



ESTUDO DA MATÉRIA ORGÂNICA INSOLÚVEL NO METEORITO CARBONÁCEO AGUAS ZARCAS

STUDY OF INSOLUBLE ORGANIC MATTER IN CARBONACEOUS METEORITE AGUAS ZARCAS

ESTUDIO DE MATERIA ORGÁNICA INSOLUBLE EN METEORITO CARBONOSO ÁGUAS ZARCAS

Clarice Paixão de Souza<sup>1</sup>, Maria Elizabeth Zucolotto<sup>2</sup>

e422695

<https://doi.org/10.47820/recima21.v4i2.2695>

PUBLICADO: 02/2023

**RESUMO**

Por meio da correlação de dados analíticos, o estudo geoquímico e de microscopia óptica permite pontuar as condições e o estado de preservação de insumos orgânicos dispersos em rochas sedimentares, sinalizando o ambiente e os processos geotérmicos e físicos que os afetaram durante os vários estágios evolutivos do pós-enterro. Com objetivo análogo, essa metodologia analítica convencional foi aplicada na caracterização do perfil orgânico dos particulados contidos na matriz rochosa de um meteorito carbonáceo recém-caído. Partindo desses pressupostos, a avaliação do isolado orgânico do condrito carbonáceo Águas Zarcas expôs um aspecto morfográfico similar ao de produtos orgânicos secundários resultantes de processos intermediários de maturação térmica sedimentar. A partir da caracterização do resíduo orgânico do meteorito, nossa pesquisa propõe uma correspondência entre os dados de cada perfil objetivando diagnosticar as possíveis condições deposicionais, térmicas e de preservação enquanto no corpo parental de origem dos fragmentos cósmicos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Condritos carbonáceos CM2. Meteoritos. Particulados orgânicos.

**ABSTRACT**

*Through the correlation of analytical data, the geochemical and optical microscopy study allows punctuating the conditions and state of preservation of organic inputs dispersed in sedimentary rocks, signaling the environment and the geothermal and physical processes that affected them during the various evolutionary stages of the post burial. With a similar objective, this conventional analytical methodology was applied to characterize the organic profile of particulates contained in the rocky matrix of a recently fallen carbonaceous meteorite. Based on these assumptions, the evaluation of the organic isolate of the carbonaceous chondrite Aguas Zarcas exposed a morphographic aspect similar to that of secondary organic products resulting from intermediate processes of sedimentary thermal maturation. From the characterization of the meteorite's organic residue, our research proposes a correspondence between the data of each profile aiming to diagnose the possible depositional, thermal and preservation conditions while in the parent body of origin of the cosmic fragments.*

**KEYWORDS:** CM2 Carbonaceous chondrites. Meteorites; Organic particulates.

**RESUMEN**

*A través de la correlación de datos analíticos, el estudio geoquímico y de microscopía óptica permite puntuar las condiciones y el estado de conservación de los insumos orgánicos dispersos en las rocas sedimentarias, señalando el medio ambiente y los procesos geotérmicos y físicos que los afectaron*

<sup>1</sup> Mestre em Geociências: Patrimônio Geopaleontológico pelo Museu Nacional/UFRJ. Funcionária da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), lotada no Instituto de Geociências, Laboratório de Palinofácies e Fácies Orgânicas (LAFO). Responsável técnica do laboratório de análise térmica elementar de Carbono Orgânico e Enxofre - SC-144DR (LECO).

<sup>2</sup> Graduada em Astronomia pelo Observatório do Valongo/UFRJ. Mestrado em Geologia pelo Instituto de Geociências/UFRJ. Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE/UFRJ. Professora do Museu Nacional/UFRJ, e curadora da coleção de meteoritos desde 1997. Professora associada IV e chefe substituta do Departamento de Geologia e Paleontologia.



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ESTUDO DA MATÉRIA ORGÂNICA INSOLÚVEL NO METEORITO CARBONÁCEO ÁGUAS ZARCAS  
Clarice Paixão de Souza, Maria Elizabeth Zucolotto

*durante las diversas etapas evolutivas del post-entierro. Con un objetivo análogo, se aplicó esta metodología analítica convencional en la caracterización del perfil orgánico de las partículas contenidas en la matriz rocosa de un meteorito carbonáceo recién caído. Con base en estos supuestos, la evaluación del aislado orgánico del conduro carbonoso Aguas Zarcas expuso un aspecto morfológico similar al de los productos orgánicos secundarios resultantes de procesos de maduración térmica sedimentaria intermedia. A partir de la caracterización del residuo orgánico del meteorito, nuestra investigación propone una correspondencia entre los datos de cada perfil con el objetivo de diagnosticar las posibles condiciones de deposición, térmicas y de preservación en el cuerpo padre de origen de los fragmentos cósmicos.*

**PALABRAS CLAVE:** *Condritas carbonáceas Cm2. Meteoritos. Partículas orgánicas.*

### INTRODUÇÃO

Os condritos carbonáceos são corpos rochosos de matriz silicática rica em minerais hidratados e alto teor de carbono orgânico amorfo condensado em estruturas aromático-alifáticas mistas, supostamente remanescentes de estrelas (KWOK; ZHANG, 2011), cuja rota termodinâmica de formação é baseada na teoria proposta de Franz Fischer e Hans Tropsch (MILLER; UREY, 1959). A partir de moléculas básicas, o material pré-biótico, exposto a fontes de energia (potenciais de redução de luz, calor e oxidação através da doação e recepção de elétrons), geraria um complexo sistema de interação molecular (KRESS; TIELENS, 2001).

