



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/05.02.17.31-TDI

**ESTUDO DE BLINDAGEM MISTA CONTENDO
COMPÓSITO CERÂMICO PARA PROTEÇÃO CONTRA
IMPACTOS DE MICROMETEORÓIDES EM SATÉLITES
ARTIFICIAIS**

Carlos Alberto de Oliveira Couto

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia
Espaciais/ Materiais e Sensores, orientada pela Dra. Maria do Carmo de Andrade
Nono, aprovada em 28 de fevereiro de 2011

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39KDDGH>>

INPE
São José dos Campos
2011

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

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

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

Membros:

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

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

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

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

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivéca Sant'Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/05.02.17.31-TDI

**ESTUDO DE BLINDAGEM MISTA CONTENDO
COMPÓSITO CERÂMICO PARA PROTEÇÃO CONTRA
IMPACTOS DE MICROMETEORÓIDES EM SATÉLITES
ARTIFICIAIS**

Carlos Alberto de Oliveira Couto

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia
Espaciais/ Materiais e Sensores, orientada pela Dra. Maria do Carmo de Andrade
Nono, aprovada em 28 de fevereiro de 2011

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39KDDGH>>

INPE
São José dos Campos
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C837e Couto, Carlos Alberto de Oliveira.
Estudo de blindagem mista contendo compósito cerâmico para proteção contra impactos de micrometeoróides em satélites artificiais / Carlos Alberto de Oliveira Couto . – São José dos Campos : INPE, 2011.
xxviii+ 103 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/05.02.17.31-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/ Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

Orientadora : Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono.

1. Blindagem. 2. Satélite. 3. Impacto balístico. 4. Meteoróide.
5. Cerâmica. I.Título.

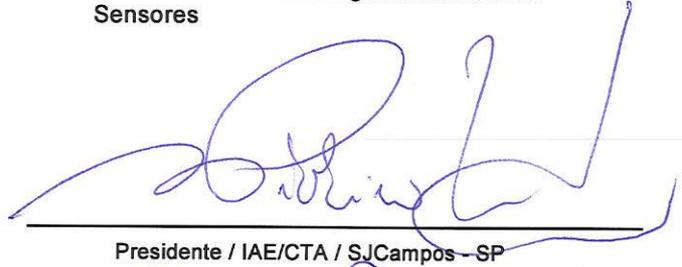
CDU 620.179.111

Copyright © 2011 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2011 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

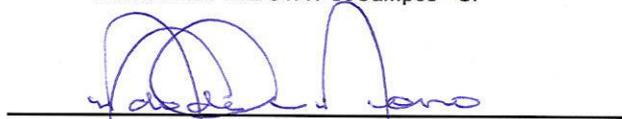
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
ETE/Ciência e Tecnologia de Materiais e
Sensores

Dr. Francisco Piorino Neto



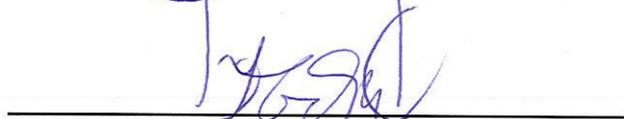
Presidente / IAE/CTA / SJC Campos - SP

Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Francisco Cristovão Lourenço de
Melo



Convidado(a) / IAE/CTA / SJC Campos - SP

Aluno (a): Carlos Alberto de Oliveira Couto

São José dos Campos, 28 de fevereiro de 2011

“Um pouco de ciência nos afasta de Deus. Muito, nos aproxima.”

LOUIS PASTEUR

AGRADECIMENTOS

Em especial a minha orientadora Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono, pelo conhecimento que transmitiu durante esses anos, pelo apoio e confiança que sempre depositou em mim e acima de tudo por sua grande amizade.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE e ao Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LAS pela formação acadêmica e utilização de sua infra-estrutura laboratorial.

Ao Dr. Francisco Piorino Neto pelos ensinamentos e pelo auxílio nos ensaios mecânicos finais deste trabalho.

À Divisão de Materiais - AMR do Instituto de Aeronáutica e Espaço - IAE do Comando da Aeronáutica - DCTA, pela utilização de suas instalações.

Ao Sr. João Bernardes e ao João Marcos K. de Assis do AMR/IAE/DCTA, pela compactação isostática das cerâmicas para os testes de flexão em quatro pontos e pelos ensaios de difração de raios X.

À técnica Maria Lúcia Brison de Mattos do LAS/CTE/INPE, pelas fotomicrografias de microscopia eletrônica de varredura.

Ao Drs. Sérgio Luiz Mineiro e José Vitor Candido de Souza, do LAS/CTE/INPE, pela assistência nos procedimentos experimentais deste trabalho, discussões dos resultados e pela amizade e companheirismo.

Aos técnicos Carlos Alberto Santos e Ciro Takahachi da Avibras pelo auxílio no início da compactação das pastilhas e nos ensaios de flexão em quatro pontos.

Ao Sr. André Bertin e à equipe de ensaios da BCA Ballistic Protection pelos ensaios balísticos realizados.

Ao meu colega de trabalho Dr. Gilbert Silva pelo auxílio na compactação.

Ao Setor de Materiais da Vale Soluções de Energia - VSE, especialmente ao Daniel Catarina pela execução dos ensaios de dureza.

Ao Dr. Roberto Marino do Departamento de Estruturas do INPE pelo auxílio e informações fornecidas.

Ao Dr. Fernando Vernille e ao técnico Otávio da Escola de Engenharia de Lorena -EEL-USP pela prensagem uniaxial das cerâmicas.

A minha mãe Áurea Faustino de Oliveira Couto por ter me apoiado em todos momentos de minha vida.

A meus irmãos que sempre acreditaram e me incentivaram nos estudos, especialmente a Renata e à Fátima.

Ao meu amigo Joaquim Machado Júnior pelo carinho e apoio.

A minha amiga e esposa Mara que esteve sempre ao meu lado com paciência e dedicação.

Aos meus colegas de trabalho da VSE.

A todos os meus colegas e amigos do LAS/CTE/INPE que me apoiaram ao longo destes anos.

A todas as pessoas que me ajudaram a vencer mais esta etapa da minha vida.

E principalmente a Deus por ter me inspirado a estudar, aprimorar meus conhecimentos e finalizar esta importante etapa de minha vida.

RESUMO

Este projeto teve como principal objetivo o estudo de blindagens mistas de metais e compósito cerâmico de alumina - zircônia tetragonal policristalina (Y-TZP - *tetragonal zirconia polycrystalline stabilized with yttria*) para proteção de satélites artificiais contra impacto de micro meteoróides. Os dados para a qualificação das blindagens mistas foram obtidos a partir de ensaios padronizados de impactos balísticos e ensaio de queda de 12 m, para a avaliação da capacidade de absorção de energia cinética das blindagens. Os meteoróides são fragmentos de materiais que viajam com velocidades entre 12 e 70 km/s e possuem formas e tamanhos variados. Para a análise comparativa dos resultados foram utilizados os valores do maior micro meteoróide que impactou o *Space Shuttle Orbiter*, com massa de 0,2 g e energia cinética de 900 J. As cerâmicas utilizadas nas blindagens foram produzidas com pó de alumina alfa com tamanhos de partículas na escala submicrométrica e pó de zircônia tetragonal com tamanhos de partículas na escala nanométrica, estabilizada com 3 % (em mol) de ítria. Foram estudadas três composições diferentes de zircônia adicionada à alumina: 15, 18 e 20 % de ZrO_2 (em peso). O objetivo foi o de obter compósitos cerâmicos com custo baixo e parâmetros de propriedades mecânicas otimizadas. As cerâmicas para o ensaio de flexão foram compactadas com 40 MPa em pressão uniaxial e 300 MPa em pressão isostática. Entretanto, as cerâmicas utilizadas no ensaio balístico foram compactadas uniaxial devido à limitação de tamanho da prensa isostática. As cerâmicas foram submetidas à caracterização por difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura. Os valores dos parâmetros de propriedades mecânicas foram obtidos pelo uso dos ensaios de flexão em quatro pontos e dureza *Vickers*. Os valores de tenacidade à fratura foram obtidos pelo uso da técnica baseada em penetração *Vickers*. As propriedades dos compósitos cerâmicos alumina-zircônia Y-TZP mostraram superiores à alumina pura relatadas na literatura, os valores da resistência à fratura foi superior a 400 MPa, a dureza superior a 15 GPa e a tenacidade à fratura superior a $11,6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. As blindagens mistas estudadas foram submetidas a três níveis de ensaios balísticos da norma brasileira NBR 15000, níveis II, IIIA e III, que utilizam as munições *.357 Magnum*, 9 mm, *.44 Magnum* e $7,62 \times 51 \text{ FMJ}$. Os materiais metálicos utilizados nas blindagens foram painéis sanduíche-colméia de alumínio do satélite CBERS e chapas de aço inox AISI 304. A comprovação da eficiência das blindagens testadas em relação ao impacto real de meteoróides em satélites foi realizada utilizando a equivalência da energia cinética envolvida (de 900 J). As blindagens mistas de compósitos cerâmicos de alumina-zircônia tetragonal sobre as bases metálicas apresentaram-se eficazes para absorção de energia para os níveis estudados.

STUDY OF COMPOUND SHIELD CONTAINING CERAMIC COMPOSITE FOR PROTECTION AGAINST MICROMETEORIDS IMPACT ON ARTIFICIAL SATELLITES

ABSTRACT

This project aimed to study the compound shields of a ceramic composite alumina - tetragonal zirconia (Y-TZP - tetragonal zirconia polycrystalline stabilized with yttria) for protection of artificial satellites against meteoroids impact. The datas used for compound shields qualification was obtained from ballistic impacts and drop test of 12 meters, evaluating the shields kinetic energy absorption capacity. The meteoroids are materials fragments traveling at speeds between 12 km/s and 70 km/s and have different sizes. For results comparative analysis was performed the largest meteoroid value that impact the Space Shuttle Orbiter, with a 0,2 g mass and 900 J of kinect energy. The ceramics used in the shields were made by submicron alpha alumina powder and nanometric tetragonal zirconia powder stabilized with 3 % mol of yttria. Three different compositions of zirconia added to alumina were studied: 15, 18 and 20 wt % of ZrO₂ (by weight) in order to obtain ceramic composites with low production cost and high mechanical properties, based on literature values and Sucera group experience. The ceramics for flexion test were compacted with 40 MPa in uniaxial pressure and 300 MPa in isostatic pressure. However, the ceramics used in ballistic test were uniaxial compacted due to the limited size capacity of isostatic press. The ceramics were characterized by X-ray diffraction and scanning electron microscopy. The values of the mechanical properties parameters were obtained by using the flexion tests at four points and Vickers hardness. The fracture toughness values were obtained by using the technique based on Vickers penetration. The properties of alumina-zirconia ceramic composite Y-TZP showed higher than pure reported in the literature: the fracture resistance was above 400 MPa, hardness exceeding 15 GPa and fracture toughness exceeding 11,6 MPa.m^{1/2}. The compound shield studied was subjected to three levels of NBR 15000 Brazilian standard ballistic tests, levels II, IIIA and III which use .357 Magnum ammunition, 9 mm, .44 Magnum and 7,62 x 51 FMJ. The metallic materials used on shields were aluminum honeycomb plates from CBERS satellite and AISI 304 stainless steel. The proof of the tested shields efficiency against the real impact of meteoroids on satellites was accomplished through the equivalence of the kinetic energy involved (around 900 J). The compound shields of ceramic composites of alumina- tetragonal zirconia bonded to the metallic bases presented effective for energy absorption for the studied levels.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 - Partes do Veículo Espacial Orbiter mais suscetíveis aos impactos por meteoróides e detritos. | 8 |
| Figura 2.2 - Seção transversal esquemática, mostrando o posicionamento dos tecidos de cerâmica (carbeto de silício) no sistema isolante da parte interna da asa do veículo espacial <i>Orbiter</i> | 8 |
| Figura 2.3 - Sistema de testes de hiper-velocidade utilizado para caracterização de blindagens. . | 9 |
| Figura 2.4 - Figura esquemática da Estação Espacial Internacional. | 10 |
| Figura 2.5 - As etapas de desintegração do projétil/blindagem no escudo de Whipple. | 10 |
| Figura 2.6 - Fator k de ajuste para equação Cour-Palais. | 12 |
| Figura 2.7 – Órbita do satélite CBERS 2B. | 15 |
| Figura 2.8 – Satélite CBERS 2B em órbita. | 17 |
| Figura 2.9 – Painel sanduíche-colméia seccionado utilizado no satélite CBERS-2B..... | 18 |
| Figura 2.10 – Curva esquemática do evento de impacto num painel sanduíche-colméia. | 19 |
| Figura 2.11 – Desenho esquemático de impacto vertical (a) e horizontal (b)..... | 20 |
| Figura 2.12 – Montagem do satélite CBERS-2B utilizando painel sanduíche-colméia. | 20 |
| Figura 2.13 – Pastilhas de cerâmicas de: a) zircônia e b) alumina, após os impactos balísticos. . | 22 |
| Figura 2.14 – Formação do cone de fraturas e erosão da ponta do projétil. | 23 |
| Figura 2.15 – Propagação de uma trinca na estrutura de uma cerâmica de zircônia tetragonal (t) provocando a transformação para monoclínica (m) induzida por tensão mecânica. | 25 |
| Figura 2.16 – Efeito da formação de microtrincas ao redor de uma partícula de zircônia inicialmente tetragonal. | 25 |
| Figura 2.17 - Modelo da microestrutura de um compósito cerâmico de matriz de alumina com grãos de zircônia | 26 |
| Figura 2.18 - Diagrama de equilíbrio de fases no sistema $Al_2O_3 - ZrO_2$ | 27 |
| Figura 2.19 - Dimensão mínima da placa cerâmica devido à formação do cone de fraturas..... | 29 |
| Figura 2.20 - a) pastilha cerâmica sextavada b) pastilha cerâmica quadrada. | 30 |
| Figura 3.1 – Dimensões da blindagem mista 1. | 35 |
| Figura 3.2 – Dimensões da blindagem mista 2. | 36 |
| Figura 3.3 – Dimensões da blindagem mista 3. | 37 |
| Figura 3.4 – Vista isométrica das montagens das: (a) blindagem 1 e (b) blindagem 3..... | 39 |
| Figura 3.5 - Pastilhas cerâmicas nos formatos: (a) sextavadas, (b) retangulares e (c) cilíndricas desenvolvidas neste trabalho..... | 40 |
| Figura 3.6 - Desenho esquemático do ensaio de flexão em 4 pontos e a distribuição de tensões mecânicas. | 46 |
| Figura 3.7 - Desenho esquemático das microtrincas radiais originadas na superfície da do material em teste resultante da impressão <i>Vickers</i> | 50 |
| Figura 3.8 – Esquema do ensaio de queda de 12 metros..... | 51 |
| Figura 3.9 – Vista em corte de um painel sanduíche-colméia após impacto de um peso. | 54 |
| Figura 3.10 – Norma NBR 15000 com a Tabela balística. | 56 |
| Figura 3.11 – Provete de ensaio balístico da Empresa BCA..... | 57 |
| Figura 3.12 – (a) Sensor de velocidade do túnel balístico e (b) placa alvo do túnel balístico, ambos da Empresa BCA..... | 57 |
| Figura 3.13 – (a) Placa de adaptação para fixação dos painéis das blindagens mistas 1 e 2 e (b) blindagem mista 3 fixada no suporte da placa com grampos. | 58 |
| Figura 3.14 – Munições utilizadas nos ensaios balísticos:(a) cartuchos de 7,62 × 51 e 9b)..... | 59 |
| Figura 3.15 - Fluxograma mostrando as etapas do procedimento experimental das amostras cerâmicas adotadas nesta investigação..... | 60 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.1 - Histograma da distribuição de tamanhos de partículas e respectiva curva de distribuição cumulativa do pó de Al_2O_3 | 61 |
| Figura 4.2 - Difratoograma de raios X do pó de Al_2O_3 | 62 |
| Figura 4.3 - Curva da distribuição de tamanho de partículas e respectiva curva de distribuição cumulativa do pó de zircônia..... | 62 |
| Figura 4.4 - Imagens obtidas por MEV do pó de zircônia: a) aglomerados grandes e b) detalhe de um aglomerado grande formado por pequenos aglomerados..... | 63 |
| Figura 4.5 - Difratoograma de raios X do pó de zircônia (3Y-TZP), onde os picos representam à fase cristalina tetragonal da zircônia. | 64 |
| Figura 4.6 – Curva do comportamento da dilatação térmica linear em função da temperatura do composto B..... | 65 |
| Figura 4.7 - Micrografias da superfície de fratura do compósito A (alumina +15 % de zircônia) compactado por prensagem uniaxial com 60 MPa..... | 66 |
| Figura 4.8 - Micrografias da superfície de fratura do compósito B (alumina +18 % de zircônia) compactado por prensagem uniaxial com 60 MPa..... | 67 |
| Figura 4.9 - Micrografias da superfície de fratura do compósito C (alumina +20 % de zircônia) compactado por prensagem uniaxial com 60 MPa..... | 67 |
| Figura 4.10 - Difratoograma de raios X da amostra B sinterizada..... | 68 |
| Figura 4.11 - Imagens obtidas por MEV do compósito sinterizado A: (a) amostra 2 (b) amostra 1 | 70 |
| Figura 4.12 - Imagens obtidas por MEV do compósito sinterizado B: a) amostra 2 b) amostra 1 | 70 |
| Figura 4.13 - Imagens obtidas por MEV do compósito sinterizado C: a) amostra 2 b) amostra 1 | 71 |
| Figura 4.14 – Ilustração das cerâmicas utilizadas: (a) Cerâmica 1, (b) Cerâmica 2 e (c) Cerâmica 3..... | 72 |
| Figura 4.15 - Imagens obtidas do microdurômetro Digital FM-700 da VSE: | 74 |
| (a) Composição A, (b) Composição B e (c) Composição C | 74 |
| Figura 4.16 - Imagens obtidas por microscopia ótica mostrando as trincas geradas pela penetração <i>Vickers</i> em 3 regiões na cerâmica da composição A. | 76 |
| Figura 4.17 - Imagens obtidas por microscopia ótica mostrando as trincas geradas pela penetração <i>Vickers</i> em 3 regiões na cerâmica da composição B. | 76 |
| Figura 4.18 - Imagens obtidas por microscopia ótica mostrando as trincas geradas pela penetração <i>Vickers</i> em 3 regiões na cerâmica da composição C. | 76 |
| Figura 4.19 – Deformação do painel sanduíche-colméia após impacto de um peso. | 77 |
| Figura 4.20 – Curva de absorção de energia de impacto no painel sanduíche-colméia..... | 78 |
| Figura 4.21 – Curva de absorção de energia de impacto em uma chapa de aço inox 304 com espessura de 1,5 mm..... | 79 |
| Figura 4.22 – Amostra de chapa de aço inox após impacto no ensaio de queda de 12 m. | 79 |
| Figura 4.23 – Ensaio da blindagem mista 1, impactada por projétil 9 mm FMJ: | 82 |
| a) vista do tecido de aramida perfurado e b) vista da cerâmica B impactada sob o tecido. | 82 |
| Figura 4.24 – Imagens mostrando os estilhaços resultantes dos impactos na blindagem mista 1: (a) do projétil 9 mm FMJ e (b) da cerâmica B impactada pelo projétil 9mm FMJ..... | 83 |
| Figura 4.25 – Ensaio da blindagem 1, impactadas por projétil .44 Magnum: | 84 |
| (a) vista do impacto frontal e (b) vista traseira da placa. | 84 |
| Figura 4.26 –Configuração da blindagem mista 2 para projétil .357 e .44 Magnum:..... | 85 |
| (a) sem o tecido aramida e (b) após a colagem completa..... | 85 |
| Figura 4.27– Chapas frontais após impacto do projétil .44 Magnum na blindagem mista 2: | 86 |
| (a) blindagem com cerâmica de composição B e (b) blindagem com cerâmica de composição C. | 86 |
| Figura 4.28–Painéis traseiros após impacto do projétil .44 Magnum com penetração completa: (a) blindagem mista 1 e (b) blindagem mista 2..... | 87 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.29 – Montagem da blindagem mista 3 com cerâmica de composição B para o ensaio balístico com projétil 7,62×51 FMJ: | 88 |
| a) vista frontal, mostrando a cerâmica e b) vista traseira. | 88 |
| Figura 4.30 – Ensaio da blindagem mista 3 com cerâmica de composição B: (a) impacto frontal do projétil 7,62 × 51 FMJ e (b) vista traseira da chapa deformada. | 88 |
| Figura 4.31 – Ensaio da blindagem mista 3 com cerâmica de composição C: (a) vista frontal antes do impacto, (b) vista frontal após impacto do projétil 7,62 × 51 FMJ e c) vista traseira da chapa deformada. | 89 |
| Figura 4.32 – Ensaio da segunda blindagem mista 3 com cerâmica de composição C: (a) vista frontal antes do impacto, (b) vista frontal após impacto do projétil 7,62 × 51 FMJ e (c) vista traseira da chapa com uma trinca. | 90 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 - Valores das densidades das partículas em função das massas..... | 6 |
| Tabela 2.2 - Valores do fator sazonal para impactos de meteoróides durante o ano..... | 16 |
| Tabela 2.3 - Cálculo de energia de absorção das colméias. | 19 |
| Tabela 3.1- Valores de tensão de impacto para as colméias fabricadas pela Hexcel. | 52 |
| Tabela 4.1 - Valores obtidos para a massa específica e densidade relativa dos..... | 66 |
| compactados 1, 2 e 3..... | 66 |
| Tabela 4.2 - Valores das retrações lineares das amostras 1 e 2 nas composições A, B e C... | 69 |
| Tabela 4.3 - Valores obtidos para a massa específica e a densidade relativa das cerâmicas 1 e 2. | 72 |
| Tabela 4.4 - Valores de tensão de fratura para as cerâmicas sinterizadas em 1600°C..... | 73 |
| Tabela 4.5 - Valores de dureza Vickers das cerâmicas produzidas para o ensaio de flexão sinterizadas em 1600 °C..... | 74 |
| Tabela 4.6 - Valores de Tenacidade à fratura das cerâmicas sinterizadas em 1600 °C. | 75 |
| Tabela 4.7 – Valores de densidade superficial das blindagens mistas..... | 80 |
| Tabela 4.8 – Valores da razão entre a energia cinética e a densidade de área das blindagens mistas. | 81 |
| Tabela 4.9 – Resultado dos ensaios balísticos realizados na blindagem mista 1. | 82 |
| Tabela 4.10 – Valores de deformação do painel sanduíche-colméia e absorção da energia cinética, resultante do impacto de projétil 9 mm FMJ. | 83 |
| Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios balísticos realizados na blindagem mista 2..... | 85 |
| Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios balísticos da blindagem mista 3 conforme nível III da norma NBR 15000. | 90 |
| Tabela 4.13 – Resultados de deformação da chapa de aço inox AISI 304 (1,5 mm) e valores de absorção da energia cinética das chapas e das cerâmicas dos impactos dos projéteis 7,62 × 51 FMJ. | 91 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|-------|---|
| AMR | Divisão de Materiais do Instituto de Aeronáutica e Espaço |
| AP | <i>Armour piercing</i> |
| ATD | Análise Térmica Diferencial |
| BET | Brunauer-Emmet-Teller |
| CTE | Coordenadoria de Tecnologias Especiais |
| CBERS | China-Brazil Earth Resources Satellites |
| DCTA | Comando Geral de Tecnologia Aeroespacial |
| DRX | Difratometria de raios X |
| DEMAR | Departamento de Engenharia de materiais |
| ETE | Coordenadoria de Engenharia Espacial |
| FMJ | <i>Full Metal Jacketed</i> |
| INPE | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| IAE | Instituto de Aeronáutica e Espaço |
| LAS | Laboratório Associado de Sensores e Materiais |
| LIT | Laboratório de Integração e Testes |
| LCP | Laboratório Associado de Combustão e Propulsão |
| NASA | <i>National Aerospace Agency</i> |
| MEV | Microscopia eletrônica de varredura |
| DTP | Distribuição de tamanhos de poros interconectados |
| TZA | <i>Tetragonal Zirconia-Alumina</i> |
| RCC | <i>Reforced carbon-carbon</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--|---|
| °C | Graus Celsius |
| % (em peso) | Porcentagem em peso |
| ZrO ₂ | Zircônia |
| Al ₂ O ₃ | Alumina ou óxido de alumínio |
| a | Comprimento médio da diagonal da impressão |
| c | Comprimento médio da trinca |
| mPa | Mili Pascal |
| MPa | Mega Pascal |
| s | Segundos |
| V | Volume específico |
| ρ | Densidade teórica |
| E | Módulo de elasticidade |
| σ | Tensão de fratura |
| $\sigma_{50\%}$ | Tensão onde 50 % das amostras fraturariam |
| N ₂ | Gás nitrogênio |
| α -Al ₂ O ₃ | Alumina alfa (estrutura hexagonal compacta) |
| t → m | Transformação fase tetragonal para a fase monoclinica |
| K _{ic} | Tenacidade à fratura |
| Y-TZP | Zircônia tetragonal policristalina estabilizada com ítria |
| nm | Nanometro ou 10 ⁻⁹ m |
| mm | Milímetro ou 10 ⁻³ m |
| μ m | Micrometro ou 10 ⁻⁶ m |
| L _c | Dimensão da placa |
| P | Probabilidade da fratura |
| v | Volume ensaiado do material |
| v ₀ | Volume padrão |
| m | Módulo de Weibull |
| σ_0 | Parâmetro de ajuste |
| Q | Carga aplicada |

