

Aplicação da difração de Raios X para caracterização mineralógica de meteoritos: conceitos físicos e os processos experimentais

RESUMO

Bruno leonardo do Nascimento Dias
bruno.astrobio@gmail.com
orcid.org/0000-0002-3632-9073
Universidade Federal de Juiz de Fora,
Departamento de Física
Campus Juiz de Fora

A técnica de difração de raios X (DRX) sempre foi bastante utilizada na caracterização de rochas terrestres, porém cada vez mais vem sendo utilizada na caracterização de meteoritos por brasileiros. Dessa maneira, o objetivo deste trabalho é apresentar de forma sintetizada e simples os conceitos gerais DRX para iniciantes ou para leitores que queiram saber sobre técnicas analíticas alternativas para identificação de minerais. Assim, não faz parte da proposta ter um aprofundamento detalhado da técnica, sendo que para maiores especificidades, os leitores poderão obter através de materiais complementares e com assistências de técnicos mais especializados no equipamento aquilo que for de seu interesse. Por fim, será apresentado alguns espectros obtidos por intermédio da utilização da técnica em um meteorito marciano e explicado de forma sucinta os resultados. Espera-se com isto, que este venha servir de material inicial e de apoio para estudantes que estejam começando a desenvolver interesses científicos e estejam procurando conceitos físicos de difração de raios X e sua aplicabilidade.

Palavras-Chave: DRX; Minerais; Meteorito marciano.

INTRODUÇÃO

A Difração de Raios X tem como finalidade fornecer as características estruturais das amostras. Nesta técnica são gerados dados com informações sobre a matriz cristalográfica das amostras e com base nisto é possível atribuir os tipos de constituintes mineralógicos que podem estar presentes nas amostras. Um dos processos que deram origem à técnica de DRX foi observado pela primeira vez em 1894, pelo físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen (NASCIMENTO-DIAS *et al.*, 2017; SAITOVITCH, 1995). Segundo Saitovitch, por meio dos raios catódicos, Roentgen observou experimentalmente a geração de uma radiação, que por conta de sua natureza desconhecida foi chamada por ele de **raios X**. No entanto, tal como foi mencionado a natureza eletromagnética dos raios X, durante esta época, ainda não estava estabelecida de forma sólida.

Foi apenas por volta de 1912, que o físico alemão Max von Laue, juntamente com Friedrich e Knipping, conseguiram obter o primeiro difratograma de difração, se baseando nos estudos de Ewald sobre cristais. Vale ressaltar que ainda durante esta época, William Henry Bragg e William Lawrence Bragg formularam uma equação, a qual se conhecendo as distâncias interplanares, seria possível determinar a estrutura cristalina do material (AGUILAR-MARÍN *et al.*, 2020).

Estes princípios regem até hoje, de maneira geral, a técnica de DRX. Esta técnica analítica, inclusive, tem sido cada vez mais utilizada na caracterização de rochas terrestres por diversos cientistas (físicos, químicos, geólogos e engenheiros), por empresas e até por agências espaciais como a NASA e a Agência Espacial Europeia (ESA, sigla em inglês). No entanto, os materiais em português são bastante escassos para iniciantes, tais como alunos de graduação ou para alguns discentes de pós-graduação que estejam utilizando DRX como técnica complementar e alternativa em suas pesquisas.

Dessa forma, se tornam cada vez mais imprescindíveis informações sobre a técnica de difração de raios X e o que ela pode proporcionar. Vale salientar que a DRX é uma técnica semi-destrutiva e o pó do material utilizado em suas análises pode ser reutilizado em outras técnicas analíticas complementares como Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Espectroscopia Raman, Cromatografia e outras. Por fim, a proposta deste artigo é apresentar uma revisão breve dos conceitos mais gerais da técnica de difração de raios X, assim como um exemplo de aplicação a partir de um difratograma gerado pela análise de um meteorito marciano.

METODOLOGIA

PRINCÍPIOS BÁSICOS DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A difração de raios X é um processo decorrente de uma dispersão coerente em que a mudança de comprimento de onda é muito pequena, de modo que a interação pode ser considerada elástica. Nesse tipo de interação, o fóton muda apenas a sua trajetória após a colisão, porém mantém a mesma fase e a mesma energia da radiação incidente (DA SILVA, 2020; JENKINS, SNYDER, 1996; KAPLAN, 1978).

