

Aplicações multidisciplinares da microtomografia de raios x e sua utilização na caracterização e análises não destrutivas de materiais.

RESUMO

A microtomografia de raios X (μ CT) é uma técnica analítica não destrutiva emergente visualmente poderosa que oferece inovações e possibilidades de maiores desenvolvimentos na pesquisa de materiais. Embora suas aplicações sejam diversas e multidisciplinares, durante um longo período foi utilizada apenas como uma ferramenta de diagnóstico médico. Recentemente, a μ CT vem se desenvolvendo e criando maiores possibilidades para a visualização de pequenos objetos em 2D e 3D de maneira a gerar informações importantes em diferentes áreas científicas. Desse modo, buscou-se, nesse trabalho, fornecer uma breve síntese seletiva das utilizações multidisciplinares que a técnica de μ CT possui. A finalidade é estimular a exploração dessa tecnologia apresentando uma visão geral da ampla gama de questões e as diversas áreas de pesquisas científicas em que ela pode ser aproveitada como uma técnica analítica não invasiva, ou seja, não destrutiva. E, por fim, foram discutidas as possibilidades de aplicações e as vantagens específicas da microtomografia computadorizada.

PALAVRAS-CHAVE: μ CT; Física aplicada; Raios X.

Bruno Leonardo do Nascimento-Dias
bruno.astrobio@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-3632-9073>
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
(UERJ), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,
Brasil.

INTRODUÇÃO

É possível inferir que o início de toda tecnologia baseada em raios X teve a sua origem em 1895 com Wilhelm Conrad Röntgen. Röntgen demonstrou a produção de raios X a partir da realização de seus experimentos com raios catódicos (SAITOVICH, 1995). Por ser, ainda naquela época, um fenômeno desconhecido, Röntgen deu-lhe nome de "raios X" (Nobel Lectures, 1967).

Pouco tempo depois, Wilhelm Röntgen em 22 de dezembro de 1895, realizou o primeiro registro de ossatura *in vivo* a partir da mão de sua esposa - ilustrado através da **Figura 1**. Logo após esse registro ser apresentado ao professor Ludwig Zehnder teve repercussão imediata na comunidade científica. A área médica foi a primeira a vislumbrar as possíveis aplicações dessa descoberta como um novo campo científico promissor.

Figura 1 – O primeiro registro de ossatura *in vivo*



Fonte: Arruda (1996).

Houve, na primeira década do século XX, uma ótima receptividade pela descoberta, de maneira que a radiologia, ramo o qual se utiliza dos conhecimentos científicos dos raios X para a realização de diagnósticos, evoluiu para uma sub-especialidade médica.

Desse modo, essa descoberta permitiu a área se desenvolver principalmente devido à possibilidade de se ter ossos e órgãos observados através de imagens geradas justamente através do uso dos raios X. Além disso, o intensificador de imagens de raios X foi desenvolvido e aprimorado a partir da década de 50. Com isso, foi possível realizar a gravação e exibição do filme de raios X usando uma câmera de TV e monitor (LOSANO *et al*, 1999).

A utilização das aplicações tecnológicas baseadas nos princípios científicos em raios X aconteceu primeiramente entre os anos 60 e 70. Nesta época, a evolução inicial a partir dessa nova tecnologia se concentrou principalmente na imagiologia diagnóstica médica. Porém, houve no final da década de 1970 esforços especiais feitos para a aplicação da tomografia computadorizada no ambiente industrial. Isso, muito devido ao desenvolvimento de estruturas matemáticas feitas por Johann Karl August Radon que possibilitou, por exemplo, o desenvolvimento da tomografia computadorizada (CT, sigla em inglês) (CORMACK, 1963). Tivemos assim, Allan M. Cormack e Godfrey N. Hounsfield foram laureados com o Prêmio Nobel de Medicina em 1979, por construírem o primeiro scanner de tomografia computadorizada.

Dessa maneira, apesar de a CT ter sido utilizada majoritariamente na área da medicina, principalmente para imagiologia diagnóstica com a finalidade de observar estruturas ósseas, a CT tem demonstrado possuir um grande potencial para outras áreas. Atualmente, tem sido utilizado em diferentes campos de investigação como paleontologia, sedimentologia, meteorítica, petrologia, ciência do solo e pesquisa de fluxo de fluido.

MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X

A Microtomografia Computadorizada, também denominada de μ CT, é uma técnica não destrutiva que permite a análise de cortes internos do material analisado, ou seja, são feitas centenas de seções transversais microtomográficas que possibilitam a visualização tridimensional interna das amostras, além de nos fornecer quantificações automatizadas de área e/ou volume (FERNANDES *et al*, 2012).

De forma geral, todos os μ CT são instrumentos tecnológicos baseados na equação de atenuação dos raios X e que possuem o mesmo princípio de funcionamento, no qual o objeto é posicionado entre uma fonte de raios X e um detector de raios X, em um sistema de rotação, tal como é ilustrado na **Figura 2**. A aquisição das imagens é basicamente obtida devido à propriedade que os materiais possuem de absorverem este tipo de radiação de forma diferenciada, em que a resposta que recebemos depende da composição química e densidade do material analisado.

Figura 2 – Imagens do interior do microtomografo e o seu porta amostra



Fonte: página virtual da Bruker.

Entende-se ser importante notar que cada material possui um coeficiente de atenuação intrínseco, contudo, sem deixar de observar que a atenuação está vinculada à redução de intensidade de um feixe, conforme ele atravessa a matéria antes de chegar ao detector.

A redução da intensidade medida por um detector ao atravessar o material é expressa por: $I = I_0 e^{-\mu x}$, onde I é intensidade medida após a colocação de algum material atenuador, I_0 é a Intensidade original do feixe ou exposição inicial sem o atenuador, μ é o coeficiente de atenuação linear e x é a espessura do objeto atenuador. Dessa forma, pode ocorrer absorção da radiação pelo meio, ou dispersão do feixe. Assim, podemos dizer que as imagens microtomográficas que visualizaremos serão formadas através da medida da radiação atenuada gerada pelos diferentes materiais que compõem a amostra, pois cada material possui diferentes taxas de absorção de radiação eletromagnética (MEES *et al*, 2003).

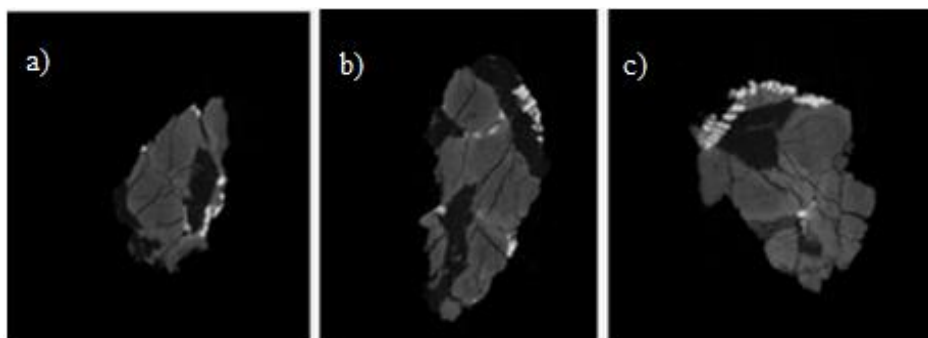
METODOLOGIA E FORMAÇÃO DE IMAGENS NA μ CT

O processo para formação de raios X de maneira artificial é feita por meio da aceleração de elétrons contra um material metálico. Através desse processo de bombardeamento de elétrons de alta energia cinética, é gerado o feixe de raios X. Dessa forma, é gerada uma radiação eletromagnética com pequeno comprimento de onda, alta frequência e com poder de penetrabilidade (LOPES *et al*, 2012). De modo geral, durante o processo de interação da radiação com a amostra, os elétrons excitados transformados em fótons são capturados por um detector.

A câmera de *CCD* (dispositivo de carga acoplada) ou *CMOS* (semicondutor de metal-óxido complementar) é um dos componentes do equipamento de μ CT e é

o responsável por gerar uma série de imagens em duas dimensões da amostra. Dessa forma, logo após a aquisição das projeções, essas imagens passam por um processo computacional através de um algoritmo de reconstrução que irá fornecer as seções 2D (bidimensionais), também conhecidas como slices da amostra **Figura 3**.