A composição orgânica básica de Condritos Carbonáceos (CCs) seria uma mistura de hidrocarbonetos (HC) leves e pesados, com entidades minerais não hidrocarbonadas (ALEXANDER *et al.*, 2017), cujo componente mais abundante é uma substância aromática polimérica (Sephton, 2002), similar aos presentes em sedimentos terrestres ricos em orgânicos, macromoléculas de querogênio ou pirobetume (TISSOT; WELTE, 1984).

O perfil orgânico desses espécimes é sugerido como um instrumento para acessar a complexa dinâmica de transformação e preservação da matéria orgânica (MO) agregada ao corpo precursor (RUBIN, 2013). As estruturas orgânicas insolúveis, cuja natureza exógena é considerada indiscutível, são totalmente incorporadas aos fragmentos carbonáceos e não podem ser justificadas por transferência pós-queda (PIZZARELLO, 2016).

O objeto investigado nesta pesquisa faz parte do conjunto de fragmentos do meteorito caído e recuperado em 23/04/2019 no município de Águas Zarcas, Costa Rica. O tema proposto baseia-se em três fatores principais: a) semelhança entre o material sedimentar orgânico terrestre e a matriz rochosa dos CCs, chamados de "sedimentos cósmicos" (MCSWEEN, 1979); b) a disponibilidade de técnicas metodológicas acreditadas internacionalmente aplicadas em estudos de sedimentos de conteúdo orgânico (MENDONÇA FILHO *et al.*, 2012); e c) o extenso banco de dados científicos referente aos vários tipos de querogênios, que serviu como fonte de comparação teórico-analítica.

Assim, o objetivo deste estudo é caracterizar o perfil isolado orgânico extraído da matriz rochosa do meteorito carbonáceo Águas Zarcas, propondo uma equivalência diagnóstica do ambiente depositário (corpo parental) através de protocolos metodológicos e correlação de dados, que



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ESTUDO DA MATÉRIA ORGÂNICA INSOLÚVEL NO METEORITO CARBONÁCEO ÁGUAS ZARCAS  
Clarice Paixão de Souza, Maria Elizabeth Zucolotto

convencionalmente sugerem as condições de preservação dos insumos orgânicos em gradientes sedimentares terrestres.

### 1 REFERÊNCIA TEÓRICA

O estudo da matéria orgânica contida em meteoritos carbonáceos não é novo. Algumas publicações apresentam resultados analíticos isolados expondo o alto grau de correspondência entre o material resultante de insumos orgânicos, maturados por gradientes geotérmicos terrestres, com os produtos orgânicos recuperados de fragmentos rochosos cósmicos.

A constituição química dos meteoritos carbonáceos se assemelha a de rochas sedimentares. Estudos a partir de 1961 têm sugerido um possível caráter biogênico dos resíduos orgânicos agregados aos corpos progenitores desses fragmentos. Gold (1999) e outros autores propõem que corpos carbonáceos tenham contribuído efetivamente com o acúmulo de MO depositada durante o desenvolvimento do planeta Terra, sendo responsáveis por parte de sua reserva petrolífera.

A importância da nossa investigação deve-se à aplicabilidade de uma metodologia de diagnóstica completa, de Geoquímica e Microscopia Orgânica, destinada a sinalizar os processos que favoreceram a transição e as condições de conservação do aglomerado orgânico ao longo das várias fases pós-sepultamento, em material análogo de origem cósmica. Dessa forma, os dados obtidos por essas técnicas convencionais nos ajudaram a propor o possível ambiente sob o qual os resíduos insolúveis foram acondicionados nos corpos precursores de meteoritos carbonáceos ao longo de milhões de anos.

Devido à queda recente (abril de 2019), o meteorito Águas Zarcas carece de estimativas mais abrangentes por meio de novas amostragens, corroborando com os resultados do ensaio e conclusão apresentada. Visto que, a finalidade desse projeto não consta em publicações anteriores para espécimes ou classe avaliada no estudo.

Considerando essas premissas, a pesquisa pretende identificar os componentes orgânicos particulados que, porventura, possam estar presentes nos fragmentos do meteorito carbonáceo Águas Zarcas, inibindo conclusões peremptórias quanto à origem, se formado biótica ou abioticamente.

Por meio de protocolos metodológicos geoquímicos e de petrografia orgânica convencionais, busca-se indicar as prováveis condições deposicionais, térmicas e de preservação impressas nos produtos orgânicos isolados das amostragens do meteorito.

### 2 MÉTODO

Os experimentos pré-analíticos permitem isolar o material insolúvel contido em sedimentos para posterior caracterização. Inicialmente, 7,1 gramas da amostragem do meteorito investigado foram submetidas a longos processos de extração via SOXHLET, para exclusão da fração molecular. Na sequência, o material remanescente foi desmineralizado por digestão com ácidos fluorídrico e



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ESTUDO DA MATÉRIA ORGÂNICA INSOLÚVEL NO METEORITO CARBONÁCEO ÁGUAS ZARCAS  
Clarice Paixão de Souza, Maria Elizabeth Zucolotto

clorídrico (HF – HCl), promovendo o isolamento do material orgânico por dissolução da maior parte da fração mineral, incluindo carbonatos (KWOK, 2007).

