



## Efeitos Magnéticos de Descargas Elétricas em Marte

Melissa de Andrade Nunes<sup>1</sup>, Instituto de Física - USP

Ricardo Ivan Ferreira da Trindade<sup>2</sup>, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - USP

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 4 a 6 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX SimBGF, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

### Resumo

O campo magnético de Marte não possui componentes nucleares, todavia, muitas de suas anomalias magnéticas, sem padrão dipolar, estão espalhadas principalmente no hemisfério sul do planeta com valores de magnetização crustal que são cerca de 100 vezes mais intensos do que os observados na Terra. A distribuição das anomalias magnéticas marcianas podem ser explicadas através de diversos fenômenos que podem ter ocorrido após o cessar de um dinamo interno (e.g.: impactos de meteoritos, hidrotermalismo, sismicidade e tectonismo), porém, esses mecanismos dificilmente explicariam suas intensidades. Esse trabalho tem como objetivo reintroduzir as descargas elétricas como um poderoso mecanismo de magnetização e discutir a possibilidade deste processo ser responsável pelas anomalias magnéticas mais intensas observadas na superfície de Marte.

### Introdução

Marte não possui um campo magneto-hidrodinâmico, porém, a partir dos dados da Missão *Mars Global Surveyor*, Voorhies et al. (2002) utilizaram a análise do potencial magnético pelo método dos harmônicos esféricos e estimaram que as fontes magnéticas marcianas estariam restritas aos primeiros 46 km de profundidade crustais, e seriam cerca de 100 vezes mais intensas que as fontes magnéticas crustais terrestres (Rochette et al., 2006). Uma forma eficaz de se magnetizar grãos e rochas com componentes ferromagnéticos é aumentando suas taxas de remanência (REM), que compara a Magnetização Remanente Natural (MRN) com a Magnetização Remanente Isotermal de Saturação (MRIs), através de pulsos magnéticos gerados por descargas elétricas (Salminen et al., 2013). Apesar de descargas elétricas nunca terem sido detectadas na atmosfera marciana, há evidência indireta de atividade elétrica devido à abundância de peróxido de oxigênio no solo (Atreya et al., 2006) e pela possibilidade de existir atividade elétrica por mecanismo triboelétrico dentro de redemoinhos e tempestades de poeira (Farrell et al., 1999; Delory et al., 2006).

Esse trabalho tem como objetivo descrever uma hipótese que explique como a atividade elétrica seria responsável pelas anomalias magnéticas de maior módulo observadas em Marte, utilizando modelos analíticos para estimar a

massa de grãos magnetizados em diferentes cenários, utilizando parâmetros teóricos e experimentais, sendo que os últimos devem ser obtidos ao submeter rochas pulverizadas, análogas às marcianas, às descargas elétricas, e, por fim, deve-se utilizar métodos de inversão para obter os valores de correntes elétricas plausíveis para sustentar essa hipótese.

### Tempestades e redemoinhos de poeira em Marte

Apesar de descargas elétricas nunca terem sido detectadas pelas missões espaciais em Marte, espera-se que elas existam em território marciano, pois são muito observadas em condições atmosféricas similares em regiões desérticas terrestres (Farrell et al., 1999; Aplin, 2006), também por causa da evidência direta da eletrificação de grãos de poeira que interagiram com a *Rover Sojourner* da missão espacial *Pathfinder* (Farrell et al., 1999), além da possibilidade de que o Peróxido de Hidrogênio ( $H_2O_2$ ), encontrado no solo marciano pela Missão *Viking*, tenha sido formado em processos eletroquímicos, como em clarões com emissões de radiação ultravioleta (Atreya et al., 2006). Diferentemente da Terra, os possíveis principais mecanismos de eletricidade atmosférica em Marte não devem estar relacionados à formação de hidrometeoros e suas colisões, mas há mecanismos similares de segregação de cargas em suas tempestades e redemoinhos de poeira (Farrell et al., 1999; Delory et al., 2006; Yair, 2012). A atmosfera de Marte possui muitas partículas de poeira vindas do solo, fenômeno que ocorre principalmente pelo processo eólico de suspensão, que similarmente ao mecanismo de saltação, remove grãos da superfície em trajetórias balísticas. No caso da suspensão, a turbulência vertical dos ventos interfere no movimento, carregando as partículas para maiores altitudes (White, 1979); os ventos marcianos podem admitir velocidades de  $230 \frac{m}{s}$ , sendo necessários  $30 \frac{m}{s}$  para soerguer os grãos do solo (Melnik & Parrot, 1998). Por não ter um campo magnético nuclear, espera-se que a atmosfera de Marte tenha uma maior interação iônica com raios cósmicos do que a terrestre (Aplin, 2006). Pequenas manifestações de tempestades de poeira, como em forma de redemoinhos, são ainda mais comuns (Delory et al., 2006). As partículas em saltação são capturadas pela vorticidade de redemoinhos, as colisões que ocorrem são importantes para estratificação das cargas em um mecanismo de triboeletrificação; grãos maiores tendem a permanecer positivamente carregados, já os grãos menores ficam negativamente carregados e soerguidos em maiores alturas (Delory et al., 2006), as partículas na parte superior do redemoinho possuem seções de choque que variam de 0,01 a  $0,1 \mu m$ , mas as que se

