

Análise automática da deformação na superfície de Marte

Automatic strain analysis on Mars surface

D. A. VAZ – vaz.david@gmail.com (Universidade de Coimbra, Centro de Geofísica e Università d'Annunzio, International Research School of Planetary Sciences)

M. T. BARATA – mtbarata@gmail.com (Universidade de Coimbra, Centro de Geofísica)

E. IVO ALVES – livo@dct.uc.pt (Universidade de Coimbra, Centro de Geofísica e Departamento de Ciências da Terra)

L. C. G. PEREIRA – gpereira@dct.uc.pt (Universidade de Coimbra, Centro de Geofísica e Departamento de Ciências da Terra)

RESUMO: Apresentam-se neste trabalho duas novas técnicas para cartografar automaticamente as deformações crustais associadas a dois tipos de estruturas tectónicas presentes na superfície de Marte: falhas normais e cristas de enrugamento (*wrinkle ridges*). Estas técnicas permitem a caracterização espacial dos padrões de deformação quer para estruturas compressivas quer distensivas.

PALAVRAS-CHAVE: Análise automática de deformação, tectónica, Marte.

ABSTRACT: *Two new techniques for automatic mapping of crustal strains on Mars surface are presented. The strains related with normal faults and wrinkle ridges are analysed allowing the spatial characterization of the strain patterns associated with compressive and distensive structures.*

KEYWORDS: *Automatic strain analysis, tectonics, Mars.*

1. INTRODUÇÃO

As estruturas tectónicas mais abundantes em Marte são falhas normais e cristas de enrugamento (*wrinkle ridges*). O estudo da tectónica de Marte é normalmente feito através da fotointerpretação das imagens de satélite obtidas pelas várias missões ao planeta. Este processo consiste na cartografia manual das estruturas tectónicas. Esta análise, meramente espacial, dos padrões de fracturação, tem sido muitas vezes complementada com a análise e modelação de perfis topográficos de forma a estimar a deformação tectónica associada a cada estrutura (Hauber e Kronberg, 2001; Colton *et al.*, 2006). O facto de se usarem perfis topográficos faz com que se trate de uma análise 1D pontual dificultando o estudo da distribuição das deformações.

São apresentadas duas novas metodologias que permitem estimar automaticamente a deformação associada aos dois tipos de estruturas tectónicas. O primeiro passo consiste na cartografia automática e classificação dos lineamentos tectónicos na superfície de Marte. Para tal utilizam-se os dados de altimetria laser MOLA (*Mars Orbiter Laser Altimeter*) com uma resolução espacial de ~231m/pixel e um algoritmo que permite a extracção e caracterização morfométrica automáticas de todas as escarpas na superfície do planeta. As linhas obtidas permitiram a construção de uma base de dados espacial que suporta todo o processamento

subsequente, sendo que estas linhas estão perfeitamente georreferenciadas e representam os pontos de curvatura em perfil igual a zero da superfície topográfica (por outras palavras, as linhas que representam as escarpas estão localizadas no ponto de inflexão da curvatura das escarpas) (Alves *et al.*, 2008; Vaz *et al.*, 2008).

Os alinhamentos obtidos foram em seguida classificados de acordo com o seu significado geológico e geomorfológico utilizando as imagens disponíveis para a área em estudo obtidas pelos instrumentos THEMIS, HRSC e CTX (figura 1). Partindo das escarpas identificadas, a deformação é estimada utilizando alguns dos parâmetros morfométricos obtidos a partir do modelo digital de terreno (MDT).