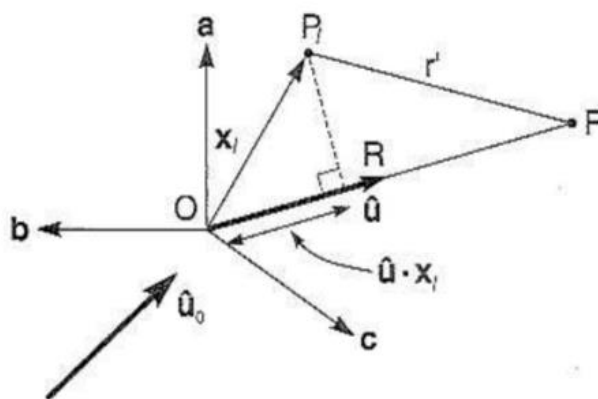
De forma geral, pode se dizer que o fenômeno da difração de raios X ocorre quando a radiação incidente possui um comprimento de onda comparável ao espaçamento entre os elementos da rede. É importante salientar que os átomos que compõem o material analisado precisam estar arranjados de forma ordenada, como em uma estrutura cristalina. Nestes casos, é possível observar ondas transmitidas por dois ou mais planos em fases de interferências construtivas periodicamente, tendo com isto um feixe difratado (CULLITY & STOCK, 2001).

Um cristal ideal é formado por átomos distribuídos sobre uma rede periódica tridimensional. A rede pode ser gerada a partir de três vetores de base não-coplanares **a**, **b**, **c**, que representam períodos de translação da rede. Vale frisar que não é unívoca a escolha desses vetores, sendo o vetor posição de um ponto arbitrário da rede dado pela forma (NUSSENZVEIG, 2013):

$$x = na + pb + qc \quad (1)$$

em que *n*, *p* e *q* são números inteiros que constituem os pontos de coordenadas no referencial (a, b, c), tal como mostra na **Figura 1**, em que \hat{u} é o versor da direção de incidência que ao incidir sobre um átomo na posição “*P*”, produz uma onda espalhada (difratada) que, num ponto de observação “*P*” a grande distância do cristal (NUSSENZVEIG, 2013).

Figura 1 – Espalhamento por um átomo num cristal



Fonte: Nussenzveig (2013).

Com base nessas informações ao considerar um feixe colimado de raios X incidente sobre um cristal, este pode ser representado por uma onda plana:

$$v_0(r) = Ae^{ik\hat{u}_0 r} \quad (2)$$

Porém, somando-se todas as contribuições de todos os átomos do cristal, de acordo com Nussenzveig (2013), obtém-se a onda total em *P*:

$$v(P) = \sum_l v_l(P) = A \frac{e^{ikR}}{R} f_l(\hat{u}) \sum_l e^{-ik(\hat{u}-\hat{u}_0)x_l} \quad (3)$$

em que o somatório é uma soma tripla sobre $l = (n, p, q)$. É válido ressaltar que a intensidade espalhada por um só átomo do cristal, chama-se fator de forma atômico, sendo dado por (NUSSENZVEIG, 2013):

$$\Delta a = k (\hat{u} - \hat{u}_0).a ; \Delta b = k (\hat{u} - \hat{u}_0).b ; \Delta c = k (\hat{u} - \hat{u}_0).c \quad (4)$$

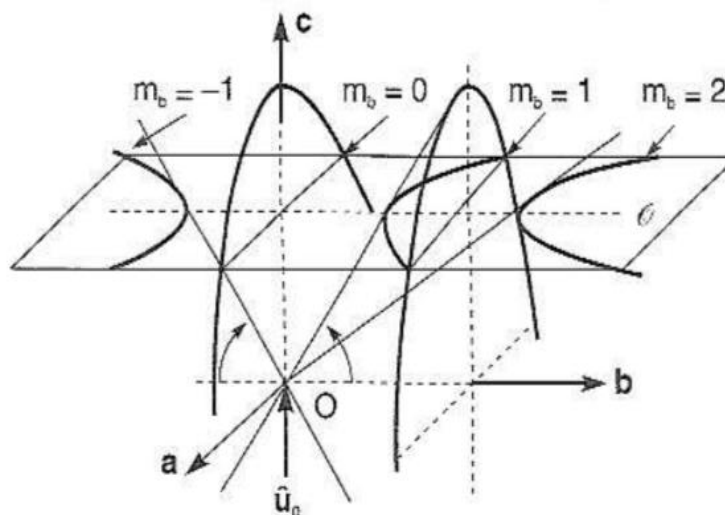
Segundo Nussenzveig, é possível realizar a generalização tridimensional, em que o fator de interferência é o produto de 3 fatores análogos ao último fator da seguinte expressão:

$$I(\alpha) = I_l(\alpha) \cdot \frac{\text{sen}^2(N\frac{\Delta}{2})}{\text{sen}^2(\frac{\Delta}{2})} \quad (5)$$

Os máximos principais são definidos por três condições simultâneas de interferência construtiva: $\Delta a = 2m_a\pi$; $\Delta b = 2m_b\pi$; $\Delta c = 2m_c\pi$. Importante frisar que m_a, m_b, m_c são números inteiros e equivalentes: $(\hat{u} - \hat{u}_0).a = \lambda m_a$; $(\hat{u} - \hat{u}_0).b = \lambda m_b$; $(\hat{u} - \hat{u}_0).c = \lambda m_c$ conhecidas como condições de Laue (NUSENZVEIG, 2013).

