

# A IMPORTÂNCIA CIENTÍFICA DOS METEORITOS



*Curso de Pós Graduação  
em Geologia- UFBA  
Julho/2007*

**Seminários em  
Petrologia,  
Metalogênese e  
Exploração Mineral.**

**Mestrando:**  
**Wilton Carvalho**  
Orientadora:  
Dra. Débora Rios  
Prof. Dr. Herbet  
Conceição

## ÍNDICE

<b>Sumário.....</b>	<b>03</b>
<b>Introdução.....</b>	<b>07</b>
<b>Definições Básicas e Nomenclatura.....</b>	<b>08</b>
<b>Amostras Extraterrestres.....</b>	<b>09</b>
<b>Classificação de Prior – 1920.....</b>	<b>11</b>
<b>Classificação Moderna – 2005.....</b>	<b>12</b>
<b>Meteoritos Férreos.....</b>	<b>14</b>
<b>Grupo IC.....</b>	<b>16</b>
<b>Conclusões.....</b>	<b>20</b>
<b>Referências.....</b>	<b>21</b>

## **SUMÁRIO**

**Os meteoritos são amostras de material extraterrestre que trazem preciosas informações sobre a origem do sistema solar. Eles são fragmentos do núcleo, manto e crosta de asteróides que passaram por processos de diferenciação similares aos que ocorreram na Terra há 4,5 b.a.**

**Nesse estudo demonstra-se a importância científica dos meteoritos, fazendo-se uma rápida apresentação da meteorítica. Seus conceitos básicos e regras de nomenclatura são abordados de forma sucinta, enfatizando-se os sistemas de classificação criados para agrupar esse material.**

**Os meteoritos férreos mereceram especial atenção nesse trabalho, haja vista abrigarem o siderito Bendegó no Grupo IC. Esse meteorito é objeto da dissertação de mestrado do autor, em fase de elaboração.**

**Palavras-chave: Bendegó, cratera, meteorito, meteoróide, extraterrestre**

## Introdução

Desde o Cambriano até o Quaternário ocorreram pelo menos quinze extinções em massa, sendo a mais severa registrada no final do Permiano, cuja duração da ordem de 15 m.a. parece relacionar-se à fragmentação e deriva dos continentes e respectivas mudanças climáticas e orogênicas.

Ao contrário dos eventos registrados no Permiano, a extinção ocorrida no Cretáceo foi súbita e mais seletiva, atingindo com maior intensidade a vida marinha do que a vida terrestre. Entre os animais marinhos extintos aqueles que habitavam águas poucos profundos ou flutuavam (planctônicos) foram mais afetados do que os seres residentes no fundo dos oceanos (bentônicos).

Há fortes indícios de que a queda de um meteorito de 10 km de diâmetro causou essa extinção em massa ocorrida há 65 m.a., sendo os principais a descoberta de uma camada de argila escura rica em metais nobres situada entre depósitos de calcário típicos dos períodos Cretáceo e Terciário (K-T) e uma gigantesca cratera submersa, localizada na Península de Yucatan, Golfo do México.

A exploração jornalística da extinção dos dinossauros e grandes répteis no final do Cretáceo, assim como o sucesso de filmes de ficção científica retratando as conseqüências do impacto de asteróides com a Terra fixaram na mente de grande parte da humanidade a imagem dos meteoritos como grandes exterminadores, deixando em segundo plano a importância científica desses fragmentos de matéria extraterrestre.

A hipótese que aponta para uma relação entre a extinção em massa do Cretáceo e a queda de um meteorito foi inicialmente aventada em 1969 por Digby McLaren e reforçada em 1973 por Harold Urey. Apenas em 1980, uma equipe da Universidade da Califórnia, Berkeley, liderada por Walter Alvarez, demonstrou que uma fina camada de argila encontrada no limite dos depósitos de calcário do Cretáceo e Terciário apresentava alta concentração de Ir, elemento excepcionalmente abundante nos meteoritos, porém raro na crosta terrestre. Essa mesma equipe verificou que abaixo da argila rica em Ir (Cretáceo) havia evidência da proliferação de foraminíferos, fato que não ocorria no calcário acima dessa linha (Terciário) evidenciando a ocorrência da extinção em massa K-T.

Dez anos mais tarde, imagens de satélite e estudos geofísicos levados a efeito por empresas da indústria do petróleo confirmaram a existência da cratera submersa de Chicxulub, uma depressão multianelar com aproximadamente 180 km de diâmetro, no fundo da Península de Yucatan. A idade dessa cratera coincide com o final do período Cretáceo, construindo-se assim mais um pilar de sustentação à hipótese cataclísmica da grande extinção ocorrida há 65 m.a.

A importância científica dos meteoritos não se restringe às catástrofes que possam ter impactado nosso planeta ao longo do tempo geológico ou às ameaças que asteróides em possíveis rotas de colisão com a Terra representam para o futuro da humanidade.

O interesse dos cientistas pelos meteoritos foi primeiramente registrado em 1794 através de um pequeno livro escrito por Ernst Friederick Chladini resumando suas investigações e descobertas sobre fragmentos de rochas e de metal cujas quedas foram testemunhadas e apresentavam consistente documentação.

Chladini foi o primeiro cientista a aceitar que esse material “caía do céu”, estava relacionado à passagem de bólidos e que provinha de regiões além da atmosfera terrestre, possivelmente do espaço interestelar. Em 1802, as primeiras rochas meteoríticas foram analisadas na Inglaterra pelo químico Edward Charles Howard que encontrou uma composição muito semelhante nas quatro amostras que estudou e que provinham de localidades diferentes da Europa e Índia. Anos mais tarde isso, corria um boato de que Thomas Jefferson, naturalista e segundo presidente dos Estados Unidos, havia dito em 1807: “Senhores, eu acreditaria mais facilmente que dois professores noviorquinos mentiriam do que acreditaria em pedras que caem do céu”, referindo-se ao relato feito por dois cientistas da Universidade de Yale sobre a queda do meteorito Weston, Connecticut, no inverno daquele ano.