encontram na parte inferior variam de 0,1 a  $1\mu\text{m}$  (Farrell et al., 1999). A segregação de cargas é responsável pela diferença de potencial dentro do mecanismo, que para se neutralizar, descarrega em forma de raio. Como em Marte a pressão atmosférica é inferior à terrestre, estima-se que campos eletrostáticos de  $2 - 300 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$  são necessários para iniciar o processo de colapso elétrico (Farrell et al., 1999). Redemoinhos marcianos podem ter diâmetros que variam de 6 km até poucas dezenas de quilômetros, que, se similares com os terrestres, devem ter densidade de carga da ordem de  $10^6 \frac{\text{elétrons}}{\text{cm}^3}$ , com ventos similares aos de tempestades de raios, até 5 vezes mais rápidos que os encontrados em seu exterior, com vorticidades importantes para misturar e eletrificar as partículas, núcleos mais aquecidos que as regiões mais externas e uma concentração média de 10 partículas em um  $\text{cm}^3$  (Farrell et al., 1999). As tempestades de poeira de Marte podem crescer ao redor de núcleos de 500km de diâmetro, formadas entre 5 e 10 dias, e então se estender de modo a cobrir o planeta a alturas que estima-se que podem chegar até 40 – 50km em relação à superfície durante períodos que duram de 50 a 100 dias (Melnik & Parrot, 1998; Farrell et al., 1999). Como essas tempestades são locais na maior parte do tempo, Marte pode não conseguir sustentar um circuito elétrico global como há na Terra, e quando núcleos de tempestades menores com polaridades distintas se encontram, são capazes de se neutralizar mutuamente (Farrell et al., 1999). Os grãos observados por Toon et al. (1977) nas tempestades possuíam dimensões de alguns micrometros, variando de 1 até  $10\mu\text{m}$  em mistura aproximadamente uniforme das diferentes partículas, com densidade sugerida por Melnik & Parrot (1998) de  $5 \times 10^6 \frac{\text{grãos}}{\text{m}^3}$ . Toon et al. (1977) estimaram que aquelas com  $\approx 1\mu\text{m}$ , sob pressão atmosférica de 5mb, demorariam cerca de 50 dias para retornar ao solo, 10 vezes o tempo necessário para uma partícula de  $10\mu\text{m}$  chegar ao solo, ambas inseridas em tempestades de poeira, que segundo Yair (2012), dominam regiões em Marte que variam de 100 até  $1,6 \times 10^6 \text{ km}^2$ . A missão espacial *Mars Global Surveyor* (MGS) (NASA Planetary Data System, 2002) foi capaz de detectar, em um intervalo de 9 meses, 783 tempestades de poeira, que ocorrem principalmente nas regiões polares e latitudes médias, mas também nas regiões mais elevadas do hemisfério norte (Yair, 2012), cobrindo os vulcões da região com poeira (Ehlmann & Edwards, 2014).

Na Terra, descargas elétricas também estão associadas a emissão de radiação, pela variação temporal de momento de dipolo elétrico ( $\frac{dM}{dt}$ ) no interior das estruturas atmosféricas. No caso de raios nuvem-terra, as correntes elétricas se dão em pulsos, como exposto na Equação 1, em que  $\alpha < \beta \approx 10^5 \text{ s}^{-1}$ . Essas correntes atingem máximos em aproximadamente 6 –  $10\mu\text{s}$ , e decaem durante cerca de 100s (Farrell et al., 1999).

$$I(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}). \quad (1)$$

Contudo, a eficiência dos processos elétricos que podem se manifestar em descargas elétricas ou clarões, dependem da eficiência dos processos segregativos

em meio à convecção das tempestades, no caso de redemoinhos, o processo triboelétrico, e também de fatores atmosféricos como pressão e condutividade, que é preferencialmente positiva pela presença abundante de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) em Marte (Aplin, 2006).

