



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/06.29.18.24-TDI

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO CERÂMICO A BASE DE B4C PARA APLICAÇÃO COMO BLINDAGEM DE RADIAÇÃO EM APLICAÇÕES ESPACIAIS

Miguel Adriano Inácio

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Maria do Carmo de Andrade Nono, Francisco Cristovão Lourenço de Melo, e Claudio Antonio Federico, aprovada em 28 de abril de 2015.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JPCBGB>

INPE

São José dos Campos

2015

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
(CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/06.29.18.24-TDI

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO CERÂMICO A BASE DE B4C PARA APLICAÇÃO COMO BLINDAGEM DE RADIAÇÃO EM APLICAÇÕES ESPACIAIS

Miguel Adriano Inácio

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Maria do Carmo de Andrade Nono, Francisco Cristovão Lourenço de Melo, e Claudio Antonio Federico, aprovada em 28 de abril de 2015.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JPCBGB>

INPE

São José dos Campos

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Inácio, Miguel Adriano.

In1d Desenvolvimento de compósito cerâmico a base de B4C para aplicação como blindagem de radiação em aplicações espaciais / Miguel Adriano Inácio. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xxxii + 159 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/06.29.18.24-TDI)

Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientadores : Drs. Maria do Carmo de Andrade Nono, Francisco Cristovão Lourenço de Melo, e Claudio Antonio Federico.

1. Cerâmica de B4C. 2. Radiação ionizante. 3. Blindagem de radiação. 4. Satélite. I.Título.

CDU 620.179.111:666.3



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Doutor(a)** em **ETE/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores**

Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono


Presidente / Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Francisco Cristovão Lourenço de Melo


Orientador(a) / AMR/IAE/DCTA / SJCampos - SP

Dr. Claudio Antonio Federico


Orientador(a) / IEAv/CTA / São José dos Campos - SP

Dr. Chen Ying An


Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Francisco Piorino Neto


Membro da Banca / AMR/IAE/DCTA / SJCampos - SP

Dra. Rosa Maria da Rocha


Convidado(a) / AMR/IAE/DCTA / São José dos Campos - SP

Dr. Elson de Campos


Convidado(a) / FEG-UNESP-Colab. / Guaratinguetá - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Título:

“Desenvolvimento de compósito cerâmico a base de B₄C para aplicação como blindagem de radiação em aplicações espaciais.”

Aluno (a): **Miguel Adriano Inácio**

São José dos Campos, 28 de Abril de 2015

“Combati o bom combate, completei a corrida, guardei a fé”.

Miguel Adriano Inácio

ÀS PESSOAS QUE ME AJUDARAM AO LONGO DE MINHA VIDA

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE). Aos meus orientadores Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono, Dr. Francisco Cristovão Lourenço de Melo e Dr. Claudio Antônio Federico, pela orientação e apoio na realização deste trabalho.

Ao Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS), por ter disponibilizado a infraestrutura necessária para a execução desta tese de doutorado.

À Coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro recebido.

A meus pais Maria de Nazaré Inácio e Pedro Inácio pelo precioso dom da vida, a partir do qual toda realização foi possível.

A minha amada esposa Elaine que tanto se doou para eu que pudesse chegar até aqui. Seu apoio e compreensão foram tudo que precisei por muitas vezes. Deus lhe pague por tudo.

A meu amado filho Pedro Henrique. Ainda que de forma inconscientemente, por ser muito pequeno, cedeu horas de colo para que eu pudesse estudar e me dedicar

Aos meus sogros José Vitor e Leila Maria que, com suas orações, sempre tiveram palavras de força e incentivo.

Aos amigos do Grupo de Pesquisas em Micro e Nanotecnologias em Cerâmicas e Compósitos: Dr. Sérgio Luiz Mineiro, Dr. Rodrigo de Matos Oliveira, Msc. Silvelene Alessandra da Silva, Eng. Adriano Cavalca Alves e Franciele Carlesso que tanto contribuíram na convivência diária e com suas experiências.

À Dra. Sônia Guimarães, que generosamente me abriu as portas para a ciência através de estágios, iniciação científica e sempre me ajudou e incentivou a ir além.

Aos professores da Área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores (CMS) do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE), pelo conhecimento compartilhado. A todos os colegas do IEAv/DCTA, pela acolhida.

Ao Msc. Marlon Antônio Pereira que compartilhou conhecimentos e experiências no IEAv/DCTA A todos os amigos que, de uma forma ou de outra, deixaram sua contribuição neste trabalho

RESUMO

As características do ambiente espacial desafiam cientistas e tecnologistas dos setores aeronáutico e espacial e faz com que esse desafio se torne oportunidade para a pesquisa e o desenvolvimento de novos materiais e processos. Os satélites artificiais, quando em órbita da Terra, estão sujeitos a exposição à radiação ionizante durante a missão coloca o satélite como objeto potencial de estudos constantes no desenvolvimento de dispositivos menos sensíveis aos efeitos da radiação ionizante. Outra opção é desenvolver materiais para aplicações espaciais a fim de atenuar os efeitos de radiação ionizante sobre componentes vitais do satélite. O material carbeto de boro (B_4C) apresenta características físicas especiais que lhe confere grandes possibilidades de aplicação em projetos de engenharia. Dentre as suas propriedades estão dureza elevada, resistência ao desgaste alta e seção de choque alta para nêutrons térmicos. Em relação a essa última propriedade, devido à capacidade de absorver nêutrons, é utilizado como material de referência em barras de controle em reatores nucleares, devido à alta concentração do isótopo boro presente. Neste trabalho, o carbeto de boro foi aditivado com quantidades diferentes de outro composto à base de boro, compactado e sinterizado na temperatura de 1750 °C, em atmosfera redutora. Os compósitos cerâmicos resultantes foram caracterizados quanto à microestrutura (microscopia eletrônica de varredura - MEV), fases cristalinas presentes (difratometria de raios X - DRX), análise química (fluorescência de raios X) e porosidade quantitativa (porosimetria de mercúrio e de nitrogênio gasoso). Foram realizadas caracterizações quanto às capacidades de atenuação para: i) radiação gama com diferentes fontes (^{60}Co , ^{241}Am , ^{137}Cs e ^{152}Eu) e energias (59 a 1332 keV) e ii) nêutrons térmicos e nêutrons rápidos com duas fontes de ^{241}Am -Be de 100 mCi cada. Para os experimentos de atenuação da radiação gama, os resultados obtidos foram comparados com curvas de atenuação obtidas a partir de cálculos teóricos efetuados com o programa computacional XCOM. Foi simulada também a penetração de partícula carregada (próton) com o programa TRIM. Este programa, dentre outras aplicações é capaz de simular a distância que uma partícula carregada penetra em um meio material. Para análise da atenuação de prótons e elétrons foi utilizado o programa de simulação Mulassis da plataforma Spenvis. Este programa é uma ferramenta que permite o cálculo do transporte da radiação através de um conjunto de materiais em multicamadas. Todos os experimentos e simulações foram feitas em cerâmicas de B_4C -composto B e alumínio aeronáutico 6061-T6, que é material de referência para uso de estrutura de satélites. Os resultados obtidos mostraram que as quantidades do composto de B adicionadas influenciaram na atenuação da radiação secundária, em especial, radiações gama de baixa energia e nêutrons térmicos. Os valores obtidos são maiores para atenuação da radiação gama, prótons e elétrons quando comparados ao alumínio aeronáutico 6061-T6. Os resultados das irradiações, em sua síntese, podem ser influenciados pela composição química, parâmetros de processamento que influenciem na homogeneidade e a na densidade dos compósitos cerâmicos de B_4C -composto de B.

DEVELOPMENT OF CERAMIC COMPOSITE BASED ON B₄C FOR SPACE APPLICATIONS AS RADIATION SHIELDING

ABSTRACT

The characteristics of spatial environment challenge aeronautics and spatial scientists and technologists and make this challenge to become an opportunity to research and develop new materials e processes. Artificial satellites, when are out in the Earth space, are exposed to the action of ionizing radiation, consequently during their mission they are potential object of continuous studies in the development of devices less sensible to the effects of this radiation. Other option is to develop materials for spatial application in order to decrease the effects of ionizing radiation over vitals satellites components. Boron carbide (B₄C) has special physics characteristics that give it great possibilities of applications in engineering projects. Among its properties are high: hardness, wear resistance and cross section for thermal neutrons. Regarding to the last property, because of the capability to absorb neutrons, it is used as reference material in nuclear reactors control bars, due to high boron isotope concentration. In this work, boron carbide was activated in different quantities of a boron compound, compacted and sintered at 1750 °C, in reducing atmosphere. The resultant ceramic composites were characterized as microstructure (scan electronic microscopy - SEM), crystalline phases (X-ray difratometry - XRD), chemical analysis (X-ray fluorescence) and quantitative porosity (mercuric and nitrogen gas porosimetry). Experimental characterizations were performed related to the attenuation capability to: I) gamma radiation with different sources (⁶⁰Co, ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs e ¹⁵²Eu) and energies (59 a 1332 keV), II) thermal and quick neutrons with two sources of ²⁴¹Am-Be of 100 mCi each. For the attenuation gamma radiation experiments, the obtained results were compared with attenuation curves obtained with theoretical calculus made with XCOM software. The charged particle (proton) penetration was also simulated with TRIM software. This software, among others applications is capable to simulate the distance which a charged particle penetrates in a material environment. In order to analyze the protons and electrons attenuation the simulation software Mulassis of Spenvis platform was used. This software is a tool which allows the calculation of the radiation transportation through a set of multilayers materials. All experiments and simulations were performed in B₄C-B compound ceramics and aeronautic 6061- T6 aluminums, which is the reference material used as satellites structures. The results obtained showed that the percentage of B added influenced in the secondary radiation attenuation, in special, low energy gamma radiation and thermal neutrons. The obtained values are higher to gamma radiation attenuation, protons and electrons when compared to aeronautic 6061- T6 aluminums. The results of the irradiations, in summary, can be influenced by chemical composition, process parameters that influence in the homogeneity and density of B₄C-B compound ceramics composites.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

| | |
|--|----|
| Figura 2.1- Região do diagrama de equilíbrio de fases do sistema B ₄ C – Ba pressão ambiente. | 6 |
| Figura 2.2 - Estrutura cristalina do carbeto de boro (B ₄ C)..... | 8 |
| Figura - 2.3 Cinturão de Van Allen, regiões e principais órbitas de satélites: GEO - geostacionária, HEO - órbita elíptica, MEO - órbita média e LEO - órbita baixa | 17 |
| Figura 2.4 - Representação do campo magnético total para o ano de 2000. O triângulo preto destaca o centro da AMAS para esse período. | 18 |
| Figura 2.5 - Classificação das radiações ionizantes | 20 |
| Figura 2.6 - Transferência de energia sob a forma de ondas eletromagnéticas ao interagir com a matéria. As figuras a, b e c são modos de interação da radiação com a matéria. . | 23 |
| Figura 2.7 - Representação esquemática do efeito fotoelétrico. | 25 |
| Figura 2.8 - Representação esquemática do efeito Compton. | 26 |
| Figura 2.9 - Representação esquemática da formação de pares | 27 |
| Figura 2.10 - Diversos processos de interação dos fótons com a matéria em função da energia do fóton e do número atômico do material absorvedor. | 27 |
| Figura 2.11 - Subsistemas afetados por falhas em órbita. | 29 |
| Figura 2.12 - Tempo de falha após lançamento do satélite. | 30 |
| Figura 2.13 - Espécies de falhas ocorridas em satélites em órbita | 30 |
| Figura 3.1 - Fluxograma mostrando as etapas do procedimento experimental adotado neste trabalho. | 42 |
| Figura 3.2 - Compactação e amostra de cerâmica compactada. | 45 |
| Figura 3.3 – Fornode atmosfera controlada utilizado na sinterização das cerâmicas..... | 46 |
| Figura 3.4 - Arranjo experimental para a transmissão de raios gama com cerâmicas de B ₄ C-B (A). Local de encaixe do arranjo no detector de germânio hiper puro dentro da câmara de ionização (B). | 52 |
| Figura 3.5 - Câmara de baixo fundo (C) e arranjo montado (D)..... | 52 |
| Figura 3.6 – Arranjo com placas de Al (E) e arranjo posicionado com placas de Al (F) | 53 |
| Figura 3.7 – Esquema do experimento de transmissão gama..... | 53 |
| Figura 3.8 – Espectro de emissão de radiação gama do radionuclídeo ²⁴¹ Am. | 54 |
| Figura 3.9 – Espectro de emissão de radiação gama do radionuclídeo ¹³⁷ Cs..... | 55 |
| Figura 3.10 – Espectro de emissão de radiação gama do radionuclídeo ⁶⁰ Co..... | 55 |
| Figura 3.11 – Espectro de emissão de radiação gama do radionuclídeo ¹⁵² Eu..... | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.12 – Identificação do tipo de análise do material..... | 57 |
| Figura 3.13 – Identificação das massas dos componentes da amostra e faixa de energia em estudo..... | 58 |
| Figura 3.14 – Curva de atenuação gamatotal para o referido material..... | 58 |
| Figura 3.15 – Espectro de nêutrons da fonte de $^{241}\text{Am}-\text{Be}$ | 59 |
| Figura 3.16 – Arranjo experimental de transmissão de nêutrons rápidos. | 60 |
| Figura 3.17 – Esquema do experimento de nêutrons rápidos..... | 60 |
| Figura 3.18 – Arranjo experimental de transmissão de nêutrons térmicos. | 61 |
| Figura 3.19 – Esquema do experimento de nêutrons térmicos..... | 62 |
| Figura 4.1 - Imagem obtida por MEV dos pós de: a) B_4C e b) B. | 65 |
| Figura 4.2 - Difratomogramas de raios X do pó de B_4C | 66 |
| Figura 4.3 - Difratomogramas de raios X de todas as composições das cerâmicas sinterizadas estudadas..... | 68 |
| Figura 4.4 - Distribuição de tamanhos de poros das cerâmicas de $\text{B}_4\text{C}-\text{B}$ | 69 |
| Figura 4.5 - Imagem da superfície de fratura da cerâmica $\text{B}_4\text{C}-\text{B}$ (A)..... | 71 |
| Figura 4.6 - Imagem da superfície de fratura da cerâmica $\text{B}_4\text{C}-\text{B}$ (B). | 71 |
| Figura 4.7 - Imagem da superfície de fratura da cerâmica $\text{B}_4\text{C}-\text{B}$ (C). | 71 |
| Figura 4.8 - Imagem da superfície de fratura da cerâmica $\text{B}_4\text{C}-\text{B}$ (D)..... | 72 |
| Figura 4.9 - Imagem da superfície de fratura da cerâmica $\text{B}_4\text{C}-\text{B}$ (E). | 72 |
| Figura 4.10 - Difrátograma de raios X do alumínio aeronáutico 6061-T6..... | 74 |
| Figura 4.11 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de $\text{B}_4\text{C}-\text{B}$ (A) para ^{241}Am (59, 537 keV). | 76 |
| Figura 4.12 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de $\text{B}_4\text{C}-\text{B}$ (A) para ^{152}Eu (121,779 keV). | 77 |
| Figura 4.13 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de $\text{B}_4\text{C}-\text{B}$ (A) para ^{152}Eu (344,272 keV). | 77 |
| Figura 4.14 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de $\text{B}_4\text{C}-\text{B}$ (A) para ^{137}Cs (661,645 keV). | 78 |
| Figura 4.15 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de $\text{B}_4\text{C}-\text{B}$ (A) para ^{152}Eu (778,890 keV). | 78 |
| Figura 4.16 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de $\text{B}_4\text{C}-\text{B}$ (A) para ^{152}Eu (964,06 keV). | 79 |
| Figura 4.17 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de $\text{B}_4\text{C}-\text{B}$ (A) para ^{60}Co (1173,236 keV). | 79 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.18 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B ₄ C-B (A) para ⁶⁰ Co (1332,501 keV). | 80 |
| Figura 4.19 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B ₄ C-B (B) para ²⁴¹ Am (59,537 keV). | 80 |
| Figura 4.20 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B ₄ C-B (B) para ¹⁵² Eu (121,779 keV). | 81 |
| Figura 4.21 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B ₄ C-B (B) para ¹⁵² Eu (344,272 keV). | 81 |
| Figura 4.22 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B ₄ C-B (B) para ¹³⁷ Cs (661,645 keV). | 82 |
| Figura 4.23 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B ₄ C-B (B) para ¹⁵² Eu (778,890keV). | 82 |
| Figura 4.24 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B ₄ C-B (B) para ¹⁵² Eu (964,050 keV). | 83 |
| Figura 4.25 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B ₄ C-B (B) para ⁶⁰ Co (1173,238 keV). | 83 |
| Figura 4.26 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B ₄ C-B (B) para ⁶⁰ Co (1332,501 keV). | 84 |
| Figura 4.27 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B ₄ C-B (C) para ²⁴¹ Am (59,537 keV). | 84 |
| Figura 4.28 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B ₄ C-B (C) para ¹⁵² Eu (121,779 keV). | 85 |
| Figura 4.29 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B ₄ C-B (C) para ¹⁵² Eu (344,272 keV). | 85 |
| Figura 4.30 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B ₄ C-B (70g-30g) para ¹³⁷ Cs (661,645 keV). | 86 |
| Figura 4.31 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B ₄ C-B (C) para ¹⁵² Eu (778,890 keV). | 86 |
| Figura 4.32 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B ₄ C-B (C) para ¹⁵² Eu (964,050 keV). | 87 |
| Figura 4.33 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B ₄ C-B (C) para ⁶⁰ Co (1173,238 keV). | 87 |
| Figura 4.34 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B ₄ C-B (C) para ⁶⁰ Co (1332,501 keV). | 88 |
| Figura 4.35 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B ₄ C-B (D) para ²⁴¹ Am (59,537 keV). | 88 |
| Figura 4.36 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B ₄ C-B (D) para ¹⁵² Eu (121,779 keV). | 89 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.37 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B_4C-B (D) para ^{152}Eu (344,272 keV). | 89 |
| Figura 4.38 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B_4C-B (D) para ^{137}Cs (661,645 keV). | 90 |
| Figura 4.39 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B_4C-B (D) para ^{152}Eu (778,890 keV). | 90 |
| Figura 4.40 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B_4C-B (D) para ^{152}Eu (964,050 keV). | 91 |
| Figura 4.41 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B_4C-B (D) para ^{60}Co (1173,236keV). | 91 |
| Figura 4.42 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B_4C-B (D) para ^{60}Co (1332,501 keV). | 92 |
| Figura 4.43 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B_4C-B (E) para ^{241}Am (59,537 keV). | 92 |
| Figura 4.44 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B_4C-B (E) para ^{152}Eu (121,779 keV). | 93 |
| Figura 4.45 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B_4C-B (E) para ^{152}Eu (344,272 keV). | 93 |
| Figura 4.46 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B_4C-B (E) para ^{137}Cs (661,645 keV). | 94 |
| Figura 4.47 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B_4C-B (E) para ^{152}Eu (778,890 keV). | 94 |
| Figura 4.48 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B_4C-B (E) para ^{152}Eu (964,050 keV). | 95 |
| Figura 4.49 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B_4C-B (E) para ^{60}Co (1173,236 keV). | 95 |
| Figura 4.50 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B_4C-B (E) para ^{60}Co (1332,501 keV). | 96 |
| Figura 4.51 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura do alumínio para ^{241}Am (59,537 keV). | 97 |
| Figura 4.52 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura do alumínio para ^{152}Eu (121,779 keV). | 97 |
| Figura 4.53 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura do alumínio para ^{152}Eu (344,272 keV). | 98 |
| Figura 4.54 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura do alumínio para ^{137}Cs (661,645 keV). | 98 |
| Figura 4.55 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura do alumínio para ^{152}Eu (778,890 keV). | 99 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.56 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura do alumínio para ^{152}Eu (964,06 keV)..... | 99 |
| Figura 4.57 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura do alumínio para ^{60}Co (1173 keV)..... | 100 |
| Figura 4.58 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura do alumínio para ^{60}Co (1332,501 keV)..... | 100 |
| Figura 4.59 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para $\text{B}_4\text{C-B}$ (A) para as proporções 1, 2 e 3..... | 102 |
| Figura 4.60 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para $\text{B}_4\text{C-B}$ (A) para as proporções 4, 5 e 6..... | 102 |
| Figura 4.61 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para $\text{B}_4\text{C-B}$ (A) para as proporções 7, 8 e 9..... | 103 |
| Figura 4.62 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para $\text{B}_4\text{C-B}$ (B) para as proporções 1, 2 e 3..... | 104 |
| Figura 4.63 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para $\text{B}_4\text{C-B}$ (B) para as proporções 4, 5 e 6..... | 104 |
| Figura 4.64 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para $\text{B}_4\text{C-B}$ (B) para as proporções 7, 8 e 9..... | 105 |
| Figura 4.65 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para $\text{B}_4\text{C-B}$ (C) para as proporções 1, 2 e 3..... | 106 |
| Figura 4.66 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para $\text{B}_4\text{C-B}$ (C) para as proporções 4, 5 e 6..... | 106 |
| Figura 4.67 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para $\text{B}_4\text{C-B}$ (C) para as proporções 7, 8 e 9..... | 107 |
| Figura 4.68 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para $\text{B}_4\text{C-B}$ (D) para as proporções 1, 2 e 3..... | 108 |
| Figura 4.69 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para $\text{B}_4\text{C-B}$ (D) para as proporções 4, 5 e 6..... | 108 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.70 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para B ₄ C-B (D) para as proporções 7, 8 e 9..... | 109 |
| Figura 4.71 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para B ₄ C-B (E) para as proporções 1, 2 e 3. | 110 |
| Figura 4.72 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para B ₄ C-B (E) para as proporções 4, 5 e 6. | 110 |
| Figura 4.73 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para B ₄ C-B (E) para as proporções 7, 8 e 9. | 111 |
| Figura 4.74 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos para as cerâmicas e o alumínio. | 112 |
| Figura 4.75 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássicos para nêutrons térmicos obtidos para as cerâmicas e o alumínio. | 113 |
| Figura 4.76 – Espectro de energia de elétrons incidentes e emergentes..... | 116 |
| Figura 4.77 – Espectro de energia de fótons emergentes. | 116 |
| Figura 4.78 – Fluência total de elétrons incidentes e emergentes | 117 |
| Figura 4.79 – Fluência total de fótons emergentes | 117 |
| Figura 4.80 – Energia média dos elétrons incidentes e emergentes | 118 |
| Figura 4.81 – Energia média dos fótons emergentes..... | 118 |
| Figura 4.82 – Espectro de energia de prótons incidentes e emergentes. | 119 |
| Figura 4.83 – Fluência total de prótons incidentes e emergentes..... | 120 |
| Figura 4.84 – Energia média dos prótons incidentes e emergentes..... | 120 |
| Figura 4.85 – Espectro de energia de nêutrons emergentes | 121 |
| Figura 4.86 - Fluência total de nêutrons emergentes..... | 121 |
| Figura 4.87 – Energia média dos nêutrons emergentes. | 122 |
| Figura 4.88 – Espectro de energia dos elétrons emergentes..... | 123 |
| Figura 4.89 - Fluência total de elétrons emergentes..... | 123 |
| Figura 4.90 – Energia média dos elétrons emergentes. | 124 |
| Figura 4.91 – Espectro radiação de gama emergente. | 124 |
| Figura 4.92 - Fluência total de radiação gama emergente..... | 125 |
| Figura 4.93 – Energia média dos gamas emergentes..... | 125 |
| Figura 4.94 – Espectro de energia dos prótons incidentes e emergentes. | 126 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.95 - Fluência total de prótons incidentes e emergentes..... | 126 |
| Figura 4.96 – Energia média dos prótons incidentes e emergentes..... | 127 |
| Figura 4.97 – Espectro de energia dos nêutrons emergentes..... | 127 |
| Figura 4.98 - Fluência total de nêutrons emergentes..... | 128 |
| Figura 4.99 – Energia média dos nêutrons emergentes..... | 128 |
| Figura 4.100 – Espectro de energia dos elétrons emergentes..... | 129 |
| Figura 4.101 - Fluência total de elétrons emergentes..... | 129 |
| Figura 4.102 – Energia média dos elétrons emergentes..... | 130 |
| Figura 4.103 – Espectro energia de radiação gama emergente..... | 130 |
| Figura 4.104 - Fluência total de fótons emergentes..... | 131 |
| Figura 4.105 – Energia média dos gamas emergentes..... | 131 |
| Figura 4.106 – Espectro de energia dos múons emergentes..... | 132 |
| Figura 4.107 - Fluência total de múons emergentes..... | 132 |
| Figura 4.108 – Energia média dos múons emergentes..... | 133 |
| Figura 4.109 – Espectro de energia dos píons emergentes..... | 134 |
| Figura 4.110 - Fluência total de píons emergentes..... | 134 |
| Figura 4.111 – Energia média dos píons emergentes..... | 135 |
| Figura 4.112 – Janela do Programa TRIM onde são inseridos os parâmetros de entrada..... | 136 |
| Figura 4.113 – Alcance dos prótons nos materiais estudados..... | 137 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 2.1- Categoria tecnológica e respectivo efeito devido a TID | 31 |
| Tabela 3.1 - Composição química do pó de carbetto de boro adquirido do fabricante. ... | 40 |
| Tabela 3.2 - Características físicas do pó de carbetto de boro adquirido do fabricante. .. | 40 |
| Tabela 3.3- Composição química do pó de boro adquirido do fabricante..... | 41 |
| Tabela 3.4 - Composição das amostras estudadas neste trabalho..... | 44 |
| Tabela 3.5 – Valores de energia dos fótons das fontes emisoras de radiação gama utilizadas..... | 54 |
| Tabela 3.6 – Parâmetros de projeto das missões CBERS 3 e 4..... | 63 |
| Tabela 4.1 - Valores de densidade e retração linear das cerâmicas sinterizadas..... | 67 |
| Tabela 4.2 – Valores de tensão de ruptura (σ) obtidas pelo ensaio de flexão em 4 pontos, para as cerâmicas sinterizadas | 70 |
| Tabela 4.3 - A análise semi-quantitativa por FRX das cerâmicas de B ₄ C-B com as composições(A)..... | 73 |
| Tabela 4.4 - Análise química semi-quantitativa por FRX da amostra de alumínio aeronáutico 6061-T6..... | 74 |
| Tabela 4.5 – Valores de coeficiente de atenuação mássico total μ/ρ (cm ² /g) da cerâmica de B ₄ C-B (A) e do alumínio 6061-T6..... | 101 |
| Tabela 4.6 – Valores de coeficiente de atenuação mássico total μ/ρ (cm ² /g) da cerâmica de B ₄ C-B (B) e do alumínio 6061-T6..... | 103 |
| Tabela 4.7 – Valores de coeficiente de atenuação mássico total μ/ρ (cm ² /g) da cerâmica de B ₄ C-B (C) e do alumínio 6061-T6..... | 105 |
| Tabela 4.8 – Valores de coeficiente de atenuação mássico total μ/ρ (cm ² /g) da cerâmica de B ₄ C-B (D) e do alumínio 6061-T6. | 107 |
| Tabela 4.9 – Valores de coeficiente de atenuação mássico total μ/ρ (cm ² /g) da cerâmica de B ₄ C-B (E) e do alumínio 6061-T6..... | 109 |
| Tabela 4.10 - Valores teóricos e experimentais de μ/ρ e μ para nêutrons rápidos transmitidos através das cerâmicas de B ₄ C-B e do alumínio. | 112 |
| Tabela 4.11– Valores experimentais obtidos para o cálculo da seção de choque total para nêutrons térmicos para o alumínio..... | 114 |
| Tabela 4.12 – Comparação dos valores teóricos da seção de choque total para nêutrons térmicos para as cerâmicas de B ₄ C-B eo alumínio..... | 115 |
| Tabela 4.13 – Tipos de radiações simuladas por meio do código SPENVIS..... | 135 |
| Tabela 4.14– Valores simulados para o alcance dos prótons nos materiais estudados. | 137 |
| Tabela A.1 - Composição química das cerâmicas de B ₄ C-B (A)..... | 149 |

| | |
|--|-----|
| Tabela A.2 - Composição química das cerâmicas de B ₄ C-B (B)..... | 149 |
| Tabela A.3 - Composição química das cerâmicas de B ₄ C-B (C)..... | 150 |
| Tabela A. 4 - Composição química das cerâmicas de B ₄ C-B (D)..... | 150 |
| Tabela A.5 - Composição química das cerâmicas de B ₄ C-B (E). | 151 |
| Tabela B.1 - Cálculo teórico da seção de choque total para nêutrons térmicos para o alumínio..... | 153 |
| Tabela B.2 - Cálculo teórico da seção de choque total para nêutrons térmicos para a cerâmica de B ₄ C-B (A)..... | 154 |
| Tabela B.3 - Cálculo teórico da seção de choque total para nêutrons térmicos para a cerâmica de B ₄ C-B (B)..... | 155 |
| Tabela B.4 - Cálculo teórico da seção de choque total para nêutrons térmicos para a cerâmica de B ₄ C-B (C)..... | 156 |
| Tabela B.5 - Cálculo teórico da seção de choque total para nêutrons térmicos para a cerâmica de B ₄ C-B (D)..... | 157 |
| Tabela B.6 - Cálculo teórico da seção de choque total para nêutrons térmicos para a cerâmica de B ₄ C-B (E). | 158 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---------------|---|
| AA | - Absorção de água |
| θ | - Ângulo de contato |
| μ | - Coeficiente de atenuação linear total do material |
| α | - Coeficiente de dilatação térmica |
| h | - Constante de Planck |
| d | - Densidade |
| D | - Coeficiente de difusão |
| D_{TP} | - Distribuição de tamanhos de partículas |
| $h\nu$ | - Energia de um fóton |
| x | - Espessura |
| ν | - Frequência da radiação |
| G | - Giga |
| I | - Intensidade do feixe de radiação gama com atenuação |
| I_0 | - Intensidade do feixe de radiação gama sem atenuação |
| K | - Kelvin |
| L | - Largura do corpo de prova |
| ρ_{sint} | - Massa específica da cerâmica sinterizada |
| W_i | - Massa da cerâmica sinterizada imersa em água |
| W_s | - Massa a seco da cerâmica sinterizada |
| Pa | - Pascal |
| γ | - Radiação gama |

- σ - Tensão de ruptura
- barn - Unidade de seção de choque
- L1 - Vão maior
- L2 - Vão menor
- ΔH - Variação da entalpia
- ΔL - Variação do comprimento inicial
- c - Velocidade da luz
- TRIM - Transport of Ions in Matter

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|--------|--|
| AOCS | <i>Attitude and Orbit Control System</i> (Atitude e sistema de controle de órbita) |
| CTE | Coordenadoria de Tecnologias Especiais |
| TECAMB | Micro e Nanotecnologias em Cerâmicas e Compósitos |
| CDH | <i>Command and Data Handling</i> (Comando e manipulação de dados) |
| CAPES | Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior |
| DCTA | Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial |
| DRX | Difratometria de raios X |
| AMR | Divisão de Materiais |
| IAE | Instituto de Aeronáutica e Espaço |
| INPE | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| JCPDS | <i>Joint Committee on Powder Diffraction Standards</i> |
| LAS | Laboratório Associado de Sensores e Materiais |
| LEO | <i>Low Earth Orbit</i> (órbita terrestre baixa) |
| MEO | <i>Medium Earth Orbit</i> (órbita terrestre média) |
| MEV | Microscopia eletrônico de varredura |
| MECH | <i>Structure and Mechanism</i> (estrutura e mecanismo) |
| TTC | <i>Tracking and Command</i> (rastreamento e comando) |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS | 1 |
| 2 | CERÂMICAS DE CARBETO DE BORO E AMBIENTE ESPACIAL | 5 |
| 2.1 | Cerâmica de carbeto de boro (B ₄ C)..... | 5 |
| 2.2 | Propriedades químicas | 8 |
| 2.2.1 | Propriedades físicas | 9 |
| 2.2.2 | Propriedades térmicas..... | 9 |
| 2.2.3 | Propriedades elétricas | 10 |
| 2.2.4 | Propriedades mecânicas..... | 10 |
| 2.3 | Processamento de materiais cerâmicos estruturais | 11 |
| 2.3.1 | Características do pó precursor..... | 12 |
| 2.3.2 | Mistura dos pós..... | 12 |
| 2.3.3 | Conformação das cerâmicas a verde | 13 |
| 2.3.4 | Sinterização | 14 |
| 2.4 | Ambiente espacial..... | 14 |
| 2.4.1 | Descrição do ambiente espacial..... | 14 |
| 2.4.2 | O espaço interestelar..... | 15 |
| 2.4.3 | Radiação espacial | 15 |
| 2.4.4 | Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) | 17 |
| 2.4.5 | Interação da radiação cósmica e seus subprodutos com a atmosfera terrestre | 18 |
| 2.4.6 | Efeitos da radiação ionizante na matéria | 20 |
| 2.4.7 | Radiações ionizantes..... | 21 |
| 2.4.8 | Interação das radiações direta e indiretamente ionizantes..... | 21 |
| 2.4.9 | Probabilidade de interação ou seção de choque | 22 |
| 2.4.10 | Ionização, excitação e ativação | 22 |
| 2.4.11 | Interação da radiação eletromagnética com a matéria..... | 24 |
| 2.4.12 | Principais falhas em veículos espaciais em órbita..... | 28 |
| 2.4.13 | Interação de nêutrons com a matéria | 32 |
| 2.4.14 | Atenuação de nêutrons..... | 34 |
| 2.4.15 | Interação de partículas carregadas com a matéria | 36 |
| 2.4.16 | Programas computacionais e plataformas de simulação | 38 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 39 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.1 | Materiais | 39 |
| 3.1.1 | Pós de carbetto de boro e de boro | 39 |
| 3.1.2 | Alumínio aeronáutico 6061-T6 | 41 |
| 3.2 | Procedimento experimental | 41 |
| 3.2.1 | Caracterização das matérias primas | 42 |
| 3.2.2 | Identificação de fases cristalinas nos pós | 43 |
| 3.2.3 | Processo da mistura dos pós | 43 |
| 3.2.4 | Análise química por fluorescência de raios X do alumínio | 43 |
| 3.2.5 | Aditivos de compactação | 44 |
| 3.2.6 | Composições estudadas | 44 |
| 3.2.7 | Compactação | 44 |
| 3.2.8 | Caracterização dos compactados | 45 |
| 3.2.9 | Sinterização | 46 |
| 3.2.10 | Caracterização das cerâmicas sinterizadas | 46 |
| 3.2.11 | Determinação de densidade relativa | 47 |
| 3.2.12 | Identificação das fases cristalinas nas cerâmicas sinterizadas | 48 |
| 3.2.13 | Determinação da tensão de ruptura | 48 |
| 3.2.14 | Análise de distribuição de tamanho de poros | 49 |
| 3.2.15 | Determinação da retração linear | 50 |
| 3.2.16 | Análise da superfície de fratura das cerâmicas sinterizadas | 50 |
| 3.2.17 | Análise química por fluorescência de raios X | 51 |
| 3.2.18 | Determinação da atenuação de radiação gama | 51 |
| 3.3 | Simulação da atenuação de radiação gama unidirecional | 56 |
| 3.4 | Metodologia de aquisição dos dados teóricos através do programa XCOM | 57 |
| 3.4.1 | Experimento de atenuação de nêutrons rápidos | 58 |
| 3.4.2 | Experimento de atenuação de nêutrons térmicos | 61 |
| 3.5 | Simulações do transporte da radiação cósmica primária | 62 |
| 3.6 | Simulações do alcance máximo de partícula carregada | 63 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 65 |
| 4.1 | Caracterização dos pós | 65 |
| 4.1.1 | Análise morfológica dos pós | 65 |
| 4.1.2 | Identificação das fases cristalinas dos pós | 66 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.2 | Caracterização das cerâmicas sinterizadas | 66 |
| 4.2.1 | Análise da densidade | 66 |
| 4.2.2 | Identificação das fases cristalinas..... | 67 |
| 4.2.3 | Análise da distribuição de tamanhos de poros..... | 68 |
| 4.2.4 | Resistência mecânica à flexão | 69 |
| 4.2.5 | Análises microestrutural | 70 |
| 4.2.6 | Estimativa das quantidades de elementos químicos nas cerâmicas..... | 72 |
| 4.3 | Caracterização do alumínio aeronáutico 6061-T6..... | 73 |
| 4.3.1 | Identificação das fases cristalinas..... | 74 |
| 4.4 | Determinação do coeficiente de atenuação para radiação gama | 75 |
| 4.4.1 | Ajuste linear da razão de transmissão dos fótons. Dados experimentais para a cerâmica B ₄ C-B (A)..... | 76 |
| 4.4.2 | Ajuste linear da razão de transmissão dos fótons . Dados experimentais para a cerâmica B ₄ C-B (B)..... | 80 |
| 4.4.3 | Ajuste linear da razão de transmissão dos fótons. Dados experimentais para a cerâmica B ₄ C-B (C)..... | 84 |
| 4.4.4 | Ajuste linear da razão de transmissão dos fótons. Dados experimentais para a cerâmica B ₄ C-B (D)..... | 88 |
| 4.4.5 | Ajuste linear da razão de transmissão dos fótons. Dados experimentais para a cerâmica B ₄ C-B (E)..... | 92 |
| 4.4.6 | Ajuste linear da razão de transmissão dos fótons. Dados experimentais para o alumínio 6061-T6 | 96 |
| 4.5 | Resultados da atenuação de nêutrons rápidos..... | 112 |
| 4.6 | Análise dos dados de atenuação de nêutrons térmicos | 113 |
| 4.8 | Elétrons provenientes do cinturão de Van Allen | 116 |
| 4.9 | Prótons provenientes do cinturão de Van Allen | 119 |
| 4.10 | Prótons, nêutrons, elétrons, múons e píons provenientes da radiação cósmica galáctica | 126 |
| 4.11 | Simulações do alcance máximo de partícula carregada | 136 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 139 |
| 5.1 | TRABALHOS FUTUROS | 141 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 143 |
| | APÊNDICE A COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS CERÂMICAS | 149 |
| | APÊNDICE B CÁLCULO DA SEÇÃO DE CHOQUE PARA NÊUTRONS TÉRMICOS PARA O ALUMÍNIO E PARA AS CERÂMICAS | 153 |

1 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

O ambiente no espaço desafia cientistas e engenheiros quanto ao desenvolvimento de novos materiais para aplicação em espaçonaves, satélites artificiais e outros dispositivos projetados para operar em tal ambiente. O ambiente espacial é complexo e apresenta grande gradiente térmico, radiações ionizantes, interferência eletromagnética, descargas eletrostáticas, impactos de micrometeorito e lixo espacial. Assim, o alto desempenho da engenharia de materiais com propriedades físicas e mecânicas específicas é necessário para uma missão bem sucedida no espaço [1-3]. Existem normas específicas que apresentam requisitos gerais para materiais de uso espacial e seus processos associados, como é o caso da norma ECSS-Q-70-71A (ECSS - *European Cooperation for Space Standardization*-Cooperação europeia para a padronização do espaço). Esta norma contém dados de materiais indicados para uso espacial que em sua maioria, foram utilizados com sucesso em algumas aplicações, sistemas espaciais e equipamentos associados [4]. No entanto, para aplicações específicas existem muitos materiais que ainda precisam ser otimizados. A abordagem experimental para desenvolver e projetar materiais que possam ser aplicados em ambientes espaciais é um dos principais desafios enfrentados pela ciência e engenharia modernas, uma vez que para controlar as propriedades dos materiais e torná-las reproduzíveis exige-se grande esforço em pesquisa e desenvolvimento.

Na área aeroespacial um dos maiores desafios tecnológicos é a diminuição dos efeitos destrutivos que a radiação cósmica pode provocar nos componentes eletrônicos instalados em satélites e aeronaves. A radiação cósmica é composta por partículas e ondas eletromagnéticas emitidas principalmente pelo Sol. As ondas eletromagnéticas (raios X e radiação gama) e as partículas (radiação beta, radiação alfa e nêutrons) são chamadas radiações ionizantes, pois quando interagem com a matéria produzem íons, radicais e elétrons livres na matéria que sofreu a interação. Esta ionização se deve ao fato das radiações possuírem energia alta o suficiente para quebrar as ligações químicas ou expulsar elétrons dos átomos após as colisões. Como resultado desta interação, ocorrem alterações nas propriedades do material afetado [1, 5, 6]. Em satélites, todos os sistemas embarcados devem funcionar harmoniosamente para cumprir a sua missão, de

forma que a menor possibilidade de falha é desejável. Dentre os sistemas mais suscetíveis às radiações ionizantes estão aqueles que possuem componentes eletrônicos e eletro-ópticos. Além disso, existe um interesse crescente na utilização de órbitas incomuns com maior tempo de duração das missões espaciais, resultando em um tempo de exposição maior dos componentes às radiações cósmicas [2, 3, 5].

As aeronaves, por trafegarem em altitudes menores, estão sujeitas a uma intensidade menor dos efeitos das radiações ionizantes, pois contam com a proteção parcial da atmosfera terrestre. No entanto, pelo fato do Brasil estar situado no centro da região de influência de um fenômeno conhecido como Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) ocorre que devido a este fenômeno, principalmente em satélites, esses efeitos podem ser amplificados [1, 8-10]. Nesta região, as intensidades das linhas do campo magnético estão mais fracas, permitindo que raios cósmicos e partículas carregadas penetrem mais profundamente na atmosfera terrestre. Pesquisadores de todo o mundo buscam os meios para minimizar as consequências desses fenômenos para as seguranças dos equipamentos a bordo de satélites, e dos equipamentos e tripulações a bordo das aeronaves [1]. Algumas aplicações específicas exigem, dos circuitos desenvolvidos, características especiais que não são atendidas utilizando-se as tecnologias convencionais. É o caso dos circuitos destinados ao uso na indústria espacial em foguetes orbitais e satélites. O bombardeio de partículas carregadas é capaz de causar falhas operacionais ou até mesmo danificar diretamente os circuitos integrados expostos, degradando progressivamente seu funcionamento. Para aumentar a vida útil de componentes dos sistemas embarcados em satélites e aeronaves, existem atualmente duas abordagens: i) desenvolver componentes cada vez mais resistentes às radiações ionizantes e ii) desenvolver novos materiais para proteções destes sistemas embarcados e tripulações/passageiros (no caso de aeronaves) [1,11]. A capacitação para desenvolver e qualificar novos materiais e produtos, que operem de forma segura no espaço e em grandes altitudes de voo dará ao Brasil possibilidade de poder conquistar a independência tecnológica nesta área, além de também poder participar efetivamente no mercado internacional de produtos aeronáuticos e espaciais de alta tecnologia [1].

Mediante as necessidades de alinhamento das pesquisas de cunho espacial realizadas no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) com as pesquisas

realizadas pelo Grupo de Pesquisas em Micro e Nanotecnologias em Cerâmicas e Compósitos (TECAMB) do Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS) da Coordenadoria dos Laboratórios Associados (CTE), em 2010 iniciou-se o estudo de materiais cerâmicos que pudessem ser utilizados como atenuadores de radiação com o objetivo de minimização dos efeitos das radiações ionizantes em componentes/equipamentos embarcados em satélites sensíveis a essas incidências. Com esta proteção, espera-se contribuir para o aumento do tempo total de funcionamento dos componentes eletrônicos expostos, ou seja, aumento da vida útil prevista. Este trabalho contou com a participação da Divisão de Materiais (AMR) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), no processamento e caracterização das cerâmicas e do Instituto de Pesquisas Avançadas (IEAv), na caracterização da atenuação de radiações, ambos do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA).

Para aplicações aeroespaciais, tanto em satélites como em aviões, os materiais devem ser mecânica e quimicamente resistentes e ao mesmo tempo leves. A escolha do material para aplicações espaciais é um dos requisitos mais importantes na etapa de um projeto. Materiais que conciliam resistência mecânica alta, baixa densidade, baixos coeficientes de expansão térmica e inércia química são candidatos potenciais à seleção. Entretanto, essas não são as únicas qualificações para a escolha de materiais[12]. De forma específica, para este estudo optou-se por desenvolver cerâmicas porosas à base de carbetos de boro (B_4C) que apresentam um dos menores valores de massa específica, quando comparado a outros materiais cerâmicos. Juntamente com a propriedade de baixa massa específica que pode garantir maior leveza, outras propriedades como, por exemplo, as mecânicas são importantes para que o material possa suportar os testes e vibrações durante o lançamento. Foram adicionadas frações de B ao pó de B_4C com o objetivo de aumentar sua capacidade de atenuação de nêutrons térmicos. Sem aditivos, o B_4C possui uma fragilidade alta, com valores de tenacidade à fratura da ordem de $3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1/2}$ [13]. O carbetos de boro B_4C é um material cerâmico de grande importância tecnológica por apresentar elevada dureza e alta estabilidade química e térmica. Na tecnologia nuclear este composto tem sido amplamente utilizado como material absorvedor de nêutrons, devido à sua alta seção de choque de captura de nêutrons [14, 15].

Pelo fato da adição de boro à matriz de B_4C resultar no aumento da seção de choque para nêutrons térmicos, houve interesse na investigação da capacidade de atenuação de outros tipos de radiações incidentes nesse material e em placas de alumínio, que é o material estrutural do satélite, com interesse em uma missão de baixa órbita para satélites da família CBERS, em ambiente espacial influenciado pelos raios cósmicos galácticos e Cinturão de Van Allen. Experimentos e/ou simulações das incidências da radiação (gama, nêutrons térmicos e nêutrons rápidos) em compósitos cerâmicos de B_4C -B em função de sua composição e espessura e em placa de alumínio aeronáutico classe 6061-T6 (em função de sua espessura) são realizados para avaliar a atenuação dessas radiações para fins de aplicação como blindagem de radiação em satélites e também em aeronaves.

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Desenvolver e caracterizar compósitos cerâmicos porosos à base de B_4C e boro;
- Estudar a capacidade destes materiais na atenuação de radiação cósmica e seus subprodutos e,
- Realizar um estudo comparativo em relação à atenuação do alumínio aeronáutico, que é utilizado nas estruturas de satélites e aeronaves.

2 CERÂMICAS DE CARBETO DE BORO E AMBIENTE ESPACIAL

2.1 Cerâmica de carbetto de boro (B_4C)

O carbetto de boro é caracterizado por uma combinação única de propriedades que o tornam um material de uma ampla gama de aplicações em engenharia. É usado em aplicações refratárias devido ao seu elevado ponto de fusão e estabilidade térmica e também como pó abrasivo em revestimentos devido à sua extrema resistência à abrasão, além de apresentar um excelente desempenho na blindagem balística devido à sua dureza elevada e densidade baixa. É usado em aplicações nucleares como absorvedor da radiação de nêutrons e, na eletrônica é um semicondutor que a temperaturas altas pode, potencialmente, ser usado para novas aplicações [13,14]. O composto de carbetto de boro foi descoberto em 1858, depois Joly em 1883 e Moissan em 1894 identificaram os compostos B_3C e B_6C , respectivamente. A fórmula estequiométrica B_4C só foi atribuída em 1934 por R.R. RIDGWAY e muitas diversificadas fórmulas foram propostas por autores russos, que não foram confirmadas. A partir de 1950, vários estudos foram realizados, especialmente sobre as estruturas e propriedades. Com base em análises químicas e medidas físicas RIDGWAY observou que, existia apenas um composto de composição B_4C no sistema boro-carbono. Apesar de saber que o carbetto de boro poderia existir com uma relação B/C diferente de quatro, é comum referir-se a este composto em termos da fórmula B_4C devido a sua elevada dureza. O carbetto de boro foi, inicialmente, considerado um material abrasivo, usado em rebolos especiais [13-15].

O diagrama de equilíbrio de fases do sistema B-C, que é apresentado na Figura 2.1, foi proposto no período de 1955-1960. Mais tarde Elliott e Kieffer assumiram uma fase de grande homogeneidade para o carbetto de boro (9 a 20 átomos % de C) [14]. O carbetto de boro funde em $2480\text{ }^\circ\text{C}$ (13,3 % C, ponto F e forma um eutético entre B_4C e C no ponto E entre compostos ricos em carbono e grafite na faixa de 26 átomos % de C em $2400\text{ }^\circ\text{C}$. Para compostos ricos em boro existe uma transformação no ponto P, com uma solução sólida (B-carbetto de boro romboédrico) [13,15].

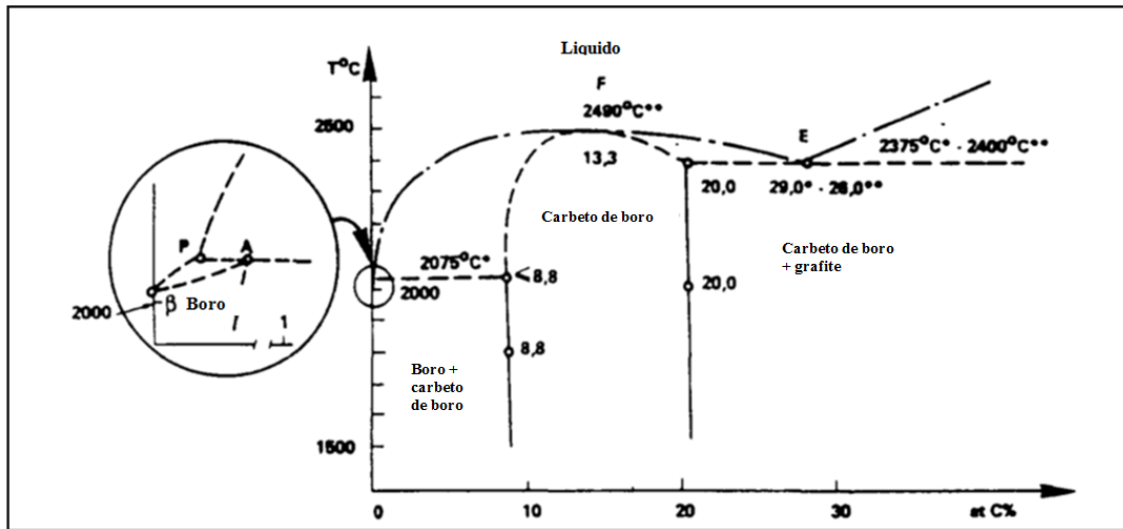
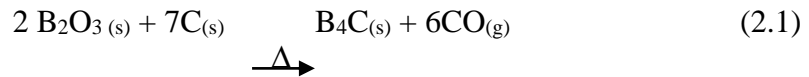


Figura 2.1- Região do diagrama de equilíbrio de fases do sistema B_4C – Ca pressão ambiente.
Fonte: [14].

Como um dos mais importantes materiais cerâmico, o B_4C apresenta combinações de propriedades interessantes como dureza elevada, ponto de fusão alto, baixa densidade, módulo de Young (450 - 470 GPa), resistência a corrosão e a oxidação elevadas. Em virtude de suas excelentes propriedades o B_4C apresenta diversas aplicações [14-16]. Sua produção mundial é da ordem de 500 toneladas. É um material de difícil aquisição comercial e fabricação, principalmente porque é utilizado em áreas estratégicas de aplicação (militar e nuclear). Isso faz com que seja um material cerâmico que apresente um importante papel no mercado mundial, sendo de grande importância o domínio da tecnologia de sua síntese e sinterização. O B_4C é um composto inorgânico binário constituído de boro e carbono e é obtido sinteticamente por diferentes rotas. Dentre estas, a reação direta do boro com o carbono, a redução metalotérmica do B_2O_3 com Mg na presença de carbono e pela redução carbotérmica do B_2O_3 . Industrialmente o B_4C é produzido pela redução carbotérmica do óxido de boro (B_2O_3) por um processo utilizando forno elétrico a arco [14, 15,17]. Para a preparação do B_4C por redução carbotérmica é necessário apenas uma fonte fornecedora de boro (H_3BO_3 , bórax, B_2O_3 , etc.), uma fonte rica em carbono (grafite, negro de fumo, coque de petróleo, resina fenólica, etc.) e um posterior aquecimento, na faixa de temperatura de 1600 a 2000°C, em atmosfera inerte. A reação termoquímica para formação do B_4C é dada por:



O processo é fortemente endotérmico, com $\Delta H = 1812 \text{ kJ/mol}$ e resulta em duas fases:



A presença de ligações covalentes fortes dificulta a densificação do pó de B_4C além de ter baixa plasticidade aliada a uma alta resistência ao crescimento dos grãos limítrofes. Na indústria, peças de geometria simples de B_4C densificado são obtidas por prensagem a quente, a temperaturas de 2100 a 2200 °C com pressões de 30-40 MPa por 15 a 45 min sob atmosfera inerte. Mas, para se obter a densificação de formas mais complexas, é adotado o método de densificação sem pressão. Na sinterização sem pressão o pó compactado é aquecido a temperaturas um pouco abaixo da temperatura de fusão do B_4C , a fim de aglomerar as partículas e reduzir a porosidade. Para o B_4C a temperatura de sinterização sem pressão varia de 2150 a 2250 °C [14, 15,18]. À temperatura ambiente, o carbetto de boro apresenta estrutura cristalina do tipo romboédrica cujos átomos estabelecem ligações covalentes entre si. As fortes ligações entre os icosaedros conferem ao carbetto de boro a propriedade de material refratário. Sua ampla faixa de concentração de carbono ocorre devido à possível substituição de átomos de boro e de carbono, um pelo outro, tanto nos icosaedros como nas cadeias inter-icosaédricas [14, 19]. A Figura 2.2 mostra sua estrutura cristalina composta de icosaedros ricos em boro contendo doze átomos, sendo que seis destes átomos localizados nos chamados sítios polares são unidos diretamente por ligações covalentes a átomos de outros seis octaedros vizinhos. Os outros seis átomos do icosaedro localizados nos sítios equatoriais estão ligados a átomos que formam cadeias de três átomos, que interconectam adicionalmente os octaedros da estrutura [14, 19-20].

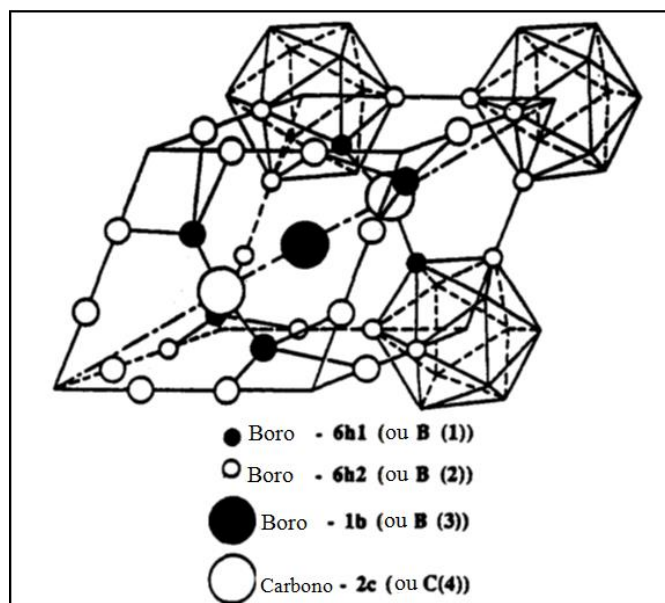


Figura 2.2 - Estrutura cristalina do carbeto de boro (B_4C).
Fonte: [14].

2.2 Propriedades químicas

O carbeto de boro é um dos compostos mais estáveis, sua entalpia padrão de formação é pequena (-38,9 a -71,5 kJ/mol) e é formado por ligações químicas essencialmente covalentes. Existem pós com tamanhos de partículas muito pequenos, são lentamente oxidados em ar úmido na temperatura ambiente. O teor de água e de oxigênio aumenta com o tempo e se concentra na superfície formando B_2O_3 , HBO_3 ou H_3BO_3 . A oxidação ao ar de B-C denso inicia em 600 °C, formando uma camada de filme fino de B_2O_3 . Até a temperatura de 1200 °C, o processo de oxidação é determinado pela difusão do oxigênio através da camada oxidada. O B_4C não é atacado por reagentes químicos a frio, mas é oxidado por oxiácidos a quente como HNO_3 , H_2SO_4 , $HClO_4$, etc. e atacado por sais fundidos como carbonatos alcalinos, por cloretos em 600 °C, e por brometos em 600 °C e por óxidos metálicos em temperaturas altas, formando monóxido de carbono mais boreto do metal. Os metais como ferro, níquel, titânio e zircônio reagem com B_4C em temperaturas maiores que 1000 °C formando boretos. O alumínio e o silício entram na rede de forma substitucional, formando compostos ternários [14,20-23].

2.2.1 Propriedades físicas

• **Densidade:** a densidade do carbetto de boro homogêneo aumenta linearmente com o teor de carbono. De acordo com o diagrama de equilíbrio de fase, pode-se obter a seguinte relação:

$$\rho = 2,422 + 0,0048 [C] \quad (2.4)$$

$$\text{com } 8,8 \leq [C] \leq 20,00 \quad (2.5)$$

Sendo:

ρ = densidade (g/cm³) e

[C] = concentração do carbono

O valor da densidade medida para o B₄C é 2,52g/cm³. A quantidade de B está na faixa de 78,26% em peso (para o B₄C) enquanto o teor de carbono 21,74% em peso para o B₄C. O boro possui dois isótopos, o ¹⁰B e o ¹¹B, que são encontrados na natureza nas quantidades de 18,8 e 81,2% em peso, respectivamente. O ¹⁰B possui seção de choque de 3.850 barns para nêutrons térmicos (com energia de 0,025 eV) enquanto o ¹¹B possui seção de choque de 0,05 barn [14, 24-29].

2.2.2 Propriedades térmicas

O coeficiente de dilatação térmica linear (α) varia em função da temperatura segundo a relação:

$$\alpha = 3,016 \times 10^{-6} + 4,30 \times 10^{-9}t - 9,18 \times 10^{-13}t^2 \quad (2.6)$$

e valores médios:

$$\alpha = 5,73 \times 10^{-6} \text{K}^{-1} (300 - 1970 \text{K}) \quad (2.7)$$

Condutividade térmica:

$$K = 0,125 \text{ W.cm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} (873\text{K}) \quad (2.8)$$

- **Difusão:** o boro difunde mais rapidamente no carbono do que o carbono no boro. O coeficiente de difusão do boro no carbono varia de acordo com a equação:

$$D = 3,02 e^{- (28625/T)} \quad (2.9)$$

Onde:

D = coeficiente de difusão superficial ou difusividade superficial (cm^2/s).

2.2.3 Propriedades elétricas

O carbetto de boro é um semicondutor do tipo p, com um *gap* de banda de valência de 1,64 eV. A resistividade elétrica na temperatura ambiente é da ordem de 0,1 a 10 $\Omega\cdot\text{cm}$. Este valor diminui com o aumento da temperatura e depende da orientação cristalina [14].

2.2.4 Propriedades mecânicas

Todas as determinações de resistência mecânica devem levar em conta a composição, a distribuição de poros, o tamanho de grão. O carbetto de boro é um dos materiais mais duros que existem, sendo superado apenas pelo diamante e nitreto de boro cúbico. A dureza do carbetto de boro aumenta com o aumento do teor de carbono e diminui com a presença de grafite livre [14,15].

- **Desgaste:** devido a alta dureza e resistência, o carbetto de boro só é inferior em resistência à abrasão ao diamante; expressa em unidades arbitrárias, a resistência a abrasão tem o diamante como o 1° da escala com 0,613, seguido do carbetto de boro com 0,422 e carbetto de silício com 0,314 [14].
- **Resistência mecânica à flexão (σ):** todas as determinações de resistência mecânica devem levar em conta a composição, a distribuição de tamanho de poros, o tamanho de grão, etc. Para materiais prensados a quente a resistência à flexão varia de 300 a 500 MPa e para materiais sinterizados sem pressão varia de 150 a 350 MPa. Medições realizadas sob atmosfera de nitrogênio demonstraram que ocorre apenas um pequeno

decréscimo no valor da tensão de ruptura, variando de 380 Mpa na temperatura ambiente a 340 Mpa em 1227 °C [14,15].

