



Caracterização das Microfeições de Ablação Atmosférica Presentes na Crosta de Fusão do Meteorito Campos Sales através de Imagens de MEV e Análises de EDS

Ricardo GAZILLO NETO¹

RESUMO: A crosta de fusão do meteorito Campos Sales apresenta-se bem preservada devido a este meteorito representar uma queda. Desta forma, sua crosta preservou microestruturas, de ablação térmica atmosférica, geradas durante a fase de bólido do meteorito. Pelo menos cinco feições microscópicas de caráter morfológico e composicional foram caracterizadas por imagens de microscópio eletrônico de varredura (MEV) e as de caráter composicional foram também analisadas quimicamente por EDS - espectroscopia por energia dispersiva de raios-x. As microfeições de caráter morfológico são fraturas de contração, texturas reliquias de possíveis côndrulos e grãos de Fe-Ni metálico, vesículas de material volatilizado e padrões lineares indicando direção de fluxo aerodinâmico. As feições microscópicas de caráter composicional são manchas de magnetita/wüstita secundárias, identificadas pelas análises de EDS.

Palavra-chave: Crosta de Fusão, Ablação Atmosférica, Microfeições.

ABSTRACT: *The fusion crust of the Campos Sales meteorite is well preserved because this is a witnessed fall meteorite. Thus, its fusion crust preserved microstructures of thermal atmospheric ablation generated during the meteorite's stage of bolide. At least five microscopic features of morphologic and compositional character were characterized by scanning electron microscope (SEM) images and the compositional features were also chemically analyzed by EDS – energy dispersive x-ray spectroscopy. The microfeatures of morphologic character are contraction cracks, relict textures of possible chondrules and metallic Fe-Ni flakes, vesicles of volatilized material, and linear patterns indicating aerodynamic flow direction. The microscopic features of compositional character are patches of magnetite/wüstite, identified by the EDS analyses.*

Keywords: *Fusion Crust, Atmospheric Ablation, Microfeatures.*

¹ Programa de Pós-graduação em Geologia - Universidade Federal do Ceará

1. INTRODUÇÃO

Os meteoritos rochosos possuem, em sua grande maioria, crosta de fusão. Estas crostas são resultado do aquecimento do meteoróide por ablação atmosférica durante a sua fase de meteoro e bólido (Thaisen & Taylor, 2009; Cepelcha et al., 1998). A ablação atmosférica é o processo de aquecimento por fricção com o ar atmosférico e consequente retirada de material do meteoróide gerando feições de fluxo e produzindo uma crosta de fusão nos fragmentos de meteorito resultantes (Bronshen, 1983; Baldwin & Sheaffer, 1971; Bhandari et al., 1980; Lovering et al., 1960). O material incandescente do meteoróide se funde a uma temperatura de pelo menos 2000°C onde os silicatos são transformados em uma massa vítrea e quente e desta forma podem fluir de forma aerodinâmica e gerar feições de fluxo que podem preservar-se na crosta de fusão. Também outros processos ocorrerão com as fases minerais metálicas do meteorito. A troilita é um mineral acessório muito comum nos meteoritos (Blander, 1971), esta é facilmente volatilizada nas condições de ablação atmosférica e desta forma pode deixar vesículas na crosta de fusão ou mesmo formar cavidades de grandes dimensões em fragmentos grandes de meteorito. O ferro-níquel metálico reage com o oxigênio atmosférico em condições anidras e converte-se em magnetita/wüstita que se torna um mineral secundário predominante na maioria das crostas de fusão dos meteoritos (Horstmann et al., 2013; Vondrak et al., 2008). Neste presente artigo, pelo menos cinco feições foram observadas e descritas na crosta de fusão do meteorito Campos Sales, sendo todas estas de dimensões microscópicas e foram observadas pelas técnicas de microscopia

eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O equipamento utilizado é um Microscópio Eletrônico de Varredura marca Hitachi Modelo TM 3000, a aceleração do feixe de elétrons utilizada foi de 15 kV com uma distância de trabalho de aproximadamente 10 mm. A amostra utilizada foi um fragmento de 3 g de massa do meteorito condrítico Campo Sales. O fragmento analisado estava 98% coberto com uma crosta de fusão escura e fosca apresentando algumas fraturas de contração térmica visíveis a olho nu. Foram feitas imagens compostas de elétrons secundários e retroespalhados, para a visualização da topografia das feições existentes na crosta de fusão do meteorito e a resultante das imagens de elétrons retroespalhados, para observar a distinção das fases minerais presentes, principalmente para diferenciar as fases com maior contraste de número atômico médio que indicam os minerais opacos do meteorito. Microanálises químicas por Energia Dispersiva de Raios X (EDS) foram realizadas em algumas fases minerais e vítreas, principalmente nos minerais metálicos através do equipamento de EDS modelo SWIFT ED 3000 da Oxford Instruments. Os equipamentos utilizados estão alocados no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará.