| | |
|---------------|--|
| ρ | Massa específica |
| ρ_{H_2O} | Massa específica da água |
| t | Fase tetragonal |
| 2θ | Ângulo de difração de raios X |
| Θ | Ângulo de inclinação do penetrador |
| Fd | Força de impacto |
| e | Espessura do corpo de prova |
| L_1 | Vão maior |
| L_2 | Vão menor |
| L | Largura do corpo de prova |
| e_c | Espessura da placa cerâmica |
| HV | Dureza <i>Vickers</i> |
| Δ_T | Varição da Temperatura |
| % mol | Porcentagem em mol |
| A | Área |
| MPa | Mega Pascal |
| GPa | Giga Pascal |
| K | Condutividade térmica |
| t_b | Espessura da base |
| d_p | Diâmetro do projétil |
| ρ_c | Densidade da cerâmica |
| ρ_p | Densidade do projétil |
| V_p | Velocidade normal do projétil |
| t_c | Espessura da cerâmica |
| S | Espaçamento entre placas |
| σ_r | Limite de resistência à tração da base |
| M_p | Massa do projétil |
| k | Fator de ajuste da equação Cour-Palais |
| N | Número de impactos por metro quadrado |
| m | Massa do meteoróide |
| F | Fator sazonal |

| | |
|-----------|-------------------------|
| g | Aceleração da gravidade |
| G | Limite G (a/g) |
| E_a | Energia de absorção |
| s | Valor da deformação |
| w | Peso (mg) |
| T_i | Tensão de impacto |
| A_i | Área de impacto |
| F_{din} | Força dinâmica |
| F_{est} | Força estática |
| F_c | Força de cisalhamento |
| τ_c | Tensão de cisalhamento |
| d_a | Densidade de área |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1..... | 1 |
| INTRODUÇÃO | 1 |
| CAPÍTULO 2..... | 5 |
| REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 5 |
| 2.1 Proteção de satélites contra impactos de meteoróides | 5 |
| 2.2 Blindagem mista..... | 13 |
| 2.3 Programa do satélite CBERS | 14 |
| 2.4 Painel sanduíche-colméia (honeycomb)..... | 17 |
| 2.5 Cerâmicas para aplicação como blindagem | 21 |
| 2.6 Cerâmicas de zircônia tetragonal | 24 |
| 2.7 Cerâmicas de alumina-zircônia tetragonal | 26 |
| 2.8 Dimensão das placas cerâmicas | 28 |
| 2.9 Formato ideal das placas cerâmicas | 29 |
| CAPÍTULO 3..... | 31 |
| 3.1 Materiais..... | 31 |
| 3.2 Definições das blindagens mistas..... | 33 |
| 3.2.1 Cálculos das blindagens mistas 1 e 2 | 33 |
| 3.2.2 Especificação da blindagem mista 3 | 37 |
| 3.2.3 Dimensões das pastilhas cerâmicas e das blindagens mistas | 37 |
| 3.2.4 Formatos das pastilhas cerâmicas | 39 |
| 3.3 Caracterização dos pós de alumina e zircônia..... | 40 |
| 3.3.1 Massa específica real..... | 40 |
| 3.3.2 Área específica e distribuição de tamanhos de poros dos pós..... | 41 |
| 3.3.3 Distribuição de tamanhos de partículas..... | 41 |
| 3.3.4 Análises das fases cristalinas presentes..... | 42 |
| 3.3.5 Análises morfológicas das partículas dos pós | 42 |
| 3.4 Misturas dos pós de alumina com zircônia | 42 |

| | |
|--|-----------|
| 3.5 Compactação dos corpos de prova | 43 |
| 3.5.1 Densidade dos pós compactados | 43 |
| 3.5.2 Microestruturas dos compactados a verde | 44 |
| 3.5.3 Análise da dilatação térmica linear | 44 |
| 3.6 Sinterização das cerâmicas | 44 |
| 3.7 Caracterizações das cerâmicas | 45 |
| 3.7.1 Densidade relativa das cerâmicas sinterizadas | 45 |
| 3.7.2 Microestruturas das cerâmicas sinterizadas | 45 |
| 3.7.3 Resistência à fratura mecânica | 45 |
| 3.7.4 Dureza superficial | 48 |
| 3.7.5 Tenacidade à fratura | 49 |
| 3.8 Caracterização das blindagens mistas | 51 |
| 3.8.1 Absorção de energia das bases através do ensaio de queda de 12 metros | 51 |
| 3.8.2 Densidade de área das blindagens mistas | 54 |
| 3.8.3 Ensaio balístico | 55 |
| CAPÍTULO 4..... | 61 |
| 4.1 Características do pó de alumina..... | 61 |
| 4.2 Características do pó de zircônia..... | 62 |
| 4.3 Estudo do comportamento da dilatação térmica linear dos compósitos cerâmicos | 64 |
| 4.4 Densidade dos compactados..... | 65 |
| 4.5 Microestruturas das cerâmicas compactadas..... | 66 |
| 4.6 Fases cristalinas das cerâmicas sinterizadas..... | 68 |
| 4.7 Retração linear das cerâmicas sinterizadas | 68 |
| 4.8 Microestrutura das cerâmicas sinterizadas | 69 |
| 4.9 Densidade das cerâmicas sinterizadas..... | 71 |
| 4.10 Tensão de fratura das cerâmicas sinterizadas..... | 73 |
| 4.11 Dureza superficial das cerâmicas sinterizadas | 74 |
| 4.12 Tenacidade à fratura | 75 |

| | |
|--|-----------|
| 4.13 Absorção de energia do painel sanduíche-colméia e chapa de aço inox Aisi 304..... | 77 |
| 4.14 Densidade de área dos materiais e das blindagens mistas..... | 79 |
| 4.15 Ensaio balístico | 81 |
| CAPÍTULO 5..... | 93 |
| SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 95 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 97 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A proteção balística com materiais cerâmicos começou a ser utilizada pelos americanos, durante a Guerra do Vietnã em helicópteros e em aeronaves pequenas, cujas blindagens tinham os objetivos de proteção dos tripulantes e das partes sensíveis da aeronave [1-3].

A substituição de materiais metálicos por materiais cerâmicos garantiu muitas melhorias nas aeronaves, como: a redução de peso, a autonomia e a capacidade de transportes maiores e qualidade da blindagem melhor [3].

As blindagens vêm sendo modificadas constantemente em função do desenvolvimento de novos armamentos. Assim, quando uma munição é desenvolvida para destruir uma certa blindagem, esta é aperfeiçoada para neutralizar o armamento [3].

A blindagem cerâmica constitui um revestimento resistente e rígido capaz de fragmentar o projétil e reduzir sua velocidade, transformando-o em pequenos fragmentos que são absorvidos pela camada flexível da base que suporta a cerâmica. Para que isto ocorra, é necessário que o material cerâmico apresente resistência à deformação mecânica alta, isto é, módulo de elasticidade alto combinado com dureza elevada [3]. A tenacidade à fratura, que é a energia que o material tem a capacidade de absorver antes que ocorra a sua fratura, é um requisito muito importante para esta aplicação. As cerâmicas de alumina apresentam tenacidade à fratura com valores pequenos (de 3 a 5 MPa.m^{1/2}). Por outro lado, as cerâmicas de zircônia apresentam valores que podem atingir até 15 MPa.m^{1/2}. No entanto, são materiais de custo elevado. Os compósitos cerâmicos do tipo alumina - zircônia (TZA - *Tetragonal zirconia-alumina*) podem apresentar valores de tenacidade à fratura de até 12 MPa.m^{1/2}, com um custo menor[4-7].

Durante o impacto balístico num alvo, a tensão mecânica varia de compressão para tração e cisalhamento [3]. Atualmente, nenhum material possui uma resistência máxima para essa combinação de tensões mecânicas. Por exemplo, um material com resistência mecânica elevada em compressão normalmente apresenta uma resistência mecânica baixa em tração. A solução é produzir uma blindagem mista que combine e explore as propriedades benéficas de dois materiais. Algumas cerâmicas permitem combinar dureza alta com massa específica baixa, oferecendo a possibilidade de reduzir o peso por unidade de área requerido para um dado nível de proteção [1,3].

A blindagem mista é formada pela combinação de dois materiais com propriedades diferentes e complementares responsáveis por evitar a penetração do projétil na aeronave ou do meteoróide em um satélite [1].

A cerâmica possui resistência à compressão alta, porém sua resistência à tração é baixa, quando comparada aos metais. Assim sendo, em solicitações mecânicas em flexão a cerâmica também não é recomendada porque apresenta tração na superfície oposta ao impacto. O material que forma a primeira camada é aquele que recebe o impacto inicial do projétil, a pastilha cerâmica, que tem a função de erodir a ponta do projétil e dissipar grande parte da energia cinética, fragmentar a massa do projétil e melhorar a distribuição da pressão de impacto sobre a segunda camada. Esta segunda camada, também chamada de base é formada por um material dúctil que tem a função de absorver a energia cinética residual do projétil, dos estilhaços oriundos do projétil e da própria cerâmica através de sua deformação plástica [2]. O requisito mais importante para o material da base é que ele não falhe durante os estágios iniciais do processo de penetração do projétil, isto é, a base deve suportar as tensões de compressão que são transferidas para a cerâmica após o impacto [1,8].

Nos veículos militares a blindagem externa é feita de aço, o fator peso não é predominante neste caso. A blindagem composta para utilização em viaturas militares pode ser feita colando as pastilhas cerâmicas diretamente sobre a carroceria ou através de um painel contendo as pastilhas cerâmicas coladas onde o painel é montado sobre a carroceria. Em ambos os casos a montagem das pastilhas cerâmicas tem o formato de mosaico com as pastilhas encostadas uma na outra. Após o impacto do projétil na pastilha esta pode ser facilmente trocada, o que reduz os custos de manutenção. Quando existe limitação de peso à base pode ser formada por materiais mais leves como alumínio, fibras de aramida ou polietileno de ultra-alta-resistência[1].

Os satélites sino brasileiros da série CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite*), construídos em parceria com a China [9], são estruturados com painéis sanduíche-colméia de alumínio. Os painéis sanduíche-colméia após montagem apresentam resistência alta e peso baixo. Por estas razões estas estruturas são utilizadas no CBERS, os painéis de 20 mm formam a estrutura geral do satélite e os mais espessos suportam as baterias do sistema de energia solar, as painéis sanduíche-colméia do CBERS serão avaliados neste projeto como base da proteção balística para aplicação contra impactos de meteoróides. A blindagem proposta para satélites foi confeccionada baseada nos princípios de blindagem para espaçonaves e da Estação Espacial Internacional. Como o ensaio balístico foi feito utilizando um projétil de massa muito superior ao do meteoróide e velocidade muito inferior, será necessário realizar uma correlação de energia

cinética entre o impacto do projétil e de um meteoróide de massa e velocidade definida para validação da blindagem.

Existem várias equações que ajudam a definir o projeto de uma blindagem para satélite, o desenvolvimento das blindagens deste projeto foi baseado nas equações definidas por Cour-Palais[10].

Existem dois fatos que devem ser evitados no projeto com blindagem mista de cerâmica e metal. O primeiro fator deve considerar que, após o impacto do projétil na cerâmica ocorre o estilhaçamento do projétil e da cerâmica com energia cinética alta colocando em risco a vida de pessoas ao redor da viatura, ou a integridade de equipamentos dos satélites. Isto pode ser solucionado através da colocação de camadas de material flexível para aumentar a retenção dos estilhaços. Para solucionar este problema foi utilizado um revestimento de aramida (kevlar) sobre as pastilhas cerâmicas. O outro fator está relacionado à deformação do metal base, caso ocorra uma deformação exagerada poderá atingir os ocupantes no interior do veículo, ou atingir as peças fundamentais do satélite. A solução que tem sido utilizada para minimizar estes efeitos, consiste em manter um espaço interno no veículo ou no satélite, garantindo a deformação da base sem afetar as dimensões do espaço limite de projeto [11].

Outra aplicação de blindagem que têm sido estudada e aperfeiçoada é para proteção de carcaças de turbinas utilizadas em aviões contra o desprendimento das palhetas ou de impacto de elementos estranhos que possam ser aspirados pelo compressor [1].

Os principais materiais cerâmicos para blindagem balística são a alumina, o carbetto de silício e o carbetto de boro. O carbetto de boro é o que apresenta as melhores propriedades mecânicas: maior dureza, módulo de elasticidade e tenacidade à fratura e a menor densidade, entretanto possui o maior custo de fabricação. O carbetto de silício possui propriedades mecânicas um pouco inferiores ao carbetto de boro, porém apresenta a vantagem de ter um custo inferior. Ambos são utilizados em blindagens para calibres pesados. No entanto, a alumina é normalmente utilizada para calibres leves, pois as suas propriedades são inferiores aos carbeto de boro e de silício, mas possui a vantagem de ser economicamente viável [1,12]. As munições utilizadas para os ensaios balísticos são os projéteis 9 mm FMJ, .357 Magnum e .44 Magnum para a blindagem mista que utiliza os painéis sanduíche-colméia com pastilhas cerâmicas finas e o projétil 7,62 x 51 FMJ para a blindagem mista que utiliza a chapa de aço inox com pastilha cerâmica espessa. A munição 7,62 x 51 FMJ é uma munição de energia cinética alta, classificada conforme nível III da norma NBR 15000 e está na classe dos calibres leves [13].

Neste trabalho serão investigados os parâmetros de processamento e as características de três composições de alumina - zircônia tetragonal policristalina dopada com ítria (Y-TZP). As

principais propriedades mecânicas de interesse associadas a este tipo de compósito cerâmico que serão estudadas: resistência mecânica à fratura, dureza superficial e tenacidade à fratura. Serão realizados ensaios de queda de 12 metros nos materiais metálicos para construção de curvas de absorção de energia. As blindagens mistas serão submetidas aos ensaios balísticos e os resultados obtidos serão correlacionados aos demais obtidos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Proteção de satélites contra impactos de meteoróides

Os meteoróides são fragmentos de materiais que vagueiam pelo espaço e que, possuem dimensões significativamente menores que um asteróide e significativamente maiores que um átomo ou molécula, distinguindo-nos dos asteróides. O meteoróide quando penetra na atmosfera, ele interage com as camadas de ar e estas causam resistência ao seu deslocamento, devido o atrito e em função disto o astro se aquece. Se a velocidade do corpo celeste for da ordem de 45 km/s o meteoróide se aquece a temperaturas de 3.000 °C a 7.000 °C, dependendo dos materiais do meteoróide. A temperaturas tão elevadas ocorre a volatilização da parte externa do meteoróide e inicia o processo de geração de luz. Um meteoróide ao colidir com a atmosfera terrestre só consegue penetrar em condições favoráveis de ângulo e velocidade. Quando a colisão do meteoróide é frontal ele se despedaça ao chocar-se com a atmosfera e se a colisão for num ângulo pequeno o meteoróide é resvalado e não consegue penetrar a atmosfera.

Meteorito é a denominação dada quando um meteoróide alcança a superfície da Terra, pode ser um aerólito (rochoso), siderito (metálico) ou siderólito (metálico-rochoso). Todos os meteoritos contêm pequenas quantidades de materiais radioativos e são utilizados no processo de datação dos meteoritos [14].

O lixo espacial ou detritos espaciais são naves, combustíveis, satélites desativados, pedaços de mantas térmicas e foguetes, objetos metálicos e até mesmo ferramentas perdidas por astronautas durante as suas explorações espaciais. A NASA (*National Aerospace Agency*) tem realizado testes exaustivos envolvendo impactos de meteoróides e detritos, pois ambos representam uma ameaça para a sobrevivência da tripulação da nave espacial e segurança principalmente devido ao risco potencial de impacto alto, velocidade e energia envolvidas em colisões entre veículos espaciais e meteoróides ou detritos espaciais. Esses estudos também são aplicáveis a satélites e divergem no grau de segurança e de órbitas [15,16].

Os impactos de meteoróides e de detritos são eventos aleatórios e não são possíveis de se determinar com precisão quando ou onde ocorrerá um impacto em uma nave espacial ou satélite. No entanto, as técnicas de estatística válidas para eventos aleatórios têm sido aplicadas para previsão de impactos de meteoróide e de detritos espaciais, a especificação dos satélites CBERS prevê esta probabilidade através da equação (2.3) apresentada no capítulo 2.1.1[9].

Os impactos de meteoritos ou de detritos são mais prováveis quanto maior for o tamanho da nave espacial ou do satélite. As taxas de impacto por detritos espaciais podem ser modificadas através de um adequado posicionamento do satélite, considerando que existem órbitas nas quais as densidades destes detritos são menores.

O objetivo dos testes e das análises é determinar o tamanho das partículas de meteoróides e de detritos que estarão no limite de falha para a superfície impactada. Isso depende de uma definição clara de fracasso, referida como critérios de falha. Os resultados dos testes e das análises de esforços mecânicos são equações de limite balístico para a blindagem, que definem o tamanho da partícula no limiar como um fracasso em função do alvo e dos parâmetros de impacto. Para isto, é calculada a probabilidade de que os limites balísticos sejam ultrapassados (por exemplo, para que ocorra a falha) para uma superfície particular do satélite a partir dos modelos e de equações desenvolvidas em função do tempo de exposição ao evento. O projeto da blindagem é feito para atender às exigências, de uma massa mínima de blindagem ou outras restrições como o volume permissível da blindagem ou espaçamento de impacto.

As velocidades dos meteoróides variam de 11 km/s a 72 km/s, e as densidades das partículas variam de 2 g/cm³ a 0,5 g/cm³ em função da massa destas partículas, conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Valores das densidades das partículas em função das massas.

| Parâmetros dos meteoróides | | | |
|--|--------|----------|-------------|
| Massa das partículas | < 1 µg | > 100 mg | 1µg - 100mg |
| Densidade das partículas (g/cm ³) | 2 | 0,5 | 2 a 0,5 |

A NASA realizou um estudo aprofundado sobre impactos de meteoróides e detritos sobre o Veículo Espacial *Orbiter*, após cada missão, realizada desde 1992, foram inspecionados visualmente os danos causados por meteoróides ou detritos [15-19].

Os meteoróides e detritos causaram muitos impactos sobre o Veículo Espacial *Orbiter*, resultando em danos de partes sensíveis do veículo, tais como nas janelas, nos radiadores e nas antenas. O potencial de impacto também tem resultado em mudanças operacionais, como em atitudes de voo e posição da porta da baía de carga, com o objetivo de reduzir a possibilidade de danos causados por impactos em superfícies. O *Orbiter* também sofreu recentes modificações para reduzir a probabilidade de perda de sistemas críticos da espaçonave.

As melhorias realizadas no *Orbiter* foram baseadas na quantificação de riscos de impactos de meteoróides/detritos.

Três tipos de avaliações de riscos relacionados a impactos de meteoróides/detrítos foram realizados:

1. riscos críticos de impacto, onde o "crítico" é definido como o dano que poderia pôr em perigo a tripulação durante a órbita ou as etapas de reentrada / aterrissagem da missão;
2. riscos de abortar uma missão devido ao impacto que cause um vazamento em um dos dois sistemas de radiadores e
3. riscos da troca da janela por impactos acima do previsto.

Por exemplo, os riscos de impacto crítico foram considerados principalmente devido às penetrações, resultantes de impactos ocorridos no compósito carbono-carbono reforçado (RCC - *Reforced carbon-carbon*) que revestiam as extremidades das asas. O RCC, nesta região do veículo, possui 6 mm de espessura e tem sido penetrado facilmente por pequenos projéteis hiper-velozes. As perfurações no RCC tornaram-se problemáticas para a reentrada. Nesta situação, os gases atmosféricos quentes entram na cavidade RCC, resultando na queima do substrato de carbono que leva à expansão de buracos no RCC, aquecendo o suporte estrutural interno e elevando a temperatura para valores inaceitáveis. A perda do RCC pode resultar na perda do controle do veículo durante reentrada, considerando que parte de um painel pode se soltar e interferir com o fluxo de ar suave nas superfícies das asas. A análise indicou que não foi possível alterar os painéis de RCC sem o aumento de custo ou acréscimo de massa [18-23].

Os radiadores e as janelas são as fontes principais para a maioria das amostras de meteoróides e detritos que colidiram no *Orbiter* (Fig. 2.2). As amostras coletadas são submetidas a análises por MEV e EDX para se determinar os constituintes químicos elementares. Durante as missões de 1992 a 1997 ocorreram 4 grandes impactos de meteoróides no *Orbiter* em áreas sensíveis como no radiador, manifold externo, refletor de antena banda Ku e estabilizador vertical, com diâmetros de 0,7, 0,2, 0,6 e 0,4 mm, respectivamente. A determinação do tamanho do meteoróide é realizada através de equações de penetração, desenvolvidas a partir de testes e de análises, uma vez que se fragmentam após o impacto [20].