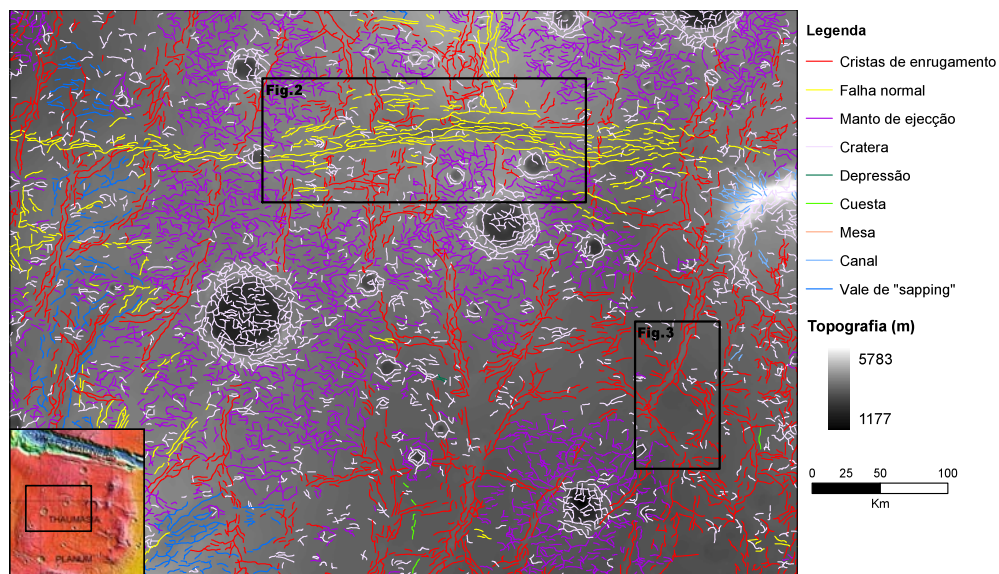


Figura 1 – Lineamentos automaticamente cartografados em Thaumasia Planum correspondentes a escarpas na superfície de Marte. Os lineamentos identificados foram posteriormente classificados de acordo com o seu significado geológico e geomorfológico utilizando as imagens disponíveis da área em estudo.

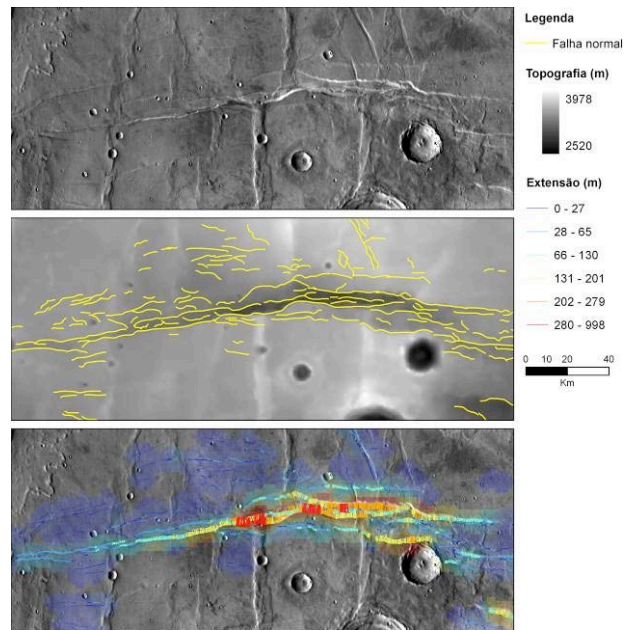
2. ESTRUTURAS DISTENSIVAS – FALHAS NORMAIS

O método usualmente empregue para estimar a extensão associada a falhas normais em Marte, consiste na medição do rejeito vertical das falhas utilizando perfis topográficos perpendiculares às falhas. Assume-se, normalmente, um modelo simples com um plano de falha com pendor (α) constante (60° é o valor normalmente utilizado) e sem componente rotacional ou de desligamento (Hauber e Kronberg, 2001; Spagnuolo *et al.*, 2008). Os mesmos pressupostos são utilizados neste trabalho para estimar automaticamente os valores da extensão associada a cada falha.