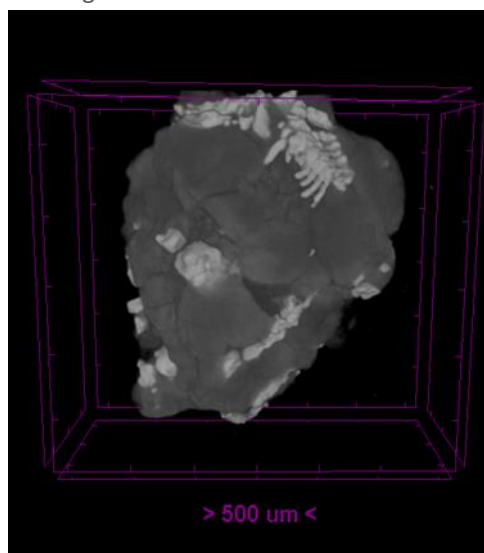
Figura 3 – Slices bidimensionais da amostra do meteorito marciano NWA 6963



Fonte: Nascimento-Dias *et al* (2017).

Assim, a μ CT passa então a dividir virtualmente o material analisado para mapear parâmetros físicos, tais como densidade e a porosidade de cada região interna do objeto, os quais posteriormente são apresentados em imagens bidimensionais e que podem ser utilizadas para gerar imagens tridimensionais (3D) como na **Figura 4**.

Figura 4 – Imagem 3D do meteorito marciano NWA 6963



Fonte: Nascimento-Dias *et al* (2017).

A obtenção das imagens tomográficas (secções transversais) é realizada em duas etapas:

- a. aquisição das imagens radiográficas de diversas projeções angulares da amostra ao longo de uma rotação de 180 graus ou 360 graus com passos de rotação precisos, ou seja, através de alguns décimos de graus de rotação.
- b. reconstrução das imagens das secções transversais a partir das imagens das projeções angulares por meio do algoritmo de reconstrução de feixe cônico de feldkmp modificado que roda no cluster de computadores.

Para se reconstruir e visualizar o material analisado em 3D é necessário realizar um processo de renderização, que converterá os slices da amostra em um empilhamento ordenado, gerando assim uma imagem em 3D (MANTOVANI, 2013).

APLICAÇÕES E ALGUMAS POSSÍVEIS CONTRIBUIÇÕES DA μ CT PARA ANÁLISE DE MATERIAIS

Inicialmente a técnica de microtomografia computadorizada de raios X era basicamente uma ferramenta de diagnóstico médico. No entanto, com o passar do tempo os pesquisadores de outras áreas passaram a ter interesse em utilizá-la, em virtude não apenas por notarem o alto potencial dessa técnica, mas principalmente por ela demonstrar ter grande relevância e aplicações em diversas áreas científicas.

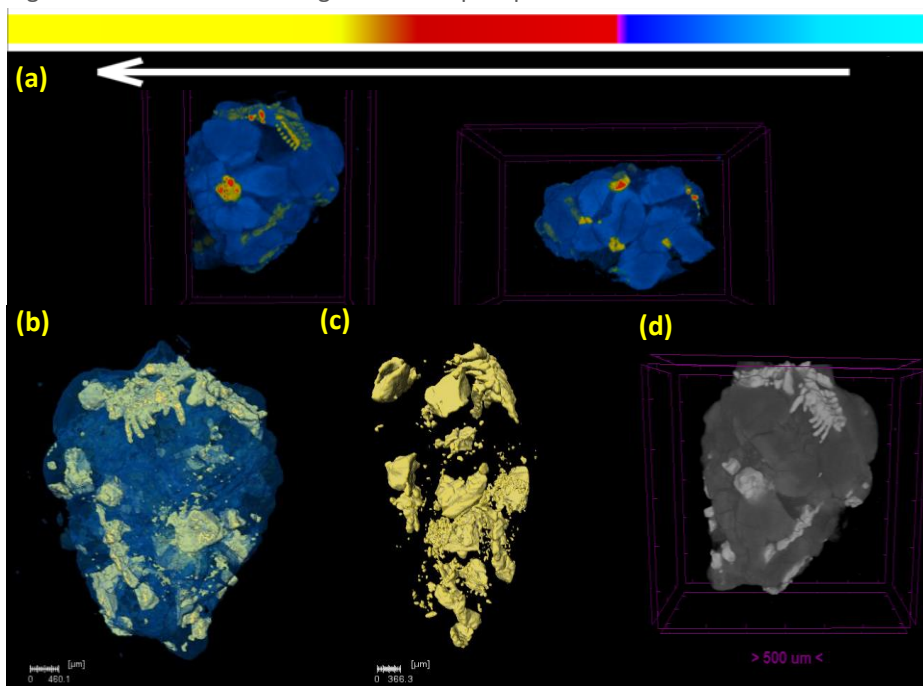
Dessa maneira, a μ CT passou a ser empregada na pesquisa de materiais freqüentemente para visualizar a estrutura interna dos materiais rochosos já na década de 70. Nesta época ainda, temos outro exemplo de utilização da μ CT, em que melhoria e desenvolvimento da técnica passou a contribuir amplamente para seu uso bem sucedido nas pesquisas de paleontologia na análise de imagens em 2D e até 3D das estruturas ósseas (FOURIER, 1974).

