

TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X COMO FERRAMENTA DE CARACTERIZAÇÃO DE FILTROS E PROCESSOS DE FILTRAGEM

Célio Maschio

Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Materiais

Cx. P. 6122 – 13083-970 – Campinas, SP, Brasil

e-mail: celio@columbia.dep.fem.unicamp.br

Antonio Celso Fonseca de Arruda

Universidade Estadual de Campinas, Departamento Engenharia de Petróleo

Cx. P. 6122 – 13083-970 – Campinas, SP, Brasil

Resumo. *Este trabalho tem por objetivo apresentar o potencial da tomografia computadorizada de raios-x utilizada como ferramenta na caracterização interna de filtros usados na separação de sólido-líquido, principalmente os filtros de água. A técnica foi utilizada em filtros tipo cartucho, de utilização doméstica e industrial, impregnados com microesferas de vidro. Os filtros também foram tomografados sem a presença do contaminante, para efeito de comparação entre as imagens referentes aos dois casos. As imagens obtidas mostraram que é possível se fazer um mapeamento da estrutura interna do filtro e da distribuição do contaminante, permitindo uma análise localizada do interior do mesmo, o que não é possível por meio dos testes padrão usados pelos fabricantes, que revelam características globais do meio filtrante em teste, tal como tamanho médio de póros. Mostra-se, também, que a tomografia de raios-x pode ser utilizada como ferramenta de apoio no controle de novos processos de fabricação de filtros. Por ser uma técnica não invasiva, tem a vantagem de não exercer nenhuma interferência sobre o processo, permitindo a visualização interna da estrutura obtida e a detecção de eventuais irregularidades ou defeitos.*

Palavras-chave: *Filtros tipo cartucho, Tomografia de Raios-X, Ensaios Não Destrutivos*

1. INTRODUÇÃO

As técnicas de tomografia, inicialmente desenvolvidas para a área médica, vêm encontrando cada vez mais aplicações no campo da engenharia. Existem diversas modalidades da técnica tomográfica, podendo-se citar a tomografia por impedância elétrica, de raios gama e a de raios-x. Dentre a maioria das técnicas de visualização interna, a tomografia de raios-x é a mais conhecida por ser mais difundida no campo da medicina.

A tomografia de raios-x vem sendo aplicada com frequência crescente nas diversas áreas da engenharia. Uma das áreas em que esta técnica encontra bastante potencial de aplicação é a área de materiais, principalmente na análise dos chamados materiais avançados (compósitos, polímeros e cerâmicas). Neste campo, pode-se mencionar a aplicação da tomografia de raios-x na caracterização de defeitos internos em materiais compósitos à base de carbono (Barakhov, 1989 e Bathias, 1992), aplicação em mecânica da fratura (Bart-Smith, 1998 e Guvenilir, 1998). Outro campo de aplicação é a área de engenharia de petróleo, onde os

principais interesses são os estudos de rochas reservatórios, sendo possível a medida de porosidade e permeabilidade relativa (Honarpour, 1985), visualização e modelamento de deslocamentos fluidos em rochas (Vinegar, 1987), etc. Também tem se verificado aplicações na área de processos, no campo da engenharia química (Kantzas, 1997).

A análise de meios filtrantes e processos de separação sólido-líquido é uma outra aplicação oportuna para esta importante técnica de visualização interna, mas que ainda se encontra incipiente. É pequeno o número de trabalhos focalizando a preocupação no elemento filtrante em si, ou seja, como ocorre a distribuição de sólidos no interior do filtro, por exemplo. Pode-se encontrar alguns trabalhos onde se verifica a utilização de outras técnicas, tais como tomografia por impedância elétrica (Tarleton, 1996) e tomografia de raios gama (Massarani, 1990). Porém estes trabalhos apresentam somente alguns perfis, em forma de gráficos, da concentração de sólidos no interior do elemento filtrante.

Os testes existentes, principalmente aqueles usados pelos fabricantes, medem parâmetros globais, ou seja, entre a entrada e a saída do filtro, tratando o meio filtrante como uma caixa preta. Neste trabalho, o foco está centrado no interior do filtro. O potencial da técnica tomográfica, aliada às técnicas de processamento e reconstrução tridimensional de imagens, é utilizado para se verificar como se comporta o meio filtrante e para se modelar a distribuição de sólidos no interior do mesmo. Ressalta-se, também, que a técnica pode ser utilizada como uma ferramenta de apoio no controle de processos de fabricação de novos tipos de filtros, com novas geometrias e para aplicações específicas. Imagens tomográficas mostrando defeitos internos em filtros também são apresentadas.

2. TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X

A tomografia computadorizada de raios-x permite reconstruir um plano qualquer de um objeto a partir da atenuação sofrida pelo feixe de raios-x ao atravessar o material. Cada material apresenta um coeficiente de atenuação (μ), que depende da densidade de massa e da densidade atômica. Quanto maior a densidade do material, maior o coeficiente de atenuação. Na fig. 1 representa-se um diagrama esquemático de um tomógrafo. Uma fonte emite um feixe de raios-x com intensidade I_0 que, ao atravessar o material, é atenuado e o feixe emerge com intensidade I . A diferença entre I_0 e I é monitorada pelos detectores para se medir o nível de atenuação sofrido pelo feixe.

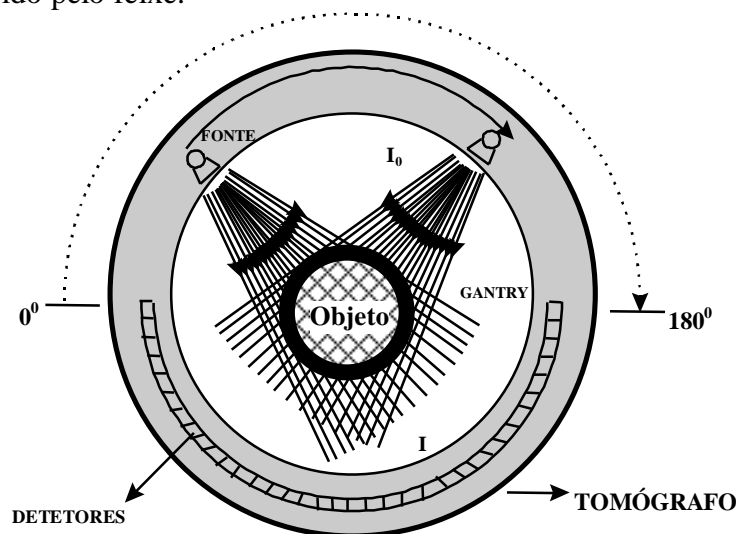


Figura 1 – Diagrama esquemático de um tomógrafo

A atenuação do feixe ao atravessar o um objeto composto por n regiões, cada uma com um coeficiente de atenuação μ , é regida pela Eq. (1), descrita a seguir:

$$I = I_0 \exp\left(-\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot x_i\right) \quad (1)$$

Na Eq. (1) I_0 é a intensidade do feixe incidente, I é a intensidade do feixe atenuado, μ_i é o coeficiente de atenuação da i -ésima região e x_i a distância atravessada pelo feixe na i -ésima região.

Os dados gerados por um tomógrafo são apresentados na forma de uma matriz-imagem, onde cada elemento é chamado de pixel. Cada pixel apresenta um atributo numérico, normalmente chamado de números CT. Os números CT são apresentados em unidades Hounsfield (H), e são diretamente proporcionais ao coeficiente de atenuação e, portanto, à densidade do material. Na escala tomográfica, o número CT da água é utilizado como referencial e vale 0 H. O osso humano, por exemplo, apresenta um número CT da ordem de 1000 H. A Eq. (2) relaciona os números CT com o coeficiente de atenuação do material, onde μ_w é o coeficiente de atenuação da água.

$$CT = 1000 \left(\frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} \right) \quad (2)$$

A imagem é apresentada em uma escala de níveis de cinza. Os tons escuros caracterizam-se por CTs baixos e, assim, designam regiões de baixa densidade. Por outro lado, regiões claras caracterizam-se por CTs altos e designam regiões de alta densidade.

A tomografia de raios-x caracteriza-se por apresentar boa resolução, tanto resolução de contraste, que é a habilidade de distinguir pequenas variações de densidade, quanto resolução espacial, que é a amostragem da imagem, traduzida pelo tamanho de pixel, que pode chegar a um tamanho mínimo da ordem 0,2 mm a 0,3 mm.

3. FILTROS E PROCESSOS DE FILTRAÇÃO

3.1 Filtros tipo cartucho ("cartridge filters")

Os filtros são meios porosos usados para a remoção de sólidos de um determinado fluido, seja líquido ou gás. Os filtros tipo cartucho pertencem a uma classe de filtros usada para a remoção de partículas de um líquido, cuja concentração é relativamente baixa. O desenvolvimento de novas técnicas, principalmente no controle do tamanho de poros, e o desenvolvimento de novos meios porosos tem tornado a aplicação dessa classe de filtros bastante versátil. Esse tipo de filtro possibilita a remoção de partículas cujo tamanho pode variar da ordem de 0,006 micrômetros até a ordem de centenas de micrômetros, podendo ser aplicados para fluidos com viscosidades superiores a 100000 cP, em temperaturas superiores a 400^o C e em pressões superiores a 200 bar (Williams, 1995 - Parte 1). Essa versatilidade permite a aplicação desses filtros em diversos tipos de indústria, tais como a indústria farmacêutica, química, alimentícia, dentre outras. Um levantamento feito nos Estados Unidos apurou que, dos 8 bilhões de dólares movimentados em 1991, relativos a produtos e tecnologia ligados a filtros e processos de filtração, 25 % foram atribuídos aos filtros tipo cartucho (Williams, 1995 - Parte 2), o que comprova o grande volume de aplicação dessa classe de filtro.