### Modelos Implementados

Com base nos parâmetros avaliados relativos às tempestades e redemoinhos de poeira, dois modelos de magnetização foram implementados. O primeiro foi utilizado para comparar a magnetização remanente induzida em grãos de diferentes minerais ferromagnéticos encontrados em Marte e nos meteoritos Shergottitos-Nakhlitos-Chassignitos (SNC): magnetita, hematita e pirrotita (Rochette et al., 2006; Nie et al., 2020; Rochette et al., 2001) (Figuras 1 e 2). O segundo foi utilizado para simular a magnetização de uma poeira inhomogênea, apenas com 5% de sua composição ferromagnética (Figura 3), para estimar a massa que seria magnetizada, sob tais condições, em um intervalo de tempo de 0,5 Ma.

Para ambos os casos a Lei de Àmpere (Equação 2) foi implementada para estimar a magnetização dos minerais a partir da Equação 3, e comparar o comportamento magnético dos diferentes minerais até uma magnetização com limite estabelecido de  $1000 \frac{\text{A}}{\text{m}}$ .

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi r} \hat{r} \quad (2)$$

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (3)$$

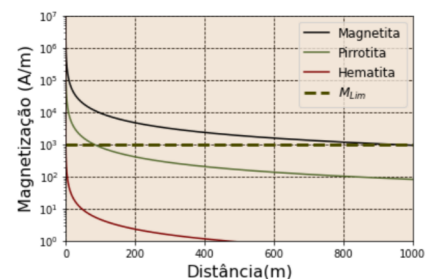


Figura 1 – Comparação entre curvas de magnetização de magnetita, pirrotita e hematita por uma descarga elétrica de 300 kA ao longo da distância de propagação de seu campo magnético gerado.

### Modelo dissipativo

Uma simulação considerando a dissipação energética dos campos magnéticos ao passarem pelos grãos ferromagnéticos também foi investigada a partir da Equação 4 (Jiles & Atherton, 1984), onde  $\mu$  é o momento de dipolo magnético,  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética no vácuo,  $B$  é o campo magnético,  $n$  é o número de domínios magnéticos dentro do grão,  $A$  é a área entre domínios,  $\theta$  é o ângulo inicial entre o domínio magnético e a direção do campo magnético, e  $x$  é a distância de rotação do domínio:

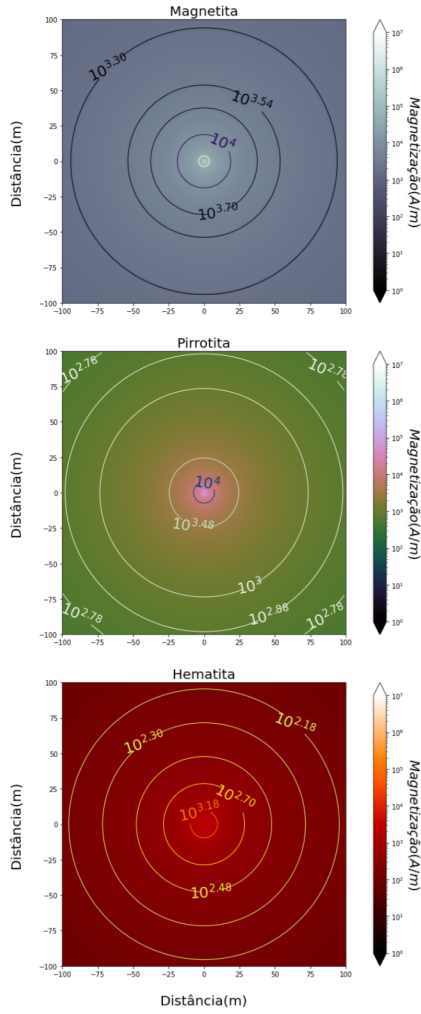


Figura 2 – Mapas de magnetização de grãos ferromagnéticos por raios como função da distância de propagação dos campos magnéticos.

$$E_{dis} = \int_0^x \frac{n\vec{\mu} \cdot \mu_0}{2} (\vec{H} + \alpha \vec{M})(1 - \cos\theta) Adx. \quad (4)$$

O valor do parâmetro de campo molecular  $\alpha$  atribuído, 0,0033 para a magnetita, foi determinado por Jiles & Atherton (1984). A partir da Equação 4, foi possível comparar a magnetização dos grãos considerando e não considerando os efeitos dissipativos (Figura 4).