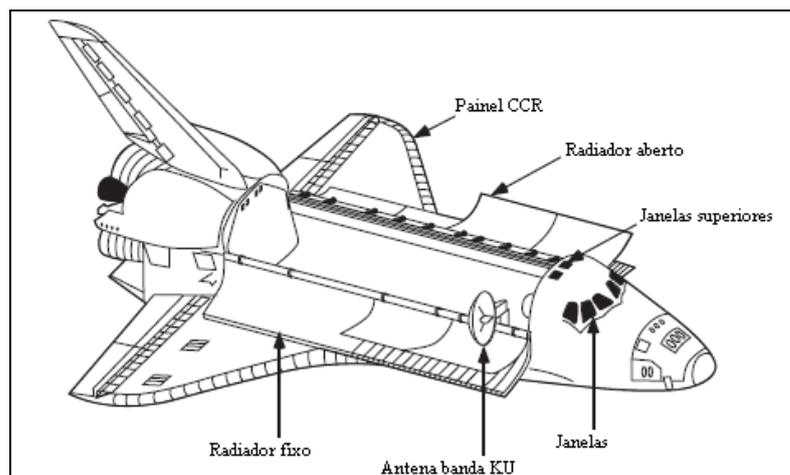


Figura 2.1 - Partes do Veículo Espacial Orbiter mais suscetíveis aos impactos por meteoróides e detritos.

Fonte: [18].

Considerando estes fatores, a NASA decidiu acrescentar um tecido de fibras de carbetto de silício (conhecido comercialmente como *Nextel*) no isolante existente na parte interna da asa, de modo que os impactos maiores poderiam ser tolerados, sem perda da integridade dos painéis de RCC (Fig. 2.2).

Através desta medida ocorreu uma redução de 75 % nos riscos de impactos críticos para o bordo de ataque.

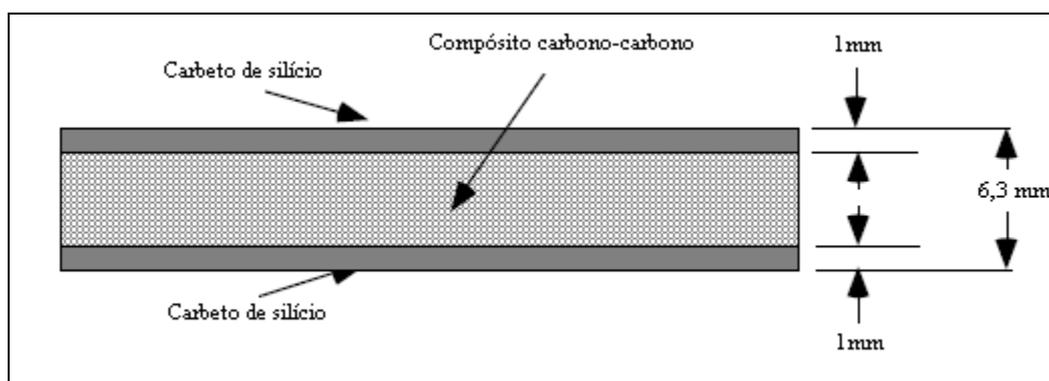


Figura 2.2 - Seção transversal esquemática, mostrando o posicionamento dos tecidos de cerâmica (carbetto de silício) no sistema isolante da parte interna da asa do veículo espacial *Orbiter*.

Fonte: [18]

Os testes de hiper-velocidade são partes integrantes das análises realizadas para garantir o projeto de blindagem adequado para meteoróides/detritos [20-26].

Canhões com duas fases de gases leves, aceleram projéteis até 7 km/s e são capazes de lançar uma grande variedade de formas de projétil, outras técnicas existem para lançar projéteis com velocidade maior do que 10 km/s, entretanto com menos versatilidade (Fig. 2.3).



Figura 2.3 - Sistema de testes de hiper-velocidade utilizado para caracterização de blindagens.

Fonte: [18]

A Estação Espacial Internacional (ISS - *International Space Station*) possui requisitos de proteção meteoróides/detritos bastante rigorosos e coerentes com os programas anteriores. Estes requisitos são devidos ao tamanho muito maior da ISS, ao tempo maior de exposição aos impactos e à operação em altitudes mais altas do que os veículos espaciais, o que aumenta os riscos e a probabilidade de impactos de meteoróides/detritos (Fig. 2.4).

A ISS possui escudos capazes de absorver os impactos de partículas de alumínio com tamanhos da ordem de 1,0 a 1,3 cm de diâmetro, com velocidade de impacto de 9 km/s e ângulo típico de incidência de 45°. Em comparação, a Estação Espacial MIR era capaz de absorver os impactos de partículas com tamanhos de até 0,3 cm de diâmetro. O Veículo Espacial *Orbiter* é capaz de absorver os impactos de partículas de 0,2 a 0,5 cm. A *Apollo* e a *Skylab* eram capazes de absorver os impactos de partículas de 0,15 a 0,2 cm em condições semelhantes de impacto.

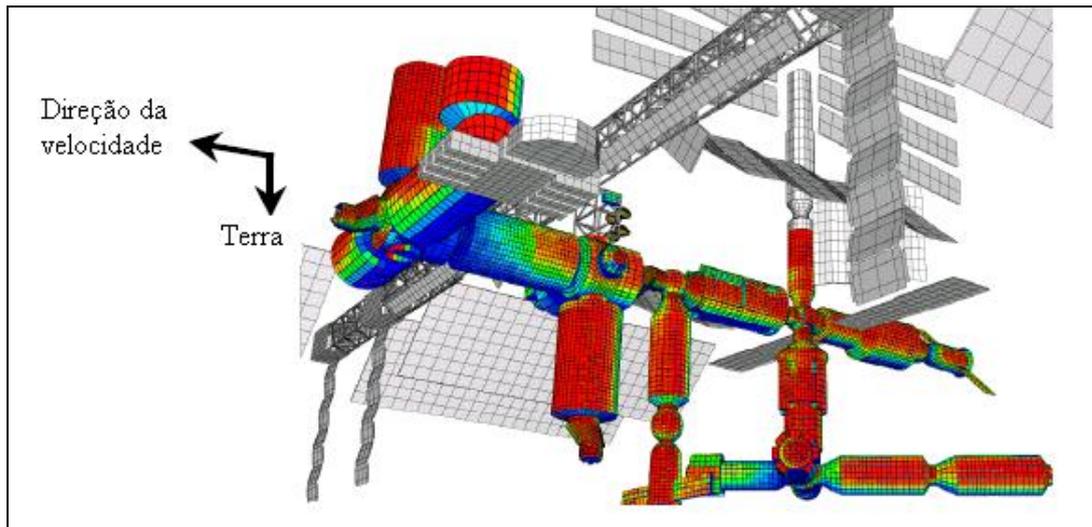


Figura 2.4 - Figura esquemática da Estação Espacial Internacional.

Fonte: [18].

Fred Whipple [27] propôs, em 1940, uma proteção contra meteoróide constituída por um anteparo de sacrifício fino e distanciado de outra parede posterior. O escudo de Whipple é mostrado na Figura 2.5. A função da primeira chapa ou para-choques é estilhaçar o projétil em uma nuvem de material contendo detritos do projétil e do pára-choques. Essa nuvem se expande enquanto se movimenta através do espaço livre, resultando na dinâmica do pêndulo a ser distribuído em uma área ampliada na parede traseira. A chapa traseira deve ser espessa o suficiente para suportar a pressão de carregamento a partir da nuvem de detritos.

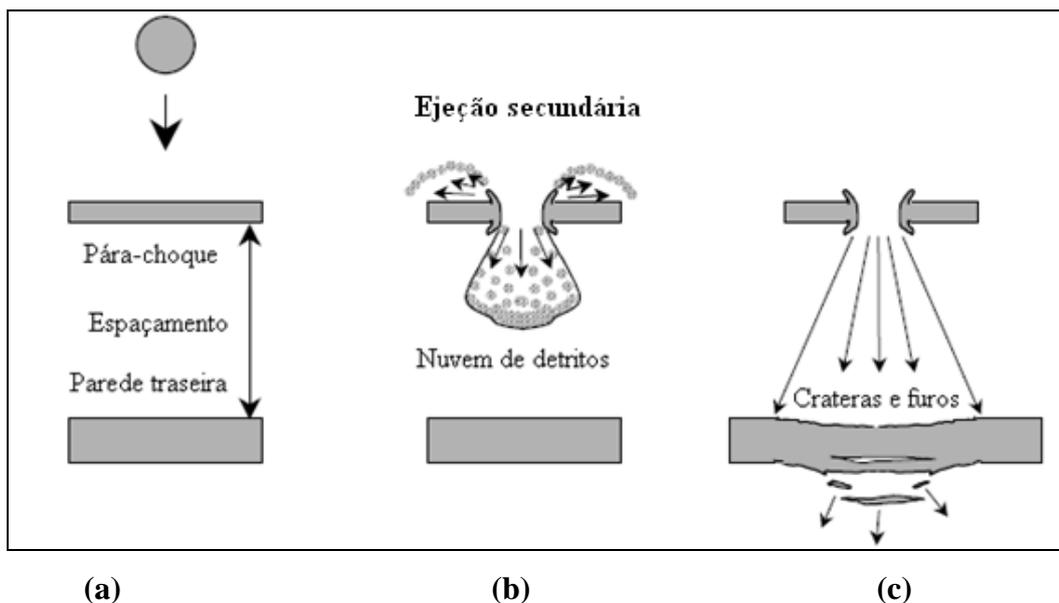


Figura 2.5 - As etapas de desintegração do projétil/blindagem no escudo de Whipple.

Fonte[27].

Os escudos Whipple foram usados para proteger o módulo de comando da *Apollo* e do *Lunar Lander*. Cour-Palais [5] desenvolveu as Equações 2.1 e 2.2, que foram utilizadas na concepção dessas proteções. Na época do desenvolvimento destas equações, os meteoróides eram considerados as únicas ameaças para uma nave espacial. As equações se originaram a partir da análise dos resultados dos testes de impacto com projéteis de alumínio ou vidro na velocidade de 10 km/s, considerando impacto normal à superfície.

As variáveis consideradas foram: a espessura do para-choques, a resistência mecânica e a espessura do material da parede traseira, o diâmetro, a densidade e a velocidade do projétil.

A primeira equação desenvolvida para o cálculo da espessura da parede é dada por:

$$T_b = 0,055 (\rho_c \rho_p)^{1/6} M_p^{1/3} V_p S^{-0,5} (980/\sigma_r)^{0,5} \quad (2.1)$$

A segunda equação desenvolvida para o cálculo da espessura da parede diferencia da primeira pelo fator k, que é uma variável em função do diâmetro do projétil.

$$t_b = k (\rho_c \rho_p)^{1/6} M_p^{1/3} V_p S^{-0,5} (980/\sigma_r)^{0,5} \quad (2.2)$$

Onde:

d_p = diâmetro do projétil (cm);

ρ_c = densidade do material do para-choques (cerâmica) (g/cm³);

ρ_p = densidade do projétil (g/cm³);

V_p = velocidade normal do projétil (km/s);

t_c = espessura do para- choques (cerâmica) (cm);

S = espaçamento entre as placas (cm);

σ_r = limite de resistência à tração do material da parede traseira (base) (MPa);

M_p = massa do projétil (g) e

k = variável em função do diâmetro do projétil (Fig. 2.6)

O coeficiente 0,055 da Equação 2.1 foi substituído pelo coeficiente do diâmetro do projétil (k) na Equação 2.2, refletindo uma vasta gama de resultados em função de vários diâmetros de partículas testadas em impactos de hiper-velocidade, como mostrado na Figura 2.6.

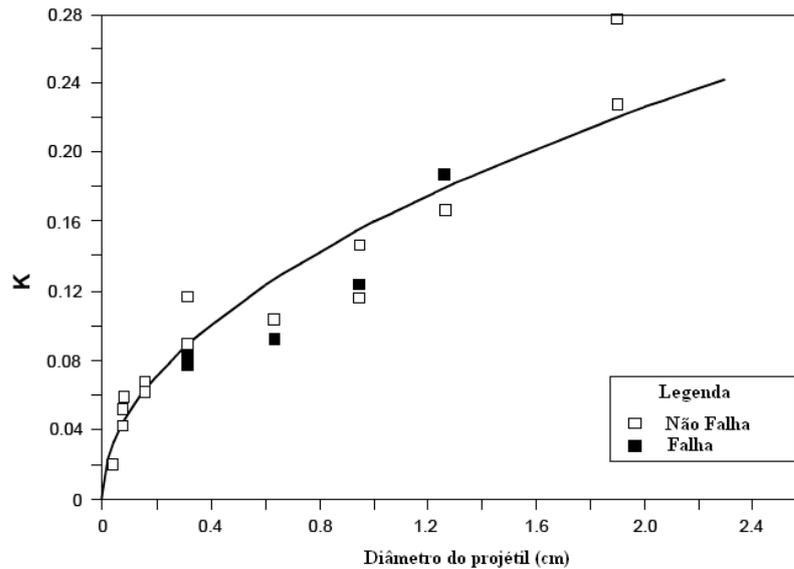


Figura 2.6 - Fator k de ajuste para equação Cour-Palais.

Fonte: [10]

A Equação 2.2 normalmente tem menor potencial para prever a espessura da parede traseira necessária para impedir a falha quando V_p é menor do que 7 km/s, S/d_p é menor do que 15 e t_c/d_p é menor do que 0,18.

As características desejáveis das blindagens eficazes incluem:

1. estilhaçamento do projétil;
2. densidade da blindagem baixa;
3. penetração limitada de estilhaços na parede traseira;
4. dispersão da nuvem de detritos grande;
5. velocidade reduzida da nuvem de detritos e
6. ejeção secundária mínima.

As pressões de impacto dependem da velocidade de impacto, da densidade do projétil e do alvo e da resistência mecânica à compressão dos materiais. As pressões de choque com valores maiores geram mais energia, que se traduz em aquecimento do projétil. Os fragmentos de projéteis sólidos são mais prejudiciais para a parede traseira do que as partículas líquidas ou de vapor e, portanto, é preferível um material da blindagem que introduza altas pressões de choque no projétil [25-27].

2.2 Blindagem mista

A blindagem mista consiste na utilização de dois ou mais materiais formando um “sanduíche”, com objetivo de aproveitar as propriedades diferentes e específicas dos materiais que são posicionados como placa, garantindo uma melhor performance da blindagem. Os materiais cerâmicos possuem alta resistência à compressão, alta dureza, entretanto possuem baixa resistência a tração e são frágeis. No processo de resistência ao impacto de projétil de alta energia, são necessárias as seguintes propriedades: dureza e alta resistência à compressão no início do impacto e resistência à flexão e ductilidade nos estágios finais. A primeira etapa é bem desempenhada pelos materiais cerâmicos, suportando a elevada carga de compressão causada pelo projétil, entretanto, na segunda etapa eles não são adequados, para os requisitos de resistência à flexão e ductilidade os materiais metálicos possuem bom desempenho, estes materiais podem ser alumínio aeronáutico ou fibras de aramida quando houver limitações de peso como no caso de satélites ou ser de aço dúctil quando o peso não for fator determinante, como no caso de viaturas militares. Os materiais cerâmicos exercem grande tensão de compressão no instante do impacto que causam a erosão da ponta dos projéteis endurecidos ou a deformação da ponta dos projéteis dúcteis, em ambos os casos ocorrem o aumento de área de contato favorecendo a distribuição da pressão sobre a blindagem.

A segunda camada, chamada também de base tem a função de absorver a energia residual dos fragmentos do projétil e da própria cerâmica através da deformação plástica. Os esforços iniciais de compressão sobre a cerâmica causam tensões de tração do lado oposto ao impacto, a base sendo de metal dúctil capaz de se deformar sem se romper e de suportar as tensões exercidas neste local, evita a ocorrência da falha. A função principal da base segundo Wilkins [8], é não falhar durante os estágios iniciais do processo de penetração do projétil, devendo suportar toda tensão de compressão exercida sobre a cerâmica. O projeto de uma blindagem composta deve levar em considerações fatores como peso da blindagem, nível da proteção desejada, ambiente de operação e observar os danos colaterais[11]. Os danos colaterais podem ser os fragmentos arremessados com alta velocidade durante o impacto do projétil e também a eventual deformação excessiva da base, entretanto, medidas de segurança solucionam facilmente esta condição. Uma das soluções é aplicar um revestimento externo à cerâmica capaz de conter os fragmentos, como tecido de aramida e outra medida é projetar um espaço adequado da blindagem em relação aos itens internos do equipamento a ser blindado.

2.3 Programa do satélite CBERS

O Programa CBERS é uma parceria entre Brasil e China no setor técnico-científico espacial, voltado para tecnologia de sensoriamento remoto, onde o INPE é o responsável do lado brasileiro. O programa trouxe vantagens para os dois países, pois a China já possuía experiência na construção de satélites e foguetes lançadores e o Brasil a familiaridade com a alta tecnologia necessária e um parque industrial mais moderno. Além disto, os dois países possuem áreas despovoadas grandes e com recursos naturais vastos com potenciais agrícolas e ambientais e, portanto, a necessidade de monitoramento de seus territórios. O Programa CBERS teve início com o desenvolvimento e a construção de dois satélites CBERS-1 e 2, que foram lançados pelo foguete chinês Longa Marcha 4B. Os dois satélites são idênticos em sua constituição técnica, missão no espaço e em suas cargas úteis (equipamentos embarcados, como câmeras, sensores, computadores além de outros equipamentos voltados para experimentos científicos). Ambos os governos decidiram expandir o acordo e incluir outros três satélites da mesma categoria, o satélite CBERS-2B que foi lançado em 2007 e operou até o início de 2010. O CBERS-2B necessitou de 1110 w de potência elétrica para o funcionamento dos seus equipamentos, que foram obtidos através dos painéis solares que foram mantidos sempre na direção do sol por controle automático. Os satélites CBERS-3 e 4 são uma segunda etapa da parceria sino-brasileira, sendo que o CBERS-3 tem seu lançamento previsto para o final de 2011. O apontamento das câmeras para obtenção de imagens de alta resolução requer um sistema de controle de atitude com preciso alta, cuja identificação é realizada pelo uso de um receptor de GPS e de um sensor de estrelas. O controle da atitude e altitude (órbita nominal) do satélite se dá pelo uso de um conjunto de propulsores de hidrazina acionados por controle remoto pelo Centro de Controle de Satélites localizado no INPE de São José do Campos, SP.

Os dados enviados à Terra são primeiramente coletados e processados por um sistema de computadores no satélite. O satélite é dotado de um sistema de controle térmico capaz de manter a temperatura ambiente apropriado para o perfeito funcionamento dos equipamentos.

A órbita do CBERS é heliossíncrona com uma altitude de 778 km e realiza 14 revoluções por dia. A Figura 2.7 apresenta um desenho ilustrativo da órbita do satélite CBERS 2B. O satélite cruza a linha do Equador sempre na mesma hora local, 10:30 da manhã, garantindo as mesmas condições de iluminação solar para a comparação de imagens realizadas em dias diferentes.



Altitude de Órbita:778km

Inclinação:98.504.º

Período:100,26 min.

Figura 2.7 – Órbita do satélite CBERS 2B.

Fonte: [9]

O satélite CBERS-2B possui câmeras CCD (Câmera imageadora de resolução alta), WFI – Câmera Imageadora de campo amplo de visada) e HRC (Câmera pancromática de resolução alta), com pixel de 2,7 m em uma banda larga no espectro visível. A cobertura da câmera HRC é de apenas 27 km, por isso é adotada uma sistemática especial de imageamento, garantindo uma cobertura completa do país em resolução alta a cada cinco ciclos de 26 dias de imageamento, ou seja a cada 130 dias. A cada ciclo de 26 dias, todo o território é coberto pela CCD (que tem 113 km de largura de faixa de imageamento), mas a HRC cobre menos de um quarto dessa largura de faixa de imageamento, precisando de cinco ciclos para completar os 113 km da CCD. Os satélites CBERS-3 e 4 serão uma evolução dos satélites CBERS-1, 2 e 2B. Para o CBERS-3 e 4, serão utilizadas no módulo carga útil 4 câmeras (Câmera PanMux - PANMUX, Câmera multi espectral - MUXCAM, Imageador por varredura de resolução média - IRSCAM, e Câmera imageadora de campo de visada amplo - WFICAM) com desempenhos geométricos e radiométricos melhorados. As órbitas dos satélites CBERS-3 e 4 serão a mesma dos satélites antecessores CBERS-1, CBERS-2 e CBERS-2B [9].

A especificação dos satélites CBERS prevê estatisticamente a possibilidade de impactos de meteoróides.

Nesta especificação, a frequência de impacto aleatória (N - número de impactos por metro quadrado por ano) de meteoróides com massa igual ou maior que m gramas numa superfície orientada aleatoriamente é dada pelas Equações 2.3 e 2.4: válida para $10^{-6} < m < 10^{-12}$ g:

$$\text{Log N} = -0,063(\log m)^2 - 1,584(\log m) - 14,339 + \log (\text{Ge}) + \log (0,5 (1 + (1-r^2)^{1/2})) + \log F \quad (2.3)$$

Válida para: $10^{-6} < m < 10^{-12}$ g

$$\text{Log N} = -1,22 (\log m) - 14,41 + \log (\text{Ge}) + \log (0,5 (1 + (1-r^2)^{1/2})) + \log F \quad (2.4)$$

Válida para: $1 < m < 10^{-6}$ g

Onde:

$$\text{Ge} = 0,568 + (0,432/r) = 0,568 + (0,432/(778/6378)) = 4,1$$

r = a distância da Terra em unidade de raios da Terra ($6,378 \times 10^3$ km) e

F = fator sazonal obtido pelo uso da Tabela 2.1..

Tabela 2.2 - Valores do fator sazonal para impactos de meteoróides durante o ano.

Fonte: [9].

| MÊS | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Fator F | 0,6 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 1,1 | 1,6 | 1,8 | 1,6 | 1,1 | 1,1 | 0,9 | 0,7 |

Considerando o maior meteoróide que atingiu o Veículo Espacial *Orbiter* durante as missões de 1992 a 1997 e o cálculo para um diâmetro de 0,7 mm, com densidade de $2,0 \text{ g/cm}^3$, a massa equivalente será de aproximadamente 2 mg.

Utilizando o maior valor do fator F (mês de julho) e da massa de 0,002 g, tem-se o valor de N conforme a equação 2.4:

$$\text{Log N} = -1,22 (\log 0,002) - 14,41 + \log (4,1) + \log (0,5 (1 + (1-0,122^2)^{1/2})) + \log 1,8$$

$$\text{Log N} = - 10,24$$

$$N = 5,6$$

Este valor indica que podem ocorrer quase 6 impactos de meteoróides com massa de 2 mg ao ano por metro quadrado de satélite, segundo a equação prevista pela especificação do satélite CBERS.

A Figura 2.8 mostra uma representação do satélite CBERS 2B em órbita sobre a Terra, toda a superfície externa do satélite está sujeita a impactos de meteoróides, as partes sensíveis do satélite precisam ser protegidas.



Figura 2.8 – Satélite CBERS 2B em órbita.

Fonte: [9]

2.4 Painel sanduíche-colméia (honeycomb)

Painel sanduíche-colméia (*honeycomb*) de alumínio é composto por duas camadas de chapas de liga de alumínio coladas juntamente com um núcleo de colméia. A colméia é um material corrugado leve, que oferece versatilidade no tamanho das células, densidade, temperatura e outras propriedades. A colméia oferece uma estrutura única, feita a partir de uma ampla variedade de materiais incluindo termoplástico, fibra de vidro, carbono, alumínio e aramida.