3. A CROSTA DE FUSÃO DO METEORITO CAMPOS SALES

A crosta de fusão do meteorito Campos Sales tem cor preta fosca e diversas microestruturas foram identificadas na crosta de fusão de um fragmento do meteorito com massa

aproximada de 3 g. O meteorito é classificado como um condrito ordinário grupo L5 (Scorzelli *et al.*, 1998). Devido a este meteorito ser uma queda, sua crosta de fusão está bem preservada, ou seja, está fresca e, portanto, preserva as estruturas produzidas no momento da entrada na atmosfera sofrendo ablação térmica. A crosta de fusão é uma capa de aproximadamente 0,25 mm de espessura formada quando o meteorito é aquecido e sua região mais externa se funde e forma uma crosta de vidro e fases minerais secundárias em volta do meteorito quando este é submetido à ablação na fase de bólido (Gence & Grady, 1999). A crosta, portanto, apresenta a mesma composição química do meteorito. Várias feições foram identificadas com auxílio do microscópio eletrônico de varredura.

4. MICROFEIÇÕES DE ABLAÇÃO ATMOSFÉRICA IDENTIFICADAS NA CROSTA DE FUSÃO

Foram identificados cinco tipos de feições microscópicas de ablação atmosférica na crosta de fusão do meteorito Campos Sales, a saber, quatro feições de caráter textural ou morfológico e uma feição de caráter composicional.

4.1. Fraturas de Contração Térmica (Contraction Cracks)

São fraturas geradas na crosta de fusão devido à diferença de temperatura entre o meteorito e a temperatura elevada do ar atmosférico no momento do atrito e ablação podendo chegar a temperaturas da ordem de 2000°C (Beauford *et al.*, 2012). O meteoróide estava no vácuo frio do espaço a uma temperatura próxima de -270°C e ao entrar na atmosfera ocorre uma drástica mudança de condições termodinâmicas gerando fraturas de contração na crosta de fusão resultante e é essa diferença térmica que também

gera a explosão do bólido antes de ele entrar em queda livre (Sears, 1975). Muitas destas fraturas primárias de contração térmica foram observadas nas imagens de elétrons secundários na crosta de fusão do meteorito (Figura 1). Observam-se padrões de tendência poligonal representando resfriamento rápido no momento do término da ablação atmosférica.

4.2. Côndrulos/Flocos de Fe-Ni Reliquiaries

Foram identificados alguns côndrulos que sobreviveram à ablação e passam a se destacar na crosta de fusão, normalmente são côndrulos contendo Fe-Ni que é uma fase mineral resistente à fusão por ablação atmosférica (Thaisen & Taylor, 2009). Estes se apresentam preservando o seu formato arredondado, destacando-se como relevos positivos em forma de domos na imagem de elétrons secundários (Figura 2). A imagem de elétrons retroespalhados e as análises de EDS confirmam sua composição de ferro-níquel metálico e resíduos de troilita nestas estruturas arredondadas também foram identificados pela presença de um percentual de 9 wt% a 11 wt% de enxofre verificado no EDS (Tabela 1). Também os picos no espectro de EDS mostram a presença do elemento enxofre nestas fases secundárias de ablação (Figura 3). Estas estruturas arredondadas podem também ser flocos de Fe-Ni e troilita que adquiriram formato arredondado devido a terem fundido e gerado estas formas aerodinâmicas durante a fase de bólido do meteorito, não constituindo, portanto, um côndrulo reliquiar verdadeiro.

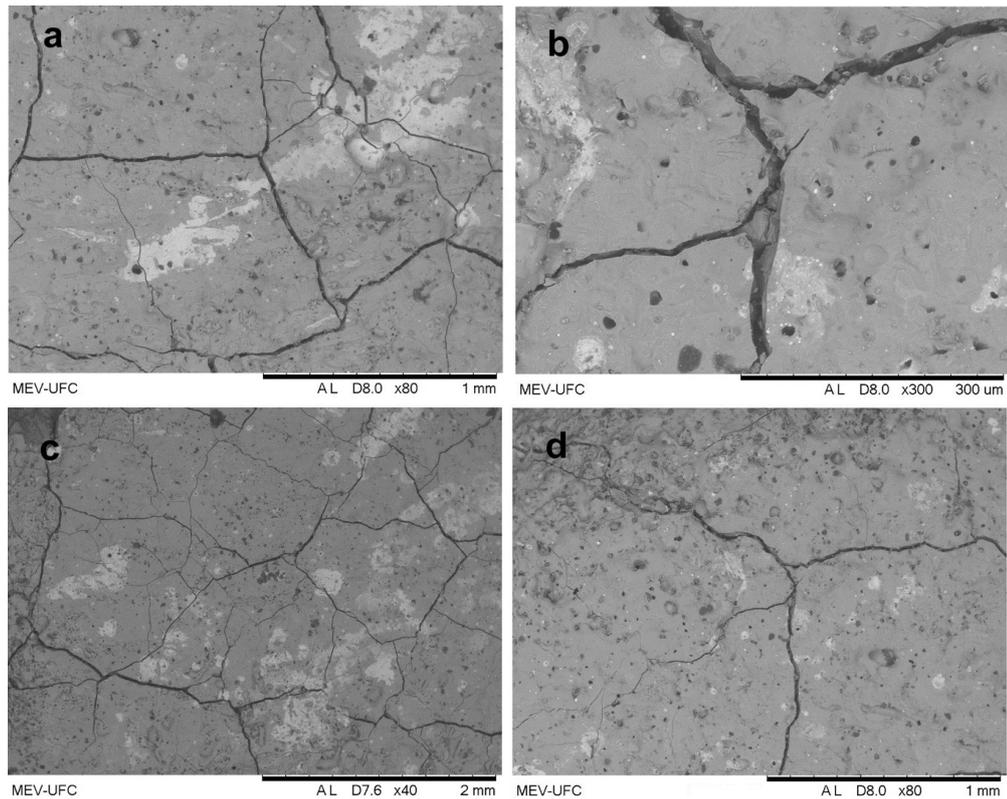


Figura 1: Fraturas de Contração, imagens compostas ao MEV; a – padrão de fraturamento com uma geometria de tendência poligonal, indicando rápido resfriamento da crosta de fusão; b – uma fratura ampliada mostrando algumas vesículas na crosta e os minerais subjacentes do meteorito entre as fraturas podem ser visualizados; c – visão geral das fraturas, mostrando várias manchas de magnetita; d – topografia rugosa numa situação em que ocorrem mais fraturas.