3.2 Mecanismos de transporte de partículas em meios porosos

Os processos de filtração envolvem diversos mecanismos de transporte e captura de partículas pela rede de poros que compõem o meio poroso (filtro). Esses mecanismos

envolvem várias interações entre os poros e as partículas. Dependendo do tipo de meio poroso, a rede de poros pode sofrer alterações ou deformações no decorrer do processo de filtração.

Dois dos principais mecanismos estão diretamente relacionados com a interação entre as partículas e a estrutura do meio poroso, os quais são a *captura mecânica* e o *processo de adsorção*. Na captura mecânica, a rede de poros age como uma barreira física à passagem das partículas e estas são aprisionadas pelos poros. Esse mecanismo predomina com relação às partículas cujo tamanho são iguais, ou próximos, ao tamanho dos poros. O processo de adsorção ocorre quando as partículas colidem com a parede dos poros e aderem à sua superfície. Esse mecanismo predomina com relação às partículas menores que os poros (ver fig. 2).

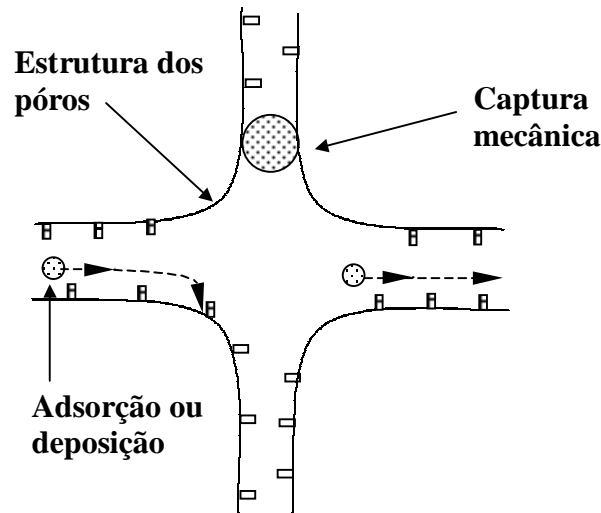


Figura 2 - Diagrama esquemático dos mecanismos de filtração

Um terceiro mecanismo está relacionado à interação entre as próprias partículas. À medida que estas vão se acumulando, os aglomerados formados passam a atuar como um filtro secundário às próximas partículas. Esses aglomerados formam o chamado reboco (cujo termo em inglês é "*cake*"). Identificar a formação do reboco, ou a forma de distribuição das partículas no interior do filtro, é importante para se conhecer o processo de filtração, ou seja, saber se o filtro retém partículas de maneira homogênea, ou se há um acúmulo preferencial em determinadas regiões. Isto pode indicar a presença de defeitos internos no filtro, tais como irregularidade na rede de poros, canais preferenciais, ou mesmo se o filtro está mal dimensionado. Neste contexto é que se torna importante o papel da tomografia computadorizada, à medida que permite mapear a distribuição interna das partículas retidas pelo meio filtrante.

3.3 Métodos de controle da qualidade de filtros

Ensaio destrutivo. Referem-se àqueles ensaios após os quais o elemento filtrante não pode ser reutilizado. São ensaios que visam reproduzir as condições de uso para as quais o filtro é designado. Esses ensaios consistem em submeter o filtro a um processo de contaminação artificial. Diversos tipos de contaminantes artificiais podem ser utilizados. Um tipo comum são as microesferas de vidro, cujo tamanho pode variar da ordem de 20 μm até 300 μm ou mais. Os ensaios destrutivos são utilizados principalmente em laboratório.