- **Tenacidade à fratura:** medidas feitas através dos métodos de indentação e barra entalhada apresentam variações entre 2,9 e 3,7 MPa m^{1/2}[14].

2.3 Processamento de materiais cerâmicos estruturais

As principais características que diferem os materiais cerâmicos das outras classes de materiais são sua alta temperatura de fusão (com exceção da maioria dos vidros) e sua elevada dureza, que são consequências das ligações químicas primárias de caráter iônico-covalente estabelecidas entre os átomos que constituem esses materiais. Essas ligações químicas, por sua força e caráter direcional, requerem temperaturas elevadas para serem rompidas e dificultam o deslocamento relativo entre vizinhos, reduzindo drasticamente sua capacidade de deformação. As elevadas temperaturas de fusão e a dureza impedem, na maioria das vezes, que cerâmicas policristalinas sejam produzidas de maneira economicamente viável por meio das técnicas convencionais de processamento aplicadas aos produtos poliméricos e metálicos [30, 31]. Na maioria dos casos, o processo de fabricação cerâmico começa a partir do pó obtido de fontes comerciais. O conhecimento de métodos de síntese em pó é muito importante, assim como, são importantes o conhecimento de métodos que podem ser utilizados para determinar as características físicas, químicas e de superfície do pó. As características do pó dependem fortemente do processamento e método utilizado para sintetizar, e estes, por sua vez, no desempenho posterior da cerâmica. Vários métodos estão disponíveis para a síntese de pós cerâmicos. Esta gama de métodos envolve desde predominantemente moer ou triturar para a redução do tamanho de um material grosseiro, granular (designada por trituração) a métodos químicos que envolvem reações químicas sob condições cuidadosamente controladas. Uma das questões mais problemáticas na produção de cerâmica é o efeito de pequenas variações na composição química e pureza do pó no processamento e propriedades. Essas variações, produzidas por um controle insuficiente do processo de síntese ou introduzidas durante o processamento, muitas vezes passam sem registro ou sem ser detectadas. No entanto, os seus efeitos sobre a microestrutura e propriedades do material podem, muitas vezes, ser

grandes. Para cerâmicas que devem satisfazer as exigências de propriedades mecânicas, uma atenção dada à qualidade do pó é de extrema importância. Isto tem resultado em maior utilização de métodos químicos para síntese de pós juntamente com manuseio cuidadoso durante o processamento [32, 33].

2.3.1 Características do pó precursor

A microestrutura desenvolvida durante a sinterização da cerâmica e as propriedades mecânicas como resistência à ruptura, dureza e tenacidade à fratura dependem das características do pó precursor. As principais características deste pó são: a forma, o tamanho e a distribuição de tamanhos de partículas, o estado de aglomeração/agregação destas partículas, a quantidade relativa de aglomerados e de agregados, a composição química e de fases cristalinas. Desta forma, é de importância fundamental conhecer estas características do pó precursor para se definir o processo de conformação e de sinterização da cerâmica [31, 34]. Quando se quer obter uma cerâmica sinterizada densa, é necessário que o pó possua uma distribuição de tamanhos de partículas ideal para uma adequada compactação, ou seja, para que se obtenha o maior número de contatos entre as partículas [35].

2.3.2 Mistura dos pós

A mistura mecânica dos pós é a forma mais simples e comum de se homogeneizar pós cerâmicos multicomponentes. A mistura mecânica a úmido é a forma mais eficiente neste tipo de processo. Geralmente é realizada em moinho de bolas e ou moinho planetário e, portanto, os pós podem ser desaglomerados e até desagregados, resultando em uma distribuição de tamanhos de partículas diferentes daquela relativa à apenas a mistura dos pós percussores. O tamanho e a forma dos aglomerados e/ou agregados presentes nos pós-precursores influenciam nos graus de homogeneidade química e física da mistura. Nesta etapa do processamento são adicionados à mistura de pós os aditivos que atuam como agentes aglomerantes e lubrificantes interpartículas. Estes aditivos utilizados com os objetivos de minimizar os gradientes de compactação do pó e de aumentar a resistência mecânica a verde após a conformação do corpo cerâmico [35, 36].

2.3.3 Conformação das cerâmicas a verde

O processo de compactação dos pós é uma etapa muito importante e consiste na prensagem do pó em um molde, originando um corpo no formato desejado e com resistência mecânica suficiente para o manuseio. É necessário que a compactação seja adequada para minimizar os gradientes de densidade, devido às próprias características do processo e ao estado de aglomeração/agregação dos pós. A compactação é necessária para se colocar as partículas do pó tão próximas quanto possível, criando o maior número possível de contatos partícula-partícula para promover a difusão de matéria para estes contatos e assim maximizar a taxa de densificação na etapa de sinterização. Pressões de compactação pequenas fazem com que o corpo cerâmico não atinja a densidade final prevista, sendo que pressões em excesso podem introduzir defeitos na microestrutura, como falhas de empacotamento de partículas (regiões mais densas e regiões menos densas), como resultado da não homogeneidade na distribuição de tensões [34,35, 37, 38]. A aplicação de carga sobre o pó é a técnica a ser utilizada no processo de compactação chamada de prensagem. A prensagem pode ser:

1) **uniaxial:** quando a carga é aplicada em um único eixo sobre uma matriz contendo o pó cerâmico. Esta técnica pode ser executada por matriz com única ação de pistão, ou por dupla ação dos pistões. A prensagem uniaxial possui as vantagens de um controle dimensional mais eficiente já que as paredes da matriz são fixas. Para resultados mais satisfatórios de massa específica a verde, podem-se incorporar lubrificantes aos pós, minimizando os efeitos do atrito entre as partículas e as paredes da matriz. A utilização de lubrificantes na parte interna do molde reduz o atrito das partículas de pó com as paredes da matriz, diminuindo perdas de energia de compactação e facilitando a ejeção do corpo cerâmico [39 - 43].

2) **isostática:** quando a carga é distribuída de maneira uniforme na matriz. Nesta técnica o corpo cerâmico é inserido em uma câmara, e o fluido existente neste compartimento transmite pressões uniformes em todas as direções do compacto. Esta técnica fornece melhores resultados de densidade a verde do que as outras técnicas. Desta forma, a utilização da prensagem isostática resulta em um compacto com uniformidade alta [36, 43 - 44].

2.3.4 Sinterização

A sinterização é uma etapa do processamento cerâmico na qual o corpo compactado é submetido a um tratamento térmico, cuja temperatura e tempo variam de acordo com os componentes do pó inicial e dos processamentos anteriores a esta etapa. Na sinterização as partículas do corpo compactado se ligam formando uma estrutura sólida [30]. No processo de sinterização podem ocorrer a temperaturas abaixo do ponto de fusão do material, neste processo pode ocorrer o transporte difusional de átomos. Este processo é denominado sinterização via fase sólida. A sinterização pode ainda ocorrer através da formação de uma fase líquida, gerada a partir da utilização de aditivos que se fundem a temperaturas inferiores às de temperatura de sinterização do material base ativando os processos difusionais que dominam a sinterização. Este processo é chamado sinterização por fase líquida [30, 35].

2.4 Ambiente espacial

Os ambientes espaciais, bem como suas características típicas influenciam nas condições naturais de operação de um veículo espacial são de grande abrangência.

2.4.1 Descrição do ambiente espacial

O ambiente é um parâmetro de extrema importância na definição da funcionalidade, do desempenho, da durabilidade e do custo de artefatos construídos pelo homem. Sua influência pode ir desde uma má função, até a geração de falhas e afetando indubitavelmente as superfícies expostas. No projeto de artefatos espaciais, o efeito do ambiente espacial é análogo, inclusive no que tange à ação no desempenho dos equipamentos embarcados [9]. Ambientes espaciais apresentam condições muito diferentes das terrestres. No espaço, assim como qualquer ambiente da Terra, existem fenômenos que são potencialmente perigosos para os seres humanos e para sistemas tecnológicos [8]. O ambiente espacial possui características que são dependentes da altitude de órbita. Basicamente, as missões espaciais podem ser subdivididas nas seguintes categorias: órbita baixa (LEO-Low Earth Orbit = 300 a 5.000 km), órbita geo-estacionária ou geo-síncrona (GEO-Geosynchronous Earth Orbit \approx 36.000 km) e órbita média (Medium Earth Orbit > 5.000 km). O limite inferior de altitude é definido pela

atmosfera, uma vez que abaixo dela a presença de matéria exerce uma resistência ao movimento do satélite (arrasto) tornando dispendioso em termos energéticos a manutenção do satélite em órbita. O ambiente espacial é complexo e dinâmico, ou seja, a energia, a densidade e os constituintes do ambiente orbital natural variam com a posição (altitude, latitude e longitude), hora local estação e atividade solar [9, 46].

2.4.2 O espaço interestelar

As características típicas predominantes do ambiente espacial, incluindo o espaço interestelar podem ser citadas como: vácuo, radiação solar (ondas eletromagnéticas), raios X e raios gama, partículas de energias altas (elétrons, prótons, nêutrons e partículas alfa), gravidade e oxigênio atômico (órbitas baixas). Estas condições devem ser consideradas durante a realização de um projeto de um veículo espacial [45-48]. A radiação cósmica primária provém do espaço interestelar e no topo da atmosfera é constituída de prótons (85%) partículas alfa (14%) e núcleos de número atômico entre 3 e 26 (1%). Essas partículas são extremamente energéticas, possuindo uma energia até 10 GeV. Como o campo magnético da Terra desvia parte das partículas carregadas, a intensidade da radiação na região do Equador é mínima e nos polos é máxima. A radiação cósmica varia de local para local, dependendo da latitude e da longitude [49].

2.4.3 Radiação espacial

Uma variedade de partículas com energias altas, que vão desde keV a GeV podem ser encontradas no campo magnético da Terra. Ao se definir a órbita de operação de um satélite, modelos teóricos do ambiente radiação são necessários na etapa de concepção do projeto para auxiliar no estudo de seu desempenho. O sucesso de uma missão está diretamente ligado ao claro conhecimento de suas características [49]. Para uma missão espacial estabelecida, todos os tipos de radiação devem ser considerados a fim de especificar o de ambiente de radiação [9, 49]. A variedade de partículas de altas energias está fortemente aprisionada no campo magnético. Os principais elementos que compõe do ambiente de radiação são [50, 51, 52]:

- 1 - Raios cósmicos:** são baixos fluxos de íons energéticos pesados estendendo-se até as energias de TeV. Os raios detectados na superfície são, na maioria, partículas secundárias, criadas nas colisões com núcleos da camada atmosférica. Além de interagir com os raios cósmicos a atmosfera terrestre exerce um papel de blindagem para os habitantes, atenuando e absorvendo bastante as radiações. A quantidade de radiação aumenta com a altitude e longitude, ou seja, as pessoas que habitam as montanhas recebem mais radiação que as que vivem ao nível do mar, os habitantes das regiões próximas aos polos são mais expostos que os da região equatorial. Alguns raios cósmicos se originam de distúrbios solares e são mais abundantes em atividade solar alta, que ocorre de 11 em 11 anos [52].
- 2 - Radiação retida no cinturão de Van Allen:** consiste nas partículas energéticas carregadas presas ao campo magnético da Terra podendo ser encontradas em altitudes que vão de 100 km a 6500 km e consistem, principalmente, de elétrons e prótons com energias da ordem de grandeza de MeV. É responsável por grande parte da exposição à radiação nas orbitas baixas e médias (*LEO- Low Earth Orbit, MEO- Medium Earth Orbit*).
- 3 - Eventos de partículas solares (EPS):** São erupções solares que produzem prótons energéticos na faixa de energia de centenas de MeV. A interação das partículas energizadas com o meio ambiente provoca emissão de energia, na forma de diversos tipos de radiação, que se distribui por grande parte do espectro eletromagnético, estendendo-se desde ondas de radio a raios X e raios gama, podendo produzir também a emissão de partículas energéticas (íons, nêutrons e elétrons) [50]. Normalmente, parte das partículas carregadas são desviadas pelo campo magnético da Terra, para o Cinturão de Van Allen, e somente chegam à Terra próxima aos polos. As partículas que ficam aprisionadas no Cinturão de Van Allen (CVA) oferecem riscos a satélites. A Figura 2.3 ilustra as regiões do CVA e algumas das órbitas influenciadas por partículas energéticas provenientes do sol que incidem no campo magnético da Terra [2, 52]. Além das partículas solares, o campo magnético também é uma camada protetora contra raios cósmicos. Em particular, em altitudes de navegação de satélites de baixa órbita (LEO), estudam-se principalmente as influências das partículas aprisionadas nos cinturões de radiação que envolvem a

Terra [50-54]. Na parte interna do cinturão interno encontra-se a Anomalia Magnética do Atlântico Sul ou simplesmente AMAS, que será explicada em maiores detalhes mais adiante.

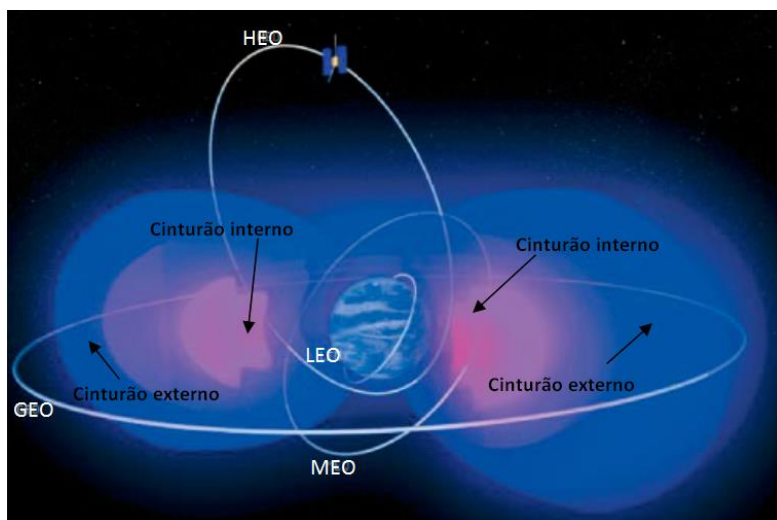


Figura - 2.3 Cinturão de Van Allen, regiões e principais órbitas de satélites: GEO - geostacionária, HEO - órbita elíptica, MEO - órbita média e LEO - órbita baixa
Fonte: [2] adaptado.

2.4.4 Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS)

O campo magnético terrestre não é um simples dipolo. Existe uma depressão no campo, no Atlântico Sul, que faz com que partículas carregadas também cheguem a uma região conhecida como Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul-AMAS (no Inglês, SAMA- South Atlantic Magnetic Anomaly). O campo magnético da Terra é variável no tempo e no espaço. Para tanto, alguns modelos foram construídos para descrever este campo. A partir de 1850, aproximadamente, quando medidas de intensidade de campo começaram a ser realizadas, os modelos revelaram comportamentos mais detalhados para o campo magnético. A Anomalia magnética do Atlântico é uma das propriedades mais notáveis do campo, caracterizando-se por apresentar baixas intensidades do campo magnético total [51]. Há três regiões sobre o planeta onde tipicamente são observados níveis elevados de radiação, sobre os dois polos e sobre a América do Sul. Grande parte do território brasileiro, principalmente a costa sudeste, está sujeito aos efeitos de anomalia cuja origem geológica ainda não é

totalmente conhecida conforme pode ser visto na Figura 2.4 [51,53]. A região de abrangência da AMAS coincide com uma região intensa da radiação no espaço próximo à Terra. Isto ocorre porque baixas intensidades da AMAS facilitam a entrada de partículas cósmicas na magnetosfera. O aumento do fluxo cósmico pode provocar problemas em objetos que orbitam a Terra, tais como satélites e estações espaciais [53]. Além do mais, diversos estudos sobre segurança de voo têm sido desenvolvidos nas últimas décadas devido ao problema do controle de nível de dose de radiação ionizante recebidas por tripulações de aeronaves, bem como equipamentos sensíveis aos efeitos da ionização [8].

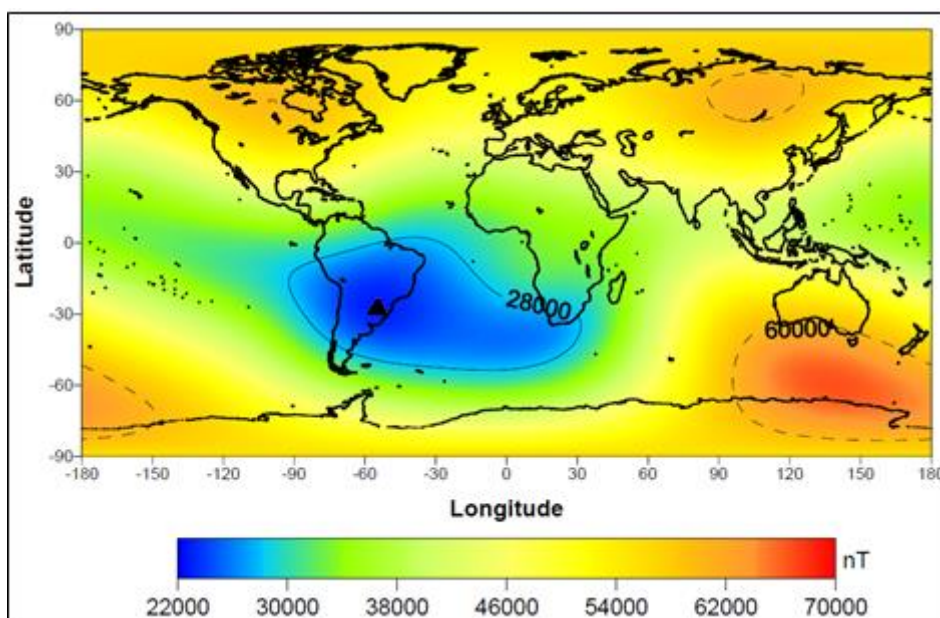


Figura 2.4 - Representação do campo magnético total para o ano de 2000. O triângulo preto destaca o centro da AMAS para esse período.

Fonte: [8].

2.4.5 Interação da radiação cósmica e seus subprodutos com a atmosfera terrestre

Na interação das radiações ionizantes com a matéria, há interesse especial nos resultados dessas interações, e em particular na transferência de energia da radiação para o meio. Há dois conceitos importantes relacionados ao tema, que são: interação e radiação ionizante. Interação é o termo que representa a ação de uma força e o efeito

causado por essa ação. Radiação ionizante, por sua vez, é qualquer radiação, com ou sem massa de repouso, que pode remover elétrons de átomos e moléculas. O conjunto das radiações ionizantes usualmente estudadas compreende [8,51]:

1 - Radiação eletromagnética: é aquela com energia de fóton acima de 12 eV, que recebe várias denominações de acordo com a origem: raios X – originados de desexcitações atômicas (raios X característicos) e da desaceleração de partículas carregadas (Bremsstrahlung); raios gama originados de desexcitações nucleares; fótons de aniquilação originados da aniquilação de pares partícula-antipartícula;

2 - Partículas eletricamente carregadas: são as que possuem energia cinética bem maior que a energia térmica, é superior a energias de ligação de elétrons atômicos, chamadas partículas carregadas rápidas. Suas origens podem ser a emissão por núcleos atômicos (partículas alfa e beta e os produtos de fissão nuclear, por exemplo), a emissão por átomos (elétrons Auger), feixes produzidos em aceleradores de partículas (elétrons, pósitrons, prótons, dêuterons, íons em geral, de qualquer número atômico ou número de massa), a radiação cósmica primária ou produtos de sua interação com a atmosfera (múons, píons etc.), produtos de reações nucleares, etc;

3 - Nêutrons livres com qualquer energia cinética e de qualquer origem. Essa classificação das radiações ionizantes tem fundamentação nas forças responsáveis pelas interações e na modelagem utilizada para descrevê-las. Fótons interagem pela ação de campos eletromagnéticos, atuando sobre partículas carregadas do meio; partículas carregadas têm sua ação em elétrons do meio aproximada por interações coulombianas consecutivas; já os nêutrons atuam sobre prótons e nêutrons de núcleos atômicos pela força nuclear forte. As áreas da física que tratam dessas interações são a eletrodinâmica quântica para interações entre campos eletromagnéticos e cargas em movimento, e a física nuclear para as interações entre núcleos. Em geral, não há soluções analíticas para o problema completo e a física da radiação se fundamenta em soluções analíticas parciais e aproximações numéricas combinadas com resultados experimentais [54, 55].

2.4.6 Efeitos da radiação ionizante na matéria

Não existe produto desenvolvido para uso espacial (sistema espacial) em que os efeitos da radiação podem ser negligenciados. No contexto aqui usado, a palavra "componente" não se refere apenas aos componentes eletrônicos, mas também para outros constituintes fundamentais de unidades de hardware de espaço e subsistemas, tais como células solares, materiais ópticos e adesivos. A eficiência de operações de sistemas espaciais no ambiente de radiação espacial, não pode ser assegurada sem uma análise cuidadosa dos efeitos da radiação. Aqui serão abordados os principais efeitos da radiação ionizante na matéria, porém um compêndio abrangente de efeitos da radiação é fornecido pela norma ECSS-E-HB-10-12, que apresenta informações sobre efeitos da radiação na matéria [51]. As interações das radiações ionizantes com os materiais dependem das características das radiações e dos átomos do meio. A classificação das radiações ionizantes pode ser assim representada, conforme Figura 2.5 [51]:

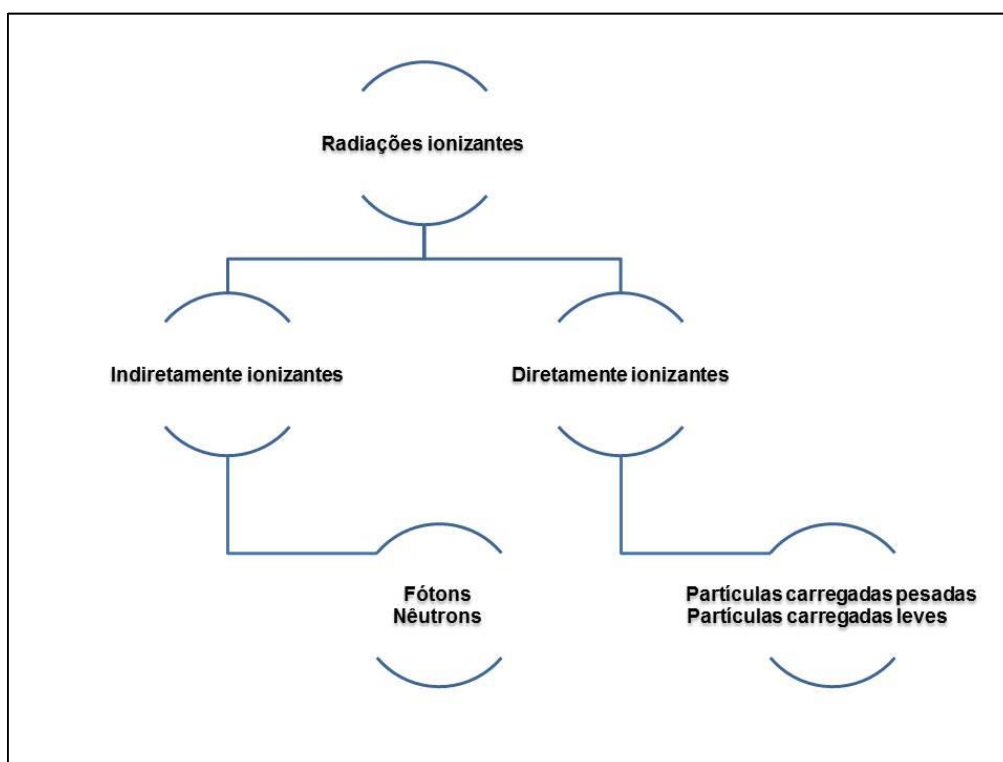


Figura 2.5 - Classificação das radiações ionizantes.
Fonte: Adaptado de [51].

2.4.7 Radiações ionizantes

Radiação ionizante é a radiação cuja energia é superior à energia de ligação dos elétrons de um átomo com o seu núcleo; radiações cuja energia é suficiente para arrancar elétrons de seus orbitais. A interação das radiações ionizantes com a matéria é um processo que se passa em nível atômico. Ao atravessarem um material, estas radiações transferem energia para as partículas que forem encontradas em sua trajetória. Caso a energia transferida seja superior à energia de ligação do elétron com o restante da estrutura atômica, este é ejetado de sua órbita. O átomo é momentaneamente transformado em um íon positivo. O elétron arrancado desloca-se no meio, impulsionado pela energia cinética adquirida neste processo. Esta energia é dissipada através da interação do elétron com elétrons e núcleos de outros átomos, eventualmente encontrados em sua trajetória. Novos íons podem, assim, serem introduzidos na matéria. O processo é interrompido quando, tendo sua energia dissipada em interações (choques), os elétrons (e suas cargas negativas) acabam capturados por moléculas do meio. A introdução de pares de íons (positivo e negativo) na matéria recebe o nome de ionização. A interação das radiações ionizantes com a matéria consiste na transferência de energia da radiação para o meio irradiado [52].

2.4.8 Interação das radiações direta e indiretamente ionizantes

No processo das radiações ionizantes, a palavra interação é aplicada aos processos nos quais a energia e/ou a direção da radiação é alterada. Tais processos são randômicos, dessa forma só é possível falar na probabilidade de ocorrências das interações. Quando ocorre transferência de energia de uma radiação incidente para a matéria, as radiações que tem carga como elétrons, partículas alfa e fragmentos de fissão, atuam principalmente por meio do seu campo elétrico e transferem sua energia para muitos átomos ao mesmo tempo, e são denominadas radiações diretamente ionizantes. As radiações que não possuem carga, como as radiações eletromagnéticas e os nêutrons, são chamadas de radiações indiretamente ionizantes, pois interagem individualmente transferindo sua energia para elétrons, núcleos ou átomos, que irão provocar novas ionizações [53].

2.4.9 Probabilidade de interação ou seção de choque

A probabilidade de interação por unidade de fluxo de partículas da radiação por centro de interação do material é denominada seção de choque para uma radiação em relação a um dado material. Seção de choque (σ) para uma radiação em relação a um dado material pode ser representada pela área aparente que um centro de interação (núcleo, elétron, átomo) apresenta para que haja uma interação com a radiação que a atinge. A seção de choque microscópica de um determinado nuclídeo varia conforme a energia da partícula ou onda incidente. Quanto maior o valor da seção de choque maior a probabilidade de ocorrer tal interação. A probabilidade de ocorrer uma determinada reação ou interação nuclear é quantificada por uma grandeza que tem dimensão de área e denomina-se seção de choque microscópica sendo sua unidade o barn (b) que, vale 10^{-24} cm^2 [53, 54].

2.4.10 Ionização, excitação e ativação

As radiações, ao interagir com a matéria, resultam na transferência de energia para os átomos e moléculas que estejam em sua trajetória. Ao interagir com um material, podem nele provocar [55]:

1 - Excitação atômica ou molecular: interação onde os elétrons são deslocados de seus orbitais de equilíbrio e, ao retornarem, emitem a energia excedente na forma de fóton, com comprimento de onda característico (Figura 2.6 a).

2 - Ionização: Interação onde os elétrons são removidos dos orbitais pelas radiações, resultando em elétrons livres de energia alta, íons positivos ou radicais livres quando ocorre quebra de ligações químicas (Figura 2.6 b).

3 - Ativação do núcleo: interação de radiações com energia superior à energia de ligação dos núcleos e que provoca reações nucleares, resultando num núcleo residual e na emissão de radiação (Figura 2.6c).

Outra forma de interação por transferência de energia é a radiação de freamento (Bremsstrahlung). É a radiação, em particular raios X, emitida em decorrência da perda de energia cinética de elétrons que interagem com o campo elétrico de núcleos de

átomos-alvo, átomos estes com elevado número atômico, ou mesmo que interagem com a eletrosfera [53].

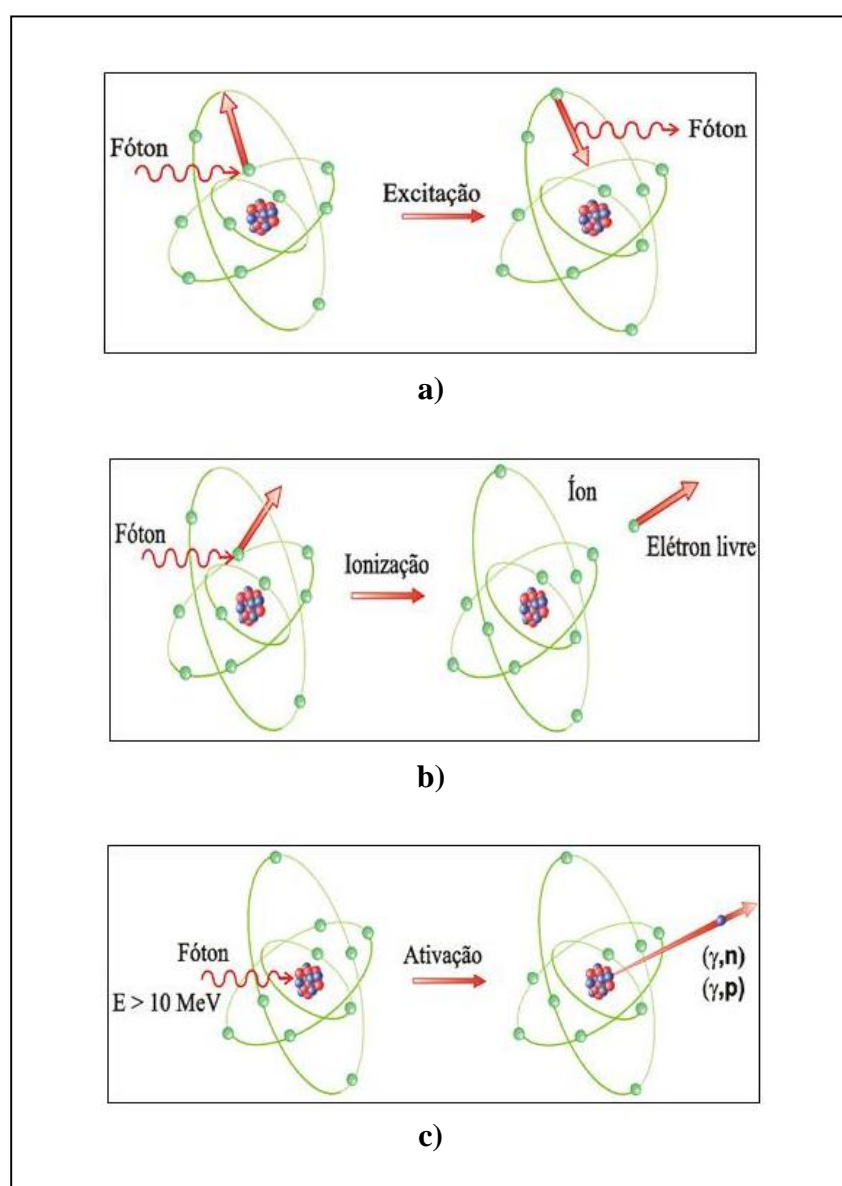


Figura 2.6 - Transferência de energia sob a forma de ondas eletromagnéticas ao interagir com a matéria. As figuras a, b e c são modos de interação da radiação com a matéria.

Fonte: [53]

2.4.11 Interação da radiação eletromagnética com a matéria

Na faixa de energias que inclui os raios X e gama, há várias interações possíveis com o átomo ou com elétrons atômicos ou ainda com o núcleo, mas há também a possibilidade de não interação, ou seja, a interação da radiação eletromagnética (REM) pode atravessar distâncias consideráveis em um meio material sem modificá-lo e sem se modificar ou até mesmo percorrer grandes espessuras antes de sofrer a primeira interação. As probabilidades de interação (e de não interação) dependem de características do meio e da energia da radiação. A REM ionizante é tratada, em boa parte dos casos, como um conjunto de partículas, denominadas fótons. Este poder de penetração depende da seção de choque de interação para cada tipo de evento que pode absorver ou espalhar a radiação incidente. A penetrabilidade dos raios X e gama é muito maior que a das partículas carregadas, e a probabilidade de interação depende muito do valor de sua energia. A cada energia de fóton $h\nu$ corresponde um momento associado $h\nu/c$, e, dessa forma, podem ocorrer ‘colisões’ em que o fóton transfere energia e momento para outras partículas. As principais interações que ocorrem na matéria com fótons de energias na faixa de poucos keV até dezenas de MeV são os principais modos de interação que, excluindo as reações nucleares, são espalhamento coerente, efeito fotoelétrico, efeito Compton e formação de pares, que serão apresentados a seguir [54]:

- **Espalhamento coerente (ou efeito Rayleigh)**

Corresponde à absorção e reemissão da radiação pelo átomo, em uma direção diferente da de incidência. Somente neste efeito a radiação é tratada como onda; em todos os outros se considera a REM como constituída de fótons;

- **Efeito fotoelétrico**

O efeito fotoelétrico é caracterizado pela transferência total da radiação X ou gama (que desaparece) a um único elétron orbital, que é expelido com energia cinética E_c bem definida.

$$E_c = h\nu - B_e \quad (2.10)$$

Onde:

h = constante de Planck;

ν = frequência da radiação;

B_e = energia de ligação do elétron orbital e

E_c = energia do do elétron.

A Figura 2.7 representa o mecanismo de interação do fóton e sua energia, no efeito fotoelétrico.

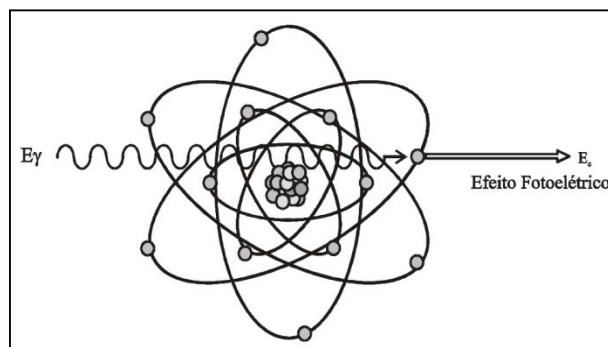


Figura 2.7 - Representação esquemática do efeito fotoelétrico.
Fonte: [56]

O efeito fotoelétrico ocorre predominantemente para baixas energias e para elementos químicos de elevado número atômico Z . A probabilidade de ocorrência aumenta com Z^4 e decresce rapidamente com o aumento da energia. Gerando como resultado final deste processo elétrons secundários e fótons com energia menor que a energia do fóton primário [56].

●Efeito Compton

O espalhamento do fóton é feito por um elétron de baixa energia de ligação, considerado quase livre. Trata-se, portanto de um espalhamento inelástico do fóton. Este elétron recebe somente parte da energia do fóton primário, dividindo-a com o fóton espalhado, continuando sua sobrevivência dentro do material em outra direção e com a energia reduzida (Figura 2.8). A transferência de energia depende da direção do elétron emergente, que é aleatória. De um fóton de energia fixa podem resultar

elétrons de energia variável. O resultado final deste efeito no material é a geração de elétrons de menor energia.

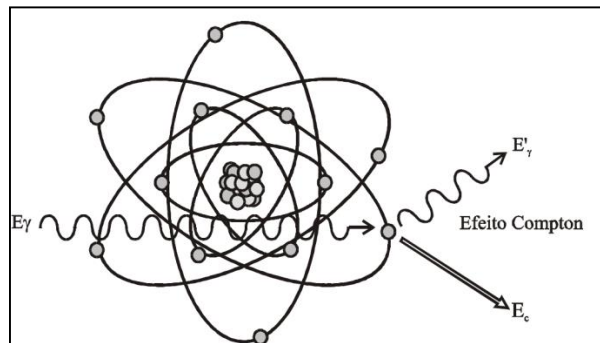


Figura 2.8 - Representação esquemática do efeito Compton.
Fonte: [56]

A probabilidade de ocorrência do efeito Compton aumenta com a diminuição da energia de ligação dos elétrons orbitais em relação à energia do fóton incidente [56].

● Formação de par

Uma das formas predominantes de absorção da radiação eletromagnética de alta energia é a produção de par elétron-pósitron. Este efeito ocorre quando fótons de energia superior a 1,022 MeV passam perto de núcleos de número atômico elevado, interagindo com forte campo elétrico. Nesta interação (Figura 2.9) a radiação desaparece e dá origem a um par elétron-pósitron. As duas partículas transferem a sua energia cinética para o meio material, sendo que o pósitron volta a se combinar com um elétron do meio e dá origem a dois fótons, cada um com energia de 511 keV, em direções opostas [56].

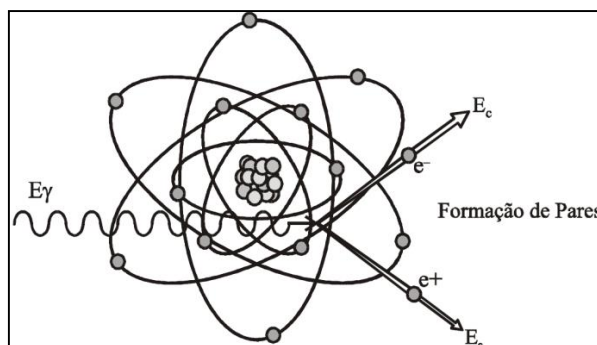


Figura 2.9 - Representação esquemática da formação de pares.
Fonte: [73]

A Figura 2.10 mostra que o efeito Compton predomina para todos os elementos da tabela periódica se as energias de fótons estão entre algumas centenas de keV e alguns MeV, e predomina para todas as energias se os números atômicos são baixos (região sombreada na Figura 2.10). Para números atômicos elevados o efeito fotoelétrico é o mais provável para energias baixas e a produção de par para energias elevadas [54].

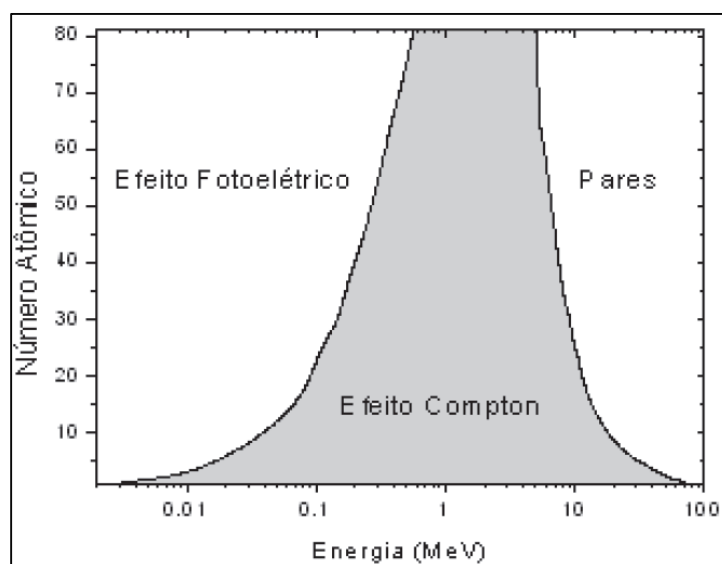


Figura 2.10 - Diversos processos de interação dos fótons com a matéria em função da energia do fóton e do número atômico do material absorvedor.
Fonte: [54]

O efeito final da penetração de fótons no meio material é o desenvolvimento de uma cascata de fótons e elétrons secundários, que aumenta em número de partículas e decresce em energia de cada partícula individual, concorrendo com a absorção de energia e de partículas pelo meio. O resultado final é uma adição de energia no meio que cresce, atinge um máximo e diminui exponencialmente a partir do ponto de máxima dose pela atenuação do feixe primário. A radiação cósmica primária, que é constituída de partículas, na ionização do meio libera elétrons que, por sua vez promovem ionizações e cascatas de fótons e elétrons secundários. Além disso, nas interações

nucleares com os núcleos do meio gerarão radiação gama de desexcitações de estados nucleares excitados nos núcleos residuais produzidos nas reações de *spallation*, reações diretas e via núcleo composto. Esta radiação gama é tipicamente menor de 10 MeV e provocará também cascatas de fótons e elétrons secundários no meio. Desta forma é evidente que, sempre acompanhando um processo de freamento ou absorção de uma partícula primária da radiação cósmica haverá a geração de fótons e elétrons no meio, junto com a ionização produzida diretamente pela partícula pesada. A radiação de *bremsstrahlung* por partículas pesadas só é significativa em energias altas (>1 GeV) [51, 53, 56].

2.4.12 Principais falhas em veículos espaciais em órbita

Mais de 4000 veículos espaciais foram lançados nos últimos 25 anos. No entanto, é grande o desafio de manter todo sistema que envolve um satélite em órbita em perfeitas condições de funcionamento durante o tempo de cada missão espacial. Mesmo utilizando tecnologias avançadas e testes intensivos muitos veículos espaciais falham antes de finalizar a sua missão [57]. Mak Tafazoli realizou um levantamento de dados de falhas ocorridas em veículos espaciais (sondas, satélites, etc.) de uso civil e militar entre 1980 e 2005. Ele identificou e estudou 156 falhas em órbita ocorridas em 129 diferentes veículos espaciais.

Os principais subsistemas estudados para satélites que apresentaram falhas foram:

- 1-Sistema de controle de atitude e de órbita (*Attitude and Orbit Control System-AOCS*);
- 2- Comando e manipulação de dados (*Command and Data Handling- CDH*);
- 3-Telemetria (*Telemetry*);
- 4- Rastreamento e Comando (*Tracking and Command-TTC*);
- 5- Estrutura e mecanismo (*Structure and Mechanism -MECH*);
- 6- Transmissão de dados (*Payload*) e
- 7- Energia (*Power*).

Os tipos de falhas analisadas foram:

- a) **mecânica:** causada por fenômenos que envolvem transferência de calor, a temperatura, as forças externas, atrito e a variação de pressão;
- b) **elétrica:** causada por sobrecarga de energia, curto-circuito, o esgotamento da bateria etc;
- c) **software:** consistem principalmente em erros nos comandos enviados e
- d) **desconhecida:** falhas ocorridas de origem desconhecida.

A Figura 2.11 mostra a distribuição de falhas ocorridas em diferentes subsistemas de espaçonaves. E a Figura 2.12 mostra o tempo de falhas após o lançamento. O subsistema mais afetado por falhas é o AOCS. Ele é responsável pela orientação do satélite/veículo espacial no espaço. Os outros subsistemas *Power* responsável por toda parte energética, CDH que é a o subsistema de manipulação de dados a bordo (computador de bordo), *other* que são falhas de origens desconhecidas e TTC responsável pelo rastreamento. Este último determina a posição do satélite e segue seu movimento utilizando informações das posições angulares e respectivas velocidades [75,76].

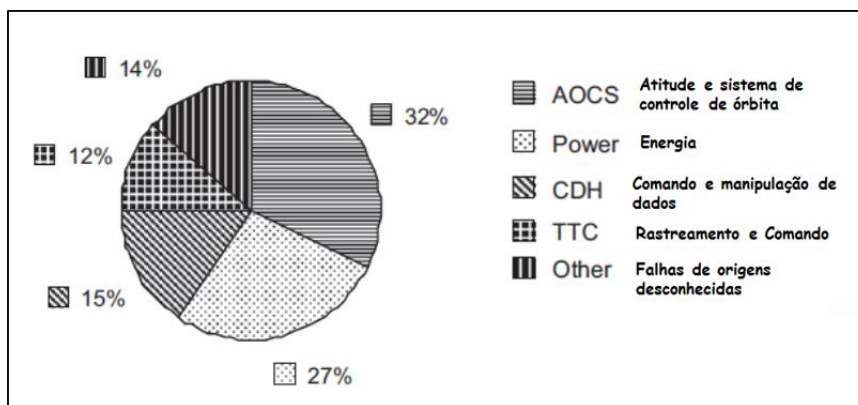


Figura 2.11 - Subsistemas afetados por falhas em órbita.
Fonte: [57].

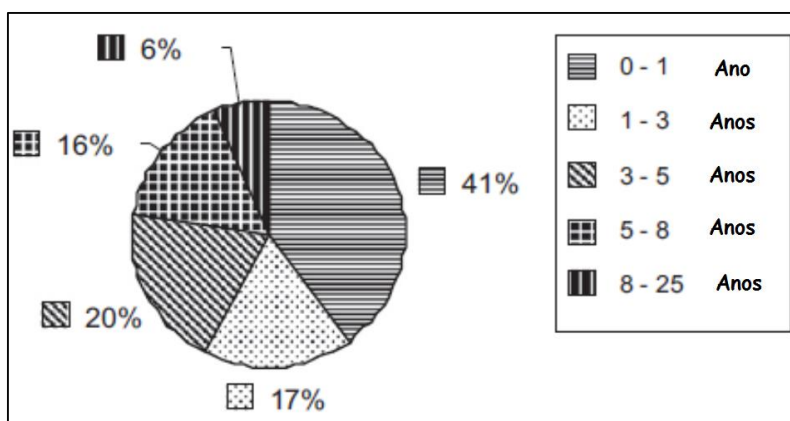


Figura 2.12 - Tempo de falha após lançamento do satélite.
Fonte: [57].

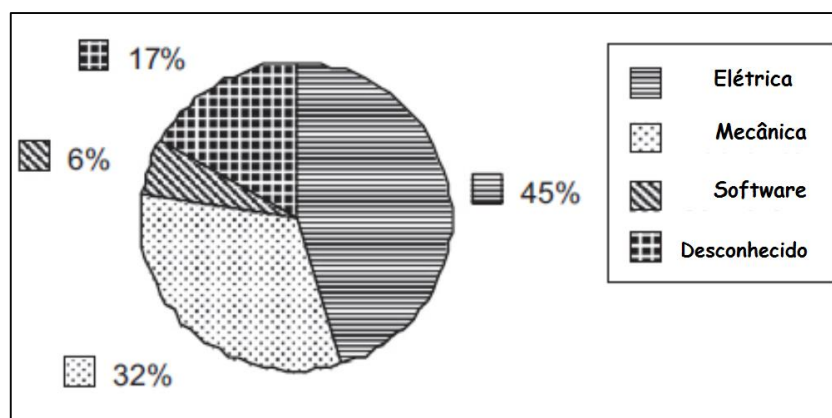


Figura 2.13 - Espécies de falhas ocorridas em satélites em órbita
Fonte: [57].

Como indicado na Figura 2.13, falhas definidas como elétricas/eletrônicas são responsáveis por quase metade das falhas, com 45% das ocorrências, à frente das falhas mecânicas/térmicas com 32% das ocorrências. Estas falhas podem estar relacionadas aos efeitos da radiação principalmente nos componentes nos veículos espaciais estudados [57]. No contexto das possíveis falhas, a palavra componente não se refere apenas aos componentes eletrônicos, mas também a outros constituintes fundamentais de unidades de hardware de espaço e subsistemas, tais como células solares e materiais ópticos. O conhecimento das propriedades das radiações e de seus efeitos sobre a matéria é de grande importância para entender suas consequências [55, 57]. Os efeitos da radiação sobre sistemas elétricos e eletrônicos e materiais podem ser classificados em: efeito de dose total ionizante (TID), dano de deslocamento e os efeitos de eventos

únicos (SEE – *Single Event Effects*). Um resumo de tecnologias suscetíveis ao efeito TID e seus efeitos estão listadas na Tabela 2.1 [57].

Tabela 2.1- Categoria tecnológica e respectivo efeito devido a TID

| Categoria Tecnológica | Efeitos |
|------------------------------------|--|
| MOS | Mudança de tensão de limiar Diminuição da unidade atual Diminuição da velocidade de comutação Aumento da corrente de fuga |
| Microeletrônica analógicas (geral) | Mudanças na tensão Mudanças no viés de corrente |
| Microeletrônica digital (geral) | Falha de lógica Mudança de tensão de limiar Redução de velocidade de comutação |

As preocupações mais comuns em projetos de engenharia espaciais estão relacionadas com descargas elétricas no veículo espacial [57]. Os efeitos de descarga eletrostática são responsáveis por mais de metade de todas as anomalias. Problemas decorrentes de SEE e efeitos e danos da dose total de radiação, juntos, responderam por cerca de um terço dos todos os casos. Os prótons são os principais responsáveis por anomalias resultantes do total de radiação enquanto íons pesados contribuem mais para anomalias decorrentes de efeitos de evento único SEE. Íons altamente energéticos, como raios cósmicos podem facilmente penetrar na estrutura de um veículo espacial, passar pelo interior de componentes, e sair da estrutura em linha reta. À medida que a partícula atravessa o material de interesse, transfere energia ao longo de seu caminho. Uma blindagem neste caso não é efetiva, pois as partículas pesadas são unidirecionais, e incidem no circuito integrado em momentos e locais aleatórios e, com ângulos aleatórios de incidência, além de que, usualmente promovem a ocorrência de uma cascata de partículas secundárias de diferentes tipos e energias e em diferentes angulações. Não é simples prever os seus efeitos sobre futuros sistemas espaciais, que podem envolver órbitas relativamente inexploradas, novas tecnologias, novos materiais,

e evolução das práticas de engenharia. Uma das consequências deste fenômeno em circuitos digitais é a alteração de portas lógicas, causando mau funcionamento do sistema [54].

2.4.13 Interação de nêutrons com a matéria

Devido à ausência de carga elétrica, a interação do nêutron com os campos elétricos atômicos é desprezível; assim sendo, a interação do nêutron com a matéria se dá essencialmente através da interação direta com núcleos. Essa peculiaridade faz do nêutron uma ponta de prova extremamente interessante para o estudo de forças nucleares. Também faz com que mesmo nêutrons de energia baixa possam induzir reações nucleares, uma vez que eles não experimentam repulsão eletromagnética nem pelos elétrons, nem pelos núcleos. Por outro lado, só interagem com os núcleos, nêutrons que têm uma penetração superior a de outros tipos de radiação. O nêutron é uma partícula com massa de repouso ligeiramente superior à do próton e sem carga elétrica. Possui massa de aproximadamente uma unidade de massa atômica (1 u.m.a). A emissão de nêutrons pelo núcleo não ocorre espontaneamente, exceto no caso de decaimento por fissão [51]. Nêutrons livres são gerados por reações nucleares. São fontes de nêutrons chuveiros de radiação cósmica na atmosfera, as fissões nucleares, os aceleradores de partículas e as fontes compostas por um radioisótopo e um material emissor de nêutrons, como por exemplo, $^{241}\text{Am-Be}$. O nêutron não interage com a matéria por meio da força coulombiana, o que, para partículas carregadas, predomina nos processos de transferência de energia da radiação para a matéria. Nêutrons que incidem na matéria podem sofrer espalhamento elástico ou inelástico com núcleos do meio, podem ser absorvidos e podem provocar reações nucleares diversas. Além disso, da mesma maneira que os fótons, nêutrons podem atravessar diversas camadas atômicas sem sofrer qualquer interação, pois a força nuclear forte tem alcance muito curto e só atua entre o nêutron e o núcleo. Em geral, quanto maior a energia dos nêutrons, maior a sua penetração nos materiais, pois a seção de choque de boa parte das interações diminui com o aumento da energia cinética. No entanto, há processos específicos e ressonâncias que fogem à regra. Assim, não é possível fazer muitas generalizações sobre as interações, e trataremos aqui apenas das consequências em termos de produção

de outras radiações ionizantes. Existem na sua interação os produtos de reações nucleares tipo (n, α), (n, p), (n, d), etc., sendo estes, por sua vez, altamente ionizantes. Por não possuir carga elétrica, a interação do nêutron livre com o campo elétrico dos átomos (tanto dos elétrons quanto dos prótons) é desprezível devido à ausência de repulsão coulombiana. A interação do nêutron com o meio material se dá essencialmente pela interação direta com os núcleos dos átomos constituintes do meio, de forma que os nêutrons de baixa energia se aproximam e penetram no núcleo com maior facilidade, iniciando reações nucleares. No meio material o nêutron livre segue uma trajetória retilínea em movimento uniforme até colidir com o núcleo e interagir com o mesmo. Pode-se dividir as interações do nêutron com os núcleos como espalhamento: I- elástico e inelástico; II- absorção: captura radioativa, reação e fissão. No espalhamento, o nêutron interage com o núcleo, mas continua livre modificando, entretanto a sua velocidade (energia) direção e trajetória. Se o espalhamento for elástico, na colisão com o núcleo estacionário o nêutron transfere parte da sua energia cinética para o núcleo, como no choque de bolas de bilhar, de maneira que o núcleo alvo adquire uma velocidade de recuo. No espalhamento inelástico parte da energia do nêutron é transferida para excitação do núcleo. Na absorção o nêutron deixa de ser livre e forma com o núcleo um sistema composto, podendo ocorrer três tipos de reações nucleares: captura radioativa, fissão e reação. Para expressar a probabilidade de ocorrência de uma interação nuclear utiliza-se o conceito de seção de choque, que pode ser determinada experimentalmente. Para isso supõe-se um fluxo incidente de nêutrons ϕ ($\text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$) sobre uma lâmina muito fina de um dado material de espessura δx totalmente imersa neste fluxo. A taxa de interação com os núcleos do alvo será dada pela taxa com a qual os nêutrons são removidos do feixe [51]. Esta taxa é dada por:

$$R = \sigma N\phi \rightarrow \sigma = \frac{R}{N\phi} \quad (2.11)$$

Sendo:

R = taxa de interação dos nêutrons com os núcleos do material do alvo;

N = número de núcleos alvo e

σ = seção de choque (barn = 10^{-24}cm^2).

- As probabilidades de interações de nêutrons com núcleos de um determinado meio material são governadas pelas seções de choque, as quais, por sua vez, variam de acordo com a energia do nêutron. Por conveniência agrupam-se os nêutrons em três faixas de energia: Nêutrons térmicos- energia menor que 0,25 e V;
- Nêutrons epitérmicos e intermediários: entre 0,25 e 100 keV;
- Nêutrons rápidos: energia maior que 100 keV.

Os nêutrons térmicos estão em equilíbrio térmico com o meio. Os nêutrons epitérmicos e intermediários estão em processo de termalização com o meio e os nêutrons rápidos são aqueles que transportam maiores quantidades de energia [51].

2.4.14 Atenuação de nêutrons

Numa condição de feixe monoenergético colimado de nêutrons a seguinte forma de atenuação exponencial se aplica:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.12)$$

Sendo:

I = intensidade transmitida;

I_0 = intensidade incidente;

μ = coeficiente de atenuação total do feixe de nêutrons num dado meio.

x = espessura

Entretanto, devido à possibilidade de múltiplos espalhamentos, para um meio fortemente moderador, como os materiais hidrogenados num experimento de transmissão, a intensidade transmitida é um pouco maior que o que está previsto nesta lei. O coeficiente de atenuação total (μ) é também chamado de seção de choque microscópica e é dado por:

$$\mu = N\sigma_T \quad (2.13)$$

onde

$$N = \frac{N_A \rho}{A} \quad (2.14)$$

onde N_A é o número de Avogadro, ρ é a densidade do material, A é o número de massa do material e σ_T é a seção de choque total para nêutrons [51].

A seção de choque total σ_T , também designada como seção de choque microscópica total, representa a probabilidade de ocorrência de todas as reações de um nêutron com um núcleo:

$$\sigma_T = \sigma_{ee} + \sigma_{ei} + \sigma_c + \sigma_{cr} + \sigma_{en} + \sigma_f \quad (2.15)$$

onde σ_{ee} , σ_{ei} , σ_c , σ_{cr} , σ_{en} e σ_f representam os fenômenos de espalhamento elástico, espalhamento inelástico, captura, captura radiativa, emissão de nêutrons e fissão, respectivamente.

Da mesma forma que para fótons, a seção de choque de um composto molecular é dada pela composição da seção de choque de cada elemento, ou seja:

$$\sigma_T = \sum n_i \sigma_i \quad (2.16)$$

onde n_i é o número de átomos do elemento i que compõe a molécula do composto e σ_i é a seção de choque microscópica total do elemento i .

Entretanto o elemento i pode ser composto por m_j isótopos com seções de choque σ_{ij} . Então a seção de choque do elemento i é dada por:

$$\sigma_i = \sum_{j=1}^{m_j} f_j \sigma_{ij} \quad (2.17)$$

Onde f_j é a fração isotópica do isótopo j no elemento i . A soma das seções de choque microscópicas de um núcleo em um alvo por unidade de volume é denominada como seção de choque macroscópica total e é dada pela seguinte equação:

$$\Sigma_T = N \sigma_T \quad (2.18)$$

onde N é o número de núcleos atômicos por unidade de volume (cm^3) e σ_T é a seção de choque microscópica ($b = 10^{-24} \text{cm}^2$).

Assim como a seção de choque microscópica, a seção de choque macroscópica total indica a probabilidade de ocorrência de todos os fenômenos envolvidos:

$$\Sigma_T = \Sigma_{ee} + \Sigma_{ei} + \Sigma_c + \Sigma_{cr} + \Sigma_{en} + \Sigma_f \quad (2.19)$$

Quando um feixe monoenergético de nêutrons atravessa paralelamente uma espessura x de um material, a sua variação de intensidade pode ser descrita como:

$$I = I_0 e^{-\Sigma_T x} \quad (2.20)$$

onde I_0 e I são as intensidades dos feixes de nêutrons incidente e emergente e, Σ_T é a seção de choque macroscópica total do material.

O caminho livre médio λ é definido como a distância média percorrida por um nêutron no meio material antes de interagir com um núcleo atômico:

$$\lambda = \frac{\int_0^{\infty} x e^{-\Sigma_T x} dx}{\int_0^{\infty} e^{-\Sigma_T x} dx} = \frac{1}{\Sigma_T} \quad (2.21)$$

Quando os nêutrons incidentes não se encontram em uma condição de colimação estreita (narrow beam), torna-se conveniente introduzir o conceito de fluxo de nêutrons (θ) ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$).

A taxa de reação R de determinado fenômeno então é definida pelo produto de fluxo de nêutrons pela seção de choque macroscópica do respectivo fenômeno:

$$R = \theta [\Sigma \text{ reações} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.22)$$

Esta expressão pode ser reescrita para conter a dependência da seção de choque com a energia cinética E dos nêutrons envolvidos [51].

$$R = \int_0^{\infty} \theta(E) \Sigma(E) dE \quad (2.23)$$

2.4.15 Interação de partículas carregadas com a matéria

Na interação de partículas carregadas com a matéria pode-se dividir em:

- **Partículas pesadas**

Partículas pesadas são partículas carregadas que possuem massa de repouso superior à do elétron (511 keV) e energia cinética maior que a energia de ligação dos elétrons aos átomos do meio. Incluem-se nesta categoria as partículas alfa emitidas por radionuclídeos, prótons da radiação cósmica ou de um acelerador, entre outros. A interação destas partículas, quase somente se restringe aos elétrons da nuvem eletrônica dos átomos, pois o volume do núcleo é muito menor do que o volume do átomo e, a carga do núcleo é blindada pela própria nuvem eletrônica. Como a força coulombiana possui longo alcance e há um número muito grande de elétrons na matéria, ocorre uma sucessão de interações (choques ou colisões) com transferência de energia cinética da partícula para os átomos do meio de forma quase contínua. A energia cinética da partícula é reduzida até próxima da energia térmica (cerca de 0,025 eV), sendo que para tal pode ocorrer um número muito grande de colisões. As partículas carregadas pesadas possuem um alcance pequeno o suficiente para se utilizar blindagens que contenham totalmente a radiação usando materiais com espessura maior que o alcance das partículas no meio. Estas partículas carregadas pesadas, quando passam num meio, produzem elétrons como radiação secundária. Os elétrons recebem parte da energia cinética sendo liberados dos átomos aos quais estão ligados (ionização), gerando também uma cascata de elétrons e fótons secundários [51].