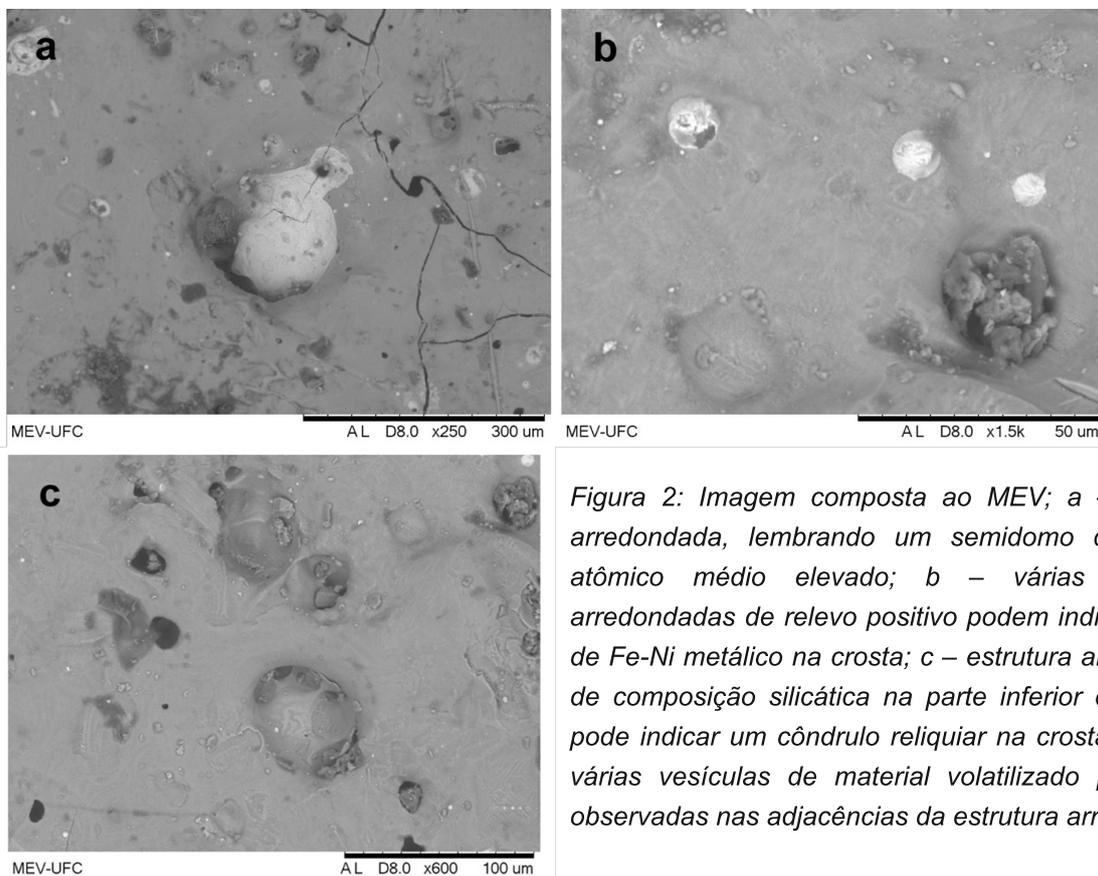


Figura 2: Imagem composta ao MEV; a – estrutura arredondada, lembrando um semidomo de número atômico médio elevado; b – várias estruturas arredondadas de relevo positivo podem indicar restitos de Fe-Ni metálico na crosta; c – estrutura arredondada de composição silicática na parte inferior da imagem pode indicar um côndrulo reliquiar na crosta de fusão, várias vesículas de material volatilizado podem ser observadas nas adjacências da estrutura arredondada.

Tabela 1: Análise química por EDS das fases de maior número atômico médio na crosta de fusão do meteorito Campos Sales. Esta análise representa uma mistura de óxidos de ferro e níquel e porções de troilita e silicato ferromagnésiano devido ao magnésio, enxofre, silício e alumínio em menores quantidades.