O apoio de pesquisadores dos laboratórios envolvidos foi essencial para conclusão do trabalho, auxiliados por técnicas analíticas disponíveis nos Laboratórios Palinofácies e Fácies Orgânica (LAFO/UFRJ), e Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES) listadas a seguir:

- a)** quantificação de carbono orgânico total e enxofre por combustão direta e detecção por infravermelho dos respectivos óxidos correspondentes gerados na queima — modelo SC144DR - fabricação LECO;
- b)** análise elementar de Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio e Enxofre por detecção via condutividade térmica – CHNS, modelo Flash 2000, fabricante *Thermo Scientific*;
- c)** pontuação de hidrocarbonetos livres e potencial gerador de querogênio através da pirólise de *Rock Eval S1* (mg HC / g rocha), *S2* (mg HC / g rocha) Índice de produção [ $PI = S1 / (S1 + S2)$ ]; *S3* (mg CO<sub>2</sub>/g rocha) e *Tmax* (°C) (Tissot e Welte, 1984); relação COT fornece Índice de Hidrogênio ( $IH = S2 / COT \times 100$ ) Índice de Oxigênio ( $IO = S3 / COT \times 100$ ) referenciado por Espitalié *et al.*, 1984 e Peters, 1986;
- d)** caracterização de matéria orgânica isolada disposta em lâminas palinofaciológicas, utilizando luz branca transmitida e microscopia de luz azul/ultravioleta incidente (Fluorescência),
- e)** determinação do estágio de maturação térmica de partículas orgânicas através da reflectância em relação a vitrinite (R%) em rocha inteira sob luz branca refletida, microscópio Leica DM4000;
- f)** registro e identificação de microestruturas agregadas à superfície do material orgânico isolado, assim como no fragmento *in natura* por Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM), EVO MA10 — fabricante ZEISS.

### 3 RESULTADOS

*Geoquímica Orgânica* A análise elementar por combustão, do material desmineralizado e pulverizado, registrou parâmetros quantitativos de carbono e enxofre com percentual de 1,36% e 1,85%, respectivamente.

Em duas amostragens do meteorito – AM.1 (crosta de fusão) e AM.2 (parte interna), os mesmos analitos foram avaliados por condutividade térmica (CHNS) e obtiveram quantificação similar aos definidos pelo equipamento detecção por infravermelho - SC-144 DR da Leco. Em estudos propostos por Matthewman *et al.*, (2013), a resposta cromatográfica da pirólise da MO de uma amostragem do meteorito Murchison, quando comparada aos de querogênios (I a IV), corresponde analiticamente a partículas orgânicas do tipo IV (paleossolo jurássico).

Um comparativo, entre os índices resultantes da pirólise *Rock Eval* do AZ e dados coletados de publicações de outro meteorito da classe CM2 (Murchison), indica um desempenho analítico equivalente, conforme descrito na tabela I.

Tabela I: Comparativa analítica da pirólise dos condritos carbonáceos Aguas Zarcas *versus* Murchison (Mukhopadhyay et al., 2007). Análise\* no CENPES/Petrobras.

Condritos CM2	%COT	S1 (mg/g)	S2 (mg/g)	S3 (mg/g)	Tmax (°C)	IH (S2/COT)	IO (S3/COT)
Murchison	1,03	0,33	0,41	2,73	400	40	265
Aguas Zarcas*	1,36	0,12	0,69	3,30	381	49	235

*Petrografia Orgânica* Submetendo o isolado orgânico, distribuído em lâmina organopalinológica, à luz branca transmitida (LBT), sinalizou predominância de partículas semelhantes ao betume/pirobetume sólido. A maioria das estruturas apresentam perfil amorfo e superfície fraturada, aparentemente lisa e sem fluorescência quando sob a influência de luz ultravioleta, indicativo de material orgânico muito oxidado conforme se observa na Figura 1.

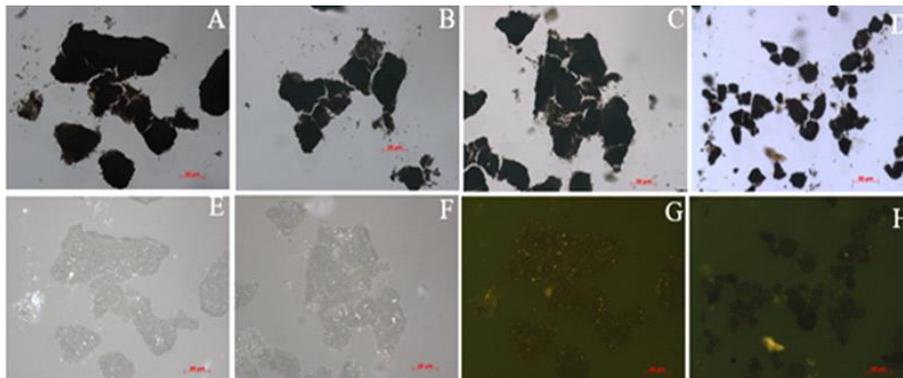


Figura 1: Fotomicrografias do isolado orgânico do meteorito AZ em uma lâmina de organopalinológica com predominância do tipo betume sólido. Material amorfo com superfície lisa e aspecto fraturado e coloração marrom escura sob LBT (A – D), sob Luz Branca Refletida (LBR), expõe inclusões brilhantes de sulfeto de ferro (E, F) e sem fluorescência sob a luz azul incidente (G, H).

Submetido à Luz Branca Refletida, no *plug* de epóxi com fragmentos da rocha total, foram selecionadas 35 partículas de perfil orgânico e, nessas, realizadas 36 medições. Nas figuras 2 e 3 há configurações da trajetória dos particulados orgânicos do meteorito AZ.

