral, para caracterizar e discriminar os diferentes ambientes sedimentares estudados. Propõe-se 12 como valor mínimo (30 como recomendado) para o número de grãos de quartzo da mesma classe dimensional que necessariamente devem ser analisados numa amostra de areia, para possibilitar a sua caracterização microtextural, utilizando para tal o valor da mediana por atributo/marca que alimenta o tratamento estatístico posterior.

Em síntese, este capítulo descreve as metodologias e procedimentos que demonstram a mais-valia da aplicação da análise microtextural em estudos sedimentológicos, nomeadamente de proveniência, desde que enquadrados no contexto geológico, geomorfológico e oceanográfico local a regional.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Professor William Mahaney (York University and Quaternary Surveys, Canadá) a inestimável colaboração e ensinamentos sobre a aplicação da análise microtextural em trabalhos de geologia costeira. A colaboração de um número alargado de colegas (em trabalho de campo, de laboratório e na concretização de experiências) foi fundamental para a recolha e interpretação dos dados sumariamente apresentados neste capítulo. Os autores gostariam, em particular, de exprimir uma palavra de muito apreço a Ana Nobre Silva, Tiago Silva, Vera Lopes, Alexandra Oliveira, Telmo Nunes, Sue Dawson, Yong-Sung Park, Raphael Paris, Sebastião Teixeira, Alastair Dawson e Lenka Lisa.

Este trabalho beneficiou de apoio financeiro da FCT através da concessão de bolsas de estudos pós graduados (SFRH/BPD/84165/2012; SFRH/BD/35900/2007) e de projectos de I&D (GETS - PTDC/CTE-GEX/65948/2006). Os projectos NEAREST (EU-037110-GOCE-2006) (UE) e NERC-UK "Will climate change in the Arctic increase the landslide-tsunami risk to the UK?" apoiaram também parte dos trabalhos aqui apresentados.

Uma última palavra de apreço para o editor, o colega Pedro Dinis, pelo convite endereçado para colaborar na construção deste livro.

Referências

- Allaby A., Allaby M. 1990. Dictionary of Earth Sciences, Oxford University Press.
- Biederman E.W. 1962. Distinction of shoreline environments in New Jersey. *Journal of Sedimentary Research* 32 (2): 181-200.
- Carvalho G.S. 1966. Índices de forma de grãos de areia e a morfoscopia das areias das praias do litoral de Angola. *Garcia da Orta* 14: 229-268.
- Costa P.J.M. 2012. Sedimentological signatures of extreme marine inundations. PhD thesis, Lisboa.
- Costa P.J.M., Andrade C., Mahaney W.C., Marques da Silva F., Freire P., Freitas M.C., Janardo C., Oliveira M.A., Silva T., Lopes V. 2013. Aeolian microtextures in silica spheres induced in a wind tunnel experiment: comparison with aeolian quartz. *Geomorphology* 180-181: 120-129.
- Costa P.J.M., Andrade C., Dawson A.G., Mahaney W.C., Paris R., Freitas M.C., Taborda R. 2012a. Microtextural characteristics of quartz grains transported and deposited by tsunamis and storms. *Sedimentary Geology* 275-276: 55-69.
- Costa P.J.M., Andrade C., Freitas M.C., Oliveira M.A., Lopes V., Dawson A.G., Moreno J., Fatela F., Jouanneau J.M. 2012b. A tsunami record in the sedimentary archive of the central Algarve coast, Portugal: characterizing sediment, reconstructing sources and inundation paths. *The Holocene* 22 (8): 899-914.
- Goldstein J., Newbury D., Echlin P., Joy D., Fiori C., Lifshin E. 1981. *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. Plenum Press.
- Krinsley D.H., Doornkamp J.C. 1973. *Atlas of quartz sand surface textures*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Krinsley D., Takahashi T. 1962. The surface textures of sand grains: an application of electron microscopy. *Science* 135: 923-925.
- Krinsley D.H., Pye K., Boggs Jr.S., Tovey N.K. 1998. *Backscattered scanning electron microscopy and image analysis of sediments and sedimentary rocks*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kruskal W.H., Wallis W.A. 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association* 47 (260): 583-621.
- Kuenen P.H. 1959. Transport and sources of marine sediments. *Geol. en. Mijub.* 21: 191-196.

- Mahaney W.C. 2002. Atlas of sand grain surface textures and applications. Oxford University Press, Oxford.
- Mahaney W.C., Stewart A., Kalm V. 2001. Quantification of SEM microtextures useful in environment discrimination. *Boreas* 30: 165-171.
- Porter J. 1962. Electron microscopy of sand surface textures. *Journal of Sedimentary Petrology* 32: 124-135.
- Powers M.C. 1953. A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 23 (2): 117-119.
- Slayter E., Slayter H. 1992. *Light and Electron Microscopy*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Watt I.M. 1985. *The Principles and Practice of Electron Microscopy*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Vos K., Vandenberghe N., Elsen J. 2014. Surface textural analysis of quartz grains by scanning electron microscopy (SEM): From sample preparation to environmental interpretation. *Earth-Science Reviews* 128: 93–104.
- Williams A.T., Wiltshire R. J., Thomas M.C. 1998. Sand grain analysis-image processing, textural algorithms and neural nets. *Computers & Geosciences* 24: 111-118.