

## CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS TECIDO-EQUIVALENTES PARA USO EM CONSTRUÇÃO DE FANTOMAS FÍSICOS

Edvan V. de Souza<sup>1</sup>, Alex C. H. de Oliveira<sup>3</sup>, José W. Vieira<sup>1,2</sup>, Fernando R. A. Lima<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco  
Av. Prof. Luís Freire, 500, Curado, Recife-PE  
CEP 50740-540, Brasil  
[edvanmsn@hotmail.com](mailto:edvanmsn@hotmail.com)

<sup>2</sup>Escola Politécnica de Pernambuco - UPE  
Rua Benfica, 455, Madalena, Recife-PE  
CEP 50750-470, Brasil  
[jose.wilson59@uol.com.br](mailto:jose.wilson59@uol.com.br)

<sup>3</sup>Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)  
Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Recife- PE  
CEP 50670-901, Brasil  
[oliveira\\_ach@yahoo.com](mailto:oliveira_ach@yahoo.com)

<sup>4</sup>Centro Regional de Ciências Nucleares (CRCN-NE / CNEN)  
Av. Prof. Luiz Freire, 200  
50740-540 Recife, PE  
[falima@cenen.gov.br](mailto:falima@cenen.gov.br)

### RESUMO

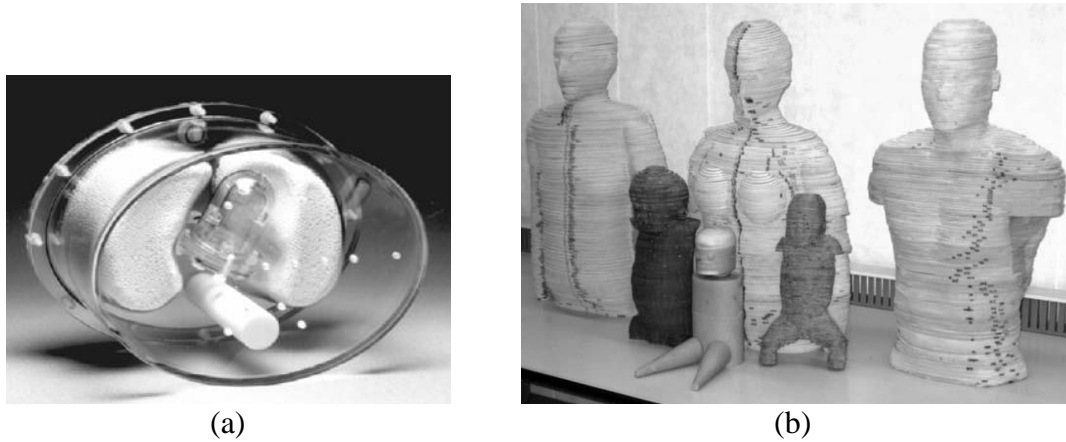
Fantomas são modelos físicos ou computacionais usados para simular o transporte da radiação ionizante, suas interações com os tecidos do corpo humano e avaliar a deposição de energia. Dependendo da aplicação, pode-se construir fantomas de diversos tipos e características. Os fantomas físicos são feitos de materiais com comportamento semelhante aos tecidos humanos expostos à radiação ionizante, os chamados materiais tecido-equivalentes. A caracterização dos vários materiais tecido-equivalentes é importante para que a escolha dos materiais a serem utilizados seja apropriada, buscando assim um melhor custo-benefício. O principal objetivo deste trabalho é produzir tabelas contendo as principais características dos materiais tecido-equivalentes. Estas tabelas foram produzidas no Microsoft Office Excel. Entre as principais características dos materiais tecido-equivalentes que foram adicionadas às tabelas, estão densidade, composição química, estado físico, estabilidade química e solubilidade. A principal importância deste trabalho é contribuir para construção de fantomas físicos de alta qualidade e evitar o desperdício de materiais ao serem selecionados adequadamente.

### 1. INTRODUÇÃO

Fantomas são modelos físicos ou computacionais usados para simular o transporte da radiação ionizante, suas interações nos tecidos do corpo humano e avaliar a deposição de energia. Os fantomas são geralmente construídos com o propósito de realizar tanto controle de qualidade de imagens e equipamentos em radiodiagnóstico quanto avaliações dosimétricas em aplicações nucleares.