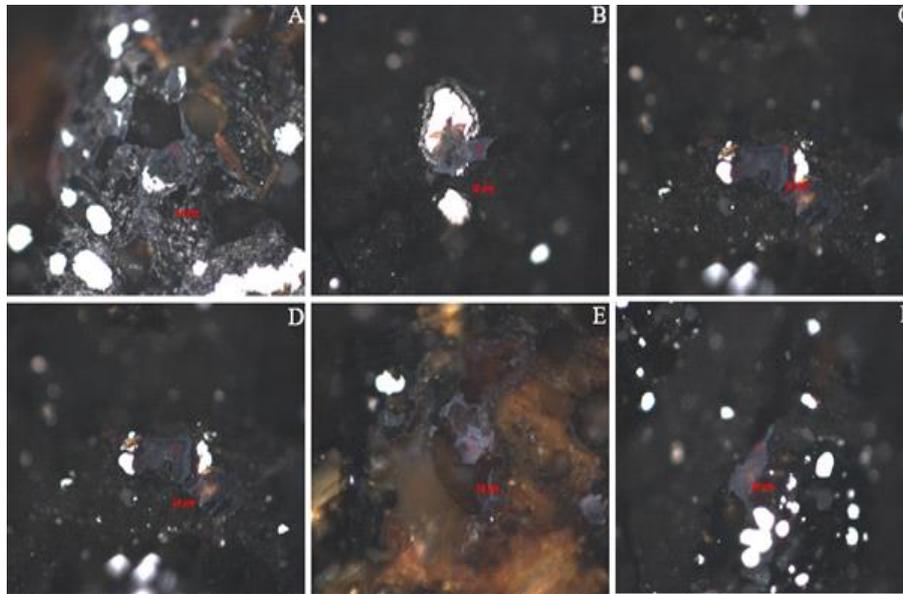


Figura 2: Fotomicrografia de partículas orgânicas indicadas pela coloração cinza (LBR) pela análise de rocha total do meteorito AZ. Medições aleatórias %R<sub>eqv</sub> A) 2,08; B) 1,44; C) e D) índice em pontos diferentes da mesma estrutura, 1,24 e 0,87, respectivamente; E) 0,82 e F) 1,76 %R<sub>eqv</sub>. Percentuais equivalentes a estruturas de betume sólido e pirobetume (Landis e Castaño 1995). Escala de 10 μm. LAFO/UFRJ.

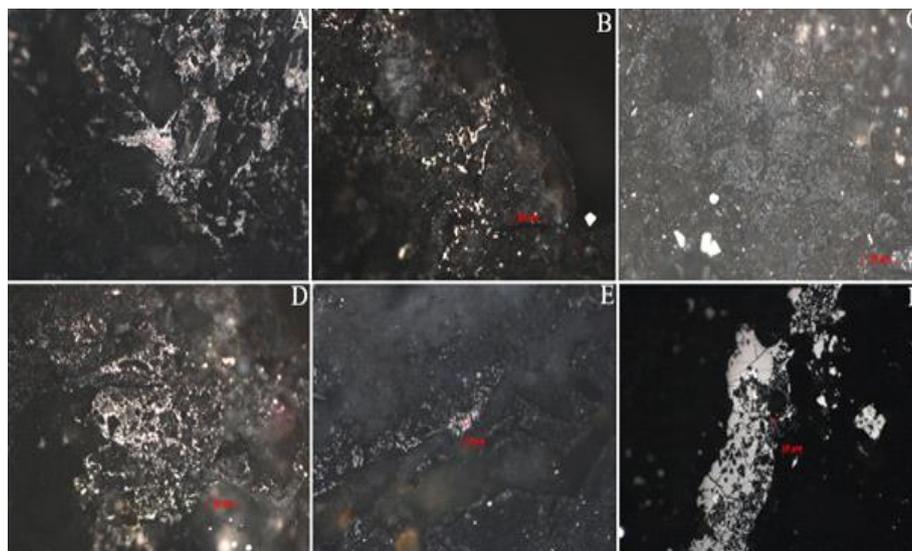


Figura 3: Fotomicrografias da matriz do meteorito Aguas Zarcas, cujo os vazios e fraturas são preenchidos com material do tipo betume sólido (A – E); sob LBR, a trajetória similar aos migrabetumes (Jacob, 1989). A medição do grau de maturação das áreas selecionadas em: A) %Reqv =3,32 e em F) com % Reqv =3,24. Escala = 10 μm. Local: LAFO/UFRJ.



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ESTUDO DA MATÉRIA ORGÂNICA INSOLÚVEL NO METEORITO CARBONÁCEO ÁGUAS ZARCAS  
Clarice Paixão de Souza, Maria Elizabeth Zucolotto

As estruturas selecionadas refletiram índices que variaram entre % Reqv = 0,57 a % Reqv = 3,95, característica de betume sólido e pirobetume (Curiale, 1986). Amostras com alto % S, como é o caso do AZ, Mastalerz et al., (2018) sugerem a redução do índice de reflectância de transição entre betume sólido e pirobetume (de % Reqv=1,5 para %Reqv= 1,30).

Considerando essa indicação, dentre as medições registradas na avaliação das partículas 1/3 correspondem a betume sólido e 2/3 ao pirobetume.

As figuras 4 A – D apresentam partículas morfograficamente similares às registradas na publicação dos pesquisadores liderados por Mukhopadhyay (2007). No estudo referente à matriz do meteorito carbonáceo Orgueil, os cientistas apontam indícios de similaridade entre as estruturas captadas e um grupo de macerais do tipo fusinita (grupo inertinita). No Águas Zarcas a estrutura 4C registrou índice de reflectância %Reqv = 4,63.