Apesar do ceticismo da comunidade científica, as análises dos meteoritos prosseguiram em ritmo lento, mas constante. Em 1857, Karl Ludwig von Reichenback estudou os minerais e a textura dos meteoritos utilizando um microscópio comum, seguindo-se observações com o microscópio petrológico, inventado em 1861 por Nevil Story-Maskelyne.

No final do século XIX as universidades e museus conseguiram reunir uma quantidade substancial e variada de meteoritos e informações petrológicas suficientes para estabelecer uma primeira classificação dessas rochas e fragmentos de ferro baseada na textura e características físicas, aceitando como ponto pacífico sua origem espacial.

O meteorito Bendegó, descoberto no Brasil em 1784, representou papel relevante nessa jornada pelo reconhecimento da meteorítica como ciência, haja vista o interesse que despertou na comunidade científica européia um artigo publicado no *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, em 1819, dando conta dos resultados de análises químicas conduzidas por Wollaston em amostras coletadas pelo engenheiro britânico A. F. Mornay, contratado pelo Governo brasileiro para investigar ocorrências de águas termais no sertão da Bahia, em 1810.

Em 1886 membros da Academia de Ciências de Paris, recomendaram ao Imperador do Brasil D. Pedro II promover meios para que o meteorito Bendegó fosse transportado para o Rio de Janeiro, onde poderia ser estudado e assim contribuir para aumentar as informações disponíveis sobre o ferro espacial do qual é constituído.

O meteorito Bendegó, pesando 5.360 k foi transportado do município de Monte Santo, Bahia, para a Corte Imperial, na cidade do Rio de Janeiro, passando a integrar o acervo do Museu Nacional a partir de 1888. No final do século XIX era o maior meteorito exposto em um museu, extraindo-se dele amostras que foram encaminhadas a diversas instituições dos Estados Unidos e Europa. A importância desse meteorito para a comunidade científica pode ser avaliada ainda por dois fatos: sua participação na Exposição Universal, realizada em Paris em 1889, quando milhares de pessoas tiveram oportunidade de apreciá-lo através de uma réplica em madeira, mandada confeccionar pelo Governo do Brasil e a visita que recebeu do eminente físico Albert Einstein quando de sua passagem pelo Rio de Janeiro em 1925.

Nos últimos 100 anos, o desenvolvimento da geoquímica, astronomia, termodinâmica e outras ciências afins que consubstanciam os estudos dos meteoritos abriu um vasto campo de pesquisa em busca de explicações sobre a origem do sistema solar e processos de diferenciação dos astros que o compõem.

Mônica Grady, atualmente professora do Center for Earth, Planetary, Space & Astronomical Research, da Open University, Londres, é autora do Catálogo de Meteoritos, edição 2000 e durante muitos anos foi Curadora da coleção de meteoritos do Museu Britânico. No artigo de abertura da coletânea de trabalhos científicos reunidos no livro *Meteorites and the Early Solar System II*, ela resumiu a importância científica dos meteoritos escrevendo em 2006:

*“Usamos os meteoritos e seus componentes para inferir todos os estágios da evolução do sistema solar, da condensação dos sólidos primordiais à agregação, alteração, diferenciação e formação de brechas.”*

### **Definições básicas e nomenclatura**

A meteorítica é uma ciência multidisciplinar que utiliza intensamente recursos e definições emprestadas da Geologia, Geoquímica, Astronomia, Física e sistemas isotópicos para estudar os meteoritos. Alguns termos utilizados para definir os principais fenômenos ligados aos meteoritos muitas vezes ganham conotação diferente em abordagens não científicas, daí a necessidade de apresentarmos as definições básicas a seguir:

- **meteoróide:** fragmento de matéria que vaga pelo espaço;
- **meteoro:** fenômeno luminoso observado quando da passagem de um fragmento diminuto de matéria pela atmosfera terrestre;
- **bólide:** fenômeno luminoso observado quando da passagem de um grande fragmento de matéria pela atmosfera terrestre;
- **meteorito:** fragmento de rocha ou de ferro de origem espacial (meteoróide) que atinge a superfície da Terra;
- **queda:** define um meteorito recuperado após manifestações de luz e de som testemunhadas;
- **achado:** define um meteorito recuperado sem que haja documentação ou relatos de sua entrada na atmosfera terrestre;

A Meteoritical Society (METSOC) é uma sociedade que reúne pessoas interessadas no estudo dos meteoritos, contando com cerca de 950 cientistas, colecionadores e curadores de museus de 33 países. A METSOCa edita um boletim trimestral, disponível na Internet (<http://www.meteoriticalsociety.org>) com os nomes e resumos das análises classificatórias de

novos meteoritos. Em 28/06/2007, havia 32.732 meteoritos registrados no banco de dados dessa organização.

A nomenclatura dos meteoritos recomenda a utilização do nome da cidade, vila, povoado ou acidente geográfico mais próximo do local da queda ou do achado, por exemplo, o Meteorito Bendegó chama-se assim porque foi achado às margens do riacho de mesmo nome. Quando a área do achado ou queda não oferece essa distinção, tais como os desertos da África e geleiras da Antártica, adota-se uma sigla e um número seqüencial para denominar os meteoritos. Por exemplo, os meteoritos coletados no continente antártico tem o seguinte padrão ALH8401, onde as três primeiras letras referem-se à região (Alan Hills, nesse caso) e os algarismos registram o ano e a ordem em que o meteorito foi descoberto (Ano 1984, primeiro meteorito coletado nessa expedição). Para os meteoritos achados nos desertos ou outros locais desprovidos de acidentes geográficos marcantes ou aglomerações urbanas, o Comitê de Nomenclatura da Meteoritical Society oferece uma relação de abreviaturas que deve ser seguida de um número seqüencial para caracterizar o achado ou queda. Exemplo Acfer 001, primeiro meteorito achado na área denominada Acfer, Argélia.