- **Partículas leves**

Partículas leves são elétrons e pósitrons, que possuem energia cinética maior do que a energia de ligação dos elétrons aos átomos do meio, independente de sua origem. Suas interações consistem principalmente em sucessivas interações coulombianas com os elétrons do meio, semelhantemente as partículas carregadas pesadas, porém as colisões são entre partículas de mesma massa (elétron incidente e elétron do meio), resultando em grandes perdas de energia e com mudanças bruscas de trajetória do elétron. São partículas que possuem alcance maior que partículas carregadas pesadas. Além das interações com os elétrons, há interações com os núcleos atômicos, resultando na produção de radiação eletromagnética (raios X por *Bremsstrahlung*). Por isso, deve-se escolher preferencialmente materiais de baixo Z para blindagem de fontes emissoras

de elétrons. A passagem de elétrons no meio produz, como radiação secundária, elétrons provenientes de ionização, além de raios X de freamento. No caso de pósitrons, acrescentam-se dois fótons oriundos da aniquilação de um pósitron com um elétron do meio, com energias de 511 keV ou mais [51].

2.4.16 Programas computacionais e plataformas de simulação

Os efeitos das blindagens no ambiente espacial foram modelados utilizando um sistema disponível em uma plataforma web, denominado SPENVIS. Este sistema SPENVIS consiste de um conjunto integrado de modelos do ambiente do espaço, dentre os quais podemos destacar: os modelos de geração de coordenadas e trajetórias; os modelos para fontes de radiação, como fluxo de partículas armadilhadas, e seus efeitos; modelos para atmosfera e ionosfera; campo magnético e as ferramentas baseadas no código Geant 4. Dentre as ferramentas disponíveis no sistema SPENVIS, está a ferramenta *Mulassis - Multi-Layered Shielding Simulation*. Trata-se de uma ferramenta que permite a definição de blindagens em multicamadas, de forma unidimensional, para o cálculo do transporte da radiação através de um conjunto de blindagens multicamadas [51, 52].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais utilizados, equipamentos e os procedimentos experimentais adotados durante a execução deste trabalho, bem como as descrições das atividades experimentais, técnicas de caracterização das matérias primas e produtos finais.

As atividades experimentais foram desenvolvidas no Laboratório Associado de Materiais e Sensores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (LAS/INPE), no Laboratório de Materiais Cerâmicos da Divisão de Materiais do Instituto de Aeronáutica e Espaço do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (AMR/IAE/DCTA) e no Laboratório de Medidas de Radioatividade Ambiental do Instituto de Pesquisas Avançadas do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (LMRA/IEAv/DCTA).

3.1 Materiais

Neste item são apresentadas as características principais dos materiais utilizados durante os experimentos, bem como sua identificação e procedência. Os materiais utilizados neste trabalho foram adquiridos comercialmente.

3.1.1 Pós de carbeto de boro e de boro

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de pós, o de carbeto de boro com área específica (BET) na faixa de 15 - 20 m²/g, com 90% de partículas variando entre 2,0 e 4,0 µm e de boro com área específica (BET) mínima de 10,0 m²/g, com tamanho máximo de partículas de 1,0 µm. Ambos os pós de B₄C e B foram fornecidos pelo fabricante Hermann C. Starck GmbH. & Co. (Alemanha) identificados, respectivamente, como (Amorphous Boron Grade I n° 28045010) e (B₄C Grade HS n° 28499010). As Tabelas 3.1 a 3.3 mostram análise química e características dos pós.

Tabela 3.1 - Composição química do pó de carbetto de boro adquirido do fabricante.

| Componentes | Quantidade máxima (% em massa) |
|---------------------|---|
| C | 21,8 |
| N | 0,7 |
| O | 1,7 |
| Fe | 0,05 |
| Si | 0,15 |
| Al | 0,05 |
| B | 75,55 |
| Outros ¹ | 0,5 |

¹Total de componentes: Ca, Cr, Mg, Mn, Ni, Ti e W.
Fonte: [58].

Tabela 3.2 - Características físicas do pó de carbetto de boro adquirido do fabricante.

| Características físicas | |
|---|-----------|
| Área de superfície específica (m ² /g) | 15 - 20 |
| Tamanho médio de partículas (µm) | 0,7 |
| D _{90%} (µm) | 2,0 - 4,0 |
| D _{50%} (µm) | 0,6 - 1,2 |
| D _{10%} (µm) | 0,1 - 0,3 |

Fonte: [58].

Tabela 3.3- Composição química do pó de boro adquirido do fabricante.

| Componentes | Quantidade máxima (% em massa) |
|------------------------------|---|
| B | 95,0 |
| B- H ₂ O solúvel | 0,2 |
| B-H ₂ O insolúvel | 1,0 |
| Mg | 0,8 |
| O | 2,2 |
| N | 0,4 |
| Mg | 0,8 |

Fonte: [58].

3.1.2 Alumínio aeronáutico 6061-T6

Neste trabalho foram utilizadas placas quadradas de alumínio 6061-T6 de 50 mm× 50 mm × 5mm. Fornecidas pela empresa ASM Aerospace Specification Metals, Inc.

3.2 Procedimento experimental

As etapas do procedimento experimental e das caracterizações realizadas estão resumidas no fluxograma mostrado na Figura 3.1. Essas etapas serão melhor detalhadas a seguir.

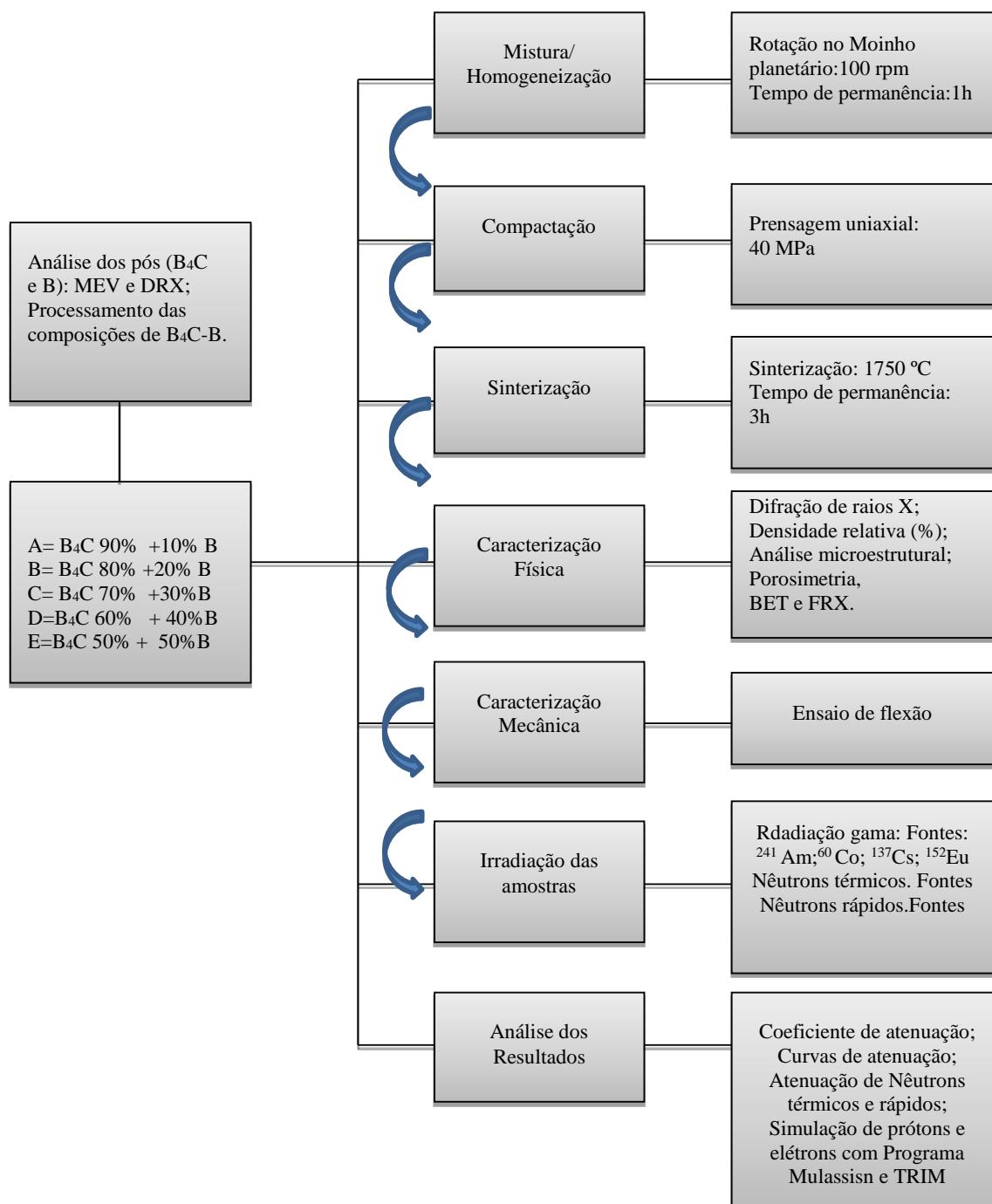


Figura 3.1 - Fluxograma mostrando as etapas do procedimento experimental adotado neste trabalho.

3.2.1 Caracterização das matérias primas

O estudo da morfologia das partículas dos pós cerâmicos de B₄C e de B foi realizado em imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). O

equipamento utilizado para esta análise foi um microscópio eletrônico de varredura, marca JEOL, modelo JSM-5310 do LAS/CTE/INPE.

3.2.2 Identificação de fases cristalinas nos pós

As fases cristalinas presentes, tanto dos pós precursores foram identificadas por difração de raios X, utilizando radiação Cu-K α com varredura de 2θ entre 10 e 80 $^{\circ}$, aplicando-se passo de 0,05 $^{\circ}$ /s. As fases identificadas pela comparação com os dados das fichas JCPDS. O equipamento utilizado para a obtenção dos espectros de difração de raios X foi um difratômetro de raios X da marca PHILIPS, modelo PW 1380/80 (LAS/CTE/INPE) [60].

3.2.3 Processo da mistura dos pós

As etapas de caracterização são de suma importância para o desenvolvimento de todo trabalho. O fluxograma do procedimento experimental segue as seguintes etapas: caracterização dos pós, processamento cerâmico, caracterização das cerâmicas sinterizadas e irradiação com diversas fontes radioativas, conforme mostrado na Figura 3.1. As misturas mecânicas dos pós de B $_4$ C e B foram realizadas em moinho giratório, modelo S 100. Neste procedimento foram utilizadas esferas de alumina com 10 mm de diâmetro e velocidade de rotação de 100 rpm e tempo de mistura de 3 horas. Posteriormente as misturas dos pós foram secas em uma estufa em 100 $^{\circ}$ C por 24 horas, sendo na sequência desagregadas em almofariz de ágata e peneiradas em peneira de malha 120 MESH. O processo de mistura e homogeneização é a operação de uniformização da composição, onde se objetiva misturar intimamente os pós para resultar em uma composição idêntica, resultando em boas propriedades de escoamento e compactação. Estas etapas foram realizadas em um moinho planetário Fritsch na Divisão de materiais do Instituto de Aeronáutica e Espaço (AMR/IAE/DCTA) [60].

3.2.4 Análise química por fluorescência de raios X do alumínio

As placas de Al foram analisadas por fluorescência de raios X. A análise por fluorescência de raios X semi-quantitativo foi feita com a finalidade de obter os

elementos constituintes das amostras. As análises foram realizadas no Laboratório de fluorescência e difração de raios X (LDRFX), utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Panalytical, modelo Axios Advanced. O local das análises foi a Divisão de Materiais (AMR/IAE/DCTA).

3.2.5 Aditivos de compactação

Na etapa de preparo dos pós de compactação, foi utilizado o aditivo ligante: álcool polivinílico (PVA). O propósito da adição do ligante é aumentar a resistência do corpo a verde, o suficiente para que ele possa ser manipulado na próxima etapa do procedimento.

3.2.6 Composições estudadas

Para a confecção das cerâmicas foram estudadas cinco composições químicas contendo percentuais diferentes de cada elemento. A definição das composições foi investigativa. A Tabela 3.4 mostra os valores das faixas percentuais adotados para o estudo.

Tabela 3.4 - Composição das amostras estudadas neste trabalho.

| Amostras- (% em massa) | Indicação da composição |
|--------------------------------|--------------------------------|
| B ₄ C-B - (A) 90-10 | A |
| B ₄ C-B - (B) 80-20 | B |
| B ₄ C-B - (C) 70-30 | C |
| B ₄ C-B - (D) 60-40 | D |
| B ₄ C-B - (E) 50-50 | E |

3.2.7 Compactação

O processo de compactação dos pós é uma etapa muito importante e consiste na prensagem do pó em um molde, originando um corpo no formato desejado e com resistência mecânica suficiente para o manuseio. É necessário que a compactação seja adequada, para minimizar os gradientes de densidade, devido às próprias características do processo e ao estado de aglomeração/agregação dos pós. A compactação é necessária

para se colocar as partículas do pó tão próximas quanto possível, criando o maior número possível de contatos partícula-partícula para promover a difusão de matéria para estes contatos e assim maximizar a taxa de densificação na etapa de sinterização. Pressões de compactação pequenas fazem com que o corpo cerâmico não atinja a densidade final prevista, sendo que pressões em excesso podem introduzir defeitos na microestrutura, como falhas de empacotamento de partículas (regiões mais densas e regiões menos densas), como resultado da não homogeneidade na distribuição de tensões [61,62]. Após a homogeneização, desagregação e peneiramento das misturas dos pós (B₄C-B) foi feita a prensagem uniaxial dos corpos de prova no formato de placas sextavadas (65 mm x 74 mm x 5 mm), sob pressão de 40 MPa. Para este procedimento foi utilizada uma prensa da marca Marconi, modelo MA0981-C, localizada na Divisão de Materiais (AMR/IAE/DCTA) utilizando moldes metálicos, conforme a Figura 3.2. O molde foi lubrificado a cada duas prensagens com estearina para reduzir o atrito do pó com as paredes da matriz e facilitar a retirada do corpo de prova.



Figura 3.2 - Compactação e amostra de cerâmica compactada.

3.2.8 Caracterização dos compactados

Na caracterização dos compactados foram analisadas os valores das fases cristalinas, densidade, tensão de ruptura à flexão, determinação da distribuição de tamanhos de poros, retração linear, estudo da morfologia da superfície de fratura, análise por fluorescência de raios X e coeficientes de atenuação.

3.2.9 Sinterização

A etapa de sinterização dos pós compactados é de extrema importância para a obtenção das fases cristalinas e da microestrutura da cerâmica sinterizada [80,81]. Os corpos de provas foram sinterizados em atmosfera de gás argônio, à pressão atmosférica, na temperatura de 1750 °C, com patamar de 3h 30min, e taxa de aquecimento de 10 °C/min em forno com elemento resistivo de grafite, projetado e construído no AMR/IAE/DCTA, para sinterização de cerâmicas covalentes. O referido forno é mostrado na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Forno de atmosfera controlada utilizado na sinterização das cerâmicas.

As amostras, antes de serem inseridas no forno, foram colocadas em um cadinho de grafite. O cadinho contendo as amostras foi colocado dentro de outro cadinho também com o objetivo de proteger o elemento resistivo do forno, no caso de fusão acidental do material. Este ciclo para o processamento de cerâmicas covalentes, já havia sido utilizado em trabalho apresentado anteriormente [15].

3.2.10 Caracterização das cerâmicas sinterizadas

Na avaliação das cerâmicas sinterizadas foram avaliadas as fases cristalinas, a morfologia, a densificação, retração linear e a resistência à flexão.

3.2.11 Determinação de densidade relativa

Os dados para o cálculo dos valores da densidade relativa das amostras sinterizadas foram obtidos utilizando o princípio de Arquimedes. Para a determinação da massa específica aparente nas composições químicas estudadas utilizou-se a norma NBR 6260 através das equações [59]:

$$\rho = \frac{M_s}{V_a} \quad (3.1)$$

$$V_a = \frac{M_u - M_i}{M_{e_{\text{liquido}}}} \quad (3.2)$$

Onde:

ρ = Densidade (g/cm³)

V_a = Volume aparente (cm³)

M_s = Massa seca (g)

M_u = Massa saturada (g)

M_i = Massa imersa (g)

$M_{e_{\text{liquido}}}$ = Massa específica do líquido (p/ água = 1 g/cm³)

Os valores obtidos na Equação 3.2 foram inseridos na Equação 3.1 para o cálculo da densidade da cerâmica sinterizada (ρ).

A densidade relativa foi calculada pela Equação 3.3:

$$\rho_{\text{Rel}} = \left(\frac{\rho_{\text{sint}}}{\rho_T} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

onde:

ρ_{Rel} = massa específica relativa da cerâmica sinterizada (%) e

ρ_T = massa específica teórica da cerâmica (g/cm³).

ρ_{sint} = massa específica da cerâmica sinterizada (g/cm³).

A porosidade foi determinada por porosimetria de mercúrio e seu método será descrito a seguir no item 3.2.14 .

3.2.12 Identificação das fases cristalinas nas cerâmicas sinterizadas

Para a identificação das fases cristalinas presentes nas cerâmicas sinterizadas foi utilizada a técnica de difração de raios X e o mesmo equipamento e parâmetros usados para a obtenção dos difratogramas dos pós.

3.2.13 Determinação da tensão de ruptura

A propriedade mecânica estudada foi a tensão de ruptura à flexão. Utilizou-se o método de flexão em quatro pontos, pois permite expor um maior volume do material ao momento fletor máximo. A velocidade de deslocamento do travessão superior da máquina foi 0,05 mm/min. Neste ensaio foi utilizada uma máquina universal de ensaios, da marca Instron, modelo 4301, com capacidade de 500 kgf (AMR/IAE/DCTA). Foram ensaiados 30 corpos-de-prova para determinação da tensão de ruptura (σ_{rup}). A relação de vão utilizada foi 27/9.

A tensão de ruptura é calculada pela seguinte relação (Equação 3.4):

$$\sigma = \frac{3F(L_1-L_2)}{2e^2L} \quad (3.4)$$

onde:

σ = tensão de ruptura;

F = carga aplicada;

e = espessura do corpo de prova (mm);

L_1 = vão maior (27 mm) e

L_2 = vão menor (9 mm).

L = distância entre os apoios

3.2.14 Análise de distribuição de tamanho de poros

A determinação da distribuição de tamanhos de poros dos corpos sinterizados foi obtida pela técnica de porosimetria de mercúrio. A porosimetria por injeção de mercúrio tem sido extensivamente utilizada como uma técnica experimental para se obter curvas de distribuição de tamanhos de poros em corpos sólidos porosos em função do volume de mercúrio penetrado. A técnica se baseia no fato de que o mercúrio se comporta como um fluido não molhante em relação à maior parte das substâncias e compostos químicos. Por consequência, não penetra espontaneamente em poros pequenos ou fissuras destes materiais. É necessária a aplicação de pressão para promover a penetração. Admitindo-se os poros com forma cilíndrica (e diâmetro constante), a relação entre a pressão e o menor diâmetro de poro ocupado pelo mercúrio é dada pela seguinte Equação 3.5.

$$D = \frac{-4\gamma\cos\theta}{P} \quad (3.5)$$

Onde:

D = diâmetro do poro (A);

γ = tensão superficial do mercúrio (gf/cm²);

θ = ângulo de contato (sólido-líquido) e,

P =força externa aplicada (gf).

Através da Equação 3.5, tem-se a relação entre o tamanho do poro e a pressão necessária para que o mercúrio seja introduzido, portanto, quanto menor o poro maior será a pressão necessária para que o mercúrio penetre na microestrutura do material poroso. Ao se registrar a redução do nível capilar, assim como o da pressão aplicada no líquido, obtém-se uma curva porosimétrica (curva volume dV/dlogD × diâmetro de poro) que apresenta o volume dos poros do material, que foi penetrado pelo mercúrio, em uma determinada pressão. Neste trabalho, as curvas do volume de Hg penetrado versus diâmetro de poro foram obtidas em um porosímetro de mercúrio da marca Quantachrome, modelo Autoscan-33, com disponibilidade de tratamento térmico das amostras. Desta maneira, as cerâmicas sinterizadas foram tratadas termicamente em 200 °C, por 2 horas, em vácuo (LCP/CTE/INPE).

3.2.15 Determinação da retração linear

Os valores da retração linear das cerâmicas foram obtidos utilizando medições do comprimento das amostras. Estas medidas foram efetuadas antes e após a sinterização. Utilizando-se a Equação 3.5 para o cálculo dos valores de retração linear das cerâmicas.

$$\Delta L = \frac{C_a - C_s}{C_a} \times 100 \quad (3.5)$$

onde:

ΔL = retração linear (%);

C_a = comprimento do corpo de prova antes da sinterização (mm) e

C_s = comprimento do corpo de prova após sinterização (mm).

3.2.16 Análise da superfície de fratura das cerâmicas sinterizadas

A compreensão dos processos que levam à fratura frágil é um dos problemas mais importantes na pesquisa dos materiais cerâmicos, porque esclarece os fatores que limitam a sua resistência mecânica. Existe uma correlação muito íntima entre o comportamento mecânico de uma cerâmica e a sua microestrutura, uma vez que, qualquer irregularidade na microestrutura atua como um concentrador de tensões (um defeito), aumentando o risco de fratura, como previsto por Griffith. As análises morfológicas dos corpos de prova foram feitas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV). O estudo da morfologia da superfície de fratura dos corpos sinterizados de B_4C e de B foi realizado em imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). O equipamento utilizado para esta análise foi um microscópio eletrônico de varredura, marca JEOL, modelo JSM-5310 do LAS/CTE/INPE. As análises das microestruturas das superfícies de fratura dos corpos foram realizadas em imagens obtidas em um microscópio eletrônico de varredura, modelo JEOL JSM – 5310 do Laboratório Associado de Sensores e Materiais do CTE/INPE. Para isso, as amostras foram fraturadas, e posteriormente as superfícies de fratura foram metalizadas com um filme fino de ouro para tornar estas superfícies condutoras elétricas.

3.2.17 Análise química por fluorescência de raios X

A análise por fluorescência de raios X é um método de análise elementar qualitativo e quantitativo que se aplica à identificação da maioria dos elementos da tabela periódica ($Z > 13$). A importância desta medida para análise das amostras está na possibilidade de quantificar os elementos presentes, uma vez que para se obter resultados de atenuação de radiação essa análise é fundamental. A análise por fluorescência de raios X para fins quantitativos dos elementos que constituem as amostras foi realizada no Laboratório de fluorescência e difração de raios X (LDRFX). Nesta análise foi utilizado um espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Panalytical, modelo Axios Advanced. O local das análises foi a Divisão de Materiais (AMR/IAE/DCTA).

3.2.18 Determinação da atenuação de radiação gama

Os coeficientes de atenuação total e mássico foram determinados por meio das medidas experimentais de transmissão da radiação gama em um arranjo envolvendo uma geometria de feixe estreito. As fontes padrão de raios gama foram colocadas a uma distância de 237 mm da superfície do detector, dentro de uma blindagem de chumbo, de forma a minimizar a contribuição da radiação ambiental. As Figuras 3.4 a 3.6 mostram o arranjo e câmara de ionização utilizadas na determinação da atenuação da radiação gama. A Figura 3.7 mostra o esquema com os equipamentos utilizados no experimento de transmissão gama.



Figura 3.4 - Arranjo experimental para a transmissão de raios gama com cerâmicas de B₄C-B (A). Local de encaixe do arranjo no detector de germânio hiper puro dentro da câmara de ionização (B).



Figura 3.5 - Câmara de baixo fundo (C) e arranjo montado (D)

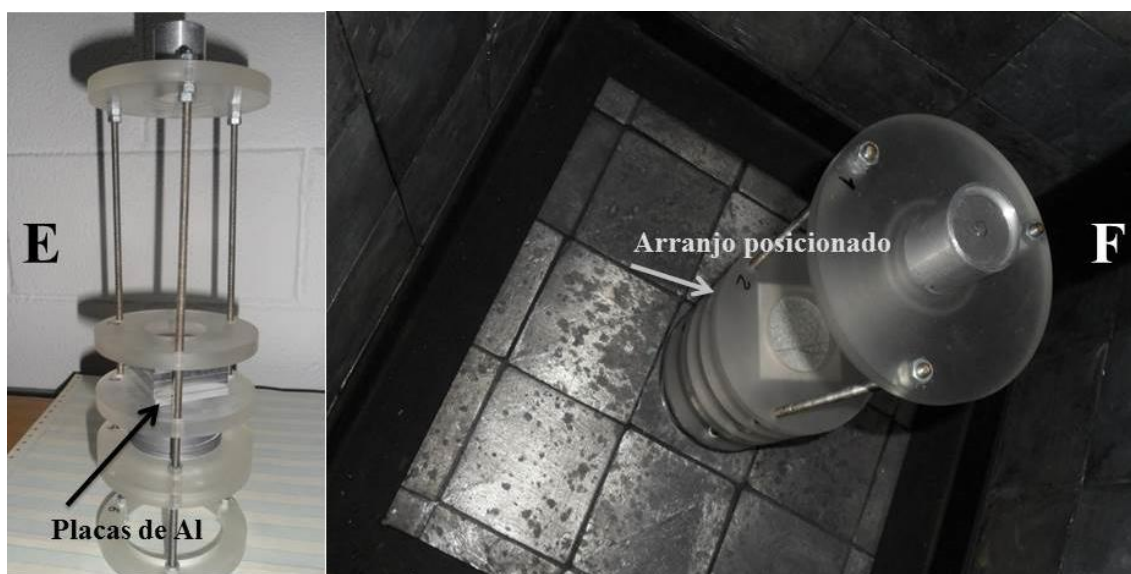


Figura 3.6 – Arranjo com placas de Al (E) e arranjo posicionado com placas de Al (F)

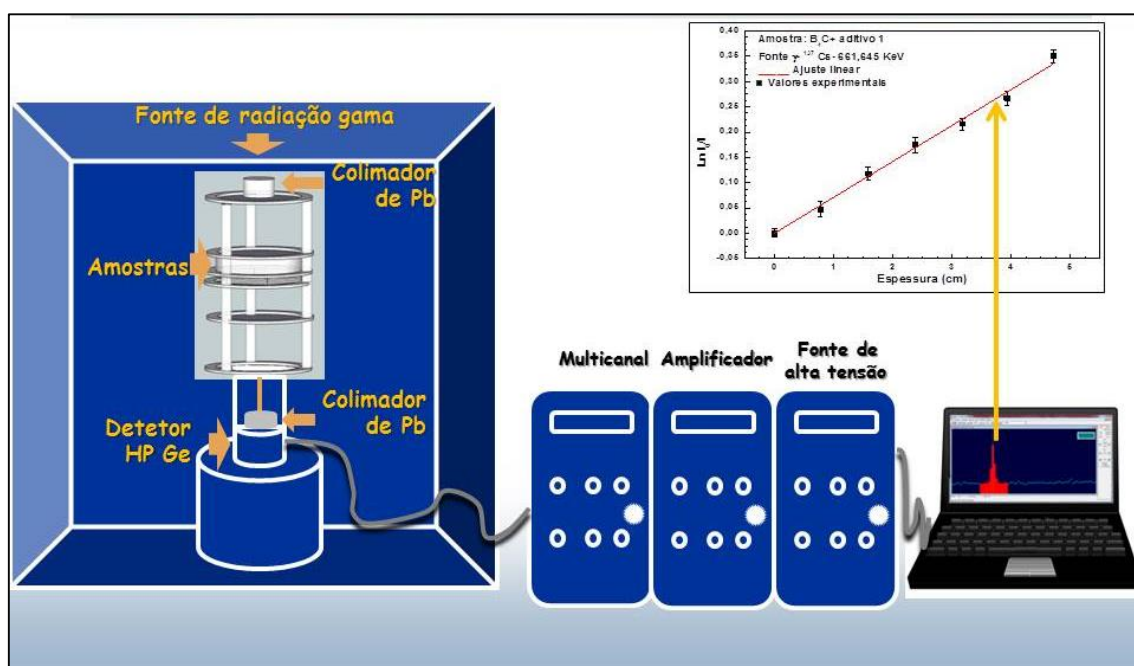


Figura 3.7 – Esquema do experimento de transmissão gama

Como fontes de radiação gama foram utilizados padrões de calibração fornecidos pela Agencia Internacional de Energia Atômica (AIEA/IAEA) de ^{60}Co , ^{241}Am , ^{137}Cs e ^{152}Eu . Estas fontes produzem radiação gama no intervalo de energia de 59 a 1332 keV, conforme a Tabela 3.5. As Figuras 3.8 a 3.11 mostram os espectros das emissões gama obtidos com as fontes de calibração da AIEA, onde é possível observar os diversos picos de emissão gama de cada radionuclídeo.

Tabela3.5 – Valores de energia dos fótons das fontes emissoras de radiação gama utilizadas.

| Radionuclídeo | Energia do fóton (keV) |
|-------------------|------------------------|
| ²⁴¹ Am | $059,537 \pm 0,001$ |
| ¹³⁷ Cs | $661,645 \pm 0,009$ |
| ⁶⁰ Co | $1173,238 \pm 0,004$ |
| | $1332,501 \pm 0,005$ |
| ¹⁵² Eu | $121,779 \pm 0,003$ |
| | $344,272 \pm 0,007$ |
| | $778,890 \pm 0,016$ |
| | $964,050 \pm 0,003$ |

Foram realizadas medidas das taxas de contagem de fótons de cada linha de emissão gama por meio de um sistema de espectrometria da radiação gama com detector pré- calibrado de germânio hiperpuro da EG&G Ortec modelo GEM – 20190, conectado a um sistema convencional de amplificação padrão NIM e um analisador multicanal.

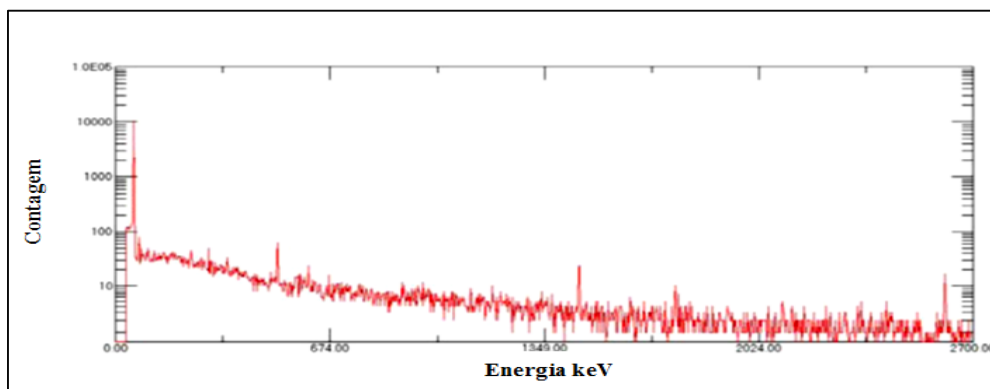


Figura 3.8 – Espectro de emissão de radiação gama do radionuclídeo ²⁴¹Am.

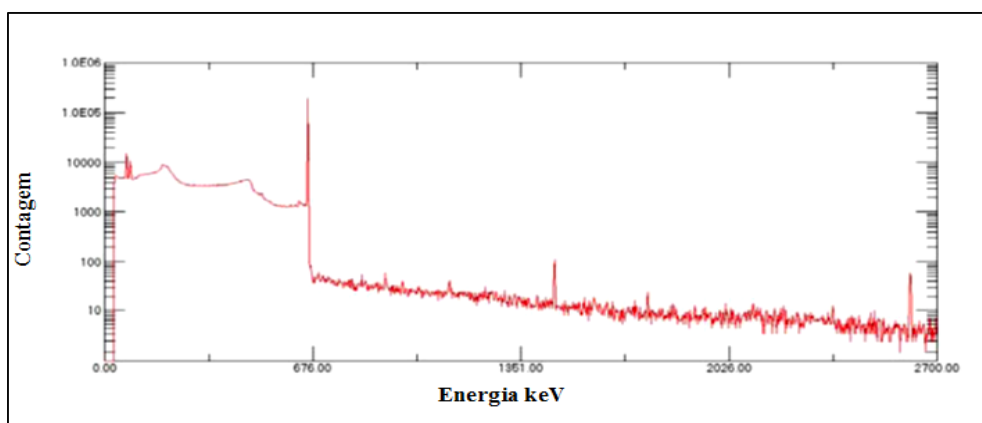


Figura 3.9 – Espectro de emissão de radiação gama do radionuclídeo ^{137}Cs .

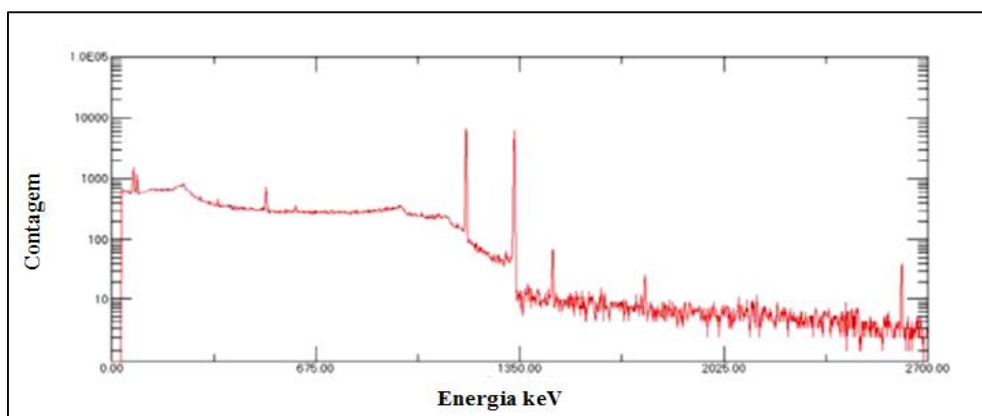


Figura 3.10 – Espectro de emissão de radiação gama do radionuclídeo ^{60}Co .

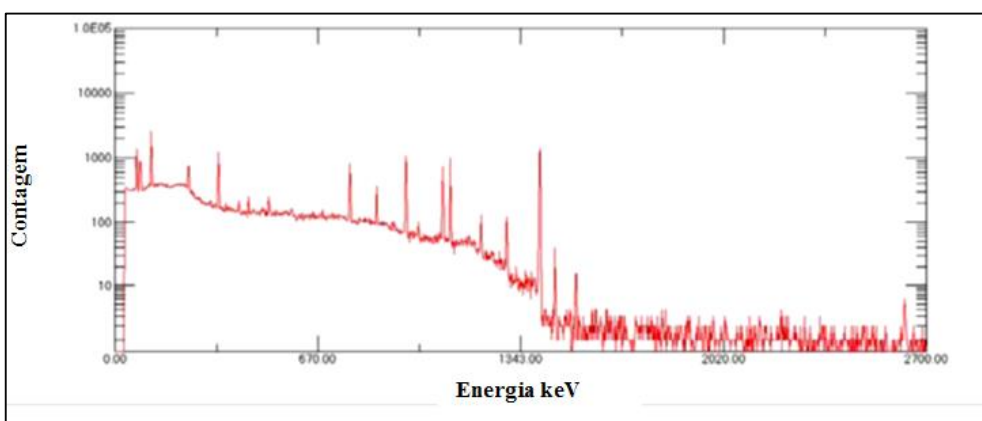


Figura 3.11 – Espectro de emissão de radiação gama do radionuclídeo ^{152}Eu .

Este detector possui resolução de 1,71 % à meia altura do pico para energia de 1,33 MeV de ^{60}Co e com eficiência relativa de 25,5 %, também para a energia de 1,33 MeV de ^{60}Co . A aquisição e a análise dos espectros da radiação transmitida em

cada experimento de transmissão foram realizadas pelo software MAESTRO da EG&G Ortec, que processa a aquisição multicanal e a análise do espectro gama. Os corpos de prova foram colocados no arranjo experimental a uma distância de 48 mm do topo do detector e as medidas de taxa de contagem em cada pico de emissão gama foram realizadas para várias espessuras das placas das diversas composições de B₄C-B. O coeficiente de atenuação linear pode ser expresso por meio da Equação 3.6:

$$\mu = -\frac{1}{x} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (3.6)$$

onde:

μ = coeficiente de atenuação linear (cm⁻¹)

x = é a espessura da amostra (cm);

I_0 = intensidades dos feixes de radiação gama sem atenuação e

I = intensidades dos feixes de radiação gama com atenuação.

Porém, o resultado para μ pode ainda ser melhor obtido pelo seguinte ajuste de função linear para várias espessuras x do material de blindagem:

$$y = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \mu x \quad (3.7)$$

No ajuste da reta para a obtenção do coeficiente angular μ é realizado também o cálculo dos valores teóricos dos coeficientes de atenuação mássico para o intervalo de energia de interesse, empregando-se para tal os dados dos coeficientes de atenuação mássico de cada isótopo presente na composição do material, obtidos por meio do programa XCOM [84].

3.3 Simulação da atenuação de radiação gama unidirecional

Para a realização da simulação da atenuação da radiação gama monoenergética primária nas placas cerâmicas de B₄C-B e de alumínio 6061-T6 (de uso espacial) com espessuras de aproximadamente 5 mm foi utilizado o programa computacional XCOM:

Photon Cross Sections Databasem, que é uma plataforma web que fornece um banco de dados que pode ser utilizado para calcular os coeficientes de atenuação total de fótons para elementos químicos, compostos ou misturas com $Z \leq 100$ com energias compreendidas entre 1 keV e 100 GeV. Os coeficientes de atenuação totais para elementos, compostos ou misturas são obtidos como somas das quantidades correspondentes para os constituintes atômicos. Os fatores de ponderação, isto é, as frações em peso dos constituintes, são calculados pelo XCOM através da fórmula química introduzida pelo utilizador. No caso das misturas, no entanto, o utilizador tem de fornecer as frações em peso dos vários componentes. Nas simulações, o XCOM leva em conta o produto das correspondentes seções transversais vezes o número de moléculas alvo por unidade de massa do material. De forma mais direta, o XCOM irá fornecer os valores de coeficiente de atenuação mássico teórico. Este deverá ser comparado com resultados dos valores de coeficiente de atenuação mássico experimental.

3.4 Metodologia de aquisição dos dados teóricos através do programa XCOM

As Figuras 3.12 a 3.14 mostram a metodologia de utilização do programa XCOM para a aquisição dos dados teóricos de atenuação da radiação gama monoenergética primária.

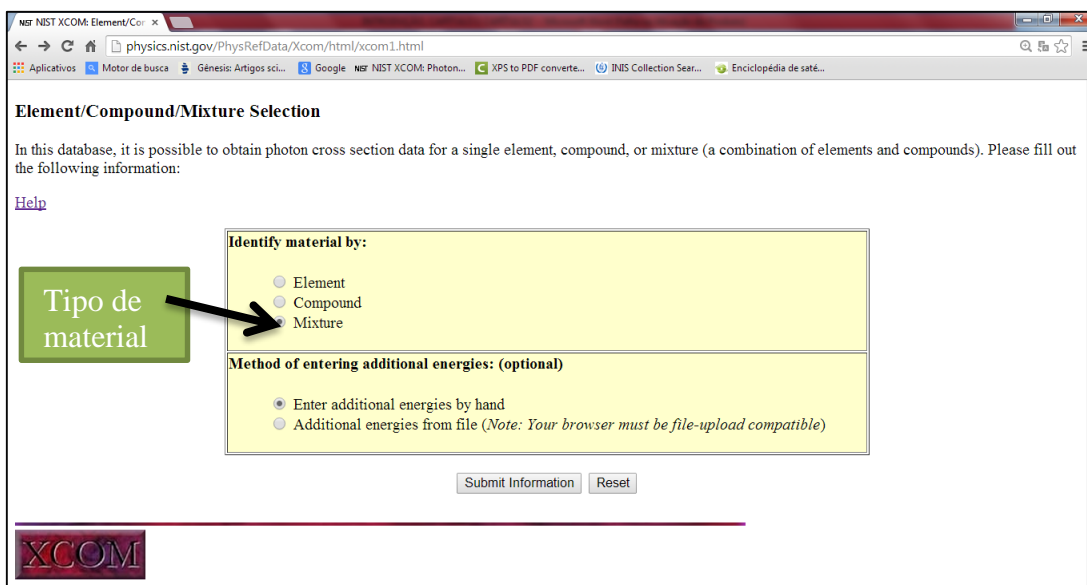


Figura 3.12 – Identificação do tipo de análise do material.

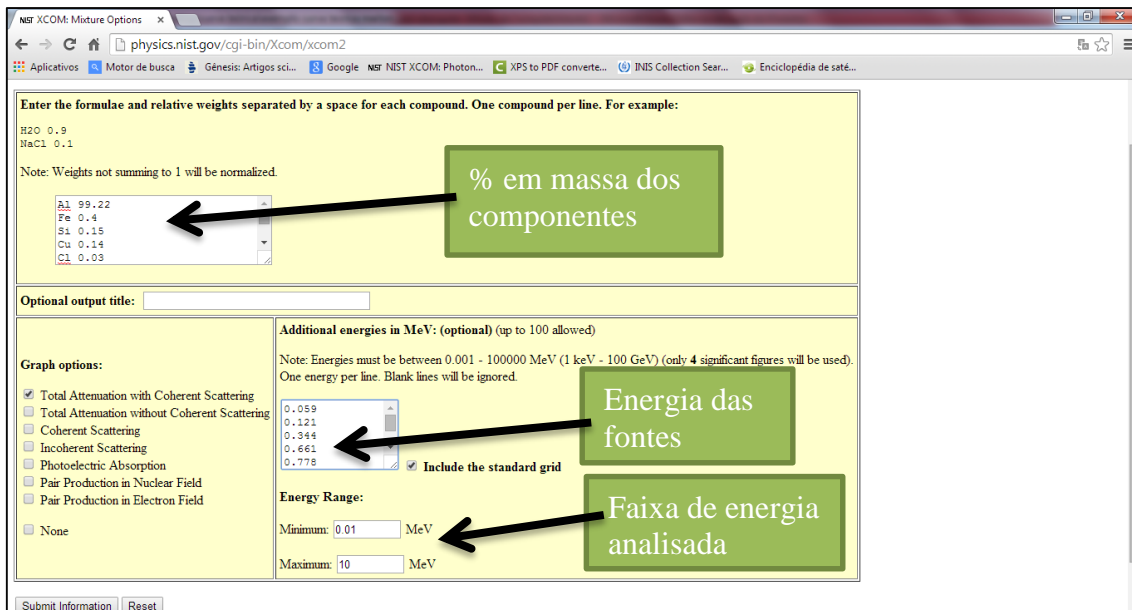


Figura 3.13 – Identificação das massas dos componentes da amostra e faixa de energia em estudo.

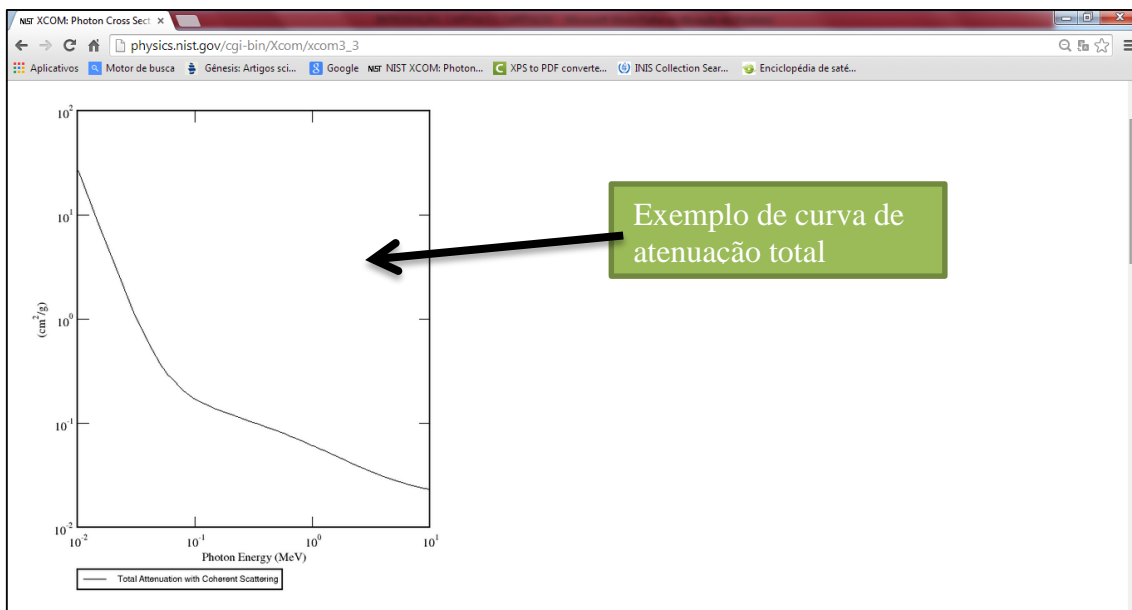


Figura 3.14 – Curva de atenuação gamatotal para o referido material

3.4.1 Experimento de atenuação de nêutrons rápidos

No experimento de atenuação de nêutrons rápidos considera-se uma atenuação aproximadamente exponencial para um fluxo colimado que atravessa um dado material

de blindagem. Neste experimento também foram realizados experimentos de transmissão similarmente ao experimento de transmissão de fótons nas blindagens. Porém, optou-se por fazer um único teste com uma sobreposição de duas placas de cada composição. Como fonte de nêutrons foram utilizadas duas fontes de $^{241}\text{Am-Be}$ de aproximadamente 100 mCi, que emitem isotropicamente nêutrons rápidos com energia média de 4,14 MeV e espectro largo que pode estender-se até 10 MeV. A Figura 3.15 mostra um espectro da fonte de $^{241}\text{Am-Be}$.

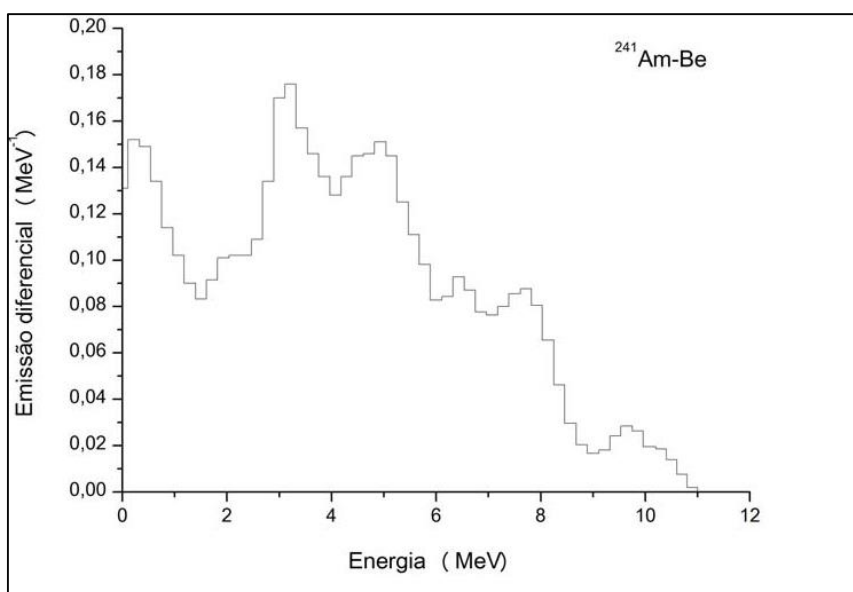


Figura 3.15 – Espectro de nêutrons da fonte de $^{241}\text{Am-Be}$.

Como detector de nêutrons rápidos foi utilizado um tubo de ^3He em um arranjo experimental de polietileno, blindado por uma capa de 0,5 mm de Cádmi. A distância fonte-detector foi fixada em 150 cm, conforme o arranjo mostrado na Figura 3.16 e esquema mostrado na Figura 3.17, de modo que se obtivesse uma boa geometria de feixe estreito e colimado. Para tal foram utilizados colimadores de polietileno com espessuras maiores que a espessura total máxima dos corpos de prova. Para os ajustes técnicos do arranjo para o ensaio, bem como a configuração eletrônica, tomou-se como base experimentos já realizados no IEAv [51].



Figura 3.16 – Arranjo experimental de transmissão de nêutrons rápidos.

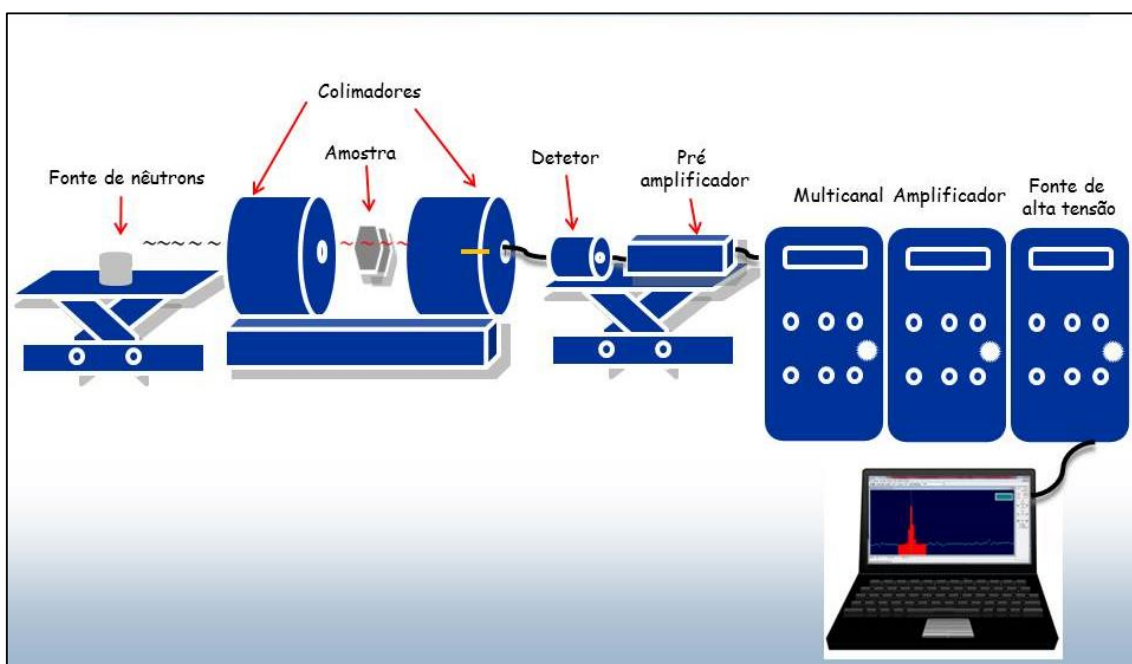


Figura 3.17 – Esquema do experimento de nêutrons rápidos

Os corpos de prova foram colocados a partir de 20 cm da fonte, de forma que todo nêutron emitido pela fonte na direção do detector deveria atravessar as amostras. A espessura das amostras variou de 0 até aproximadamente 1,0 cm. A contagem de fundo foi realizada deslocando-se lateralmente o detector de nêutrons de modo que esta ficasse descentralizada com o canal central dos colimadores. O coeficiente de transmissão

teórico foi também calculado a partir das seções de choque totais extraídas da biblioteca de dados nucleares ENDF-B.

3.4.2 Experimento de atenuação de nêutrons térmicos

Semelhante ao experimento de atenuação de neutros rápidos, descrito anteriormente, foi realizado um experimento de atenuação de nêutrons térmicos numa geometria próxima à de feixe colimado, conforme indica a Figura 3.18 e esquema mostrado na Figura 3.19. Como, teoricamente, a atenuação de nêutrons térmicos pelo boro é extremamente elevada, ficou impossibilitada utilização deste método nos compostos das placas de B_4C -B. No entanto, o experimento de atenuação de nêutrons térmicos foi utilizado somente com as placas da amostra de alumínio, com a finalidade de validar a metodologia de obtenção do coeficiente de atenuação experimental. Esse resultado serviu de parâmetro para comparar os resultados teóricos e experimentais obtidos para o alumínio. Desta forma foi possível validar o cálculo teórico feito para obtenção do coeficiente para os compostos de B_4C -B.



Figura 3.18 – Arranjo experimental de transmissão de nêutrons térmicos.

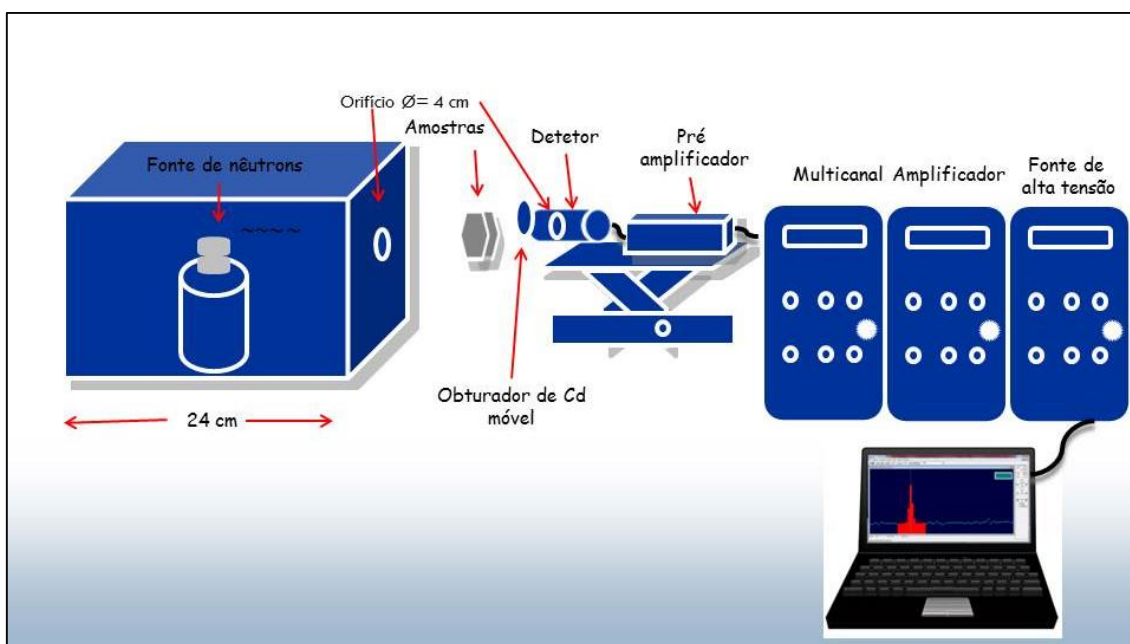


Figura 3.19 – Esquema do experimento de nêutrons térmicos

Os nêutrons térmicos foram produzidos num arranjo onde duas fontes de $^{241}\text{Am-Be}$ de 100 mCi cada uma são introduzidas no interior de um bloco de polietileno com paredes de 6 cm de espessura. Todo o recipiente foi envolvido por uma placa de cádmio de 0,5 mm de espessura, contendo em uma das faces um orifício de 4 cm de diâmetro para a saída dos nêutrons térmicos. Para a detecção dos nêutrons térmicos foi utilizado um contador proporcional de ^3He conectado a um sistema padrão de amplificação de pulsos elétricos produzidos pela detecção de cada nêutron. O detector foi posicionado no eixo de um recipiente cilíndrico de cádmio de paredes de 0,5 mm de espessura, diâmetro de 11 cm e de altura de 20 cm. Este arranjo possui um orifício de 4 cm de diâmetro na parte central da face para permitir a entrada de nêutrons na direção do tubo detector situado no eixo central. A aquisição do espectro de amplitude de pulso em cada irradiação foi realizada através de uma placa multicanal da marca ORTEC conectada pelo aplicativo Maestro, instalados num microcomputador.

3.5 Simulações do transporte da radiação cósmica primária

Para a realização da simulação do transporte da radiação cósmica (RC) primária nas cerâmicas de $\text{B}_4\text{C-B}$ e na placa de alumínio foi utilizado o programa computacional

Mulassis, que é uma das ferramentas disponível na plataforma SPENVIS. As simulações realizadas consistem na simulação unidimensional do transporte de um feixe de prótons e elétrons armadilhados, incidente de forma omnidirecional, em uma blindagem plana de $1,0 \text{ g.cm}^{-2}$, pelo método Monte Carlo. Esta ferramenta se baseia no código computacional Geant4 e foi executada remotamente, na plataforma SPENVIS. A origem do feixe de prótons foi também objeto de simulação no sistema SPENVIS, consistindo de uma missão espacial simulada de duração de 4 anos com parâmetros semelhantes aos dos satélites CBERS 3 – 4, conforme mostrado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Parâmetros de projeto das missões CBERS 3 e 4.

| Parâmetro | Dados |
|--------------------------|-----------------------------|
| Tipo de órbita | Recorrente e hélio síncrona |
| Altitude (km) | 778,0 |
| Inclinação (graus) | 98,5 |
| Ciclo de repetição (dia) | 26 |
| Nó descendente (h) | 10 |
| Duração da missão (anos) | 4 |

Foram avaliadas também as fluências (fluxo de partículas) emergentes, de prótons, nêutrons, elétrons e gamas, da parte posterior das blindagens, em função dos prótons incidentes nas blindagens.

3.6 Simulações do alcance máximo de partícula carregada

Os raios cósmicos são partículas energéticas que se deslocam a velocidades próximas à da luz e entram na atmosfera terrestre, vindas do espaço interestelar. Os raios cósmicos primários são formados principalmente de prótons (núcleos de hidrogênio). Para as simulações do alcance penetrado nas cerâmicas de $\text{B}_4\text{C-B}$ e Al foi usado o programa TRIM, que é parte do código SRIM. O SRIM é um pacote de programas que calcula o poder de freamento eletrônico nuclear (stopping power) e o alcance de íons implantados na matéria, com energias variando entre 10 eV/u.m.a e 2 GeV/u.m.a. , usando tratamento quântico das colisões entre íons incidentes e átomos do alvo, partindo do potencial de interação coulombiano entre eles. A física por trás do SRIM foi extensivamente descrita por Ziegler, Biersack e Littmark (1985).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento de uma microestrutura em cerâmicas depende de vários fatores, mas, em particular, para que um controle efetivo possa ser exercido, as características dos pós-cerâmicos de partida devem ser rigorosamente controladas [86]. As características físicas dos pós de carbeto de boro (B_4C da H.C. Starck) são mostradas nas Tabelas 3.1 e 3.2. Na Tabela 3.2, pode ser observado que o maior diâmetro de partículas ($D_{90\%}$) está na faixa de tamanhos na escala micrométrica ($2,0 \leq$ diâmetro da partícula $\leq 4 \mu m$). Seguindo de partículas ($D_{50\%}$) ($0,6 \leq$ diâmetro da partícula $\leq 1,2$). As partículas com menores diâmetros representam cerca de 10% na escala micrométrica ($0,1 \geq$ diâmetro da partícula $\leq 0,3$), essa distribuição corresponde ao pó utilizado neste trabalho. O pó de boro (B da H.C. Starck) apresentou diâmetro médio de $1,4 \mu m$.

4.1 Caracterização dos pós

4.1.1 Análise morfológica dos pós

As imagens obtidas por MEV mostrando as características morfológicas do pó de carbeto de boro é mostrada na Figura 4.1. A imagem mostra que este pó é formado por partículas de formas irregulares. Observa-se que no pó de boro fica evidenciada a predominância de aglomerados enquanto as partículas do pó de B_4C apresentam-se desaglomeradas e com tamanho de grão superior ao do boro.