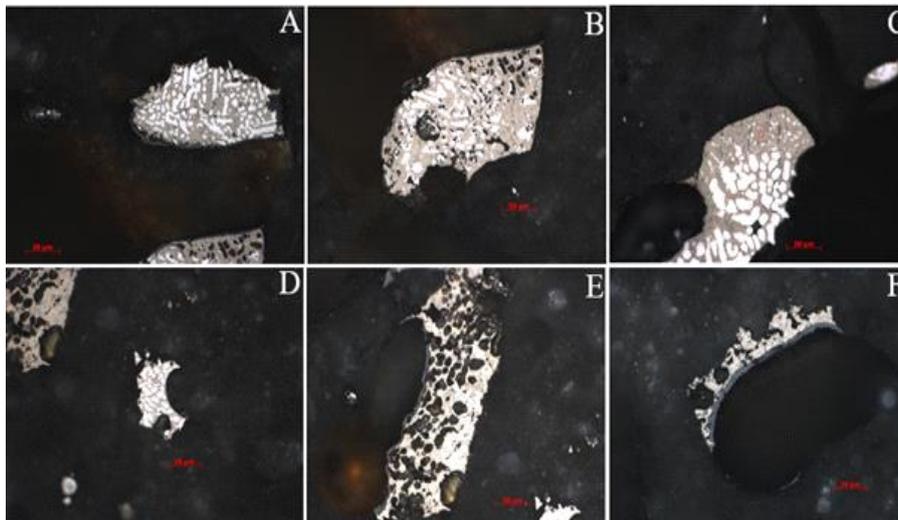


Figura 4: Fotomicrografias da avaliação da superfície polida do *plug* de rocha inteira do meteorito AZ expõem estruturas como as indicadas por Mukhopadhyay *et al.* (2007) como uma estrutura do tipo celular do grupo inertinita (A – D); estruturas minerais hidratadas de cálcio e alumínio (CAIs) – Macpherson e Davi,1994 – contendo bordas de oxidação (cinza escuro) com características orgânicas (E, F) sob LBR. Escala = 20  $\mu$ m. LAFO/UFRJ.

Nas capturas realizadas durante a análise de MEV, há registros da superfície não metalizada do meteorito *in natura* na Figura 5A e na sequência, imagens do isolado orgânico insolúvel.

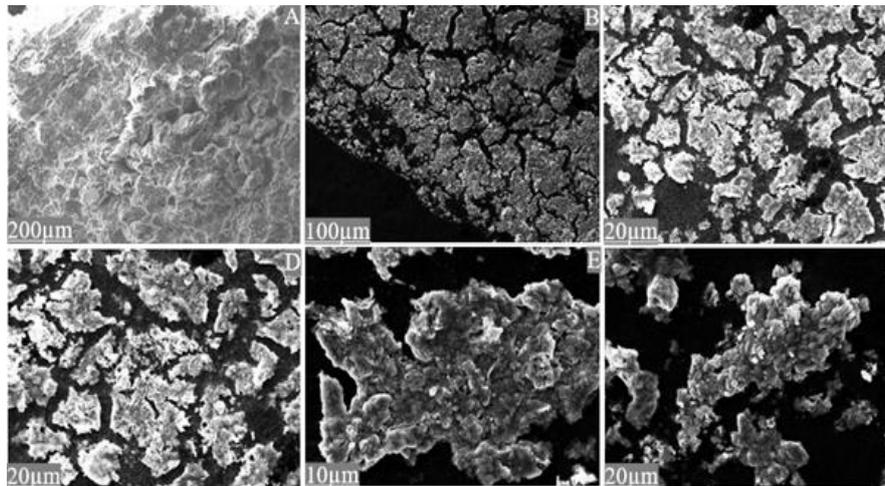


Figura 5: Fotomicrografias capturadas por MEV revelam a superfície *in natura* do meteorito (A); seguido do isolado orgânico com aspecto fissurado e detalhe do material amorfo (B – F).

Apresentando-se em forma de placas fraturadas de aspecto amorfo, a matéria orgânica insolúvel (MOI) contém inclusões minerais abundantes em determinadas regiões. Os minerais agregados a MO do meteorito (Figure 6) provavelmente são cristais de pentlanditas ( $\text{Fe}^{\circ}\text{S}^{\circ}$ ), anteriormente sugeridos por Kerridge *et al.*, (1979) em avaliações de meteoritos de mesma classificação (CM2).

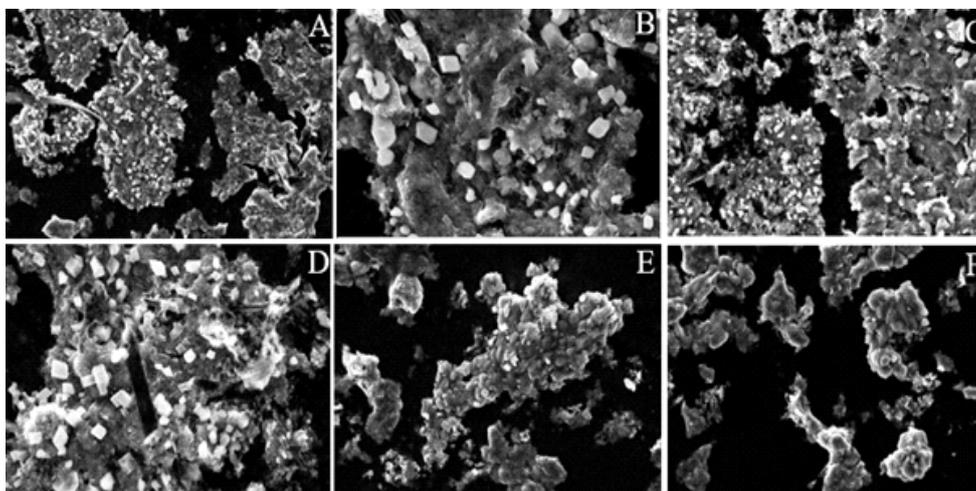


Figura 6: Registro de estruturas orgânicas isoladas do meteorito AZ. Numerosas inclusões minerais associadas ao material (A – D) sugeridas como pentlanditas ( $\text{Fe}^{\circ}\text{S}^{\circ}$ ) – Kerridge *et al.*, (1979). Aglomerado orgânico espaçado (E e F). Escala = 10µm. Local: LAFO/UFRJ.