Os fantomas físicos são feitos de materiais com comportamento semelhante aos tecidos humanos expostos à radiação ionizante, os chamados materiais tecido-equivalentes [1].

Idealmente, estes devem ter a mesma densidade e o mesmo coeficiente de atenuação ( $\mu$ ) dos tecidos humanos simulados [2]. A Figura 1 mostra exemplos de fantasmas físicos.



**Figura 1 - (a) Fantoma *Lung-Spine SPECT*, Modelo ECT/LUNG/P (Data Spectrum Corporation). Simula as estruturas anatômicas e distribuições de radioatividade na parte superior do tronco humano. (b) Uma série de fantasmas antropomórficos desenvolvida na Universidade da Flórida.**

Um grande número de materiais tecido-equivalentes tem sido desenvolvido para aplicações em dosimetria, imageamento e proteção radiológica. A composição dos materiais difere consideravelmente dependendo da aplicação. Várias propriedades, tais como tipo de radiação, intervalo de energia, densidade, etc., precisam ser consideradas no projeto [3].

Em geral, os tecidos mais importantes que precisam ser representados são o muscular (esquelético), o adiposo, o ósseo (estes três, representando mais de 70% da massa corporal), o pulmonar (importante devido às perturbações nas distribuições de dose) e alguns tecidos de radiosensibilidade considerável como os seios, olhos, pele, ovário, testículo e tireoide. Avaliações dosimétricas em radioterapia podem envolver órgãos específicos tais como o cérebro, o fígado, os rins, etc [4].

Os materiais de base usados no desenvolvimento de materiais tecido-equivalentes são frequentemente polímeros, especificamente resinas epóxi, polietileno e outros compostos, como cera de parafina, poliestireno, polipropileno, poliuretano, líquidos orgânicos e soluções químicas [5, 6, 7]. Além desses, a ICRU Report 44 (1989) compilou vários outros materiais que podem ser usados como tecido-equivalente. O polietileno, a cortiça e o alumínio são os mais cotados para substituir a gordura, o pulmão e o osso, respectivamente [8]. A maioria dos materiais desenvolvidos para radioterapia ou CT é baseada em polietileno ou resinas epóxi [3].

Desde a publicação da ICRU 44 (1989), não há nenhum outro trabalho ou publicação que reúna a maioria dos materiais tecido-equivalentes desenvolvidos ou aplicados na construção de fantasmas físicos. Por isso, o objetivo deste trabalho é produzir tabelas contendo as principais características dos materiais tecido-equivalentes usados na construção de fantasmas físicos.

## **2. METODOLOGIA**

Inicialmente, as tabelas foram construídas a partir da reprodução das tabelas da ICRU 44 (1989), adicionando outras características importantes dos materiais. As tabelas foram produzidas no Microsoft Office Excel 2007. Em seguida, foram pesquisados novos materiais tecido-equivalentes que vêm sendo usados para construção de fantomas físicos. Entre as principais características dos materiais tecido-equivalentes que foram adicionadas às tabelas, estão densidade, composição química, estado físico, estabilidade química e recomendações de uso. Foram utilizados os instrumentos disponíveis no Laboratório de Dosimetria Numérica (LDN) para determinar a densidade de alguns materiais.

## **3. RESULTADOS**

As tabelas construídas foram baseadas nas da ICRU 44. São quatro tabelas, uma para cada tipo de material tecido-equivalente: puros, industriais, misturas químicas e manufaturados. A Tabela 1 apresenta os materiais puros, esses materiais são formados por um único tipo de substância e podem ser encontrados facilmente na natureza. A Tabela 2 mostra os materiais formados por misturas químicas, esses materiais são formados por mais de uma substância pura. A Tabela 3 apresenta os materiais industrializados (fabricados para uso geral). A Tabela 4 apresenta os materiais manufaturados, esses são materiais desenvolvidos por empresas ou pesquisadores. Nesta última tabela, foram omitidos os materiais apresentados na ICRU 44.