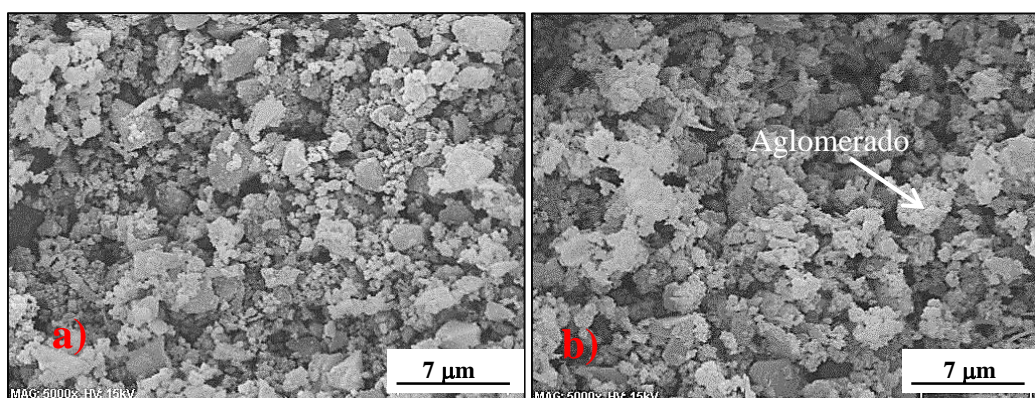


Figura 4.1 - Imagem obtida por MEV dos pós de: a) B_4C e b) B.

4.1.2 Identificação das fases cristalinas dos pós

As intensidades observadas nos difratogramas dos pós de B_4C e B são baseadas em intensidades relativas. A Figura 4.2 apresenta o difratograma do pó de carbeto de boro. Os resultados foram identificados e comparados com o auxílio de fichas presentes no programa *high Score*. Os referidos pós possuem predominância à estrutura cristalina romboédrica (R). Sendo esta estrutura cristalina termodinamicamente estável à temperatura ambiente.

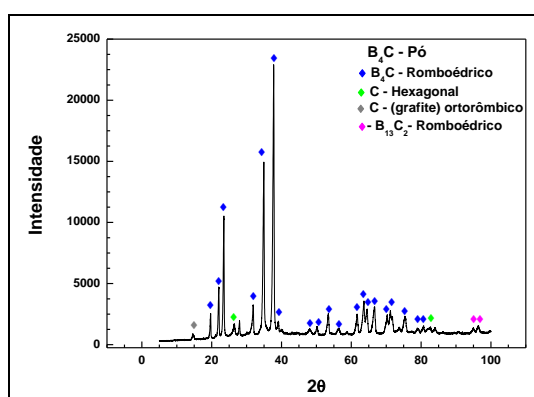


Figura 4.2 - Difratogramas de raios X do pó de B_4C

A análise do difratograma de raios X do pó de carbeto de boro indica que a fase cristalina B_4C é majoritária. A análise do pó de boro foi realizada apenas através da caracterização obtida do H.C Stark, já descritas nas Tabelas 3.2 e 3.3.

4.2 Caracterização das cerâmicas sinterizadas

Para a avaliação do comportamento de sinterização dos corpos de B_4C -B foram caracterizados quanto à densidade, fases cristalinas, microestrutura, retração linear e porosidade. Neste ponto vale lembrar que o objetivo é produzir uma cerâmica porosa, cerâmica esta que servirá de base para um futuro desenvolvimento de compósitos na forma de tintas, mantas e placas.

4.2.1 Análise da densidade

Os valores de densidade relativa das cerâmicas sinterizadas foram próximos entre si. Como um dos objetivos desse estudo é o desenvolvimento de cerâmicas

porosas, não houve uso de técnicas ou métodos para promover valores altos de densificação. Baixos valores densificação eram esperados, uma vez que cerâmicas de B₄C apresentam dificuldades oriundas da etapa de sinterização, provocadas pelas fortes ligações covalentes entre os átomos, ocasionando um baixo coeficiente de difusão e conseqüentemente baixa taxa de densificação. Para se produzir componentes de B₄C com alta densidade geralmente se utiliza a técnica da prensagem a quente. Esses baixos valores podem ser explicados pelo fato de que os pós compactados não utilizaram aditivos para promover melhor densificação, Além disso, cerâmicas de B₄C sinterizadas em temperaturas abaixo de 2150 °C normalmente apresentam baixos valores de densificação. A combinação desses valores, bem como a variação da densidade em função da composição apresentados na Tabela 4.1 sugere ainda a presença de poros abertos no interior dos grãos [15,68]. Os valores obtidos de retração linear também são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Valores de densidade e retração linear das cerâmicas sinterizadas.

| Cerâmica | Densidade medida (g/cm³) | Densidade calculada (g/cm³) | Densidade relativa (%) | Retração linear (%) |
|------------------------|--|---|---------------------------------------|------------------------------------|
| B ₄ C-B (A) | 2,47 | 1,46 ± 0,01 | 58,90 ± 0,02 | 1,79 ± 0,04 |
| B ₄ C-B (B) | 2,42 | 1,40 ± 0,02 | 57,72 ± 0,03 | 1,65 ± 0,03 |
| B ₄ C-B (C) | 2,38 | 1,38 ± 0,01 | 57,27 ± 0,12 | 1,40 ± 0,07 |
| B ₄ C-B (D) | 2,33 | 1,32 ± 0,04 | 56,52 ± 0,18 | 0,99 ± 0,02 |
| B ₄ C-B (E) | 2,29 | 1,24 ± 0,03 | 54,13 ± 0,01 | 0,83 ± 0,04 |

4.2.2 Identificação das fases cristalinas

Os dois pós (B₄C e B) utilizados diferem em tamanho de partícula e fase cristalina, sendo que seus respectivos valores de tamanho de partícula para o carbetto de boro e boro, de acordo com o fabricante H. C. Stark, estão nas faixas de 1,0 µm e 2.0 - 4.0 µm. Já as fases cristalinas dos pós foram apresentadas anteriormente na Figura 4.2. Avaliando o composto constituído de matriz de carbetto de boro adicionado com percentuais que variam de 10-50 % de adição de boro, percebe-se que as amostras

sinterizadas apresentaram variação de densificação quando adicionadas frações de boro. Isso pode ser justificado pelo menor valor de massa específica do B em relação ao B_4C .

A Figura 4.3 mostra o difratograma de raios X das cerâmicas sinterizadas em $1750\text{ }^\circ\text{C}$ identificadas pelo percentual em massa. Não foram observada presença de fases secundárias detectáveis por difração de raios X. Na comparação entre os picos de difração de raios X para as amostras analisadas verifica-se que são coincidentes em todas as composições estudadas.

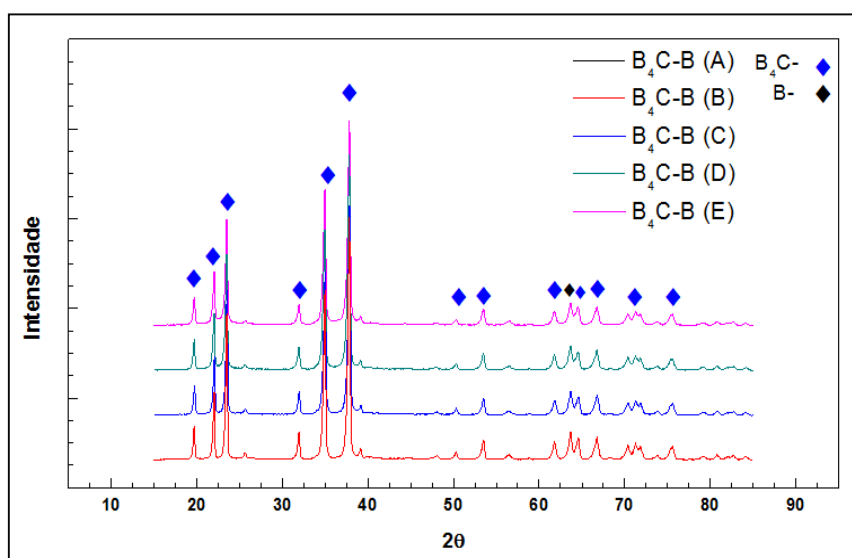


Figura 4.3 - Difratogramas de raios X de todas as composições das cerâmicas sinterizadas estudadas.

4.2.3 Análise da distribuição de tamanhos de poros

As curvas de distribuição de tamanhos de poros das cerâmicas sinterizadas na temperatura de $1750\text{ }^\circ\text{C}$ foram obtidas por meio da técnica de porosimetria de mercúrio. As curvas obtidas mostram os tamanhos de poros em relação ao volume de poros (Figura 4.4). Na cerâmica sinterizada na temperatura de $1750\text{ }^\circ\text{C}$, os raios dos poros situam-se na faixa de $0,8$ a $0,9\text{ }\mu\text{m}$, respectivamente nas cerâmicas B_4C-B (D) e B_4C-B (E) sendo que o maior volume de poros encontra-se na faixa de $0,88\text{ cm}^3$, que corresponde à cerâmica B_4C-B (E).

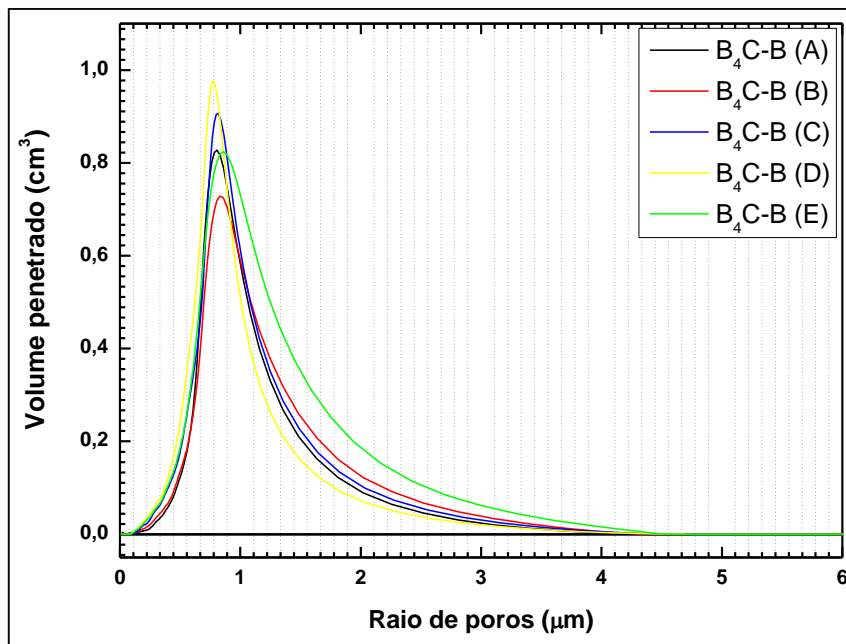


Figura 4.4 - Distribuição de tamanhos de poros das cerâmicas de B₄C -B.

Estes resultados mostram que todas os compósitos cerâmicos apresentaram poros com tamanhos predominantemente na faixa submicrométrica com raio dos poros de aproximadamente 0,9 µm para todos os compósitos estudados.

4.2.4 Resistência mecânica à flexão

Os valores de resistência mecânica das cerâmicas são influenciados pela composição, a distribuição de poros, o tamanho de grão, etc. As cerâmicas, em geral, apresentaram valores dispersos das tensões de ruptura. Este espalhamento de valores nas cerâmicas pode indicar a existência de uma população de defeitos críticos encontrados numa faixa de tensões baixas e com desvios padrões elevados. Na Tabela 4.2 estão representados os resultados do ensaio mecânico de flexão em quatro pontos, onde pode-se observar valores individuais das cinco composições das cerâmicas cujo valor médio está entre 44 e 70 MPa. Esse resultado está de acordo com o esperado para estes compósitos cerâmicos porosos.

Tabela 4.2 – Valores de tensão de ruptura (σ) obtidas pelo ensaio de flexão em 4 pontos, para as cerâmicas sinterizadas

| Cerâmica | σ (MPa) | D_σ (MPa) |
|------------------------|-------------------|---------------------|
| B ₄ C-B (A) | 70 | 9 |
| B ₄ C-B (B) | 70 | 10 |
| B ₄ C-B (C) | 48 | 7 |
| B ₄ C-B (D) | 40 | 5 |
| B ₄ C-B (E) | 44 | 2 |

D_σ = desvio padrão dos valores de tensão de ruptura

4.2.5 Análises microestrutural

As microestruturas das superfícies de fratura dos compósitos cerâmicos de B₄C-B são mostradas nas Figuras 4.5 a 4.9. A morfologia dos grãos apresenta especificamente a presença de algumas geometrias distintas. Observa-se ainda que há algumas regiões interconectadas contendo regiões sólidas constituídas de aglomerados de grãos sinterizados, aleatoriamente distribuídas, indicando que os mecanismos de transporte de massa operaram. Outra inspeção da microestrutura mostra é que muitas das pequenas partículas sinterizadas formando grandes blocos com elevada porosidade. As Figuras 4.5 a 4.9. apresentam, ainda, possibilidades de análise dos tamanhos de grãos para cinco composições investigadas. As amostras B₄C-B (A) e B₄C-B (B), através do método do intercepto linear, apresentaram tamanho de grão ligeiramente superior aos das demais composições. Para as referidas amostras os valores de tamanho médio de grão foram respectivamente aproximadamente 0,75 μm e 0,69 μm relativamente maiores do que aquelas contendo quantidades de B₄C-B (C), B₄C-B (D) e B₄C-B (E), que tem os respectivos valores médios 0,47 μm , 0,43 μm e 0,58 μm .

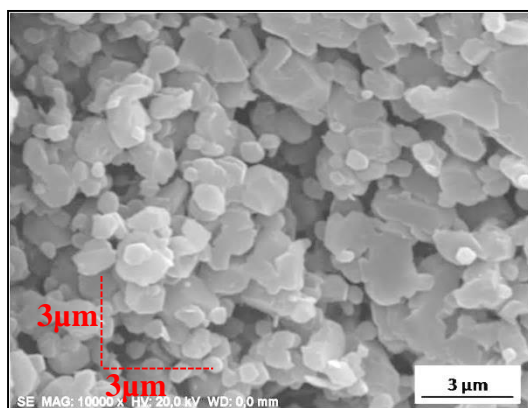


Figura 4.5 - Imagem da superfície de fratura da cerâmica B₄C-B (A).

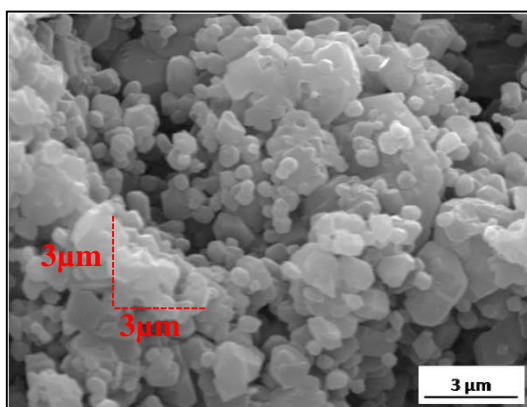


Figura 4.6 - Imagem da superfície de fratura da cerâmica B₄C-B (B).

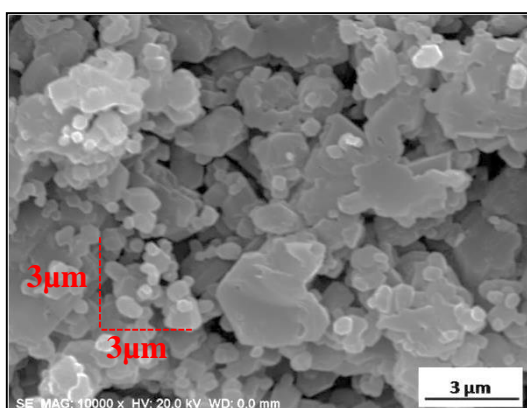


Figura 4.7 - Imagem da superfície de fratura da cerâmica B₄C-B (C).

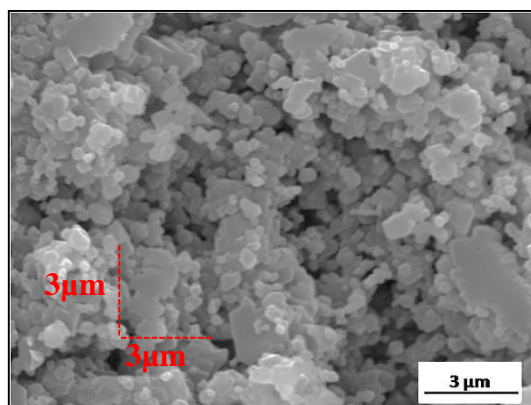


Figura 4.8 - Imagem da superfície de fratura da cerâmica B₄C-B (D).

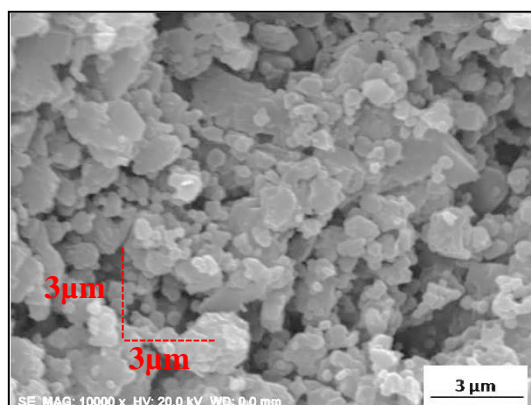


Figura 4.9 - Imagem da superfície de fratura da cerâmica B₄C-B (E).

4.2.6 Estimativa das quantidades de elementos químicos nas cerâmicas

A determinação dos elementos químicos presentes nas cerâmicas sinterizadas de B₄C-B e nas amostras de alumínio foram feitas pela técnica de fluorescência de raios X (FRX). Essas análises são necessárias para a realização dos cálculos da atenuação das diferentes radiações nesses materiais e também para gerar as curvas teóricas de atenuação a fim de compará-las com os coeficientes de atenuação mássicos obtidos experimentalmente. Para as cerâmicas de B₄C-B, devido à limitação de leitura de baixos valores de número atômico, como é o caso do boro ($Z=5$), a técnica de fluorescência de raios X permitiu apenas a semi-quantificação dos elementos químicos minoritários constituintes das amostras de B₄C-B que são Ca, Cr, Mg, Mn, Ni, Ti e W Tabela 4.3. Apesar disso, foram feitas estimativas dos valores dos elementos químicos B₄C e do B

conforme indicados no Apêndice A. As estimativas dos valores percentuais de B e C, foram feitas com base no limiar dos elementos minoritários estabelecido previamente no pelo fabricante do pó (HSC Stark) que é de 0,5 % e estendendo-se até 0,9 % de elementos minoritários. Embora a quantidade máxima das misturas dos elementos seja 0,5 %, as proporções estimadas 0,6 %, 0,7 %, 0,8 % e 0,9 % foram feitas para que se possa analisar uma faixa maior. As indicações proporção 1 (P1), proporção 2 (P2), etc. representam, respectivamente 0,1 %, 0,2 %, etc., de um total máximo de 0,5 % da soma dos elementos Ca, Cr, Mg, Mn, Ni, Ti e W presentes no pó de B₄C.

Tabela 4.3 - A análise semi-quantitativa por FRX das cerâmicas de B₄C-B com as composições(A)

| Elemento químico | Cerâmica (A) concentração (% em massa) | Cerâmica (B) concentração (% em massa) | Cerâmica (C) concentração (% em massa) | Cerâmica (D) concentração (% em massa) | Cerâmica (E) concentração (% em massa) |
|------------------|--|--|--|--|--|
| W | 81,51 | 78,33 | 72,06 | 71,51 | 58,3 |
| Fe | 8,61 | 9,81 | 10,05 | 12,96 | 13,54 |
| Si | 3,21 | 2,85 | 3,66 | 3,68 | 6,15 |
| Al | 0,82 | 0,79 | 1,48 | 0,65 | 6 |
| K | 1,13 | 1,53 | 1,56 | 1,09 | 2,16 |
| Ti | 1,1 | 1,3 | 1,42 | 2,19 | 1,93 |
| Mg | 0,75 | 0,79 | 4,03 | 2,78 | 2,06 |
| S | 0,9 | 1,15 | 0,99 | 1,11 | 1,24 |
| Nb | 0,69 | 0,63 | 0,61 | 0,58 | 0,54 |
| P | 0,15 | 0,18 | 0,17 | 0,2 | 0,28 |
| Ca | 1,13 | 1,45 | 1,14 | 1,12 | 2,03 |
| Mn | ----- | 0,65 | 0,91 | 1,19 | 1,34 |
| Ni | ----- | 0,53 | 0,87 | 0,94 | 0,96 |
| Zr | ----- | ----- | 0,47 | ----- | 2,37 |
| Cr | ----- | ----- | 0,57 | ----- | 1,1 |

4.3 Caracterização do alumínio aeronáutico 6061-T6

O alumínio 6061-T6 é amplamente utilizado em projetos espaciais no INPE [88,89]. Para que possa ser utilizado como material de referência à atenuação de radiação gama, foram quantificados os componentes químicos da amostra em estudo para, também alimentar as simulações de atenuação de radiação gama. A análise semi-

quantitativa por FRX da amostra de alumínio utilizada neste trabalho encontra-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Análise química semi-quantitativa por FRX da amostra de alumínio aeronáutico 6061-T6.

| Alumínio aeronáutico 6061-T6 | | | | | | | | |
|------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| Elemento químico | Al | Fe | Si | Cu | Cl | K | S | Ga |
| Quantidade (% em massa) | 99,22 | 0,40 | 0,20 | 0,14 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,01 |

4.3.1 Identificação das fases cristalinas

Neste trabalho, alumínio 6061 T6 foi utilizado como material de referência a fim de que os resultados de atenuação das radiações nele incidentes possam ser estudadas e seus valores comparados aos resultados de atenuação de radiação obtidos nas cerâmicas de B₄C. Para ocorrer essas comparações uma amostra desse alumínio foi submetida à análise de fluorescência de raios X a fim de quantificar e identificar os elementos químicos ali presentes. Também foi feita difração de raios X, como mostra Figura 4.10. Os resultados das quantificações tanto do alumínio quanto das cerâmicas de B₄C são importantes para a obtenção dos resultados de atenuação.

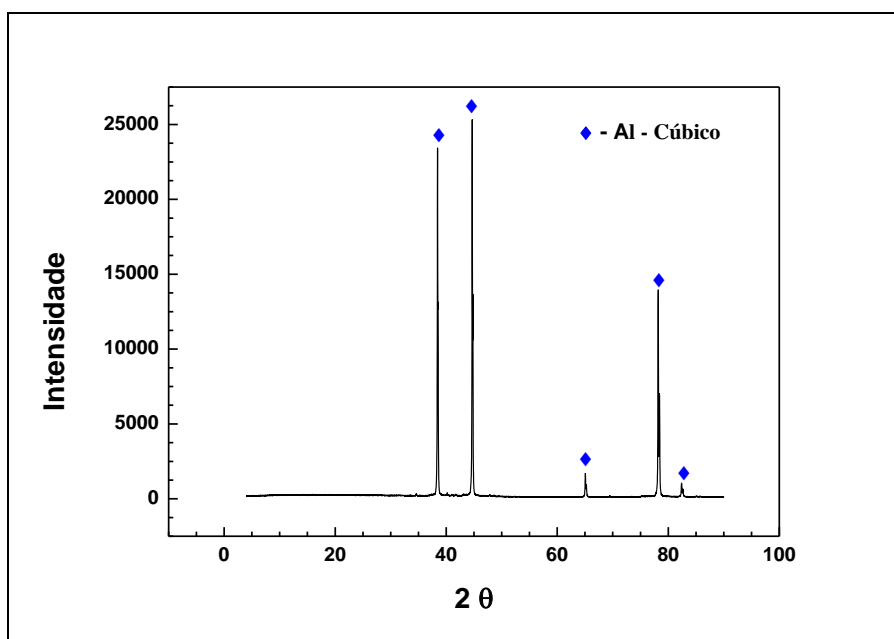


Figura 4.10 - Difratograma de raios X do alumínio aeronáutico 6061-T6.

4.4 Determinação do coeficiente de atenuação para radiação gama

Os corpos de prova de B₄C-B e alumínio 6061-T6 foram irradiados, em diferentes espessuras, por fótons emitidos de fontes radioativas de ⁶⁰Co, ¹⁵²Eu, ²⁴¹Am e ¹³⁷Cs nas energias listadas na Tabela 3.5, apresentada anteriormente.

As emissões dos fótons transmitidos através das espessuras das cerâmicas e das placas de alumínio foram contadas por um sistema de espectroscopia gama de alta resolução. A Equação 2.12 já apresentada anteriormente, no caso de experimento de emissão de fótons, é utilizada para expressar o modelo teórico experimental da intensidade de um feixe monoenergético colimado atenuado, quando atravessa um material de espessura x . Neste caso, I_0 e I são respectivamente as intensidades incidente e atenuada de fótons e μ (cm^{-1}) é o coeficiente de atenuação linear total do material que pode, por sua vez, ser determinado por meio da Equação 4.1, que é a linearização da Equação 2.12.

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \mu x \quad (4.1)$$

Pelo comportamento de $\ln(I_0/I)$ em função de x , obtemos por ajuste linear dos dados experimentais, o valor de μ que é a inclinação da reta ajustada. O ajuste linear da razão de transmissão dos fótons ($\ln(I_0/I)$) das energias das fontes radioativas dos radionuclídeos de ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co e ¹⁵²Eu com energias que variam de $59,537 \pm 0,001$ até $1332,501 \pm 0,005$ em função da espessura x (g/cm^2) para o B₄C-B e para o alumínio. Os resultados dos coeficientes de atenuação linear permitem a obtenção do coeficiente mássico experimental das amostras, os quais serão comparados com os coeficientes de atenuação teóricos em curvas características de atenuação. Estas curvas foram geradas a partir das inserções das composições das cerâmicas de B₄C-B e as faixas de energia nelas incididas. As curvas teóricas foram obtidas pelo programa de simulação XCOM. Os coeficientes mássicos (em cm^2/g) dizem respeito à fração de energia absorvida pelo material, por densidade superficial de massa, quando atravessado pela radiação. Esta unidade é de interesse para o presente estudo pois permite comparar as propriedades de atenuação de diferentes materiais para a uma mesma massa superficial de material absorvedor. As Figuras 4.11 a 4.50 mostram os ajustes lineares

da razão de transmissão dos fótons ($\ln(I_0/I)$) das fontes radioativas em função da espessura x para as cerâmicas A, B, C, D, E. Os gráficos de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura do B_4C -B têm como indicador do coeficiente de atenuação o valor de μ que, é a inclinação da reta.

4.4.1 Ajuste linear da razão de transmissão dos fótons. Dados experimentais para a cerâmica B_4C -B (A)

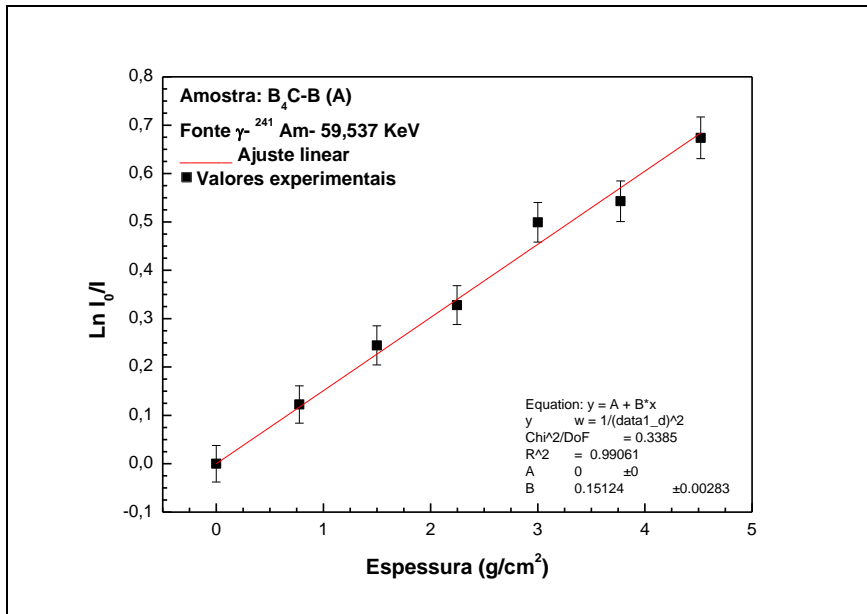


Figura 4.11 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B_4C -B (A) para ^{241}Am (59, 537 keV).

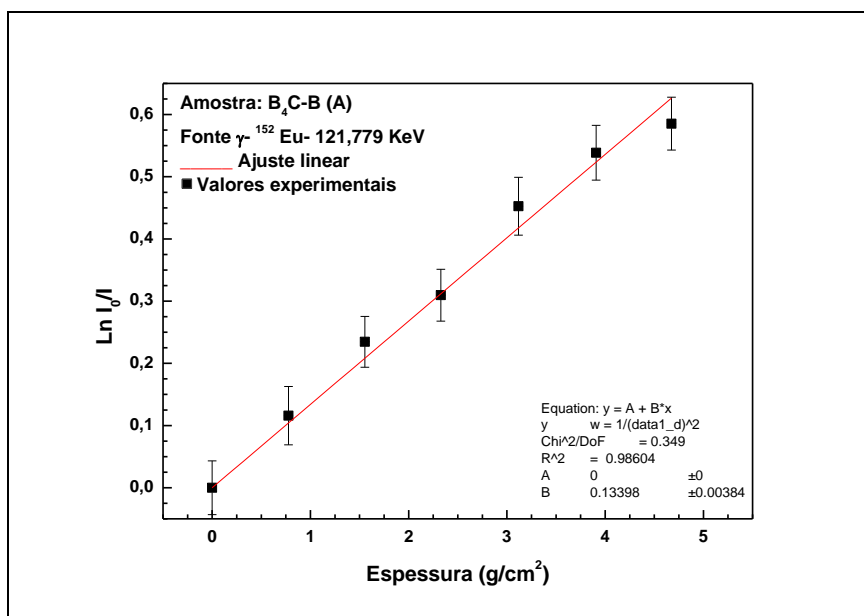


Figura 4.12 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (A) para ¹⁵²Eu (121,779 keV).

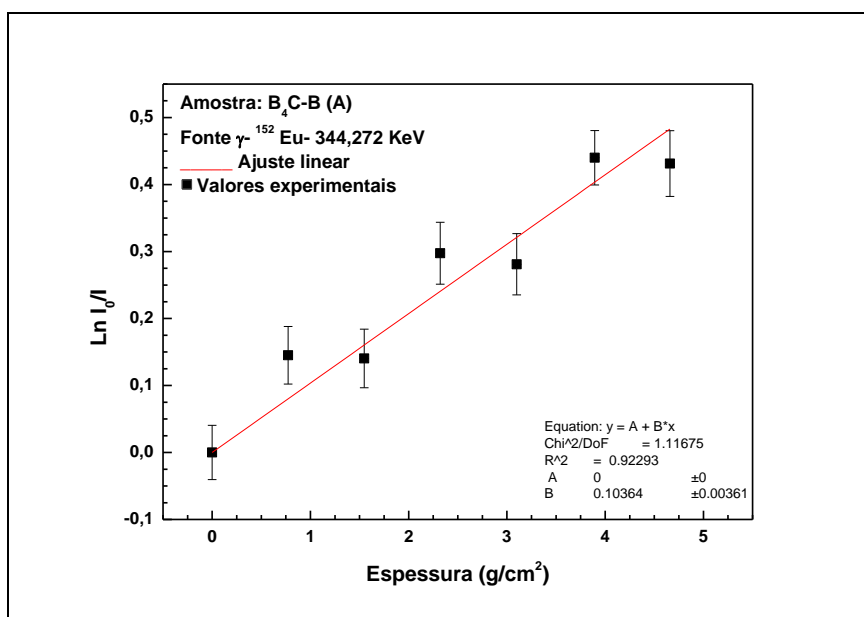


Figura 4.13 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (A) para ¹⁵²Eu (344,272 keV).

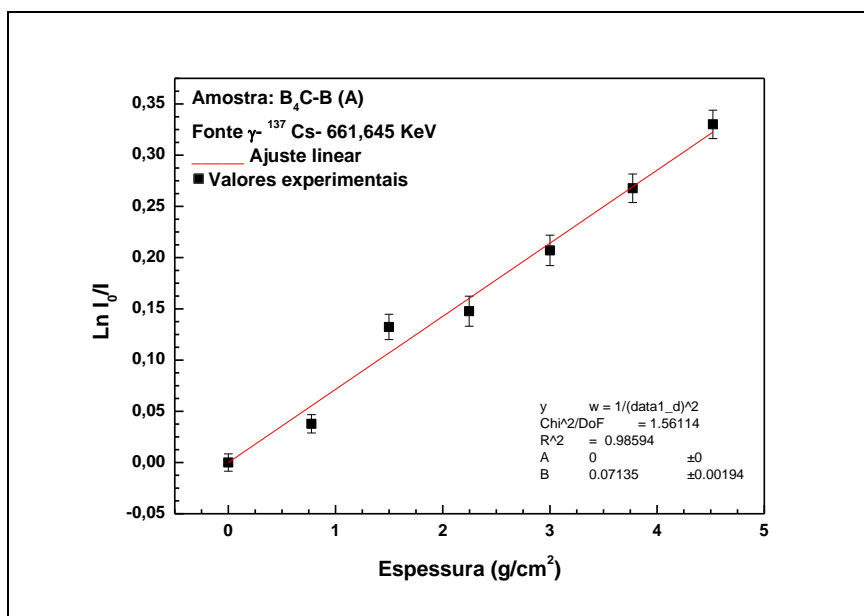


Figura 4.14 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (A) para ¹³⁷Cs (661,645 keV).

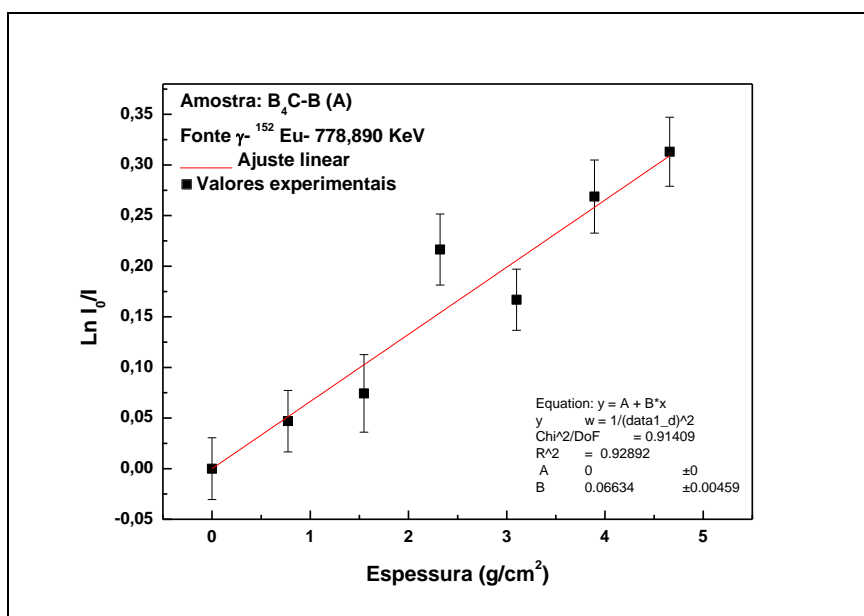


Figura 4.15 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (A) para ¹⁵²Eu (778,890 keV).

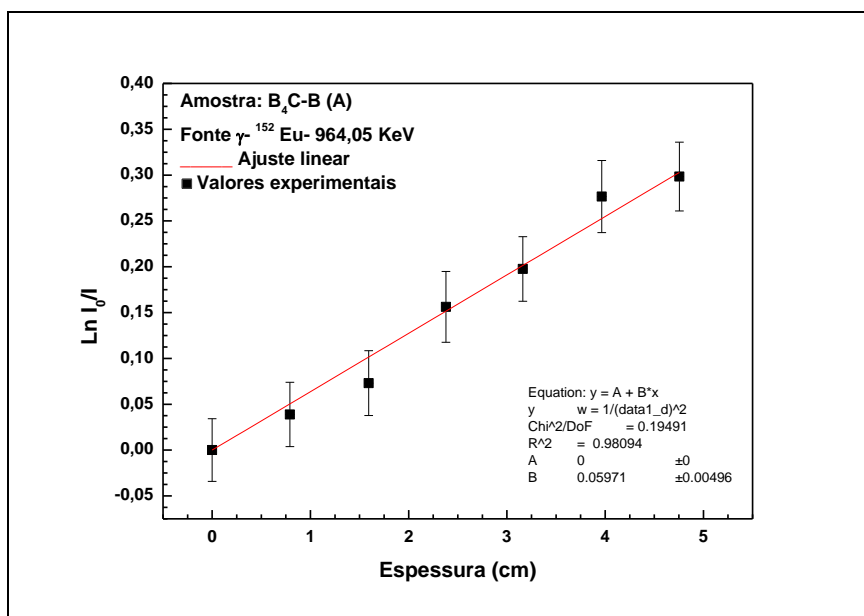


Figura 4.16 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (A) para ¹⁵²Eu (964,06 keV).

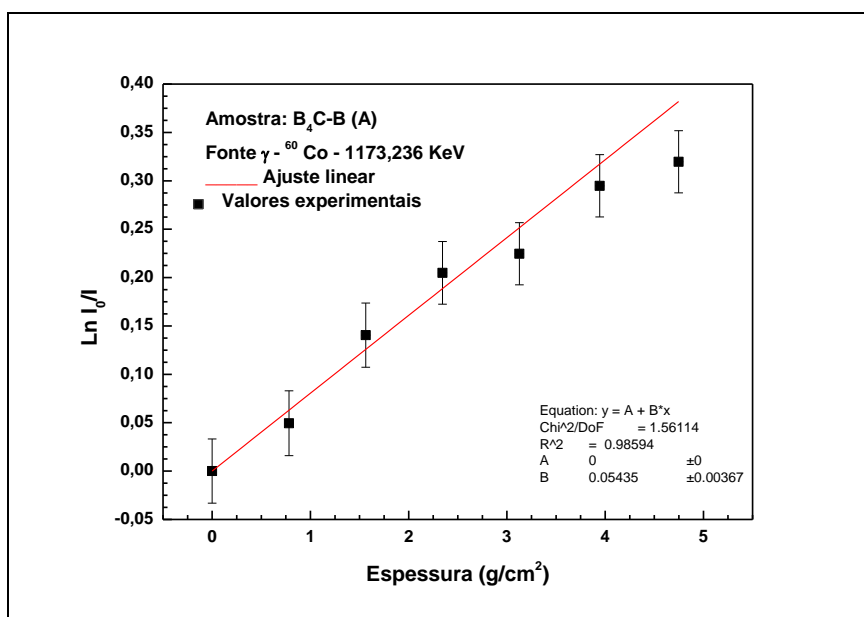


Figura 4.17 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (A) para ⁶⁰Co (1173,236 keV).

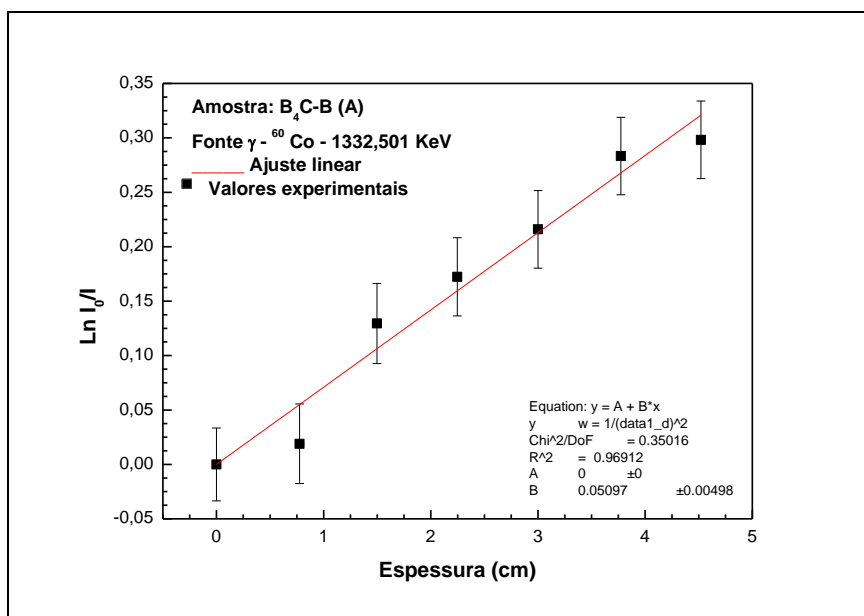


Figura 4.18 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (A) para ⁶⁰Co (1332,501 keV).

4.4.2 Ajuste linear da razão de transmissão dos fótons . Dados experimentais para a cerâmica B₄C-B (B)

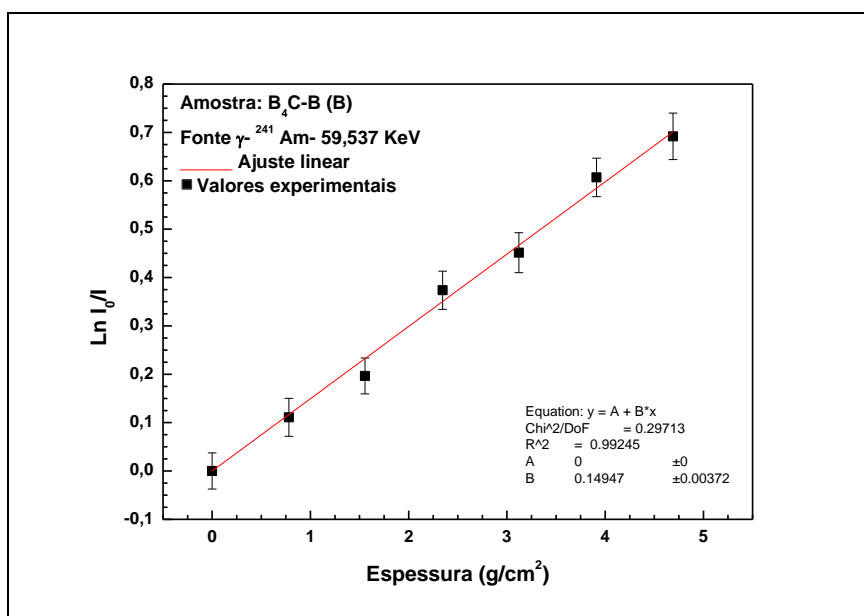


Figura 4.19 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (B) para ²⁴¹Am (59,537 keV).

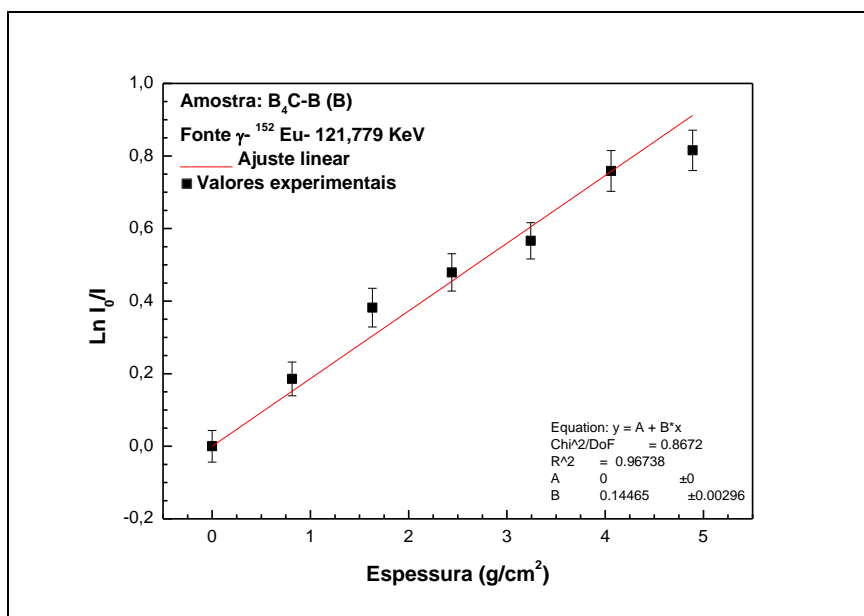


Figura 4.20 - Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (B) para ¹⁵²Eu (121,779 keV).

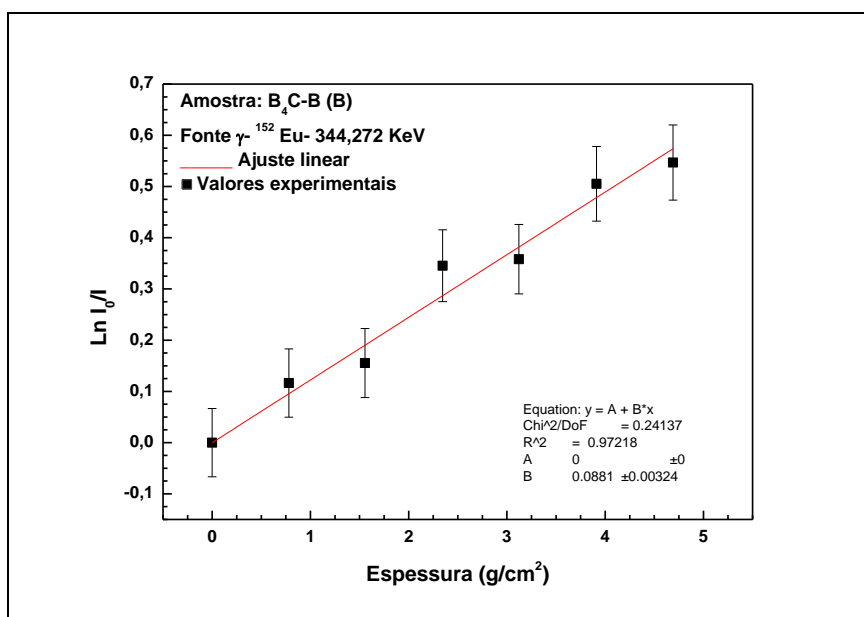


Figura 4.21 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (B) para ¹⁵²Eu (344,272 keV).

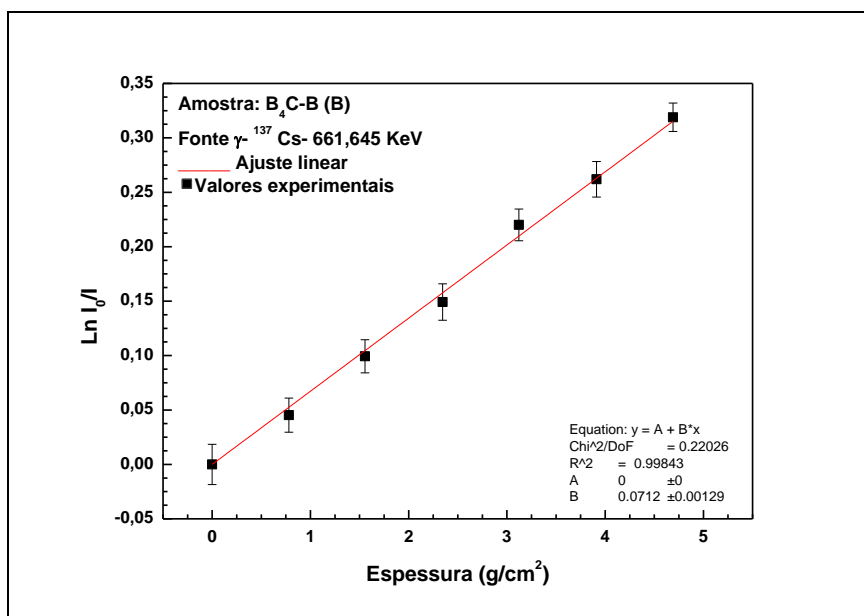


Figura 4.22 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (B) para ¹³⁷Cs (661,645 keV).

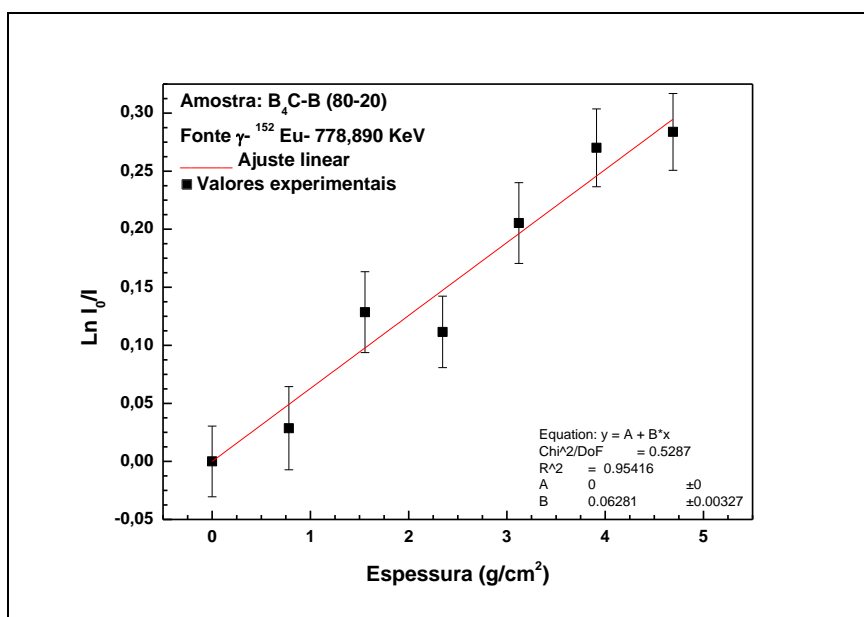


Figura 4.23 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (B) para ¹⁵²Eu (778,890 keV).

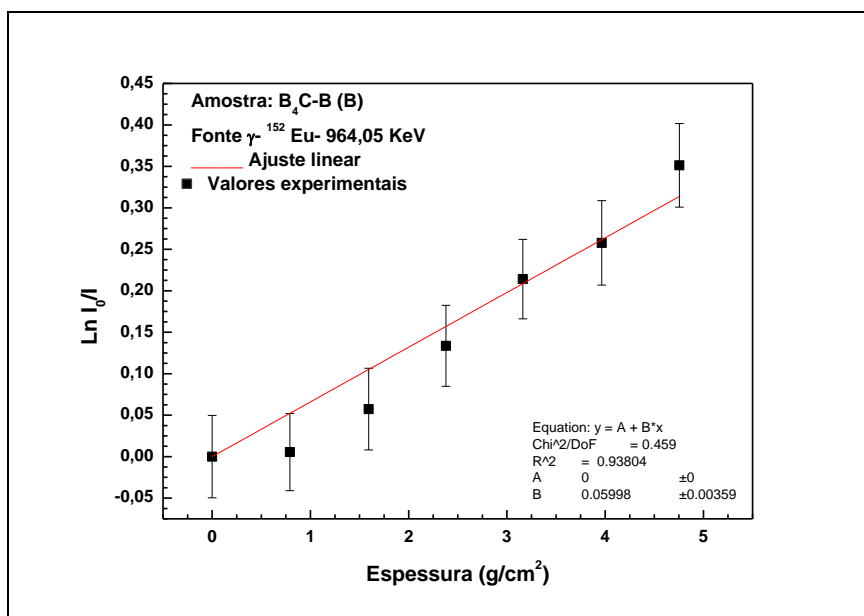


Figura 4.24 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (B) para ¹⁵²Eu (964,050 keV).

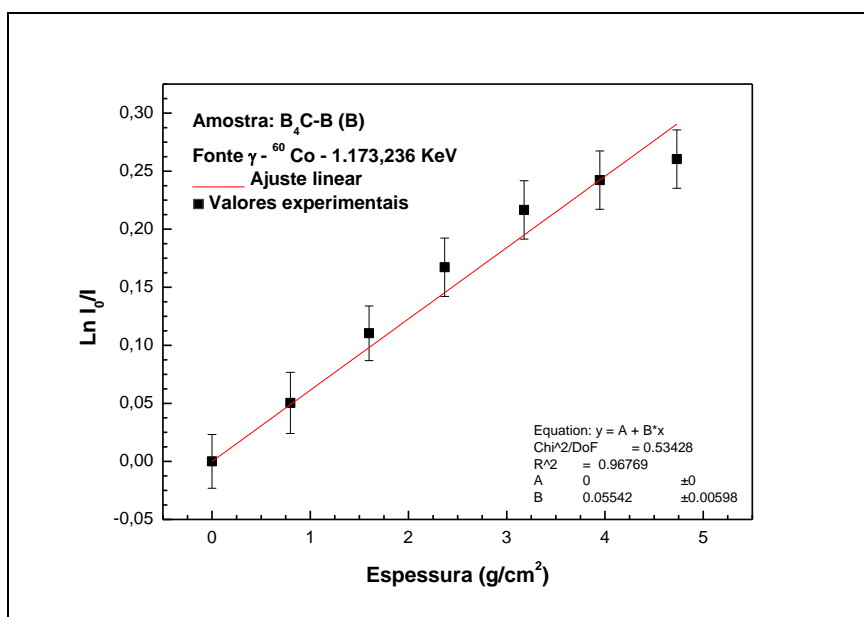


Figura 4.25 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (B) para ⁶⁰Co (1173,238 keV).

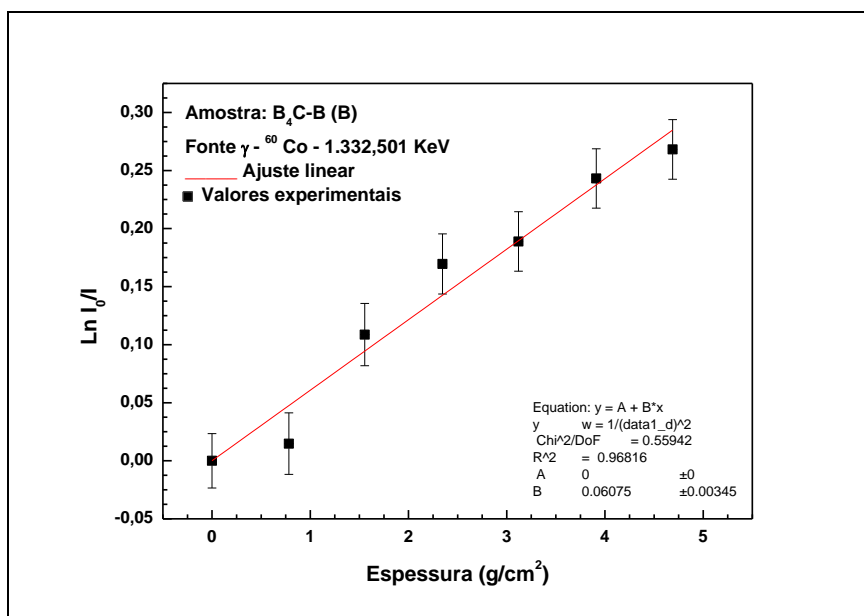


Figura 4.26 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (B) para ⁶⁰Co (1332,501 keV).

4.4.3 Ajuste linear da razão de transmissão dos fótons. Dados experimentais para a cerâmica B₄C-B (C)

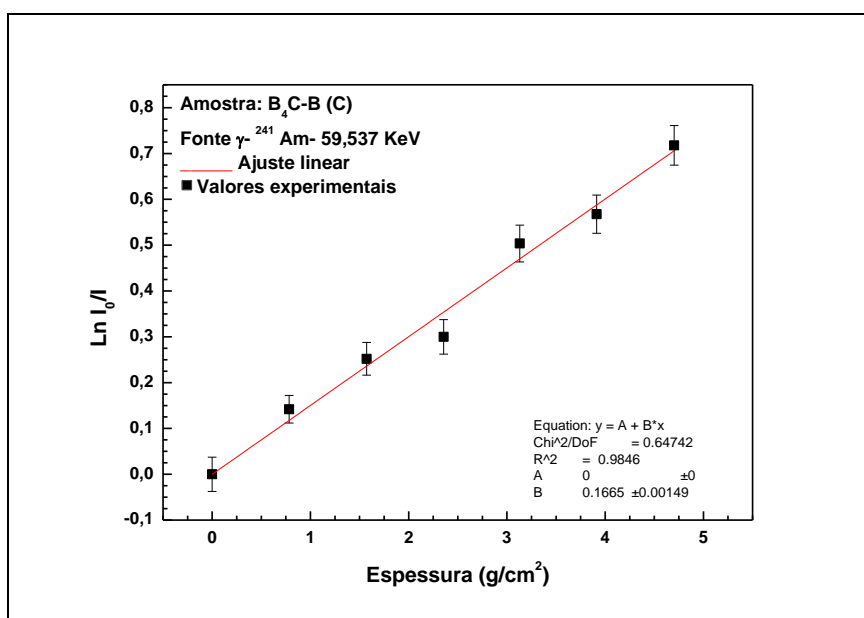


Figura 4.27 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (C) para ²⁴¹Am (59,537 keV).

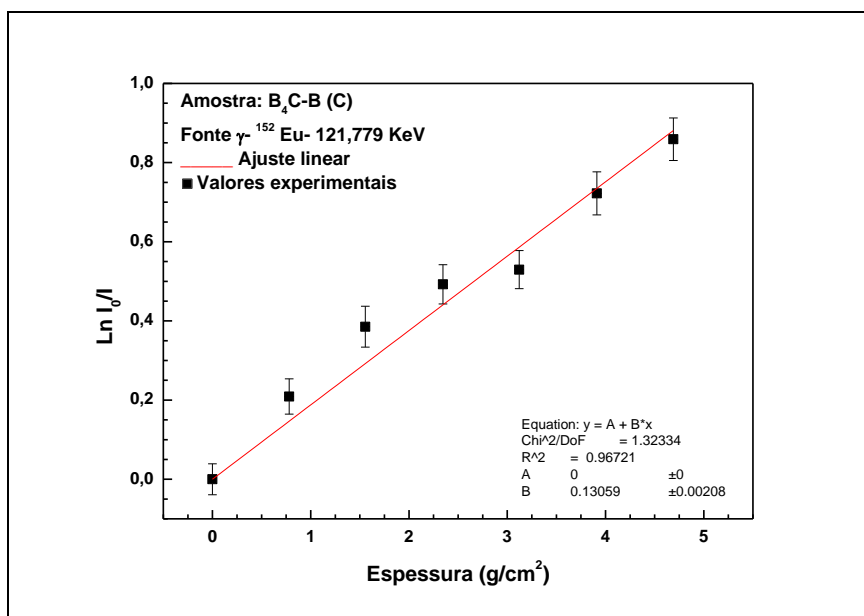


Figura 4.28 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (C) para ¹⁵²Eu (121,779 keV).

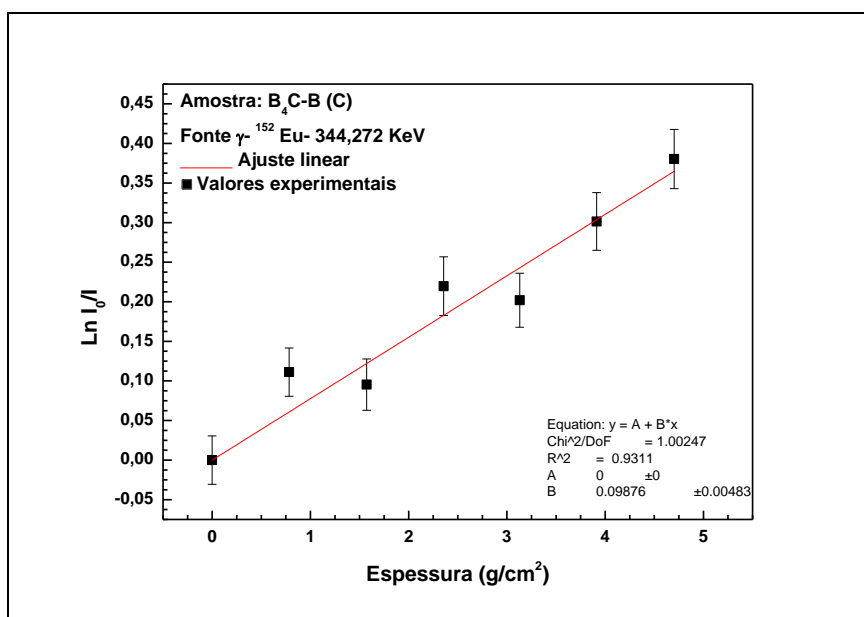


Figura 4.29 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (C) para ¹⁵²Eu (344,272 keV).