Para cada um desses termos m_a, m_b, m_c são definidos um conjunto de direções que formam um ângulo constante com um dos eixos. A direção de um máximo principal deve ser uma geratriz comum aos três cones, tal como representados na **Figura 2** com o eixo b associados a $m_b = 1, 0$ e -1 [para $m_b = 0$, o cone degenera no plano (a,c)] (NUSENZVEIG, 2013).

Figura 2 - Interpretação geométrica das condições de Laue

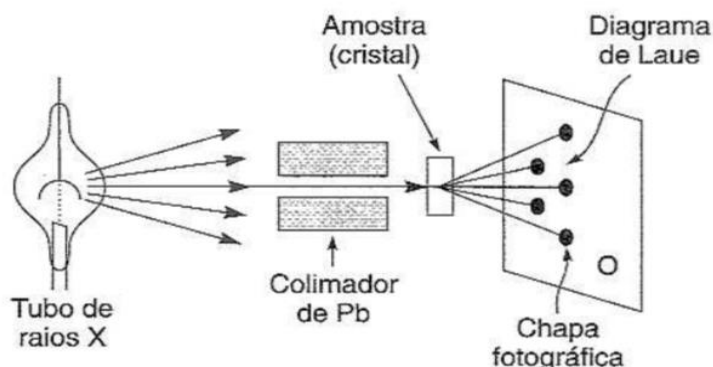


Fonte: Nussenzveig (2013).

As famílias de hipérboles associadas aos pares (m_a, m_b) , que representariam a figura de difração de uma rede bidimensional são representadas na **Figura 3** como pontos de interseção que satisfazem as duas primeiras condições de Laue. Assim, para cada λ não haverá em geral pontos de interseção comuns às três famílias de curvas (NUSENZVEIG, 2013).

No entanto, caso seja incidido sobre o cristal um feixe contínuo de raios X, como o que resulta do frenamento de um feixe de elétrons acelerados, de acordo com Nussenzveig (2013), o cristal selecionará os valores discretos de λ para os quais há interseções comuns às 3 famílias de curvas (satisfazendo às 3 condições de Laue). Com isso aparecerá as chamadas **manchas de Laue**, que estão associadas a estas direções. Assim, essas manchas refletem a simetria interna do cristal analisado (**Figura 3**).

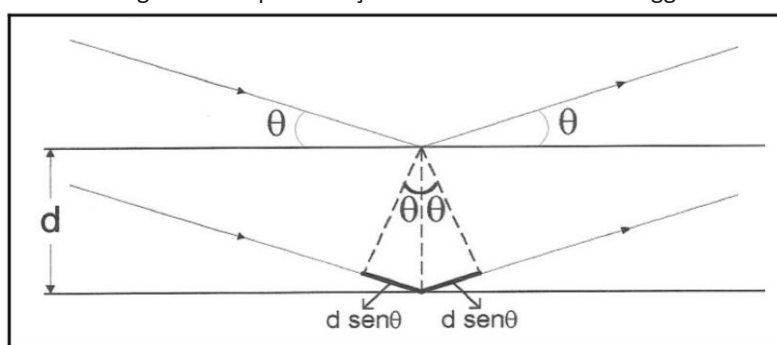
Figura 3 - Esquema pictórico do dispositivo para difração de raios X



Fonte: Nussenzveig (2013).

Em 1912, Friedrich e Knipping usando o dispositivo experimental conseguiram obter resultados que confirmaram as previsões de Laue e o carácter das ondas eletromagnéticas dos raios X. Posteriormente, William Henry Bragg e seu filho William Lawrence Bragg, desenvolveram uma nova metodologia de observação de difração de raios X através da do que se conhece como radiação X monocromática. Os Braggs utilizaram da variação dos ângulos de incidência (por rotação do cristal) até que fosse possível obter os máximos principais. Com base nessas condições foi possível mostrar que as condições de Laue podem ser interpretadas como se fossem reflexões espaciais dos raios X. Conforme Nussenzveig (2013), seguindo essas condições, para que haja interferência construtiva entre essas **reflexões espaciais dos raios X** e a **reflexão** por um átomo correspondente do plano vizinho da família, à distância d , é preciso que a diferença de caminho $2d\text{sen}\theta$ seja um múltiplo inteiro de λ (ou seja, $n\lambda = 2d\text{sen}\theta$) (**Figura 4**). É possível mostrar que a condição de Bragg é equivalente às condições de Laue, mas não será desenvolvido aqui, pois a demonstração não é simples.