Além disso, na década seguinte o interesse e a utilização da técnica foram aplicados à pesquisa de solo, através da análise de estruturas sedimentares, porosidade e densidade desse material a partir de imagens tridimensionais (PETROVIC, SIEBERT e RIEKE, 1982). Assim, a μ CT passou a ter um papel fundamental nas pesquisas científicas de modo a se tornar uma técnica de pesquisa não destrutiva importante em análise de materiais valiosos e raros como os meteoritos (ARNOLD *et al*, 1982) por não destruir ou contaminar a amostra.

Na Figura 5 ilustra-se em (a) um modelo 3D gerado a partir do pelo método de reconstrução e que fornece a densidade do material de forma eu a escala aumenta do azul para o amarelo. Além disso, a imagem apresenta em (a) e (b) imagens que

apresentam a configuração da porosidade eu existe no material analisado. Sendo por fim, a imagem (d) a estrutura em 3D do meteorito que serve de base comparativa com as outras imagens.

Figura 5 – Resultados de imagens obtidas pela μ CT do meteorito marciano NWA 6963.

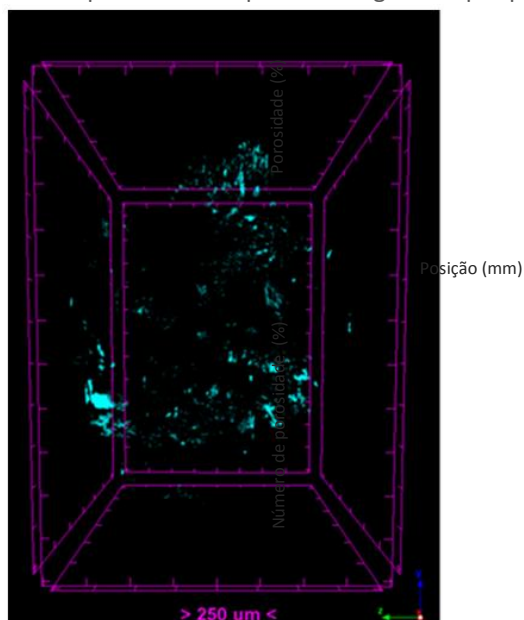


Fonte: Nascimento-Dias *et al* (2017).

A partir de então, a microtomografia de raios X foi aplicada de maneira mais específica, como na caracterização 3D de sistemas porosos e no tamanho de grão em rochas sedimentares (APPOLONI, FERNANDES e RODRIGUES, 2007), em análises de rochas ígneas e vulcânicas na busca de entendimento e análise de materiais intrusivos (CARLSON, DENISON e KETCHAM, 1999), em paleobiologia para análise estrutural e na caracterização morfológica de fósseis (HAUBITZ *et al*, 1988) entre outras áreas.