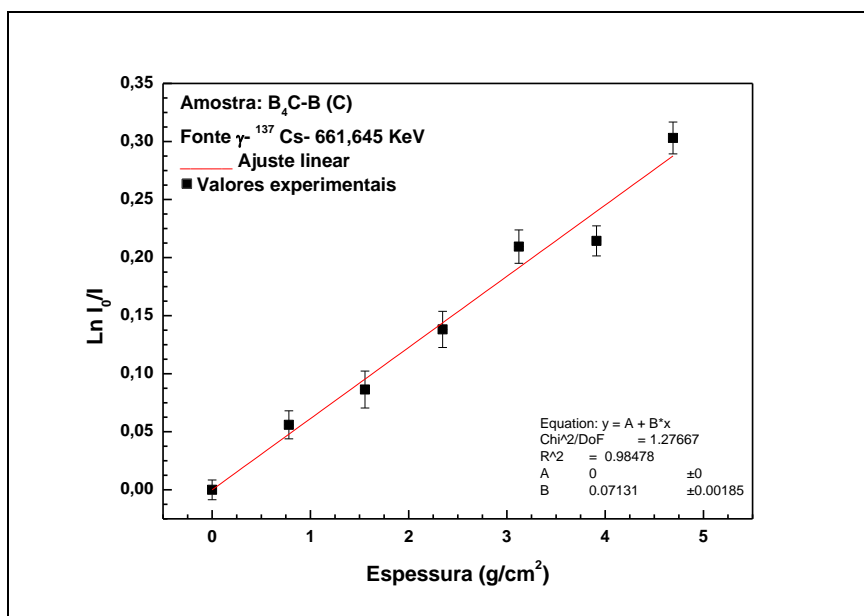


Figura 4.30 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (70g-30g) para ¹³⁷Cs (661,645 keV).

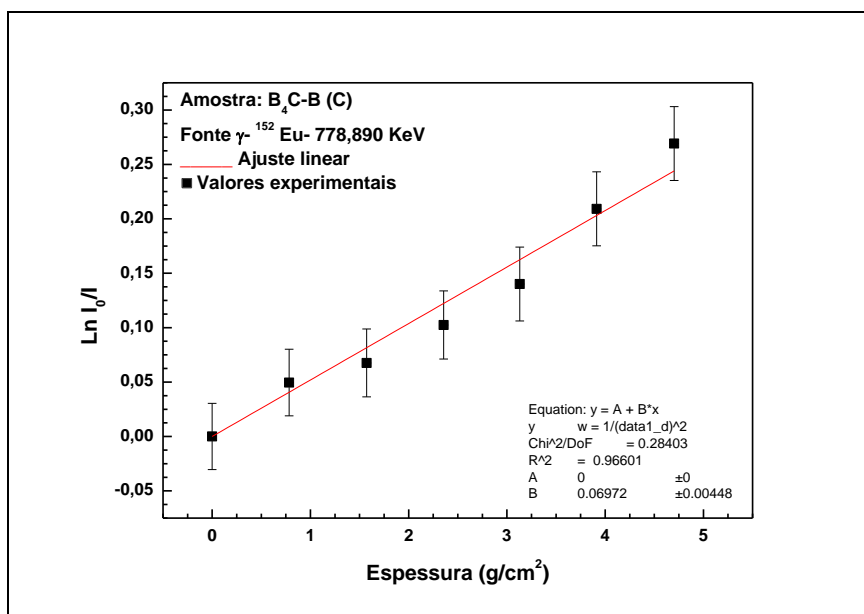


Figura 4.31 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (C) para ¹⁵²Eu (778,890 keV).

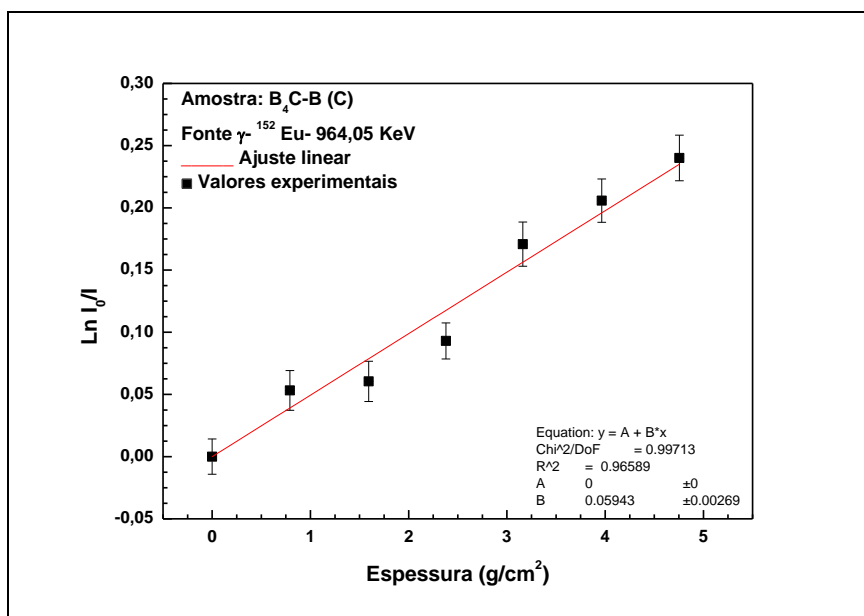


Figura 4.32 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (C) para ¹⁵²Eu (964,050 keV).

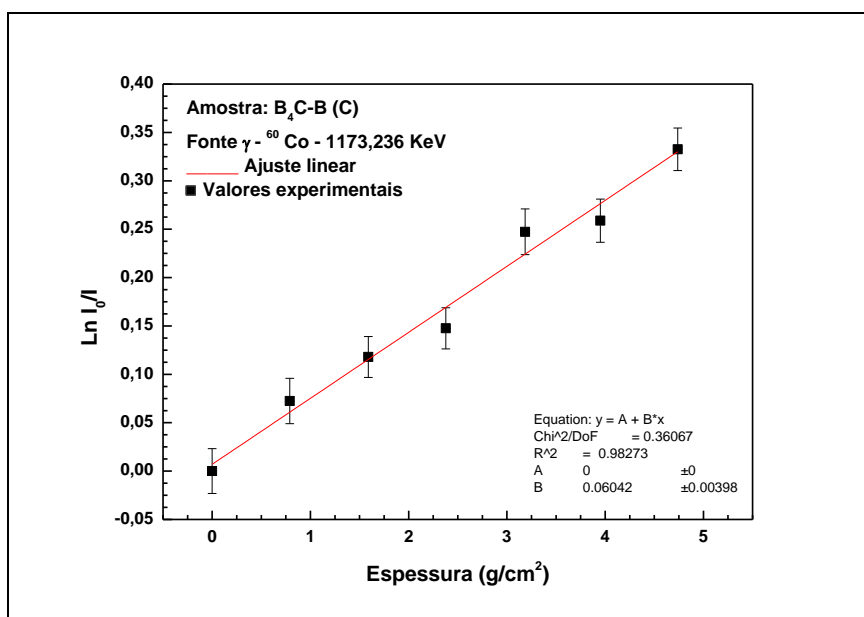


Figura 4.33 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (C) para ⁶⁰Co (1173,238 keV).

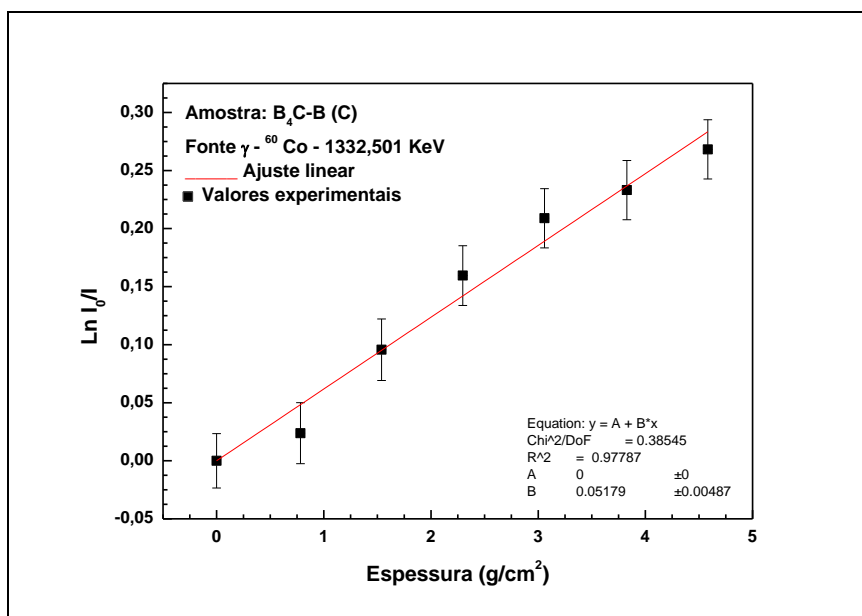


Figura 4.34 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (C) para ⁶⁰Co (1332,501 keV).

4.4.4 Ajuste linear da razão de transmissão dos fótons. Dados experimentais para a cerâmica B₄C-B (D)

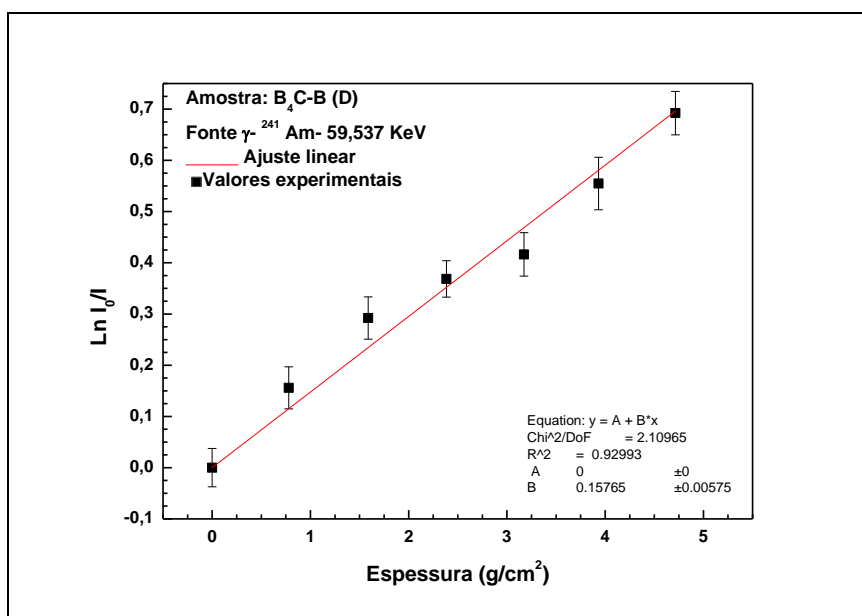


Figura 4.35 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (D) para ²⁴¹Am (59,537 keV).

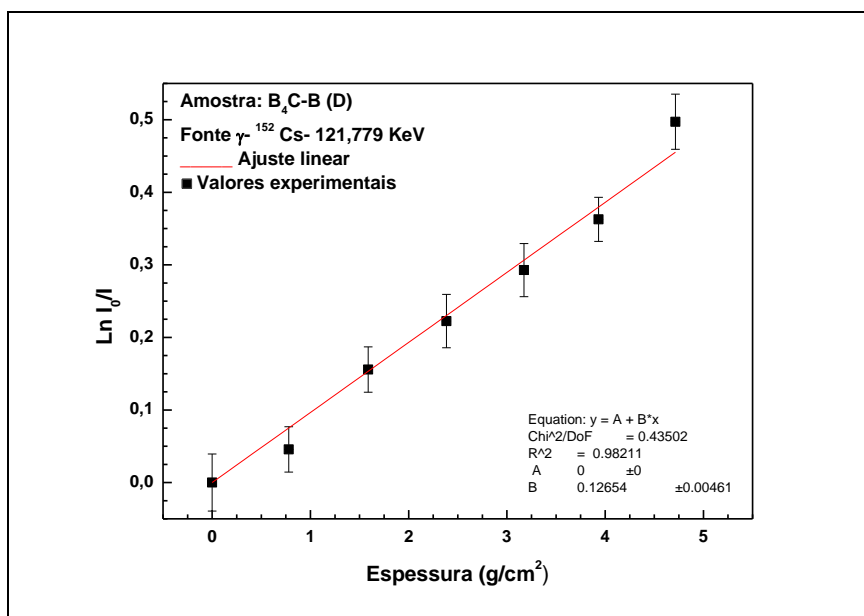


Figura 4.36 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (D) para ¹⁵²Eu (121,779 keV).

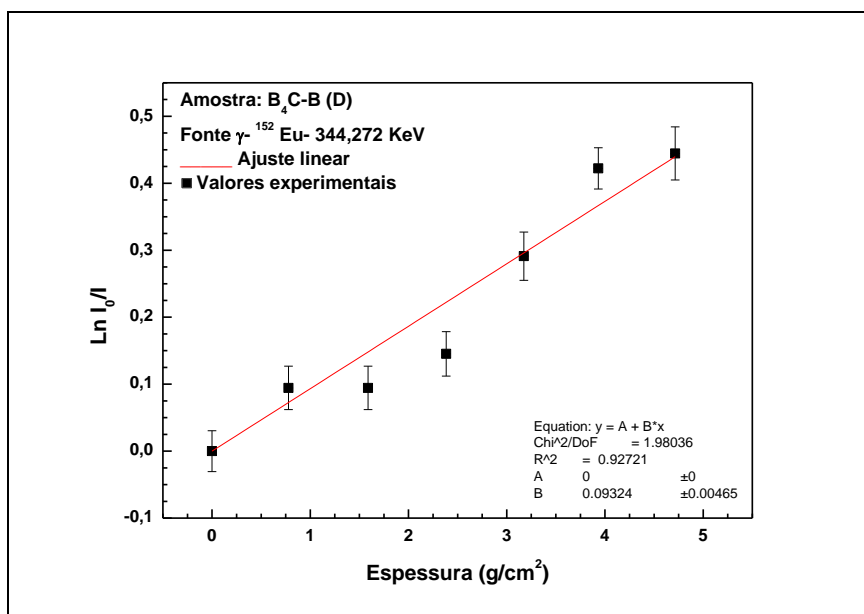


Figura 4.37 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (D) para ¹⁵²Eu (344,272 keV).

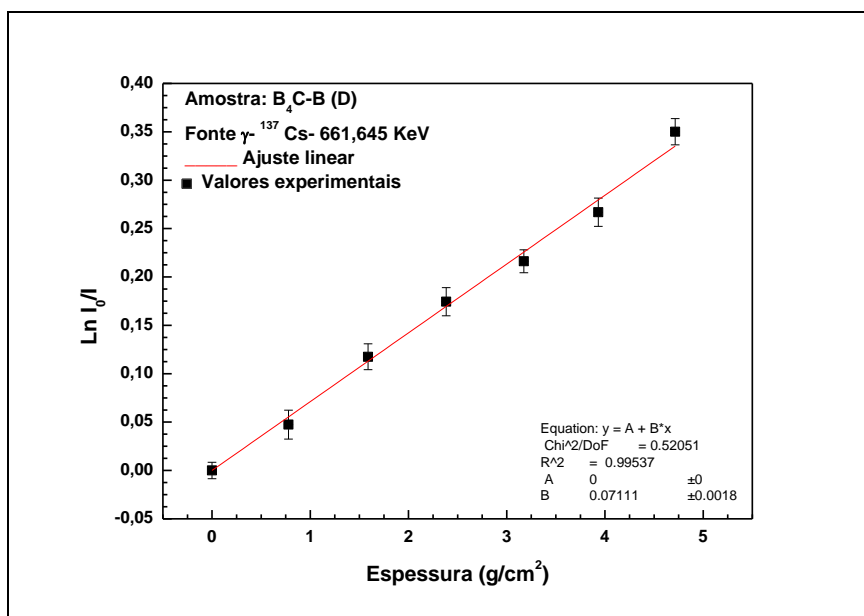


Figura 4.38 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (D) para ¹³⁷Cs (661,645 keV).

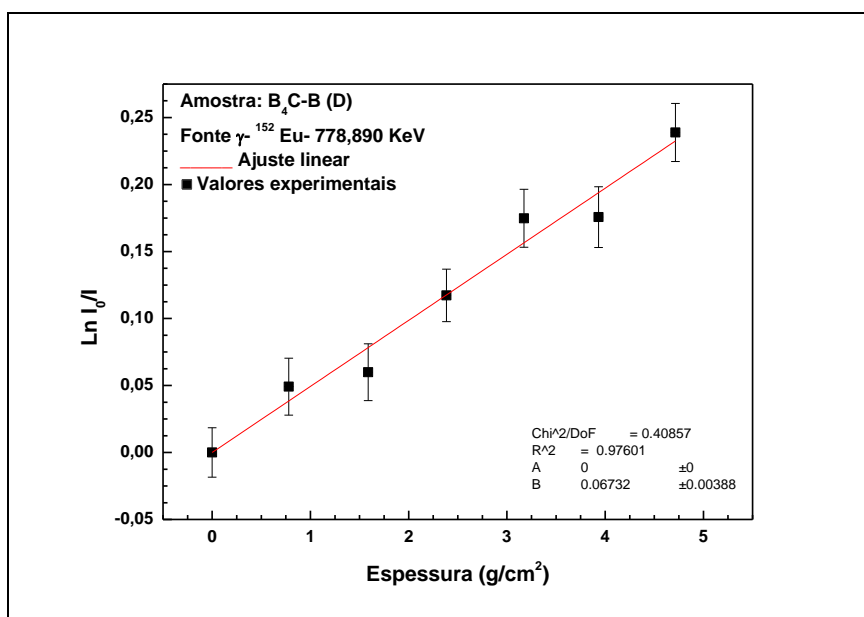


Figura 4.39 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (D) para ¹⁵²Eu (778,890 keV).

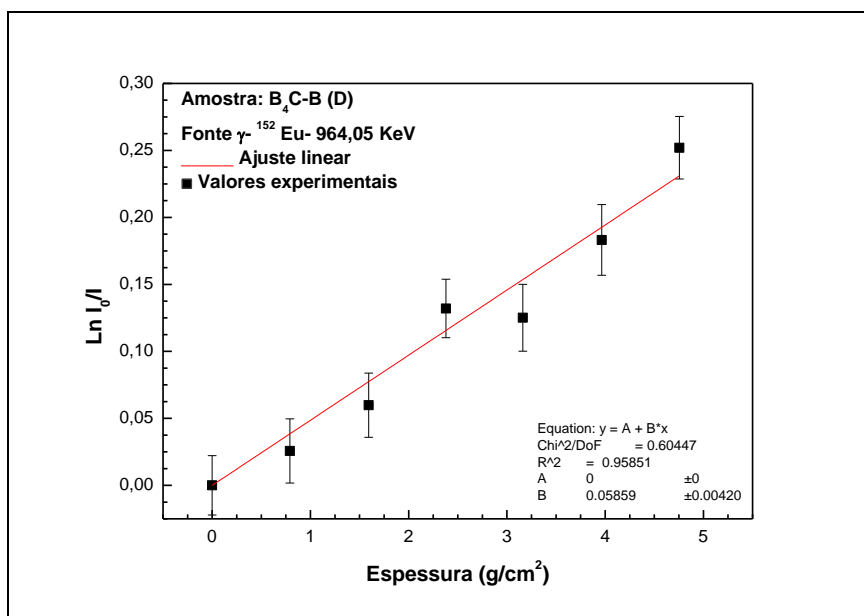


Figura 4.40 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (D) para ¹⁵²Eu (964,050 keV).

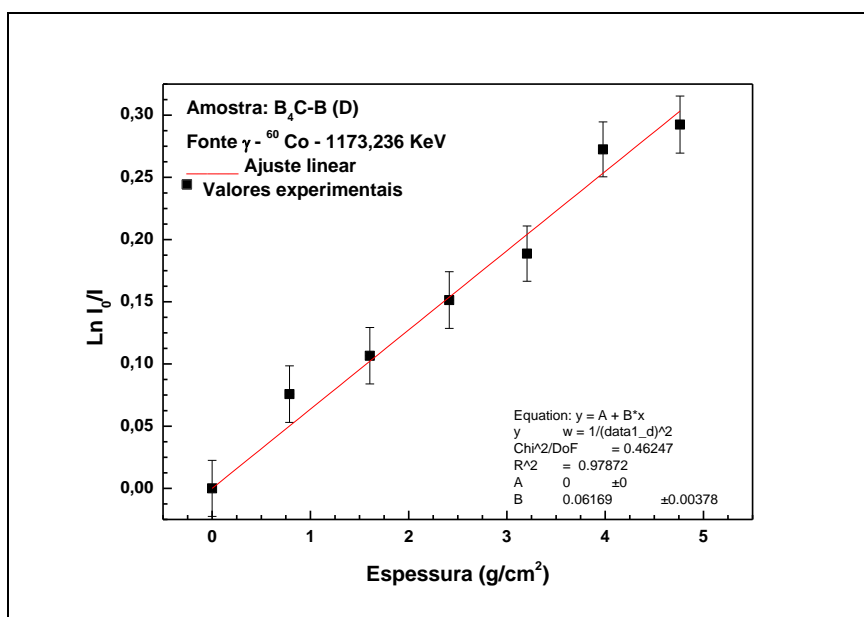


Figura 4.41 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (D) para ⁶⁰Co (1173,236 keV).

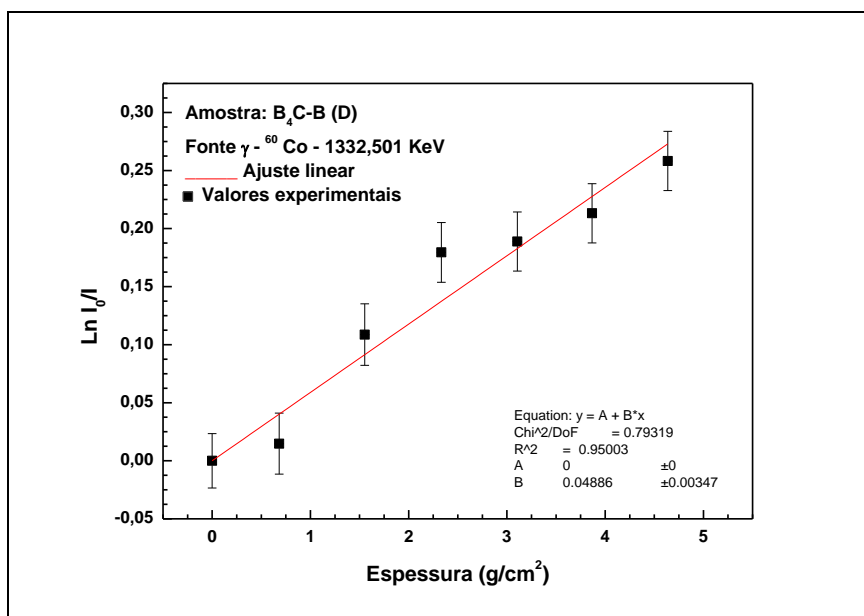


Figura 4.42 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (D) para ⁶⁰Co (1332,501 keV).

4.4.5 Ajuste linear da razão de transmissão dos fótons. Dados experimentais para a cerâmica B₄C-B (E)

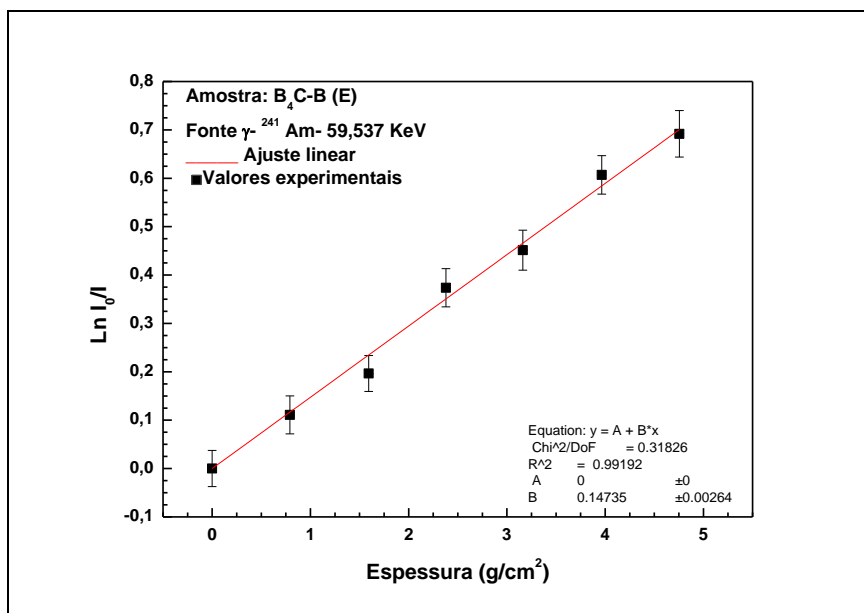


Figura 4.43 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (E) para ²⁴¹Am (59,537 keV).

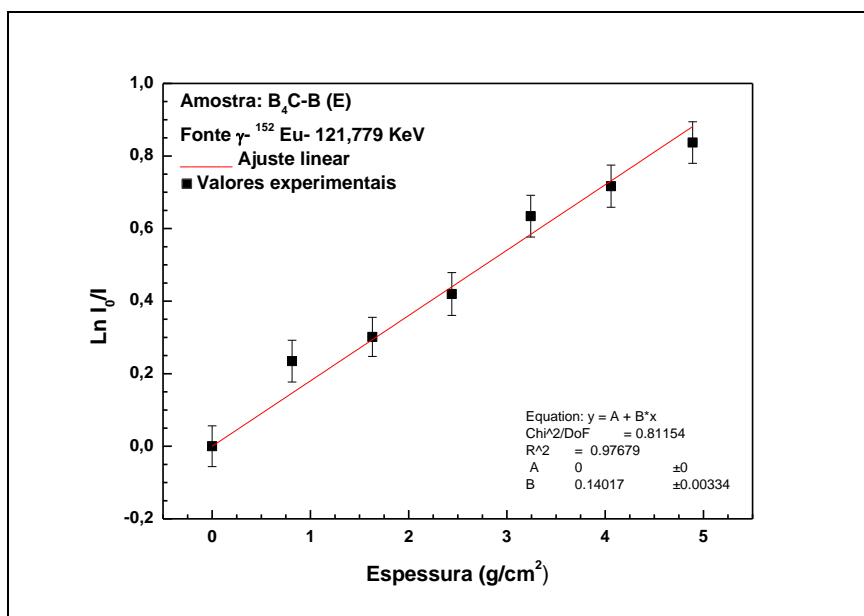


Figura 4.44 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (E) para ¹⁵²Eu (121,779 keV).

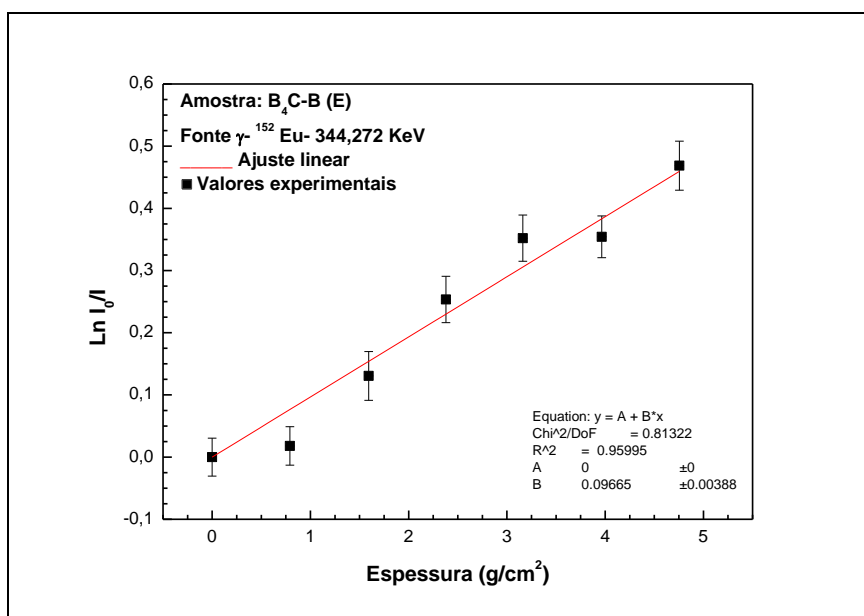


Figura 4.45 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (E) para ¹⁵²Eu (344,272 keV).

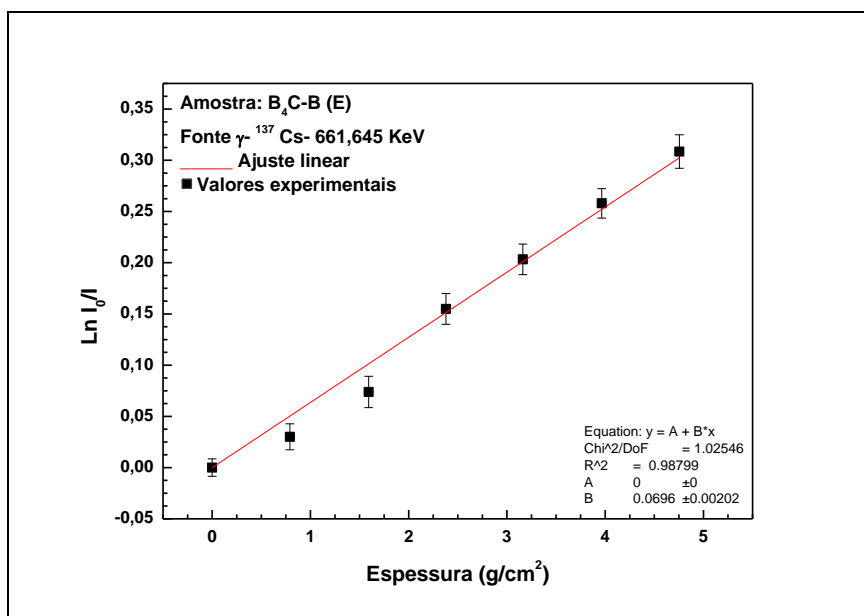


Figura 4.46 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (E) para ¹³⁷Cs (661,645 keV).

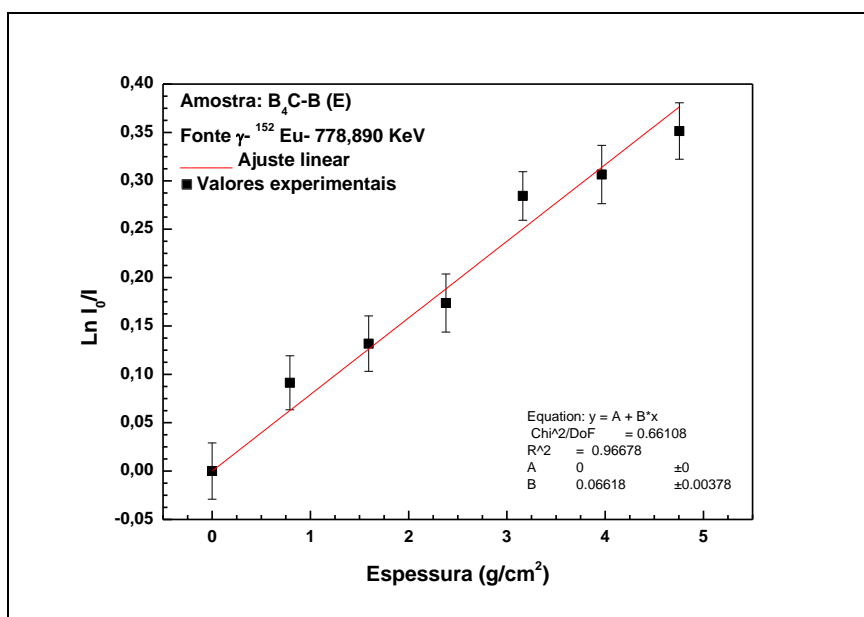


Figura 4.47 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (E) para ¹⁵²Eu (778,890 keV).

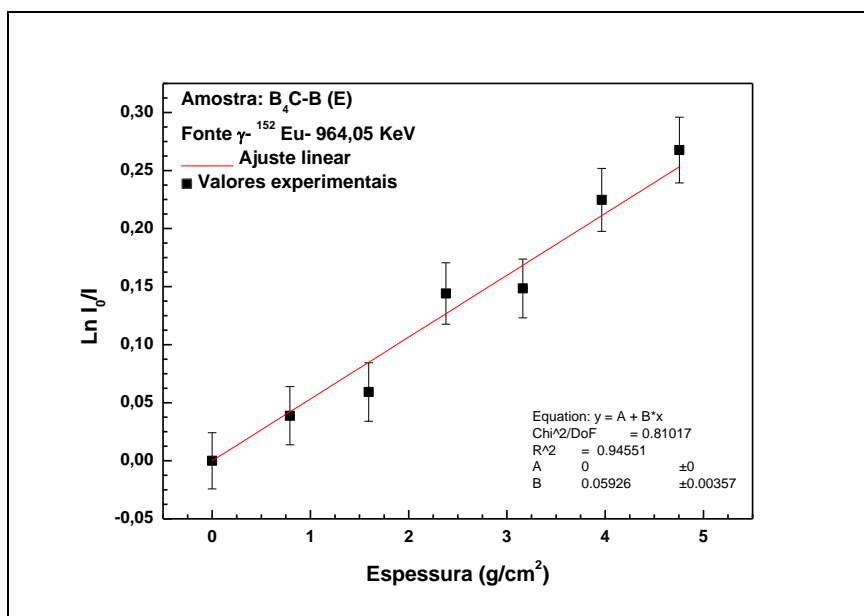


Figura 4.48 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (E) para ¹⁵²Eu (964,050 keV).

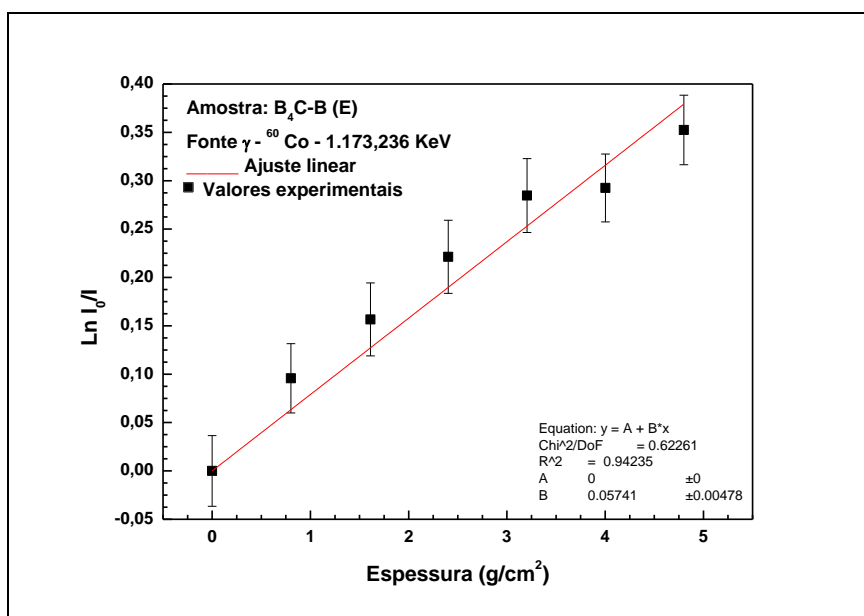


Figura 4.49 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (E) para ⁶⁰Co (1173,236 keV).

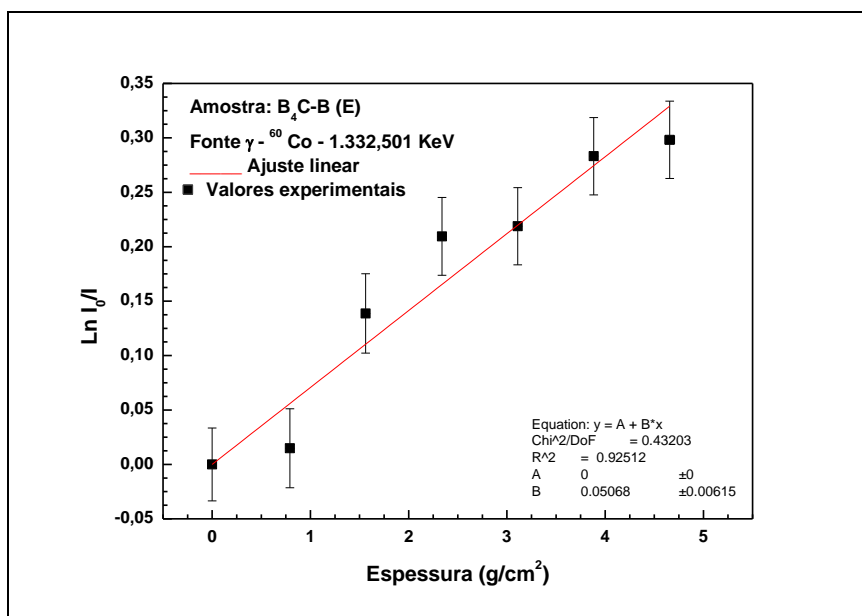


Figura 4.50 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura da cerâmica de B₄C-B (E) para ⁶⁰Co (1332,501 keV).

4.4.6 Ajuste linear da razão de transmissão dos fótons. Dados experimentais para o alumínio 6061-T6

Neste trabalho os valores teóricos do coeficiente de atenuação do alumínio para fótons foram utilizados para comparar com os resultados dos coeficientes de atenuação para fótons das cerâmicas, as figuras indicativas dos seus ajustes lineares experimentais da razão de transmissão dos fótons são apresentadas nas Figuras 4.51 a 4.58. Tanto para as cerâmicas estudadas quanto para as placas de alumínio, as incertezas experimentais foram obtidas a partir da incerteza na contagem da região de interesse de cada pico, posteriormente propagada por meio da regra geral de propagação de incertezas.

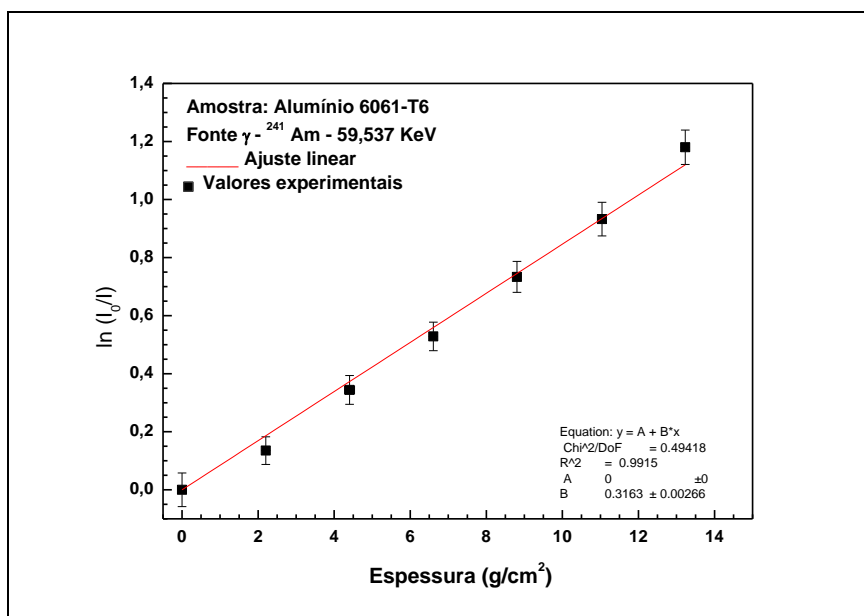


Figura 4.51 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura do alumínio para ^{241}Am (59, 537 keV).

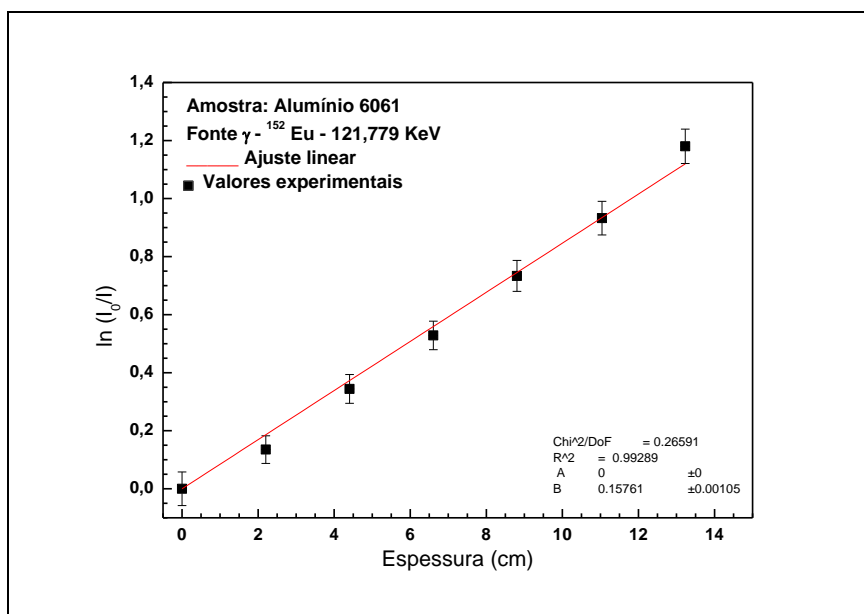


Figura 4.52 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura do alumínio para ^{152}Eu (121,779 keV).

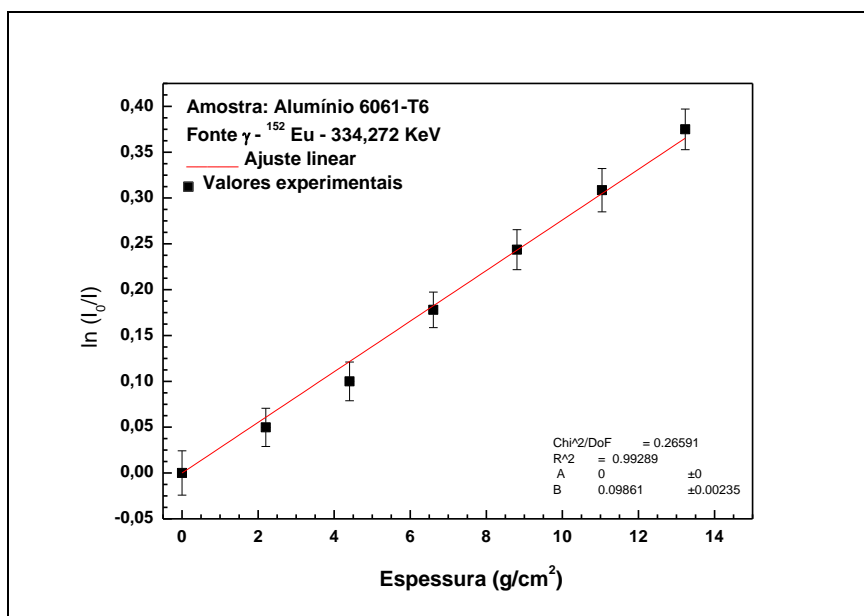


Figura 4.53 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura do alumínio para ^{152}Eu (334,272 keV).

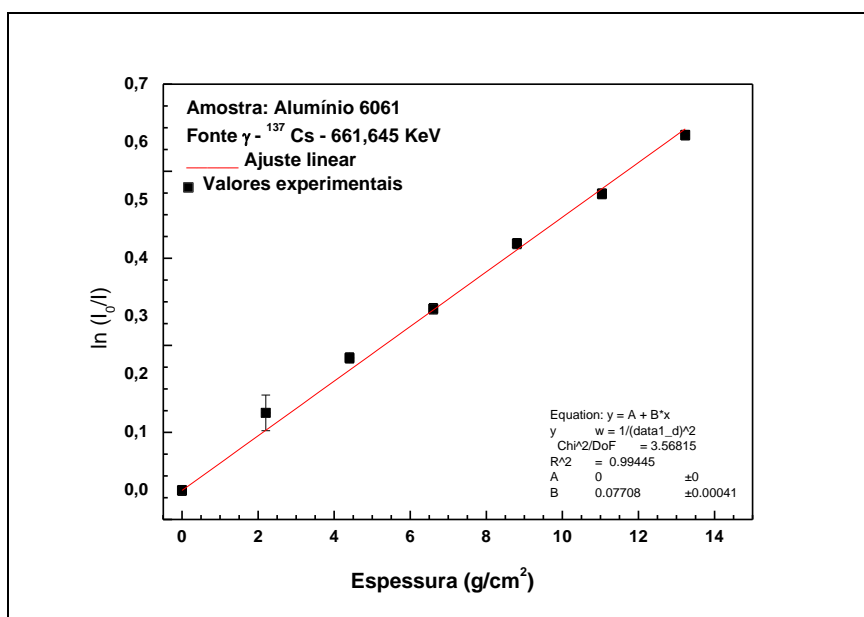


Figura 4.54 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura do alumínio para ^{137}Cs (661,645 keV).

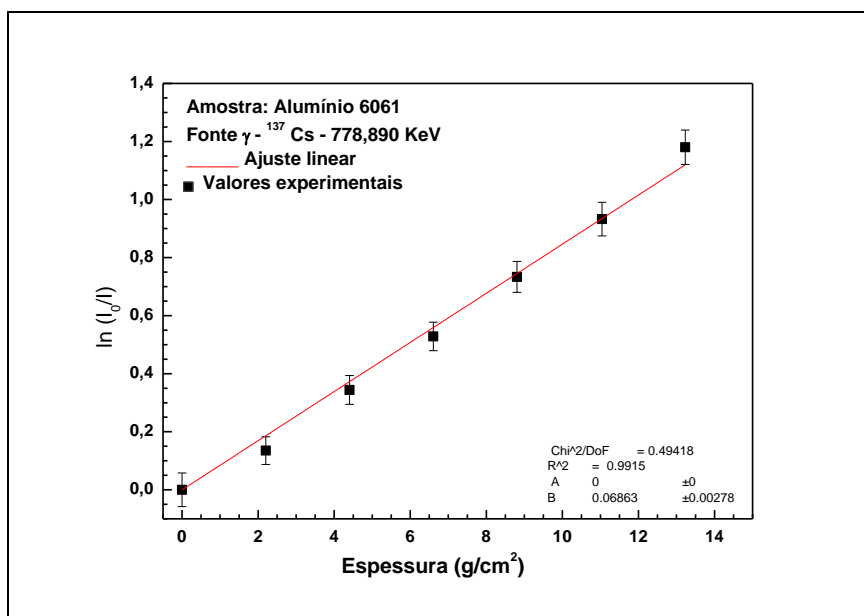


Figura 4.55 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura do alumínio para ^{152}Eu (778,890 keV).

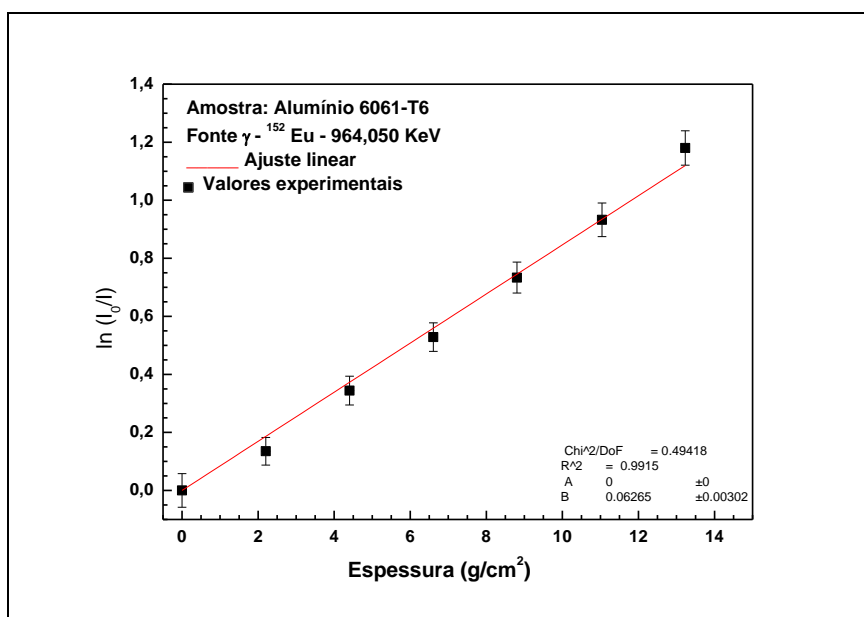


Figura 4.56 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura do alumínio para ^{152}Eu (964,06 keV).

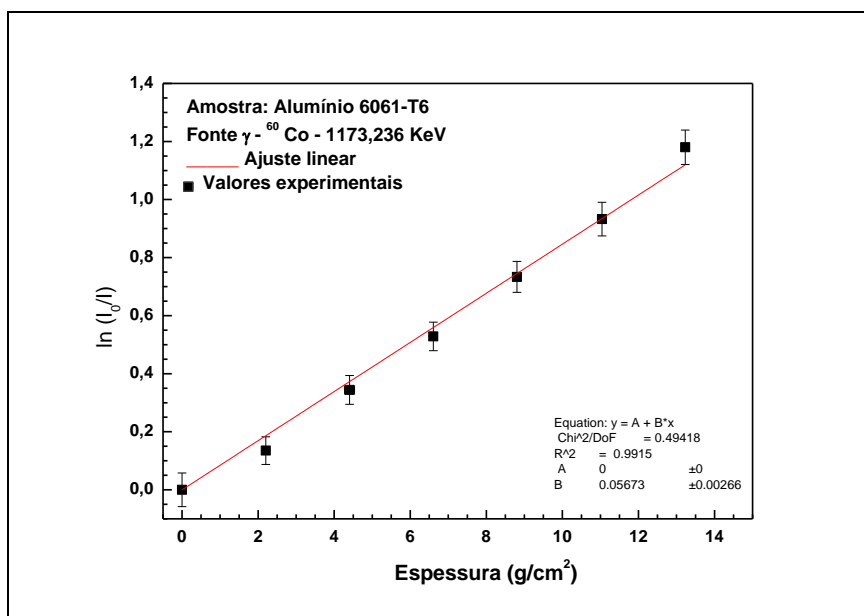


Figura 4.57 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura do alumínio para ^{60}Co (1173 keV).

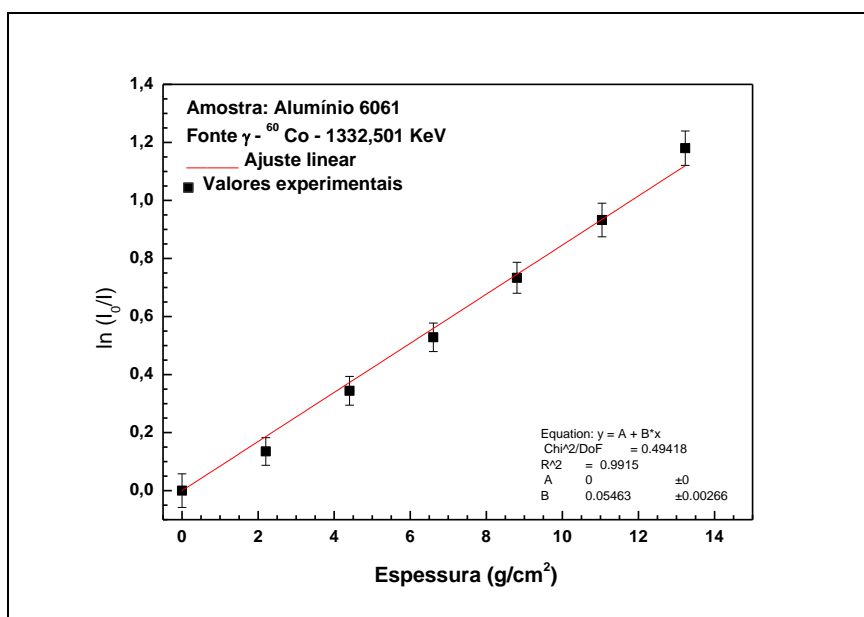


Figura 4.58 – Gráfico de $\ln(I_0/I)$ em função da espessura do alumínio para ^{60}Co (1332,501 keV).

Os coeficientes de atenuação mássicos experimentais totais para as cerâmicas A, B, C, D e E obtidos a partir dos respectivos ajustes lineares (Figuras 4.11 a 4.50) estão listados nas Tabelas 4.7 a 4.11, os quais são comparados com os valores teóricos calculados por meio do programa XCOM [63]. Nestas tabelas também são apresentados, para fins de comparação, os valores calculados pelo programa XCOM

para o alumínio, que é um material de referência para blindagens em veículos espaciais [51]. Os valores experimentais dos coeficientes de atenuação mássicos apresentados nas Tabelas 4.7 a 4.11 também são apresentados na forma gráfica nas Figuras 4.59 a 4.73, comparando-os com a curva do coeficiente de atenuação teórico do alumínio, calculado por meio do programa XCOM. Como pode ser visto nas Tabelas 4.7 a 4.11, o coeficiente de atenuação mássico total teóricos calculados pelo XCOM e experimentais do B₄C-B, são dispersos e, as Figuras 4.59 a 4.73 indicam, ainda, que esses valores estão distribuídos no intervalo de energia de 0,2 a 1,5 MeV.

Tabela 4.5 – Valores de coeficiente de atenuação mássico total μ/ρ (cm²/g) da cerâmica de B₄C-B (A) e do alumínio 6061-T6.

| Fonte | Energia (keV) | Coeficiente de atenuação mássico (cerâmica A) | | Diferença experimental teórico (%) | Alumínio teórico (XCOM) (cm ² /g) | Alumínio Experimental (cm ² /g) |
|-------------------|------------------|---|-----------------------------------|------------------------------------|--|--|
| | | Experimental (cm ² /g) | Teórico XCOM (cm ² /g) | | | |
| ²⁴¹ Am | 59,537 ± 0,001 | 0,1512 ± 0,0028 | 0,1656 | 9 | 0,2907 | 0,3163 |
| ¹³⁷ Cs | 661,645 ± 0,009 | 0,0714 ± 0,0019 | 0,0726 | 2 | 0,0747 | 0,0771 |
| ⁶⁰ Co | 1173,238 ± 0,004 | 0,0545 ± 0,0034 | 0,0553 | 1 | 0,0568 | 0,0567 |
| | 1332,501 ± 0,005 | 0,0510 ± 0,0050 | 0,0518 | 2 | 0,0532 | 0,0546 |
| ¹⁵² Eu | 121,779 ± 0,003 | 0,1340 ± 0,0038 | 0,1366 | 2 | 0,1534 | 0,1576 |
| | 344,272 ± 0,007 | 0,1036 ± 0,0036 | 0,0953 | 9 | 0,0987 | 0,0986 |
| | 778,890 ± 0,016 | 0,0663 ± 0,0046 | 0,0674 | 2 | 0,0693 | 0,0686 |
| | 964,050 ± 0,003 | 0,0597 ± 0,0050 | 0,0609 | 2 | 0,0626 | 0,0627 |

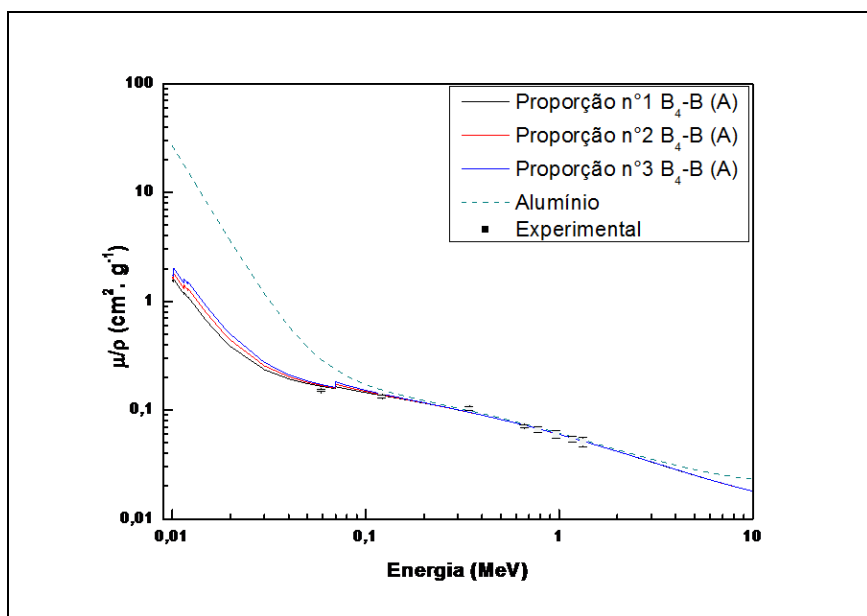


Figura 4.59 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para $\text{B}_4\text{C-B}$ (A) para as proporções 1, 2 e 3.

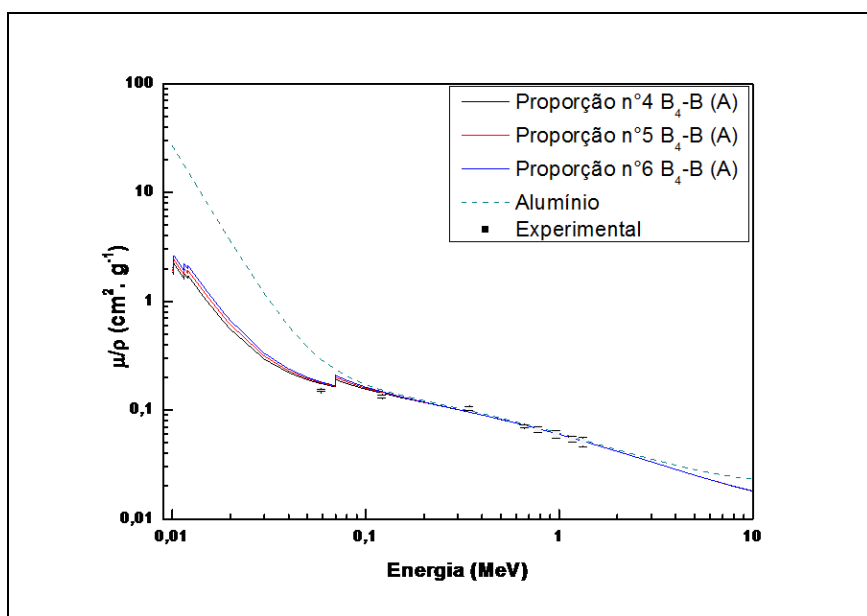


Figura 4.60 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para $\text{B}_4\text{C-B}$ (A) para as proporções 4, 5 e 6.

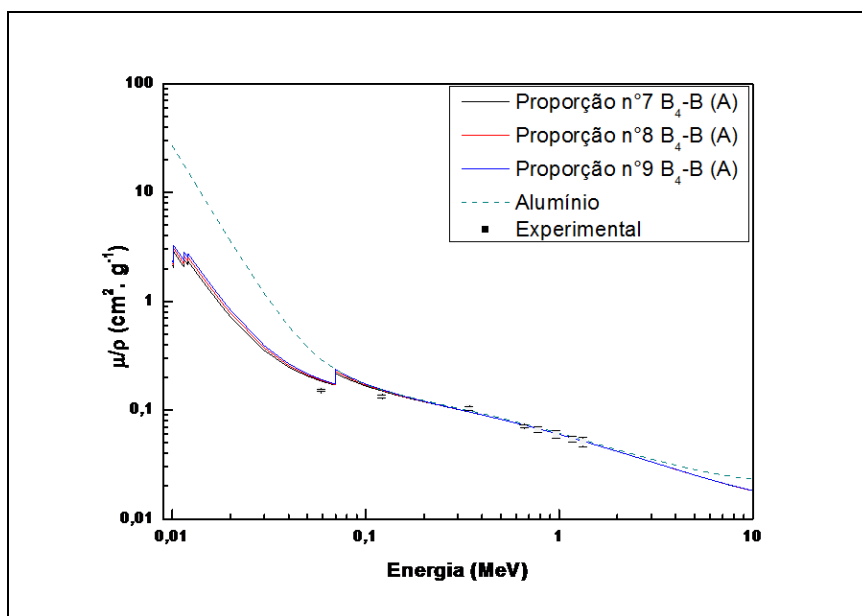


Figura 4.61 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para B₄C-B (A) para as proporções 7, 8 e 9.