#### 4 DISCUSSÃO

Geralmente, a relação estabelecida entre o carbono orgânico total (COT) e enxofre total (St) sugere o ambiente deposicional dos sedimentos orgânicos (BERNER, 1995; BORREGO *et al.*, 1998).



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ESTUDO DA MATÉRIA ORGÂNICA INSOLÚVEL NO METEORITO CARBONÁCEO ÁGUAS ZARCAS  
Clarice Paixão de Souza, Maria Elizabeth Zucolotto

Submetendo os parâmetros quantitativos obtidos, a razão COT/St é inferior a 3, característico de ambiente deposicional redutor (BORREGO *et al.*, 1998).

Considerando os dados da simulação térmica da pirólise de *Rock Eval* (Tabela 1), tanto as amostras AM.1 quanto AM.2 indicaram baixas concentrações de HC lábil (S1) e HC pirolisado (S2) – liberados em temperatura máxima (Tmax) < 435°C, típico de querogênio de baixo potencial de expulsão. A razão S1/S2 expõe um volume reduzido de hidrocarbonetos pelo Índice de Produção (IP = 0,15), característico de produtos em estágio imaturo (PETERS *et al.*, 2005).

A correlação entre os índices S2 e S3 e o COT gera, respectivamente, baixos IH e alto IO. As informações a partir da análise da pirólise (Tabela 1) traduzem que a MOI do meteorito AZ teria perfil análogo ao de querogênios do tipo III (TISSOT E WELTE, 1984) ou do tipo IV (MENDONÇA FILHO *et al.*, 2012).

Os altos índices S3 e IO podem estar relacionados à abundância de grupos funcionais do oxigênio conectados à macromolécula (MUKHOPADHYAY *et al.*, 2007). Segundo Tissot e Welte, (1984), os dados emitidos pela pirólise *Rock Eval* se adequam a materiais com poucas cadeias alifáticas, predominância de núcleos aromáticos e grupos funcionais oxigenados, tendendo à formação de gás. No Águas Zarcas, o predomínio de aromáticos é exposto pela razão de 0,78 obtido pelos percentuais de C (1,36%) e H (1,10%), sugerindo uma relação molecular (CH) próximo à 1:1.

O alto valor do S3 pode estar relacionado à presença de heteroátomos (NSO) contidos na mistura, gerada pela degradação de alcanos leves ou devido a imaturidade do material para o craqueamento térmico. Em amostras desprovidas de vitrinita, o grau de reflectância do betume sólido (BR) pode ser usado para calcular a reflectância equivalente da vitrinita (%Reqv) (JACOB, 1989). Assim, o betume sólido é considerado uma fonte confiável de medição do grau de maturação da matéria orgânica (WEI *et al.*, 2016), quando há homogeneidade estrutural das áreas medidas (SCHOENHERR *et al.*, 2007).

O cálculo da %Reqv indicados pela reflexão do betume (BR) segue a orientação proposta por Jacob (1989), com base na equação  $Reqv = (0,618 \times BR) + 0,4$  e aprimorada por Schoenherr *et al.*, (2007) pela fórmula por  $Reqv = (BR + 0,2443) / 1,0495$ .

A configuração desenhada pelas partículas de matéria orgânica na matriz do AZ, figuras 2 e 3, é interpretada como o registro do deslocamento do material viscoso no corpo parental. Na trajetória a MO preenche os vazios e fraturas de rochas, como os migrabetumes em rochas sedimentares (JACOB, 1989). O percurso seria iniciado após a consolidação do corpo precursor (DUNN *et al.*, 2010), provocando a expulsão do material orgânico e sua exposição direta a ações oxidativas, gerando múltiplas populações de betume (SANEI, 2020). Requerendo alto gradiente térmico e elevada pressão para craquear, o condensado orgânico expele um material viscoso no interior da matriz mineral que, gradualmente perde a fluidez, adquirindo um perfil proporcional ao potencial de alteração sofrida (MASTALERZ *et al.*, 2018) convertendo-se em betume semissólido, sólido, pirobetume e gás (HILL *et al.*, 2003).



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ESTUDO DA MATÉRIA ORGÂNICA INSOLÚVEL NO METEORITO CARBONÁCEO ÁGUAS ZARCAS  
Clarice Paixão de Souza, Maria Elizabeth Zucolotto

Partículas orgânicas diagnosticadas como de fonte imatura nos CCs, que apresentam alto grau de reflexão, poderiam indicar que a macromolécula teria experimentado, por um curto período e antes da sedimentação, forte estresse térmico por irradiação cósmica ou outra fonte térmica externa, o que afetaria mais significativamente os produtos menos resistentes à intervenção temporária imposta (MUKHOPADHYAY *et al.*, 2007).

Medições com características de superaquecimento ( $> 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), como a sinalizada nas estruturas do meteorito AZ (figura 4C), também foram registradas nas partículas dos CC Allende e Orgueil em pesquisa liderada por Mukhopadhyay *et al.*, (2007), acrescentando que a prevalência de betume sólido é uma característica geralmente atribuída a restos orgânicos antigos que visitaram individualmente ambientes térmicos severos ( $> 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), reduzindo hidrocarbonetos a carbono fossilífero, resultando em betume sólido ou semissólido e carbono residual (inerte).