### **Amostras extraterrestres**

Os meteoritos são amostras geológicas não rotuladas de astros do sistema solar formados juntamente com a Terra há 4,5 b.a. Eles representam regiões da superfície e interior de corpos celestes, proporcionando aos cientistas, através dos resultados de análises químicas e isotópicas, informações para construção de modelos que propõem hipóteses sobre os processos de diferenciação da Terra e constituição de sua crosta, manto e núcleo.

Teoricamente todos os astros do sistema solar são potencialmente fontes de meteoritos, entretanto fatores como velocidade de escape, densidade da atmosfera e órbitas estáveis, combinados ou isoladamente, atuam como elementos restritivos para ejeção de material sólido no espaço e sua posterior colisão com a Terra.

Os meteoritos analisados até o presente têm como origem os asteróides, a Lua e Marte. É provável que os núcleos de cometas sejam também fontes de meteoritos, entretanto a carência de informações sobre a composição desses astros não permitiu ainda identificar material cometário nos fragmentos de rocha e de ferro espaciais recuperados até o momento.



Além dos meteoritos os cientistas dispõem de outras amostras de material extra-terrestres, a saber:

- rochas lunares coletadas pelos astronautas do Projeto Apolo (Estados Unidos) e pelas naves não tripuladas do Projeto Luna (Rússia) na década de 1970;
- partículas de poeira interplanetária (IDP) , coletadas na estratosfera por aviões tipo U2;
- partículas do Cometa Wild2, coletadas pelo Projeto Poeira das Estrelas (Stardust) e trazidas à Terra em 2006;
- nanodiamantes e SiC (Carboneto de Silício), considerados de origem estelar, extraídos de meteoritos carbonáceos
- Inclusões de Cálcio e Alumínio (CAI), material refratário encontrado nos meteoritos condritos e considerado com um dos primeiros sólidos resultantes da condensação da nebulosa solar.

Adicionalmente a essas amostras sólidas, os meteoritos trazem em seu interior trilhas de fissão nuclear resultantes do bombardeamento de raios cósmicos durante sua estadia no espaço, além de isótopos gerados pelos efeitos do vento solar em suas superfícies. Essas características são utilizadas para datação das idades terrestres e de exposição dos meteoritos, respectivamente o tempo de residência em nosso planeta e o tempo que passou vagando no espaço sideral após ser ejetado do astro de origem.

### **Composição química**

A maioria dos minerais que compõem os meteoritos são comuns às rochas terrestres. Aproximadamente 300 minerais já foram identificados nessas amostras espaciais, sendo 40 deles exclusivos. Os minerais mais comumente encontrados são as olivinas, os piroxênios e os feldspatos. Óxidos, fosfatos, sulfetos e carbonatos também ocorrem com frequência, embora em pequenas concentrações. Elementos nativos como o Carbono já foram isolados sob a forma de grafite e diamantes. O Ferro e o Níquel metálicos, formando uma liga de Taenita  $\alpha(\text{Ni,Fe})$  e Kamacita  $\gamma(\text{Ni,Fe})$ , estão presentes em quase todos os meteoritos, sendo a marca

registrada dessas rochas, uma vez que sua ocorrência na crosta terrestre sob a forma metálica é muito rara. A tabela seguinte sumariza os minerais mais comuns encontrados em meteoritos.

<b>Mineral</b>	<b>Descrição</b>	<b>Fórmula Geral</b>
Níquel-Ferro	Liga de Fe, Ni e Co	(Ni, Fe, Co)
Troilita	Principal sulfeto em meteoritos	FeS
Piroxênios	Enstatita, Bronzita, Hiperstênio, Diopsídio, Augita.	(Fe, Mg, Ca) SiO <sub>3</sub>
Olivinas	Comuns em meteoritos pétreos e mistos. Raras em meteoritos férreos	(Fe, Mg) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
Feldspatos/Plagioclásios	Albita, Anortita, Ortoclásio	(K,Na,Ca)(Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>

Dentre os minerais exclusivos, os principais são a Schreibersita (Fe,Ni)<sub>3</sub>P, a Osbornita (TiN) e a Oldhamita (CaS) identificados no final do século XIX.

A proporção em peso desses minerais na constituição dos meteoritos e as concentrações de elementos-traço e elementos maiores como o Fe e Ni fundamentam os sistemas de classificação atualmente vigente, sem desbancar, entretanto, a classificação estrutural adotada há 200 anos que subdivide os meteoritos em três tipos básicos: pétreos, férreos e mistos.

### **Classificação**

A primeira classificação dos meteoritos diferenciando os férreos dos pétreos foi proposta em 1807. Em 1863 foi introduzida nessa classificação o grupo de meteoritos mistos, compostos de silicatos embutidos em uma matriz de Ferro-Níquel. Baseada na composição mineralógica e características estruturais, surgiu em 1904 uma classificação abrangente com 76 tipos de meteoritos. Essa classificação é denominada sistema Rose-Tschermak-Brezina em homenagem aos três cientistas que a desenvolveram, adotando as seguintes classes: acondritos, condritos, enstatita-anortita-condritos, siderólitos, litosiderólitos, octahedritos, hexaedritos e ataxitos.

A multiplicidade de classes e suas subdivisões baseadas principalmente na mineralogia e em propriedades físicas tais como cor e veios na estrutura interna das rochas foram os principais pontos críticos da classificação Rose-Tschermak-Brezina, conforme revisão feita por Prior em 1920 propondo uma versão mais simplificada com apenas quatro classes e 19 grupos.