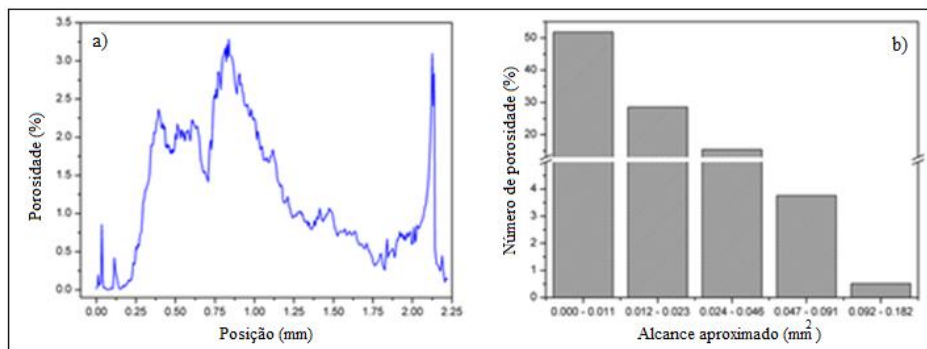
De maneira geral, a μ CT possibilita obter dados qualitativos e quantitativos em diversas áreas de modo a transmitir informações relevantes sobre a forma, tamanho, distribuição, volume, área e conectividade dos poros em microescala por modelos 3D. Assim, é possível observar na **Figura 6** um modelo espacial dos poros em 3D na imagem e na **Figura 7** um gráfico linear relacionado a porosidade contida na amostra em (a) e um histograma que contém a distribuição do tamanho dos poros existente no material ilustrado na imagem em (b).

Figura 6 – Dados qualitativos de porosidade gerados por μ CT



Fonte: autor.

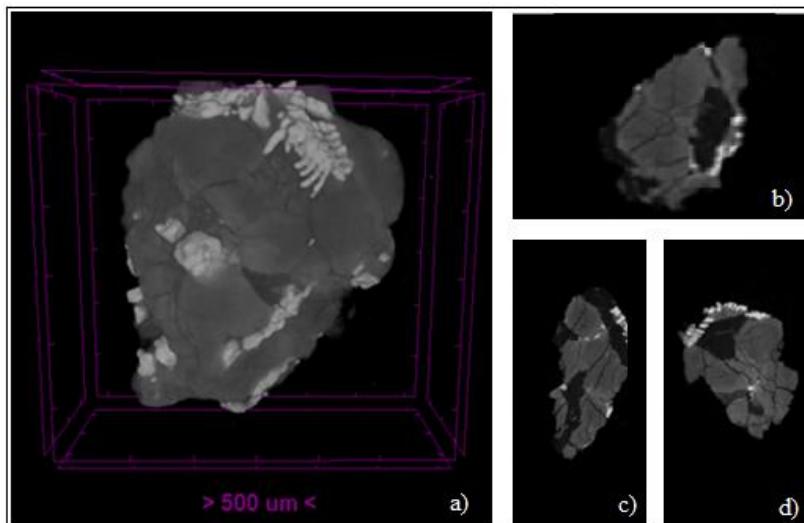
Figura 7 – Dados quantitativos de porosidade gerados por μ CT



Fonte: autor.

Além dos poros também é possível realizar a identificação de características físicas e morfológicas de materiais que estejam presente na amostra. A μ CT pode fornecer informações de possíveis fases distintas de minerais presentes no material analisado por meio da atenuação e penetrabilidade distinta dos raios X (ROSENBERG *et al.*, 1999). Em geral, os materiais de maior densidade possuem tonalidades mais claras de modo que a intensidade vai diminuindo e escurecendo com a diminuição da densidade. Dessa forma, a separação e a quantificação das diferentes fases em uma determinada amostra podem ser feitas através da chamada escala cinza. Assim, na **Figura 8** é possível notar pelo menos duas ou três fases distintas como componentes da amostra.

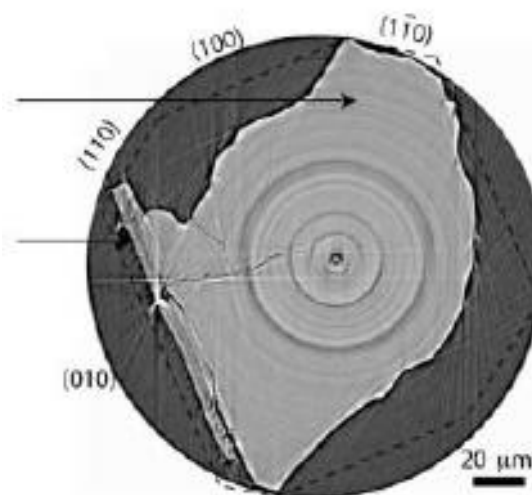
Figura 8 – Imagens em 2D e 3D na escala cinza



Fonte: Nascimento-Dias *et al* (2017).

Outra questão importante é a possibilidade obter informações sobre faces cristalográficas, orientações e ângulos de clivagem presentes no material, que de acordo com Lemelle *et al* (2004), podem ser fornecidos através da μ CT ilustrada na **Figura 9**.