Element	Weight %	Atomic %	Compound %	Formula
Magnesium	3.166	3.668	5.250	MgO
Aluminum	0.785	0.820	1.483	Al ₂ O ₃
Silicon	3.547	3.557	7.588	SiO ₂
Sulfur	9.233	8.111	23.053	SO ₃
Iron	7.113	3.588	9.150	FeO
Nickel	42.024	20.162	53.476	NiO
Oxygen	34.133	60.094		

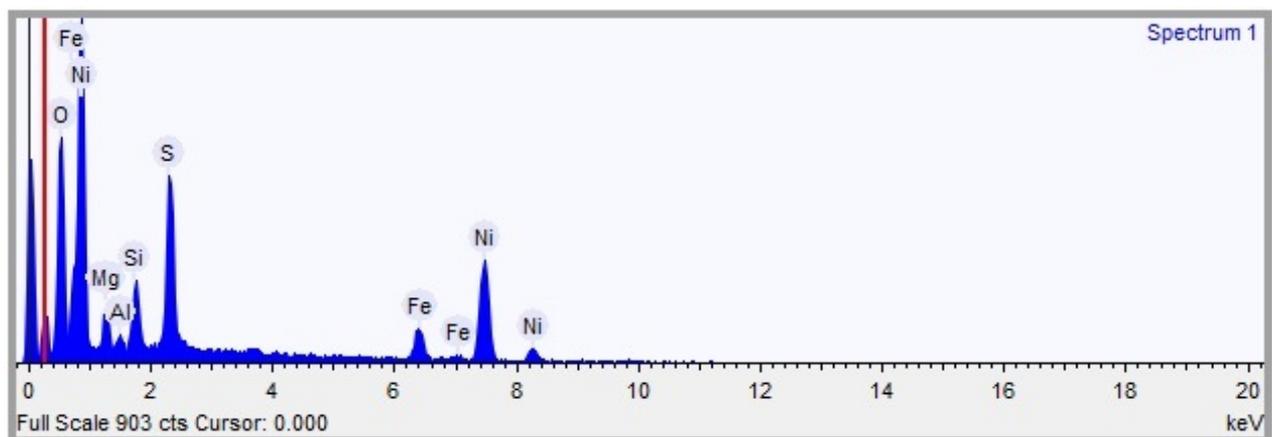


Figura 3: Espectro de EDS de uma das estruturas arredondadas da Figura 2b, mostrando um teor elevado em enxofre, indicando ser esta estrutura um grão de troilita reliquiar.

4.3. Cavidades/Vesículas de Ablação Atmosférica

São cavidades ou vesículas na crosta de fusão geradas pela evaporação de minerais menos resistentes à ablação atmosférica. Minerais acessórios como a troilita são muito susceptíveis à volatilização e deixam vesículas em seu lugar (Figura 4), situação semelhante é muito comum em vários tipos de meteoritos ricos em troilita, por exemplo, nos meteoritos metálicos Mundrabilla e Gibeon (Figura 5), da Austrália e África respectivamente, onde estes possuem muitos nódulos de troilita e muitos fragmentos destes meteoritos apresentam vesículas de dimensões de até dezenas

de centímetros, vazios deixados pela ablação e completa vaporização da troilita, cohenita, grafita e schreibersita presentes nestes meteoritos durante sua fase de bóldo incandescente (Buchwald, 1970). A presença de troilita volatilizada no Campos Sales está evidente nas análises de EDS feitas nas texturas reliquiares com maior contraste de número atômico verificadas nas imagens de elétrons retroespalhados.

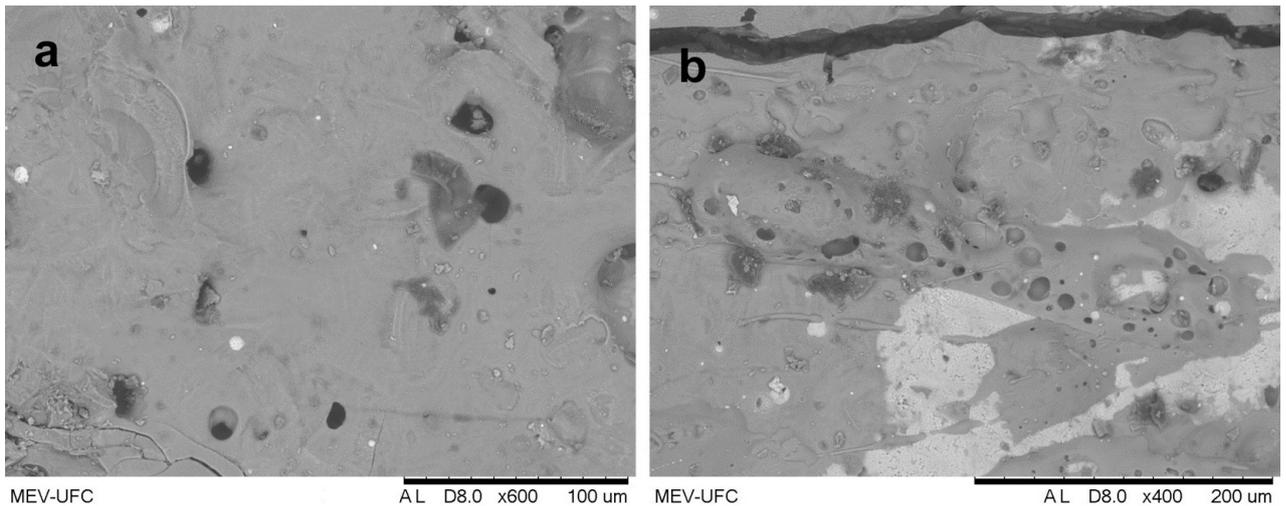


Figura 4: Imagens ao MEV composta de vesículas de bolhas de escape de material volatilizado na ablação atmosférica; a – várias destas cavidades estão dispostas na imagem evidenciando a saída de material por ablação atmosférica; b – nódulo de composição silicática com a forma de haltere pode ser distinguido na topografia. Este nódulo provavelmente é vítreo e está repleto de vesículas de escape de fases voláteis. Observar manchas de magnetita na porção inferior direita da imagem.