## Classificação de Prior – 1920

1) Condritos – subdivididos em cinco grupos de acordo o conteúdo de Fe oxidado versus Fe livre.

- a) enstatito
- b) olivina-bronzito
- c) olivina-hiperstênio
- d) olivina-pigeonito
- e) carbonáceo

2) Acondritos – subdivididos em duas categorias: ricos em cálcio e pobre em cálcio.

### Pobres em cálcio

- a) enstatito ou aubrito
- b) hiperstênio ou diogenito
- c) olivina ou chassignito
- d) olivina-pigeonito

### Ricos em cálcio

- a) augita ou angrito
- b) diopsídio-olivina ou nakhalito
- c) piroxênio-plagioclásio ou eucrito, howardito, shergortito

3) Mistos (stony-irons) – classificados conforme a natureza de seus minerais.

- a) olivina ou palasito
- b) bronzita-tridimita ou siderófilo
- c) bronzita-olivina ou lodranito
- d) piroxênio-plagioclásio ou mesossiderito

4) Féreos – divididos conforme o conteúdo de Ni e largura das lamelas de Kamacita.

- a) hexahedrito – Ni entre 4-6%
- b) octahedrito – Ni entre 6-14%
- c) ataxito – Ni maior que 14%

## **Classificação moderna – 2005**

A análise dos meteoritos evoluiu muito nos últimos 80 anos, construindo-se sistemas de classificação mais detalhados que levam em conta as semelhanças dos meteoritos em termos de sua mineralogia, petrografia, geoquímica e isótopos de oxigênio.

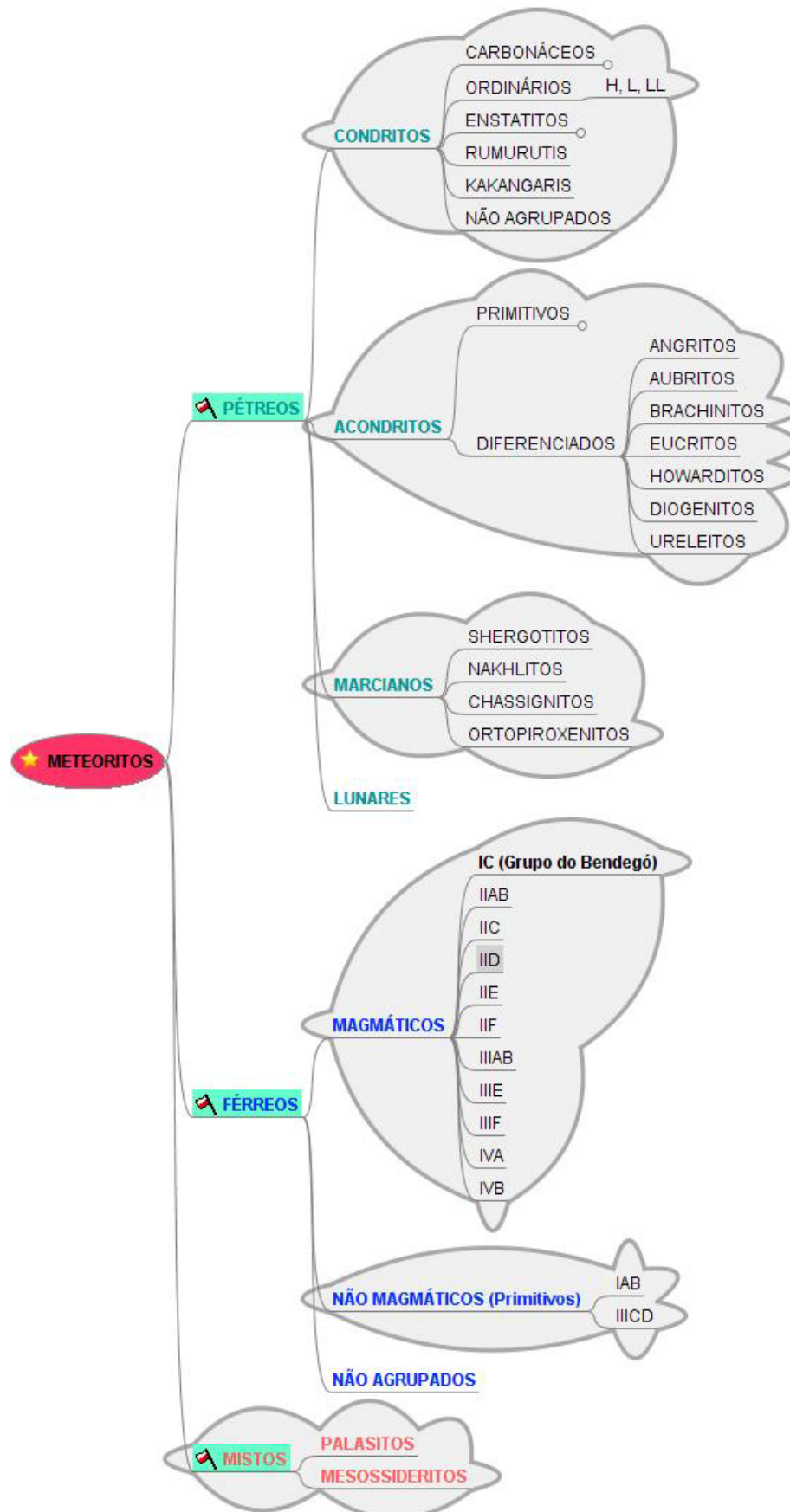
A classificação moderna dos meteoritos tem como objetivo reunir em grupos distintos meteoritos de origem similar histórico de formação parecidos de forma a revelar prováveis relacionamentos genéticos que apontam para um determinado tipo de astro (planeta ou asteróide) como possível fonte primária.