Ensaio não destrutivo. São os ensaios realizados principalmente pelos fabricantes para se determinar e/ou controlar algumas propriedades dos filtros, tais como permeabilidade e tamanho médio de poros. O teste de permeabilidade ao ar e o método da bolha são os que

representam essa classe. O primeiro consiste na passagem de um fluxo de ar através do elemento filtrante, com o objetivo de se medir a permeabilidade do meio. O segundo tem como objetivo o controle do tamanho médio de poros.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar o experimento de contaminação artificial do filtro, foi montado o aparato mostrado na fig. 3. Para o processo de contaminação foram utilizadas as microesferas de vidro (100 gramas), adicionadas a um reservatório de água localizado a 8 metros de altura em relação ao nível do filtro. O contaminante foi adicionado a uma razão constante ao longo do experimento, cuja duração foi de 60 minutos. Foi utilizado um filtro tipo cartucho composto por fibras de polipropileno. Nesses filtros, os feixes de fibras são bobinados e montados em volta de um suporte de plástico, perfurado e em formato cilíndrico. Esse suporte tem como objetivo principal dar sustentação mecânica às fibras. O elemento filtrante foi montado em uma carcaça transparente (acrílico), para facilitar a visualização do processo, conforme é recomendado por Williams (1995). Isto permite, por exemplo, visualizar a presença de bolhas de ar no interior da carcaça, principalmente no início do processo, quando é necessário se estabilizar o escoamento eliminando ou diminuindo a presença de ar.

Terminado o processo de contaminação, foram feitas as imagens tomográficas do filtro. Neste exame, 80 imagens foram geradas e armazenadas em disquetes. Após o exame tomográfico, estas imagens foram, primeiramente, transferidas dos disquetes para uma estação de trabalho para se proceder à análise e ao processamento das mesmas, utilizando-se o software Khoros. Para se iniciar o processo de análise, foi necessário criar um procedimento automático para se converter cada imagem, originalmente no formato próprio do tomógrafo, para o formato do Khoros.

Alguns filtros prensados, do tipo carbono ativado, também foram analisados para se investigar a presença de defeitos.

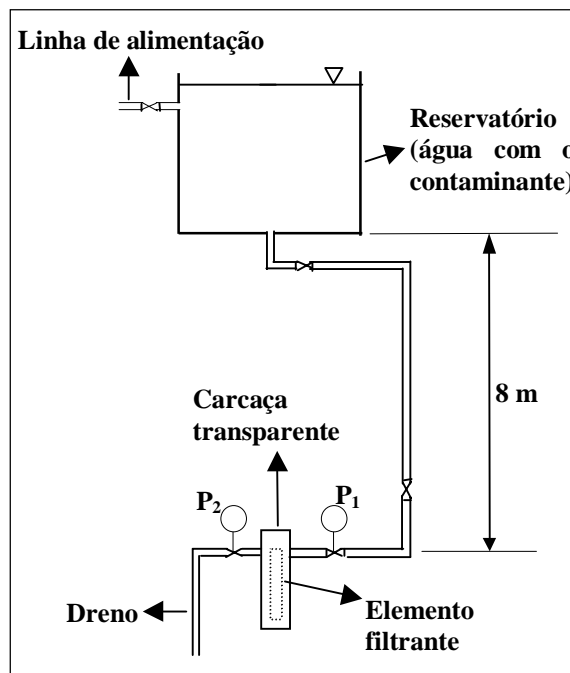


Figura 3 - Diagrama esquemático da montagem experimental para a contaminação do filtro

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Comparação entre as imagens do filtro contaminado e do filtro virgem

Como o número de imagens obtidas é relativamente grande (80 imagens), apresenta-se algumas, para se comparar aspectos do filtro virgem (sem contaminante) e do filtro contaminado. Na fig. 4 mostra-se duas imagens, sendo que a primeira corresponde ao filtro virgem e a segunda ao filtro contaminado. Na imagem correspondente ao filtro contaminado (fig. 4-b), as regiões com a presença do contaminante aparecem com bastante destaque. Na fig. 5 mostra-se os perfis de intensidade correspondentes às linhas horizontais mostradas na fig. 4. Neste gráfico pode-se ver os picos correspondentes aos aglomerados de partículas vistos na fig. 4-b. Na próxima seção mostra-se a análise global das imagens, feita quantitativamente e apresentada de forma gráfica.