Os painéis sanduíche-colméia de alumínio também se caracterizam por serem leves, de resistência alta, rigidez alta, bom isolante acústico, resistência alta a corrosão, resistente ao calor, etc. A colméia é um excelente material de núcleo para fabricação de estruturas sanduíche e um absorvedor de energia muito eficiente. A absorção de energia acontece através do esmagamento sob ação de uma carga ocasionando a dobra sobre dobra. Esta característica tem provado ser um dos métodos mais confiáveis e eficientes para amortecimento e proteção contra impactos (limite G). Os painéis sanduíche-colméia encontram várias aplicações de amortecimento e são aplicadas em várias partes de aviões e helicópteros, também em mísseis, naves espaciais, satélites, lançador de satélite, estruturas de fórmula 1, barreiras de impacto, navios, barreiras acústicas, etc.

As chapas das faces do sanduíche possuem espessuras que variam de 0.2 mm até 1.5mm e a folha de alumínio, que é usada para compor as colméias, possui espessura que varia de 0.1mm até 0.6mm. A união entre as chapas e a colméia é feita através da colagem com PVDF sob condições de altíssimas temperaturas e pressão. A espessura total do painel sanduíche-colméia de alumínio pode ser fabricada conforme a necessidade de projeto. As colméias de

alumínio do fabricante Hexcel são protegidas por dois tipos de tratamento para proteção à corrosão: o CR III que consiste numa primeira camada protetiva à base de cromatos e outra camada seladora de um polímero à base de organometálico; a outra proteção é a CR-PAA; proteção à base de ácido fosfórico anodizado que garante bom desempenho ao salt spray, resistência à propagação de trincas e boa adesão para colagem das placas no núcleo da colméia [28].

A Figura 2.9 apresenta um painel sanduíche-colméia de alumínio com espessura de 20 mm cedida pela área de estruturas do INPE que foi seccionada para visualização interna.

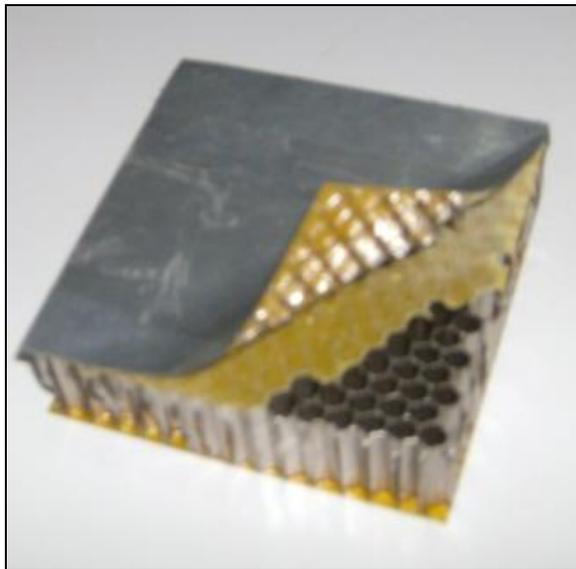


Figura 2.9 – Painel sanduíche-colméia seccionado utilizado no satélite CBERS-2B.

A Figura 2.10 apresenta esquematicamente uma curva da deformação do painel sanduíche-colméia sujeito a uma carga dinâmica, a deformação máxima para amortecimento nos painéis de alumínio deve estar entre 55 e 80 %.

No impacto representado por “A” ocorre a deformação apenas da chapa superior.

Em “B” ocorre a deformação da chapa superior e da colméia.

Em “C” apenas o da colméia, pois a placa da face já se rompeu.

A partir deste ponto, com 50% de deformação o aumento da carga é pequeno para que ocorra uma grande deformação.

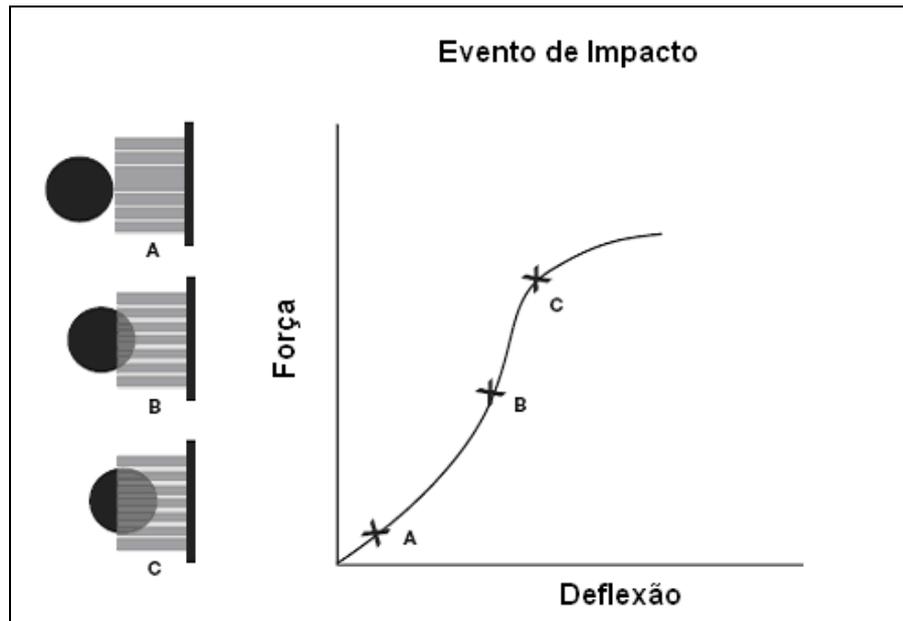


Figura 2.10 – Curva esquemática do evento de impacto num painel sanduíche-colméia.

Fonte: [28].

O projeto do painel sanduíche-colméia pode ser realizado através do valor da energia de absorção conforme Tabela 2.2.

Tabela 2.3 - Cálculo de energia de absorção das colméias.

| Equações | | | |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------|
| Parâmetro | Vertical | Horizontal | Nº |
| Limite G | $G = F_{din}/F_{est}$ | $G = v^2/2gs$ | (2.6) |
| Força dinâmica (N) | $F_{din} = T_i \cdot A_i$ | $F_{din} = T_i \cdot A_i$ | (2.7) |
| Energia de absorção (J) | $E_a = F_{din} \cdot s$ | $E_a = F_{din} \cdot s$ | (2.8) |
| Velocidade de impacto (m/s) | $v = (2gh)^{1/2}$ | Valor dado | (2.9) |

Fonte: [28]

Onde:

$G = a/g$ (adimensional);

s = valor da deformação (m);

$w = m \cdot g$ (N);

T_i = tensão de impacto (valor tabelado) (Pa);

A_i = área de impacto (m²);

F_{din} = força dinâmica (N) e

$F_{est} = w$ = força estática (N)

A Figura 2.11 apresenta esquematicamente o impacto vertical de uma massa em queda livre e outra o impacto horizontal, mostrando as variáveis h e s apresentadas na Tabela 2.2.

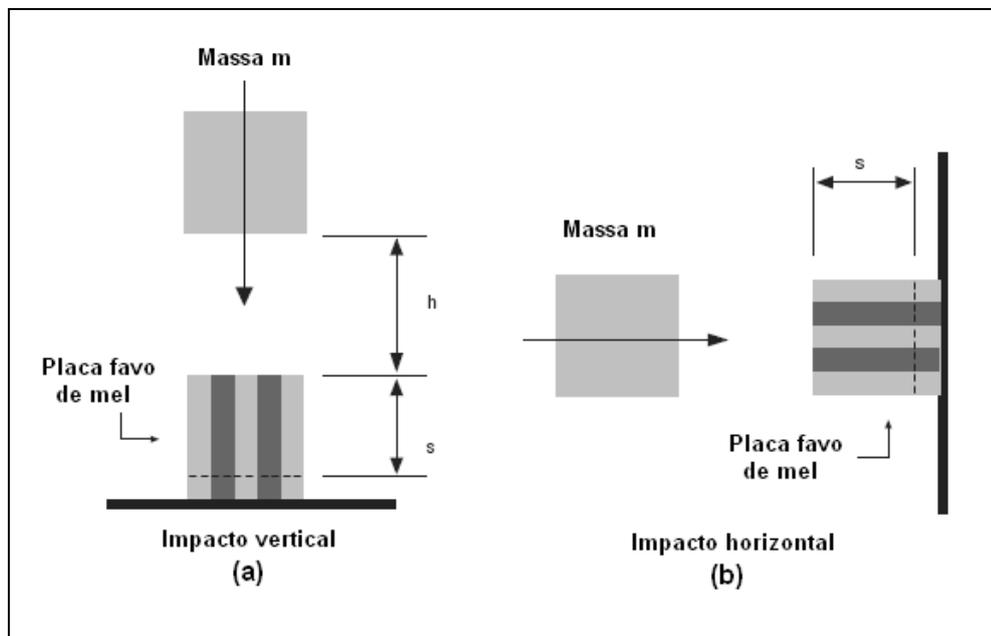


Figura 2.11 – Desenho esquemático de impacto vertical (a) e horizontal (b).

Fonte: [28]

A Figura 2.12 apresenta a montagem da estrutura do satélite CBERS-2B, utilizando painéis sanduíche-colméia de alumínio, as espessuras dos painéis são variadas, os mais espessos são utilizados para suportar as baterias do sistema de energia solar, semelhantes aos painéis utilizados neste projeto, que possuem espessura de 61,6 mm e densidade de área 8,4 kg/m².



Figura 2.12 – Montagem do satélite CBERS-2B utilizando painel sanduíche-colméia.

Fonte: [9].

A capacidade de absorção de energia e do limite G do painel sanduíche-colméia de alumínio de espessura 61,6 mm utilizado neste projeto foram calculados pelas equações 2.6 a 2.9 e apresentados no capítulo 3.8.1 e a capacidade de absorção de energia foi comprovada na prática através do ensaio de 12m e é apresentada no item 4.11.

2.5 Cerâmicas para aplicação como blindagem

Cerâmicas tem sido alvo de pesquisa e desenvolvimento em sistemas de blindagens de peso reduzido e desempenho balístico alto, este tema tem sido de grande interesse tecnológico e científico. Mesmo com os recentes progressos nesta área, a compreensão sobre o comportamento balístico de materiais cerâmicos ainda está em pleno desenvolvimento [29-31]. Várias cerâmicas têm sido aplicadas no desenvolvimento de blindagem balística, principalmente: Al_2O_3 , B_4C , SiC , TiB_2 e AlN e também vários compósitos, como $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ e $\text{TiB}_2/\text{B}_4\text{C}$ [32]. Os principais motivos pelos quais os materiais cerâmicos não são tão utilizados nas blindagens são o custo elevado, dificuldade de repetibilidade no processamento e dificuldade em prever o desempenho balístico a partir das propriedades dos materiais [1]. Para garantir o bom desempenho do sistema balístico é necessário controlar todas as propriedades relevantes e características microestruturais da cerâmica [33]. Algumas cerâmicas não-óxidas apresentam elevado desempenho balístico e baixa densidade, entretanto os custos dos pós e processamento são elevados [12,34].

Dentre as cerâmicas, a alumina é um dos materiais de blindagem que apresenta as melhores relações custo-benefício [1,3,33]. A alumina apresenta módulo de elasticidade elevado, refratariedade alta, dureza alta, condutividade térmica superior à maioria dos óxidos cerâmicos, resistência ao ataque químico alta, resistência alta em altas e baixas temperaturas e rigidez dielétrica alta [1,3]. Entretanto, algumas propriedades, tais como tenacidade à fratura é baixa e a resistência à flexão também é baixa, um dos motivos pelo qual o seu desempenho balístico é inferior a outras cerâmicas, tais como o carbetto de silício e o carbetto de boro [12].

As propriedades da alumina podem ser melhoradas, especialmente a tenacidade à fratura e a resistência à flexão através da introdução de partículas pequenas de zircônia tetragonal policristalina, ampliando a gama de aplicações estruturais [36-39].

O projeto de uma blindagem utilizando material cerâmico deve considerar que nos impactos balísticos a fratura é associada com cargas instantâneas que é bem diferente daquelas associadas com cargas estáticas. Na condição de carga estática, as tensões e deformações são distribuídas ao longo do corpo solicitado e todos os pontos participam do processo de início da

fratura [30]. Nas cargas instantâneas, as tensões e deformações encontram-se muito localizadas, de forma que as fraturas podem ocorrer em uma parte isolada do corpo, como pode ser observado na Figura 2.13 (b). Nos impactos balísticos as elevadas pressões e as rápidas taxas de carregamento podem alterar drasticamente as propriedades mecânicas [30].

As fraturas originadas sob cargas instantâneas formam um padrão bem definido e são quase sempre reproduzíveis, desde que se mantenha a forma do corpo submetido ao impacto. A geometria do padrão gerado normalmente é complexa, e a velocidade de impacto tem grande influência na extensão das fraturas. O impacto na blindagem composta de cerâmica por projéteis com alta energia cinética normalmente dão origem a um cone de fraturas com trincas radiais e circunferenciais [30]. Na Figura 2.13 não se observa claramente a formação de trincas circunferenciais e radiais na cerâmica de zircônia, entretanto é bem caracterizado na cerâmica de alumina.

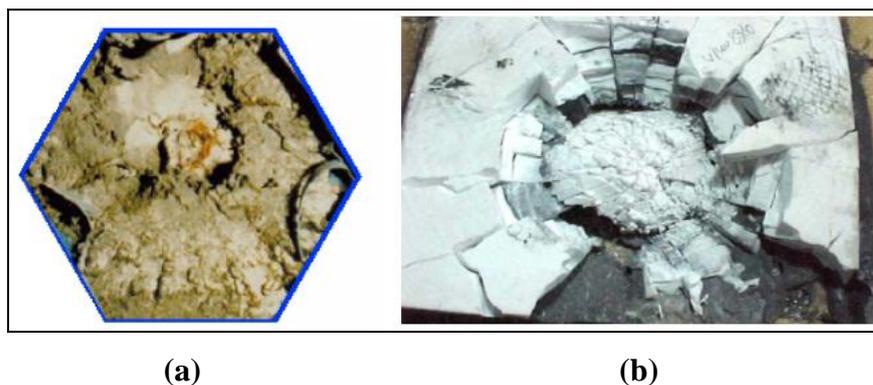


Figura 2.13 – Pastilhas de cerâmicas de: (a) zircônia e (b) alumina, após os impactos balísticos.

Fonte: [1,35]

O cone de fratura favorece a distribuição do carregamento numa área maior sobre a base. A sua propagação acontece numa velocidade bem mais elevada do que a velocidade do projétil, ocasionando uma separação do material que está dentro do cone de fraturas em relação ao que está fora dele [31]. O material do cone está sujeito ao carregamento dinâmico transmitido pelo projétil e assim os fragmentos de cerâmica unidos ao material da base são acelerados em direção à mesma. Externamente ao cone os fragmentos estão livres de carregamentos (Fig. 2.14).

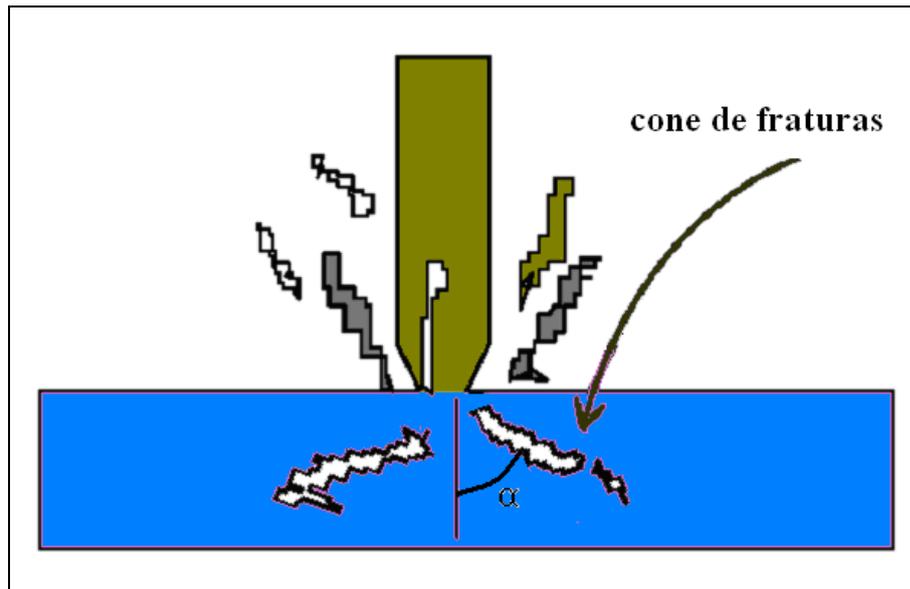


Figura 2.14 – Formação do cone de fraturas e erosão da ponta do projétil.

Fonte: [1]

Alguns resultados importantes na pesquisa de Wilkins [8] ajudaram a melhor compreender o mecanismo de impacto e penetração na blindagem mista com cerâmica:

- Os projéteis disparados contra alvos de cerâmica de alumina cujas pontas eram achatadas apresentaram velocidades residuais maiores após a perfuração dos alvos e, portanto, possuem maior poder de penetração em relação aos projéteis com geometria pontiaguda;
- Uma única camada de material cerâmico absorve mais energia que várias camadas compondo uma mesma espessura. Imediatamente após o impacto na primeira placa, ocorre a formação de uma trinca axial na interface entre as duas placas, o que provoca a fratura prematura do conjunto.
- Durante o primeiro estágio do mecanismo de penetração, o fator mais importante é manter a integridade da cerâmica para que ela possa erodir a maior quantidade possível de massa do projétil, ou seja, retardando-se o início da fratura do material cerâmico.

2.6 Cerâmicas de zircônia tetragonal

O óxido de zircônio ou zircônia (ZrO_2), possui um ponto de fusão elevado (2680 °C), estabilidade química alta e propriedades mecânicas excelentes (dureza, resistência à ruptura e tenacidade à fratura). Por causa destas propriedades, tem sido usado por muito tempo para recipientes refratários e como um meio abrasivo. Em temperaturas acima de 1200 °C, torna-se eletricamente condutor, sendo utilizada em fornos com atmosfera oxidante. As cerâmicas a base de zircônia têm características similares da expansão térmica às ligas metálicas e podem ser integradas aos componentes metálicos nos motores de calor. Além das aplicações estabelecidas, encontrou-se nela uma propriedade especial, aproveitando as transições da estrutura cristalina e mudanças de fases da zircônia tetragonal, conseguiu-se a diminuição do efeito de concentração de tensão com elevado valor de tenacidade à fratura, assim fornecendo uma nova classe de cerâmica com tenacidade [36,37].

A zircônia é polimórfica e apresenta três estruturas cristalinas:

- monoclínica: Fase estável para todas as temperaturas abaixo de 1170 °C;
- tetragonal: Fase estável numa faixa de temperatura entre 1170 °C a 2370 °C;
- cúbica: Fase estável de 2370 °C até o ponto de fusão (2680 °C).

A estabilização, na temperatura ambiente, da fase cristalina tetragonal da zircônia, é obtida pela adição de determinados óxidos (Y_2O_3 , CeO_2). Na condição metaestável, esta estrutura circunvizinha opõe-se à transição expansiva da estrutura tetragonal (t) para monoclínica (m), gerando um campo de tensões mecânicas na estrutura da cerâmica de zircônia. No evento da propagação de uma trinca passar pela região com grãos de zircônia tetragonal, o campo de tensão concentrado na ponta da trinca induz a transformação destes grãos para a estrutura cristalina monoclínica, consumindo parte da energia associada à trinca [36-39]. Este mecanismo de aumento da tenacidade à fratura de cerâmicas com grãos de zircônia tetragonal que se transformam para a fase monoclínica, quando induzida por tensão mecânica, é mostrado esquematicamente na Figura 2.15.

A transformação $t \rightarrow m$ tem caráter martensítico. A expansão volumétrica de 3 a 5 % e a deformação cisalhante desenvolvida durante esta transformação resultam em uma deformação compressiva na matriz. Tais fenômenos estão associados à trinca em propagação, para propagar a trinca através da microestrutura cerâmica é necessário um gasto extra de energia, desta maneira aumenta a tenacidade à fratura e o valor da tensão de ruptura [36,39].

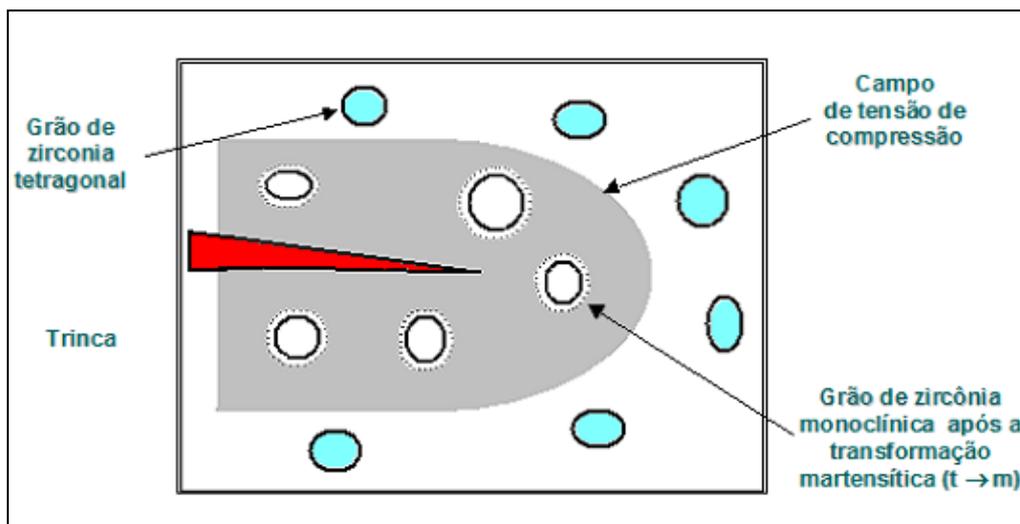


Figura 2.15 – Propagação de uma trinca na estrutura de uma cerâmica de zircônia tetragonal (t) provocando a transformação para monoclinica (m) induzida por tensão mecânica. Fonte: [39].

Existe outro mecanismo que envolve a formação de microtrincas, que visa induzir durante a mudança de fase tetragonal para monoclinica microtrincas na matriz cerâmica ao redor dos grãos de zircônia (Figura 2.16). Este microtrincamento ocorre em função do surgimento de tensões tangenciais na interface matriz-precipitado de zircônia transformada e consegue absorver parte da energia associada a uma trinca em propagação, o que dificulta o avanço da mesma, melhorando a tenacidade à fratura [40,41]. As condições perfeitas para este mecanismo são encontradas quando suas partículas são suficientemente grandes para se transformarem, mas produzindo somente um efeito limitado de microtrincamento.

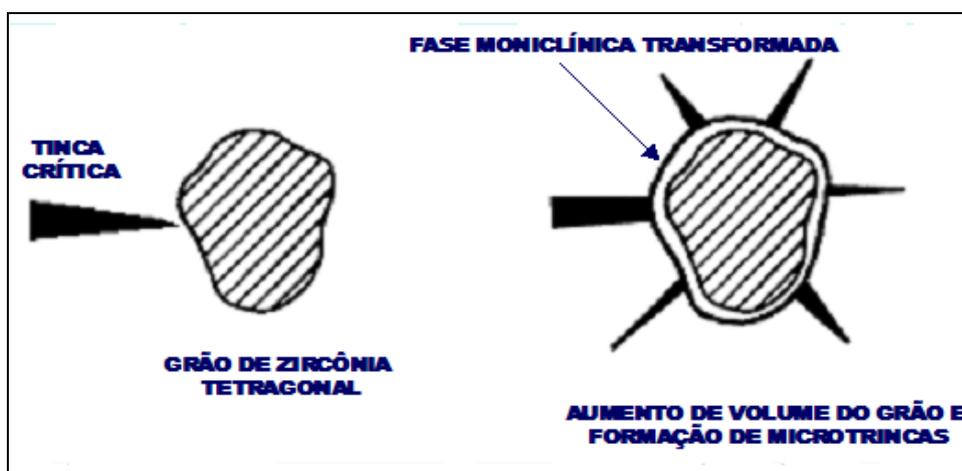


Figura 2.16 – Efeito da formação de microtrincas ao redor de uma partícula de zircônia inicialmente tetragonal. Fonte: [39].