A partir das Equações 2, 3 e 5 estimou-se a massa magnetizada de um elemento infinitesimal de poeira, para possibilitar a comparação entre a magnetização de cada um dos três minerais avaliados, e generalizando o resultado para o volume de cilindros de 9 km de altura, com diâmetro estabelecido até o ponto de magnetização limite de  $1000 \frac{A}{m}$ . Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 1.

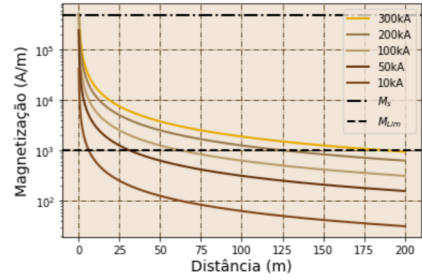


Figura 3 – Magnetização considerando uma poeira composta por 5% de magnetita e diferentes valores de corrente elétrica de raios.  $M_S$  é a magnetização de saturação da magnetita e  $M_{lim}$  denota a magnetismo de  $1000 \frac{A}{m}$ .

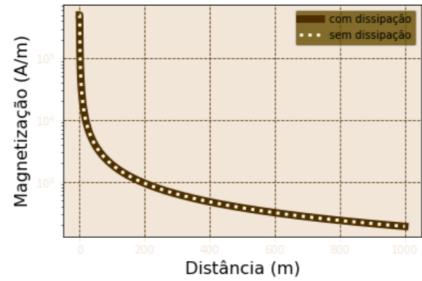


Figura 4 – Magnetização de grãos de magnetita por uma descarga elétrica de 300 kA com e sem dissipação energética.

$$M_{TOTAL} = m \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^H dz. \quad (5)$$

Para um raio com corrente elétrica de 300 kA a massa magnetizada de magnetita foi de  $5,88 \times 10^{-2} \text{ kg}$ ,  $4,69 \times 10^{-3} \text{ kg}$  de pirrotita e  $8,81 \times 10^{-4} \text{ kg}$  de hematita.

### Estimativa de massa global

Utilizando o modelo inhomogêneo, com composição ferromagnética de 5% de magnetita e os dados do *Lightning Imaging Sensor Optical Transient Detector* (LIS-OTD) de taxa de raios sobre os desertos do Saara, Gobi e Patagônia, uma estimativa de massa de grãos magnetizados remanentemente foi feita (Equação 6) para um planeta hipotético com mesmo raio que Marte ( $\approx 3389,5 \text{ km}$ ), durante 0,5 Ma em regiões entre  $45^\circ - 90^\circ N$  and  $45^\circ - 90^\circ S$ , já que as tempestades de poeira marciana ocorrem preferencialmente em médias e altas latitudes (Yair, 2012).

$$M_{PI} = M \times \bar{N} \times \Delta t \times 4\pi R_{PI}^2 \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{3\pi}{4}} \sin\Phi d\Phi, \quad (6)$$

em que  $\Delta t$  é o intervalo de tempo,  $N$  é o número de descargas elétricas por  $\text{km}^2$  em um ano,  $R$  é o raio

Parâmetros	Descrição	Valor
$\sigma$	seção reta dos grãos	$6,3\mu(m)$
$\delta$	espaçamento entre grãos	$0,005(m)$
$\chi_M$	susceptibilidade magnética da magnetita	3,94
$\chi_P$	susceptibilidade magnética da pirrotita	1,54
$\chi_H$	susceptibilidade magnética da hematita	0,30
$\rho_M$	densidade da magnetita	$5200(\frac{kg}{m^3})$
$\rho_P$	densidade da pirrotita	$4500(\frac{kg}{m^3})$
$\rho_H$	densidade da hematita	$5200(\frac{kg}{m^3})$
$H$	extensão da descarga elétrica	$9000(m)$

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para estimar a massa de poeira ferromagnética magnetizada por descargas elétricas.

do planeta,  $M$  é a massa magnetizada por uma única descarga e  $\Phi$  é a latitude do planeta.