Figura 4 – Representação ilustrativa da Lei de Bragg



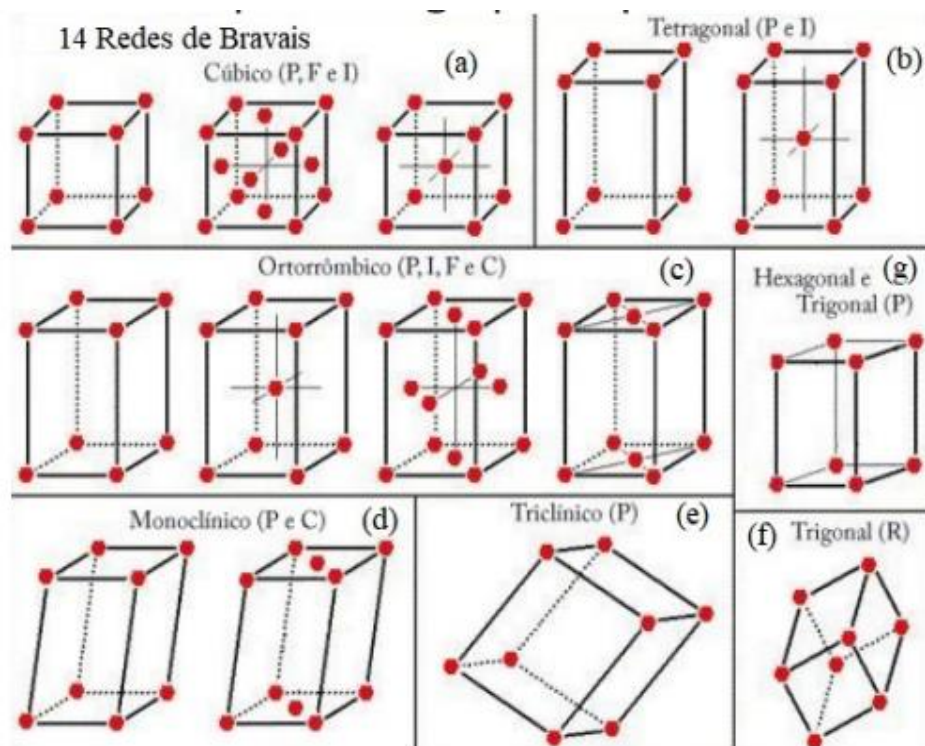
Fonte: Cullity e Stock, 2001.

Têm-se que (d) é a distância interplanar para o conjunto de planos (hkl) é unicamente determinada por três pontos não colineares do plano. Para cada ponto, a interseção do plano com cada um dos três eixos cristalinos, o plano pode ser determinado fornecendo-se a coordenada da interseção com cada eixo em função dos vetores da base, a_1 , a_2 e a_3 . Para os casos em que o plano é paralelo ao eixo, toma-se a interseção como sendo no infinito (NUSSENZVEIG, 2013).

Em uma estrutura cristalina é necessário fazer referência a determinados planos de átomos, que para determinados estudos pode haver interesse em conhecer a orientação cristalográfica. Nesses casos, os planos cristalográficos de estruturas cristalinas são definidos pelo sistema de notação de Miller. Os índices de Miller são uma notação utilizada em cristalografia para definir famílias de planos cristalográficos definidos como os inversos das interseções fracionárias (com as frações reduzidas ao mesmo denominador) que o plano faz com os eixos cristalográficos (x), (y) e (z) coincidentes com três arestas não paralelas da célula unitária cúbica. As arestas da célula unitária representam comprimentos unitários e as interseções do plano são medidas em termos destes comprimentos unitários.

Outro conceito fundamental na descrição de qualquer sólido cristalino é a rede de Bravais (**Figura 5**), a qual é caracterizada pela especificação de todas as operações rígidas que preservam a distância de todos os pontos de rede e que transformam a rede nela própria (ASHCROFT, 1976) a partir do ponto de vista de simetria. Assim, as operações que o grupo apresenta são (1) translações por meio de vetores, (2) operações que fixam um ponto particular da rede e (3) operações sucessivas do tipo (1) e do tipo (2) (XAVIER, SARVEZUK, 2017).

Figura 5 – Sete sistemas cristalinos



a) cúbica b) tetragonal c) ortorrômbico d) monoclínico e) triclínico f) trigonal g) hexagonal.
Fonte: Ashcroft (1976).

Aqui é válido salientar que na difração de raios X, as variáveis λ , n e θ são conhecidas, uma vez que a radiação utilizada deve ser monocromática (único comprimento de onda), o ângulo θ pode ser medido no padrão de difração (difratograma) e o número n é característico para cada plano cristalográfico do cristal. Desta forma, passa a ser o único valor não determinado (KAHN, 2000). O valor das distâncias interplanares são como assinaturas características próprias de

cada substância ou material, tal como índices de refração, densidade, ângulo óptico e outras constantes.

Dessa forma, cada pico de um difratograma representa a intensidade da radiação difratada por um conjunto de planos cristalinos que possuem a mesma distância interplanar. O padrão difratométrico de um material cristalino pode ser entendido, então, como um conjunto de picos individuais cujos parâmetros (intensidade, posição, largura, forma e área) são dependentes do tipo de átomos e de sua posição no agrupamento atômico repetitivo que forma um cristal. Dessa forma, o difratograma funciona como uma impressão digital que permite a identificação das fases cristalinas da amostra (CULLITY, STOCK, 2001; FORMOSO, 1984).