2.7 Cerâmicas de alumina-zircônia tetragonal

A melhoria das qualidades da alumina utilizando zircônia tetragonal policristalina (TZP), tem sido alvo de pesquisa em várias partes do mundo [36-38].

Os compósitos cerâmicos de alumina – zircônia tetragonal (ZTA), por possuir várias propriedades adequadas à indústria aeroespacial, têm grande utilização para a produção de componentes mecânicos como válvulas, filtros, orifícios, cilindros, rotores e ablativos de foguetes e mísseis. Estas aplicações são decorrentes de sua resistência alta ao desgaste abrasivo e erosivo, estabilidade química grande, e tenacidade à fratura alta (em relação às outras cerâmicas) [42].

O compósito policristalino de alumina-zircônia resulta num aumento da resistência à flexão, da tenacidade à fratura e da resistência à fadiga em relação à alumina pura [43,44], isso ocorre porque as partículas de alumina estão sujeitas a campos de tensões compressivas devido ao seu baixo coeficiente de expansão térmica e também pelo aumento de volume das partículas de zircônia na sua transformação de fase para a forma monoclinica, processo já discutido no capítulo anterior. A Figura 2.17 apresenta um modelo da microestrutura de um compósito ZTA.

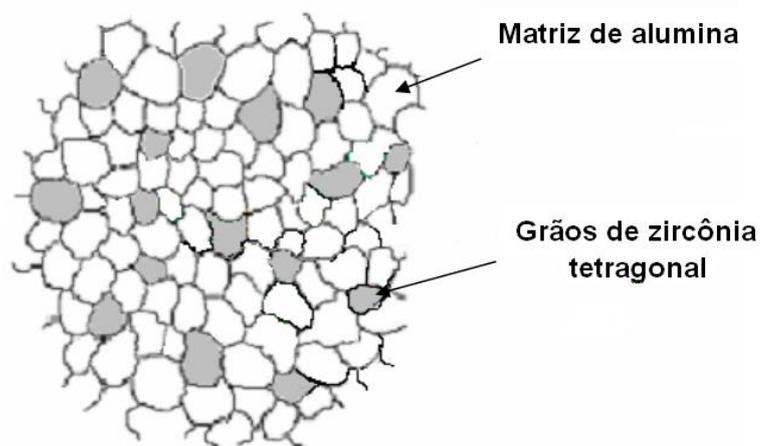


Figura 2.17 - Modelo da microestrutura de um compósito cerâmico de matriz de alumina com grãos de zircônia.

Fonte: [5].

A zircônia possui baixa solubilidade em alumina, conforme pode ser observado no diagrama de fases do sistema $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ (Figura 2.18). No diagrama de equilíbrio de fases do sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ pode ser observada uma pequena região de solubilidade da zircônia na alumina (aproximadamente 1 %) em temperaturas altas (acima de 1600 °C) formando uma

solução sólida, sendo que as demais composições químicas resultam apenas em uma mistura de Al_2O_3 e ZrO_2 [30]. Um ponto eutético está localizado em 42,5 % em peso de ZrO_2 em 1910 °C.

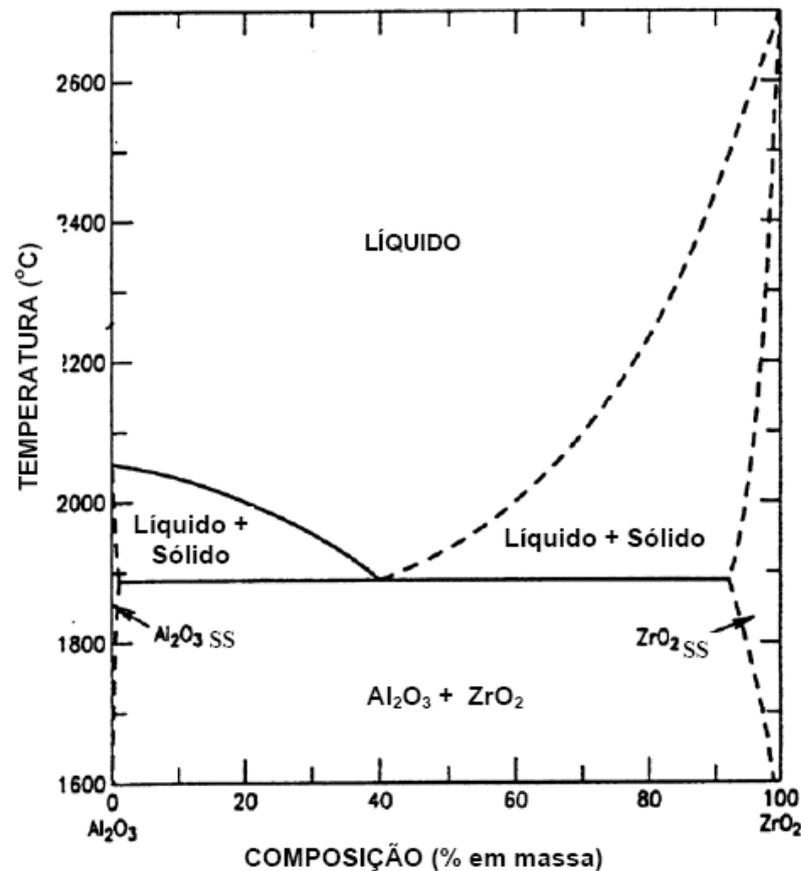


Figura 2.18 - Diagrama de equilíbrio de fases no sistema $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$.

Fonte: [45,46].

Dependendo da quantidade de ítria adicionada ao sistema, a zircônia estabiliza nas formas tetragonal ou cúbica, apresentando dois pontos eutéticos no diagrama de fases ternário ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ e Y_2O_3). Quando adicionamos 3 mol% de ítria, a zircônia apresenta estrutura tetragonal e encontramos um ponto eutético em 33 mol%. Na adição de 9 mol % de ítria, a zircônia apresenta estrutura cúbica, apresentando um ponto eutético em 35 mol % [47].

Estudos mostraram que as cerâmicas solidificadas no ponto eutético possuíam propriedades superiores que a dos seus vizinhos devido a forte compressão da microestrutura, e na temperatura ambiente apresentaram alta resistência ao desgaste. Neste ponto a tenacidade à fratura é máxima embora o aumento de tenacidade implicou na diminuição em outras propriedades mecânicas [42].

Um fator que influencia as propriedades mecânicas da ZTA é o tamanho do grão de zircônia, que afeta a eficiência da transformação de fase e no desenvolvimento de microtrincas, conforme já foi visto no capítulo anterior [43,48].

Estudos já realizados comparando entre a alumina pura e a TZA tem mostrado um aumento de aproximadamente 43 % na tensão de fratura e 49% na tenacidade à fratura, melhoria observada pela presença da zircônia estabilizada [49].

A adição de partículas tetragonais de ZrO_2 com 3 mol % de ítria distribuídas uniformemente na matriz de Al_2O_3 oferece um decréscimo no tamanho de grão de alumina, melhorando a tenacidade à fratura. Em compósitos onde foram adicionadas somente partículas de zircônia tetragonal, observou-se que o tamanho de grão de alumina eram menores do que em compósitos onde foram adicionadas somente partículas de zircônia monoclinica [50,51].

2.8 Dimensão das placas cerâmicas

A dimensão de uma placa cerâmica (L_c) deve ser calculada de forma atender ao critério da capacidade de impacto. A capacidade de impacto é um parâmetro obtido experimentalmente, onde se observa a evolução da fratura ocorrida na placa cerâmica após o impacto de um projétil e é especificada em termos da distância permitida entre impactos para que não haja perda da proteção oferecida pela blindagem, ou seja, a capacidade de impacto é a menor distância entre dois impactos sem falha da blindagem. É importante que uma única placa ao receber o impacto permita a propagação das trincas ao longo de sua extensão sem danificar a placa vizinha, após o impacto do projétil ocorre um fenômeno chamado de “cone de fratura”, que auxilia na distribuição da carga sobre uma área maior sobre a base. O desempenho balístico é maior quanto maior for a largura da placa (L_c) [11], o menor tamanho das placas é aquele que permite a formação do cone de fraturas em uma única placa. Experimentalmente foi observado que o ângulo de propagação do cone é em geral 68° a partir do diâmetro do projétil, acompanhando o eixo vertical [31].

Considerando um impacto ocorrendo no centro da cerâmica, a dimensão mínima L_c da placa cerâmica deve ser:

$$L_c = d_p + 2 (e_c \cdot \text{tg } 68^\circ) \quad (2.9)$$

Onde:

d_p : é o diâmetro do projétil e

e_c : é a espessura da placa cerâmica.

A Figura 2.19 mostra o impacto de um projétil sobre uma blindagem mista de cerâmica e metal e mostra os efeitos que ocorrem no instante inicial, o estilhaçamento da ponta do projétil e da cerâmica e a formação do cone de fraturas com ângulo de 68° .

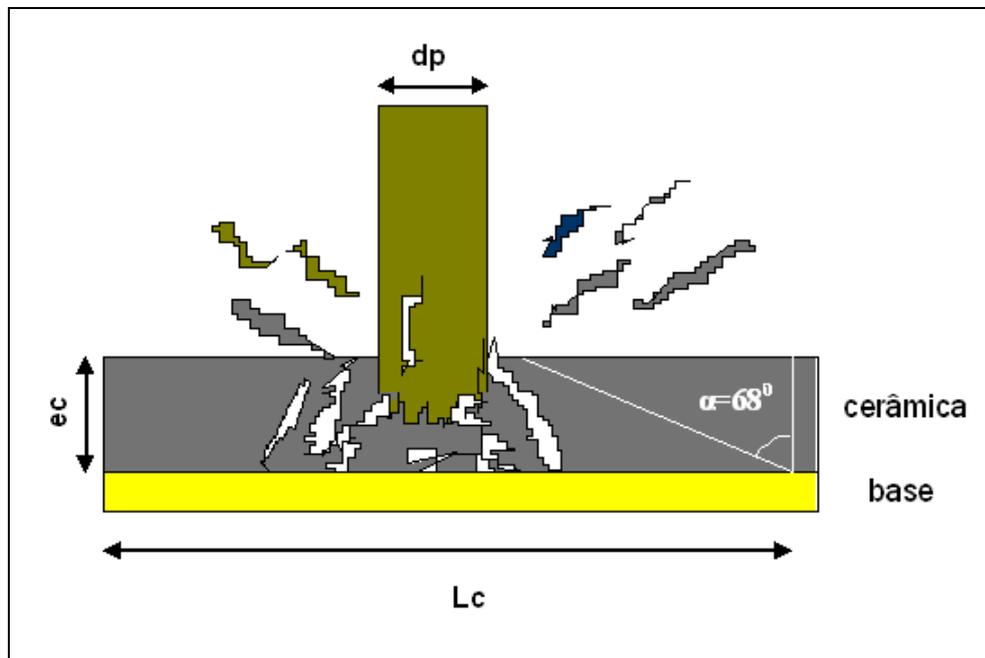


Figura 2.19 - Dimensão mínima da placa cerâmica devido à formação do cone de fraturas.

Fonte: [1]

2.9 Formato ideal das placas cerâmicas

A geometria das pastilhas cerâmicas mais utilizadas é a forma quadrada, por apresentar facilidade de fabricação, uma vez que as matrizes de compactação são relativamente mais simples. A principal desvantagem dessa geometria é a vulnerabilidade criada pelos pontos de contato que fica localizado entre quatro placas adjacentes. Para reduzir a vulnerabilidade da região blindada, a geometria mais indicada é a hexagonal, pois o ponto comum de junção fica entre três placas apenas [1]. A Figura 2.20 apresenta a montagem das pastilhas cerâmicas sextavadas e o ponto de junção unindo três cerâmicas (a) e a montagem das pastilhas cerâmicas quadradas e o ponto de junção unindo quatro cerâmicas (b).

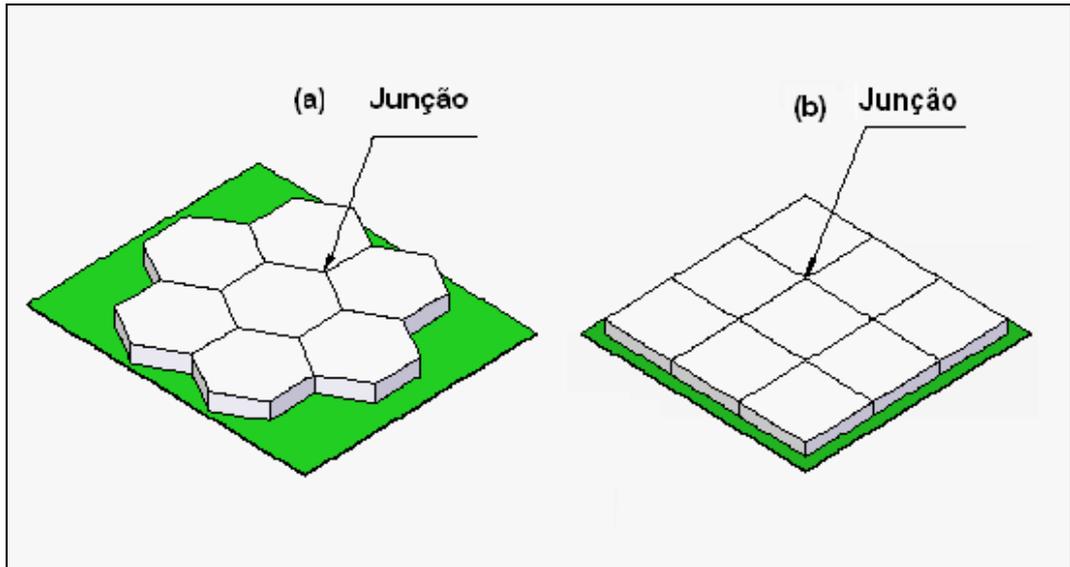


Figura 2.20 - (a) pastilha cerâmica sextavada e (b) pastilha cerâmica quadrada.

Fonte: [1]

CAPÍTULO 3

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho foi proposto o desenvolvimento de blindagens mistas cerâmica-metal, utilizando compósitos cerâmicos de alumina - zircônia tetragonal (ZTA). A zircônia utilizada possui estrutura cristalina tetragonal estabilizada com 3 mol % de ítria (3Y-TZP). O objetivo é obter blindagens mistas capazes de absorver energia cinética da ordem de 900 J utilizando painel sanduíche-colméia de alumínio nas espessuras de 20 e 61,6 mm, como os utilizados no satélite CBERS. Para o projeto das blindagens mistas, além do requisito de absorção de energia, as blindagens deverão possuir valores pequenos de densidade superficial. A escolha dos materiais utilizados foi baseada em requisitos técnicos e financeiros, buscando o desenvolvimento de blindagens de desempenho balístico alto com um custo relativamente reduzido.

3.1 Materiais

Na seleção dos materiais para a obtenção da cerâmica para aplicação em blindagem contra impactos de meteoróides foram considerados os seguintes critérios:

- 1 - ser bom isolante térmico;
- 2 - possuir valores altos de resistência à fratura, dureza e tenacidade à fratura;
- 3 - possuir densidade superficial baixa;
- 4 - permitir a confecção de peças com materiais de aquisição fácil no mercado nacional e
- 5 - garantir a reprodução com intercambiabilidade das peças confeccionadas.

Os pós utilizados para a obtenção dos compósitos cerâmicos de alumina - zircônia tetragonal, foram:

- **Alumina:** micronizada do tipo OP1000, fornecida pela Alcan do Brasil e
- **Zircônia:** tetragonal estabilizada com 3% em mol de ítria (3Y-TZP) (dos tipos micro e nanoparticuladas), fornecidas pela Zhongshun (China).

A escolha dos pós de alumina e de zircônia foi influenciada pela experiência dos pesquisadores em cerâmicas do LAS/CTE/INPE, com o objetivo de se obter cerâmicas sinterizadas compostas por grãos com tamanhos na escala sub-micrométrica.

Os materiais metálicos utilizados como bases nas blindagens mistas foram:

- **Painel sanduíche-colméia 1:**

- colméia de alumínio 5052 - 3.4-1/4"-0,0015P – fornecida pela Hexcel, com espessura de 60 mm;
- chapas da face de alumínio 2024-T3 com espessura de 0,8 mm e
- filme adesivo Redux 312/5.

As dimensões dos painéis utilizados foram $210 \times 170 \times 61,6$ mm. A escolha deste painel foi feita em função do cálculo realizado para a **blindagem mista 1**. A definição das dimensões de largura e comprimento foi feita em função da disponibilidade da matéria prima doada pela empresa Cenic - Engenharia, Indústria e Comércio Ltda.

- **Painel sanduíche-colméia 2:**

- colméia de alumínio 5052 - 3.4-1/4"-0,0015P - fornecida pela Hexcel, com espessura de 19,4 mm;
- chapas da face de Alumínio 2024-T3, com espessura de 0,3 mm e
- filme adesivo Redux 312/5.

As dimensões dos painéis utilizados foram $200 \times 200 \times 20$ mm. A escolha deste painel foi feita em função de ser parte integrante do satélite CBERs, este painel é responsável pela estrutura geral do satélite. A definição das dimensões de largura e comprimento foi feita em função dos requisitos do ensaio balístico, nas dimensões mínimas necessárias. Este painel foi utilizado na **blindagem mista 2**.

- **Chapa de aço inox AISI 304:**

- tensão de ruptura mínima de 935 MPa.

As dimensões das placas utilizadas foram $250 \times 250 \times 1,5$ mm. A escolha deste material e das dimensões da chapa foram feitas em função do objetivo do ensaio da **blindagem mista 3**. Neste caso, o objetivo que foi realizar uma comparação com uma blindagem mista de cerâmica de alumina, nas condições de ensaio balístico semelhantes e sob um nível de energia cinética alta.

- **Chapa de aço inox AISI 304:**

- tensão de ruptura mínima de 935 MPa.

Dimensões das placas utilizadas: $200 \times 200 \times 1$ mm. A escolha desta chapa foi feita em função do cálculo realizado, para a **blindagem mista 2**. O aço inox AISI 304 possui

valor grande de resistência mecânica, custo baixo e disponibilidade no mercado. As dimensões de comprimento e de largura foram compatíveis com as dimensões do painel sanduíche-colméia 2.

- **Adesivo de poliuretano Sikaflex-256**

Material utilizado para colar as pastilhas cerâmicas nas placas metálicas. A escolha deste material foi feita em função do valor grande resistência mecânica do adesivo após adesão do metal ao material cerâmico e pela facilidade de aplicação.

- **Tecido de aramida.**

Material utilizado para reter os estilhaços, com as dimensões de 200 × 170 × 1 mm. A escolha deste material foi feita em função do valor grande de resistência ao rasgamento alta e pela disponibilidade deste material no mercado nacional. Este material foi usado nas blindagens mistas 1 e 2.

3.2 Definições das blindagens mistas

3.2.1 Cálculos das blindagens mistas 1 e 2

Para o projeto das blindagens mistas foi necessário inicialmente calcular a energia cinética equivalente ao do impacto do meteoróide considerado. O Capítulo 2.2 apresenta os meteoróides que impactaram o Veículo Espacial *Orbiter*. Os dados do meteoróide maior foram utilizados para o cálculo da energia cinética deste meteoróide, que foi utilizada como referência para os cálculos dos parâmetros balísticos.

A energia cinética do meteoróide de massa (m) e velocidade (v) igual a 30.000 m/s é dada pela Equação 3.1:

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (3.1)$$

$$E_c = 2 \cdot 10^{-6} \cdot (3 \cdot 10^4)^2 / 2 = \mathbf{900 \text{ J}}$$

Portanto, a energia cinética de referência utilizada para o projeto das blindagens contra impactos de meteoróides foi de 900 J.

Em função deste nível de energia foram utilizados os parâmetros do projétil .357 Magnum, que possui energia cinética nominal de 921 J (Fig. 3.4), para realizar o cálculo da espessura da base metálica.

Nesta configuração de blindagem mista foram utilizadas as pastilhas retangulares que após a sinterização apresentaram a espessura de 8,3 mm. Para o valor do espaçamento entre as placas foi utilizado 60 mm, que é o valor da espessura da placa colméia utilizada nos satélites CBERS.

Os parâmetros utilizados para o cálculo da espessura da base foram:

$V_p = 0,425$ km/s (velocidade do projétil .357 Magnum);

$S = 6,0$ cm (espaçamento entre as placas);

$d_p = 0,9$ cm (\varnothing do projétil);

$S/d_p: 6,0/0,9 = 6,6$ (menor que 15);

$t_c = 0,83$ cm (espessura da cerâmica);

$t_c/d_p: 0,83/0,9 = 0,92$ (bem maior que 0,18);

$\rho_c = 4,0$ g/cm³ (densidade média da cerâmica);

$\rho_p = 11,3$ g/cm³(densidade do projétil);

$M_p = 10,2$ g (massa do projétil);

σ_r (2024 T3) = 345 MPa e

$k = 0,15$ (Figura 2.6).

Os valores de V_p e S/d_p estão abaixo dos valores recomendados, entretanto o valor de t_c/d_p está acima do recomendado (5 x maior), ou seja, a placa para-choques (cerâmica) apresenta os parâmetros adequados.

Para o cálculo da espessura da base para a primeira blindagem mista, foram utilizada:

Pela Equação 2.1:

$$t_b = 0,055 (4. 11,3)^{1/6} . 10,2^{1/3} . 0,425. 6,0^{-0,5} . (980/345)^{0,5}$$

$$t_b = 0,066 \text{ cm, ou } 0,66 \text{ mm}$$

Pela Equação 2.2:

$$t_b = 0,15 (4. 11,3)^{1/6} . 10,2^{1/3} . 0,425. 6,0^{-0,5} . (980/345)^{0,5}$$

$$t_b = 0,18 \text{ cm, ou } 1,8 \text{ mm}$$

O painel sanduíche-colméia que suporta as baterias do sistema de energia solar dos satélites CBERS possui colméia de 60 mm e chapas da face de 0,8 mm de espessura. Estes valores estão próximos aos valores encontrados pelo uso da Equação 2.1, que corresponde a uma

condição mais severa em relação à Equação 2.2. Esta configuração de blindagem foi utilizada no primeiro ensaio balístico, que passou a ser descrita como **Blindagem mista 1**.

A blindagem mista 1 foi constituída por pastilhas retangulares do compósito cerâmico de alumina-zircônia tetragonal coladas sobre o painel sanduíche-colméia de alumínio mostrados na Figura 3.1. Esta configuração utilizou como base o painel que é parte integrante apenas do sistema de baterias dos satélites CBERS.