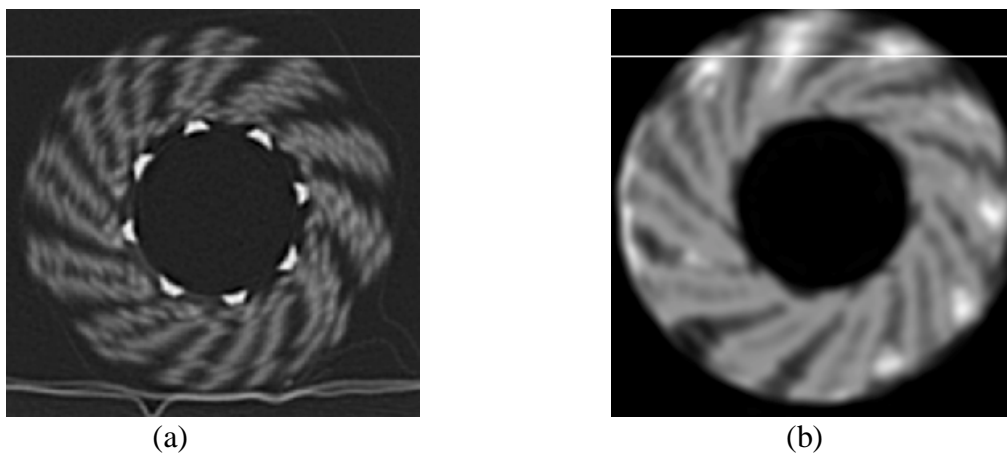


Figura 4 – Imagens do filtro sem contaminação (a) e do filtro contaminado (b)

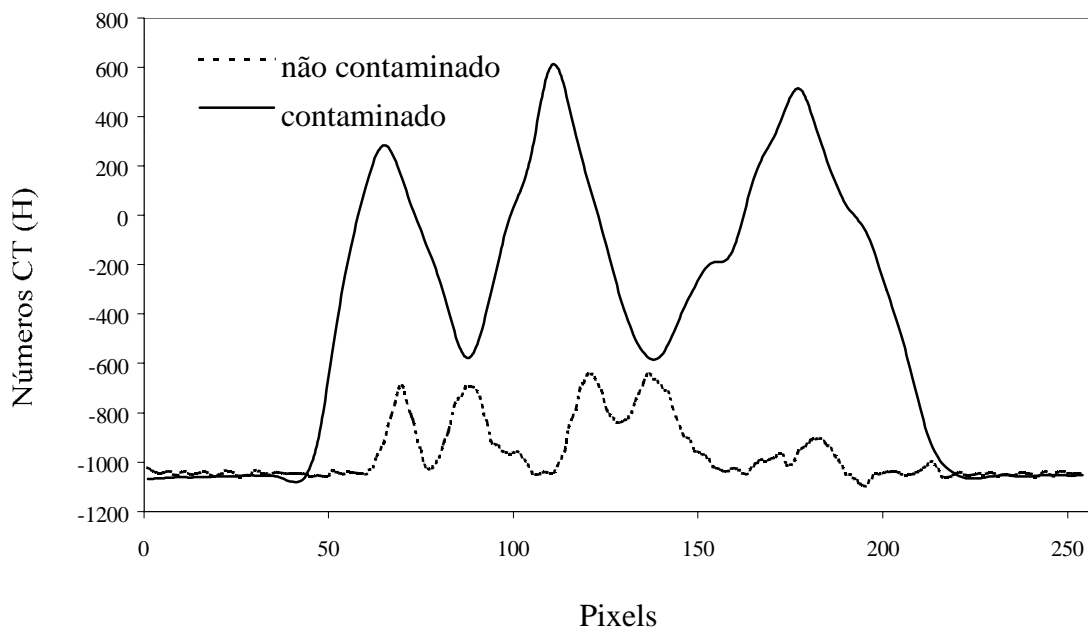


Figura 5 – Perfis de intensidade correspondentes às linhas mostradas na fig. (4)

5.2 Análise e processamento das imagens do filtro contaminado

A partir dos dados originais mediu-se, imagem por imagem, o número de pixels cujo valor do número CT indicava a presença de partículas. Como a densidade das partículas é bem maior do que a densidade do filtro, portanto maior CT, há um razoável contraste entre os pixels com a presença de partículas, e os pixels sem a presença de partículas. Desta forma, estabeleceu-se um valor limiar de 10 H (*threshold*), cujos pixels contendo CTs acima desse valor revelavam a presença do contaminante. A escolha desse limiar baseou-se no fato de que o CT da água é igual a 0 H e levando-se em conta uma margem de erro que tipicamente varia em torno de 10 H.

Inicialmente, cada imagem foi dividida em três regiões circulares de mesma área, medindo-se, em cada uma, o número de pixels com a presença de partículas, ou a concentração relativa de sólido em cada região. Para cada região foi aplicada uma máscara de forma a isolar a área de interesse. A área mais externa foi delimitada pela máscara 1, a intermediária pela máscara 2 e a interna pela máscara 3, conforme fig. 6.