Em um **espectro de Bragg** para raios X, o cristal é montado sobre uma plataforma giratória que permite variar o ângulo de incidência θ . Este é o método desenvolvido para este trabalho, em que consiste em ajustar no difratograma obtido diversos difratogramas padrões que permitem relacionar a estrutura cristalina estudada com estruturas conhecidas (LUTTEROTTI *et al*, 2019; ZHOU *et al*, 2018; ANIS *et al*, 2018; CORREA, ARAÚJO FILHO, FONTES, 2017). É importante destacar que os padrões de DRX são constituídos por picos de difração em diferentes posições angulares. Dessa forma, eles se formam por um escaneamento do ângulo incidente e de detecção (2θ) dos feixes de raios X que incidem sobre as amostras. O método Rietveld consiste na aplicação matemática do método dos mínimos quadrados para refinar os perfis teóricos dos picos de difração até que esses perfis estejam muito próximos dos perfis experimentais (XAVIER, SARVEZUK, 2017).

Por fim, outra maneira de coletar dados de difração de raios X é o método de pó microcristalinos de Debye e Scherrer, em que o cristal é pulverizado, de modo a constituir um agregado de micro cristais cujas faces estão orientadas ao acaso. Conforme Nussenzveig (2013), por simetria, a figura de difração correspondente é formada de anéis concêntricos.

A TÉCNICA DE DRX E AS CONCEPÇÕES EXPERIMENTAIS

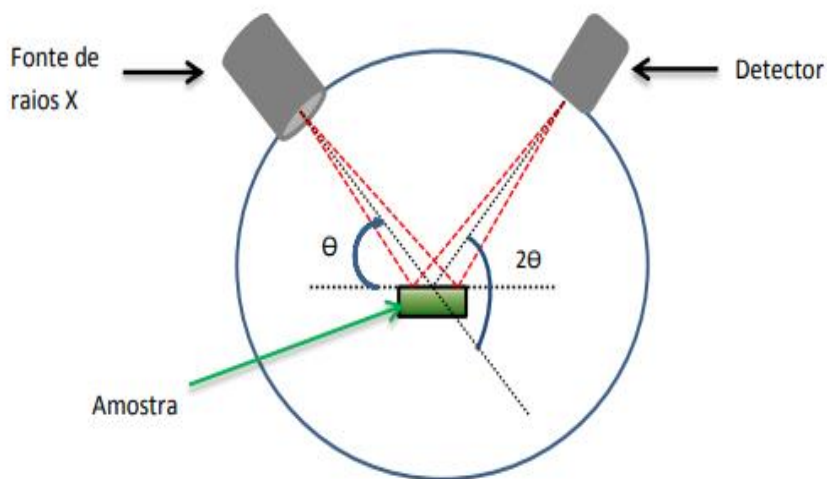
O equipamento de difração de raios X, também conhecido como difratômetro, é constituído basicamente por um goniômetro, um tubo de raios X, uma porta amostras onde incide a radiação e um detector cujo eixo contém a amostra e gira no plano de incidência (CULLITY, STOCK, 2001). Em geral, a radiação emitida pelo tubo de raios X possui as linhas $K\alpha$ e $K\beta$ características do anodo. Destes são selecionados apenas fótons referentes à linha $K\alpha$, de modo que para atenuar os efeitos da linha $K\beta$ é utilizado um filtro (CULLITY, STOCK, 2001; KAHN, 2000; FORMOSO, 1984).

Então, utilizando destes parâmetros de seleção usa-se a radiação com energia dada pela linha $K\alpha$, menos energética que a da linha $K\beta$, para incidir sobre a amostra. Esta após incidir sofre difração causada pelos fatores mencionados na seção anterior. A intensidade da radiação espalhada é assim medida para diferentes ângulos de espalhamento (KAHN, 2000)

De modo geral, os difratômetros mais comuns apresentam geometria Bragg-Brentano. Nessa geometria o goniômetro e o suporte da amostra são acoplados de forma que quando o eixo da fonte gira de um ângulo θ , simultaneamente o eixo

do detector que coleta os dados da difração desloca-se de 2θ semelhante ao esquema representado na **Figura 6**.