Figura 5. Situação macroscópica dos efeitos da ablação atmosférica nos meteoritos durante a sua fase de bólido incandescente; a – Fragmento do meteorito metálico Mundrabilla mostrando um grande vazio de escape de fases minerais volatilizadas, provavelmente troilita junto de fases voláteis mais raras como grafita, cohenita e schreibersita; b – Grande fragmento do meteorito metálico Gibeon, mostrando uma grande vesícula ou vazio de escape de material volatilizado, provavelmente o vazio era ocupado por um grande nódulo de troilita. A barra vermelha de escala tem aproximadamente 5 cm de comprimento. Fontes: Mundrabilla: <https://upload.wikimedia.org/wikiversity/en/c/c7/Lrg-1502-mundrabilla-meteorites-with-natural-hole-photographs.jpg>; Gibeon: <https://images.justcollecting.com/large/M1659/PIC1000505850/QKSGEUORKS.JPG>

Em casos mais raros têm-se gases nobres implantados no regolito de asteroides e corpos diferenciados do Sistema Solar, além de gases nobres gerados pela interação das partículas minerais do regolito com raios cósmicos, como o hélio-3, que ficam presos nas porções mais superficiais do meteoróide e ao sofrer aquecimento na entrada atmosférica o hélio-3 é liberado e deixa vesículas no lugar, essa última situação é mais comum na crosta de fusão de meteoritos lunares, mas pode ocorrer em meteoritos que não eram parte de regolitos tais como este condrito em estudo cujo corpo parental, um asteroide, também foi exposto aos raios cósmicos e partículas do vento solar (Thaisen & Taylor, 2009; Black, 1972).

4.4. Manchas de Magnetita/Wüstita

A magnetita e/ou wüstita se forma pela reação química entre o ferro metálico e o oxigênio atmosférico durante a fase de bólido do meteorito (Horstmann, 2013). Como resultado, o ferro meteorítico é oxidado em altas temperaturas, isto é, em condições anídras, convertendo o ferro-níquel metálico original exposto à ablação atmosférica em manchas de magnetita na crosta de fusão (Figura 6). A cor escura da crosta é devida exatamente à presença da magnetita. A presença da magnetita está também confirmada na análise química de EDS (Tabela 2) e também nos picos dos elementos químicos no seu espectrograma (Figura 7). Nos meteoritos sideritos a sua crosta de fusão fina e escura brilhante ocorre devido à abundância de magnetita/wüstita gerada.