Os perfis topográficos são substituídos na nossa análise pelo modelo digital de terreno e a medição do rejeito vertical (d) das escarpas é efectuada recorrendo ao gradiente morfológico multi-escala (Soille, 2002), utilizando-se elementos estruturantes lineares perpendiculares aos planos de falha. Os valores da extensão (D) são obtidos utilizando a expressão $D = d/\tan\alpha$. A direcção de extensão assume-se que é normal ao plano de falha e é calculada a partir do MDT (figura 2).

O método proposto corresponde, no fundo, à "expansão" do método manual 1D para uma análise 2D automatizada, permitindo a visualização e quantificação das variações espaciais da deformação. Os valores de extensão estimados serão inferiores aos reais em casos em que tenha havido deposição de materiais no bloco abatido quer, por exemplo, por acção eólica ou por vulcanismo.

Figura 2 – Do topo para a base: mosaico THEMIS, falhas normais e vectores de extensão. De referir a variação lateral da deformação ao longo deste pequeno rift EW. Os valores mais elevados de extensão encontram-se na parte central do rift, sendo que a deformação nas extremidades se encontra dispersa num maior número de pequenas falhas. A magnitude da extensão nas falhas que pendem para Norte aparenta ser maior o que sugere uma geometria de rift assimétrico.



3. ESTRUTURAS COMPRESSIVAS – CRISTAS DE ENRUGAMENTO

As cristas de enrugamento correspondem provavelmente à expressão superficial de cavalgamentos que, à superfície, se expressam na forma de dobramentos. Não existem evidências directas acerca da geometria deste tipo de estruturas sendo que uma superfície basal de descolamento é geralmente implicada na formação destas estruturas compressivas (Carr, 2006). Estas incertezas na geometria fazem com que o cálculo da deformação tenha sido efectuado recorrendo à estimação da área em excesso devida à deformação (Colton *et al.*, 2006). Esta técnica consiste na análise de perfis topográficos, de forma a estimar a área (em excesso) originada pelo dobramento e o encurtamento associado a cada crista.

Tal como no caso anterior trata-se também de uma análise pontual 1D que não permite o estudo da distribuição espacial da deformação. Este modelo implica que a deformação se processe ao longo de uma superfície basal de descolamento sendo que a profundidade deste descolamento pode também ser calculada (Colton *et al.*, 2006).

A área da secção deformada (A) é obtida através da aplicação de um operador direccionado de chapéu-alto (Soille, 2002). A dimensão do elemento estruturante utilizado é definida de forma a corresponder à máxima largura dos enrugamentos da zona em estudo. Uma máscara obtida a partir dos alinhamentos previamente identificados é aplicada ao integral dos resultados da aplicação do chapéu-alto (esta integração é também feita utilizando um elemento estruturante linear normal às escarpas cartografadas).

O encurtamento horizontal (ΔL) é calculado como a diferença entre o comprimento inicial (medido como a distância curvilínea entre as orlas dos enrugamentos) e o comprimento final (a distância horizontal entre os mesmos pontos). Este parâmetro estará certamente subestimado, uma vez que a alta resolução espacial dos dados altimétricos não permite captar as estruturas menores existentes e que são bem visíveis nas imagens (figura 3). Uma vez que a profundidade do descolamento consiste no quociente $A/\Delta L$ será de esperar que estas profundidades estejam também enviesadas. Os enviesamentos esperados serão apenas função da resolução espacial dos dados, o que por um lado dificulta uma análise em termos absolutos, mas possibilita uma análise relativa comparando as deformações em diferentes zonas (figura 3).