## **4. CONCLUSÃO**

Este trabalho teve como objetivo produzir tabelas contendo as principais características de materiais tecido-equivalentes que possam ser usados na construção de fantomas físicos. Até o momento foram compiladas as tabelas de materiais da ICRU 44 (1989) e adicionados novos materiais que foram desenvolvidos ou aplicados na construção de fantomas físicos após 1989. Essas tabelas irão contribuir para obtenção de resultados de alta qualidade, tanto na construção de fantomas físicos quanto em experimentos dosimétricos, e poderão ser usadas não só no LDN, como também em outros laboratórios de pesquisa da área. As tabelas apresentadas estarão em breve disponíveis no site do Grupo de Dosimetria Numérica (GDN/CNPq): [www.dosimetrianumerica.org](http://www.dosimetrianumerica.org).

**Tabela 1. Materiais Puros**

| <b>Material Substituto</b> | <b>Tecido Substituído</b> | <b>Composição Química</b> | <b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Ponto de Fusão / Ebulição (°C)</b> | <b>Solubilidade</b>  |
|----------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--|
| Água                       | Músculo                   | H <sub>2</sub> O          | 1                                   | 0 / 100                               |  |
| Alumínio                   | Osso                      | Al                        | 2,7                                 | 660,3 / 2519                          | Solúvel em HCl, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , água quente e soluções alcalinas. |
| Magnésio                   | Osso                      | Mg                        | 1,738                               | 650 / 1090                            |  |
| Enxofre                    | Osso                      | S                         | 1,96                                | 115,2 / 444,7                         | Cerca de 25g/L (em acetona).   |

**Tabela 2. Misturas Químicas**

| <b>Material Substituto</b>                           | <b>Tecido Substituto</b> | <b>Composição Química</b>   | <b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Referência</b>   |
|--|--------------------------|---|-------------------------------------|---|
| Etanol + Água  | Tecido Mole              | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH + H <sub>2</sub> O                       | 0,789 – 1,00                        | SANADA et al., 1999;<br>VERHAEGEN; DEVIC, 2005;<br>BAZALOVA et al., 2007. |
| Nitrato de Cálcio Tetra hidratado + Água             | Osso                     | Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4 H <sub>2</sub> O + H <sub>2</sub> O | 1,00 – 1,55                         | OLIVEIRA, 2012.   |
| Resina Epóxi (66.93%) + Carbonato de Cálcio (33.07%) | Esqueleto                |   | 1,41                                | KINASE et al., 2003.  |
| Resina Epóxi (38.20 %) + Hidroxiapatita (61.80%)     | Ossos Corticais          |   | 1,81                                | KINASE et al., 2003.  |
| Resina Epóxi (97.25%) + Carbonato de Cálcio (2.75 %) | Ossos Trabeculares       |   | 1,17                                | KINASE et al., 2003.  |

**Tabela 3. Materiais Industrializados**

| <b>Material Substituto</b>        | <b>Tecido Substituído</b> | <b>Composição Química</b>                                     | <b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Ponto de Fusão / Ebulição (°C)</b> | <b>Solubilidade</b>     |
|-----------------------------------|---------------------------|---|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| Acrílico (PMMA)                   | Músculo                   | (C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>n</sub>  | 1,17 – 1,20                         | 130-140 / 200                         |                         |
| 2-Etoxietanol (Etilglicol)        | Gordura                   | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>                 | 0,93                                | -76 / 135                             | Solúvel em água.        |
| Cera de Parafina                  | Gordura                   | C <sub>n</sub> H <sub>2n+1</sub> , n > 15                     | 0,93                                | 50 - 57 / 199                         | Insolúvel em água.      |
| Gesso de Paris                    | Osso                      | CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O                          | 2,32                                | 1460 /                                | 0,24 g/100 mL (20 °C)   |
| Mylar/Melinex (PET)               | Músculo                   | (C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub> ) <sub>n</sub> | 1,4                                 | > 250 /                               |                         |
| Nylon-6 (Poliamida)               | Músculo                   | (C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> NO) <sub>n</sub>              | 1,13                                | 216 /                                 |                         |
| Poliestireno                      | Músculo                   | (C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> ) <sub>n</sub>                 | 1,03 – 1,06                         | 240 / 145                             |                         |
| Polietileno                       | Gordura                   | (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) <sub>n</sub>                 | 0,95                                | 140 /                                 |                         |
| Policloreto de Polivinila (P.V.C) | Osso                      | (C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl) <sub>n</sub> ;             | 1,35                                | > 180 /                               | Praticamente insolúvel. |
| Polietileno                       | Gordura                   | (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) <sub>n</sub>                 | 0,95                                | 140 /                                 |                         |