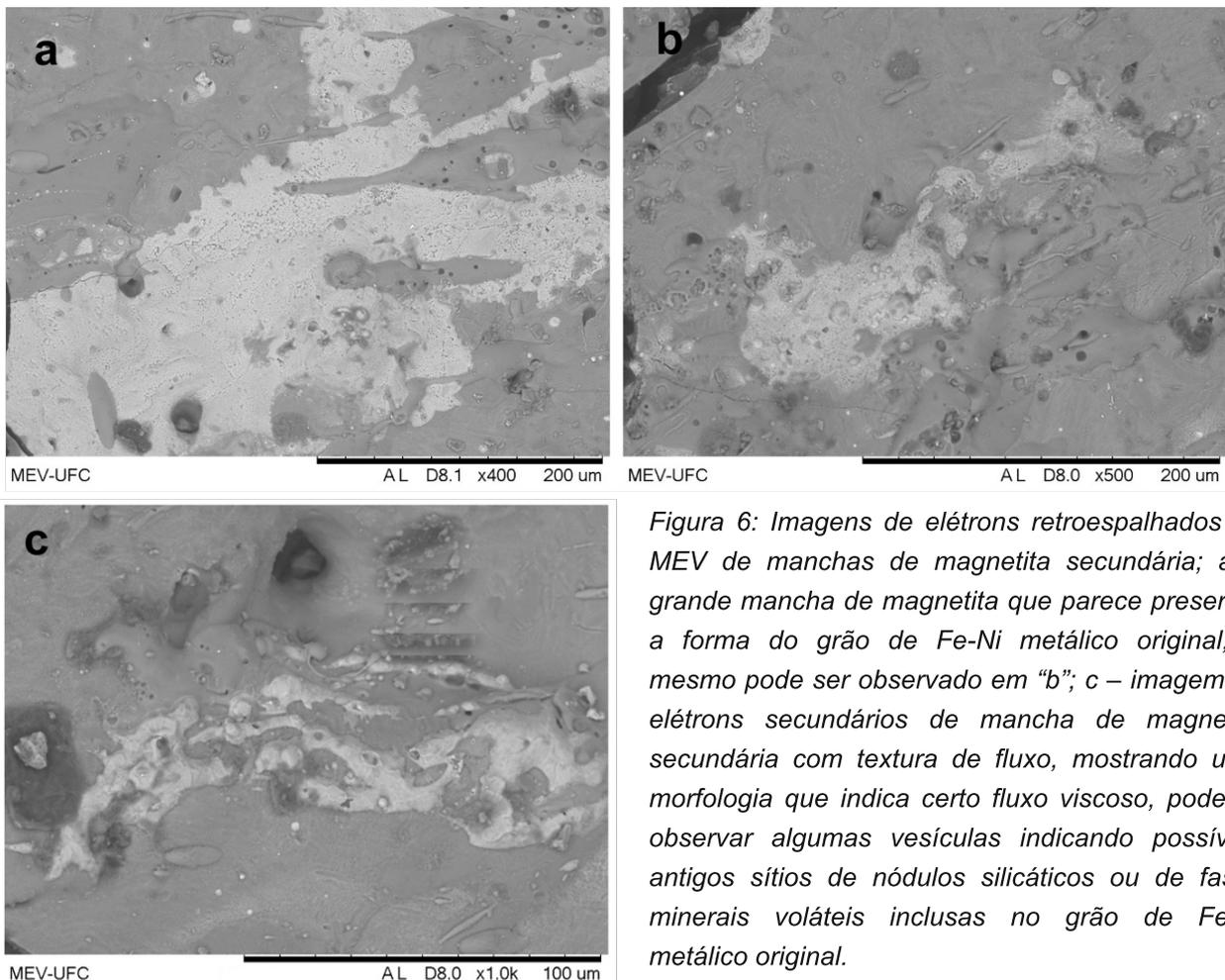


Figura 6: Imagens de elétrons retroespalhados ao MEV de manchas de magnetita secundária; a – grande mancha de magnetita que parece preservar a forma do grão de Fe-Ni metálico original, o mesmo pode ser observado em “b”; c – imagem de elétrons secundários de mancha de magnetita secundária com textura de fluxo, mostrando uma morfologia que indica certo fluxo viscoso, pode-se observar algumas vesículas indicando possíveis antigos sítios de nódulos silicáticos ou de fases minerais voláteis inclusas no grão de Fe-Ni metálico original.

Tabela 2: Análise Química da Magnetita/Wüstita Secundária, notar impurezas de carbono, silício, magnésio e cálcio, indicando que a fase contém impurezas de outras fases, principalmente silicatos ferromagnesianos e o percentual de carbono pode representar o carbono atmosférico devido à câmara de baixo vácuo.

Element	Weight %	Atomic %	Compound %	Formula
Carbon	6.467	13.354	23.695	CO ₂
Magnesium	2.966	3.026	4.917	MgO
Silicon	3.813	3.368	8.158	SiO ₂
Calcium	0.457	0.283	0.640	CaO
Iron	48.653	21.608	62.591	FeO
Oxygen	37.644	58.361		

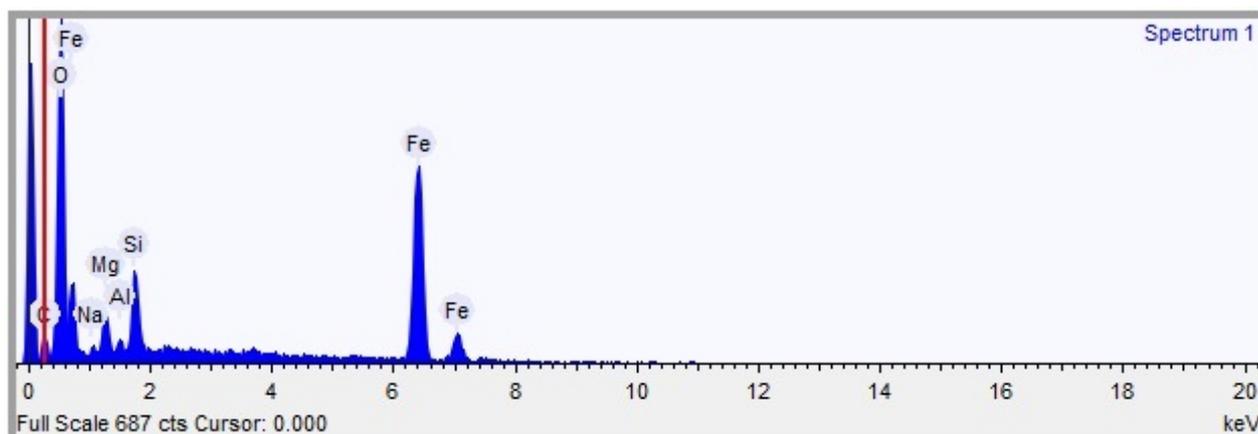


Figura 7: Espectrograma de EDS mostrando os picos de ferro e oxigênio da magnetita secundária. Algumas impurezas de Si, Al, Mg e Na indicam a presença de componentes silicáticos que estavam inclusos no Fe-Ni metálico antes da oxidação e transformação para magnetita secundária.

A presença de magnetita e/ou wüstita secundárias nas crostas de fusão dos meteoritos é verificada principalmente em esférulas cósmicas resultantes de micrometeoritos entrando na atmosfera da Terra, tais micrometeoritos magnetíticos, principalmente as ditas esférulas cósmicas, mostram-se ter uma composição química próxima da dos condritos ordinários e carbonáceos (Blanchard *et al.*, 1980; Gence *et al.*, 2008).

4.5. Microfeições Lineares de Fluxo

Quando o material silicático do meteorito encontra-se no estado vítreo, este ainda comporta-se como um líquido viscoso e então pode fluir de forma aerodinâmica e seguindo linhas de fluxo do ar atmosférico aquecido que orienta o vidro liquefeito e ao solidificar, o fluxo da massa fundida fica preservado na crosta de fusão gerando linhas de fluxo e padrões orientados na superfície da crosta de fusão (Akos *et al.*, 2014). Muitas

linhas de fluxo em alguns meteoritos orientados podem ser vistos em amostras de mão dos meteoritos. A situação mais comum aqui é a de texturas lineares

microscópicas de fluxo e estas foram identificadas nas imagens de elétrons secundários (Figura 8).