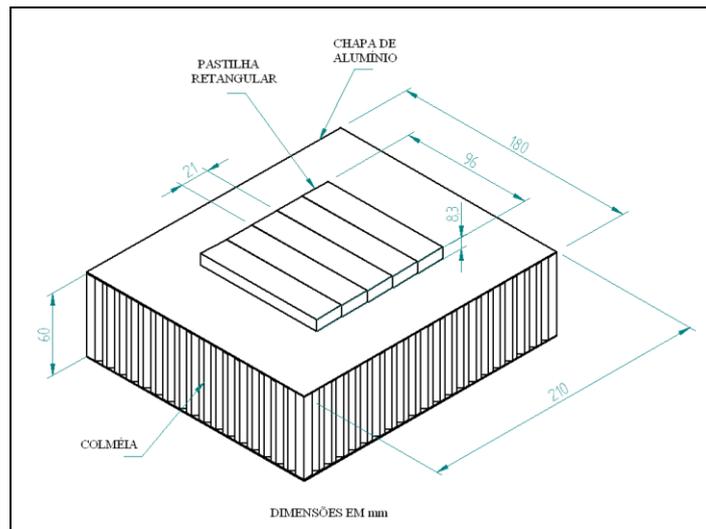


Figura 3.1 – Dimensões da blindagem mista 1.

As demais regiões do satélite CBERS são estruturadas com painéis sanduíche-colméia com 20 mm de espessura. Para que o estudo de blindagem mista possa ser aplicado a todas as partes dos satélites CBERS foi necessário realizar uma configuração de blindagem mista com o painel sanduíche-colméia de 20 mm. O painel sanduíche-colméia de 20 mm possui chapas da face com apenas 0,3 mm de espessura, o que tornou necessária a incorporação de outra chapa mais espessa colada sobre o painel sanduíche-colméia de alumínio, para aumentar a resistência mecânica da base. A solução adotada foi a utilização de uma chapa de aço inox 304 com espessura de 1,0 mm, que é disponível no mercado e possui resistência mecânica alta. Para esta configuração foi utilizada a Equação 2.1 de Cour-Palais para calcular a espessura da cerâmica.

Os parâmetros utilizados para o cálculo da blindagem mista 2 foram:

$$t_b = 0,13 \text{ cm (espessura da base);}$$

$$V_p = 0,425 \text{ km/s (velocidade do projétil .357 Magnum);}$$

$$S = t_c + 0,13 \text{ (espaçamento entre as placas);}$$

$$d_p = 0,9 \text{ cm (Ø do projétil);}$$

$$\rho_c = 4,0 \text{ g/cm}^3 \text{ (densidade média da cerâmica);}$$

$\rho_p = 11,3 \text{ g/cm}^3$ (densidade do projétil);

$M_p = 10,2 \text{ g}$ (massa do projétil) e

σ_r (AISI 304) = 935 MPa

Pela equação 2.1:

$$0,13 = 0,055 (4 \cdot 11,3)^{1/6} \cdot 10,2^{1/3} \cdot 0,425 \cdot S^{-0,5} \cdot (980/935)^{0,5}$$

$$S = 0,86 \text{ cm e}$$

$$T_c = 0,73 \text{ cm ou } 7,3 \text{ mm}$$

O resultado do cálculo forneceu a espessura da cerâmica igual a 7,3 mm, necessária para resistir ao impacto de um projétil .357 Magnum, que tem energia cinética de 921 J. Entretanto, as cerâmicas sinterizadas para o uso nesta blindagem mista apresentaram valores de espessuras iguais a 6,5 mm, ou seja, inferior ao valor calculado. A espessura da base foi considerada igual a 1,3 mm, pois foram somados os valores de espessuras da chapa de aço inox 304 (1,0 mm) e da chapa superior do painel sanduíche-colméia (0,3 mm).

Para o cálculo da espessura da cerâmica não foi considerada a espessura do painel sanduíche-colméia, pois foi considerado que o projétil deverá perfurar a placa superior, ou seja, o projétil será retido pelo conjunto da cerâmica, chapa de aço inox e chapa superior do painel sanduíche-colméia.

A figura 3.2 mostra as dimensões da blindagem mista 2 que foi preparada para o ensaio balístico.

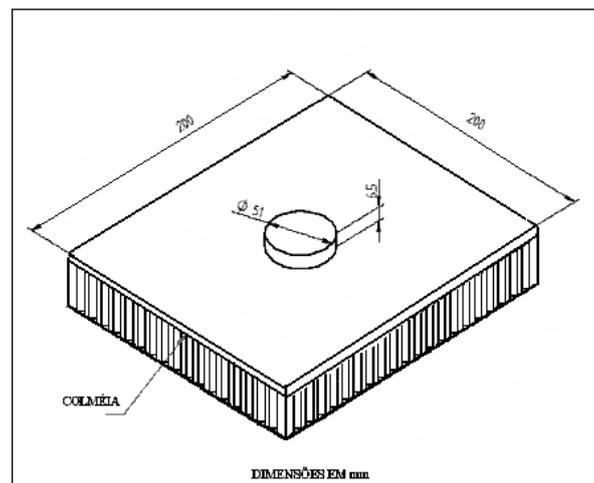


Figura 3.2 – Dimensões da blindagem mista 2.

Os projéteis utilizados na determinação dos parâmetros das equações de Cour-Palais eram de alumínio, material com valores pequenos de densidade. Por esta razão, foi necessário especificar para os ensaios balísticos, projéteis com propriedades semelhantes, que fornecessem

valores altos de energia cinética, entretanto com núcleo dúctil. Os projéteis adotados para os ensaios balísticos das blindagens mistas 1 e 2, com valores de energia cinética entre 725,5 e 1405,5 J foram: 9 mm FMJ, .357 Magnum e .44 Magnum.

3.2.2 Especificação da blindagem mista 3

A blindagem mista 3 tem os objetivos de avaliar o impacto balístico de um projétil de velocidade maior e também permitir a realização de um estudo comparativo da eficiência entre a blindagem com compósito cerâmico de alumina-zircônia e outra blindagem semelhante com cerâmica de alumina. Uma investigação semelhante foi feita por Gonçalves [1], que realizou ensaio balístico com o projétil 7,62 AP sobre a blindagem mista de pastilha cerâmica de alumina, com a espessura de 11,3 mm, colada sobre uma base de aço inox AISI 304, com espessura de 1,5 mm.

A Figura 3.3 apresenta as dimensões da blindagem mista 3.

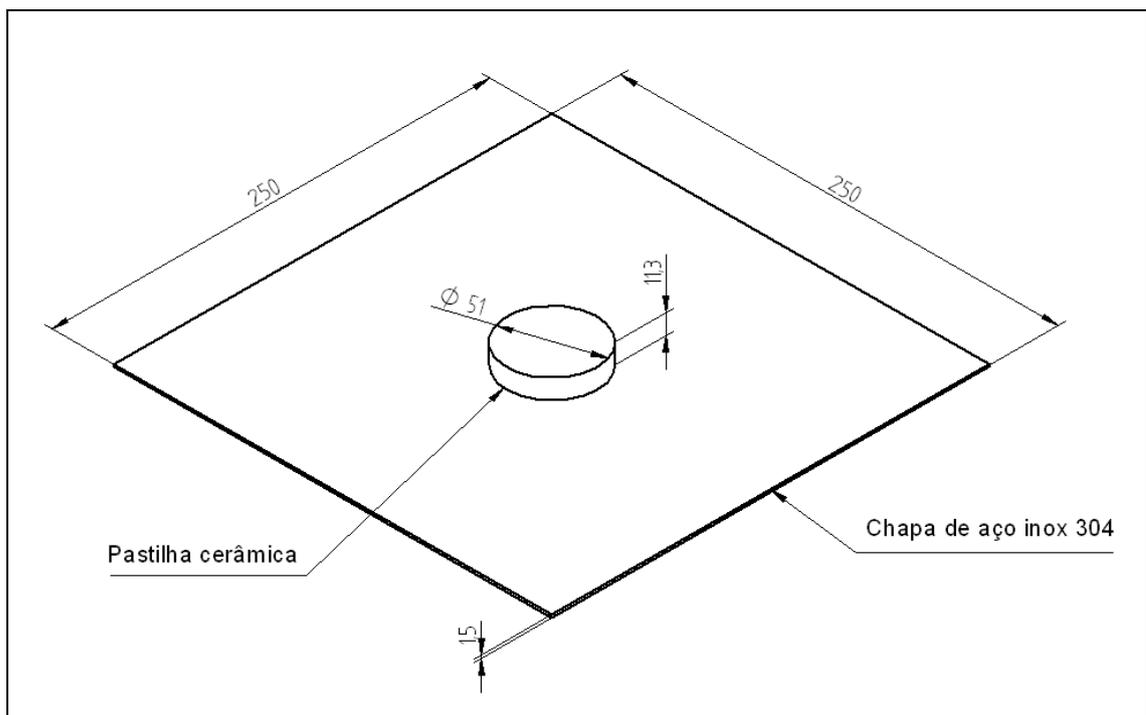


Figura 3.3 – Dimensões da blindagem mista 3.

3.2.3 Dimensões das pastilhas cerâmicas e das blindagens mistas

Para o dimensionamento adequado das pastilhas cerâmicas foi necessário considerar o valor da dimensão L_C das pastilhas cerâmicas que seriam submetidas aos ensaios balísticos. O

valor teórico de L_C foi diferente para cada pastilha em função da variação da espessura de cada uma. Para o cálculo de L_C foi necessário conhecer a espessura da cerâmica e o diâmetro do projétil. Este estudo teve por finalidade a avaliação das dimensões ideais das pastilhas cerâmicas. Entretanto, a sua aplicabilidade foi limitada pela disponibilidade de matrizes de compactação. As cerâmicas que foram desenvolvidas para as blindagens 1, 2 e 3, após a sinterização em 1600 °C, foram:

- **Blindagem mista 1:** pastilha retangular nas dimensões de 95 x 21 x 8,5 mm, que foi colada sobre o painel sanduíche-colméia de alumínio com 61,6 mm de espessura. Para o cálculo de L_C foi considerado o projétil com diâmetro de 9 mm.
- **Blindagem mista 2:** pastilha cilíndrica com diâmetro de 51 mm e espessura de 6,5 mm, que foi colada sobre a placa de aço inox AISI 304 com espessura de 1,0 mm e esta colada sobre o painel sanduíche-colméia de alumínio de 20 mm de espessura. Para o cálculo de L_C foi considerado o projétil .357 Magnum, ou seja, com diâmetro de 9 mm.
- **Blindagem mista 3:** pastilha cilíndrica com diâmetro de 51 mm x 11,3 mm de espessura, que foi colada na placa de aço inox AISI 304 com espessura de 1,5 mm. Para o cálculo de L_C foi considerado o projétil 7,62 mm.

Os valores de L_C calculados e recomendados foram:

$$L_C 1 = 9 + 2 \cdot (8,5 \cdot \text{tg } 68^\circ) = 49,7 \text{ mm}$$

$$L_C 2 = 9 + 2 \cdot (6,5 \cdot \text{tg } 68^\circ) = 41,1 \text{ mm}$$

$$L_C 3 = 7,62 + 2 \cdot (11,3 \cdot \text{tg } 68^\circ) = 63,5 \text{ mm}$$

As pastilhas cerâmicas das blindagens 1 e 3 apresentaram valores de L_C inferiores aos recomendados. Entretanto, a pastilha da blindagem 2 apresentou o valor de L_C conforme o recomendado, ou seja, com 6,5 mm de espessura.

A utilização das pastilhas com dimensões menores do que as recomendadas ocorreu devido à indisponibilidade de matriz de compactação com dimensões maiores. Desta forma, foram utilizadas as matrizes disponíveis e que garantiram boa compactação a verde das amostras.

O valor mínimo de L_C é uma orientação que sempre que possível deve ser utilizado. Entretanto, na prática, o projétil nem sempre atinge o centro da pastilha e a formação de trincas

resultantes de fraturas pode atingir a pastilha vizinha, mesmo utilizando o valor de L_C recomendado.

A Figura 3.4 mostra a vista isométrica das blindagens mistas.

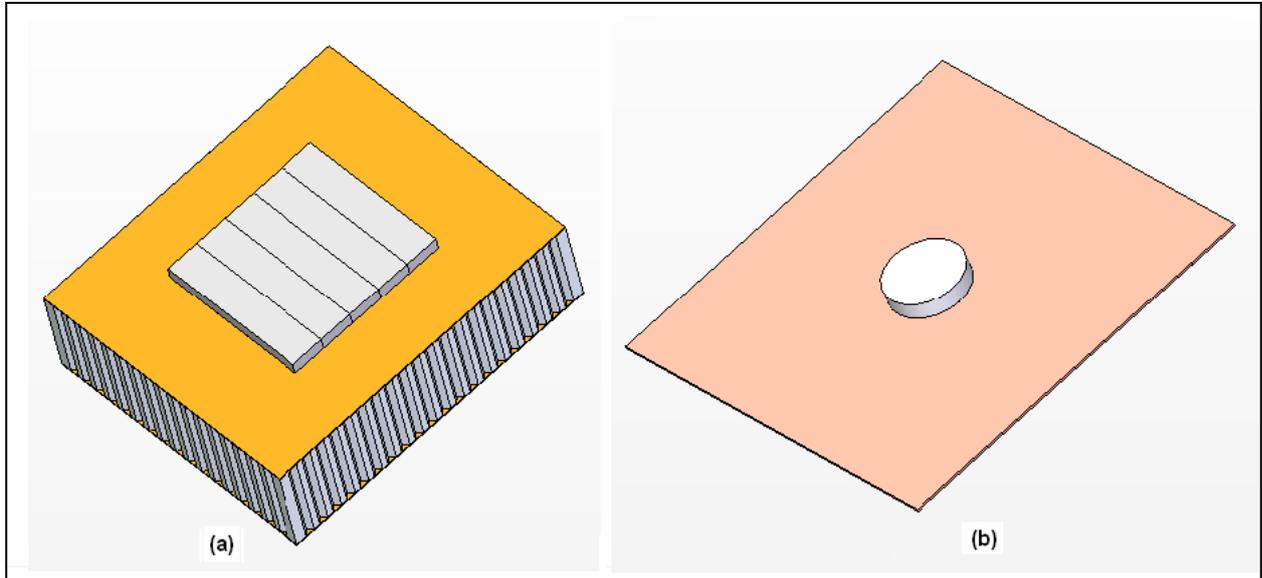


Figura 3.4 – Vista isométrica das montagens das: (a) blindagem 1 e (b) blindagem 3.

3.2.4 Formatos das pastilhas cerâmicas

A geometria utilizada nos ensaios balísticos foram a retangular para a blindagem mista 1 e a cilíndrica para as blindagens mistas 2 e 3.

A Figura 3.5 mostra os três formatos de pastilhas produzidas neste projeto, para aplicação de blindagem em satélites, aeronaves ou veicular. O formato ideal é o sextavado, por apresentar facilidade de montagem (colagem) sobre a base, facilidade de troca numa eventual necessidade e também por possuir apenas três pastilhas nos pontos de junção. A pastilha retangular, com espessura de 8,5 mm, foi utilizada no ensaio com o painel sanduíche-colméia de alumínio. A pastilha cilíndrica, com espessura de 11,3 mm, com a placa de aço inox. A pastilha sextavada não apresentou qualidade adequada e espessura necessária para o ensaio balístico, pois apresentou laminação na etapa de compactação.

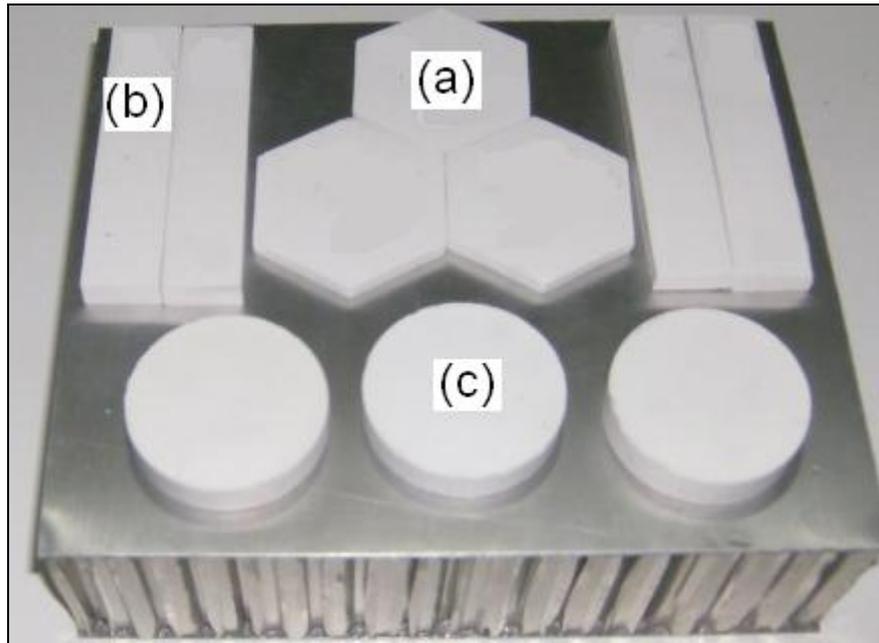


Figura 3.5 - Pastilhas cerâmicas nos formatos: (a) sextavadas, (b) retangulares e (c) cilíndricas desenvolvidas neste trabalho.

3.3 Caracterização dos pós de alumina e zircônia

As cerâmicas investigadas neste trabalho foram produzidas a partir de misturas dos pós cerâmicos de alumina alfa e de zircônia tetragonal.

3.3.1 Massa específica real

As determinações dos valores de massa específica real dos pós foi feita através da técnica de picnometria de hélio, utilizando o equipamento da marca Multivolume Pycnometer, modelo 1305, no Laboratório de Combustão e Propulsão (LCP/CTE/INPE). Este método consiste em colocar a amostra do pó dentro de uma câmara, que é pressurizada com gás hélio, utilizando um valor definido de pressão. O gás penetra nos poros intercomunicantes da amostra e é expandido em outra câmara, com pressão inicial zero a pressão final é função do volume ocupado pela amostra. O volume, a temperatura das câmaras e a massa da amostra são conhecidos. Portanto, a densidade da amostra pode ser determinada, considerando que ocorra um comportamento ideal do gás He.

3.3.2 Área específica e distribuição de tamanhos de poros dos pós

O ensaio de porosimetria dos pós foram feitos pelo uso da técnica de adsorção superficial de gás N₂. Esta técnica permite obter informações relacionadas com área superficial das partículas, tanto dos aglomerados e dos agregados, quanto dos poros abertos e intercomunicantes presentes nos pós. O princípio desta técnica consiste na adsorção de moléculas do gás N₂ na superfície do pó. Com a temperatura controlada injeta-se N₂ sobre a amostra com variação da pressão. A partir daí pode ser construído o gráfico das isotermas de adsorção e dessorção do gás utilizando os dados da pressão parcial e do volume de N₂ adsorvido. O valor da área específica dos pós foi calculado pelo método desenvolvido por Brunauer, Emmet e Teller (BET) [52]. Para a determinação da distribuição de tamanhos de poros foi utilizado o método proposto por Barret, Joyner e Halenda (BJH). Este método permite obter dados de tamanho de poros compreendidos na faixa entre 20 Å e 200 Å, com grau elevado de confiabilidade. As curvas de adsorção e dessorção foram obtidas no equipamento da marca Quantachrome Nova, modelo 1000, do LCP/CTE/INPE, com pré-tratamento em 200 °C durante 2 horas em vácuo para remoção de impurezas da superfície do pó.

3.3.3 Distribuição de tamanhos de partículas

A técnica de obtenção da distribuição de tamanho de partículas, é baseada no conceito da difração de luz, que consiste na incidência de um feixe de laser sobre as partículas do pó dispersas em um fluido, se os tamanhos das partículas forem maiores do que o comprimento da onda luminosa ocorrerá difração. A intensidade da luz refratada é proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula e o ângulo de difração é inversamente proporcional ao diâmetro da partícula. Através destes valores podem-se construir as curvas de distribuição de tamanho de partículas. Para os pós analisados, as dispersões de partículas foram preparadas com água deionizada e o dispersante pirofosfato de sódio. As soluções foram submetidas à dispersão por ultra-som por 4 min, com a finalidade de manter o grau máximo de desaglomeração possível entre as partículas. As obtenções das curvas de distribuição dos tamanhos de partículas foram feitas utilizando o modelo de Fraunhofer [53].

As obtenções das curvas de distribuição de tamanho de partículas (aglomerados e/ou agregados) foram feitas em um analisador de partículas da marca CILAS, modelo 1064, no Instituto de Pesquisas Energéticas (IPEN), em São Paulo.

3.3.4 Análises das fases cristalinas presentes

Para a identificação das fases cristalinas presentes nos pós, nas misturas dos pós e nas cerâmicas sinterizadas foi utilizada a técnica de difração de raios X (DRX), baseada na Lei de Bragg [54]. A identificação das fases cristalinas foi feita utilizando o programa de computador Pscwin através da comparação dos dados obtidos nos difratogramas com os dados tabelados nas fichas JCPDS. O equipamento utilizado foi um difratômetro de raios X da marca Philips, modelo PW1380/80, no LAS/CTE/INPE.

3.3.5 Análises morfológicas das partículas dos pós

Para observar a morfologia e o grau de aglomeração e/ou agregação das partículas nos pós de alumina e de zircônia foi utilizada a microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para a observação dos pós foi necessário realizar o depósito de um filme fino de ouro, para que as superfícies das amostras se tornassem condutoras de elétrons. O equipamento utilizado foi um microscópio eletrônico de varredura da marca Jeol, modelo JMS 5310 acoplado a uma estação de trabalho, no LAS/CTE/INPE.

3.4 Misturas dos pós de alumina com zircônia

Para este estudo, foram feitas três misturas de pós utilizando o pó de alumina micronizada com 15, 18 e 20 % (em peso) de pó zircônia nanoparticulada estabilizada com ítria na fase tetragonal. Estas misturas de pós foram nomeadas como amostras A, B e C, respectivamente.

O procedimento utilizado para obtenção das misturas de pós e homogeneizações dos pós de alumina micronizada e da zircônia nanoparticulada foi pelo uso de um moinho de força centrífuga da marca Retsch, modelo S 100 (LAS/CTE/INPE), usando jarro e esferas de alumina. As misturas dos pós foram feitas a úmido, com a adição de álcool etílico, por 2,5 horas. Para a secagem das misturas dos pós foi utilizada uma estufa da marca Fanem, modelo 320-SE (LAS/CTE/INPE), na temperatura de 70 °C com circulação forçada de ar por 12 horas. Após secos, os pós, eles foram desaglomerados em graal e passados em peneira de malha 100 mesh.

3.5 Compactação dos corpos de prova

A compactação das cerâmicas foi realizada em duas etapas. A primeira etapa foi a compactação uniaxial com 60 MPa de pressão em molde de aço de dimensões do compactado de $40 \times 5 \times 5$ mm. Foram compactados 24 corpos de prova de cada mistura (15, 18 e 20 % de ZrO_2 , em peso). Após a compactação uniaxial, as amostras foram submetidas à compactação isostática com 300 MPa de pressão em uma prensa isostática automática da marca Paul Weber, modelo D7064, do AMR/IAE/DCTA.

A compactação dos corpos de prova retangulares foi feita na Divisão de Engenharia de Materiais (DEMAR) da Universidade de São Paulo (USP) no campus de Lorena utilizando um molde com camisa flutuante. Foram obtidos 10 corpos de prova compactados de cada composição, na pressão de 60 MPa, em prensa hidráulica. As dimensões do compactado a verde foram de: $114,4 \times 25,4 \times 11$ mm. Estes corpos de prova foram preparados para o ensaio balístico dos projéteis 9 mm e .44 Magnum na configuração da placa de colméia de 61,5 mm de espessura (blindagem 1).