**Tabela 4. Materiais Manufaturados**

| <b>Material Substituto</b> | <b>Tecido Substituído</b> | <b>Composição Química</b>   | <b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Referência</b>    |
|----------------------------|---------------------------|---|-------------------------------------|----------------------|
| ARL                        | Tecido mole               | H(9,24%); C(67,91%); N (2,5%); O (20,09%); Sb(0,25%)                          | 0,985                               | KLECK et al.,1990    |
| ARL                        | Tecido mole               | H(9,07%); C(67,88%); N(2,29%); O(20,48%); Sb(0,22%); indefinido(0,06%)        | 1,006                               | KLECK et al.,1990    |
| KSS/<br>CAPINTEC           | Músculo                   | H(8,40%); C(69,20%); N(3,90%); O(15,40%); P(0,70); Cl(2,40%)                  | 1,064                               | KLECK et al.,1990    |
| KSS/<br>CAPINTEC           | Músculo                   | H(8,93%); C(69,92%); N(2,79%); O(17,72%); P(0,77); Cl(2,07%); indefinido(0,8) | 1,074                               | KLECK et al.,1990    |
| RSD                        | Músculo                   | H(9,45%); C(66,01%); N(5,05%); O(19,20%); S(0,03%); Ba(0,14%)                 | 1,056                               | KLECK et al.,1990    |
| RSD                        | Tecido mole               | H(9,33%); C(65,63%); N(4,58%); O(19,12%); Ba(0,15%); indefinido(1,19%)        | 0,991                               | KLECK et al.,1990    |
| RW3                        | Água                      | H(7,59%); C(90,41%); O(0,80%); Ti(1,20%)                                      | 1,050                               | HILL et al., 2010    |
| RMI457                     | Água                      | H(8,09%); C(67,22%); N(2,40%); O(19,84%); Cl(0,13%); Ca(2,32%)                | 1,030                               | HILL et al., 2010    |
| VW                         | Água                      | H(7,70%); C(68,74); N(2,27); O(18,86%); Cl(0,13%); Ca(2,31%)                  | 1,030                               | HILL et al., 2010    |
| PRESAGE                    | Água                      | H(8,92%); C(60,74%); N(4,46%); O(21,72%); Cl(3,34%); Br(0,84%)                | 1,101                               | HILL et al., 2010    |
| PWDT                       | Água                      | H(7,40%); B(2,26%); C(46,70%); N(1,56%); O(33,52%); Mg(6,88%); Al(1,40%)      | 1,039                               | HILL et al., 2010    |
| PAGAT                      | Água                      | H(10,59%); C(6,81%); N(2,42%); O(80,08%); P(0,02%); Cl(0,02%)                 | 1,026                               | HILL et al., 2010    |
| PW                         | Água                      | H(9,25%); C(62,82%); N(1,00%); O(17,94%) ;Cl(0,96%); Ca(7,95%); Br(0,03%)     | 1,013                               | HILL et al., 2010    |
| AD1                        | Gordura                   | Polipropileno (96,112%); MgO(2,015%); CaCO <sub>3</sub> (1,873%)              | 0,941                               | HOMOLKA et al., 2002 |