Figura 6 – Representação ilustrativa de um difratômetro



Fonte: o autor

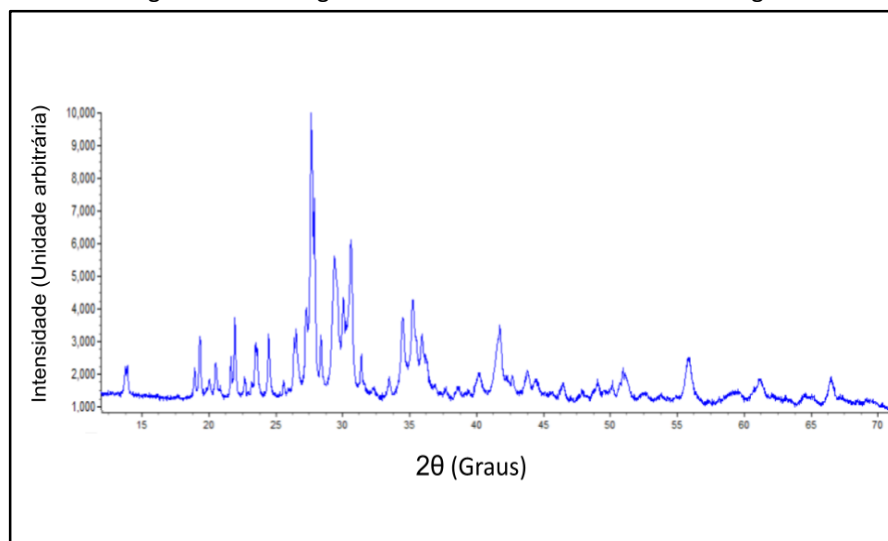
Em geral, uma medida preliminar quase sempre é feita para identificar os picos de maior destaque. Essa identificação é importante para que o programa de aquisição Diffrac.Eva v3 possa calcular o tempo de aquisição necessário. A intensidade da radiação difratada foi obtida para ângulos de espalhamento entre 10° e 90° , com passo de varredura de $0,02^\circ$, e tempo de aquisição de 2,5s por passo. As medidas foram realizadas a temperatura ambiente.

RESULTADOS

Apesar da simplicidade com que a técnica de difração de raios X será abordada aqui, estudos bem mais técnicos e específicos mostram que essa técnica, quando usada em sua plenitude, fornece subsídios para caracterização detalhada de inúmeros materiais, principalmente para amostras de monocristal ou estruturas cristalinas mais complexas (ANIS *et al.*, 2018; HE *et al.*, 2018; MCDONALD *et al.*, 2020, MADDALI *et al.*, 2020). Para a demonstração de aplicabilidade da técnica de DRX foi realizada uma medida em um meteorito marciano Zagami, ou seja, um fragmento de material rochoso oriundo do planeta Marte (ZUCOLOTTO *et al.*, 2013; NASCIMENTO DIAS *et al.*, 2020).

A difração de raios X (DRX) é uma técnica analítica usada em rochas, principalmente, para a identificação de minerais, pois são estruturas cristalinas. Usando DRX foi obtido o difratograma do meteorito marciano Zagami mostrado na **Figura 7**.

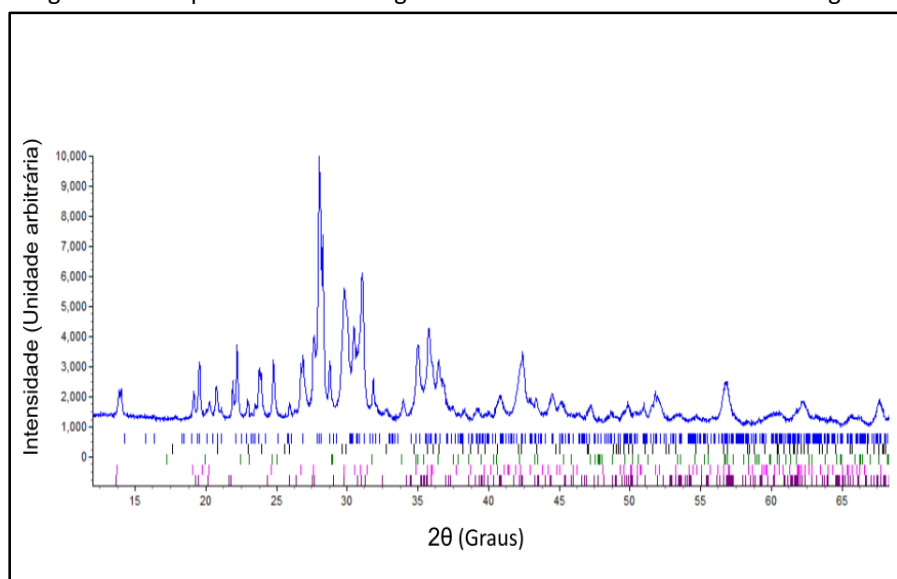
Figura 7 – Difratoograma obtido do meteorito marciano Zagami



Fonte: o autor.

O difratograma foi analisado por meio do *software* Topas 2.0 da Bruker. Por meio desta análise foram detectados os minerais: quartzo, faialita, augita e ferrossilita. As representações da identificação de cada mineral são mostradas na **Figura 8**.

Figura 8 – Comparativo do difratograma obtido do meteorito marciano Zagami



Fonte: o autor.