Para um raio de  $300\text{ kA}$  a massa total magnetizada até  $1000\frac{A}{m}$  foi  $3461 \pm 170\text{ kg}$ , usando os dados do Saara,  $7888 \pm 394\text{ kg}$  com os dados de Gobi e  $7588 \pm 754\text{ kg}$  para o Deserto da Patagônia.

### Conclusões

Para o primeiro modelo, avaliando o magnetismo remanente em uma poeira ferromagnética homogênea, calculou-se que descargas elétricas de  $300\text{ kA}$  são capazes de magnetizar 12,53 vezes mais magnetita que pirrotita, e 66,7 vezes mais magnetita que hematita até  $1000\frac{A}{m}$ . A estimativa de massa, utilizando o modelo inhomogêneo, obteve que descargas elétricas com no máximo valor de  $300\text{ kA}$  não magnetizariam muito mais que  $8000\text{ kg}$  de grãos ferromagnéticos em tempestades e redemoinhos de poeira em um intervalo de  $0,5\text{ Ma}$  até  $1000\frac{A}{m}$ .

Considerando efeitos de dissipação energética de campos magnéticos quando estes interagem com domínios magnéticos de cada grão, encontramos que a dissipação pode ser negligenciada, então o parâmetro  $\alpha$  pode ser reavaliado experimentalmente para as condições do problema estudado, através das curvas de histerese dos minerais de interesse. Novas simulações devem ser efetuadas, utilizando parâmetros definidos experimentalmente ao submeter rochas similares às marcianas às descargas elétricas e o modelo deve ser invertido com o propósito de determinar o módulo das correntes elétricas que podem ser associadas às anomalias magnéticas de maior intensidade.

### Agradecimentos

Melissa de Andrade Nunes tem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) como financiador e gostaria de agradecer aos pesquisadores Prof. Dr. Carlos Morales e Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Rachel Albredt, do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG), por seus conselhos.

### Referências

- Aplin, K., 2006. Atmospheric electrification in the solar system, *Surveys in Geophysics*, vol. 27: 63:108.
- Atreya, S. K., Wong, A., Renno, N. & Farrell, W. M. and Delory, G.T. and Sentman, D.D. and Cummer, S.A. and Marshall, J.R. and Rafkin, S.C.R. and Catling, D.C., 2006. *Astrobiology*, vol. 6: 439:450.
- Delory, G., Farrell, W., Atreya, S. & Renno, N.O., Wong, A., Cummer, S.A., Sentman, D.D., Marshall, J.R., Rafkin, S.C.R., Catling, D.C., 2006. *Astrobiology*, vol. 6(3): 451:462.
- Ehlmann, B. & Edwards, C., 2014. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 42: 291:315.
- Farrell, W. M. et al., 1999. Detecting electrical activity from martian dust storms, *Journal of Geophysical Research: Planets*, vol. 104: 3795:3801.
- Jiles, D. C. & Atherton, D., 1984. Theory of ferromagnetic hysteresis (invited), *Journal of Applied Physics*, vol. 55: 2115:2120.
- Melnik, O. & Parrot, M., 1998. Electrostatic discharge in martian dust storms, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 103(A12): 29107:29117.
- NASA Planetary Data System, 2002. Mars global surveyor mapping mag level 1 data, doi: <https://doi.org/10.17189/1519752>.
- Nie, N. et al., 2020. Iron isotopic and chemical tracing of basalt alteration and hematite spherule formation in hawaii: A prospective study for mars, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 544: 116385.
- Rochette, P., Gattacceca, J., Chevrier, V. & Mathé, P.E., Menvielle, M., 2006. *Astrobiology*, vol. 6: 423:436.
- Rochette, P., Lorand, J., G., F. & SautterV., 2001. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 190: 1:12.
- Salminen, J., Pesonen, L. J. & Lahti, K., K. and Kannus, 2013. *Geophysical Journal International*, vol. 195: 117:129.
- Toon, O. B., Pollack, J. & Sagan, C., 1977. Physical properties of the particles composing the martian dust storm of 1971–1972, *Icarus*, vol. 30(4): 663:696.
- Voorhies, C. V., Sabaka, T. J. & Purucker, M., 2002. On magnetic spectra of earth and mars, *Journal of Geophysical Research: Planets*, vol. 107: 1:10.
- White, B. R., 1979. soil transport by winds on mars, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 84: 4643:4651.
- Yair, Y., 2012. *Advances in Spacial Research*, vol. 50: 293:310.