O conjunto de dados obtido nesta pesquisa expõe uma MOI com alto teor de enxofre, o que poderia ser justificado pela suposta dinâmica de processos reacionais entre compostos orgânicos, elementos metálicos e enxofre, provocando a condensação em condições similares às propostas por Kowalewski *et al.*, (2010), que sugere a "vulcanização" natural a  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  como um processo de transformação de MO originalmente não biodegradada. Assim, há a substituição dos hidrogênios por enxofre, favorecendo interações intramoleculares com a MO e a alterando a massa molecular original, gerando macromoléculas.

O caráter anfótero do enxofre o capacita a gerar arranjos estruturais diversificados em condições ácidas ou alcalinas, permitindo uma variedade de minerais complexos do grupo dos sulfetos (DUNLOP; ÖZIDEMIR, 2001). Os cristais de pentlanditas ( $\text{Fe}^{\circ}\text{S}^{\circ}$ ), possivelmente seriam produtos reacionais da sulfedização entre metais fundidos de Ferro (Fe) e Níquel (Ni), reagindo ao sulfeto de hidrogênio da nebulosa, como proposto por Singerling e Brearley (2018).

### 5 CONSIDERAÇÕES

Embora a condensação macromolecular orgânica seja justificada por mecanismos hipotéticos diferentes nos sítios envolvidos, aparentemente os produtos orgânicos secundários do meteorito Águas Zarcas expuseram perfis muito próximos aos obtidos por insumos orgânicos em estágios específicos de maturação em subsuperfície.

Supondo que o material orgânico distribuído no Cosmo seja derivado de sínteses poliméricas, para que o resíduo produzido possa adquirir uma analogia morfológica reconhecível seria necessário conceber que seu conjunto macromolecular estivesse blindado por uma espécie de camada protetora, favorecendo os estágios transitórios do aglomerado, cuja função equivaleria à película que envolve os querogênios (na conversão de biomassa em geopolímeros).

No corpo parental estabilizado, a estrutura do "cosmopolímero" pode ter sido submetida a efeitos similares aos patrocinados por fatores geotérmicos. A proposta delineada sugere que, o conteúdo inicialmente fluido do "cosmopolímero" foi ejetado precocemente na matriz do asteroide,



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ESTUDO DA MATÉRIA ORGÂNICA INSOLÚVEL NO METEORITO CARBONÁCEO ÁGUAS ZARCAS  
Clarice Paixão de Souza, Maria Elizabeth Zucolotto

adquirindo o perfil equivalente aos processados na etapa da catagênese (fase intermediária de maturação térmica em subsuperfície).

Quando fraturado, o particulado expôs uma mistura oleosa de perfil imaturo que, sujeita à degradação térmica, foi gradualmente solidificada. Permeado na matriz rochosa de composição mineralógica predominantemente alcalina, o aglomerado preservado em condições redutoras foi adquirindo características de querogênios do tipo III ou IV.

Propõe-se, a continuidade do estudo de avaliação óptica do conjunto dos particulados orgânicos sólidos do Águas Zarcas não contemplados no estudo, que formado predominantemente de betumes sólidos e pirobetumes, registraram índices de reflectância variados que aludem à ordem classificatória baseada nas diretrizes de Jacob (1989), considerando o grau de maturação.

### REFERÊNCIAS

ALEXANDER, C. M. O. D.; CODY, G. D.; DE GREGORIO, B. T.; NITTLER, L. R.; STROUD, R. M. The nature, origin, and modification of insoluble organic matter in chondrites, the major Source of Earth's C and N. **Geochemistry**, v. 77, p. 227–256, 2017.

BERNER, R. A. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis — a comment. **Marine Chemistry**, v. 49, p. 121–122, 1995.

BORREGO, J.; LOPEZ, M.; PEDON, J. G.; MORALES, J. A. C/S ratios in estuarine sediments of the Odiel River-mouth, S.W. Spain. **Journal of Coastal Research**, v. 14, p. 1276–1286, 1998.

CURIALE, J. A. Origin of solid bitumen, with emphasis on biological marker results. **Organic Geochemistry**, v. 10, p. 559-580, 1986.

DUNLOP, D. J.; ÖZDEMİR, O. **Rock Magnetism, Fundamentals and Frontiers**, Cambridge: Cambridge University Press, 2001. p. 231–232.

DUNN, T. L.; MCCOY, T. J.; SUNSHINE, J. M.; MCSWEEN-JR, H. Y. A coordinated Spectral, Mineralogical, and Compositional Study of Ordinary Chondrites. **Science Direct**, v. 208, p. 789–797, 2010.

ESPITALIÉ, J.; MARQUIS, F.; BARSONY, I. Geochemical logging. *In*: VOORHEES, K. J. (ed.). **Analytical Pyrolysis: Techniques and Applications**. London: Butterworth-Heinemann, 1984. p. 276–304.

GOLD, T. **The Deep Hot Biosphere**. New York: Springer, 1999. p. 37–77.

HILL, R. J.; TANG, Y. C.; KAPLAN, I. R. Insights into oil cracking based on laboratory and experiments. **Org. Geochem**, v. 34 p. 1651–1672, 2003.

JACOB, H. Classification, structure, genesis, and practical importance of solid natural bitumen ("migrabitumen"). **International Journal Coal of Geology**, v. 11, p. 65–79, 1989.

KERRIDGE, J. F.; MACDOUGALL, J. D.; CARLSON, J. **Iron-Nickel Sulfides in Murchison meteorite and their relationship to phase Q1**. Rio de Janeiro: Elsevier, 1979. v. 43, p.1–4.