Figura 9 – Configuração da face criatalográfica proposta por steno em 1669

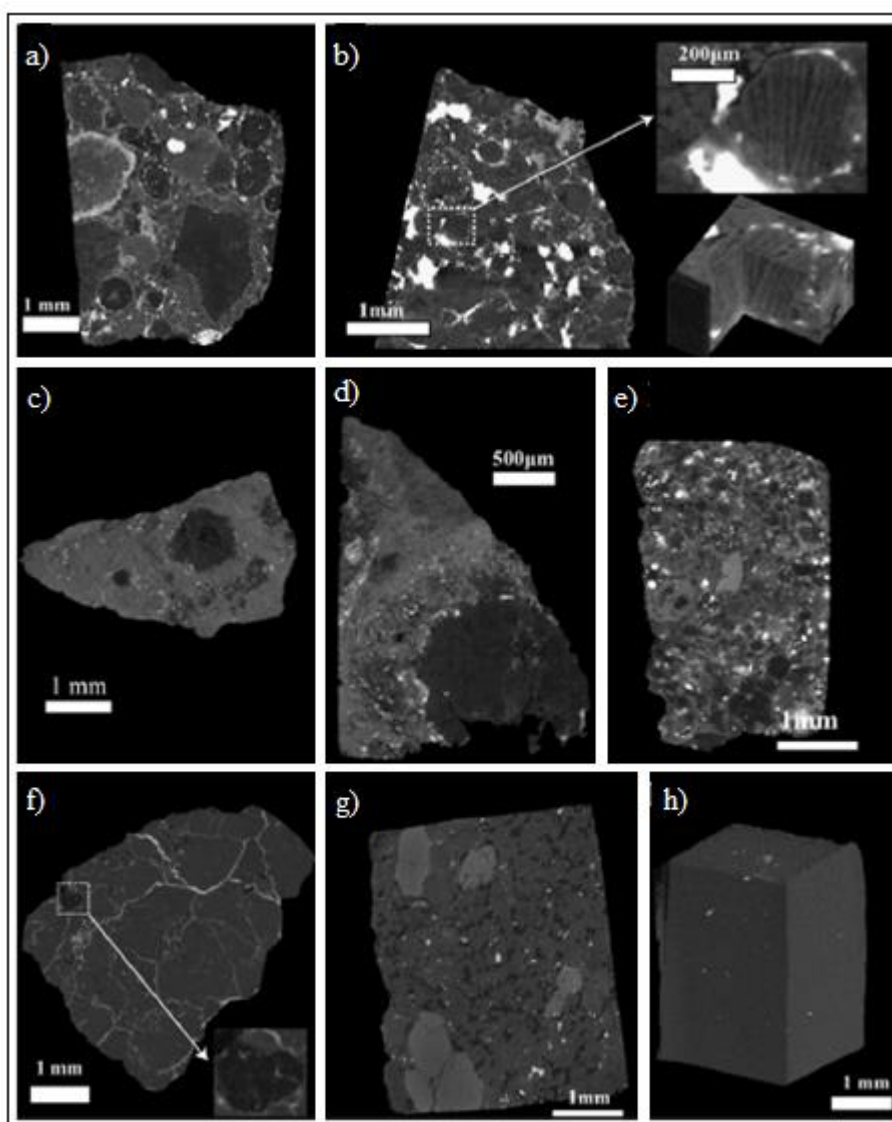


Fonte: Lemelle *et al* (2004).

Essas informações possuem extrema relevância para a área de materiais. De forma geral, essas informações podem auxiliar, por exemplo, em processos de

clivagem ou secção de rochas e minerais. No entanto, também existe à possibilidade de se estudar o material internamente fatiando ou “clivando” de maneira virtual tal como na **Figura 10**. Dessa forma, a formação estrutural do material permanece íntegra e sem danos. Assim, é possível utilizar outras técnicas complementares no mesmo material sem que ocorra contaminação, destruição ou necessidade de descarte da amostra, pois a μ CT é invasiva, ou seja, é um processo analítico não destrutivo.

Figura 10 – Imagens de diferentes materiais clivados ou fatiados virtualmente



Fonte: Uesugi, M.; Uesugi, K. e Oka (2010).