Tabela 4.6 – Valores de coeficiente de atenuação mássico total μ/ρ (cm²/g) da cerâmica de B₄C-B (B) e do alumínio 6061-T6.

| Fonte | Energia (keV) | Coeficiente de atenuação mássico (cerâmica B) | | Diferença experimental-teórico (%) | Alumínio teórico (XCOM) (cm ² /g) | Alumínio Experimental (cm ² /g) |
|-------------------|------------------|---|-----------------------------------|------------------------------------|--|--|
| | | Experimental (cm ² /g) | Teórico XCOM (cm ² /g) | | | |
| ²⁴¹ Am | 59,537 ± 0,001 | 0,1495 ± 0,0037 | 0,1655 | 10 | 0,2907 | 0,3163 |
| ¹³⁷ Cs | 661,645 ± 0,009 | 0,0712 ± 0,0013 | 0,0726 | 2 | 0,0747 | 0,0771 |
| ⁶⁰ Co | 1173,238 ± 0,004 | 0,0554 ± 0,0060 | 0,0553 | 0,2 | 0,0567 | 0,0567 |
| | 1332,501 ± 0,005 | 0,0608 ± 0,0035 | 0,0518 | 17 | 0,0532 | 0,0546 |
| ¹⁵² Eu | 121,779 ± 0,003 | 0,1447 ± 0,0030 | 0,1365 | 6 | 0,1534 | 0,1576 |
| | 344,272 ± 0,007 | 0,0881 ± 0,0032 | 0,0953 | 8 | 0,0987 | 0,0986 |
| | 778,890 ± 0,016 | 0,0628 ± 0,0033 | 0,0674 | 7 | 0,0693 | 0,0686 |
| | 964,050 ± 0,003 | 0,0600 ± 0,0036 | 0,0609 | 1 | 0,0626 | 0,0627 |

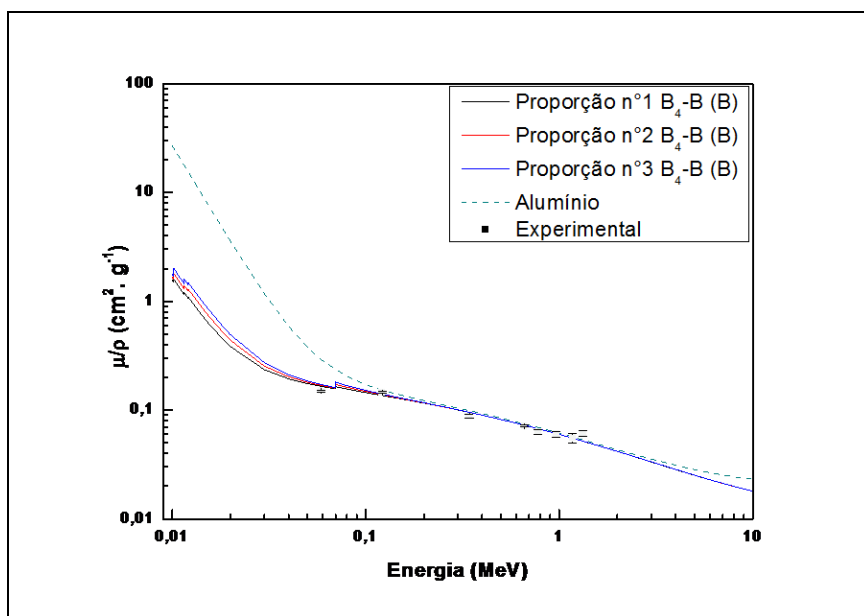


Figura 4.62 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para B₄C-B (B) para as proporções 1, 2 e 3.

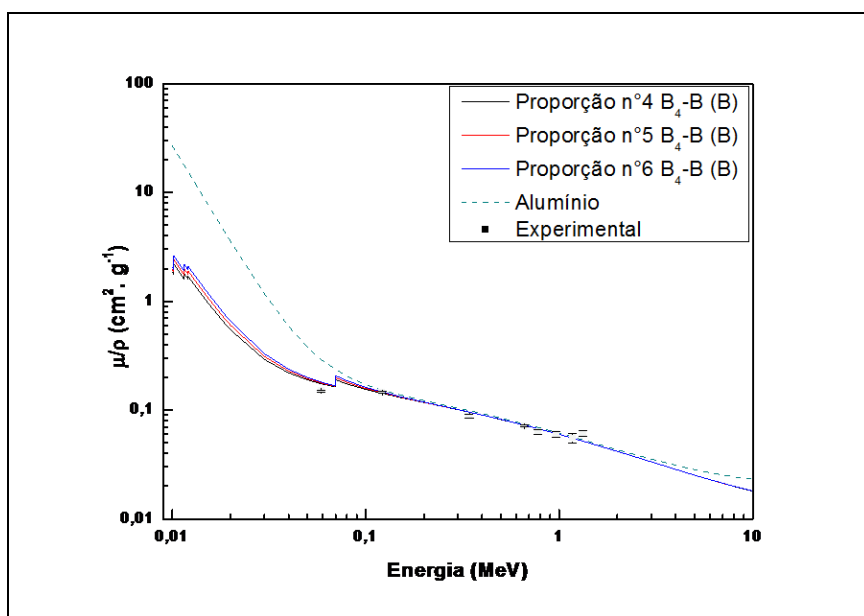


Figura 4.63 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para B₄C-B (B) para as proporções 4, 5 e 6.

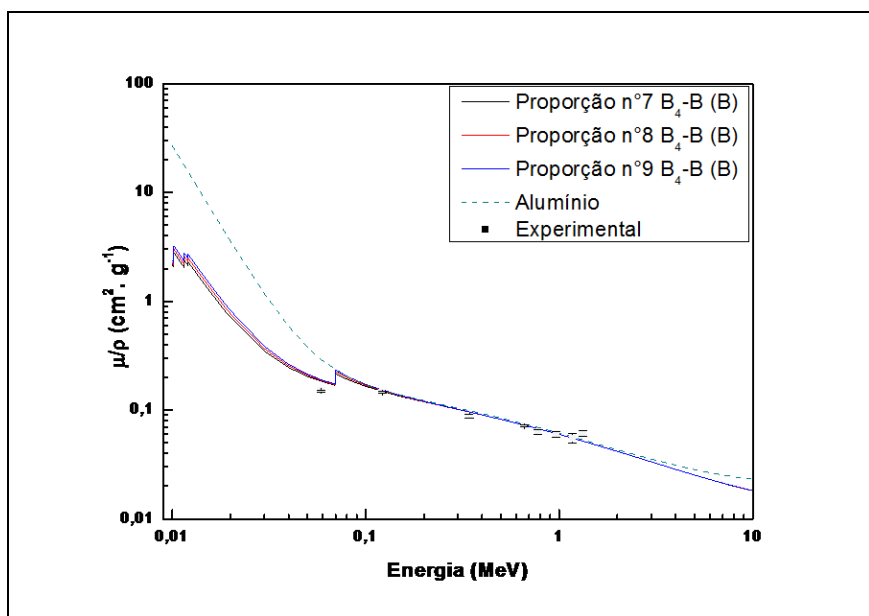


Figura 4.64 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para B₄C-B (B) para as proporções 7, 8 e 9.

Tabela 4.7 – Valores de coeficiente de atenuação mássico total μ/ρ (cm²/g) da cerâmica de B₄C-B (C) e do alumínio 6061-T6.

| Fonte | Energia (keV) | Coeficiente de atenuação mássico (cerâmica C) | | Diferença experimental-teórico (%) | Alumínio teórico (XCOM) (cm ² /g) | Alumínio Experimental (cm ² /g) |
|-------------------|------------------|---|-----------------------------------|------------------------------------|--|--|
| | | Experimental (cm ² /g) | Teórico XCOM (cm ² /g) | | | |
| ²⁴¹ Am | 59,537 ± 0,001 | 0,1665 ± 0,0015 | 0,1653 | 1 | 0,2907 | 0,3163 |
| ¹³⁷ Cs | 661,645 ± 0,009 | 0,0713 ± 0,0018 | 0,0726 | 2 | 0,0747 | 0,0771 |
| ⁶⁰ Co | 1173,238 ± 0,004 | 0,0604 ± 0,0040 | 0,0553 | 9 | 0,0568 | 0,0567 |
| | 1332,501 ± 0,005 | 0,0518 ± 0,0049 | 0,0518 | 0 | 0,0532 | 0,0546 |
| ¹⁵² Eu | 121,779 ± 0,003 | 0,1306 ± 0,0021 | 0,1363 | 4 | 0,1534 | 0,1576 |
| | 344,272 ± 0,007 | 0,0988 ± 0,0048 | 0,0953 | 4 | 0,0987 | 0,0986 |
| | 778,890 ± 0,016 | 0,0697 ± 0,0045 | 0,0674 | 3 | 0,0693 | 0,0686 |
| | 964,050 ± 0,003 | 0,0594 ± 0,0027 | 0,0609 | 2 | 0,0626 | 0,0627 |

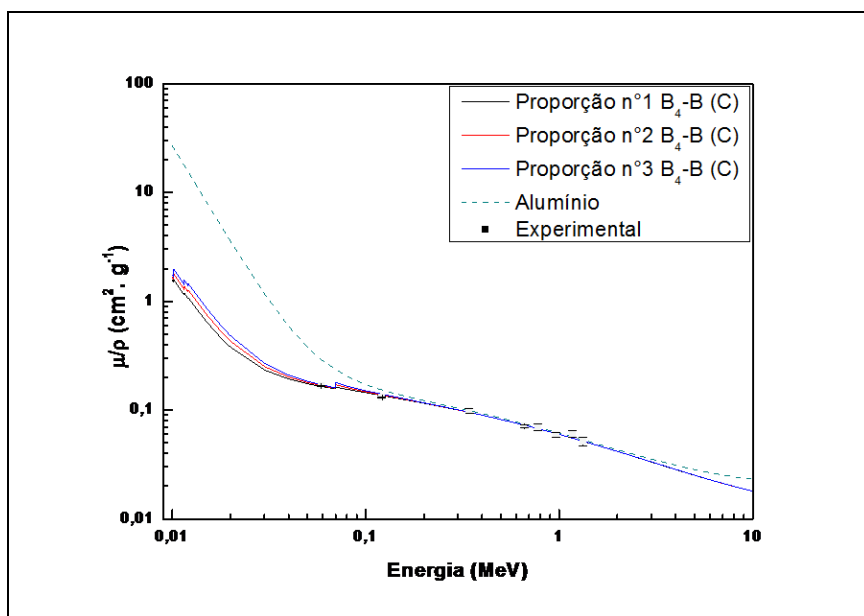


Figura 4.65 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para B₄C-B (C) para as proporções 1, 2 e 3.

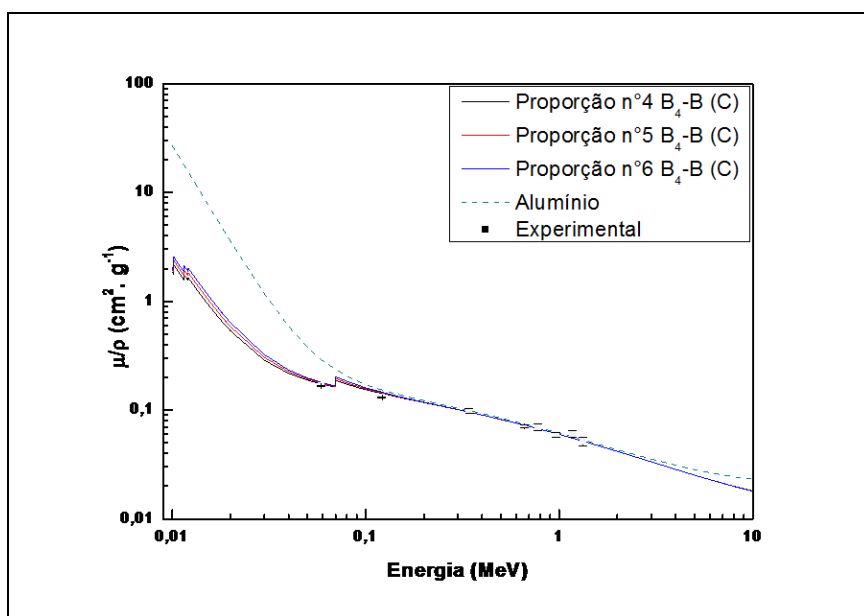


Figura 4.66 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para B₄C-B (C) para as proporções 4, 5 e 6.

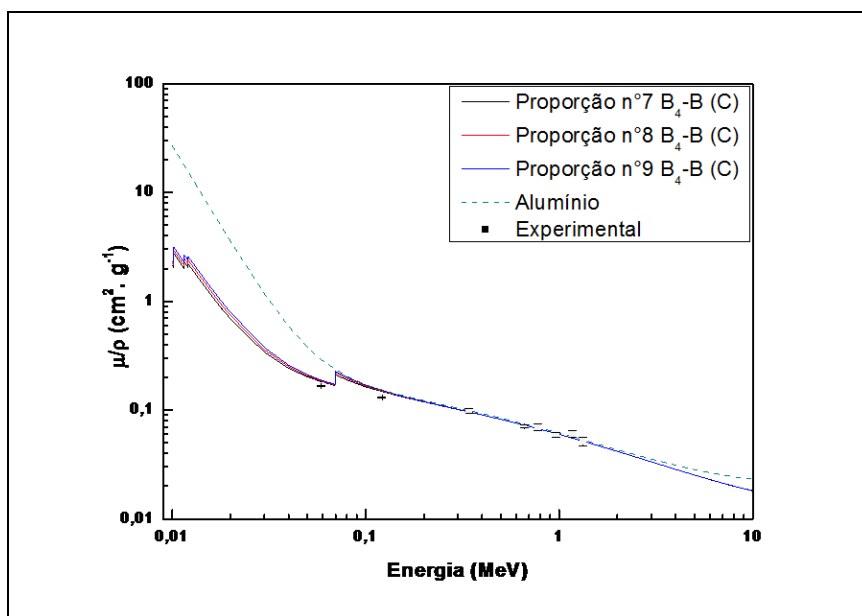


Figura 4.67 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para B₄C-B (C) para as proporções 7, 8 e 9.

Tabela 4.8 – Valores de coeficiente de atenuação mássico total μ/ρ (cm²/g) da cerâmica de B₄C-B (D) e do alumínio 6061-T6.

| Fonte | Energia (keV) | Coeficiente de atenuação mássico (cerâmica D) | | Diferença experimental-teórico (%) | Alumínio teórico (XCOM) (cm ² /g) | Alumínio Experimental (cm ² /g) |
|-------------------|------------------|---|-----------------------------------|------------------------------------|--|--|
| | | Experimental (cm ² /g) | Teórico XCOM (cm ² /g) | | | |
| ²⁴¹ Am | 59,537 ± 0,001 | 0,1577 ± 0,0018 | 0,1653 | 5 | 0,2907 | 0,3163 |
| ¹³⁷ Cs | 661,645 ± 0,009 | 0,0711 ± 0,0018 | 0,0726 | 2 | 0,0747 | 0,0771 |
| ⁶⁰ Co | 1173,238 ± 0,004 | 0,0617 ± 0,0038 | 0,0553 | 12 | 0,0568 | 0,0567 |
| | 1332,501 ± 0,005 | 0,0489 ± 0,0035 | 0,0518 | 6 | 0,0532 | 0,0546 |
| ¹⁵² Eu | 121,779 ± 0,003 | 0,1265 ± 0,0046 | 0,1060 | 7 | 0,1534 | 0,1576 |
| | 344,272 ± 0,007 | 0,0932 ± 0,0047 | 0,0953 | 2 | 0,0987 | 0,0986 |
| | 778,890 ± 0,016 | 0,0673 ± 0,0039 | 0,0674 | 0 | 0,0693 | 0,0686 |
| | 964,050 ± 0,003 | 0,0586 ± 0,0042 | 0,0609 | 4 | 0,0626 | 0,0627 |

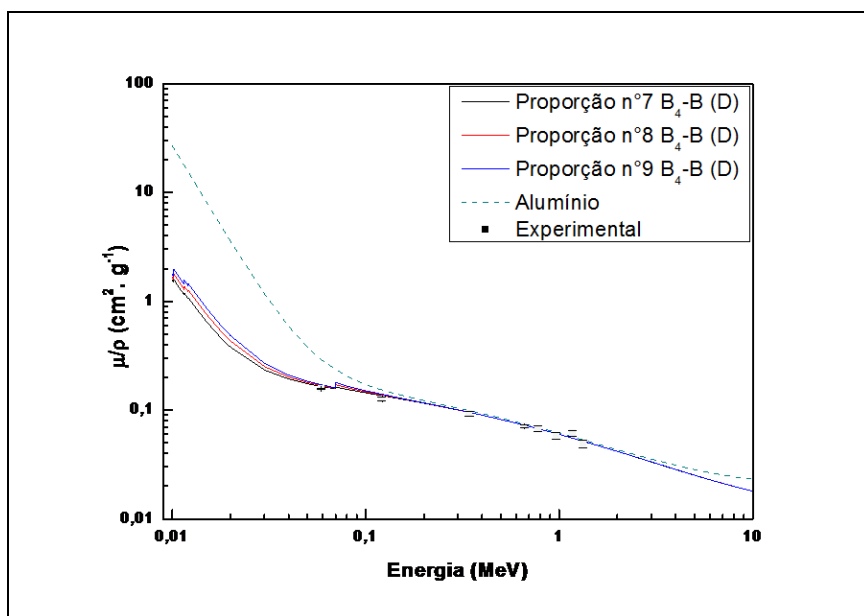


Figura 4.68 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para $\text{B}_4\text{C-B}$ (D) para as proporções 1, 2 e 3.

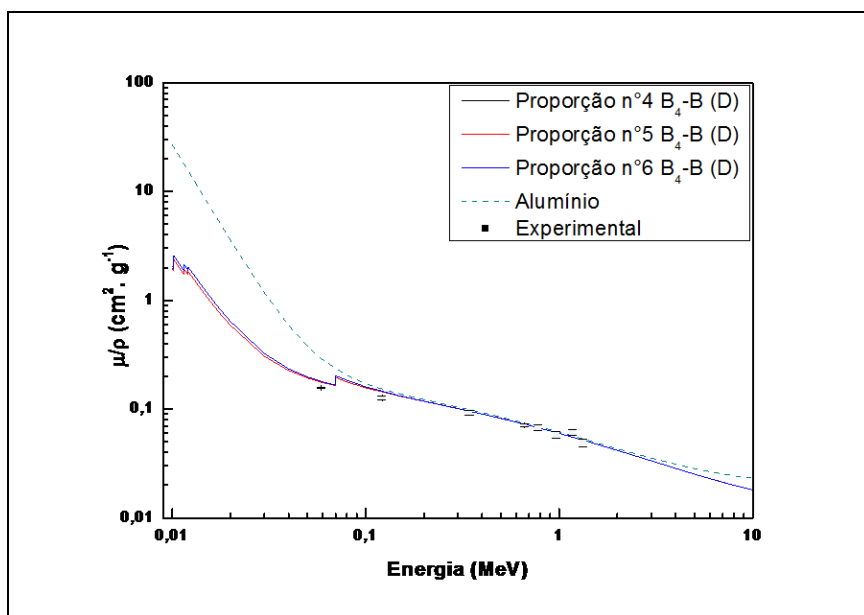


Figura 4.69 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para $\text{B}_4\text{C-B}$ (D) para as proporções 4, 5 e 6.

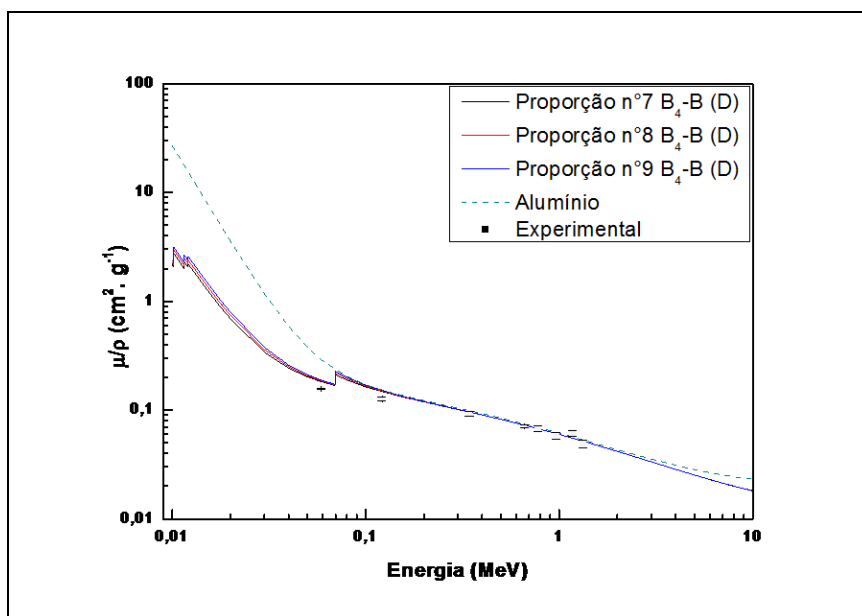


Figura 4.70 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para B₄C-B (D) para as proporções 7, 8 e 9.

Tabela 4.9 – Valores de coeficiente de atenuação mássico total μ/ρ (cm²/g) da cerâmica de B₄C-B (E) e do alumínio 6061-T6.

| Fonte | Energia (keV) | Coeficiente de atenuação mássico (cerâmica E) | | Diferença experimental-teórico (%) | Alumínio teórico (XCOM) (cm ² /g) | Alumínio Experimental (cm ² /g) |
|-------------------|------------------|---|-----------------------------------|------------------------------------|--|--|
| | | Experimental (cm ² /g) | Teórico XCOM (cm ² /g) | | | |
| ²⁴¹ Am | 59,537 ± 0,001 | 0,1475 ± 0,0026 | 0,1649 | 11 | 0,2907 | 0,3163 |
| ¹³⁷ Cs | 661,645 ± 0,009 | 0,0696 ± 0,0020 | 0,0726 | 4 | 0,0747 | 0,0771 |
| ⁶⁰ Co | 1173,238 ± 0,004 | 0,0574 ± 0,0048 | 0,0553 | 4 | 0,0568 | 0,0567 |
| | 1332,501 ± 0,005 | 0,0507 ± 0,0062 | 0,0518 | 2 | 0,0532 | 0,0546 |
| ¹⁵² Eu | 121,779 ± 0,003 | 0,1402 ± 0,0033 | 0,1360 | 3 | 0,1534 | 0,1576 |
| | 344,272 ± 0,007 | 0,0967 ± 0,0039 | 0,0953 | 1 | 0,0987 | 0,0986 |
| | 778,890 ± 0,016 | 0,0662 ± 0,0038 | 0,06740 | 2 | 0,0693 | 0,0686 |
| | 964,050 ± 0,003 | 0,0593 ± 0,0036 | 0,0609 | 3 | 0,0626 | 0,0627 |

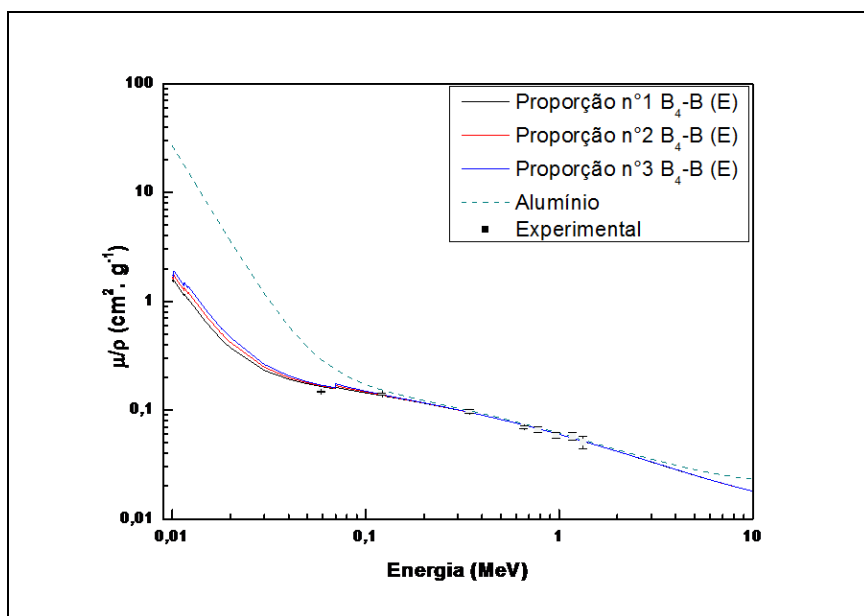


Figura 4.71 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para $\text{B}_4\text{C-B}$ (E) para as proporções 1, 2 e 3.

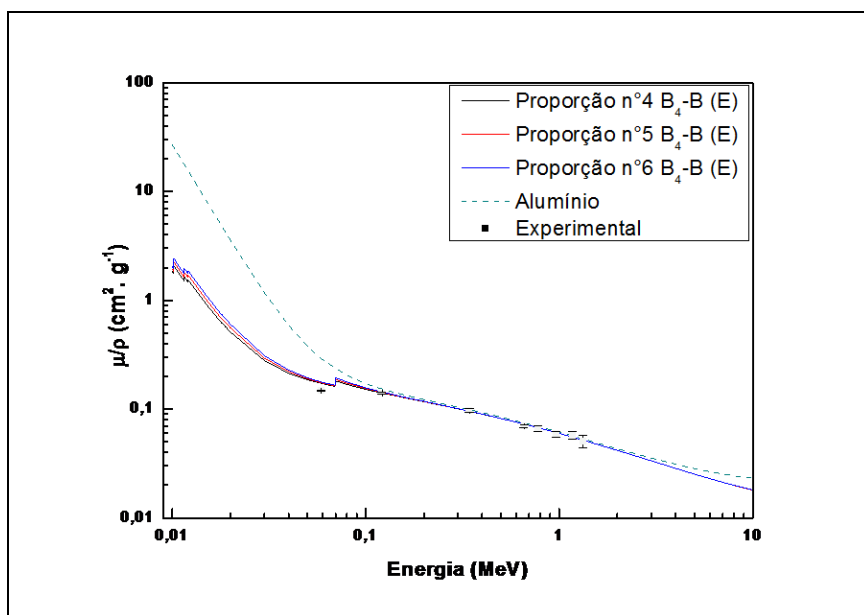


Figura 4.72 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para $\text{B}_4\text{C-B}$ (E) para as proporções 4, 5 e 6.

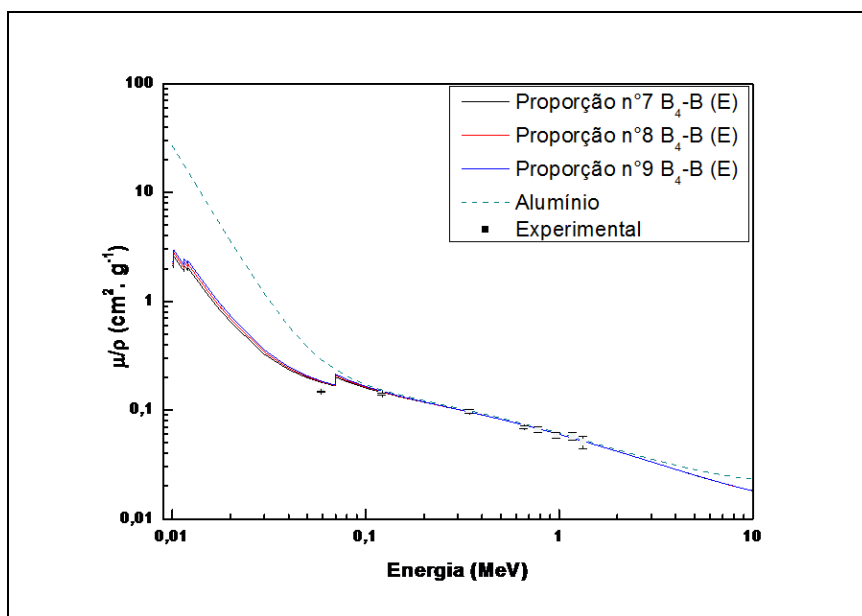


Figura 4.73 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos experimentalmente com os teóricos, obtidos por meio do programa XCOM para B₄C-B (E) para as proporções 7, 8 e 9.

Os corpos de prova, com diferentes espessuras foram irradiados por fótons emitidos de fontes radioativas diferentes com energias variando de 59,537 a 1332,501 keV conforme indicado na Tabela 3.5. As intensidades dos fótons transmitidos através dos corpos foram contadas por um sistema de espectroscopia gama de alta resolução. Os gráficos experimentais e os respectivos pontos foram apresentados e comparados com valores de μ calculados pelo programa XCOM. De maneira geral, pode-se observar pelos resultados obtidos nas tabelas e gráficos para espectroscopia gama que os valores de atenuação obtidos para cerâmicas de B₄C-B são ligeiramente inferiores aos do alumínio, em um intervalo de 0,02 a 1,5 MeV, evidenciando que os materiais são praticamente equivalentes para atenuação de radiação gama, com pequena vantagem para o alumínio, em termos de atenuação por unidade de massa. É possível observar a presença de desvios encontrados nos valores experimentais quando comparados com as simulações teóricas. Uma possível explicação pode ser a falta de uniformidade e homogeneidade nos corpos de prova [64].

4.5 Resultados da atenuação de nêutrons rápidos

A Tabela 4.12 mostra os valores dos coeficientes de atenuação mássico para nêutrons rápidos (μ/ρ) e do coeficiente de atenuação mássico total (μ) do $^{241}\text{Am}-\text{Be}$ que atravessaram as cerâmicas de $\text{B}_4\text{C}-\text{B}$ e o alumínio.

Tabela 4.10 - Valores teóricos e experimentais de μ/ρ e μ para nêutrons rápidos transmitidos através das cerâmicas de $\text{B}_4\text{C}-\text{B}$ e do alumínio.

| Cerâmica | Densidade($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | μ/ρ Experimental ($\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$) | μ/ρ Teórico ($\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$) | Diferença μ/ρ (%) | μ Experimental (cm^{-1}) |
|----------------------------|--|---|--|--------------------------|---|
| B₄C-B(A) | 1,46±0,03 | 0,126±0,010 | 0,1078 | 14,4 | 0,183±0,02 |
| B₄C-B(B) | 1,40±0,03 | 0,133±0,010 | 0,1081 | 18,7 | 0,159±0,02 |
| B₄C-B(C) | 1,38±0,03 | 0,110±0,010 | 0,1085 | 1,4 | 0,151±0,02 |
| B₄C-B(D) | 1,32±0,03 | 0,106±0,010 | 0,1088 | 2,6 | 0,139±0,02 |
| B₄C-B(E) | 1,24±0,02 | 0,095±0,010 | 0,1091 | 12,9 | 0,118±0,02 |
| Alumínio | 2,72±0,01 | 0,051±0,012 | 0,058 | 12,1 | 0,139±0,02 |

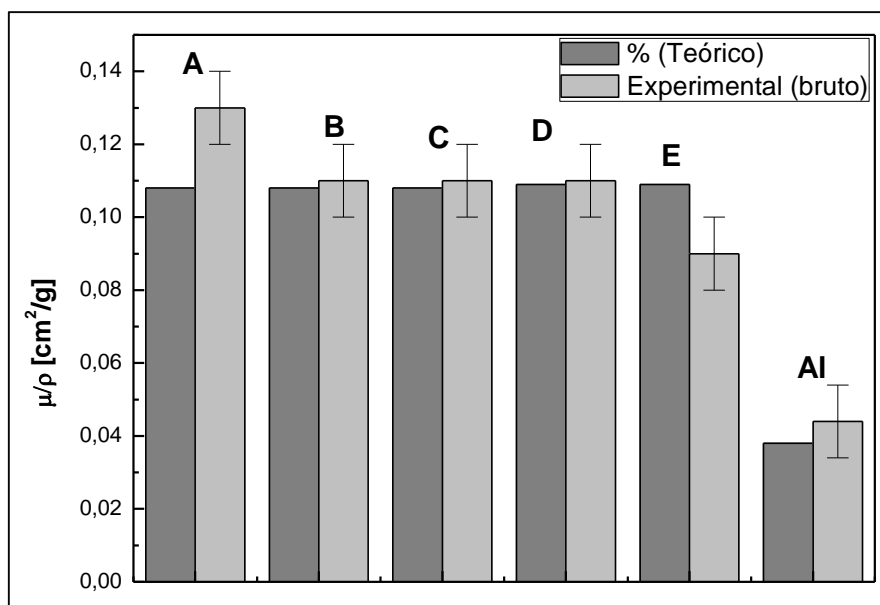


Figura 4.74 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássico obtidos para as cerâmicas e o alumínio.

Observa-se, dos dados apresentados, uma boa concordância entre os valores experimentais e os valores teóricos que, na maioria dos casos, está dentro de 1 desvio padrão do valor experimental e, no caso mais extremo, mostra uma discrepância de 18,7% e inferior a 2 desvios padrões do valor experimental (Figura 4.74). Na comparação com o material de referência (alumínio), observa-se que os compostos à base de B₄C-B atenuam praticamente 100% a mais do que o alumínio, demonstrando ser um bom atenuador de nêutrons rápidos espalhados.

4.6 Análise dos dados de atenuação de nêutrons térmicos

A Figura 4.75 mostra os valores das taxas de contagem líquidas do fluxo de nêutrons rápidos (μ/ρ) e do coeficiente de atenuação total (μ) do ²⁴¹Am-Be que atravessaram as cerâmicas à base de B₄C-B e o alumínio.

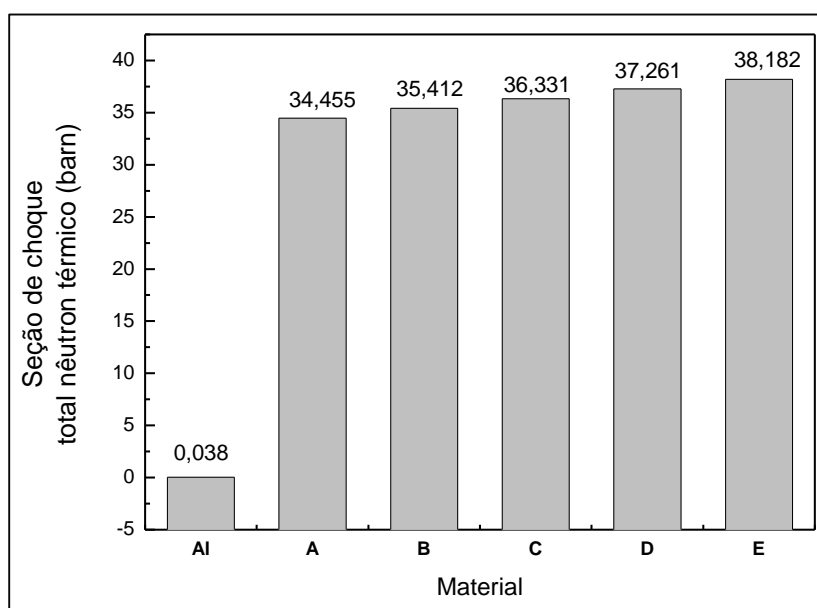


Figura 4.75 – Comparação dos coeficientes de atenuação mássicos para nêutrons térmicos obtidos para as cerâmicas e o alumínio.

Estes resultados indicam a superioridade das cerâmicas na capacidade de atenuação de nêutrons térmicos em relação ao alumínio. É possível observar também o aumento do coeficiente de atenuação em função das distintas concentrações de B₄C como material base, sendo menor na cerâmica A e crescente até a cerâmica E.

As planilhas com os resultados dos cálculos teóricos da seção de choque total para neutros térmicos para o alumínio e para as cerâmicas A, B, C, D e E são apresentados no Apêndice B. O cálculo baseia-se no coeficiente de cada isótopo presente na composição do material, ponderado pela sua participação na mistura. O resultado experimental do coeficiente de atenuação mássico para nêutrons térmicos para o alumínio é mostrado na Tabela 4.13, e foi baseado nos valores das taxas de contagem líquidas do fluxo de nêutrons rápidos do $^{241}\text{Am-Be}$ que atravessaram o alumínio.

Tabela 4.11– Valores experimentais obtidos para o cálculo da seção de choque total para nêutrons térmicos para o alumínio.

| Fonte | Material | Espessura (g.cm ⁻²) | Taxa de contagem (contagens/s) | Ln I ₀ /I | ρ (g.cm ⁻³) Al Teórico | μ/ρ total (cm ² /g) Al | μ (cm ⁻¹) Al |
|----------------------|----------|------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|--|--|---------------------------------|
| $^{241}\text{Am-Be}$ | ----- | 0,000±0,000 | 0,99±0,01 | 0,00 | ----- | ----- | ----- |
| | Al | 1,145±0,023 | 0,91±0,06 | 0,08±0,02 | 2,72 | 0,04±0,01 | 0,10±0,01 |

Da comparação entre o resultado teórico (0,038 cm²/g, Apêndice B) com o resultado experimental (0,04 cm²/g ± 0,01 cm²/g), pode-se observar uma boa concordância entre os valores obtidos, permitindo confirmar a validade da metodologia de estimativa teórica do coeficiente de atenuação mássico. Assim, nas Tabelas B.2 a B.6 (Apêndice B) são apresentadas as estimativas teóricas para as diferentes composições de B₄C-B, uma vez que, como já comentado anteriormente, não é possível fazer estimativa experimental desse parâmetro com a metodologia utilizada, devido à alta capacidade de absorção de nêutrons térmicos do B₄C-B. Na Tabela 4.14 são sumarizados os resultados para todas as composições de B₄C-B e alumínio.

Tabela 4.12 – Comparação dos valores teóricos da seção de choque total para nêutrons térmicos para as cerâmicas de B₄C-B e o alumínio.

| Material | ρ (g.cm ⁻³) | Coeficiente de atenuação total teórico | |
|-----------------------|------------------------------|--|---------------------|
| | | (cm ² /g) | (cm ⁻¹) |
| B ₄ C-B(A) | 1,4 6±0 ,03 | 34,45 | 50,30 |
| B ₄ C-B(B) | 1,40 ± 0,03 | 35,41 | 49,57 |
| B ₄ C-B(C) | 1,38 ± 0,03 | 36,33 | 50,14 |
| B ₄ C-B(D) | 1,3 2± 0,03 | 37,26 | 49,18 |
| B ₄ C-B(E) | 1,24 ± 0,02 | 38,18 | 47,34 |
| Al | 2,72 ± 0,01 | 0,038 | 0,10 |

4.7 Simulações e propriedades de atenuação da radiação em órbita

Nos itens 4.8 a 4.10.6 a seguir são avaliadas as propriedades de atenuação da radiação incidente na órbita definida para a missão, conforme citado no item 3.6. Os espectros de partículas incidentes e emergentes foram obtidos por meio do código SPENVIS, já citado, e os cálculos dos fluxos e energias das radiações emergentes foram realizados conforme definido no capítulo 3. Os tipos de radiações avaliadas englobaram todas as radiações transmitidas ou produzidas pela radiação primária nos materiais de blindagem, que podem ser calculadas pela ferramenta MULASSIS do código SPENVIS. Foram realizadas simulações com as composições de B₄C-B variando de 10% a 50% de boro, assim como com uma blindagem de alumínio, para fins de comparação. Todas as simulações foram realizadas para uma espessura de blindagem de 1 g/cm², de forma a ser possível comparar as propriedades dos materiais como blindagem, em função da mesma densidade superficial de massa. Os tipos de radiações incidentes analisadas foram elétrons e prótons, originadas tanto do Cinturão de Van Allen, quanto dos Raios Cósmicos Galácticos.

4.8 Elétrons provenientes do cinturão de Van Allen

As Figuras 4.76 a 4.81 apresentam os espectros, fluxos e energia média das partículas emergentes do material de blindagem, provenientes de elétrons aprisionados no cinturão de Van Allen.

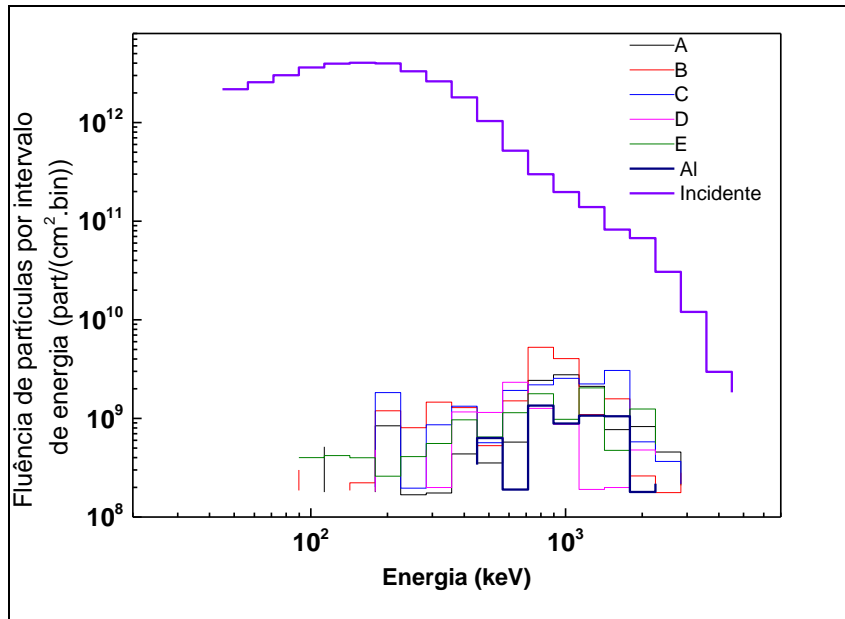


Figura 4.76 – Espectro de energia de elétrons incidentes e emergentes.

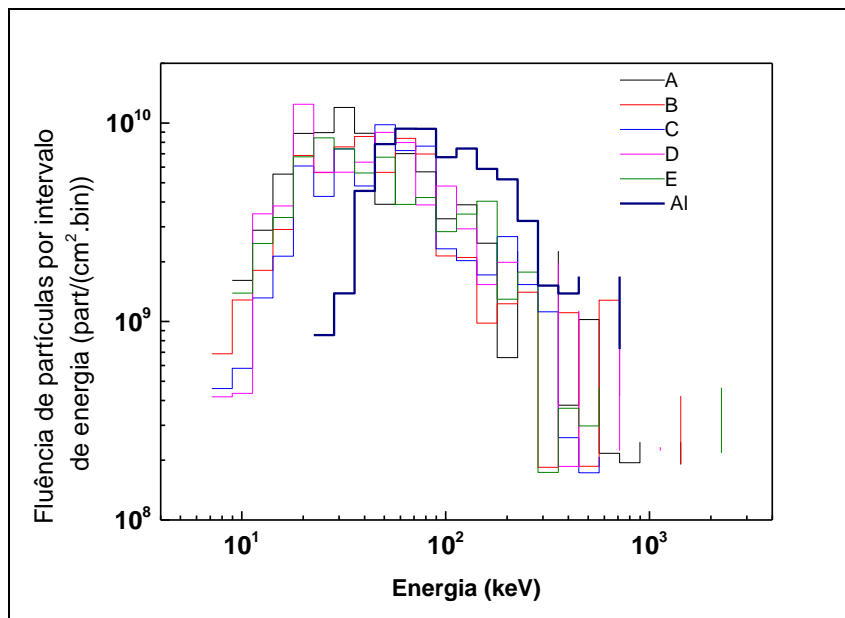


Figura 4.77 – Espectro de energia de fótons emergentes.

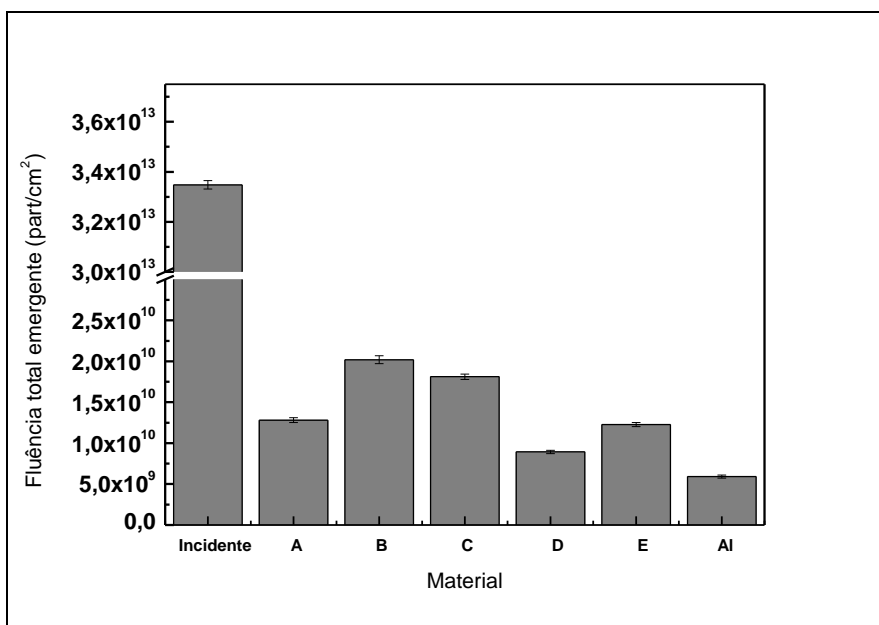


Figura 4.78 – Fluência total de elétrons incidentes e emergentes

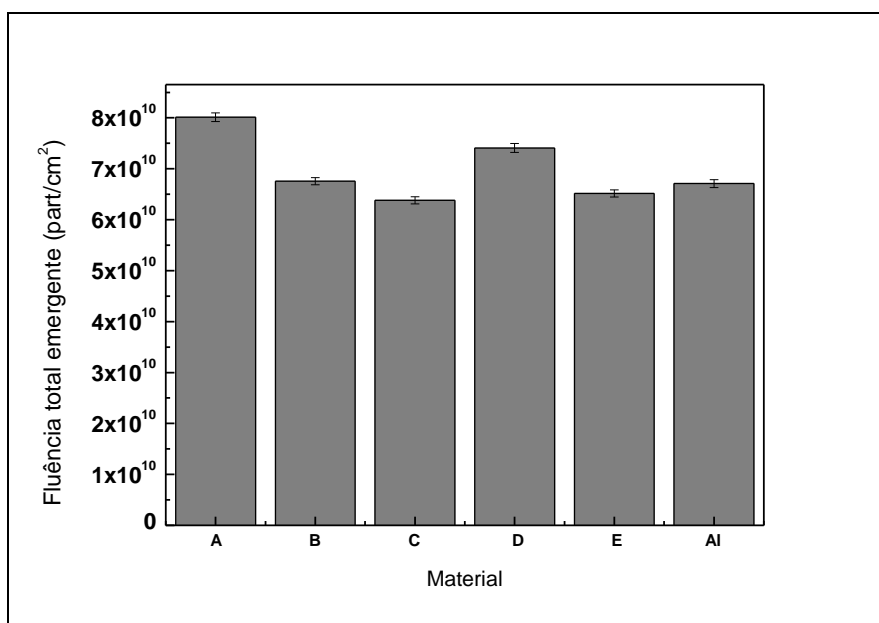


Figura 4.79 – Fluência total de fótons emergentes

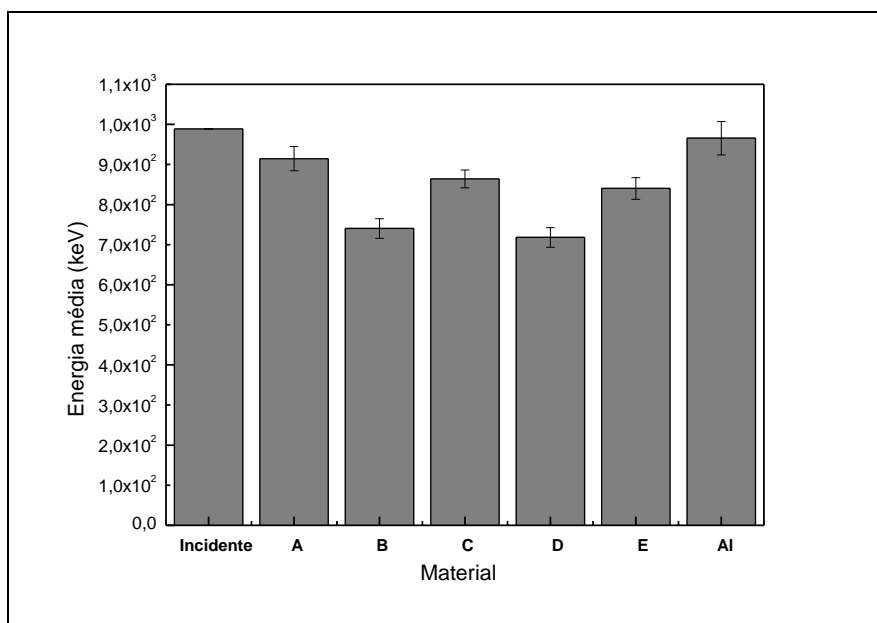


Figura 4.80 – Energia média dos elétrons incidentes e emergentes

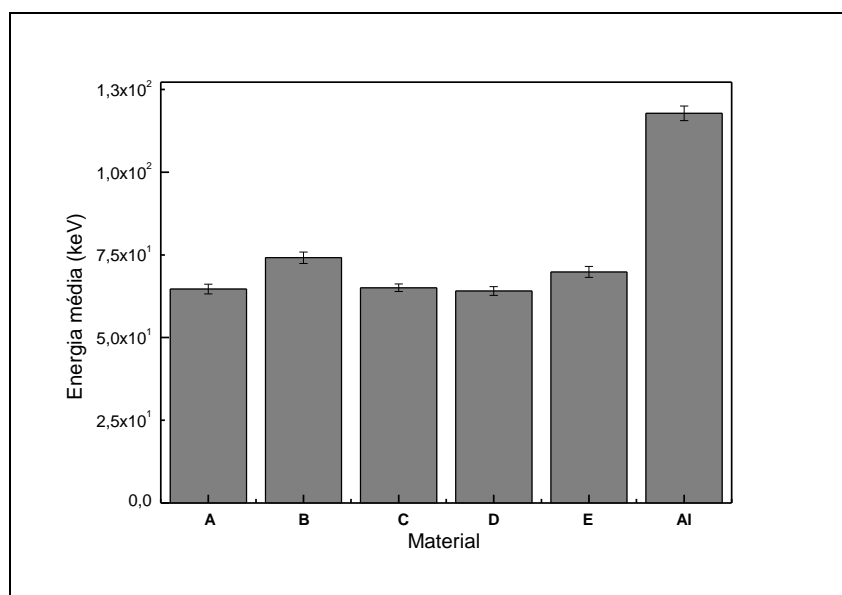


Figura 4.81 – Energia média dos fótons emergentes

Pode-se observar, das Figuras 4.76 a 4.81, que os compostos de B₄C-B produzem uma maior quantidade de elétrons emergentes para a mesma densidade superficial de massa, mas com energia média inferior à do espectro emergente do alumínio. Já para a radiação de fótons (gama e raios X) transmitida, observa-se que os compostos de B₄C-B produzem aproximadamente a mesma atenuação que o alumínio, mas a radiação emergente possui uma energia sensivelmente menor.

4.9 Prótons provenientes do cinturão de Van Allen

As Figuras 4.81 a 4.83 apresentam os espectros, fluxos e energia média das partículas emergentes do material de blindagem, provenientes de prótons aprisionados no cinturão de Van Allen.

4.9.1 Prótons emergentes

Das Figuras 4.82 a 4.84 pode-se observar uma grande redução na quantidade total de prótons emergentes, sendo esta redução mais acentuada para prótons de baixas energias (menor do que 10 MeV). Esta redução depende da espessura de material utilizado e da energia do próton incidente, uma vez que o próton é eliminado do feixe sempre que seu alcance é inferior do que a espessura de material a ser atravessado. Importante observar que não há diferenças significativas entre a transmissão de prótons no alumínio e nas cerâmicas de B₄C-B.

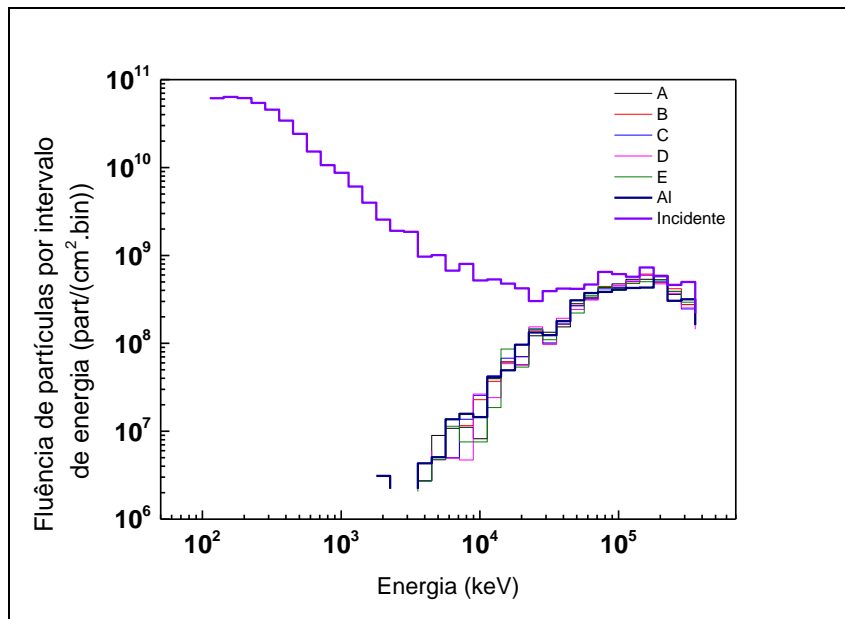


Figura 4.82 – Espectro de energia de prótons incidentes e emergentes.

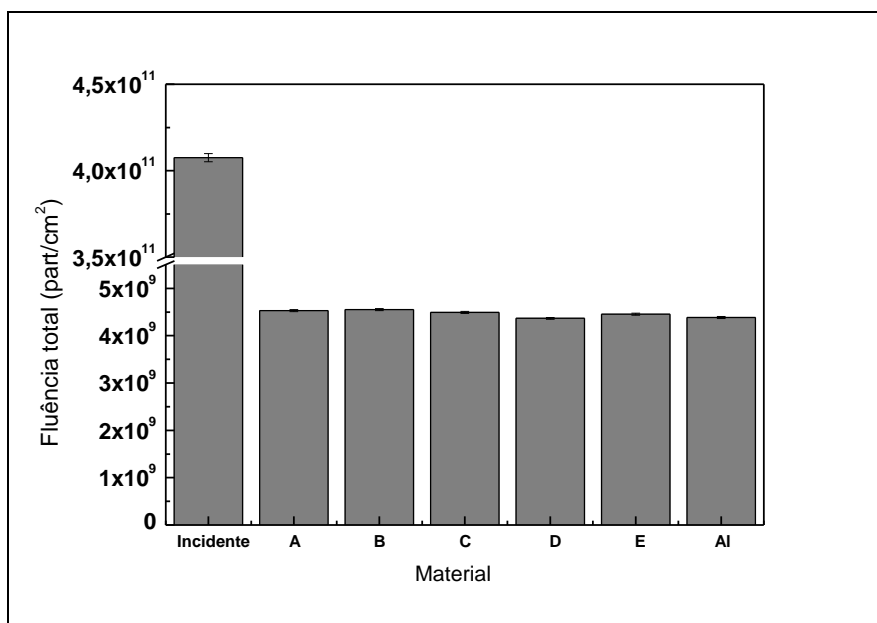


Figura 4.83 – Fluência total de prótons incidentes e emergentes.

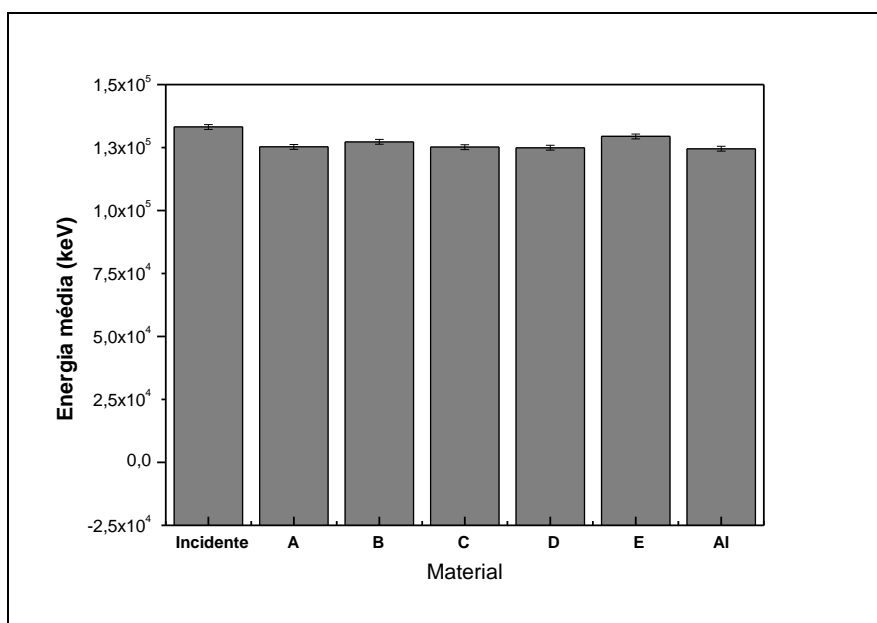


Figura 4.84 – Energia média dos prótons incidentes e emergentes.

4.9.2 Nêutrons emergentes

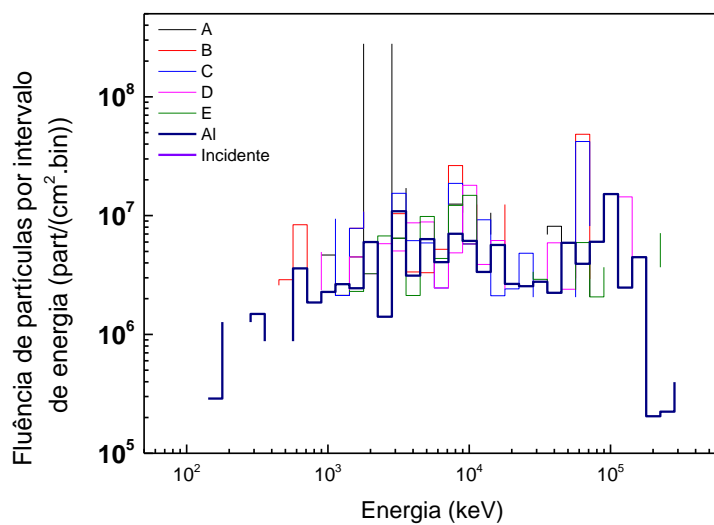


Figura 4.85 – Espectro de energia de nêutrons emergentes

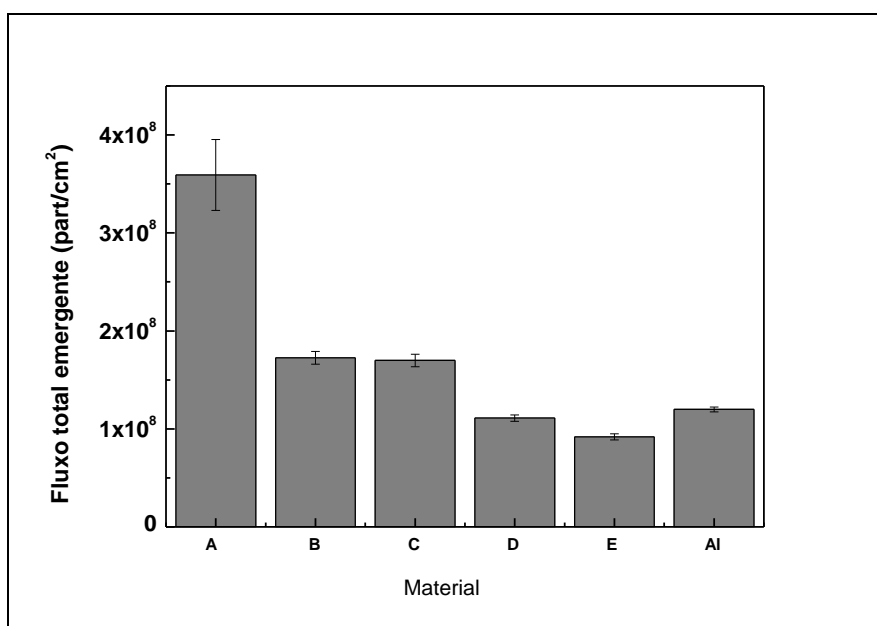


Figura 4.86 - Fluência total de nêutrons emergentes.