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ESTUDO DA MATÉRIA ORGÂNICA INSOLÚVEL NO METEORITO CARBONÁCEO ÁGUAS ZARCAS  
Clarice Paixão de Souza, Maria Elizabeth Zucolotto

KOWALEWSKI, I.; SCHAEFFER, P.; ADA, P.; DESSORT, D.; FAFET, A.; CARPENTIER, B. Formation of H<sub>2</sub>S and sulfur-rich bitumen from a reservoir heavy oil in the presence of elemental sulfur. **Organic Geochemistry**, v. 41, p. 951–958, 2010.

KRESS, M. E.; TIELENS, A. G. G. M. The role of Fischer-Tropsch catalysis in solar nebula chemistry. **Meteoritics and Planetary Science**, v. 36, p. 75–91, 2001.

KWOK, S. Enrichment of the solar system by organic compounds delivered from evolved stars. **Advances in Space Research**, v. 40, p. 1613–1619, 2007.

KWOK, S.; ZHANG, Y. Mixed aromatic-aliphatic organic nanoparticles as carriers of unidentified infrared emission features. **Nature**, v. 479, p. 80–83, 2011.

LANDIS, C. R.; CASTAÑO, J. R. Maturation and bulk chemical properties of a suite of solid hydrocarbons. **Organic Geochemistry**, v. 22, p. 137–149, 1995.

MACPHERSON, G. J.; DAVI, A. M. Refractory inclusions in the prototypical CM chondrite, Mighei. **Geochimica Cosmochimica Acta**, v. 58, p. 5599–5625, 1994.

MASTALERZ, M.; DROBNIAK, A.; STANKIEWICZ, A. B. Origin, properties, and implications of solid bitumen in source-rock. **International Journal of Coal Geology**, v. 195, p. 14–36, 2018.

MATTHEWMAN, R.; MARTINS, Z.; SEPHTON, M.A. Type IV Kerogens an analogue for organic macromolecular materials in aqueously altered carbonaceous chondrites. **Astrobiology**, v. 13, p. 324–333, 2013.

MCSWEEN, J. R. N. Y. Are carbonaceous chondrites primitive or processed? **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 17, n. 5, p. 1059–1078, 1979. doi:10.1029/RG017i005p01059.

MENDONÇA FILHO, J. G.; MENEZES, T. R.; MENDONÇA, J. O.; OLIVEIRA, A. D.; SILVA, T. R.; RANDON, N.F.; SILVA, F.S. Organic Facies: Palynofacies and Organic Geochemistry Approaches. **In Tech Rijeka**, v. 1, p. 211–245, 2012.

MILLER, S. L.; UREY, H. C. Organic compound synthesis on the primitive Earth. **Science**, v. 130, p. 245–251, 1959.

MUKHOPADHYAY, P. K.; MOSSMAN, D. J.; EHRMAN, J. M. The case for vestiges of early solar system biota in carbonaceous chondrites: petroleum geochemical snapshots and possible future petroleum prospect on Mars expedition. **Proceedings SPIE**, v. 6694, p. 1–8, 2007. Doi:10.1117/12.730716. SPIE v 6694.

PETERS, K. E. Guidelines evaluating petroleum source rocks using programs pyrolysis. **The American Association of the Petroleum Geologists Bulletin**, v. 70, p. 318–329, 1986.

PETERS, K. E.; WALTERS, C. C.; MOLDOWAN, J. M. *The Biomarker Guide: Biomarkers and isotopes in the Petroleum Exploration and Earth History*. Cambridge: Cambridge University Press; 2005. 1155 p.

PIZZARELLO, S. Looking for the origin of life in cosmochemistry: asteroids and their carbon-rich meteorites. **Science Journal**, v. 6, p. 161–165. 2016.

RUBIN, A. E. Secret of Primate Meteorites. **Scientific American**, v. 36, p. 37–41, 2013.

SANEI, H. Genesis of solid bitumen. **Nature Scientific Reports**, v. 10, p. 15595, 2020. Doi:10.1038/s41598-020-72692.



**RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR**  
**ISSN 2675-6218**

ESTUDO DA MATÉRIA ORGÂNICA INSOLÚVEL NO METEORITO CARBONÁCEO ÁGUAS ZARCAS  
Clarice Paixão de Souza, Maria Elizabeth Zucolotto

SCHOENHERR, J.; LITCKE, R.; URAI, J. L.; KUKLA, P. A.; RAWAHI, Z. Polyphase thermal evolution in the Infra-Cambrian Ara Group (South Oman Salt Basin) as deduced by maturity of solid reservoir bitumen. **Organic Geochemistry**, v. 38, p.1293–1318, 2007.

SEPHTON, M. A. Organic compounds in carbonaceous meteorites. **Nature Scientific Reports**, v. 19, p. 292–311, 2002.

SINGERLING, S. A.; BREARLEY, A. J. Primary iron sulfides in CM and CR carbonaceous chondrites: insights into nebular processes. **Meteoritics e Planetary Science**, v. 53, p. 2078–2106, 2018.

TISSOT, B. P.; WELTE, D. H. **Petroleum Formation and Occurrence**. 2nd ed. Berlim, Heidelberg: Springer-Verlag, 1984. 699 p.

WEI, L.; WANG, G. Y.; MASTALERZ, M. Comparative optical properties of macerals and statistical evaluation of misidentification of vitrinite and solid bitumen from early mature Middle Devonian – Lower Mississippian New Albany Shale: implications for thermal maturity assessment. **International Journal of Coal Geology**, v. 68, p. 222–236, 2016.