Assim, a μ CT tem se apresentado como uma técnica extremamente promissora e que vem trazendo bons resultados em áreas diversificadas. Vale ressaltar que a qualidade das imagens e a quantidade de detalhes que tem sido fornecido são muito maiores do que há 10 anos e atualmente a μ CT está cada vez mais encontrando seu caminho no campo de pesquisa científica.

Assim, é possível inferir que a utilização da μ CT pode ser uma ferramenta poderosa no estudo de materiais, sendo peça fundamental para apresentar resultados mais satisfatórios que necessitem de técnicas complementares não destrutivas (NETO *et al*, 2011).

CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento e avanço tecnológico a microtomografia computadorizada de raios X tem se demonstrado ser uma técnica não apenas inovadora, mas também muito poderosa para se realizar pesquisas na caracterização e análise não destrutivas de materiais no laboratório. Utilizando-se da μ CT é possível realizar a visualização de centenas de cortes não destrutivos por meio de slices 2D, além de ser possível realizar uma visualização tridimensional de porções específicas e quantificações automatizadas nas amostras. Dessa forma, a μ CT nos possibilita obter atualmente a identificação de características físicas e morfológicas de materiais presentes na amostra, tais com forma, tamanho, distribuição, densidade, volume, área e conectividade entre poros ou vesículas, sem a necessidade de preparação dos materiais ou descaracterização da amostra.

Além disso, quando integrada com outras técnicas, o uso da μ CT permite ter uma melhor identificação dos compostos químicos presentes na amostra como, por exemplo, as fases minerais vistas através de atenuações contrastantes, nos fazendo ter um maior entendimento das relações entre as diferentes fases e que tipos de compostos químicos estão presentes em uma determinada região do objeto analisado. Por fim, entende-se que as etapas de aquisição dos dados no microtomógrafo de raios X e reconstrução das seções μ CT necessitam experiência do pesquisador e conhecimento aprofundado do equipamento, visto que somente a partir de boas imagens será possível obter resultados fidedignos no tratamento dos dados.

Multidisciplinary Applications of X-ray Microtomography and its Use in the Characterization and Non Destructive Analysis of Materials

ABSTRACT

X-ray microtomography (μ CT) is a visually powerful non-destructive analytical technique that offers innovations and possibilities for further developments in material research. Although its applications are diverse and multidisciplinary, over a long period it has only been used as a medical diagnostic tool. Recently, X-ray microtomography has been developing and creating greater possibilities for the visualization of small objects in 2D and 3D in order to generate important information in different scientific areas. Thus, in this work, is sought to provide a brief selective synthesis of the multidisciplinary uses that the micro TC technique has. The purpose is to stimulate the exploitation of this technology by presenting an overview of the wide range of issues and the various areas of scientific research in which it can be used as a non-invasive technique, or in the other words, non-destructive. Finally, the possibilities of applications and the specific advantages of computerized microtomography was discussed.

KEYWORDS: μ CT; Applied Physics; Imaging; X-rays.

Aplicaciones multidisciplinares de la microtomografía de rayos X y su utilización en la caracterización y análisis no destructivos de materiales

RESUMEN

La microtomografía de rayos X (μ CT) es una técnica analítica no destructiva emergente visualmente poderosa que ofrece innovaciones y posibilidades de mayores desarrollos en la investigación de materiales. Aunque sus aplicaciones son diversas y multidisciplinares, durante un largo período se utilizó sólo como una herramienta de diagnóstico médico. Recientemente, la microtomografía de rayos X se está desarrollando y creando mayores posibilidades para la visualización de pequeños objetos en 2D y 3D de manera a generar informaciones importantes en diferentes áreas científicas. De este modo, buscamos proporcionar una breve síntesis selectiva de los usos multidisciplinarios que la técnica de μ CT posee. La finalidad es estimular la explotación de esta tecnología presentando una visión general de la amplia gama de cuestiones y las diversas áreas de investigaciones científicas en que puede ser aprovechada como una técnica analítica no invasiva, o sea, no destructiva. Y por fin se discutirán aquí las posibilidades de aplicaciones y las ventajas específicas de la microtomografía computarizada.

PALABRAS CLAVE: μ CT, Física aplicada, Imagenología, Rayos X.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a CAPES por fomentar a bolsa de estudos, sem a qual essa pesquisa não teria sido possível. Além disso, agradece a Universidade do Estado do Rio de Janeiro, instituição em que atua.