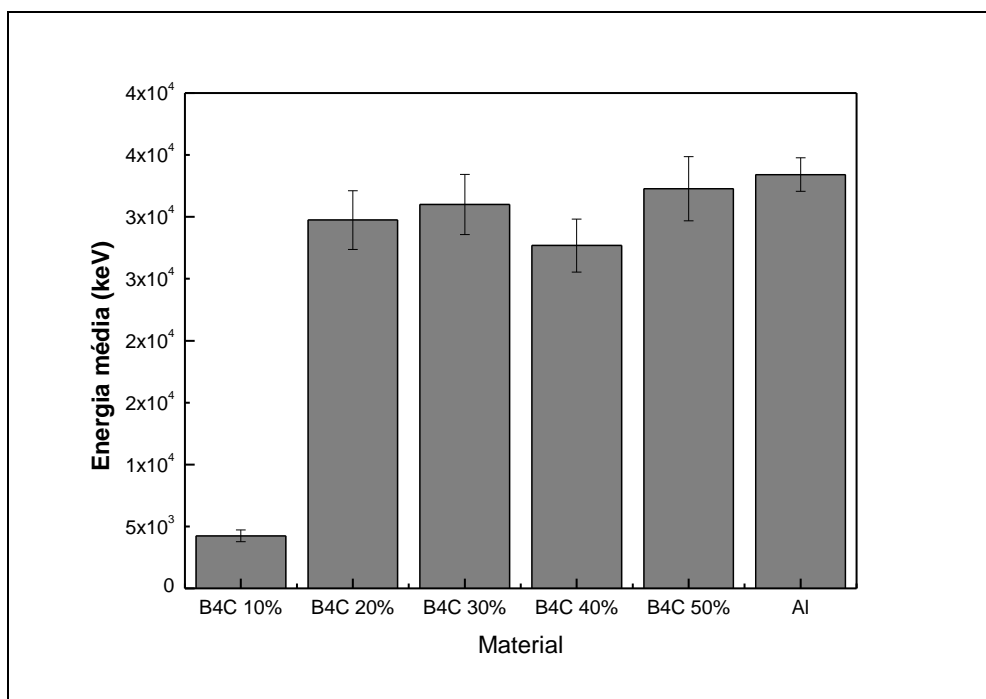


Figura 4.87 – Energia média dos nêutrons emergentes.

Das Figuras 4.85 a 4.87 pode-se observar que a fluência acentuada de nêutrons emergentes para a cerâmica A, já à energia média é menor para todas as concentrações à base de B₄C em relação ao alumínio.

4.9.3 Elétrons emergentes

Das Figuras 4.88 a 4.90 pode-se observar que a fluência de elétrons emergentes, produzidos por prótons é maior do que no material de referência (alumínio) para todas as concentrações de boro, muito embora para a concentração de 50 % os resultados sejam muito próximos ao alumínio. Entretanto, observa-se, da Figura 4.87, que a energia média dos elétrons produzidos é, em média, cerca de 45 % menor para as cerâmicas de B₄C-B.

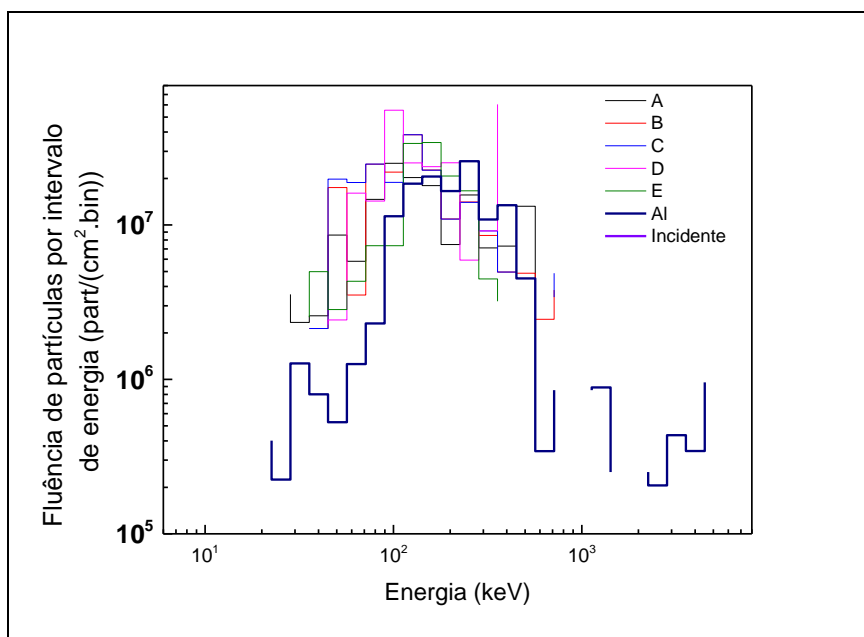


Figura 4.88 – Espectro de energia dos elétrons emergentes.

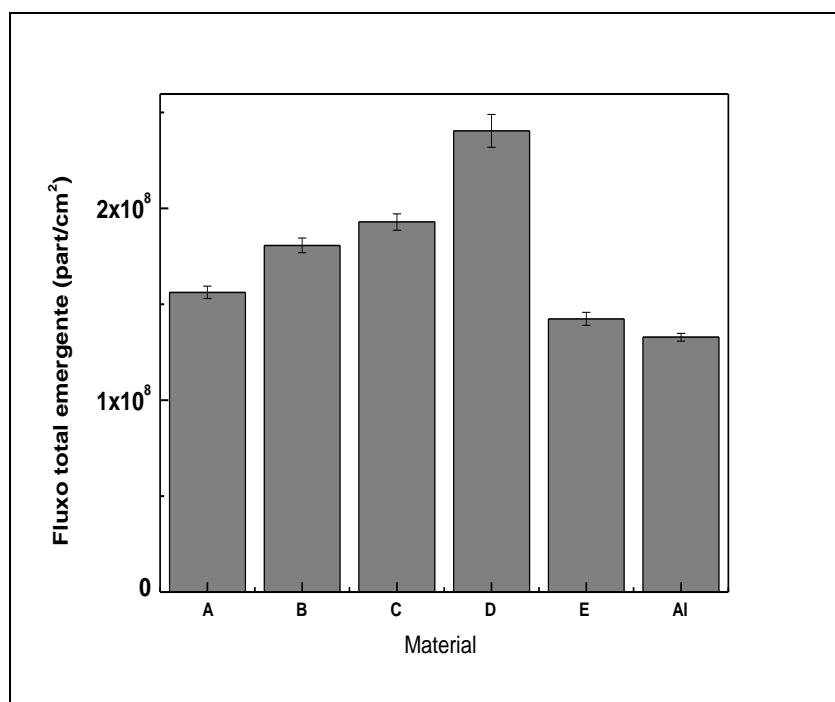


Figura 4.89 - Fluência total de elétrons emergentes.

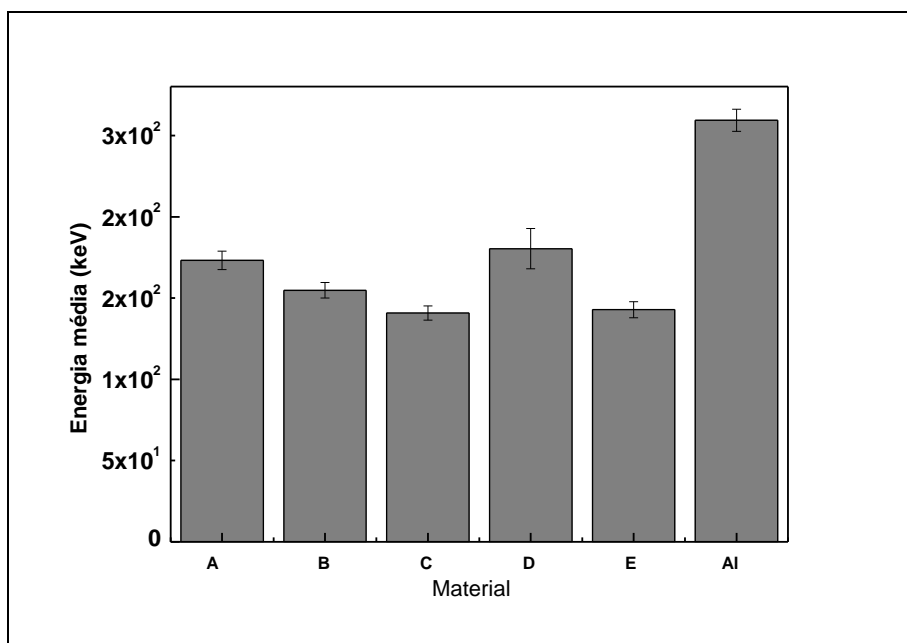


Figura 4.90 – Energia média dos elétrons emergentes.

4.9.4 Fótons emergentes

Nas Figuras 4.91 a 4.93 observa-se uma redução bastante acentuada (mais de 70 %) na produção de fótons secundários nos compostos de B₄C-B, em relação ao material de referência (alumínio), não tendo havido diferenças significativas na energia média dos fótons produzidos.

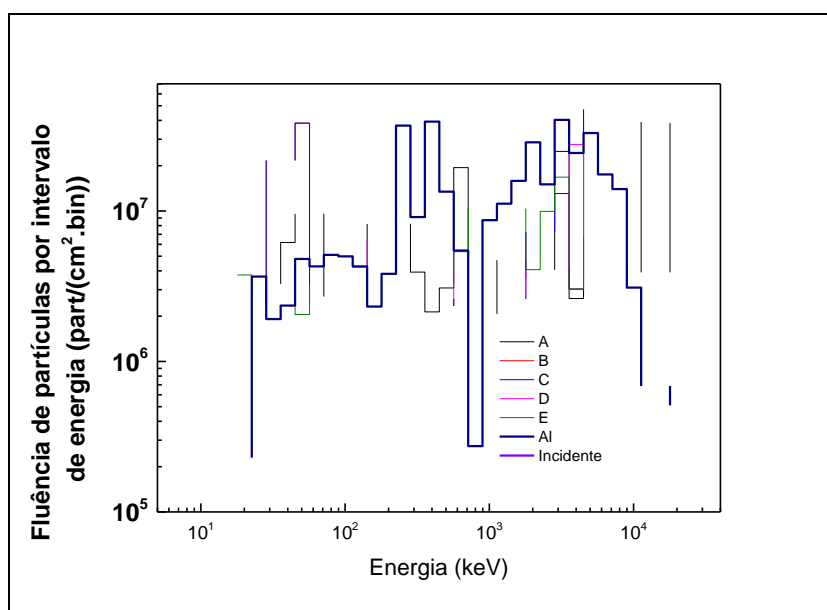


Figura 4.91 – Espectro radiação de gama emergente.

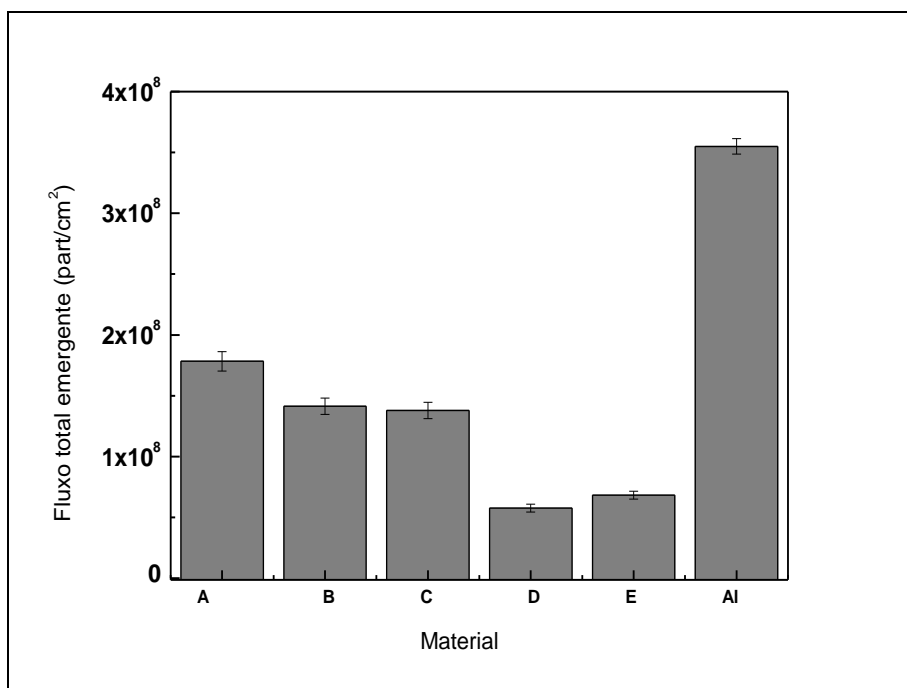


Figura 4.92 - Fluência total de radiação gama emergente.

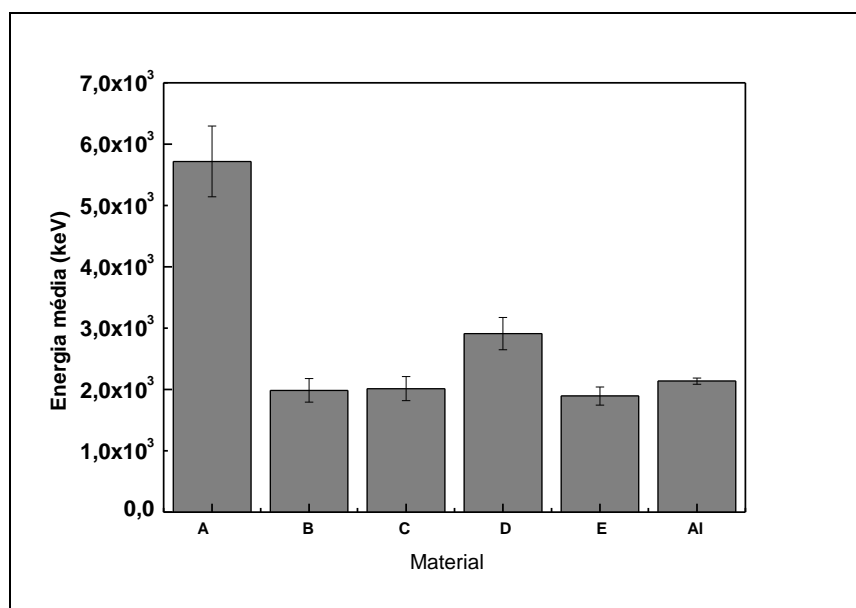


Figura 4.93 – Energia média dos gamas emergentes

4.9.5 Píons e múons emergentes

Devido à baixa energia média das partículas provenientes do cinturão de radiação de Van Allen, não existe a produção de píons e múons nestes casos.

4.10 Prótons, nêutrons, elétrons, múons e píons provenientes da radiação cósmica galáctica

As Figuras 4.94 a 4.112 apresentam os espectros, fluxos e energia média das partículas emergentes do material de blindagem, provenientes de prótons oriundos de radiação cósmica galáctica.

4.10.1 Prótons

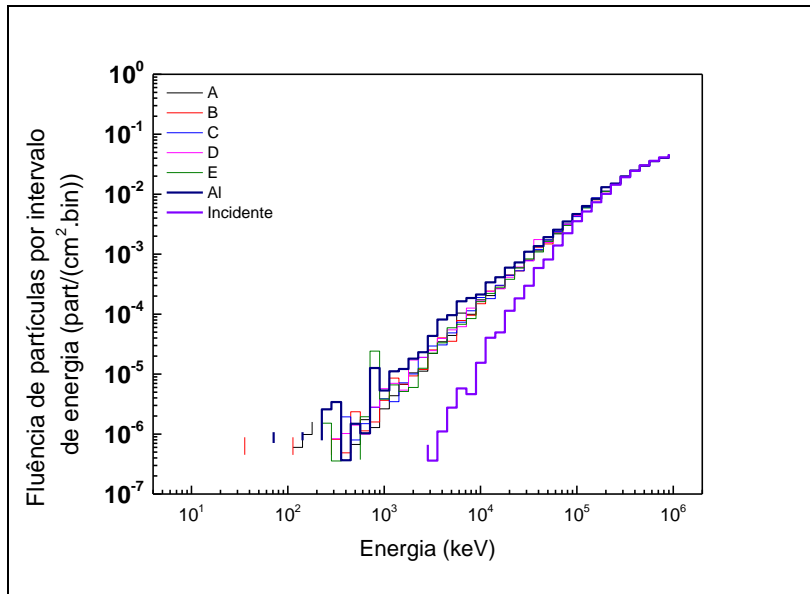


Figura 4.94 – Espectro de energia dos prótons incidentes e emergentes.

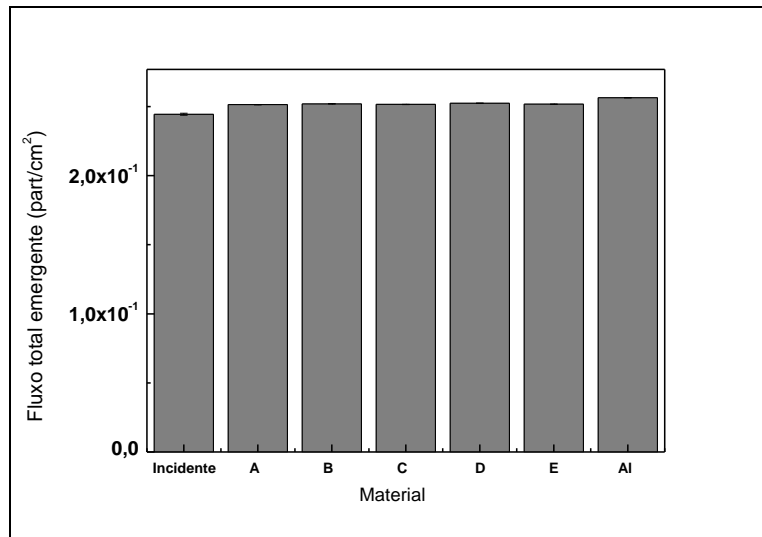


Figura 4.95 - Fluência total de prótons incidentes e emergentes.

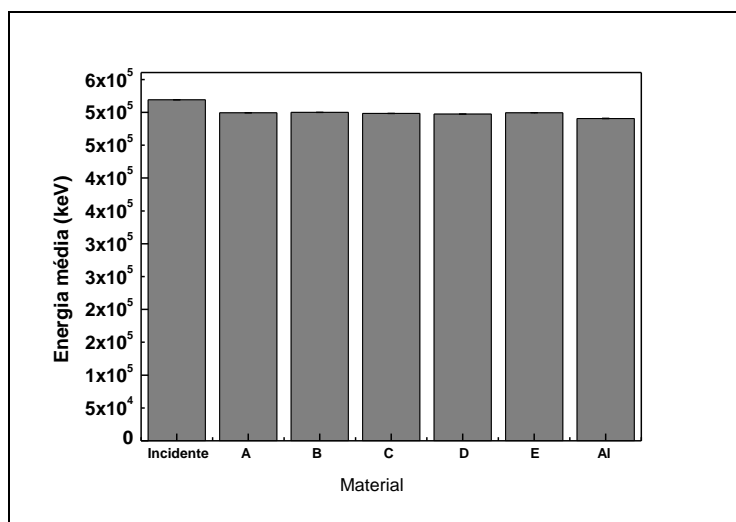


Figura 4.96 – Energia média dos prótons incidentes e emergentes.

Das Figuras 4.94 a 4.96 não se observam diferenças significativas entre as fluências e energias dos prótons transmitidos no alumínio e nas cerâmicas de B₄C-B. Em ambos os materiais, os prótons de menor energia são possuem maior probabilidade de serem retidos pela blindagem, conforme já explicado anteriormente.

4.10.2 Nêutrons

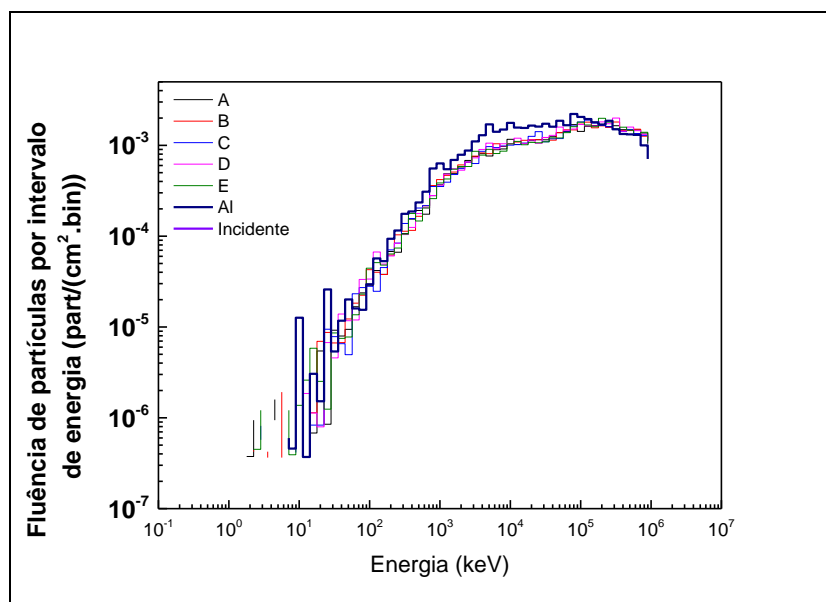


Figura 4.97 – Espectro de energia dos nêutrons emergentes.

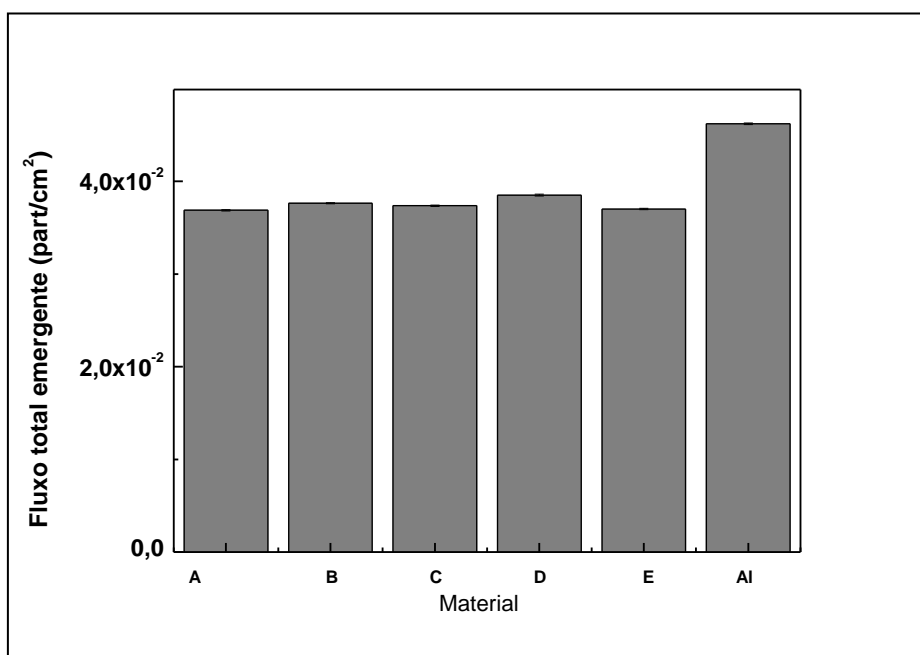


Figura 4.98 - Fluência total de nêutrons emergentes.

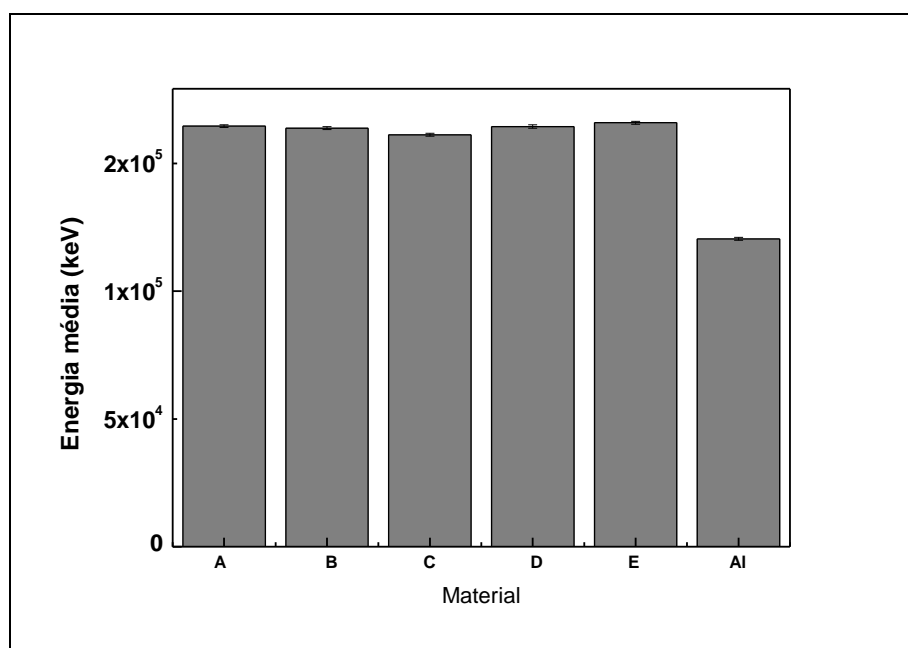


Figura 4.99 – Energia média dos nêutrons emergentes

Para o caso de nêutrons produzidos pela interação dos prótons de alta energia no material de blindagem (Figuras 4.97 a 4.99) , observa-se que o alumínio proporciona uma maior fluência de nêutrons emergentes, (cerca de 20% a mais do que o B₄C-B), entretanto os nêutrons emergentes possuem uma menor energia média, em comparação com o B₄C-B (cerca de 30% a menos do que o B₄C-B).

4.10.3 Elétrons

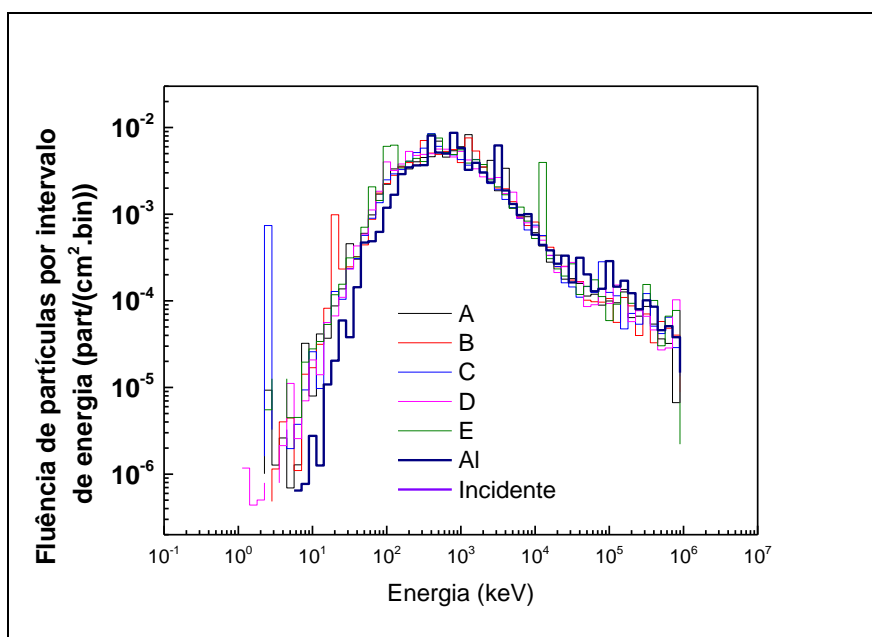


Figura 4.100 – Espectro de energia dos elétrons emergentes.

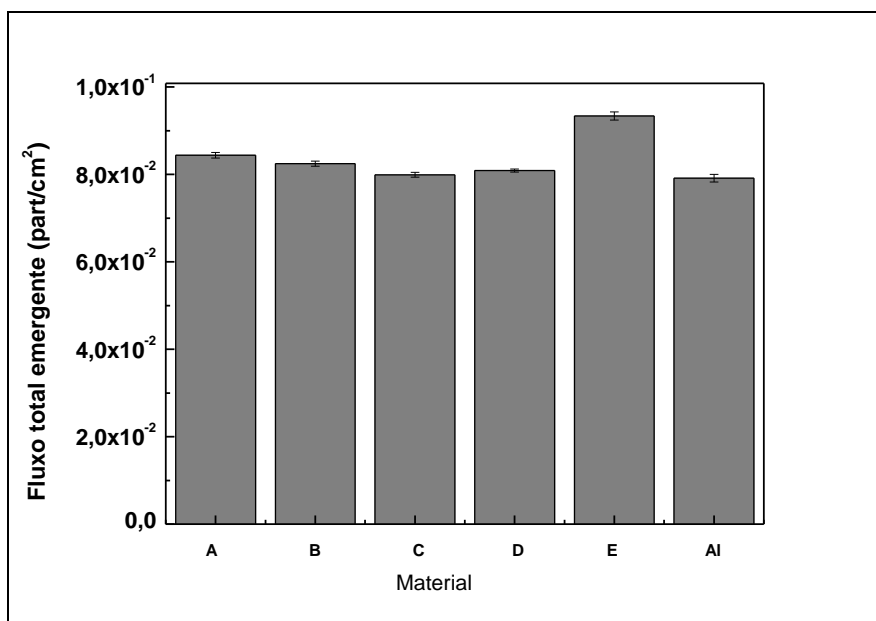


Figura 4.101 - Fluência total de elétrons emergentes.

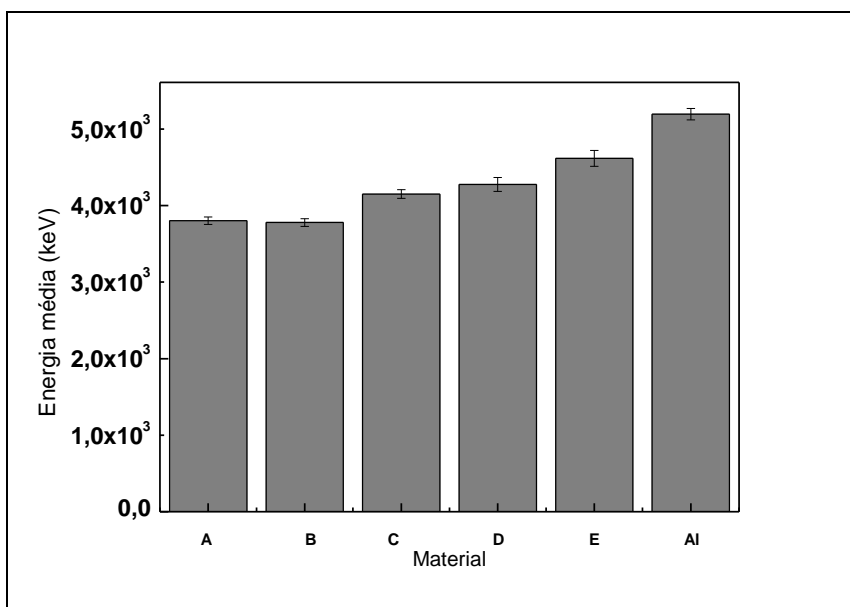


Figura 4.102 – Energia média dos elétrons emergentes.

Nas Figuras 4.100 a 4.102 observa-se que não há diferença significativa na fluência de elétrons transmitidos nos compostos de B₄C-B e alumínio. Entretanto, as energias médias dos elétrons emergentes são maiores no alumínio em relação aos compostos de B₄C-B, com diferenças que variam de cerca de 13% a cerca de 36% para as cerâmicas de B₄C-B (D) e B₄C-B (A), respectivamente.

4.10.4 Radiação gama

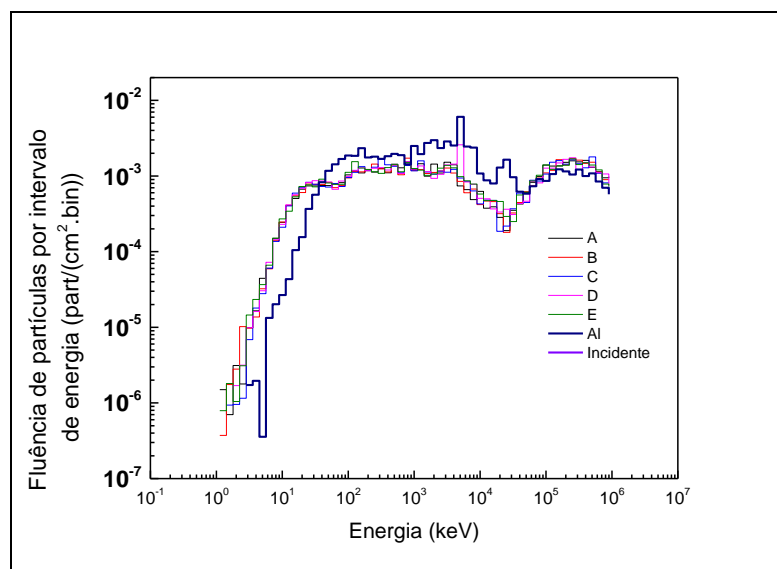


Figura 4.103 – Espectro energia de radiação gama emergente.

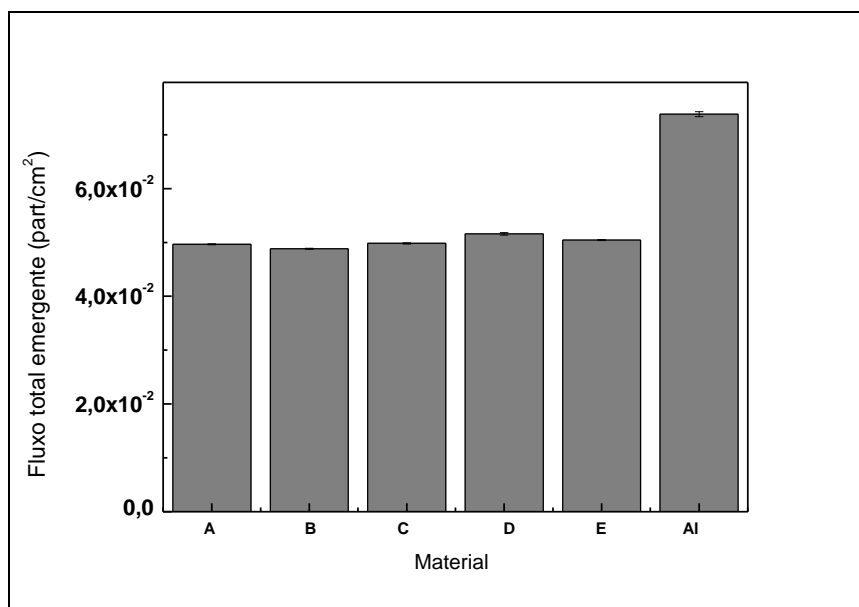


Figura 4.104 - Fluência total de fótons emergentes.

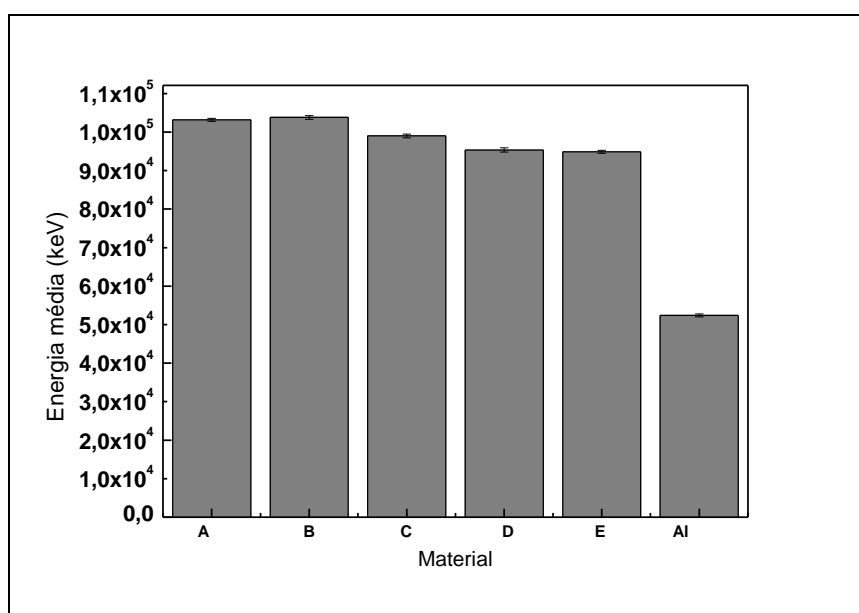


Figura 4.105 – Energia média dos gamas emergentes.

Nas Figuras 4.102 a 4.105 observa-se um maior fluxo de fótons para o alumínio com energia média menor que a dos compostos à base de B₄C.

4.10.5 Múons

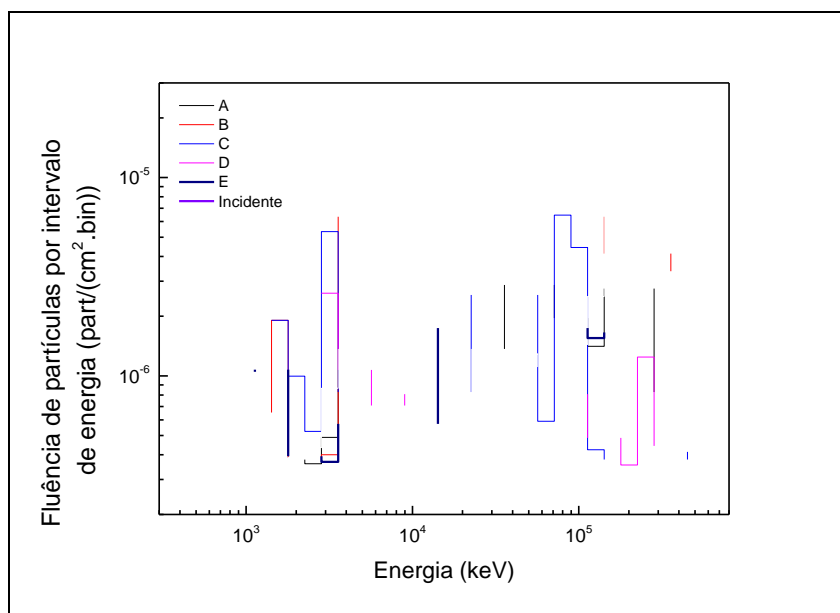


Figura 4.106 – Espectro de energia dos múons emergentes.

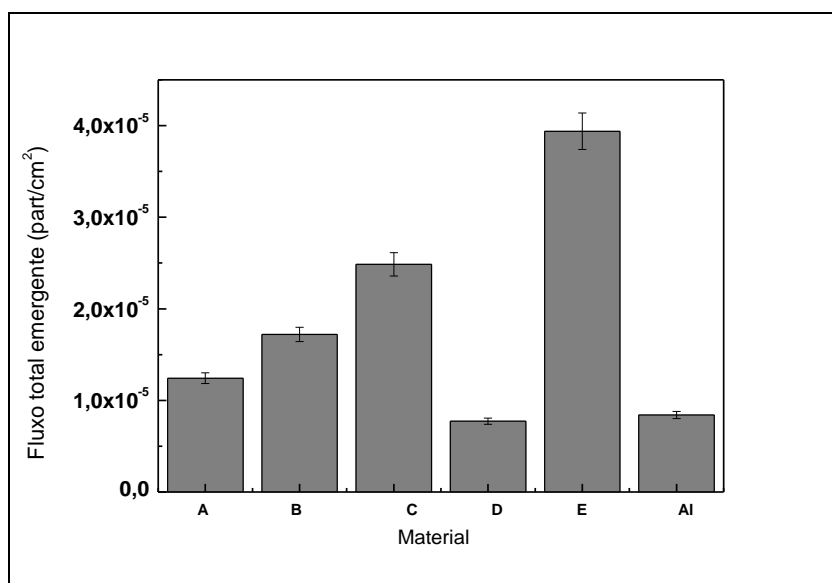


Figura 4.107 - Fluência total de múons emergentes.

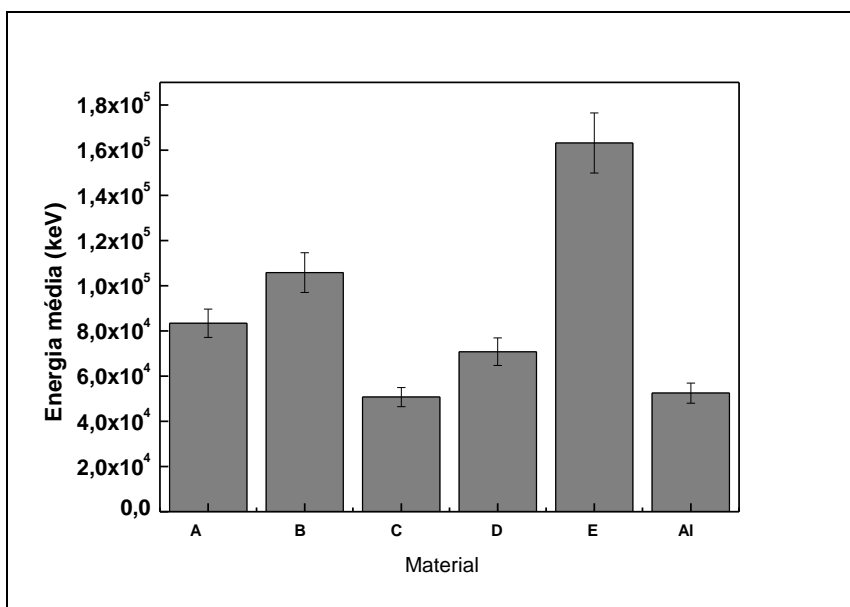


Figura 4.108 – Energia média dos múons emergentes

Os resultados (Figuras 4.106 a 4.108) indicaram que a emissão e energia dos múons apresenta valores menores no alumínio do que nos compostos de B₄C-B, entretanto não pode ser observado um comportamento sistemático, de forma que pouco se pode concluir das simulações realizadas para múons emergentes.

4.10.6 Píons

As Figuras 4.109 a 4.111 apresentam espectros de energia fluxo e energia média dos píons emergentes. Observa-se que as energias médias estão muito próximas entre si tanto nas cerâmicas, quanto no alumínio.

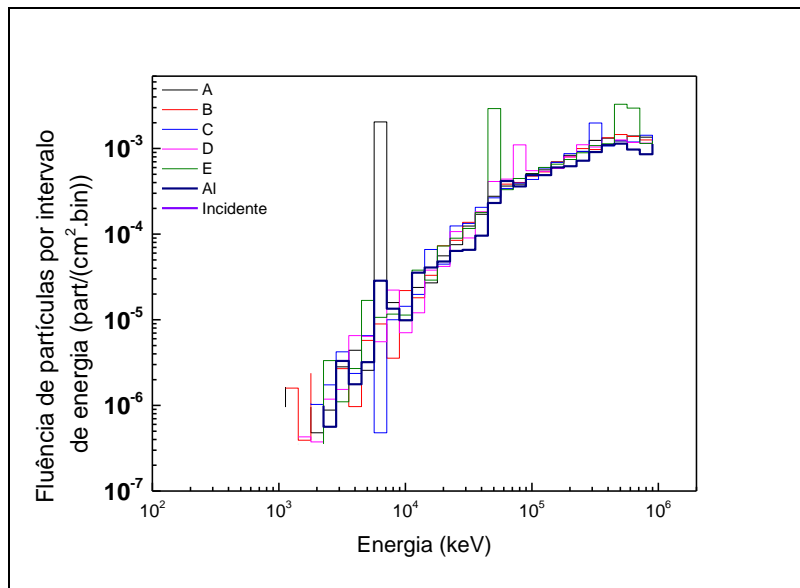


Figura 4.109 – Espectro de energia dos píons emergentes.

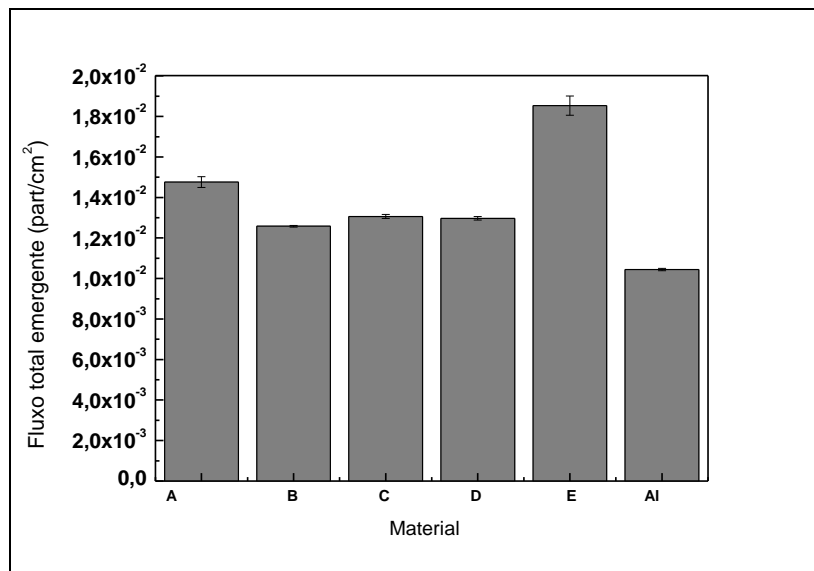


Figura 4.110 - Fluência total de píons emergentes.

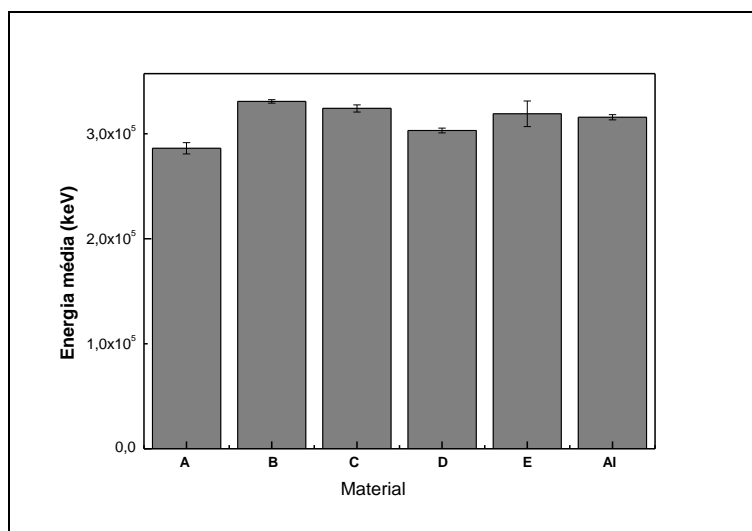


Figura 4.111 – Energia média dos píons emergentes.

Um resumo das análises das radiações incidentes e emergentes, bem como sua origem e fluência emergente estão indicadas na Tabela 4.13, onde as setas ↑ e ↓ indicam maior e menor valor nos compósitos de B₄C em relação ao alumínio, respectivamente.

Tabela 4.13 – Tipos de radiações simuladas por meio do código SPENVIS.

| Tipo de radiação incidente | Origem | Tipo de radiação emergente | Fluência Emergente no B ₄ C-B em relação ao Al | Energia emergente no B ₄ C-B em relação ao Al |
|----------------------------|------------------------|----------------------------|---|--|
| Elétrons | Cinturões de Van Allen | Elétrons | ↑ | ↓ |
| | | Fótons | ≅ | ↓ |
| Prótons | Cinturões de Van Allen | Prótons | ≅ | ≅ |
| | | Nêutrons | ↑ | ↑ |
| | | Elétrons | ↑ | ↓ |
| | | Fótons | ↓ | *≅ |
| | | Múons | ** | ** |
| | | Píons | ** | ** |
| | | Raios cósmicos galácticos | Prótons | ≅ |
| | Nêutrons | | ↓ | ↑ |
| | Elétrons | | ↑ | ↓ |
| | Fótons | | ↓ | ↑ |
| | Múons | | ↑ | ↑ |
| | Píons | | ↑ | ↑ |

* Somente para cerâmicas B, C e E. ** Não foi detectada a presença deste tipo de radiação.

Das simulações para as radiações incidentes provenientes do cinturão de Van Allen verificou-se que os compósitos cerâmicos de B₄C-B apresentaram valores de atenuação para elétrons inferiores à do alumínio, mas em média com maior redução da

energia dos elétrons emergentes. Em geral, os valores de atenuação média para os fótons nos os compósitos cerâmicos de B₄C-B ficaram aproximadamente iguais aos do alumínio, mas os fótons emergentes possuem menor energia.

4.11 Simulações do alcance máximo de partícula carregada

Com o programa TRIM, foi possível simular a penetração máxima dos prótons em cada composição do B₄C-B e no alumínio, conforme indica a Figura 4.112 [65, 66]. Os resultados dos valores de penetração foram obtidos para prótons da ordem de keV do cinturão de radiação de Van Allen, cuja origem está baseada na missão do satélite CBERS 3 - 4 simulada anteriormente no programa SPENVIS e podem ser observados na Figura 4.113. Os resultados indicam menor alcance para a placa de alumínio (52,7 μm), contra 79,3 μm para a cerâmica de B₄C-B (A). Em termos de densidade superficial de massa, os resultados comparativos são apresentados na Tabela 4.14.

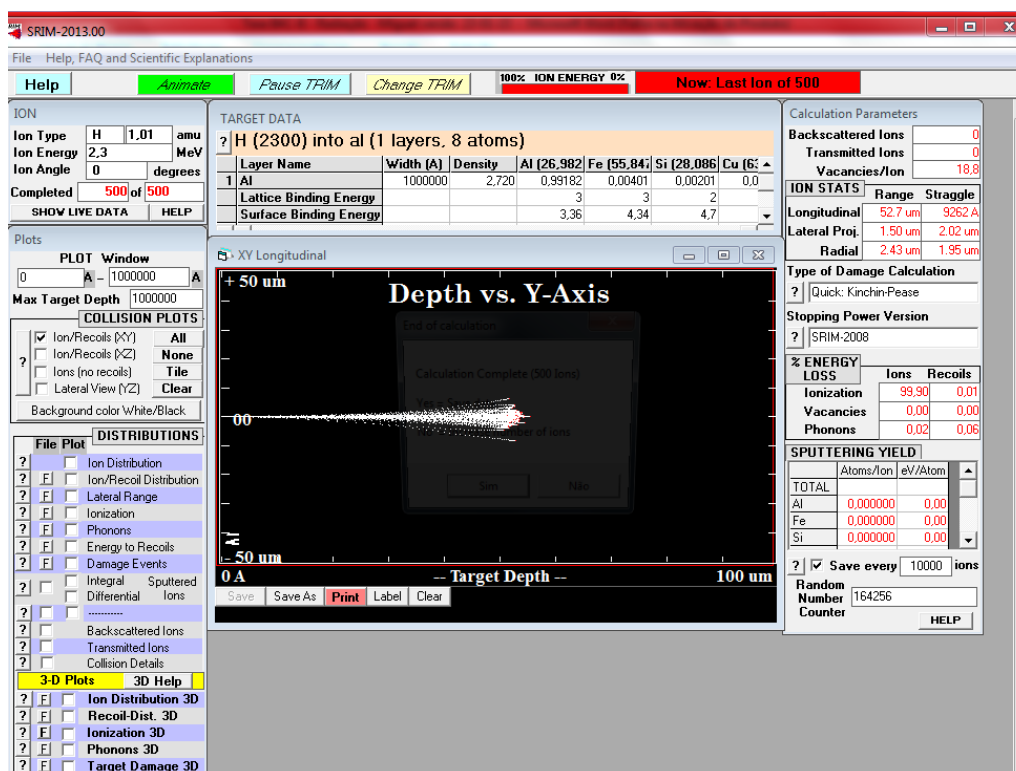


Figura 4.112 – Janela do Programa TRIM onde são inseridos os parâmetros de entrada.

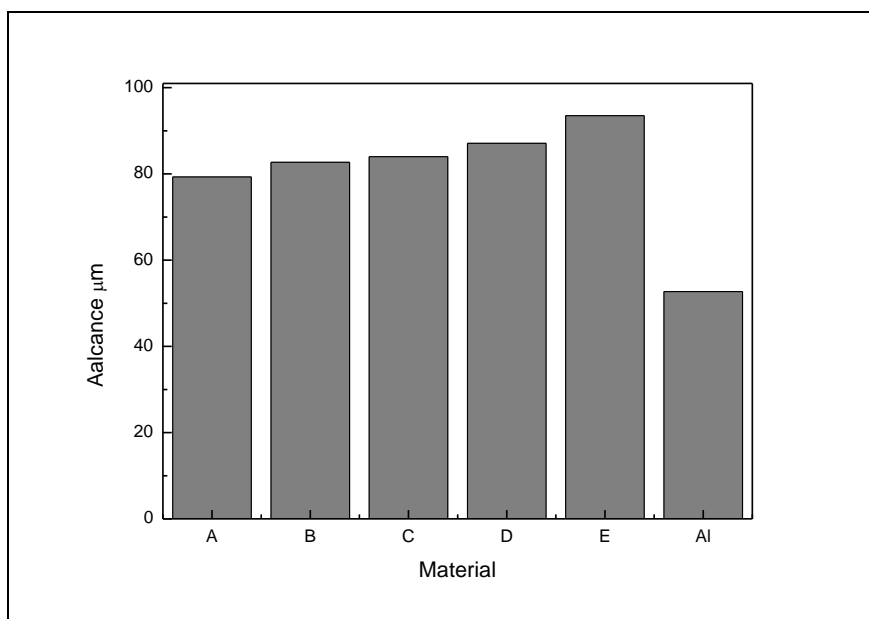


Figura 4.113 – Alcance dos prótons nos materiais estudados.

Tabela 4.14– Valores simulados para o alcance dos prótons nos materiais estudados.

| Cerâmica | Alcance máximo (μm) | Alcance máximo (g/cm²) |
|------------------------|----------------------------|--|
| B ₄ C-B (A) | 79,3 ± 0,1 | 0,011578 |
| B ₄ C-B (B) | 82,7 ± 0,1 | 0,011578 |
| B ₄ C-B (C) | 84,0 ± 0,1 | 0,011592 |
| B ₄ C-B (D) | 87,1 ± 0,1 | 0,0114972 |
| B ₄ C-B (E) | 93,5 ± 0,1 | 0,011594 |
| Alumínio | 52,7 ± 0,1 | 0,014334 |

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados experimentais e das simulações pode-se concluir que:

- 1 - Os compósitos cerâmicos de B₄C-B investigados apresentaram valores de densidade muito promissores para uso espacial. Quando comparados com os materiais densos (2,47 a 2,29 g/cm³, em função da composição) o peso necessário é menor quando comparados ao alumínio 60601 T6 (2,71 g/cm³). Neste trabalho foram utilizadas cerâmicas porosas, cujos valores de densidade foram de 1,47 a 1,32 g/cm³ (densidades relativas de 58,90 a 54,13 %), para as composições de 90 a 50 % de B₄C (em massa), respectivamente. As análises por difratometria de raios X confirmaram a formação dos compósitos cerâmicos de B₄C-B. Os valores de tensão de ruptura, de 70,05 a 40,02 MPa, estão de acordo com o propósito deste estudo que é o de permitir o manuseio dos corpos de prova sem risco de fratura.
- 2 - O valor teórico (calculado) do coeficiente de atenuação mássico (μ/ρ) do alumínio para nêutrons térmicos apresentou coerência com o resultado experimental. Esse fato validou cálculo teórico do coeficiente de atenuação mássico do alumínio, baseado nas seções de choque, e permitiu o uso desta metodologia para os cálculos dos coeficientes de atenuação das cerâmicas desenvolvidas.
- 3 - Para os resultados experimentais da atenuação da radiação gama, os valores dos coeficientes de atenuação mássico total dos compósitos cerâmicos de B₄C-B foram inferiores aos do alumínio. Porém, estas diferenças não são significativas para a utilização na órbita estudada, pois os valores de atenuação tanto das cerâmicas quanto do alumínio se aproximam no intervalo de energia da órbita considerada.
- 4 - Os resultados experimentais da atenuação de nêutrons rápidos indicam que os valores do coeficiente de atenuação mássico (μ/ρ) estão em concordância com os valores teóricos. Os resultados experimentais indicaram que os compósitos cerâmicos de B₄C-B possuem valores de coeficiente de atenuação para nêutrons rápidos de 2,7 vezes maiores em relação ao do alumínio.
- 5 - Os resultados teóricos dos coeficientes de atenuação mássicos para os compósitos cerâmicos desenvolvidos apresentaram um fator de atenuação (≈ 34 a ≈ 38 barn) da ordem de 1000 vezes superior ao do alumínio (0,038 barn), ressaltando a excelente atenuação do B₄C-B para nêutrons térmicos quando comparado ao alumínio.

Considerando que no ambiente de órbita LEO haja a presença de radiações provenientes do cinturão de Van Allen e também de origem cósmica, pode-se concluir, a partir das simulações para as radiações incidentes provenientes do cinturão de Van Allen que os compósitos cerâmicos de B₄C-B apresentaram:

- 1 - Valores de atenuação para elétrons inferiores à do alumínio, mas em média com maior redução da energia dos elétrons emergentes. Este resultado indica um potencial das cerâmicas investigadas para a blindagem de elétrons, e
- 2 - Valores de produção de fótons aproximadamente igual aos do alumínio, mas com menor energia média, para o caso de fótons produzidos pela interação de elétrons do Cinturão de Van Allen. Para o caso de fótons produzidos por prótons, houve maior

redução nos fluxos e similar energia dos fótons emergentes, nos compósitos cerâmicos de B₄C em comparação com o alumínio.

Para as incidências da radiação cósmica galáctica, os compósitos cerâmicos de B₄C-B apresentaram:

- 1 - Uma quantidade menor de nêutrons emergentes, porém com valores maiores de energia em relação ao alumínio e
- 2 - Uma redução nos valores de energia média dos elétrons emergentes, porém com valores maiores de fluxo.

De forma geral, para a utilização do material desenvolvido como blindagem para efeitos do tipo SEE em eletrônica, onde é especialmente importante a atenuação de prótons e nêutrons, os resultados indicaram que:

- 1 - Os compósitos cerâmicos de B₄C-B apresentaram redução nos valores de quantidade total de prótons de energias baixas (menor do que 10 MeV). Os resultados obtidos pela simulação da penetração de próton nos materiais, indicaram que para frear prótons é necessário, em média, aproximadamente 20 % a menos (em massa) de B₄C-B em relação ao alumínio.
- 2 - A partir dos nêutrons produzidos pela incidência de prótons e elétrons nas cerâmicas desenvolvidas, uma segunda camada de compósitos cerâmicos de B₄C-B ou o revestimento de um componente sensível a esta radiação pode ser eficiente na blindagem da radiação neutrônica.