A compactação uniaxial das amostras sextavadas foi feita na Avibras Aeroespacial com pressão de 60 MPa, utilizando um molde com camisa flutuante. Foi possível compactar apenas 3 amostras devido à qualidade ruim de acabamento superficial deste molde. As dimensões das amostras sextavadas compactadas foram de 60 mm de largura da face sextavada \times 8 mm de espessura. A escolha da pressão uniaxial adotada para a compactação das amostras retangulares e sextavadas, foi feita em função da máxima pressão utilizada sem causar a laminação das amostras.

A compactação das amostras cilíndricas foi realizada no LAS/CTE/INPE utilizando um molde de camisa flutuante. Três amostras de cada composição foram compactadas uniaxialmente na pressão de 40 MPa em prensa hidráulica da marca Tecnal. As dimensões das amostras compactadas foram de 60,0 mm de diâmetro e 15,0 mm de espessura, para utilização no ensaio balístico com projétil 7,62 x 51 mm. Três amostras cilíndricas de cada composição de mistura dos pós foram compactadas na mesma condição anterior, porém com espessura de 8,5 mm, para utilização no ensaio balístico com os projéteis 9 mm e .357 Magnum.

3.5.1 Densidade dos pós compactados

A densidade a verde dos compactados dos pós cerâmicos de alumina-zircônia tetragonal foi calculada usando a relação entre a massa e o volume dos compactados. As densidades foram

calculadas para os pós compactados pequenos utilizados para o ensaio de flexão, dos pós compactados retangulares utilizados na blindagem mista 1 e dos compactados cilíndricos. Os compactados pequenos foram submetidos a pressão uniaxial de 60 MPa e pressão isostática de 300 MPa. Os compactados retangulares foram submetidos à prensagem de 60 MPa e os compactados cilíndricos a 40 MPa, ambos por prensagem uniaxial.

3.5.2 Microestruturas dos compactados a verde

A microestrutura dos compactados foi examinada usando imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura. Foram feitas observações nas superfícies de fratura dos compactados a verde para a análise qualitativa da porosidade e de falhas de empacotamento das partículas dos pós.

3.5.3 Análise da dilatação térmica linear

O comportamento de densificação dos compactados durante a sinterização foi investigado pelo uso de ensaio de dilatométrica. Neste ensaio é observada a retração linear característica da cerâmica durante a etapa de sinterização, em função da temperatura e do tempo de tratamento térmico. Os corpos de prova foram compactados com diâmetro de 5,0 mm e comprimento de 10,0 mm, utilizando os mesmos procedimentos adotados para a confecção das cerâmicas anteriores. Os corpos compactados foram submetidos à uma taxa de aquecimento de 10 °C/min até aproximadamente 1600 °C, em atmosfera ambiente. A taxa de resfriamento empregada foi de 10 °C/min até 200 °C. O equipamento utilizado foi um dilatômetro da marca Netzsch, modelo DIL 402E, pertencente ao CCDM/UFSCAR.

3.6 Sinterização das cerâmicas

As cerâmicas foram sinterizadas nas temperaturas de 1550, 1600 e 1650 °C, utilizando a taxa de aquecimento de 10 °C/min com um tempo de permanência na temperatura de sinterização de 2 horas. Os valores dos parâmetros das propriedades mecânicas destas cerâmicas determinaram a temperatura de sinterização a ser adotada para todas as demais cerâmicas preparadas neste trabalho.

O forno utilizado foi do tipo Mufla, marca Carbolite, modelo HTF 1800, do LAS/CTE/INPE.

3.7 Caracterizações das cerâmicas

3.7.1 Densidade relativa das cerâmicas sinterizadas

Os valores de densidade relativa das cerâmicas sinterizadas foram determinados pelo uso do método geométrico, a partir das dimensões e da massa das amostras. Para a medição das dimensões de todas as amostras cerâmicas foi utilizado um paquímetro de precisão 0,02 mm. A massa foi medida com o uso de uma balança analítica com precisão de 10^{-2} mg. As medições da massa e das dimensões foram realizadas nas amostras sem defeitos físicos aparentes, como imperfeições, bordas e cantos quebrados e empenamentos. O cálculo da densidade relativa foi feito para todas as geometrias das cerâmicas utilizadas neste projeto, com exceção da sextavada, utilizando os valores médios de 10 amostras de cada composição das cerâmicas para o ensaio de flexão ($33 \times 4 \times 4$ mm), de 5 pastilhas retangulares ($96 \times 21 \times 8,5$ mm) de cada composição e de 3 pastilhas cilíndricas ($\text{Ø}51 \times 11,3$ mm) de cada composição. As dimensões das cerâmicas apresentadas foram dimensões após a sinterização. A densidade relativa foi obtida comparando-se os valores calculados da massa específica das cerâmicas sinterizadas com a massa específica real de sua correspondente mistura de pós.

3.7.2 Microestruturas das cerâmicas sinterizadas

As microestruturas das cerâmicas sinterizadas foram analisadas através de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das superfícies de fratura. As superfícies das cerâmicas foram revestidas com filmes finos de ouro e observadas com o propósito de se verificar o estado de densificação, os tamanhos e as formas dos grãos e identificar os possíveis defeitos de empacotamento de partículas remanescentes após a etapa de sinterização. O equipamento utilizado foi um microscópio eletrônico de varredura da marca Jeol, modelo JMS 5310 acoplado a uma estação de trabalho, no LAS/CTE/INPE.

3.7.3 Resistência à fratura mecânica

O método mais eficaz para determinação da resistência à fratura de cerâmicas estruturais é o ensaio de resistência à flexão em quatro pontos. Neste ensaio o corpo de prova é apoiado em dois pontos e a carga é aplicada em dois pontos, permitindo que um volume maior do corpo seja submetido ao carregamento e criando uma região na qual a tensão e o momento fletor são

máximos [56]. A Figura 3.6 apresenta um desenho esquemático da montagem para ensaio de flexão em quatro pontos, mostrando também a distribuição das tensões mecânicas ao longo do corpo de prova.

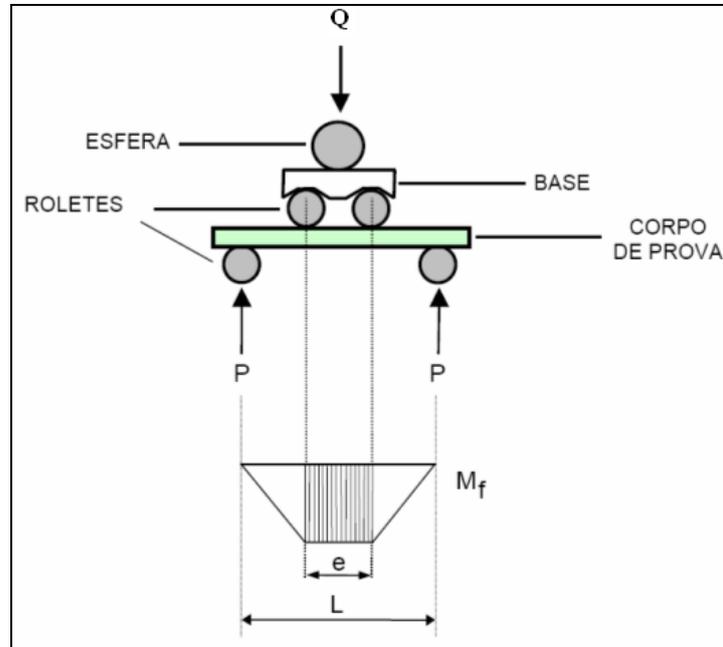


Figura 3.6 - Desenho esquemático do ensaio de flexão em 4 pontos e a distribuição de tensões mecânicas.

Fonte: [39].

A tensão de ruptura, em flexão em 4 pontos, é dada pela equação:

$$\sigma = \frac{3Q}{2bh^2}(L - e) \quad (3.1)$$

Onde:

σ = tensão de flexão (MPa);

Q = carga aplicada (kgf);

b = largura do corpo de prova (mm);

h = espessura do corpo de prova (mm);

L = espaçamento dos apoios (mm) e

e = espaçamento dos pontos de aplicação da carga (mm).

Os ensaios de flexão foram realizados em 20 corpos de prova pequenos nas dimensões nominais de (30 × 4 × 4 mm) sinterizados em cada uma das temperaturas selecionadas, sendo utilizada a velocidade de aplicação da carga de 0,5 mm/min.

O material cerâmico por ser normalmente frágil ocorre uma dispersão grande dos valores de resistência, que é uma consequência da probabilidade de se encontrar, no volume de material ensaiado, um defeito com tamanho crítico. Os defeitos são distribuídos aleatoriamente nos materiais cerâmicos, podendo ser quantificado estatisticamente [57].

A distribuição probabilística dos defeitos e a dificuldade de sua detecção e quantificação por métodos não destrutivos conduzem à necessidade da utilização de tratamentos estatísticos dos valores de resistência mecânica de maneira a melhorar a confiabilidade nos resultados.

Entre diversos tratamentos estatísticos aplicáveis às cerâmicas, a estatística de Weibull tem se mostrado bastante adequada. Weibull obteve a seguinte expressão para a probabilidade de fratura acumulativa [57]:

$$P = 1 - e^{\left[\left(\frac{-v}{v_0} \right) \left\{ \frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right\} \right]^m} \quad (3.2)$$

Onde:

P = probabilidade da fratura;

v = volume ensaiado do material;

v₀ = volume padrão;

m = módulo de Weibull;

σ = tensão de ruptura do material;

σ₀ = parâmetro de ajuste;

σ_u = tensão abaixo da qual a probabilidade de fratura é zero

Para uma amostragem, considerando o volume dos corpos de prova constante, tem-se:

$$P = 1 - e^{\left[- \frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right]^m} \quad (3.3)$$

As constantes m, σ₀ e σ_u são conhecidas como parâmetros de Weibull. A determinação destes parâmetros é feita considerando primeiramente σ_u = 0 e depois modificando a expressão

de forma a transformá-la na equação de uma reta segundo um sistema de eixos $\ln[\ln(1/(1-P))] \times \ln \sigma$]:

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-P} \right) \right] = m \ln \sigma - m \ln \sigma_0 \quad (3.4)$$

Utilizando o método de regressão linear é possível determinar os valores dos parâmetros m e σ_0 .

Neste trabalho, para as análises da estatística de Weibull foram testados 20 corpos de prova de cada composição. Os dados obtidos foram utilizados para os cálculos estatísticos e para a obtenção dos valores de m e $\sigma_{50\%}$, que é a tensão onde 50 % das amostras fraturariam.

Para as amostras retangulares grandes, nas dimensões nominais de $(96 \times 21 \times 8,5 \text{ mm})$ foram utilizadas 3 amostras de cada composição para o ensaio de flexão. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos na AVIBRAS Aeroespacial S.A., utilizando a máquina universal de ensaios mecânicos da marca Wolpert, modelo 1021.

3.7.4 Dureza superficial

A dureza superficial das cerâmicas foi determinada através do ensaio de dureza *Vickers*. Esta técnica é baseada na deformação da superfície da amostra sob ação de uma carga. A determinação da dureza depende do tamanho da impressão (diagonais da pirâmide) na superfície do material e da carga aplicada pelo penetrador de diamante (Figura 3.3). Para o durômetro *Vickers* o penetrador tem formato piramidal, com seção quadrada [58,59].

Para o ensaio de dureza superficial *Vickers* os corpos de provas foram embutidos em baquelite e em seguida foi feito o polimento superficial em uma politriz automática. Foram feitas cinco indentações em cada amostra, com carga de 20 kgf, para as determinações dos valores de dureza nas três composições estudadas. As amostras ensaiadas foram as cerâmicas com dimensões pequenas utilizadas nos ensaios de flexão.

O valor da dureza foi dado automaticamente pelo durômetro, após o posicionamento manual das barras de alinhamento das extremidades da indentação. A carga de 20 kgf foi escolhida pelo fato de poder gerar trincas visíveis na ampliação de 20 vezes, valor máximo de ampliação do durômetro da marca Instron, modelo Tukon 2100 B, do Laboratório de Caracterização de Materiais do AMR/IAE/DCTA.

A equação de dureza é dada por:

$$H_v = \frac{2Q \sin\Theta/2}{a^2} \quad (3.5)$$

Onde:

H_v = dureza Vickers (GPa);

Q = carga aplicada pelo penetrador (kgf);

Θ = ângulo de inclinação do penetrador e

a = comprimento médio da diagonal da impressão (m)

3.7.5 Tenacidade à fratura

Para a determinação da tenacidade à fratura (K_{IC}) das cerâmicas sinterizadas foi utilizado o método da indentação *Vickers* [56,60]. Este método consiste em produzir trincas radiais na superfície da amostra utilizando um penetrador *Vickers*. O valor da tenacidade à fratura depende da carga aplicada, dos comprimentos das trincas produzidas, do tamanho médio das diagonais da indentação *Vickers*, do módulo de elasticidade e da equação utilizada.

As trincas se originam em função da carga aplicada, quanto maior a carga, maior o comprimento das trincas. Foram realizados ensaios de tenacidade à fratura nas amostras das três composições. Os corpos de provas utilizados foram os de ensaio de flexão. As amostras ensaiadas foram submetidas à carga de 20 kgf, aplicada durante 15 segundos, para garantir trincas visíveis sob ampliação de 20 vezes (valor de ampliação máxima do equipamento utilizado).

As impressões foram feitas usando um durômetro da marca Instron, modelo Tukon 2100 B, pertencente ao Laboratório de Ensaios de Caracterização de Materiais do AMR/IAE/DCTA.

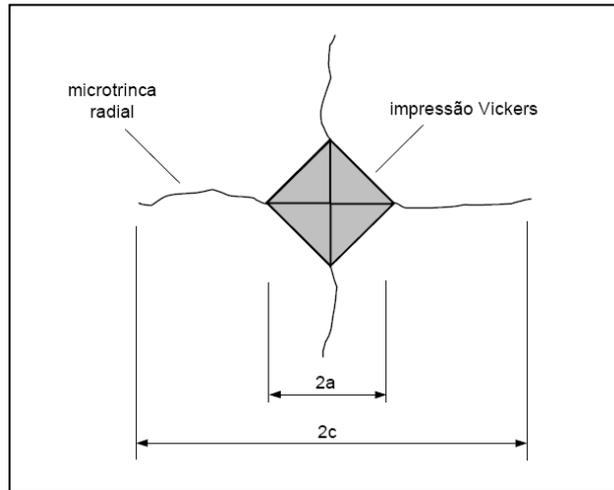


Figura 3.7 - Desenho esquemático das microtrincas radiais originadas na superfície da do material em teste resultante da impressão *Vickers*.

Fonte: [39].

Para o cálculo de K_{IC} , foi usado o valor médio do comprimento das duas trincas radiais que se originam do vértice da diagonal de cada impressão *Vickers* e utilizou-se a Equação 3.2 [7,61,62]:

$$K_{IC} = \frac{0,0726 \times Q}{c^{3/2}} \quad (3.6)$$

Onde:

K_{IC} = tenacidade à fratura (MPa. m^{1/2});

Q = carga aplicada (kgf) e

c = metade do comprimento da trinca provocada pela penetração (mm).

Para a comprovação dos valores calculados de tenacidade à fratura foi utilizada também a equação desenvolvida por Evans e Charles [63], para $c/a > 2,5$:

$$K_{IC} = 0,036 \cdot E^{0,4} \cdot Q^{0,6} \cdot a^{-0,7} \cdot (c/a)^{-1,5} \quad (3.7)$$

Onde:

E = módulo de elasticidade (MPa);

Q = carga aplicada (kgf);

a = comprimento médio da diagonal da impressão (cm) e

c = comprimento médio da trinca (cm).

3.8 Caracterização das blindagens mistas

3.8.1 Absorção de energia das bases através do ensaio de queda de 12 metros

O ensaio de queda de 12 metros é baseado na Norma MIL-STD-331B, Apêndice A de ensaios de choque mecânico, que é utilizado para avaliar índices de choques em peças com índice de risco alto, no setor industrial bélico [64]. Este ensaio consiste na queda livre da altura de 12 metros. O manual da Hexcel apresenta o cálculo da energia de absorção do painel sanduíche-colméia através da queda vertical mostrada na Figura 2.11 (a) do capítulo 2.4, a partir de uma altura, que deve causar uma deformação de até 70% da espessura total do painel [28]. Para melhor compreender a participação da base (painel sanduíche-colméia) na capacidade de absorver a energia de impacto do projétil durante o ensaio balístico, foi necessário construir uma curva de Energia absorvida x deformação, que foi realizada através deste ensaio a partir da queda livre de várias massas e fazendo a medição da deformação do painel sanduíche-colméia apresentado. Para determinação do valor de G limite foi necessário utilizar a equação 2.4 do capítulo 2.1.2, aplicar na equação o valor da carga que gerou a deformação de 70% do painel sanduíche-colméia e a velocidade de impacto para este nível de energia absorvida.

A Figura 3.8 apresenta o esquema do ensaio de queda de 12 metros no painel sanduíche-colméia de alumínio utilizado neste ensaio.

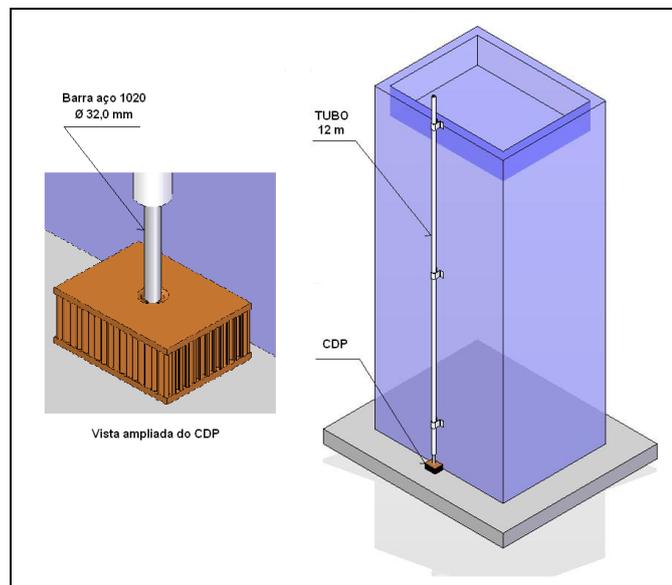


Figura 3.8 – Esquema do ensaio de queda de 12 metros.

A Tabela 3.1 apresenta os valores de tensão de impacto (T_i) para as colméias. Os valores são fornecidos pelo fabricante Hexcel e são necessários para o cálculo teórico da capacidade de absorção de energia cinética dos painéis sanduíche-colméia.

Tabela 3.1 - Valores de tensão de impacto para as colméias fabricadas pela Hexcel.

| Tensão de impacto (T_i) | |
|---|-------------|
| Descrição | kPa |
| 1/8-5052-3.1 | 900 |
| 1/8-5052-4.5 | 1800 |
| 1/8-5052-6.1 | 3100 |
| 1/8-5052-8.1 | 5200 |
| 1/4-5052-1.6 | 280 |
| 1/4-5052-2.3 | 520 |
| 1/4-5052-3.4 | 1000 |
| 1/4-5052-4.3 | 1600 |
| 1/4-5052-5.2 | 1300 |
| 1/4-5052-6.0 | 3000 |
| 1/4-5052-7.9 | 5000 |

Fonte: [28]

O estudo teórico e prático da absorção de energia cinética do painel sanduíche-colméia foi realizado no painel da blindagem 1, por permitir a utilização do uso do ensaio de queda de 12 m para avaliação da energia cinética em função da deformação. A colméia utilizada na blindagem 1 é a Hexcel 1/4" – 5052 – 3.4 com espessura de 60 mm e as chapas da face são de alumínio 2024-T3 com espessura de 0,80 mm, coladas com filme adesivo Redux 312/5. O fato deste painel ter a colméia e as chapas da face espessas, facilitam a medição da deformação do painel após o impacto de massas variadas da altura de 12 metros. O painel sanduíche-colméia da blindagem 2 tem colméia de 19,4 mm de espessura e chapas da face com 0,3 mm de espessura, ou seja muito finos. A deformação máxima do painel sanduíche-colméia da blindagem 2 ocorreu com uma força de impacto pequena, seriam necessários muitos ensaios e amostras para elaborar o gráfico de energia absorvida x deformação com certo grau de precisão. Outro motivo pelo qual não foi realizado o estudo de absorção de energia do painel sanduíche-colméia da blindagem 2 foi o fato da base ser constituída pelo painel sanduíche-colméia em conjunto com a chapa de aço

inox de 1,0 mm de espessura, tornando complexo e impreciso a avaliação de absorção de energia cinética.

O cálculo da energia cinética absorvida, utilizando as Equações 2.7 e 2.8 e a Tabela 3.1, é aplicado diretamente para as colméias sem placas, para o cálculo de colméias coladas nas placas foi necessário considerar a área da placa que trabalha no impacto. Através do ensaio de 12 metros foi possível determinar a área da deformação plástica. O diâmetro que participou do processo de deformação foi de 80 mm aproximadamente.

Nesta condição a energia cinética de absorção teórica é de:

$$F_{\text{din}} = T_i \cdot A_i \quad (2.7)$$

$$F_{\text{din}} = 1000 \cdot 10^3 \cdot (0,08)^2 \cdot \pi / 4 = 5.026,5 \text{ N}$$

$$E_a = F_{\text{din}} \cdot s \quad (2.8)$$

$s = 70\%$ da espessura da placa

$$E_a = 5.026,5 \cdot 0,7 \cdot 0,061 = \mathbf{214 \text{ J}}$$

Portanto, a energia de absorção teórica considerando uma deformação do painel sanduíche-colméia de 70% da espessura é de 214 J. A comparação entre o valor teórico e o valor real será feita no capítulo 4.11.

Cálculo do Limite G para 70% de deformação:

$$G = F_{\text{din}} / F_{\text{est}} \quad (2.6)$$

Onde:

$$F_{\text{din}} = 5.026,5 \text{ N}$$

$$F_{\text{est}} = m \cdot g = 17,91 \text{ N}$$

$$m = 2 E_a / v^2 = 1,83 \text{ kg}$$

$$E_a = 214 \text{ J}$$

$$v = (2gh)^{1/2} = 15,3 \text{ m/s} \quad (2.9)$$

$$h = 12 \text{ m}$$

$$G = 5.026,5 / 17,91 = \mathbf{280}$$

O limite G é um parâmetro de amortecimento de impactos, o limite G do painel sanduíche-colméia da blindagem 1, considerando a deformação de 70% foi de 280, este valor representa uma capacidade de amortecimento baixa para estas condições de contorno. O cálculo do limite G para este projeto foi apenas didático, não foi estipulado um valor de limite G ideal. O amortecimento de impactos de meteoróides no satélite CBERS deverá ser analisado pelos responsáveis do projeto, definindo os valores máximos de limite G para cada região sujeita aos impactos de meteoróides ou detritos. Preocupações com a órbita e os desvios de apontamento deverão ser consideradas em função dos impactos de meteoróides ou detritos. A 3.9 apresenta uma vista em corte do painel sanduíche-colméia mostrando a deformação realizada pelo impacto de um peso.