REFERÊNCIAS

APPOLONI, C.R.; FERNANDES, C.P.; RODRIGUES, C.R.O. *X-ray microtomography study of a sandstone reservoir rock. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, v. 580, p. 629-632, 2007

ARNOLD, J.R. *et al. Computed tomographic analysis of meteoric inclusions. Sci.*, n.219, p.383-384, 1982.

ARRUDA, W. O. Wilhelm Conrad Röntgen: 100 years of X-rays discovery. *Arquivos de neuro-psiquiatria*, v. 54, n. 3, p. 525-531, 1996.

BRUKER. *M4 Tornado Bruker*. Disponível em: <<https://www.bruker.com/pt/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/micro-xrf-and-txrf/m4-tornado/technical-details.html>>. Último acesso em 18 setembro de 2017.

CARLSON, W.D.; DENISON, C.; KETCHAM, R.A. *High-Resolution X-ray computed tomography as a tool for visualization and quantitative analysis of igneous textures in three dimensions. Electronic Geosci*, 1999

CORMACK, A.M. *Representation of a Function by Its Line Integrals, with Some Radiological Applications. Journal of Applied Physics*, 1963.

FERNANDES, J.S. *et al. Determination of the Representative Elementary Volume for the study of sandstones and siltstones by X-Ray microtomography, Mat.Res*, 15, 4, pp.662-670, 2012.

FOURIER, S. *The cranial morphology of Thrinaxodon liohinus Seeley. Ann. South Afr. Museum*, v.65, p.337-400, 1974.

HAUBITZ B. *et al*, *Computed tomography of Archaeopteryx. Paleobiology*, n.14,v. 2, p. 206-213, 1988.

LEMELLE, L. *et al*. *A new nondestructive X-ray method for the determination of the 3D mineralogy at the micrometer scale. American Mineralogist*, v. 89, n. 4, p. 547-553, 2004.

LOPES, A.P. *et al.*, Análise tridimensional de rochas por meio de microtomografia computadorizada de raios X integrada à petrografia, *Geociências*, v.31, n.1, 2012.

LOSANO, F. *et al*. *Computed tomography in the automotive field development of a new engine head case study. Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology, Berlin, Germany. DGZfP Proceedings BB67-CD pp. 65-73. (1999)*

MANTOVANI, I.F. **Microtomografia e nanotomografia de raios X aplicada à caracterização multiescalar de sistemas porosos carbonáticos.** Tese de Doutorado, UFSC, 2013.

MEES, F. *et al.*, *Applications of X-ray computed tomography in the geosciences. Geological Society, London, Special Publications*, 2003 v. 215, n. 1, p. 1-6.

NASCIMENTO-DIAS, B.L., *et al*. *Utilization of non-destructive techniques for analysis of the Martian meteorite NWA 6963 and its implications for astrobiology. X-Ray Spectrometry. Willey On Line Library*, p. 1-6, 2017.

NETO, J.M.R. *et al.*, A microtomografia computadorizada de raios x integrada à petrografia no estudo tridimensional de porosidade em rochas, *Revista Brasileira de Geociências*, v.41, n.3, 2011.

Nobel Lectures, *Physics 1901-1921*, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1967.

PETROVIC, A.M.; SIEBERT, J.E; RIEKE, P.E. *Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. Soil Sci. Soc. Am. J.*, ed.46, p.445-450, 1982

ROSENBERG E. *et al. Microtomography applications in rock analysis and related fields*. Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology. Berlin, Germany. DGZfPProceedings BB 67-CD. 1999

SAITOVICH, H. Cem anos da descoberta dos raios-X: caracterização estrutural de sólidos, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol.17, n.3, 1995.

UESUGI, M.; UESUGI, K.; OKA, M. *Non-destructive observation of meteorite chips using quantitative analysis of optimized X-ray micro-computed tomography. Earth and Planetary Science Letters*, v. 299, n. 3, p. 359-367, 2010.

Recebido: 29 de agosto de 2017.

Aprovado: 05 de dezembro de 2017.

DOI:

Como citar: NASCIMENTO-DIAS, B.L, Aplicações multidisciplinares da microtomografia de raios x e sua utilização na caracterização e análises não destrutivas de materiais, *Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada*, Ponta Grossa, v. 4, n.2, p. 26-41, dezembro. 2017.

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.