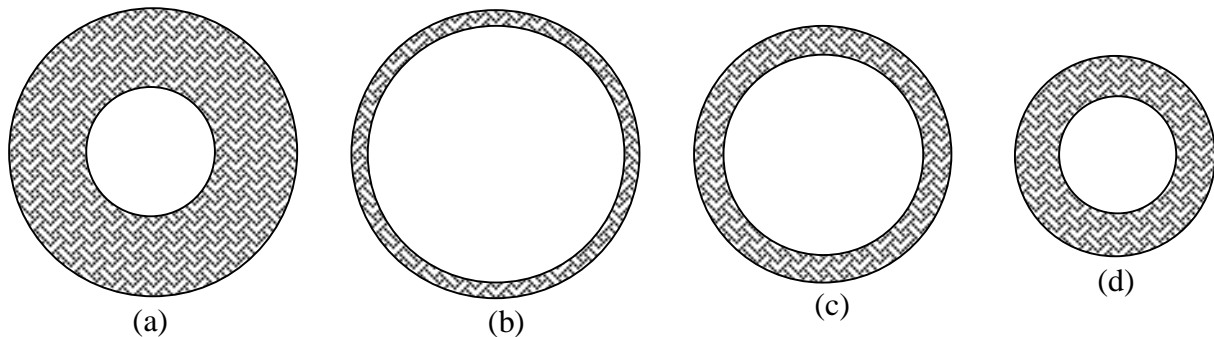


Figura 6– (a) Forma da imagem original, (b) máscara 1, (c) máscara 2 e (d) máscara 3

Na fig. 7 apresenta-se, graficamente, para cada região, a concentração relativa de sólido (em número de pixels) ao longo do comprimento do filtro que, no gráfico, está representado pelo número de slices. Pode-se notar que, neste caso, a concentração é bem maior na região mais externa do elemento (área relativa à máscara 1), diminuindo sensivelmente na região mais interna (área relativa à máscara 3), apesar dessas regiões terem a mesma área, ou seja, boa parte do filtro reteve pequena quantidade de partículas. Em termos percentuais, aproximadamente 62,5 % das partículas estão concentrados na região externa, 31,3 % na região intermediária e apenas 6,2 % na região interna. Isto é um indicativo de que este filtro se caracteriza por uma eficiência de remoção localizada nas áreas mais externas, pelo menos nas condições do teste realizado. Um dos parâmetros a se levar em conta é a relação do tamanho das partículas com respeito ao tamanho dos poros, da qual dependerá a predominância de um ou outro fenômeno de captura.

A alta concentração de sólido na área mais externa do filtro está indicando que no início do processo, as partículas maiores são presas pelo mecanismo de captura mecânica e, quando se atinge uma determinada concentração, o fenômeno da interação entre as partículas passa a predominar nessa região, ou seja, as partículas acumuladas inicialmente passam a funcionar como uma barreira às próximas partículas, ou como uma espécie de filtro secundário.

Outra constatação em relação ao gráfico da fig. 7 é que também no sentido do comprimento do filtro há uma considerável oscilação no grau de acúmulo de partículas, o que se verifica a partir dos picos observados nas curvas, tais como nas posições dos slices 4, 44 e 57, por exemplo. Isso indica certos canais preferenciais no interior do filtro.