Vale salientar que é função do usuário aliar informações da amostra para identificar corretamente as verdadeiras fases. Em princípio, procura-se a substância que apresente coincidência nos maiores picos do difratograma, depois os picos menores sucessivamente até que todos os picos sejam achados. Ao selecionar as fases compatíveis com o difratograma, pode-se conferir suas características e referências a partir do banco de dados do programa.

DISCUSSÃO

Os dados gerados por DRX auxiliam na compreensão da composição mineralógica da rocha. Este fator é de extrema importância, pois a caracterização de uma rocha terrestre ou extraterrestre está vinculada aos minerais constituintes dessa amostra.

Dentre os minerais detectados pela Difração de raios X no meteorito Zagami, foram constatadas as presenças de piroxênios e olivinas. Os piroxênios são um grupo de minerais que possuem quantidades variadas de Ca, Fe e Mg em sua composição química mineralógica $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$. Já as olivinas variam em sua composição através da quantidade de Fe e Mg presentes em sua estrutura química em combinação com os átomos de silício-oxigênio. As olivinas são caracterizadas pela fórmula química $(\text{Fe, Mg})_2\text{SiO}_4$. Ambos os materiais são conhecidos como minerais formadores de rochas e considerados minerais essenciais (KLEIN, DUTROW, 2009).

Na geologia os minerais essenciais ou majoritários conferem basicamente o caráter à rocha e determinam a sua designação, por serem considerados componentes indispensáveis à caracterização e classificação desses materiais (GROTZINGER, JORDAN, 2006; TEIXEIRA, DE TOLEDO, FAIRCHILD, 2001). Os meteoritos rochosos, como os marcianos possuem uma composição bastante semelhante às rochas basálticas terrestres, e conforme Zucolotto *et al.*, (2013), por conta disto são constituídos por minerais essenciais, tais como as olivinas e os piroxênios.

Além disso, a difração de raios X também detectou a presença de um mineral considerado acessório, o quartzo, que possui uma composição estrutural cristalina de dióxido de silício (SiO_2). Minerais acessórios são aqueles que não afetam o aspecto fundamental da rocha. De forma geral, ocorrem em diminutas quantidades e, geralmente, só são visíveis ao microscópio. Vale salientar que este mineral é o segundo mais abundante no planeta Terra, perdendo apenas para o grupo dos feldspatos.

CONCLUSÕES

Os conceitos teóricos sobre a DRX foram desenvolvidos da maneira mais geral possível, buscando não estender demais, assim como tentando não ser superficial a ponto de não possuir requisitos físicos mínimos para quem está iniciando seus estudos. A parte experimental foi apresentado um resultado de um difratograma coletado de um meteorito marciano, com o intuito de representar de maneira menos abstrata aos jovens que estejam buscando técnicas alternativas para complementarem seus dados e dessa maneira saber o que pode ser obtido através de espectros de DRX. Assim, este é um trabalho que busca servir como referência inicial para o desenvolvimento e aprendizagem desta técnica analítica para futuros trabalhos de iniciação científica, monografias, dissertações ou até mesmo teses.

Application of X-Ray Diffraction for Mineralogical Characterization of Meteorites: Physical Concepts and Experimental Processes

ABSTRACT

The X-ray diffraction technique (XRD) has always been widely used in the characterization of terrestrial rocks, however it is increasingly being used in the characterization of meteorites by Brazilians. Thus, the objective of this work is to present the general DRX concepts in a synthesized and simple way for beginners or for readers who want to know about alternative analytical techniques for identifying minerals. Thus, it is not part of the proposal to have a detailed deepening of the technique, and for greater specificities, readers will be able to obtain through complementary materials and with the assistance of technicians more specialized in the equipment, what is of interest. Finally, some spectra obtained through the use of the technique on a Martian meteorite will be presented and the results briefly explained. With this, it is expected that this will serve as initial and support material for students who are beginning to develop scientific interests and are looking for physical concepts of X-ray diffraction and its applicability.

KEYWORDS: XRD; Minerals; Martian Meteorite.

Aplicación de la difracción de rayos X para la caracterización mineralógica de meteoritos: conceptos físicos y procesos experimentales

RESUMEN

La técnica de difracción de rayos X (XRD) siempre ha sido ampliamente utilizada en la caracterización de rocas terrestres, sin embargo, cada vez se utiliza más en la caracterización de meteoritos por parte de los brasileños. Así, el objetivo de este trabajo es presentar los conceptos generales de DRX de una manera sintetizada y sencilla para principiantes o para lectores que quieran conocer técnicas analíticas alternativas para la identificación de minerales. Así, no forma parte de la propuesta tener una profundización detallada de la técnica, y para mayores especificidades, los lectores podrán obtener a través de materiales complementarios y con la asistencia de técnicos más especializados en el equipamiento, lo que sea de su interés. Finalmente, se presentarán algunos espectros obtenidos mediante el uso de la técnica en un meteorito marciano y se explicarán brevemente los resultados. Con esto, se espera que este sirva como material inicial y de apoyo para los estudiantes que están comenzando a desarrollar intereses científicos y buscan conceptos físicos de difracción de rayos X y su aplicabilidad.