Para a utilização do material como blindagem para efeitos do tipo TID, a importância do material desenvolvido, bem como as vantagens e desvantagens devem ser avaliadas em termos da dose final para cada aplicação específica.

Os resultados das irradiações indicaram que podem ser influenciados pela composição química, parâmetros de processamento que afetam as homogeneidades química e microestrutural e a densidade dos compósitos cerâmicos de B₄C-B.

Os compósitos cerâmicos de B₄C-B desenvolvidos são promissores para a utilização como blindagem em satélites, principalmente, para nêutrons e prótons. Esse mesmo material apresenta um grande potencial de utilização na blindagem de equipamentos de aeronaves sensíveis a nêutrons, uma vez que em altitudes de voo há maior influência de radiação neutrônica.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

É proposto o estudo da viabilidade do desenvolvimento de produtos nas formas de peças de compósitos polímero-cerâmica e de tintas com carga cerâmica, visando sua aplicação na atenuação de radiação ionizante em componentes de satélites sensíveis aos efeitos deste tipo de radiação. O objetivo é aumentar a vida útil de satélites em órbita, pela proteção destes componentes utilizando peças e tintas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SILVEIRA, V. Radiação cósmica preocupa cientistas. **Jornal da Ciência**, n. 4012, de 18 de maio de 2010.
- [2] MAZUR, J. E. An overview of the space radiation environment. **Cross link**, v. 4, n. 2, p. 10-14, 2003.
- [3] MIKAELIAN, T. **Spacecraft charging and hazards to electronics in space**. reference 3884 06/2009 e print ar Xiv: 0906. Disponível em: <<http://www.scienceopen.com>>. Acesso em: 10 jan. 2014.
- [4] EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION. **ECSS-Q-70-71A: space product assurance - data for selection of space materials**. Noordwijk, The Netherlands, 2004.
- [5] NASA. Understanding space radiation. **NASA Facts**, FS-2002-10-080-JSC, 2006.
- [6] WHITSON, P. Fire and radiation safety get new emphasis from. **Space Research**, v. 1, n. 1, p. 1-7, 2001.
- [7] SCARPULLA, J.; YARBROUGH, A. What could go wrong: the effects of ionizing radiation on space electronics. **Cross link**, summer, v. 4, n. 2, p. 15-19, 2003.
- [8] FEDERICO, C. A. **Dosimetria da radiação cósmica no interior de aeronaves no espaço aéreo brasileiro**. 2011. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, 2012.
- [9] PRADO, A. C. M.; PEREIRA JUNIOR, E. C. F.; GONÇALEZ, O. L.; FEDERICO, C. A. Avaliação dos efeitos da radiação ionizante em aviônicos. In: SIMPÓSIO DE SEGURANÇA DE VOO, 6, 2013, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: FAB. Instituto de Pesquisas e Ensaio em Voo, v. 5. p. 953-1014, 2013.
- [10] HARTMANN, G. A. A anomalia magnética do Atlântico Sul: causas e efeitos. **Rev. Bras. Geof.**, São Paulo, v. 24, n. 3, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/scielo.php>>. Acesso em: 15 jan. 2014
- [11] DE LIMA, K. G. **Estruturas APS resistentes à radiação para aplicações espaciais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Mestre em Ciências) -COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- [12] PRADO, A. F. B. A.; KUGA, H. K. (Eds.). **Fundamentos de tecnologia espacial**. São José dos Campos: INPE, 2001. 220 p. ISBN 85-17-00004-8.

- [13] DOMNICH, V. et al. Boron carbide: structure, properties, and stability under stress. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 94, n. 11, p. 3605-3628, 2011.
- [14] THÉVENOT, F. Boron carbide - a comprehensive review. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 6, n. 4, p. 205-225, 1990.
- [15] MELO, F. C. L. **Efeito de aditivos na sinterização de carbeto de boro**. 1994, Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) - Ipen, São Paulo, 1994
- [16] CASTRO, A. R. M. **Estudo e otimização do processo de obtenção de carbeto de boro por redução carbotérmica** 1989. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) -Ipen, São Paulo, 1989.
- [17] KHANRA, A. K. Production of boron carbide powder by carbothermal synthesis of gel material. **Bulletin of Materials Science**, v. 30, n. 2, p. 93 – 96, 2007.
- [18] HANAFIN, J. W.; GRANT, W.; BOBEK, L.; REGAN, T. **Boron fiber neutron shielding properties**. Lowell: Radiation Laboratory, Jan., 2011.
- [19] DOMNICH, V.; REYNAUD, S.; HABER, R. A.; CHHOWALLA, M. (2011), Boron Carbide: Structure, Properties, and Stability under Stress. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 94, p. 3605–3628, 2011. doi: 10.1111/j.1551-2916.2011.04865.x
- [20] RIEDEL R. **Handbook of ceramic hard materials**. Weinheim, Federal Republic of Germany: Wiley-Vch, 2000. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9783527618217.fmatter/pdf>. Acesso em: 15 set. 2014.
- [21] ROY, T.K.; SUBRAMANIAM, C.; SURI, A.K. Pressureless sintering of boron carbide. **Ceramics International**, v. 32, p. 227-233, 2006.
- [22] ALIZADEH, A.; TAHERI-NASSAJ, E.; EHSANI, N. Synthesis of boron carbide powder by a carbothermic reduction method. **J. Eur. Ceram. Soc.**, v. 24, p. 3227-3234, 2004.
- [23] SINHA, A.; MAHATA, T.; SHARMA, B.P. Carbothermal route for preparation of boron carbide powder from boric acid-citric acid gel precursor. **Journal of nuclear materials**. v. 301, p. 165-169, 2002.
- [24] WEIMER, A.W. **Carbide, nitride and boride materials synthesis and processing**. Colorado: Chapman & Hall, 1997.
- [25] CHEN, S.; WANG, D.Z.; HUANG, J.Y.; REN, Z.F. Synthesis and characterization of boron nanoparticles. **Materials Science & Processing**, v. 79, p. 1757-1759, 2004.

- [26] LEE, H.; SPEYER, R.F. Pressure less sintering of boron carbide. **J. Am. Ceram. Soc.**, v. 86, p. 1468-1473, 2003.
- [27] HANAFIN, J. W.; GRANT, W.; BOBEK, L.; REGAN, R. **Boron fiber neutron shielding properties**. Middlesex, Massachusetts: Radiation Laboratory, Jan., 2011.
- [28] WERHEIT H.; SHALAMBERIDZE S. Advanced microstructure of boron carbide. **J. Phys. Condens. Matter**, v. 24, 2012, 385406 (12p). doi: 10.1088/0953-8984/24/38/385406. Epub 2012 Sep 3.
- [29] SUBRAMANIAN, C.; SURI, A. K.; CH. MURTHY. Development of Boron-based materials for nuclear applications. Barc Newsletter, n. 31, mar. - apr. 2010.
- [30] GOMES, U. U. **Tecnologia dos pós, fundamentos e aplicações**. Natal: EDUFRN, 1994.
- [31] HIGGINS, R.A. **Properties of materials**. 2. ed. New York: Industrial Press Inc., 1994.
- [32] ASHBY, M.; SHERCLIFF, H.; CEBON, D. **Materials engineering, science, processing and design**. London: Elsevier Ltd, 2007.
- [33] OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas - princípios e aplicações em processamento cerâmico**. S. Paulo: Fazendo Arte, 2000.
- [34] RAHAMAN, M. N. **Ceramic processing and sintering**. 1.ed. New York: Marcel-Dekker, Inc., 1995. 770p.
- [35] GERMAN, M. R. **Powder metallurgy science**. 2.ed. [S.l.]: Metal Powder Industries, 1994. p.472. ISBN-13:9781879854428.
- [36] TÄFENER, U.; CARLE, V.; SCHÄFER, U.; HOFFMANN, M. J. Preparation and microstructural analysis of high- performance ceramics. In: VOORT, G. F. V. (ed.). **ASM Handbook: metallography and microstructures of ceramics, composite-metal forms, and special-purpose alloys**. Materials Park, OH, USA: ASM International, 2004.v. 9.
- [37] KINGERY, W. D.; BOWEN, H.K.; UHLMANN, D.R. **Introduction to ceramics**. New York: John Wiley & Sons, 1976.
- [38] SILVA, O.M.M. **Processamento e caracterização do nitreto de silício aditivado com carbonato de ítrio e concentrado de terras raras**. Tese (Doutorado em Engenharia) - FEG-UNESP, Guaratinguetá, 2000. 169p.
- [39] RAHAMAN, M. N. **Ceramic processing and sintering**. 2. ed. [S.l.]: CRC Press, 1995.SBN 9780824709884.

- [40] TÄFENER, U.; CARLE, V.; SCHÄFER, U.; HOFFMANN, M. J. Preparation and microstructural analysis of high- performance ceramics. In: **ASM handbook volume 9: metallography and microstructures of ceramics, composite-metal forms, and special-purpose alloys**. USA: ASM International, 2004.
- [41] KINGERY, W. D.; BOWEN, H.K.; UHLMANN, D.R. **Introduction to ceramics**. New York: John Wiley & Sons, 1976.
- [42] CHIANG, Y-M; BIRNIE III, D.; KINGERY, W. D. **Physical Ceramics: principles for ceramic science and engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [43] REED, J. S.; RUNK, R. B. Dry pressing. In: HERMAN, H. (Ed.) **Treatise on materials science and technology**. New York: Academic Press, 1976. v.9, p. 71-93
- [44] HASEGAWA, Y.T.; HIROTA, K., OKAMURA, F.P.; TANAKA, H. Fundamentos do processamento de cerâmicas covalentes. **Inf. Int**, v. 20, n. 41, p. 28-40, 1988
- [45] LEY, W.; WITTMANN, K.; HALLMANN, W. (Eds.). **Handbook of space technology**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. ISBN: 978-0-470-74241-9.
- [46] BALEN, T. R. **Efeitos da radiação em dispositivos analógicos programáveis (fpaas) e técnicas de proteção**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - UFRGS, Porto Alegre, 2010.
- [47] KIRÁLY, P.; WOLFENDALE, A. W. Sources of danger and defence systems in our space environment. In: BURDYUZHA, V.; KHOZIN, G.eds.). **The future of the universe and the future of our civilization**. World Scientific, Singapore, p. 316-325, 2000. Proceedings of a Symposium, held in conjunction to the UNESCO/ICSU World Conference on Science, Budapest, Hungary, 2-6 July 1999.
- [48] MAVROMICHALAKI, H. et al. Cosmic ray radiation effects on space environment associated to intense solar and geomagnetic activity. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 54, n. 4, p. 1089-1096, 2007.
- [49] LEY, W.; WITTMANN, K.; HALLMANN, W. (EdS.). **Handbook of space technology**. [s.L.]: John Wiley & Sons, 2009.
- [50] HOLMES-SIEDLE, A.; ADAMS, L. **Handbook of radiation effects**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 2006.
- [51] PEREIRA, M. A. **Polietileno de ultra alto peso molecular como material de base para blindagens da radiação cósmica em aplicações aeroespaciais**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais) - ITA, São José dos Campos, 2013.

- [52] MILONE, A. C.; WUENSCHÉ, C. A.; RODRIGUES, C. V.; JABLONSKI, F. J.; CECATTO, J. R.; VILLELA NETO, T. **Introdução à astronomia e astrofísica**. São José dos Campos: INPE, 2003. 298 p. Curso de introdução à astronomia e astrofísica realizado em 21-26 de julho de 2003. (INPE-7177-PUD/38). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/08.14.15.10>>. Acesso em: 09 abr. 2014
- [53] TAUHATA, L. et al. **Radioproteção e dosimetria: fundamentos**. 5. ed. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2003.
- [54] GASPAR, P. F. **Considerações sobre o estudo da BNCT (terapia de captura neutrônica por boro)**. 1994. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1994
- [55] XAVIER, A. M.; MORO, J. T.; HEILBRON, P. F. **Princípios básicos de segurança e proteção radiológica**. 3. ed. UFRGS, 2006.
- [56] TAUHATA, L. et al. **Radioproteção e dosimetria: fundamentos**. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2001
- [57] TAFAZOLI, M. A study of on-orbit spacecraft failures. **Acta Astronáutica**, v. 64, n. 2, p. 195-205, 2009
- [58] H.C. STARK. **Powders for advanced ceramics**. Disponível em: www.hcstarck.com. Acesso em: 20 mar. 2014
- [59] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6220-ABNT/MB 67: Materiais refratários densos conformados – determinação do volume aparente, densidade de massa aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida**. Rio de Janeiro: ABNT; 2011
- [60] JCPDS. **Selected powder diffraction data for metals and alloys**. Newton Square, PA: Joint Committee on Powder Diffraction Standards, 1978.
- [61] ONODA, G. Y. J.; HENRY, L. L. **Ceramic processing before firing**. New York: John Wiley & Sons, 1978.
- [62] TÄFENER, U.; CARLE, V.; SCHÄFER, U.; HOFFMANN, M. J. Preparation and microstructural analysis of high- performance ceramics. In: VOORT, G. F. V. (ed.). **ASM Handbook**. metallography and microstructures of ceramics, composite-metal forms, and special-purpose alloys. Materials Park, OH, USA: ASM International, 2004.v. 9.
- [63] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. **XCOM: Photon cross sections database**. Disponível em: <<http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>>. Acesso em: 01 de mai de 2014.

- [64] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. **XCOM:** photon cross sections database. Disponível em: <<http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>>. Acesso em: 10 de jul de 2014.
- [65] ZIEGLER, J. **SRIM and TRIM**. Disponível em <http://www.SRIM.org>. Acesso em 05 set. 2005.
- [66] ZIEGLER, J. F.; BIRSACK, J. P.; LITTMARK, U. **The stopping and range of ions in matter**, v.1, New York: Pergamon, 1985.

APÊNDICEA

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS CERÂMICAS

Tabela A.1 - Composição química das cerâmicas de B₄C-B (A).

| Cerâmica (A) concentração (% em massa) | **** | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 |
|--|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Elemento químico | **** | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,007 | 0,008 | 0,009 |
| B ₄ C | **** | 0,8991 | 0,8982 | 0,8973 | 0,8964 | 0,8955 | 0,8946 | 0,8937 | 0,8928 | 0,8919 |
| B | **** | 0,0999 | 0,0998 | 0,0997 | 0,0996 | 0,0995 | 0,0994 | 0,0993 | 0,0992 | 0,0991 |
| W | 0,8151 | 0,000815 | 0,00163 | 0,002445 | 0,00326 | 0,004076 | 0,004891 | 0,005706 | 0,006521 | 0,007336 |
| Fe | 0,0861 | 8,61E-05 | 0,000172 | 0,000258 | 0,000344 | 0,000431 | 0,000517 | 0,000603 | 0,000689 | 0,000775 |
| Si | 0,0321 | 3,21E-05 | 6,42E-05 | 9,63E-05 | 0,000128 | 0,000161 | 0,000193 | 0,000225 | 0,000257 | 0,000289 |
| Ca | 0,0113 | 1,13E-05 | 2,26E-05 | 3,39E-05 | 4,52E-05 | 5,65E-05 | 6,78E-05 | 7,91E-05 | 9,04E-05 | 0,000102 |
| K | 0,0113 | 1,13E-05 | 2,26E-05 | 3,39E-05 | 4,52E-05 | 5,65E-05 | 6,78E-05 | 7,91E-05 | 9,04E-05 | 0,000102 |
| Ti | 0,011 | 0,000011 | 0,000022 | 0,000033 | 0,000044 | 0,000055 | 0,000066 | 0,000077 | 0,000088 | 0,000099 |
| S | 0,009 | 0,000009 | 0,000018 | 0,000027 | 0,000036 | 0,000045 | 0,000054 | 0,000063 | 0,000072 | 0,000081 |
| Al | 0,0082 | 8,2E-06 | 1,64E-05 | 2,46E-05 | 3,28E-05 | 0,000041 | 4,92E-05 | 5,74E-05 | 6,56E-05 | 7,38E-05 |
| Mg | 0,0075 | 7,5E-06 | 0,000015 | 2,25E-05 | 0,00003 | 3,75E-05 | 0,000045 | 5,25E-05 | 0,00006 | 6,75E-05 |
| Nb | 0,0069 | 6,9E-06 | 1,38E-05 | 2,07E-05 | 2,76E-05 | 3,45E-05 | 4,14E-05 | 4,83E-05 | 5,52E-05 | 6,21E-05 |
| P | 0,0015 | 1,5E-06 | 0,000003 | 4,5E-06 | 0,000006 | 7,5E-06 | 0,000009 | 1,05E-05 | 0,000012 | 1,35E-05 |

Tabela A.2 - Composição química das cerâmicas de B₄C-B (B).

| Cerâmica (B) concentração (% em massa) | **** | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 |
|--|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Elemento químico | **** | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,007 | 0,008 | 0,009 |
| B ₄ C | **** | 0,7992 | 0,7984 | 0,7976 | 0,7968 | 0,796 | 0,7952 | 0,7944 | 0,7936 | 0,7928 |
| B | **** | 0,1998 | 0,1996 | 0,1994 | 0,1992 | 0,199 | 0,1988 | 0,1986 | 0,1984 | 0,1982 |
| W | 0,7833 | 0,000783 | 0,001567 | 0,00235 | 0,003133 | 0,003917 | 0,0047 | 0,005483 | 0,006266 | 0,00705 |
| Fe | 0,0981 | 9,81E-05 | 0,000196 | 0,000294 | 0,000392 | 0,000491 | 0,000589 | 0,000687 | 0,000785 | 0,000883 |
| Si | 0,0285 | 2,85E-05 | 0,000057 | 8,55E-05 | 0,000114 | 0,000143 | 0,000171 | 0,0002 | 0,000228 | 0,000257 |
| K | 0,0153 | 1,53E-05 | 3,06E-05 | 4,59E-05 | 6,12E-05 | 7,65E-05 | 9,18E-05 | 0,000107 | 0,000122 | 0,000138 |
| Ca | 0,0145 | 1,45E-05 | 0,000029 | 4,35E-05 | 0,000058 | 7,25E-05 | 0,000087 | 0,000102 | 0,000116 | 0,000131 |
| Ti | 0,013 | 0,000013 | 0,000026 | 0,000039 | 0,000052 | 0,000065 | 0,000078 | 0,000091 | 0,000104 | 0,000117 |
| S | 0,0115 | 1,15E-05 | 0,000023 | 3,45E-05 | 0,000046 | 5,75E-05 | 0,000069 | 8,05E-05 | 0,000092 | 0,000104 |
| Al | 0,0079 | 7,9E-06 | 1,58E-05 | 2,37E-05 | 3,16E-05 | 3,95E-05 | 4,74E-05 | 5,53E-05 | 6,32E-05 | 7,11E-05 |
| Mg | 0,0079 | 7,9E-06 | 1,58E-05 | 2,37E-05 | 3,16E-05 | 3,95E-05 | 4,74E-05 | 5,53E-05 | 6,32E-05 | 7,11E-05 |
| Mn | 0,0065 | 6,5E-06 | 0,000013 | 1,95E-05 | 0,000026 | 3,25E-05 | 0,000039 | 4,55E-05 | 0,000052 | 5,85E-05 |
| Nb | 0,0063 | 6,3E-06 | 1,26E-05 | 1,89E-05 | 2,52E-05 | 3,15E-05 | 3,78E-05 | 4,41E-05 | 5,04E-05 | 5,67E-05 |
| Ni | 0,0053 | 5,3E-06 | 1,06E-05 | 1,59E-05 | 2,12E-05 | 2,65E-05 | 3,18E-05 | 3,71E-05 | 4,24E-05 | 4,77E-05 |
| P | 0,0018 | 1,8E-06 | 3,6E-06 | 5,4E-06 | 7,2E-06 | 0,000009 | 1,08E-05 | 1,26E-05 | 1,44E-05 | 1,62E-05 |

Tabela A.3 - Composição química das cerâmicas de B₄C-B (C).

| Cerâmica (C) concentração (% em massa) | **** | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 |
|--|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Elemento químico | **** | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,007 | 0,008 | 0,009 |
| B ₄ C | **** | 0,6993 | 0,6986 | 0,6979 | 0,6972 | 0,6965 | 0,6958 | 0,6951 | 0,6944 | 0,6937 |
| B | **** | 0,2997 | 0,2994 | 0,2991 | 0,2988 | 0,2985 | 0,2982 | 0,2979 | 0,2976 | 0,2973 |
| W | 0,7206 | 0,000721 | 0,001441 | 0,002162 | 0,002882 | 0,003603 | 0,004324 | 0,005044 | 0,005765 | 0,006485 |
| Fe | 0,1005 | 0,000101 | 0,000201 | 0,000302 | 0,000402 | 0,000503 | 0,000603 | 0,000704 | 0,000804 | 0,000905 |
| Mg | 0,0403 | 4,03E-05 | 8,06E-05 | 0,000121 | 0,000161 | 0,000202 | 0,000242 | 0,000282 | 0,000322 | 0,000363 |
| Si | 0,0366 | 3,66E-05 | 7,32E-05 | 0,00011 | 0,000146 | 0,000183 | 0,00022 | 0,000256 | 0,000293 | 0,000329 |
| K | 0,0156 | 1,56E-05 | 3,12E-05 | 4,68E-05 | 6,24E-05 | 0,000078 | 9,36E-05 | 0,000109 | 0,000125 | 0,00014 |
| Al | 0,0148 | 1,48E-05 | 2,96E-05 | 4,44E-05 | 5,92E-05 | 0,000074 | 8,88E-05 | 0,000104 | 0,000118 | 0,000133 |
| Ti | 0,0142 | 1,42E-05 | 2,84E-05 | 4,26E-05 | 5,68E-05 | 0,000071 | 8,52E-05 | 9,94E-05 | 0,000114 | 0,000128 |
| Ca | 0,0114 | 1,14E-05 | 2,28E-05 | 3,42E-05 | 4,56E-05 | 0,000057 | 6,84E-05 | 7,98E-05 | 9,12E-05 | 0,000103 |
| S | 0,0099 | 9,9E-06 | 1,98E-05 | 2,97E-05 | 3,96E-05 | 4,95E-05 | 5,94E-05 | 6,93E-05 | 7,92E-05 | 8,91E-05 |
| Mn | 0,0091 | 9,1E-06 | 1,82E-05 | 2,73E-05 | 3,64E-05 | 4,55E-05 | 5,46E-05 | 6,37E-05 | 7,28E-05 | 8,19E-05 |
| Ni | 0,0087 | 8,7E-06 | 1,74E-05 | 2,61E-05 | 3,48E-05 | 4,35E-05 | 5,22E-05 | 6,09E-05 | 6,96E-05 | 7,83E-05 |
| Nb | 0,0061 | 6,1E-06 | 1,22E-05 | 1,83E-05 | 2,44E-05 | 3,05E-05 | 3,66E-05 | 4,27E-05 | 4,88E-05 | 5,49E-05 |
| Cr | 0,0057 | 5,7E-06 | 1,14E-05 | 1,71E-05 | 2,28E-05 | 2,85E-05 | 3,42E-05 | 3,99E-05 | 4,56E-05 | 5,13E-05 |
| Zr | 0,0047 | 4,7E-06 | 9,4E-06 | 1,41E-05 | 1,88E-05 | 2,35E-05 | 2,82E-05 | 3,29E-05 | 3,76E-05 | 4,23E-05 |
| P | 0,0017 | 1,7E-06 | 3,4E-06 | 5,1E-06 | 6,8E-06 | 8,5E-06 | 1,02E-05 | 1,19E-05 | 1,36E-05 | 1,53E-05 |

Tabela A. 4 - Composição química das cerâmicas de B₄C-B (D).

| Cerâmica (D) concentração (% em massa) | **** | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 |
|--|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Elemento químico | **** | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,007 | 0,008 | 0,009 |
| B ₄ C | **** | 0,5994 | 0,5988 | 0,5982 | 0,5976 | 0,597 | 0,5964 | 0,5958 | 0,5952 | 0,5946 |
| B | **** | 0,3996 | 0,3992 | 0,3988 | 0,3984 | 0,398 | 0,3976 | 0,3972 | 0,3968 | 0,3964 |
| W | 0,7151 | 0,000715 | 0,00143 | 0,002145 | 0,00286 | 0,003576 | 0,004291 | 0,005006 | 0,005721 | 0,006436 |
| Fe | 0,1296 | 0,00013 | 0,000259 | 0,000389 | 0,000518 | 0,000648 | 0,000778 | 0,000907 | 0,001037 | 0,001166 |
| Si | 0,0368 | 3,68E-05 | 7,36E-05 | 0,00011 | 0,000147 | 0,000184 | 0,000221 | 0,000258 | 0,000294 | 0,000331 |
| Mg | 0,0278 | 2,78E-05 | 5,56E-05 | 8,34E-05 | 0,000111 | 0,000139 | 0,000167 | 0,000195 | 0,000222 | 0,00025 |
| Ti | 0,0219 | 2,19E-05 | 4,38E-05 | 6,57E-05 | 8,76E-05 | 0,00011 | 0,000131 | 0,000153 | 0,000175 | 0,000197 |
| Mn | 0,0119 | 1,19E-05 | 2,38E-05 | 3,57E-05 | 4,76E-05 | 5,95E-05 | 7,14E-05 | 8,33E-05 | 9,52E-05 | 0,000107 |
| Ca | 0,0112 | 1,12E-05 | 2,24E-05 | 3,36E-05 | 4,48E-05 | 0,000056 | 6,72E-05 | 7,84E-05 | 8,96E-05 | 0,000101 |
| S | 0,0111 | 1,11E-05 | 2,22E-05 | 3,33E-05 | 4,44E-05 | 5,55E-05 | 6,66E-05 | 7,77E-05 | 8,88E-05 | 9,99E-05 |
| K | 0,0109 | 1,09E-05 | 2,18E-05 | 3,27E-05 | 4,36E-05 | 5,45E-05 | 6,54E-05 | 7,63E-05 | 8,72E-05 | 9,81E-05 |
| Zr | 0,0094 | 9,4E-06 | 1,88E-05 | 2,82E-05 | 3,76E-05 | 0,000047 | 5,64E-05 | 6,58E-05 | 7,52E-05 | 8,46E-05 |
| Al | 0,0065 | 6,5E-06 | 0,000013 | 1,95E-05 | 0,000026 | 3,25E-05 | 0,000039 | 4,55E-05 | 0,000052 | 5,85E-05 |
| Nb | 0,0058 | 5,8E-06 | 1,16E-05 | 1,74E-05 | 2,32E-05 | 0,000029 | 3,48E-05 | 4,06E-05 | 4,64E-05 | 5,22E-05 |
| P | 0,002 | 0,000002 | 0,000004 | 0,000006 | 0,000008 | 0,00001 | 0,000012 | 0,000014 | 0,000016 | 0,000018 |

Tabela A.5 - Composição química das cerâmicas de B₄C-B (E).

| Cerâmica (E) concentração (% em massa) | **** | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 |
|--|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Elemento químico | **** | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,007 | 0,008 | 0,009 |
| B ₄ C | **** | 0,4995 | 0,499 | 0,4985 | 0,498 | 0,4975 | 0,497 | 0,4965 | 0,496 | 0,4955 |
| B | **** | 0,4995 | 0,499 | 0,4985 | 0,498 | 0,4975 | 0,497 | 0,4965 | 0,496 | 0,4955 |
| W | 0,583 | 0,000583 | 0,001166 | 0,001749 | 0,002332 | 0,002915 | 0,003498 | 0,004081 | 0,004664 | 0,005247 |
| Fe | 0,1354 | 0,000135 | 0,000271 | 0,000406 | 0,000542 | 0,000677 | 0,000812 | 0,000948 | 0,001083 | 0,001219 |
| Si | 0,0615 | 6,15E-05 | 0,000123 | 0,000185 | 0,000246 | 0,000308 | 0,000369 | 0,000431 | 0,000492 | 0,000554 |
| Al | 0,06 | 0,00006 | 0,00012 | 0,00018 | 0,00024 | 0,0003 | 0,00036 | 0,00042 | 0,00048 | 0,00054 |
| Zr | 0,0237 | 2,37E-05 | 4,74E-05 | 7,11E-05 | 9,48E-05 | 0,000119 | 0,000142 | 0,000166 | 0,00019 | 0,000213 |
| K | 0,0216 | 2,16E-05 | 4,32E-05 | 6,48E-05 | 8,64E-05 | 0,000108 | 0,00013 | 0,000151 | 0,000173 | 0,000194 |
| Mg | 0,0206 | 2,06E-05 | 4,12E-05 | 6,18E-05 | 8,24E-05 | 0,000103 | 0,000124 | 0,000144 | 0,000165 | 0,000185 |
| Ca | 0,0203 | 2,03E-05 | 4,06E-05 | 6,09E-05 | 8,12E-05 | 0,000102 | 0,000122 | 0,000142 | 0,000162 | 0,000183 |
| Ti | 0,0193 | 1,93E-05 | 3,86E-05 | 5,79E-05 | 7,72E-05 | 9,65E-05 | 0,000116 | 0,000135 | 0,000154 | 0,000174 |
| Mn | 0,0134 | 1,34E-05 | 2,68E-05 | 4,02E-05 | 5,36E-05 | 0,000067 | 8,04E-05 | 9,38E-05 | 0,000107 | 0,000121 |
| S | 0,0124 | 1,24E-05 | 2,48E-05 | 3,72E-05 | 4,96E-05 | 0,000062 | 7,44E-05 | 8,68E-05 | 9,92E-05 | 0,000112 |
| Cr | 0,011 | 0,000011 | 0,000022 | 0,000033 | 0,000044 | 0,000055 | 0,000066 | 0,000077 | 0,000088 | 0,000099 |
| Ni | 0,0096 | 9,6E-06 | 1,92E-05 | 2,88E-05 | 3,84E-05 | 0,000048 | 5,76E-05 | 6,72E-05 | 7,68E-05 | 8,64E-05 |
| Nb | 0,0054 | 5,4E-06 | 1,08E-05 | 1,62E-05 | 2,16E-05 | 0,000027 | 3,24E-05 | 3,78E-05 | 4,32E-05 | 4,86E-05 |
| P | 0,0028 | 2,8E-06 | 5,6E-06 | 8,4E-06 | 1,12E-05 | 0,000014 | 1,68E-05 | 1,96E-05 | 2,24E-05 | 2,52E-05 |

APÊNDICE B

CÁLCULO DA SEÇÃO DE CHOQUE PARA NÊUTRONS TÉRMICOS PARA O ALUMÍNIO E PARA AS CERÂMICAS

Tabela B.1 - Cálculo teórico da seção de choque total para nêutrons térmicos para o alumínio

| | | | | seção de choque total n térmico (barn) | | Alumínio | | | | |
|---|-------------|---------|------------------|--|----------|-----------------------|--------------------------|--|-----------------------------------|--------------------|
| Elemento | Massa molar | Isótopo | fração isotópica | isótopo | elemento | composição na mistura | número de moles em 100g | número de átomos na "fórmula mínima da substância" | Massa do elemento na "substância" | fração molar |
| Al | 26,982 | 27 | 1 | 1,6444 | 1,64 | 99,22 | 3,6773 | 160021 | 4317603,4 | 0,20910 |
| Fe | 55,845 | 54 | 0,0584 | 4,42 | 14,28 | 0,4 | 0,0072 | 312 | 17406,182 | 0,00084 |
| | | 56 | 0,9175 | 15,21 | | | | | | |
| | | 57 | 0,0212 | 3,16 | | | | | | |
| | | 58 | 0,0028 | 1,32 | | | | | | |
| Si | 28,086 | 28 | 0,9222 | 2,169 | 2,21 | 0,2 | 0,0071 | 310 | 8703,0909 | 0,00042 |
| | | 29 | 0,0469 | 2,739 | | | | | | |
| | | 30 | 0,0309 | 2,597 | | | | | | |
| Cu | 63,546 | 63 | 0,6915 | 9,6 | 11,67 | 0,14 | 0,0022 | 96 | 6092,1636 | 0,00030 |
| | | 65 | 0,3085 | 16,3 | | | | | | |
| Cl | 35,453 | 35 | 0,7576 | 64,68908 | 49,39 | 0,03 | 0,0008 | 37 | 1305,4636 | 0,00006 |
| | | 37 | 0,2424 | 1,583 | | | | | | |
| K | 39,098 | 39 | 0,93258 | 4,0943 | 3,98 | 0,02 | 0,0005 | 22 | 870,30909 | 0,00004 |
| | | 40 | 0,000117 | 34,79 | | | | | | |
| | | 41 | 0,067302 | 2,38 | | | | | | |
| S | 32,065 | 32 | 0,9499 | 1,4682 | 1,49 | 0,02 | 0,0006 | 27 | 870,30909 | 0,00004 |
| | | 33 | 0,0075 | 3,301 | | | | | | |
| | | 34 | 0,0425 | 1,716 | | | | | | |
| | | 36 | 0,0001 | 0,236 | | | | | | |
| Ga | 69,723 | 69 | 0,60108 | 9,5 | 9,61 | 0,01 | 0,0001 | 6 | 435,15455 | 0,00002 |
| | | 71 | 0,39892 | 9,77 | | | | | | |
| | | | | | | composição total | número total de moles | número total de átomos na "fórmula mínima da substância" | Massa da "substância" | fração molar total |
| | | | | | | 100,04 | 3,6959 | 160831 | 4353286,1 | 0,210828505 |
| seção de choque total n térmico substância (barn) | | | | | | | μ/p (cm ² /g) | | | |
| 271401,3517 | | | | | | | 0,038 | | | |

Tabela B.2 - Cálculo teórico da seção de choque total para nêutrons térmicos para a cerâmica de B₄C-B (A).

| | | | | seção de choque total nêutron térmico (barn) | | A | | | | |
|---|-------------|---------|------------------|--|-----------|-----------------------|------------------------------|--|---------------------------------|--------------------|
| Elemento | Massa molar | Isótopo | fração isotópica | isótopo | elemento | composição na mistura | número de moles em 100g | número de átomos na "fórmula mínima da substância" | Massa do elemento na substância | fração molar |
| B | 10,811 | 10 | 0,199 | 3838,1 | 768,41 | 80,3535 | 7,4326 | 1534764 | 16592335 | 0,80356 |
| | | 11 | 0,801 | 5,7755 | | | | | | |
| C | 12,011 | 12 | 0,9893 | 5,56253 | 5,55 | 19,5464 | 1,6274 | 336048 | 4036170,3 | 0,19547 |
| | | 13 | 0,0107 | 4,84137 | | | | | | |
| W | 183,84 | 180 | 0,0012 | 33 | 20,57 | 0,08151 | 0,0004 | 92 | 16831,142 | 0,00082 |
| | | 182 | 0,265 | 26,8 | | | | | | |
| | | 183 | 0,1431 | 15,8 | | | | | | |
| | | 184 | 0,3064 | 8,73 | | | | | | |
| | | 186 | 0,2843 | 37,965 | | | | | | |
| Fe | 55,845 | 54 | 0,0584 | 4,45 | 14,19 | 0,00861 | 0,0002 | 32 | 1777,8939 | 0,00009 |
| | | 56 | 0,9175 | 15,01 | | | | | | |
| | | 57 | 0,0212 | 3,48 | | | | | | |
| | | 58 | 0,0028 | 29,28 | | | | | | |
| Si | 28,086 | 28 | 0,9222 | 2,297 | 7,07 | 0,00321 | 0,0001 | 24 | 662,83851 | 0,00003 |
| | | 29 | 0,0469 | 103,78 | | | | | | |
| | | 30 | 0,0309 | 2,747 | | | | | | |
| Ca | 40,078 | 40 | 0,96941 | 3,31 | 3,26 | 0,00113 | 0,0000 | 6 | 232,88155 | 0,00001 |
| | | 42 | 0,00647 | 2,1 | | | | | | |
| | | 43 | 0,00135 | 7 | | | | | | |
| | | 44 | 0,02086 | 1,13 | | | | | | |
| | | 46 | 0,00004 | 2,34 | | | | | | |
| | | 48 | 0,00187 | 1,109 | | | | | | |
| K | 39,098 | 39 | 0,93258 | 4,11 | 4,0162093 | 0,00 | 0,00003 | 6 | 233,33567 | 1,13004E-05 |
| | | 40 | 0,000117 | 36,6 | | | | | | |
| | | 41 | 0,067302 | 2,66 | | | | | | |
| Ti | 47,867 | 46 | 0,0825 | 3,64 | 10,43 | 0,0011 | 0,0000230 | 5 | 227,14092 | 0,00001 |
| | | 47 | 0,0744 | 4,9 | | | | | | |
| | | 48 | 0,7372 | 12,49 | | | | | | |
| | | 49 | 0,0541 | 5,6 | | | | | | |
| | | 50 | 0,0518 | 4,979 | | | | | | |
| S | 32,065 | 32 | 0,9499 | 1,528 | 1,53 | 0,0009 | 0,0000281 | 6 | 185,84257 | 0,00001 |
| | | 33 | 0,0075 | 3,64 | | | | | | |
| | | 34 | 0,0425 | 1,747 | | | | | | |
| | | 36 | 0,0001 | 1,25 | | | | | | |
| Al | 26,982 | 27 | 1 | 1,734 | 1,73 | 0,00082 | 0,0000 | 6 | 169,32323 | 0,00001 |
| Mg | 24,305 | 24 | 0,7899 | 4,08 | 3,77 | 0,00075 | 0,0000 | 6 | 154,86881 | 0,00001 |
| | | 25 | 0,1 | 2,12 | | | | | | |
| | | 26 | 0,1101 | 3,0382 | | | | | | |
| Nb | 92,906 | 93 | 1 | 7,405 | 7,41 | 0,00069 | 0,0000 | 2 | 142,47931 | 0,00001 |
| P | 30,974 | 31 | 1 | 3,484 | 3,48 | 0,00015 | 4,84281E-06 | 1 | 30,973762 | 1,50005E-06 |
| | | | | | | composição total | número total de moles | número total de átomos na fórmula mínima da substância | Massa da substância | fração molar total |
| | | | | | | 100 | 9,060877743 | 1870975,495 | 20648470 | 1 |
| seção de choque total nêutron térmico substância (barn) | | | | | | | μ/p (cm ² /g) | | | |
| 1181194456,11 | | | | | | | 34,45 | | | |

Tabela B.3 - Cálculo teórico da seção de choque total para nêutrons térmicos para a cerâmica de B₄C-B (B).

| | | | | seção de choque total nêutron térmico (barn) | | B | | | | |
|---|-------------|---------|------------------|--|------------|-----------------------|--------------------------|--|---------------------------------|--------------------|
| Elemento | Massa molar | Isótopo | fração isotópica | isótopo | elemento | composição na mistura | número de moles em 100g | número de átomos na "fórmula mínima da substância" | Massa do elemento na substância | fração molar |
| B | 10,811 | 10 | 0,199 | 3838,1 | 768,41 | 82,5253 | 7,6335 | 102781196 | 1111167513 | 0,82608 |
| | | 11 | 0,801 | 5,7755 | | | | | | |
| C | 12,0107 | 12 | 0,9893 | 5,56253 | 5,55 | 17,3572 | 1,4451 | 19458250 | 233707199,5 | 0,17375 |
| | | 13 | 0,0107 | 4,84137 | | | | | | |
| W | 183,84 | 180 | 0,0012 | 33 | 20,57 | 0,07833 | 4,4300E-06 | 60 | 10965,69497 | 8,1523E-06 |
| | | 182 | 0,265 | 26,8 | | | | | | |
| | | 183 | 0,1431 | 15,8 | | | | | | |
| | | 184 | 0,3064 | 8,73 | | | | | | |
| | | 186 | 0,2843 | 37,965 | | | | | | |
| Fe | 55,845 | 54 | 0,0584 | 4,45 | 14,11 | 0,00981 | 1,7566E-04 | 2365 | 132087,412 | 9,8198E-05 |
| | | 56 | 0,9175 | 15,01 | | | | | | |
| | | 57 | 0,0212 | 3,48 | | | | | | |
| Si | 28,0855 | 28 | 0,9222 | 2,297 | 7,07 | 0,00285 | 1,0148E-04 | 1366 | 38374,01877 | 2,8529E-05 |
| | | 29 | 0,0469 | 103,78 | | | | | | |
| | | 30 | 0,0309 | 2,747 | | | | | | |
| Ca | | 40 | 0,96941 | 3,31 | 3,26 | 0,00145 | 3,6250E-05 | 488 | 19523,62358 | 1,4515E-05 |
| | | 42 | 0,00647 | 2,1 | | | | | | |
| | | 43 | 0,00135 | 7 | | | | | | |
| | | 44 | 0,02086 | 1,13 | | | | | | |
| | | 46 | 0,00004 | 2,34 | | | | | | |
| | | 48 | 0,00187 | 1,109 | | | | | | |
| K | 39,0983 | 39 | 0,93258 | 4,11 | 4,01620932 | 1,5300E-03 | 3,9132E-05 | 527 | 20600,78902 | 1,53153E-05 |
| | | 40 | 0,000117 | 36,6 | | | | | | |
| | | 41 | 0,067302 | 2,66 | | | | | | |
| Ti | 47,867 | 46 | 0,0825 | 3,64 | 10,43 | 0,0013 | 2,2980E-07 | 3 | 148,1080478 | 1,1011E-07 |
| | | 47 | 0,0744 | 4,9 | | | | | | |
| | | 48 | 0,7372 | 12,49 | | | | | | |
| | | 49 | 0,0541 | 5,6 | | | | | | |
| | | 50 | 0,0518 | 4,979 | | | | | | |
| S | 32,065 | 32 | 0,9499 | 1,528 | 1,53 | 0,00115 | 2,8068E-07 | 4 | 121,1811685 | 9,0090E-08 |
| | | 33 | 0,0075 | 3,64 | | | | | | |
| | | 34 | 0,0425 | 1,747 | | | | | | |
| | | 36 | 0,0001 | 1,25 | | | | | | |
| Al | 26,9815 | 27 | 1 | 1,734 | 4,96 | 0,00079 | 2,9279E-05 | 394 | 10637,00871 | 7,9079E-06 |
| Mg | 24,305 | 24 | 0,7899 | 4,08 | 19,22 | | 3,0858E-07 | 4 | 100,9841022 | 7,5075E-08 |
| | | 25 | 0,1 | 2,12 | | | | | | |
| | | 26 | 0,1101 | 3,0382 | | | | | | |
| Mn | 54,938 | 55 | 1 | 15,45 | 15,45 | 0,00065 | | | | |
| Nb | 92,906 | 93 | 1 | 7,405 | 7,41 | 0,00063 | 7,4269E-08 | 1 | 92,906 | 1,1000E-05 |
| Ni | 58,6934 | 58 | 0,6807 | 1,537 | 1,05 | 0,00053 | 7,4269E-08 | 1 | 58,6934 | |
| P | 30,973762 | 31 | 1 | 3,484 | 3,48 | 0,00018 | 5,81137E-06 | 78,24759027 | 2423,622238 | 1,10002E-05 |
| | | | | | | composição total | número total de moles | número total de átomos na "fórmula mínima da substância" | Massa da "substância" | fração molar total |
| | | | | | | 100 | 9,078994422 | 122244255,2 | 1345109846 | 0,999990012 |
| seção de choque total nêutron térmico substância [barn] | | | | | | | μ/p (cm ² /g) | | | |
| 79086038662,34 | | | | | | | 35,41 | | | |

Tabela B.4 - Cálculo teórico da seção de choque total para nêutrons térmicos para a cerâmica de B₄C-B (C).

| | | | | | seção de choque total nêutron térmico (barn) | C | | | | |
|---|-------------|---------|------------------|---------|--|------------------------------|-------------------------|--|---------------------------------|--------------------|
| Elemento | Massa molar | Isótopo | fração isotópica | isótopo | elemento | composição na mistura | número de moles em 100g | número de átomos na fórmula mínima da substância | Massa do elemento na substância | fração molar |
| B | 10,811 | 10 | 0,199 | 3838,1 | 768,41 | 84,6972 | 7,8344 | 105486191 | 1140411208 | 0,8476737 |
| | | 11 | 0,801 | 5,7755 | | | | | | |
| C | 12,0107 | 12 | 0,9893 | 5,56253 | 5,55 | 15,2028 | 1,2658 | 17043064 | 204699134 | 0,1521539 |
| | | 13 | 0,0107 | 4,84137 | | | | | | |
| W | 183,84 | 180 | 0,0012 | 33 | 20,57 | 0,07206 | 0,00000443 | 60 | 10965,695 | 8,151E-06 |
| | | 182 | 0,265 | 26,8 | | | | | | |
| | | 183 | 0,1431 | 15,8 | | | | | | |
| | | 184 | 0,3064 | 8,73 | | | | | | |
| | | 186 | 0,2843 | 37,965 | | | | | | |
| Fe | 55,845 | 54 | 0,0584 | 4,45 | 14,19 | 0,01005 | 0,0002 | 2423 | 135318,908 | 0,0001006 |
| | | 56 | 0,9175 | 15,01 | | | | | | |
| | | 57 | 0,0212 | 3,48 | | | | | | |
| | | 58 | 0,0028 | 29,28 | | | | | | |
| Si | 28,0855 | 28 | 0,9222 | 2,297 | 7,07 | 0,00366 | 0,0001 | 1755 | 49280,3188 | 3,663E-05 |
| | | 29 | 0,0469 | 103,78 | | | | | | |
| | | 30 | 0,0309 | 2,747 | | | | | | |
| Ca | 40,078 | 40 | 0,96941 | 3,31 | 3,26 | 0,00113 | 0,00002825 | 380 | 15214,9618 | 1,131E-05 |
| | | 42 | 0,00647 | 2,1 | | | | | | |
| | | 43 | 0,00135 | 7 | | | | | | |
| | | 44 | 0,02086 | 1,13 | | | | | | |
| | | 46 | 0,00004 | 2,34 | | | | | | |
| | | 48 | 0,00187 | 1,109 | | | | | | |
| K | 39,0983 | 39 | 0,93258 | 4,11 | 4,011927 | 0,00 | 0,00004 | 537 | 21004,7261 | 1,561E-05 |
| | | 40 | | 36,6 | | | | | | |
| | | 41 | 0,067302 | 2,66 | | | | | | |
| Ti | 47,867 | 46 | 0,0825 | 3,64 | 10,43 | 0,00142 | 2,298E-07 | 3 | 148,108048 | 1,101E-07 |
| | | 47 | 0,0744 | 4,9 | | | | | | |
| | | 48 | 0,7372 | 12,49 | | | | | | |
| | | 49 | 0,0541 | 5,6 | | | | | | |
| | | 50 | 0,0518 | 4,979 | | | | | | |
| S | 32,065 | 32 | 0,9499 | 1,528 | 1,53 | 0,00099 | 2,8068E-07 | 4 | 121,181168 | 9,007E-08 |
| | | 33 | 0,0075 | 3,64 | | | | | | |
| | | 34 | 0,0425 | 1,747 | | | | | | |
| | | 36 | 0,0001 | 1,25 | | | | | | |
| Al | 26,9815 | 27 | 1 | 1,734 | 4,96 | 0,00148 | 0,0001 | 739 | 19927,5606 | 0,00001 |
| Mg | 24,305 | 24 | 0,7899 | 4,08 | 3,77 | 0,00403 | 3,0858E-07 | 4 | 100,984102 | 7,506E-08 |
| | | 25 | 0,1 | 2,12 | | | | | | |
| | | 26 | 0,1101 | 3,0382 | | | | | | |
| Nb | 92,906 | 93 | 1 | 7,405 | 7,41 | 0,00061 | 7,4269E-08 | 1 | 92,906 | 6,906E-08 |
| P | 30,97376 | 31 | 1 | 3,484 | 3,48 | 0,00017 | 5,4885E-06 | 73,90050192 | 2288,97656 | 1,701E-06 |
| Mn | 54,938 | 55 | 1 | 15,45 | 15,45 | 0,0009 | 1,6564E-05 | 223 | 12252,7569 | 9,108E-06 |
| Ni | 58,6934 | 58 | 0,6807 | 1,537 | 1,046236 | 0,00087 | 1,4823E-05 | 199,5824769 | 11714,1742 | 8,707E-06 |
| Cr | 51,996 | 50 | 0,0434 | 2,96 | 0,128464 | 0,00057 | 1,0962E-05 | 147,603734 | 7674,80375 | 5,705E-06 |
| Zr | 91,224 | 90 | 0,514 | 3,8229 | 1,96 | 0,00047 | 5,1522E-06 | 69 | 6328,34695 | 0,00000 |
| | | | | | | composição total | número total de moles | número total de átomos na "fórmula mínima da substância" | Massa da "substância" | fração molar total |
| | | | | | | 100 | 9,1005 | 122534413 | 1345342275 | 1,00000 |
| seção de choque total nêutron térmico substância [barn] | | | | | | | | | | |
| 81151167235,09 | | | | | | μ/p (cm ² /g) | | | | |
| | | | | | | 36,33 | | | | |

Tabela B.5 - Cálculo teórico da seção de choque total para nêutrons térmicos para a cerâmica de B₄C-B (D).

| | | | | seção de choque total nêutron térmico (barn) | | D | | | | |
|---|-------------|---------|------------------|--|-----------|-----------------------|--------------------------|--|---------------------------------|--------------------|
| Elemento | Massa molar | Isótopo | fração isotópica | isótopo | elemento | composição na mistura | número de moles em 100g | número de átomos na "fórmula mínima da substância" | Massa do elemento na substância | fração molar |
| B | 10,811 | 10 | 0,199 | 3838,1 | 768,41 | 86,869 | 8,0352 | 124440835 | 1,345E+09 | 0,86955 |
| | | 11 | 0,801 | 5,7755 | | | | | | |
| C | 12,011 | 12 | 0,9893 | 5,56253 | 5,55 | 13,0309 | 1,084940928 | 16802351 | 201807998 | 0,1304 |
| | | 13 | 0,0107 | 4,84137 | | | | | | |
| W | 183,84 | 180 | 0,0012 | 33 | 20,57 | 0,0007151 | 0,00000443 | 69 | 12612,689 | 8E-06 |
| | | 182 | 0,265 | 26,8 | | | | | | |
| | | 183 | 0,1431 | 15,8 | | | | | | |
| | | 184 | 0,3064 | 8,73 | | | | | | |
| Fe | 55,845 | 186 | 0,2843 | 37,965 | 14,19 | 0,0001296 | 2,32071E-06 | 36 | 2007,0998 | 1E-06 |
| | | 54 | 0,0584 | 4,45 | | | | | | |
| | | 56 | 0,9175 | 15,01 | | | | | | |
| | | 57 | 0,0212 | 3,48 | | | | | | |
| Si | 28,086 | 58 | 0,0028 | 29,28 | 7,07 | 0,0000368 | 1,31028E-06 | 20 | 569,91722 | 4E-07 |
| | | 28 | 0,9222 | 2,297 | | | | | | |
| | | 29 | 0,0469 | 103,78 | | | | | | |
| Ca | 40,078 | 30 | 0,0309 | 2,747 | 3,2317841 | 0,0000112 | 0,00000028 | 4 | 173,45307 | 1E-07 |
| | | 40 | 0,96941 | 3,31 | | | | | | |
| | | 42 | 0,00647 | 2,1 | | | | | | |
| | | 43 | 0,00135 | 7 | | | | | | |
| | | 44 | 0,02086 | 1,13 | | | | | | |
| | | 46 | 0,00004 | 2,34 | | | | | | |
| K | 39,098 | 48 | 0,00187 | 1,109 | 4,0162093 | 0,00 | 2,78784E-07 | 4 | 168,807 | 1E-07 |
| | | 39 | 0,93258 | 4,11 | | | | | | |
| | | 40 | 0,000117 | 36,6 | | | | | | |
| | | 41 | 0,067302 | 2,66 | | | | | | |
| Ti | 47,867 | 46 | 0,0825 | 3,64 | 10,43336 | 0,0000219 | 2,298E-07 | 3,558885254 | 170,35316 | 1E-07 |
| | | 47 | 0,0744 | 4,9 | | | | | | |
| | | 48 | 0,7372 | 12,49 | | | | | | |
| | | 49 | 0,0541 | 5,6 | | | | | | |
| | | 50 | 0,0518 | 4,979 | | | | | | |
| S | 32,065 | 32 | 0,9499 | 1,528 | 1,5256947 | 0,0000111 | 2,8068E-07 | 4,346857759 | 139,38199 | 9E-08 |
| | | 33 | 0,0075 | 3,64 | | | | | | |
| | | 34 | 0,0425 | 1,747 | | | | | | |
| | | 36 | 0,0001 | 1,25 | | | | | | |
| Al | 26,982 | 27 | 1 | 1,734 | 4,96 | 0,0000065 | 2,40906E-07 | 4 | 100,66473 | 7E-08 |
| Mg | 24,305 | 24 | 0,7899 | 4,08 | 3,7692978 | 0,0000278 | 3,08578E-07 | 4,778910765 | 116,15143 | 8E-08 |
| | | 25 | 0,1 | 2,12 | | | | | | |
| | | 26 | 0,1101 | 3,0382 | | | | | | |
| Nb | 92,906 | 93 | 1,0000 | 7,405 | 7,41 | 0,0000058 | 0,0000 | 1 | 106,86003 | 0,00001 |
| P | 30,974 | 31 | 1,0000 | 3,484 | 3,48 | 0,000002 | 0,0000 | 1 | 30,973762 | 0,00001 |
| Mn | 54,938 | 55 | 1 | 15,45 | 15,45 | 0,0000119 | 0,0000 | 3 | 184,29388 | 2,00001 |
| Zr | 91,224 | 90 | 0,514 | 3,8229 | 3,8229 | 0,0000094 | 1,03043E-07 | 1,59581559 | 145,57668 | 4 |
| | | | | | | composição total | número total de moles | número total de átomos na fórmula mínima da substância | Massa da substância | fração molar total |
| | | | | | | 100 | 9,1202 | 141243323 | 1,547E+09 | 1,00000 |
| seção de choque total nêutron térmico substância [barn] | | | | | | | μ/ρ (cm ² /g) | | | |
| 95714678538,65 | | | | | | | 37,26 | | | |

Tabela B.6 - Cálculo teórico da seção de choque total para nêutrons térmicos para a cerâmica de B₄C-B (E).

| Elemento | Massa molar | Isótopo | fração isotópica | seção de choque total nêutron térmico (barn) | | E | | | | |
|---|-------------|---------|------------------|--|-----------|-----------------------|--------------------------|--|---------------------------------|--------------------|
| | | | | isótopo | elemento | composição na mistura | número de moles em 100g | número de átomos na fórmula mínima da substância | Massa do elemento na substância | fração molar |
| B | 10,811 | 10 | 0,199 | 3838,1 | 768,41 | 88,9517 | 8,2279 | 110784961 | 1197696212 | 0,89119 |
| | | 11 | 0,801 | 5,7755 | | | | | | |
| C | 12,011 | 12 | 0,9893 | 5,56253 | 5,55 | 10,8591 | 0,9041 | 12173569 | 146213090,3 | 0,10880 |
| | | 13 | 0,0107 | 4,84137 | | | | | | |
| W | 183,84 | 180 | 0,0012 | 33 | 20,57 | 0,000583 | 0,00000443 | 60 | 10965,69497 | 8E-06 |
| | | 182 | 0,265 | 26,8 | | | | | | |
| | | 183 | 0,1431 | 15,8 | | | | | | |
| | | 184 | 0,3064 | 8,73 | | | | | | |
| Fe | 55,845 | 186 | 0,2843 | 37,965 | 14,19 | 0,0001354 | 2,42457E-06 | 33 | 1823,102506 | 1E-06 |
| | | 54 | 0,0584 | 4,45 | | | | | | |
| | | 56 | 0,9175 | 15,01 | | | | | | |
| | | 57 | 0,0212 | 3,48 | | | | | | |
| | | 58 | 0,0028 | 29,28 | | | | | | |
| Si | 28,086 | 28 | 0,9222 | 2,297 | 7,07 | 0,0000615 | 2,18974E-06 | 29 | 828,0709313 | 6E-07 |
| | | 29 | 0,0469 | 103,78 | | | | | | |
| | | 30 | 0,0309 | 2,747 | | | | | | |
| Ca | 40,078 | 40 | 0,96941 | 3,31 | 3,26 | 0,0000203 | 5,075E-07 | 7 | 273,3307302 | 2E-07 |
| | | 42 | 0,00647 | 2,1 | | | | | | |
| | | 43 | 0,00135 | 7 | | | | | | |
| | | 44 | 0,02086 | 1,13 | | | | | | |
| | | 46 | 0,00004 | 2,34 | | | | | | |
| | | 48 | 0,00187 | 1,109 | | | | | | |
| K | 39,098 | 39 | 0,93258 | 4,11 | 4,0162093 | 0,00 | 5,52454E-07 | 7 | 290,8346686 | 2E-07 |
| | | 40 | 0,000117 | 36,6 | | | | | | |
| | | 41 | 0,067302 | 2,66 | | | | | | |
| Ti | 47,867 | 46 | 0,0825 | 3,64 | 10,43 | 0,0000193 | 2,298E-07 | 3 | 148,1080478 | 1E-07 |
| | | 47 | 0,0744 | 4,9 | | | | | | |
| | | 48 | 0,7372 | 12,49 | | | | | | |
| | | 49 | 0,0541 | 5,6 | | | | | | |
| | | 50 | 0,0518 | 4,979 | | | | | | |
| S | 32,065 | 32 | 0,9499 | 1,528 | 1,53 | 0,0000124 | 2,8068E-07 | 4 | 121,1811685 | 9E-08 |
| | | 33 | 0,0075 | 3,64 | | | | | | |
| | | 34 | 0,0425 | 1,747 | | | | | | |
| | | 36 | 0,0001 | 1,25 | | | | | | |
| Al | 26,982 | 27 | 1 | 1,734 | 4,96 | 0,00006 | 2,22375E-06 | 30 | 807,8740794 | 6E-07 |
| Mg | 24,305 | 24 | 0,7899 | 4,08 | 3,77 | 0,0000206 | 3,08578E-07 | 4 | 100,9841022 | 8E-08 |
| | | 25 | 0,1 | 2,12 | | | | | | |
| | | 26 | 0,1101 | 3,0382 | | | | | | |
| Nb | 92,906 | 93 | 1 | 7,405 | 7,41 | 0,0000054 | 7,4269E-08 | 1 | 92,906 | 7E-08 |
| P | 30,974 | 31 | 1 | 3,484 | 3,48 | 0,0000028 | 9,03991E-08 | 1,217184738 | 37,70079037 | 3E-08 |
| Zr | 91,224 | 90 | 0,514 | 3,8229 | 1,9649706 | 0,00 | 0,0000 | 3 | 319,1102613 | 2E-07 |
| Mn | 54,938 | 55 | 1 | 15,45 | 15,45 | 0,0000134 | 2,43911E-07 | 3,284160527 | 180,4252111 | 1E-07 |
| Cr | 51,996 | 50 | 0,0434 | 2,96 | 0,128464 | 0,000011 | 2,11555E-07 | 2,848493113 | 148,1102479 | 1E-07 |
| Ni | 58,693 | 58 | 0,6807 | 1,537 | 1,05 | 0,0000096 | 1,63562E-07 | 2 | 129,2598527 | 1E-07 |
| | | | | | | composição total | número total de moles | número total de átomos na "fórmula mínima da substância" | Massa da "substância" | fração molar total |
| | | | | | | 100 | 9,1320 | 122958721 | 1343925569 | 1,00000 |
| seção de choque total nêutron térmico substância [barn] | | | | | | | μ/p (cm ² /g) | | | |
| 85195682742,16 | | | | | | | 38,18 | | | |