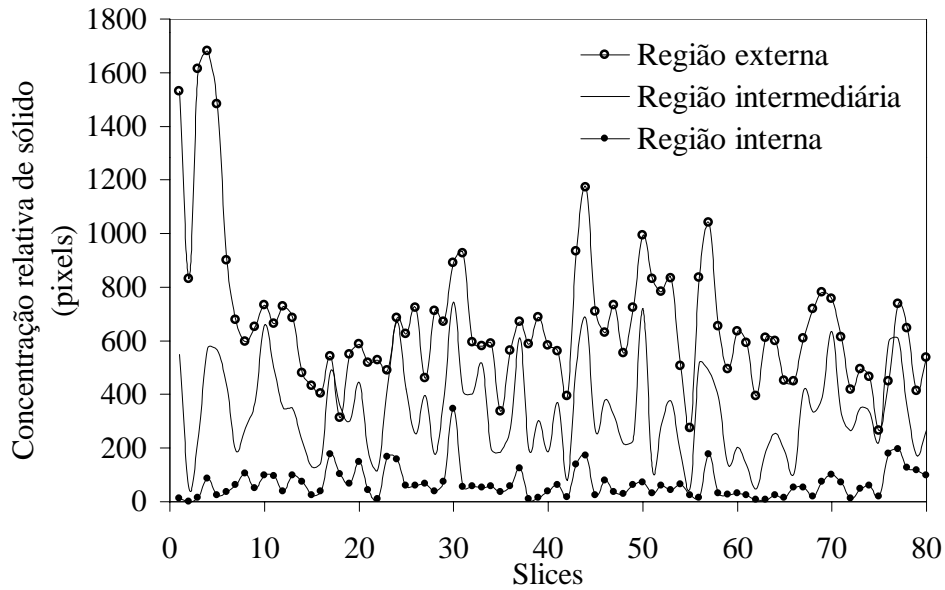


Figura 7 – Concentração de partículas ao longo do filtro

Técnicas de reconstrução permitiram utilizar as seqüências de imagens relativas às regiões delimitadas pelas máscaras 1, 2 e 3 para se obter uma reprodução tridimensional de cada região do filtro, de acordo com as partes (b), (c) e (d) da fig. 6. Na fig. 8 apresenta-se as três regiões correspondentes. Do preto ao branco existe uma escala de valores representados em níveis de cinza (preto representando o valor mínimo e branco o valor máximo). Pode-se notar que na região de maior diâmetro externo os tons em branco são mais pronunciados, representando regiões de maior densidade e maior presença de partículas. Na região intermediária, esta presença é mais moderada e na região interna os tons em branco aparecem em pequena intensidade, o que está de acordo com a análise apresentada no gráfico da fig. 7.

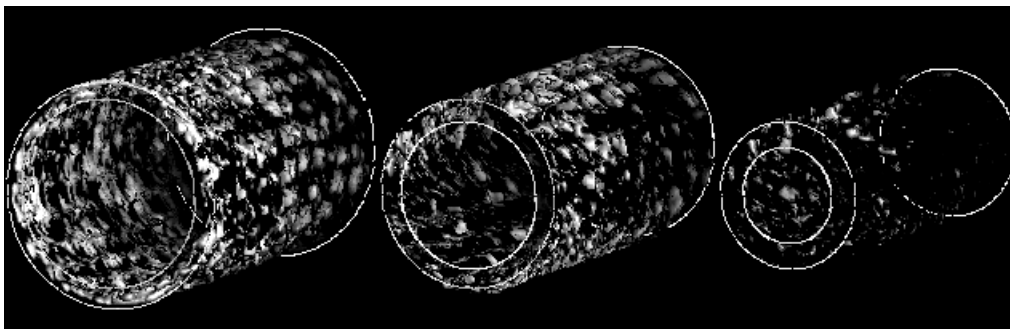


Figura 8 - Reconstrução 3d das regiões delimitadas pelas máscaras 1, 2 e 3

5.3 Investigação de defeitos internos

Na fig. 9 apresenta-se uma seqüência de seis imagens relativas a um filtro de carbono ativado. Estas imagens mostram claramente a presença de um fraturamento no interior do filtro, ocorrida pelo excesso de pressão a que o mesmo foi submetido. Também se nota a presença de várias inclusões, caracterizadas pelas regiões mais brilhantes na imagem. Provavelmente houve alguma falha no processo de fabricação desse filtro, resultando nessas inclusões.

Neste aspecto, a tomografia pode atuar como uma ferramenta importante para se monitorar processos de fabricação de filtros, tanto processos já existentes quanto, e

principalmente, aqueles em desenvolvimento. Pode atuar, também, na análise dos efeitos provocados por oscilações bruscas de alguns parâmetros envolvidos no processo de filtração, tais como a pressão atuante no filtro e vazão de fluido.

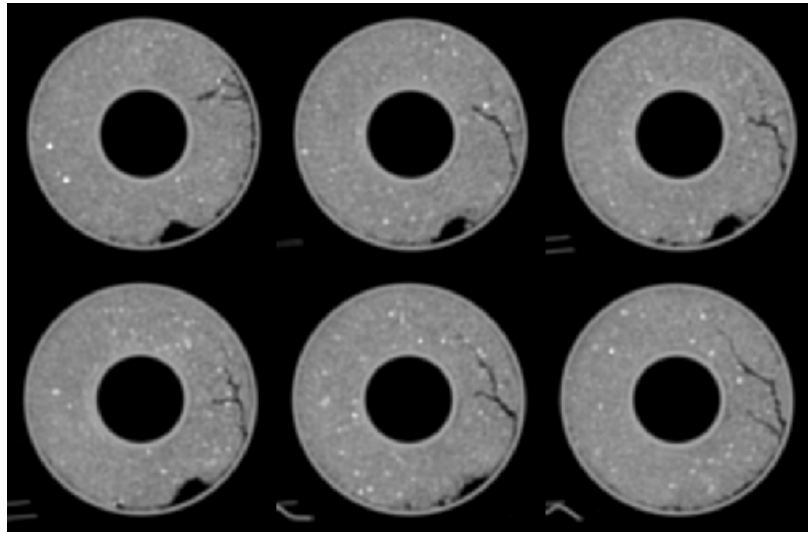


Figura 9 – Sequência de seis imagens mostrando defeitos e inclusões em um filtro de carbono

6. CONCLUSÕES

A boa resolução, tanto de contraste quanto espacial, permitiu a utilização da tomografia de raios-x na caracterização do processo de contaminação de filtros. Foi possível mapear a distribuição do sólido no interior do filtro, mostrando-se que, no caso do elemento analisado, grande parte se concentrou nas regiões mais externas do filtro. Técnicas de reconstrução tridimensional permitiram reproduzir essa distribuição. A análise das imagens mostrou que ao longo do comprimento do filtro também existem certas regiões preferenciais para o acúmulo de partículas. A tomografia permitiu, ainda, a detecção de defeitos, tais como inclusões resultantes de alguma falha no processo de fabricação e fraturamentos decorrentes de sobrepressões atuantes no filtro de carbono ativado.