Nessa classificação os meteoritos são agrupados em duas classes principais: condritos e não condritos. O primeiro grupo subdivide-se em carbonáceos, ordinários, enstatitos, similares ao Rumurati, similar ao Kakangari e não agrupados.

O grupo dos não condritos tem dois subgrupos: primitivos e diferenciados. Os primitivos subdividem-se em acapulcoitos, lodranitos e winonaitos. Os diferenciados são os acondritos, mistos (pétreos-férreos), férreos, marcianos, lunares e não agrupados.

O diagrama seguinte apresenta a classificação atualmente vigente, traduzida e adaptada do artigo Classification of Meteorites, de Krot, Keil, Goodrich, Scott e Weisberg .

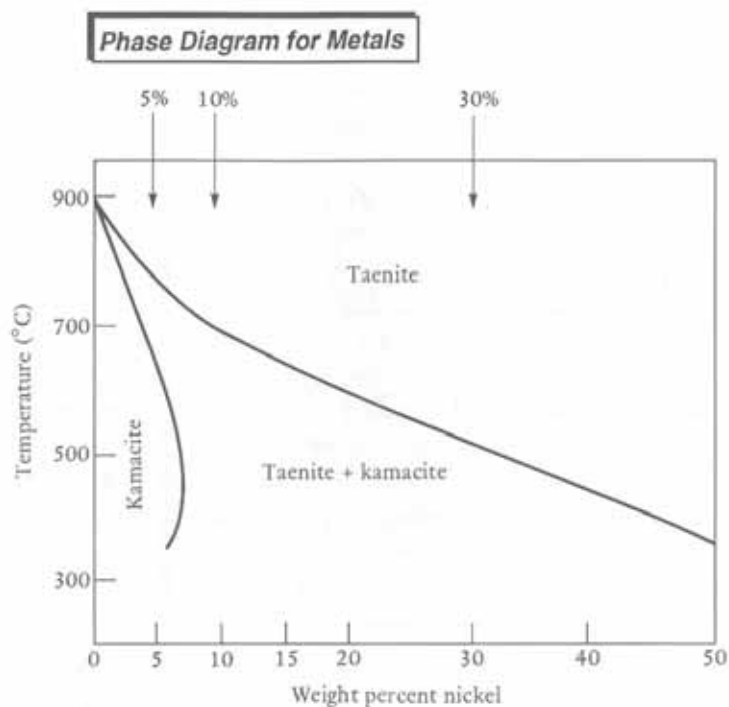
## Classificação Moderna dos Meteoritos



## Meteoritos férreos

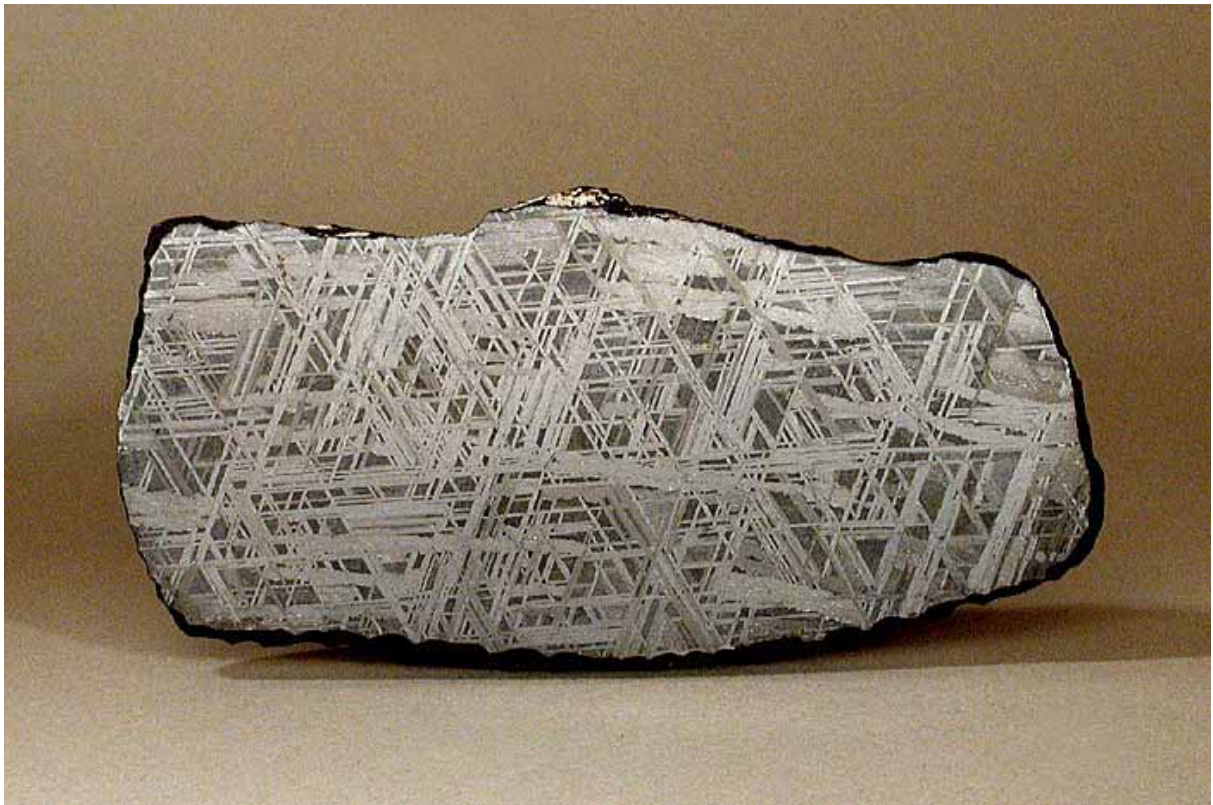
Entre os meteoritos férreos do Brasil, destaca-se o Bendegó achado em 1784 e transportado da Bahia para o Rio de Janeiro em 1888, conforme vimos na Introdução. A geoquímica e geocronologia desse meteorito é o objeto da proposta de dissertação integrante do curso de Mestrado em Geologia, iniciado pelo autor neste semestre. Por essa razão, estamos enfatizando essa classe de meteoritos neste Seminário de Petrologia, Metalogênese e Exploração Mineral, em detrimento de um maior aprofundamento das características dos meteoritos pétreos e mistos.