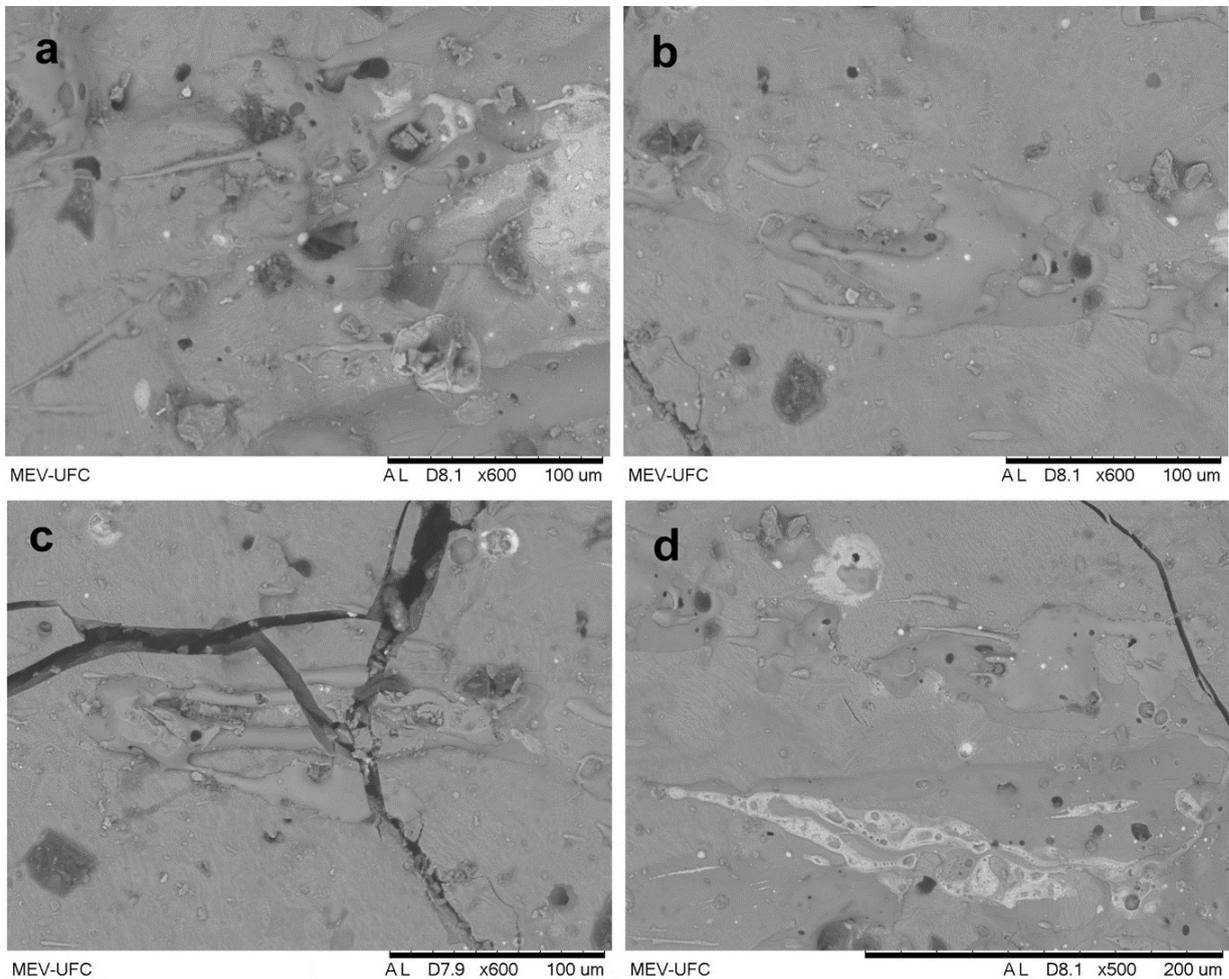


Figura 8. Imagens compostas ao MEV de texturas de fluxo; a – padrões lineares e unidirecionais de material silicático e metálico vitrificado; b – padrão de fluxo em material silicático vítreo indicando novamente fluxo unidirecional; c – padrões de gotas orientadas todas com a mesma direção de fluxo, notar as fraturas cortando estas estruturas de fluxo, mostrando que as fraturas de contração térmica ocorreram num evento posterior à geração das texturas de fluxo na crosta de fusão; d- gotas de magnetita/wüstita com padrões orientados, também padrões lineares no material silicático vítreo ocorrem. Notar que em todas as imagens, o direcionamento de todas as microfeições de fluxo é constante.

5. CONCLUSÕES

Com o auxílio das técnicas de MEV e EDS, puderam-se identificar cinco microfeições na crosta de fusão do meteorito Campos Sales geradas pela ablação atmosférica. As fraturas de contração térmica mostram que durante a fase de resfriamento do bólido havia uma diferença de temperatura entre a região

externa quente e interna fria do meteorito gerando contração térmica da crosta de fusão. Os côneculos/flocos de Fe-Ni representam texturas reliquias que resistiram à ablação térmica porque normalmente são formados em sua maior parte de Fe-Ni metálico resistente ao calor. As cavidades/vesículas de ablação

atmosférica mostram o resultado da evaporação de fases minerais voláteis em contato com o ar quente da ablação, onde normalmente estas vesículas eram ocupadas por troilita cujos resquícios foram detectados por EDS. As manchas de magnetita e wüstita evidenciam a reação química em alta temperatura e em condições anídras do Fe-Ni metálico com o ar atmosférico, produzindo uma mistura de óxidos magnetita/wüstita identificados no EDS. As microfeições lineares de fluxo são resultado do material silicático fundido e vitrificado que fluiu de forma viscosa para gerar linhas de fluxo e diversos outros padrões lineares indicando a mesma direção de fluxo correspondente à direção do ar quente. Todas estas feições analisadas mostram a história do meteorito na fase de bólido incandescente, evidenciando os processos ocorridos durante a formação da crosta de fusão primária do meteorito Campos Sales.