Por fim, este trabalho mostra que a tomografia computadorizada de raios-x apresenta grande potencial na área de filtros processos de filtração, à medida que torna possível conhecer o perfil de distribuição de sólido no interior do filtro permitindo, assim, verificar possíveis anomalias no meio filtrante. Pode, ainda, servir como ferramenta de apoio no controle de processos de fabricação, bem como na verificação dos efeitos causados sobre o elemento filtrante quando ocorre algum distúrbio no processo de filtração.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos responsáveis pelo departamento de imagem médica do Hospital Boldrini, de Campinas, por permitirem o uso do tomógrafo instalado naquele hospital.

REFERÊNCIAS

Bathias C.; Cagnasso, A., 1992, Application of x-ray tomography to the nondestructive testing of high-performance polymer composites. *Damage Detection in Composite Materials*, ASTM STP 1128, J. E. Masters, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.3554.

- Barakhov, V.I., 1989, Aspects of the study of moisture transfer in composite materials with the help of x-ray computational tomography. *Journal of Engineering Physics*, vol. 55, n. 6, pp.1359-1363.
- Bart-Smith, H. et al., 1998, Compressive deformation and yielding mechanisms in cellular Al alloys determined using X-ray tomography and surface strain mapping. *Acta Materialia*, vol.46, n.10, pp.3583-3592.
- Guvenilir, A. and Stock, S.R., 1998, High resolution computed tomography and implications for fatigue crack closure modelling. *Fatigue & fracture of engineering materials*, vol. 21, n. 4, p. 439.
- Honarpour, M.M.; Cromwell, V.; Hatton, D. and Satchwell, R., 1985, "Reservoir Rock Descriptions Using Computer Tomography", *SPE 14272 presented at the Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE*.
- Kantzas, A.; Wright, I. and Kalogerakis N., 1997, Quantification of channelling in polyethylene resin fluid beds using X-Ray Computer Assisted Tomography (CAT). *Chemical Engineering Science*, vol. 52, n. 13, pp. 2023-2035.
- Massarani, G.; Damasceno, J.J.R. and Souza, R., 1990, Determination of a Concentration Profile in a Continuous Thickener Using a Gamma Ray Attenuation Technique. *Fluid/Particle Separation Journal*, vol. 3, n. 4, pp. 2894-2896.
- Tarleton, E.S. and Hancock, D. L.,1996, Imaging of filter cakes through Electrical Impedance Tomography. *Filtration & Separation*, vol. 33, n. 6, pp. 491-494.
- Wellington, S.L and Vinegar, 1987, X-Ray computerized tomography *Journal of Petroleum Technology*, vol. 39, n. 8, pp. 885-898.
- Williams, C.J. and Edyvean, R.G.J., 1995, Testing cartridge filters in aqueous media: Interpreting the results - The pitfalls and problems. Part 1: Evaluating performance methods. *Filtration and Separation*, vol. 32, n. 2, pp. 157-161.
- Williams, C.J. and Edyvean, R.G.J., 1995, Testing cartridge filters in aqueous media: Interpreting the results - The pitfalls and problems. Part 2: The problems and pitfalls of cartridge filter performance evaluation. *Filtration & Separation*, vol. 32, n. 3, pp. 255-259.

CHARACTERIZATION OF FILTERS AND FILTRATION PROCESS USING X-RAY COMPUTERIZED TOMOGRAPHY

Abstract. *The objective of this work is to present the potential of X-Ray computerized tomography as a tool for internal characterization of filters used in the solid-liquid separation, mainly the water filters. Cartridge filters (for industrial and domestic applications) contaminated with glass beads were used. The scanning process was carried out both with and without contaminant in the filter to compare the attenuation coefficient of the clean filter and the contaminated filter. The images showed that it is possible to map the internal structure of the filters and the distribution of the contaminant, permitting a local analysis, that is not possible through the standard tests used by the manufacturers. These standard tests reveal only global characteristics of the filter media. The possibility of application for manufacturing process control was also shown, because the non-invasive nature is an important advantage of the technique, which also permitted damage detection in filters submitted to severe operational conditions.*

Key words: *Cartridge Filters, Solid Distribution, X-Ray Tomography, Damage Detection*