A hipótese mais consistente com a formação da maioria dos meteoritos férreos tem como base de sustentação processos de diferenciação química de um líquido de natureza condritica. Aproximadamente aos 900° C o metal existente nesse líquido primitivo formou uma solução sólida de Taenita [ $\alpha(\text{Ni,Fe})$ ] e Kamacita [ $\gamma(\text{Ni,Fe})$ ]. A composição química final do meteorito depende do conteúdo original de Ni uma vez que a solução sólida exsolve-se por difusão de átomos desse elemento, sendo mais vigorosa a temperaturas elevadas e cessando por volta dos 500° C conforme diagrama abaixo:



O crescimento dos cristais de Kamacita e Taenita é uma função da taxa de resfriamento da liga Fe-Ni e a largura das lamelas do primeiro mineral é utilizado em modelos para cálculo do tempo que a solução sólida dispendeu resfriando-se até os 400° C, permitindo por esse método inferir a profundidade e tamanho do astro que abrigava a massa metálica.

As lamelas de Kamacita crescem em áreas específicas dos cristais da Taenita, truncando a matriz cúbica cristalina em ângulos de 45° nos oitos pontos de junção das arestas. Quando uma área do meteorito metálico é polida e atacada por um ácido forte aparecem linhas claras e escuras formando um arranjo geométrico denominado Padrão de Windmanstatten



Há dois sistemas de classificação dos meteoritos férreos: estrutural e químico. O primeiro é baseado no conteúdo de Ni e na largura das lamelas de Kamacita que variam de 0,2 a mais de 50 mm. Essa classificação estrutural é conhecida desde o final do Século XIX sendo formada por três grandes grupos: hexahedrito, octahedrito e ataxito. O grupo octahedrito, por sua vez, é subdividido em seis subgrupos conforme a largura da lamela de Kamacita em muito grosso, grosso, médio, fino, muito fino e plessítico.

### Classificação Estrutural dos Meteoritos Férreos

Grupo	Sigla	Largura da Lamela (mm)	% Ni
Hexahedrito	H	>50,0	4,5 – 6,5
Octahedrito	O		
Muito grosso	Ogg	3,3 – 50,0	6,5 – 7,2
Grosso	Og	1,3 - 3,3	6,5 – 7,2
Médio	Om	0,5 - 1,3	7,4 – 10,3
Fino	Of	0,2 - 0,5	7,8 – 12,7
Muito fino	Off	<0,2	7,8 – 12,7
Plessítico	Opl	<0,2	Kamacita fusiforme
Ataxito	D	Sem estrutura	>16,0

Fonte: Norton (2002), The Cambridge Encyclopedia of Meteorites

A classificação química dos meteoritos férreos foi desenvolvida entre os anos de 1967 e 1977 por John Wasson e seus colegas da Universidade da Califórnia, Los Angeles, através de uma série de oito artigos que estabeleceram treze grupos cogenéticos. Essa classificação tem por base o conteúdo de Ni e a concentração dos elementos-traço Ge, Ga e Ir em relação a esse metal. Além desses elementos utiliza-se adicionalmente a concentração do Au, As, P e Ir para resolver casos em que ocorre sobreposição de áreas nos gráficos. Foram analisados mais de 600 meteoritos, usando-se a técnica de Ativação por Irradiação de Nêutrons e análises através de micro-sonda da largura das lamelas do componente Kamacita da liga Fe-Ni, registrando-se cerca de 100 meteoritos que não puderam ser enquadrados em nenhum dos treze grupos cogenéticos, sendo classificados como anômalos.

A primeira distinção dessa classificação é a subdivisão dos meteoritos férreos em magmáticos ou diferenciados e não magmáticos ou primitivos. Norton (2002) define meteoritos magmáticos como “*aqueles cuja inclinação das linhas de tendência de seus elementos em relação ao Ni são consistentes com a possibilidade de terem sido formados por cristalização fracionada.*” Dodd (1986), esclarece que os meteoritos férreos magmáticos são aqueles formados através da cristalização fracionada de magmas lentamente resfriados, enquanto os não magmáticos foram formados através da segregação de cristais em líquidos rapidamente resfriados e contêm abundância de inclusões silicáticas.



Os treze grupos cogenéticos de meteoritos férreos obedecem a uma nomenclatura representada por algarismos romanos de I a IV, que identificam quatro grandes classes criadas por John Lovering (1957) após analisar as concentrações de Ga, Ge e Ni em 88 meteoritos. Os estudos de John Wasson (1967-1977) e seus colegas da UCLA mantiveram as quatro classes originalmente propostas por Lovering, acrescentando letras maiúsculas para diferenciar os treze grupos genéticos encontrados.

### Classificação Química dos Meteoritos Férreos

Grupo Químico	Quant. (2002)	Frequência %
IAB	139	19,69
IC	11	1,56
IIAB	109	15,44
IIC	8	1,13
IID	17	2,41
IIE	18	2,54
IIF	5	0,71
IIIAB	258	36,54
IIICD	42	5,95
IIIE	13	1,84
IIIF	8	1,13
IVA	65	9,21
IVB	13	1,85
<b>Total</b>	<b>706</b>	<b>100,00</b>

Fonte: Catalogue of Meteorites (2002)

O grupo mais numeroso é o IIIAB com 258 espécimes, seguido pelos grupos IAB com 139 exemplares e IIAB com 109. Esse três grupos representam mais de 2/3 (71%) de todos os meteoritos férreos catalogados até 2002.