Agradecimentos

À disponibilidade e colaboração do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará, à CAPES pelo apoio valioso à pesquisa continuada e aos professores Drs. J. A. Nogueira Neto e V. W. Almeida Vieira por fornecer as amostras do meteorito Campos Sales.

REFERÊNCIAS

- AKOS, K., SZIVIA, O., SANDOR, J., MATE, S., MARIA, T. (2014) Analysis of ripple or flow-like features in NWA3118 CV3 meteorite; *Planetary and Space Science* 104, 200–210
- BALDWIN, B., SHEAFFER, Y. (1971) Ablation and breakup of large meteoroids during atmospheric entry; *Journal of Geophysical Research*, Vol. 76, pages 4653 - 4668
- BEAUFORD, R. E., ARNOLD, S. K., SEARS, D. (2012) The Macrostructure of the Sutter's Mill Meteorite; 75th Annual Meeting of the Meteoritical Society, held August 12-17, 2012 in Cairns, Australia. Published in *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, id.5091.
- BHANDARI, N., LAL, D., RAJAN, R.S., ARNOLD, J.R., MARTI, K., MOORE, C.B. (1980) Atmospheric ablation in meteorites: A study based on cosmic ray tracks and neon isotopes; *Nuclear Tracks*, Vol. 4, Issue 4, pp. 213 – 262
- BLACK, D. C. (1972) On the origins of trapped helium, neon and argon isotopic variations in meteorites—I. Gas-rich meteorites, lunar soil and breccia; *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol 36, Issue 3, pages 347–375.
- BLANCHARD, M. B., BROWNLEE, D. E., BUNCH, T. E., HODGE, P. W., KYTE, F. T. (1980) Meteoroid Ablation Spheres from Deep-Sea Sediments; *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 46, pp. 178 - 190
- BLANDER, M. (1971) The constrained equilibrium theory: Sulphide phases in meteorites; *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 35, Issue 1, pp. 61 – 76
- BRONSHTEN, V. A. (1983) Ablation of Meteoroids; *Physics of Meteoritic Phenomena, Geophysics and Astrophysics Monographs*, Vol. 22, pp 91 - 138
- BUCHWALD, V. F. (1977) The Mineralogy of Iron Meteorites; *Philos. Trans. Of the Royal Society*, Vol 286, Issue 1336
- CEPLECHA, Z., BOROVIČKA, J., ELFORD, W. G., REVELLE, D. O., HAWKES, R. L., PORUBCAN, V., SIMEK, M. (1998) Meteor Phenomena and Bodies; *Space Science Reviews*, Vol. 84, Issue 3, pp. 327 – 471.

- GENCE, M. J., ENGRAND, C., GOUNELLE, M., TAYLOR, S. (2008) The classification of micrometeorites; *Meteoritics & Planetary Science*, Vol. 43, Nr. 3, pp. 497 – 515
- GENCE, M. J., GRADY, M. M. (1999) The fusion crusts of stony meteorites: Implications for the atmospheric reprocessing of extraterrestrial materials; *Meteoritics & Planetary Science*, Vol. 34, pp. 341 – 356
- HORSTMANN, M., HUMAYUN, M., HARRIES, D., LANGENHORST, F., CHABOT, N. L., BISCHOFF, A., ZOLENSKY, M. E. (2013) Wüstite in the fusion crust of Almahata Sitta sulfide-metal assemblage MS-166: Evidence for oxygen in metallic melts; *Meteoritics & Planetary Science*, Vol 48, Issue 5, pages 730 - 743
- LOVERING, J. F., PARRY, L. G., JAEGER, J. C. (1960) Temperatures and mass losses in iron meteorites during ablation in the Earth's atmosphere; *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 19, Issue 3, pages 159 – 167
- SCORZELLI, R. B., MICHEL-LEVY, C.; GILABERT, E., LAVIELLE, B., AZEVEDO, I. S., VIEIRA, V. W., COSTA, T. V. V., ARAUJO, M. A. B. (1998) The Campos Sales meteorite from Brazil: A lightly shocked L5 chondrite fall; *Meteoritics & Planetary Science*, Vol. 33, pp. 1335-1337
- SEARS, D. W. (1975) Temperature Gradients in Meteorites Produced by Heating During Atmospheric Passage; *Modern Geology*, Vol. 5, pp. 155 - 164
- THAISEN, K. G., TAYLOR, L. A. (2009) Meteorite fusion crust variability; *Meteoritics & Planetary Science*, Vol. 44, Issue 6, pages 871 - 878
- VONDRAK, T., PLANE, J. M. C., BROADLEY, S., JANCHES, D. (2008) A chemical model of meteoric ablation; *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 8, pp. 7015-7031