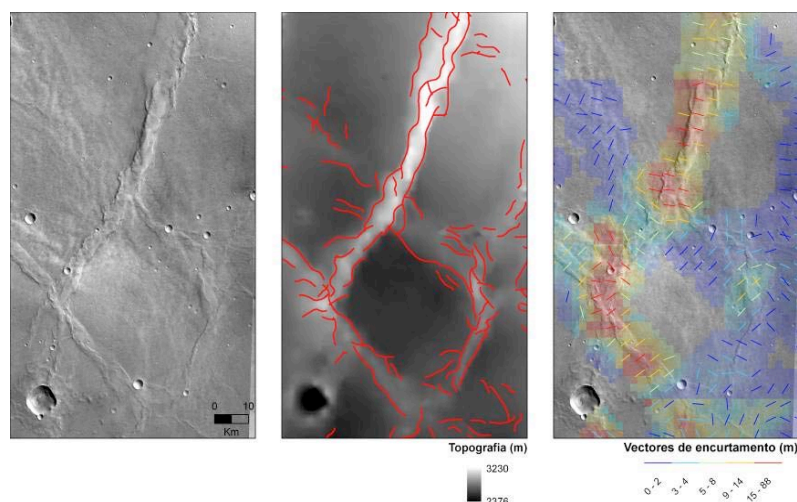


Figura 3 – Da esquerda para a direita: imagem HRSC, escarpas das cristas de enrugamento e vectores de encurtamento. Nesta área dá-se a intersecção de duas famílias de enrugamentos correspondentes a duas fases de deformação distintas (a mais antiga originou alinhamentos com direcção NW-SE e a mais recente e intensa com direcção NNE-SSW) o que se traduz num padrão de interferência claramente visível. De referir a variação de magnitude e de azimute dos vectores de deformação.

3. CONCLUSÃO

As incertezas e a simplicidade dos modelos utilizados, bem como os factores relacionados com a qualidade e resolução dos dados topográficos fazem com que os valores absolutos de deformação obtidos devam ser encarados como meras estimativas. Apesar deste facto as metodologias descritas permitem uma análise relativa automática da distribuição da deformação ao longo das estruturas tectónicas existentes na superfície de Marte.

Estruturas tectónicas compressivas e distensivas apresentando geometria em *echelon* são comuns em Marte evidenciando regimes de cisalhamento simples. As ferramentas descritas assumem apenas um cenário de cisalhamento puro, sendo que uma representação mais realista, das deformações e dos campos de tensões associados, poderá ser facilmente modelada recorrendo à rotação dos vectores de deformação provocada por um cisalhamento simples.

A aplicação destas ferramentas permitirá no futuro uma melhor compreensão da distribuição da deformação em Marte.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito da bolsa com referência SFRH/BD/22641/2005, aprovado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

Referências

- Alves, E.I., Barata, M.T., Vaz, D.A., Pereira, L.C.G., Baptista, A.R. and Chorro, M.J. (2008) – *Martian Tectonics, Water and Life*. In *Planet Mars Research Focus*. L. A. Costas (ed.), Nova Science Publishers.
- Carr, M. H. (2006) – *The surface of Mars*. New York, Cambridge University Press.
- Colton, S. L., Smart, K. J. and Ferrill, D. A. (2006) – Wrinkle ridge detachment depth and undetected shortening at Solis Planum, Mars. *Lunar and Planet. Sci. Conf. XXXVII*, Houston, abstract 1729.
- Hauber, E. and Kronberg, P. (2001) – Tempe Fossae, Mars: A planetary analogon to a terrestrial continental rift? *J. Geophys. Res.* 106(E9), pp. 20587-20602.
- Soille, P. (2002) – *Morphological Image Analysis - Principles and Applications*, 2nd Edition. Berlin, Springer-Verlag.
- Spagnuolo, M.G., Figueredo, P.H. and Ramos, V.A. (2008) – Reinterpretation of Tractus Fossae region as an asymmetric rift system on Mars. *Icarus* 198(2), pp. 318-330.
- Vaz, D.A., Di Achille, G., Barata, M.T. and Alves, E.I. (2008) – Manual and automatic lineament mapping: comparing results. *Lunar and Planet. Sci. Conf. XXXIX*, Houston, abstract 1058.