Segundo Wasson e Kallemeyn (2001) os grupos IIAB, IIIAB e IVA foram formados por processos de cristalização fracionada de um magma que se resfriou muito lentamente. Meteoritos gerados por esse processo são definidos como magmáticos. A origem dos meteoritos do grupo IAB, considerados como não magmáticos, ainda é assunto em discussão,

admitindo-se que tenham sido formados a partir de líquidos gerados por impactos, haja vista não apresentarem significativos efeitos dos processos de partição sólido/líquido.

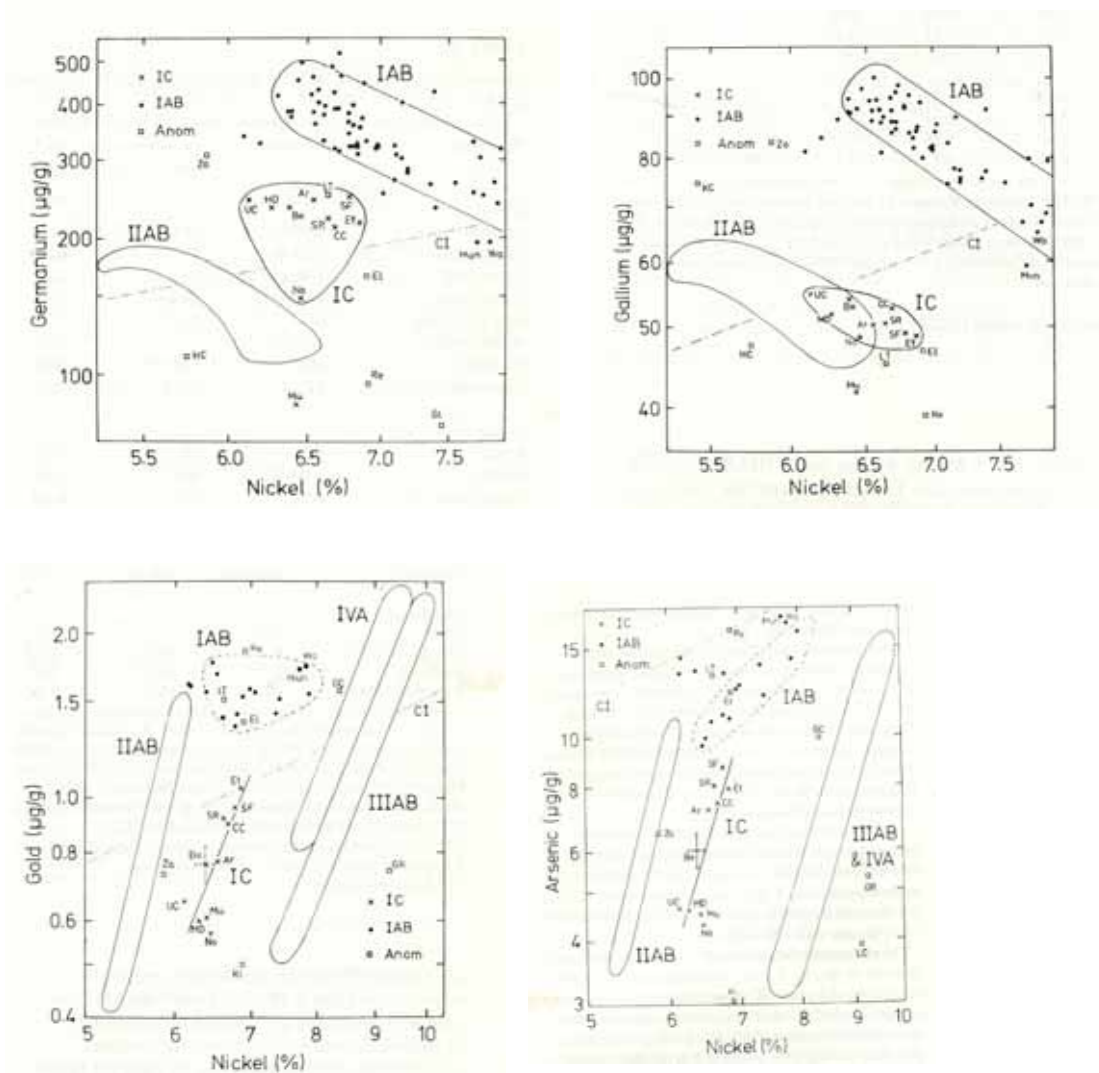
### Grupo IC

O grupo IC inclui o meteorito Bendegó e mais dez espécimes conforme a seguinte tabela:

**Meteoritos do Grupo Químico IC**

Meteorito	País	Peso (kg)	Ni % Wt	Ga ppm	Ge ppm	Ir ppm
Arispe	México	307	6,54	50,30	243,0	9,70
Benedegó	Brasil	5.360	6,39	54,00	234,0	0,20
Chihuahua	México	54	6,68	52,70	212,0	0,11
Etosha	Namíbia	110	6,85	48,90	217,0	0,10
Mount Booling	Austrália	733	6,26	52,00	234,0	1,20
Murnpeowie	Austrália	1.143	6,42	41,80	85,0	1,80
Nocoleche	Austrália	20	6,45	48,60	148,0	7,30
Santa Rosa	Colômbia	820	6,63	50,60	222,0	0,07
St. François County	Estados Unidos	7	6,77	49,20	247,0	0,11
Union County	Estados Unidos	3	6,12	54,80	245,0	2,10
Winburg	África do Sul	50	6,98	51,80	180,0	0,89

Os gráficos referentes à concentração de Ga e Ge em relação ao Ni mostram claramente que o grupo IC situa-se entre o IA e IIAB, constituindo uma classe à parte. Nota-se no gráfico de dispersão do Ga em relação ao Ni que há uma superposição dos campos referentes aos meteoritos do Grupo IC e IIAB. As linhas de tendência encontradas para as concentrações de outros elementos-traço (Au, Ir, As, P) demonstram uma boa correlação, resolvendo aquele conflito da superposição e corroborando a proposta de Wasson e Scott para criação de um novo grupo com meteoritos anteriormente considerados anômalos, conforme gráficos abaixo, emprestados da monografia *Composition, Mineralogy and Origin of Group IC Iron Meteorites* (1977, de E. R. D. Scott).