PALABRAS CLAVE: XRD; Minerales; Meteorito marciano.

NOTAS

Os autores agradecem a CAPES, UFJF e aos revisores por auxiliarem no desenvolvimento do aprimoramento deste trabalho através das sugestões que foram feitas.

REFERÊNCIAS

ANIS, Mohd *et al.* Monocrystal growth and characterization study of α - and γ - polymorph of glycine to explore superior performance of γ -glycine crystal. **Materials Research Innovations**, v. 22, n. 7, p. 409-414, 2018.

AGUILAR-MARÍN, *et al.* Understanding the phenomenon of X-rays diffraction by crystals and related concepts. **European Journal of Physics**, 2020.

ASHCROFT, Neil W. *et al.* Solid state physics. 1976. Saunders College Publishing, 2011. 870 p

CORRÊA, M. M.; DE ARAUJO FILHO, J. C.; FONTES, MPF. Avaliação quantitativa de minerais cristalinos de solos pelo Método Rietveld. **Embrapa Solos-Capítulo em livro técnico (INFOTECA-E)**, 2017.

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. Elements of X-Ray Diffraction, 3 ed, Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001. 678 p

DA SILVA, R. F. A Difração de Raios X: uma Técnica de Investigação da Estrutura Cristalina de Materiais. **Revista Processos Químicos**, v. 14, n. 27, p. 73-82, 2020.

FORMOSO, M. L. L. Difractometria de Raios X. In: GOMES, C. B. (Org.). **Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas à Geologia**, São Paulo: Edgard Blücher Ltda. 1984, p.1-43

GROTZINGER, J; JORDAN, TH **Para Entender a Terra**. 4.ed. Bookman, 2006.

HE, Kai *et al.* Method for Determining Crystal Grain Size by X-Ray Diffraction. **Crystal Research and Technology**, v. 53, n. 2, p. 1700157, 2018.

JENKINS, R.; SNYDER, R. L. **Introduction to X-Ray Powder Diffractometry**. New York: John Wiley & sons, Inc. 1996. 403 p. (Chemical Analysis, v.138).

KAHN, H. **Difração de Raios X**, 2000. 18 p. Disponível em . Acesso em: 21 de setembro de 2012.

KAPLAN, I. **Física Nuclear**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978. 727 p.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais**. 23 ed. Porto Alegre: Bookman. 716 p, 201, 2009.

LUTTEROTTI, Luca *et al.* Full-profile search–match by the Rietveld method. **Journal of applied crystallography**, v. 52, n. 3, p. 587-598, 2019.

MADDALI, Siddharth *et al.* High-energy coherent X-ray diffraction microscopy of polycrystal grains: Steps toward a multiscale approach. **Physical Review Applied**, v. 14, n. 2, p. 024085, 2020.

MCDONALD, Samuel A. *et al.* Tracking polycrystal evolution non-destructively in 3D by laboratory X-ray diffraction contrast tomography. **Materials Characterization**, p. 110814, 2020.

NASCIMENTO-DIAS, B. L. *et al.* A utilização e a relevância multidisciplinar da fluorescência de raios X. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 39.4 ,2017.

NASCIMENTO-DIAS, B. L. *et al.* Detection of organic or inorganic material in Martian meteorite Zagami by vibrational spectroscopy?. **International Journal of Astrobiology** 19.6 (2020): 438-445.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica: Mecânica** (vol. 1). Editora Blucher, 2013.

SAITOVICH, H. Cem anos da descoberta dos raios-X: caracterização estrutural de sólidos. **Revista Brasileira de Ensino de Física** 17.3, 1995.

TEIXEIRA, W., DE TOLEDO, M. C. M., M. FAIRCHILD, T. R., & F.(Org.) TAIOLI. (2001). **Decifrando a terra**. Oficina Textos.

XAVIER, L. M.; SARVEZUK, P. W. C. Física da difração de raios x aplicada à engenharia ambiental. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**. v. 8, n. 20, 2017.

ZHOU, X. *et al.* XRD-based quantitative analysis of clay minerals using reference intensity ratios, mineral intensity factors, Rietveld, and full pattern summation methods: A critical review. **Solid Earth Sciences**, v. 3, n. 1, p. 16-29, 2018.

ZUCOLOTTO, M. E. *et al.* Decifrando os meteoritos. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Museu Nacional, 2013.

Recebido: 26 de janeiro de 2021.

Aprovado: 17 de setembro de 2021.

DOI:

Como citar: NASCIMENTO-DIAS, B. L., Aplicação da difração de Raios X para caracterização mineralógica de meteoritos: conceitos físicos e os processos experimentais, *Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada*, Ponta Grossa, v. 8, n.2, p. 01-15, ser. 2021.

Contato: Bruno Leonardo do Nascimento-Dias: bruno.astrobio@gmail.com

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