**Tabela 4. Materiais Manufaturados (Cont.)**

| <b>Material Substituto</b> | <b>Tecido Substituído</b> | <b>Composição Química</b>   | <b>Densidade ( g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Referência</b>    |
|----------------------------|---------------------------|---|--------------------------------------|----------------------|
| MS1                        | Músculo                   | Poliestireno (53,806%); Polipropileno(35,871%); MgO(5,028%); CaCO <sub>3</sub> (5,295%)                 | 1,067                                | HOMOLKA et al., 2002 |
| SP1                        | Ossos Trabeculares        | Poliestireno(79,766%); TiO <sub>2</sub> (4,845%); CaCO <sub>3</sub> (15,388%)                           | 1,207                                | HOMOLKA et al., 2002 |
| VC4                        | Coluna Vertebral C4       | Poliestireno(57,224%); MgO(2,558%); CaCO <sub>3</sub> (40,218%)   | 1,443                                | HOMOLKA et al., 2002 |
| PSPP1                      | Água                      | Poliestireno (57,665%); Polipropileno(38,443%); TiO <sub>2</sub> (3,402%); MgO(0,490%); Gráfito(0,106%) | 1,021                                | HOMOLKA et al., 2002 |
| WAS CAMERON                | Osso                      | H(8,62%); C(54,4%); O(20,1%); Ca(16,8%)   | 1,28                                 | TOMIMASU, 2000       |
| Triolein                   | Gordura                   | H(1,8%); C(77,3%); O(10,8%)   | 0,92                                 | TOMIMASU, 2000       |
| Stacey latex               | Pulmão                    | H(10,1%); B(8,0%); C(9,2%); O(0,12%); S(1,91%); Zn(0,67%)   | 0,26                                 | TOMIMASU, 2000       |
| LNI                        | Pulmão                    | H(6,0%); C(51,4%); N(4,3%); O(30,7%); Al(7,5%)  | 0,30                                 | TOMIMASU, 2000       |

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFPE, CRCN e ao DEN/UFPE pela estrutura computacional e o suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS

1. A. C. H. Oliveira, “Influência da Qualidade de Imagens CT na Avaliação da Distribuição de Dose em Planejamento Radioterápico Baseado em Métodos Monte Carlo”, *Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE* (2012).
2. D. E. Hintenlang, W. E. Moloney, Winslow, “Handbook of Anatomical Models for Radiation Dosimetry,” *J. Physical Phantoms for Experimental Radiation Dosimetry*, EUA, pp.389-413 (2010).
3. P. Homolka, A. Gahleitner, M. Prokop, R. Nowotny, “Optimization of the composition of phantom materials for computed tomography,” *Physics in Medicine and Biology* (2002).
4. ICRU – International Commission on Radiation Units and Measurements, “Tissue Substitutes in Radiation Dosimetry and Measurement: ICRU Report 44”, Bethesda (1989).
5. S. J. Thomas, “Relative Electron Density Calibration of CT Scanners for Radiotherapy Treatment Planning,” *The British Journal of Radiology*, **72**, pp.781-786 (1999).
6. L. G. O. Silva, “Construção de um PET Didático: Construção de um Fantoma,” *Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa* (2010).
7. I. Yohannes, D. Kolditz, O. Langner, W. A. Kalender, “A formulation of tissue- and water-equivalent materials using the stoichiometric analysis method for CT-number calibration in radiotherapy treatment planning,” *Physics in Medicine and Biology*, **57** (2012).
8. S. Tomimasu, “Desenvolvimento de Material Simulador de Tecido Humano a partir do Látex de Borracha Natural Vulcanizado com Radiação Gama,” *Tese de Doutorado, IPEN, São Paulo* (2000).
9. S. Sanada, K. Kawahara, T. Yamamoto, T. Takashima, “New Tissue Substitutes Representing Cortical Bone and Adipose Tissue in Quantitative Radiology”, *Physics in Medicine and Biology*, **44**, pp.107-112 (1999).
10. F. Verhaegen, S. Devic, “Sensitivity study for CT image use in Monte Carlo treatment planning”, *Physics in Medicine and Biology*, **50**, pp.937-946 (2005).
11. M. Bazalova, L. Beaulieu, S. Palefsky, F. Verhaegen, “Correction of CT artifacts and its influence on Monte Carlo dose calculations”, *Medical Physics*, **34** (2007).
12. S. Kinase, M. Kimura, H. Noguchi, “Development of Skeletal Substitute Materials”, *Radioisotopes*, **52**, pp.277-284 (2003).
13. J. H. Kleck, J. B. Smathers, F. E. Holly, L. T. Myers, “Anthropomorphic radiation therapy phantoms: A quantitative assessment of tissue substitutes”, *Medical Physics*, **17** (1990).



14. R. Hill, Z. Kuncic, C. Baldock, “The water equivalence of solid phantoms for low energy photon beams”, *Medical Physics*, **37**, (2010).