Em termos de mineralogia, Scott reporta abundância de Coenita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) com inclusões de Kamacita e Taenita. A presença do carboneto Hexonita ( $\text{Fe}_{2,3}\text{C}_6$ ) no meteorito Bendegó foi assinalada por Buchwald, em seu Handbook of Iron Meteorites (1975).

Inclusões de Troilita ( $\text{FeS}$ ) são comuns nos meteoritos desse grupo, assim como foram encontradas diminutas quantidades de nitrato de Cromo, Carlsbergite ( $\text{CrN}$ ).

Por seu turno, a textura mineral dos espécimes do grupo IC é muito variada, dificultando a utilização de modelos para cálculo da taxa de resfriamento baseados na largura das lamelas de Kamacita e conteúdo de Ni. Para os meteoritos Arispe e Bendegó o método Goldstein-Short forneceu uma taxa de resfriamento de  $3^\circ$  e  $9^\circ \text{ C m.a.}^{-1}$  respectivamente. O método de Wood aplicado ao meteorito Arispe resultou em uma taxa de resfriamento de  $8^\circ \text{ C m.a.}^{-1}$ . Esses resultados são coerentes com os limites de taxas de resfriamento para meteoritos do tipo

octahedritos, entretanto outros exemplares desse grupo, como o Santa Rosa, apresentaram taxas de resfriamento da ordem de  $10^{30}$  C m.a.<sup>-1</sup>. As taxas de resfriamento a partir dos 900° C encontradas por Scott (1977) nos dez meteoritos do grupo analisados por ele variam de 1° a  $10^{40}$  C m.a.<sup>-1</sup>. Segundo esse autor, essa variação não se correlaciona com o fracionamento químico do Ni, Ga, Ge, Au, As, Ir e W, sugerindo que as massas que deram origem a esse meteorito resfriaram-se a profundidades diferentes em um mesmo astro, requerendo assim a atuação de algum mecanismo para redistribuí-las. Essa redistribuição pode ter sido causada por um grande impacto que fragmentou o astro-pai e dispersou em diferentes profundidades fragmentos de seu núcleo ainda quente.

## **Conclusões**

Os meteoritos férreos são amostras do núcleo de asteróides formados há 4,5 b.a. e sua disponibilidade em nossos laboratórios proporciona aos cientistas o único meio de tocar, ver e analisar com instrumentos sofisticados material similar ao que se encontra no centro da Terra, numa região entre 2.900 e 6.400 km de profundidade.

Os modelos criados para simular a diferenciação química dos astros do sistema solar têm como premissa que os mesmos foram formados por acreção de material condrítico, posteriormente aquecidos ao ponto de fusão.

Uma vez no estado líquido esse material sofreu diferenciação química e separação mecânica por gravidade, vindo a constituir nos asteróides e planetas três partes distintas: núcleo, manto e crosta.

Esse modelo explica de forma satisfatória a formação da maioria dos meteoritos férreos, entretanto ele não explica a grande variação das taxas de resfriamento calculadas para os membros do grupo IC e o fato de que a inclinação das linhas de tendência dos elementos dos grupos IAB e IIIC em relação ao Ni não são consistentes com a possibilidade de terem sido formados por cristalização fracionada.

## Referências

- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F., and Michel, H., 1980, Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction: *Science*, Vol. 208, pp. 1095- 1108.
- Dodd, R. T. (1986) *Thunderstones and Shooting Stars - The Meaning of Meteorites*. Harvard University Press. 196 pp.
- Grady, M. M. (2006) *Types of Extraterrestrial Material Available for Study in Meteorites and the Early Solar System II*. The University of Arizona Press, pp 3-17
- Krot A. N., Keil K, Goodrich C.A., Scott E. R. D. e Weisberg M. K. (2005) *Classification of Meteorites in Meteorites, Comets, and Planets, Treatise of Geochemistry Vol. I* pp 83-127.
- Mason, B. (1962) *Meteorites*. John Wiley & Sons, Inc. 274 pp.
- McSween Jr., Harry Y. (2000) *Meteorites and Their Parent Planets*. 2<sup>a</sup> edition. Cambridge University Press. 310 pp.
- Norton, O. R. (2002) *The Cambridge Encyclopedia of Meteorites*. Cambridge University Press. 354 p.
- Scott, E. R. D. *Composition, Mineralogy and Origin of Group IC Iron Meteorites*. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 37, pp. 273-284, 1977.
- Scott, E. R. D. e Wasson, J. T. *Chemical classification of iron meteorites - VIII. Groups IC, IIE, IIIF and 97 other irons*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 40, pp. 103-115, 1976.
- Wasson, J. T. (1974) *Meteorites - Classification and Properties*. Springer 316 p.
- Wasson, J. T. e Kallemeyn, G. W. *The IAB iron-meteorite complex: A group, five subgroups, numerous grouplets, closely related, mainly formed by crystal segregation in rapidly cooling melts*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 66, Nº 13pp. 2445-2473, 2002.
- Wasson, J. T., Choi, B-G, Jerde, E. A. e Ulf-Moller, F. *Chemical classification of iron meteorites - XII. New members of the magmatic groups*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 62, pp. 715-724, 1998.
- Wasson, J. T., Huber, H. Malvin, D. *Formation of IIAB iron meteorites*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 71, pp. 760-781, 2007.