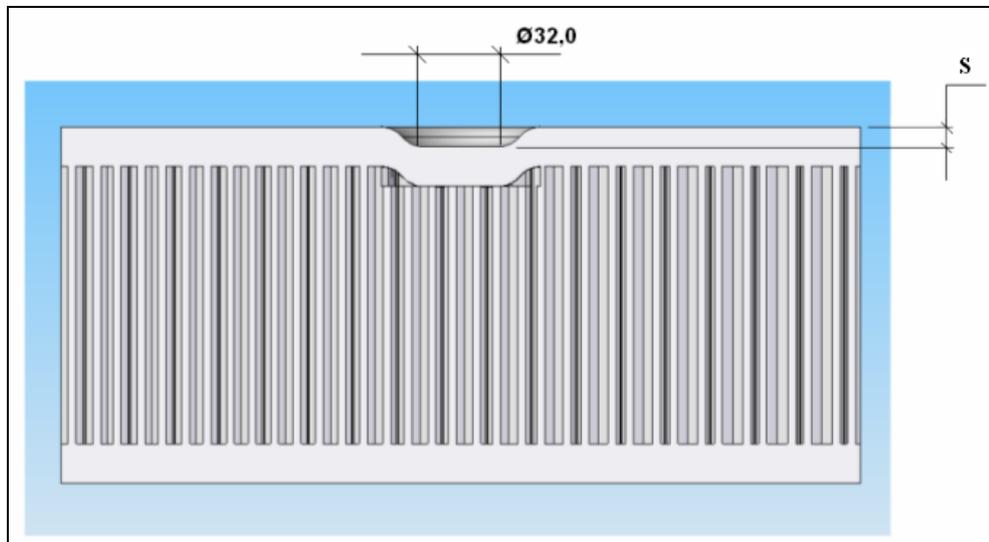


Figura 3.9 – Vista em corte de um painel sanduíche-colméia após impacto de um peso.

Fonte: [Adaptada de 28].

A chapa de aço inox AISI 304 da blindagem 3 também foi submetida ao ensaio de queda de 12 metros, para avaliação da participação percentual de absorção de energia da base e da cerâmica (resultados apresentados no item 4.13).

3.8.2 Densidade de área das blindagens mistas

A densidade de área, também chamada de densidade superficial é a razão entre a massa total da blindagem (em kg) e a sua área unitária (em m²)[65]. Esse parâmetro é utilizado nos projetos estruturais de satélites, que necessita manter uma massa total reduzida e manter uma distribuição adequada da massa no volume do satélite. O centro de massa e o momento de inércia

do satélite são afetados diretamente por este parâmetro. Uma blindagem eficiente requer uma densidade de área mais reduzida quanto possível para um determinado nível de absorção de impacto. Para a determinação da densidade de área das blindagens poderiam ser medidas as massas das blindagens com dimensões de 1×1 m. Por razões práticas, a densidade das blindagens foram consideradas em amostras menores.

3.8.3 Ensaio balístico

Existem duas normas internacionais principais utilizadas para avaliar o desempenho da proteção balística: a NIJ - 0101.04 e 0108.0 (National Institute of Justice) e a NATO - STANAG 4569 (North Atlantic Treaty Organization). Recentemente a ABNT lançou a norma NBR 15000, sendo que a tabela balística apresentada na norma NBR é semelhante à da norma NIJ. Existem diferentes níveis de exposição ao impacto que são relacionados por classes baseadas no calibre e tipo da arma, na massa e velocidade do projétil e distância de impacto. Observando estes parâmetros foi especificado o nível IIIA da norma NIJ ou NBR 15000 para o ensaio balístico da blindagem 1, com painel de sanduíche-colméia de 61,6 mm de espessura e pastilhas cerâmicas retangulares com 8,5mm de espessura. O motivo da escolha deste nível para a blindagem 1 foi pelo fato da energia cinética do projétil ser semelhante à energia teórica de um meteoróide, conforme cálculo realizado no item 3.2.1, cujo valor obtido foi de 900 J.

Para o ensaio balístico da blindagem 2, com painel de sanduíche-colméia de 20,0 mm de espessura mais a chapa de aço inox 304 com 1,0 mm de espessura e pastilha cerâmica cilíndrica com 6,5 mm de espessura foi escolhido os níveis II e IIIA. O motivo da escolha destes níveis para a blindagem 2 foi pelo fato da energia cinética dos projéteis ser mais abrangente, porém próximos ao valor de meta, ou seja, 900 J. O cálculo das blindagens mistas 1 e 2 foram apresentados no item 3.2.1.

Para o ensaio balístico da blindagem mista 3, que tem como base a placa de aço inox de 1,5 mm de espessura e pastilha cerâmica cilíndrica com 11,3 mm de espessura foi escolhido o nível III. A escolha do nível III para a blindagem mista 3 foi pelo fato de ser um ensaio de alta energia, que requer uma blindagem de maior eficiência balística e por permitir uma análise comparativa da qualidade da blindagem mista estudada em relação a uma blindagem mista equivalente, mas com cerâmica de alumina, realizado em outro trabalho. A energia cinética de impacto deste nível é de 3406 J (projétil $7,62 \times 51$ FMJ), ou seja, muito superior a 900 J, por isso esta blindagem tem grande potencial para aplicação como proteção contra impactos de detritos

espaciais. A Figura 3.10 apresenta os níveis de blindagem, calibre, massa, velocidade e energia cinética do projétil, conforme norma ABNT NBR 15000 [13].

Para a perfeita compreensão do ensaio balístico são necessárias algumas definições:

- Penetração completa (PC) - Ocorre quando o projétil, seus fragmentos ou qualquer fragmento da própria blindagem perfura a placa testemunha permitindo a passagem de luz;
- Penetração parcial (PP) - Ocorre quando a blindagem suporta o projétil e seus fragmentos, bem como os próprios fragmentos do material da blindagem, deixando intacta a placa testemunha e
- Placa testemunha - É uma placa de alumínio com espessura de 0,051 mm, localizada a 152,0 mm atrás do alvo para testemunhar a penetração completa.

De acordo com a norma, o alvo deve ser fixado de tal forma que a face de impacto seja perpendicular à linha de vôo do projétil. A bancada que fixa a blindagem deve permitir movimentos nas direções vertical e horizontal, permitindo impactos em qualquer ponto do alvo [1].

O ensaio balístico foi realizado no túnel de tiro da empresa BCA Ballistic Protection.

| - NORMA ABNT NBR 15000 | | | | | | |
|------------------------|-----------|-----------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------|
| NÍVEIS DE BLINDAGEM | PROJÉTEIS | ARMAMENTO | TIPO DE MUNIÇÃO | MASSA NOMINAL | VELOCIDADE REFERÊNCIA | ENERGIA CINÉTICA |
| I | | | .22 LRHV Chumbo | 2,6 +/- 0,1 g 40 gr | 320 +/- 10 m/s | 133,12 J |
| | | | .38 Special RN Chumbo | 10,2 +/- 0,1 g 158 gr | 254 +/- 15 m/s | 329 J |
| II-A | | | 9 mm FMJ | 8,0 +/- 0,1 g 124 gr | 332 +/- 12 m/s | 440,9 J |
| | | | .357 Magnum JSP | 10,2 +/- 0,1 g 158 gr | 381 +/- 12 m/s | 740,3 J |
| II | | | 9 mm FMJ | 8,0 +/- 0,1 g 124 gr | 358 +/- 15 m/s | 512,66 J |
| | | | .357 Magnum JSP | 10,2 +/- 0,1 g 158 gr | 425 +/- 15 m/s | 921 J |
| III-A | | | 9 mm FMJ | 8,0 +/- 0,1 g 124 gr | 426 +/- 15 m/s | 725,5 J |
| | | | .44 Magnum SWC GC | 15,6 +/- 0,1 g 240 gr | 426 +/- 15 m/s | 1405,5 J |
| III | | | 7,62 x 51 FMJ (.308 - Winchester) | 9,7 +/- 0,1 g 150 gr | 838 +/- 15 m/s | 3405,9 J |
| IV | | | .30 - 06 AP | 10,8 +/- 0,1 g 166 gr | 868 +/- 15 m/s | 4068,5 J |

Figura 3.10 – Norma NBR 15000 com a Tabela balística.

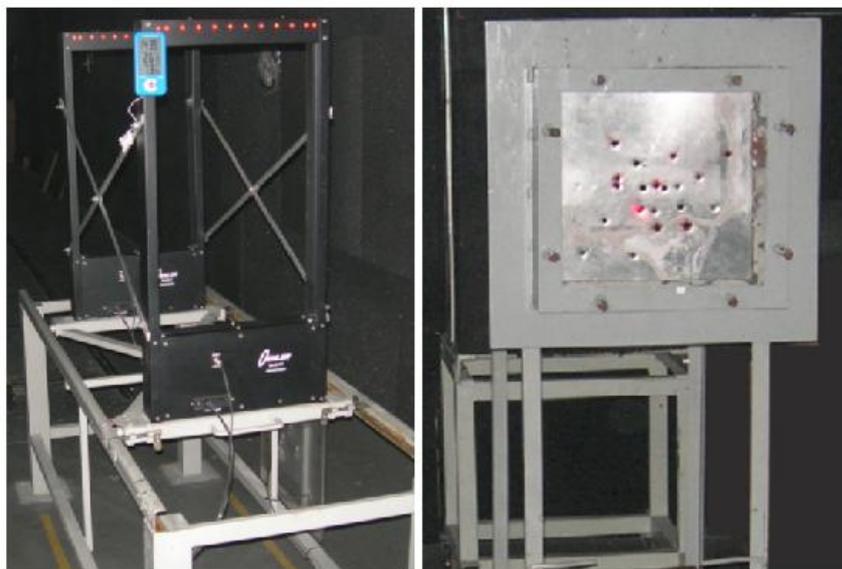
Fonte [13]

A Figura 3.11 apresenta o equipamento responsável por atirar os projéteis, ou seja, o proveite. Este equipamento faz parte do banco de tiros da empresa BCA.



Figura 3.11 – Provete de ensaio balístico da Empresa BCA.

A Figura 3.12 (a) apresenta o dispositivo responsável pela verificação das velocidades dos projéteis, pelo uso de sensores óticos. A Figura 3.12 (b) apresenta a placa alvo que é responsável por fixar as amostras e suportar os impactos dos projéteis. Os dois dispositivos possuem a versatilidade de movimento para adequar às distâncias estabelecidas na norma para cada nível balístico.



(a)

(b)

Figura 3.12 – (a) Sensor de velocidade do túnel balístico e (b) placa alvo do túnel balístico, ambos da Empresa BCA.

Todos os ensaios balísticos foram realizados conforme a norma NBR 15000, que especifica o peso e a velocidade do projétil com suas respectivas tolerâncias e a distância de impacto. Os painéis sanduíche-colméia das blindagens 1 e 2 foram colados em uma placa de aço de 600 × 600 × 5 mm, contendo um furo quadrado no centro para permitir a penetração do projétil, no caso da blindagem não resistir ao impacto do projétil, como mostrado na Figura 3.13 (a). As placas de aço inox da blindagem 3 foram fixadas diretamente no suporte da placa alvo através de grampos, como mostrado na Figura 3.13 (b). A placa alvo também contém um furo central quadrado.

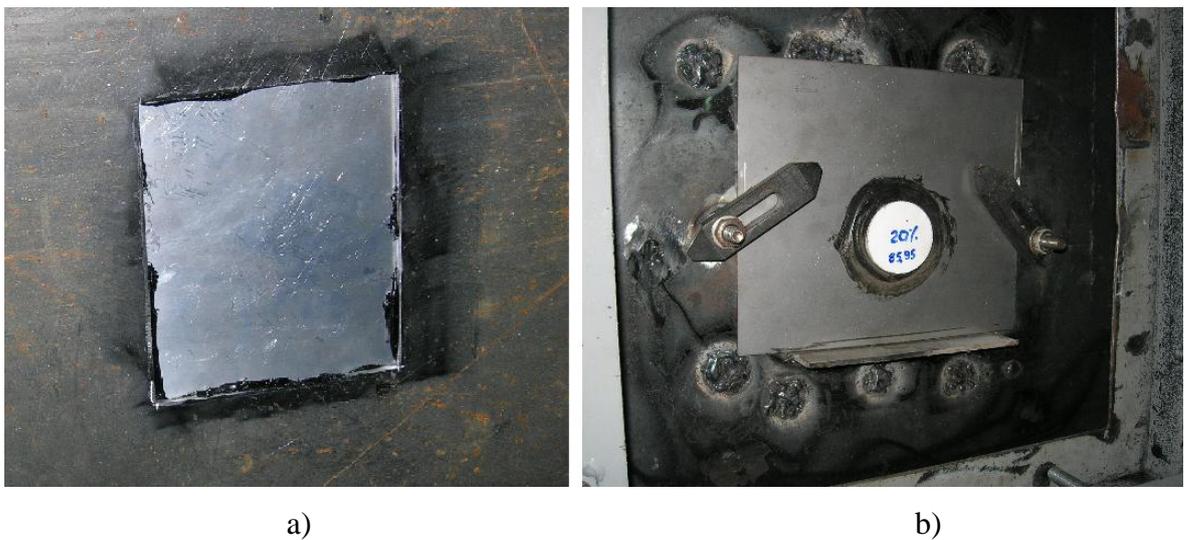


Figura 3.13 – a) Placa de adaptação para fixação dos painéis das blindagens mistas 1 e 2 e b) Blindagem mista 3 fixada no suporte da placa com grampos.

A preparação das amostras para o ensaio balístico foi realizada de acordo com o procedimento:

1. limpeza e rebarbamento das chapas de aço e dos painéis de sanduíche-colméia;
2. colagem da pastilha cerâmica no centro da chapa com o adesivo Pu Sykaflex 256;
3. retirada do excesso do adesivo e tempo cura de 24 horas;
4. colagem de duas camadas de tecido de aramida sobre a pastilha cerâmica com o adesivo Pu;
5. tempo de cura de 24 horas e
6. ensaio balístico.

A aplicação do tecido de aramida (*kevlar*) sobre a pastilha cerâmica tem a função de reter os estilhaços do projétil e da própria cerâmica durante o impacto.

Para realização do ensaio balístico existem alguns procedimentos a serem seguidos:

1. pesagem dos projéteis;

2. carregamento da carga explosiva no cartucho que foi previamente pesada;
3. posicionamento do carro da placa alvo na distância normalizada;
4. realização do 1º disparo teste e observação da velocidade do projétil através do sensor;
5. se a velocidade estiver correta carrega-se os demais cartuchos;
6. se a velocidade for inferior ou superior à especificada, altera-se a quantidade de carga e recomeça-se o processo;
7. após o carregamento dos cartuchos, faz-se outro disparo teste com mira laser;
8. correção da mira do proveite;
9. realização de outro tiro teste para confirmar a mira;
10. posicionamento da amostra centrada na mira laser;
11. realização do disparo sobre a amostra, que normalmente atinge o centro da cerâmica e
12. avaliação do resultado, olhando a parte traseira da amostra.

A Figura 3.14 mostra os cartuchos e projéteis da munição $7,62 \times 51$ que foram utilizados no ensaio da blindagem 3. A especificação das blindagens mistas 1, 2 e 3 foi apresentada no item 3.2.3.

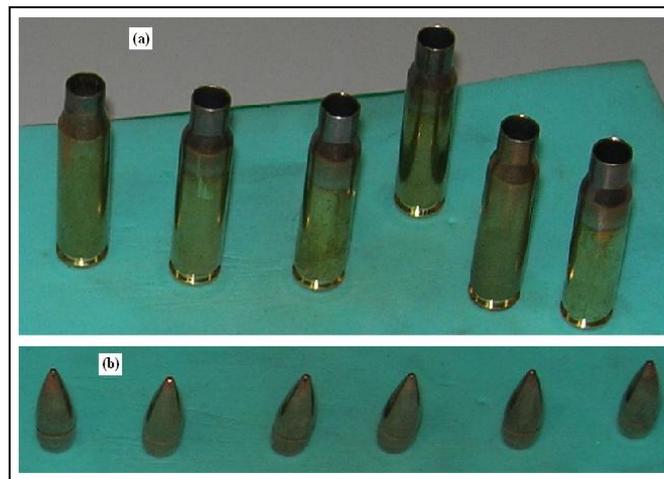


Figura 3.14 – Munições utilizadas nos ensaios balísticos: (a) cartuchos de $7,62 \times 51$ e (b) projéteis de $7,62 \times 51$.

No resultado dos ensaios balísticos o laudo deve ser apresentado como “PP” que significa penetração parcial ou “PC” que significa penetração completa, ou seja, o objetivo da blindagem é obter laudo PP. A cerâmica pode fragmentar-se e a base pode ser parcialmente danificada, entretanto, nenhum estilhaço pode romper a última chapa da blindagem.

Na Figura 3.15 é mostrado o fluxograma dos procedimentos adotados para a produção e caracterização dos compósitos cerâmicos de alumina-zircônia utilizados neste trabalho.

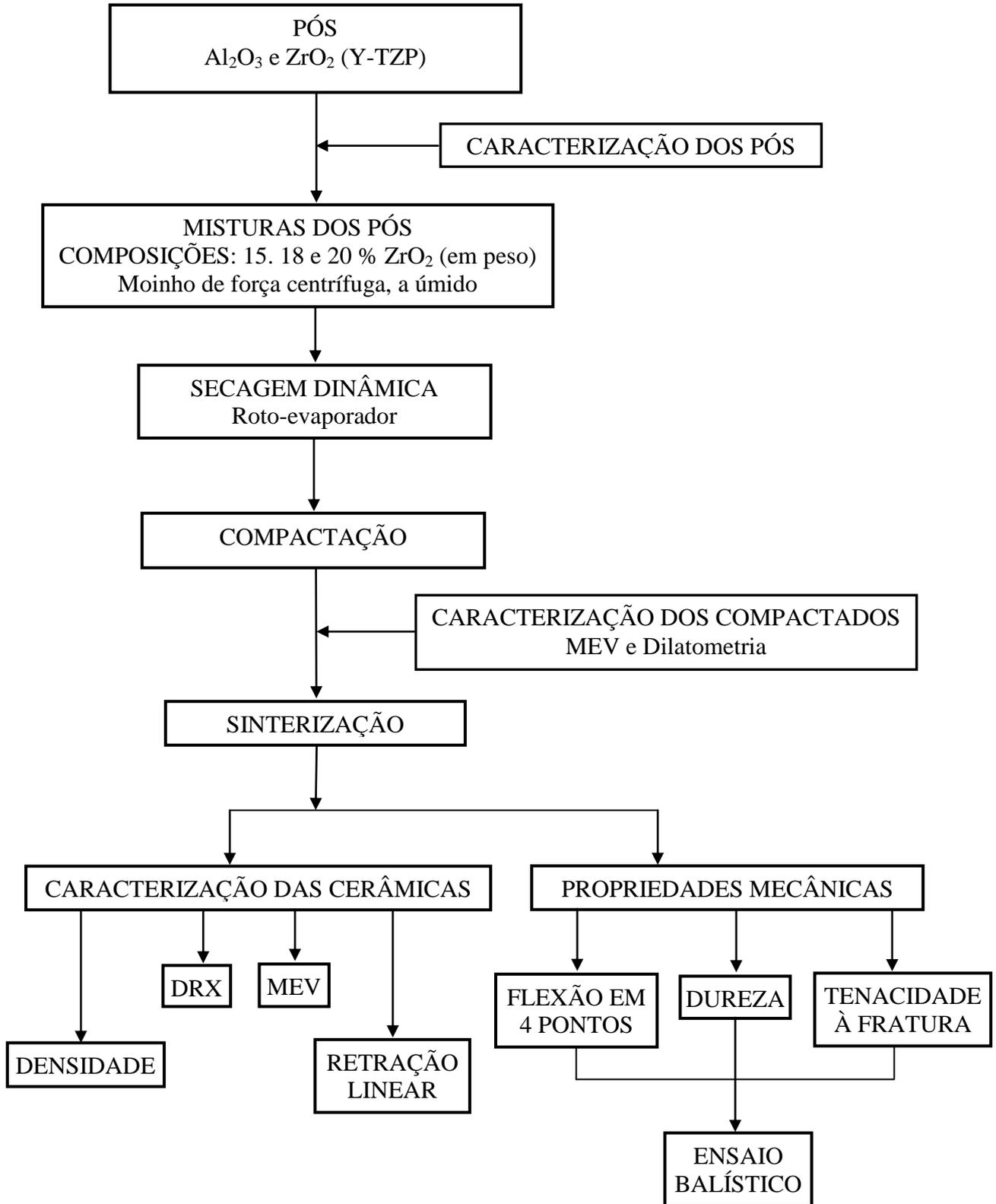


Figura 3.15 - Fluxograma mostrando as etapas do procedimento experimental adotado para a produção e caracterização dos compósitos cerâmicos de alumina-zircônia utilizados nesta investigação.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Características do pó de alumina

As curvas de distribuição de tamanhos de partículas da alumina são mostradas na Figura 4.1. Pode ser observado que o volume maior corresponde às partículas na faixa sub-micrométrica de tamanhos, sendo que o diâmetro médio das partículas deste pó de alumina é de 0,36 μm . Observa-se que este pó de alumina é composto por partículas com tamanhos nas escalas nanométrica ($\cong 18\%$, com partículas $\leq 100\text{ nm}$ ou $0,1\ \mu\text{m}$), sub micrométrica ($\cong 68\%$, com partículas entre $0,1$ e $1\ \mu\text{m}$) e micrométrica ($\cong 14\%$, com partículas $\geq 1\ \mu\text{m}$).

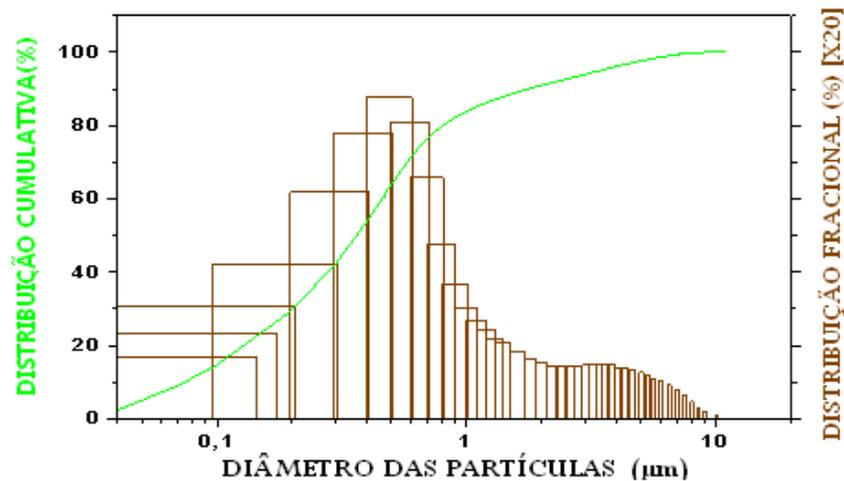


Figura 4.1 – Histograma da distribuição de tamanhos de partículas e respectiva curva de distribuição cumulativa do pó de Al_2O_3 .

A área superficial do pó de alumina sub-microparticulado obtida pelo método de adsorção superficial de nitrogênio apresentou o valor de $6,0\ \text{m}^2/\text{g}$. O valor indica que as partículas do pó possuem porosidade baixa, ou seja, é composto predominantemente por agregados de nanopartículas.

A massa específica real do pó apresentou o valor de $3,96\ \text{g}/\text{cm}^3$ indica que esta alumina possui um valor de massa específica próximo do seu valor teórico ($3,98\ \text{g}/\text{cm}^3$).

□ Figura 4.2 mostra o difratograma de raios X do pó de alumina, com a predominância da fase cristalina alfa □ deste material. Os picos de difração de raios X característicos da fase alfa foram indexados com o auxílio da microficha JCPDS 01-1296.

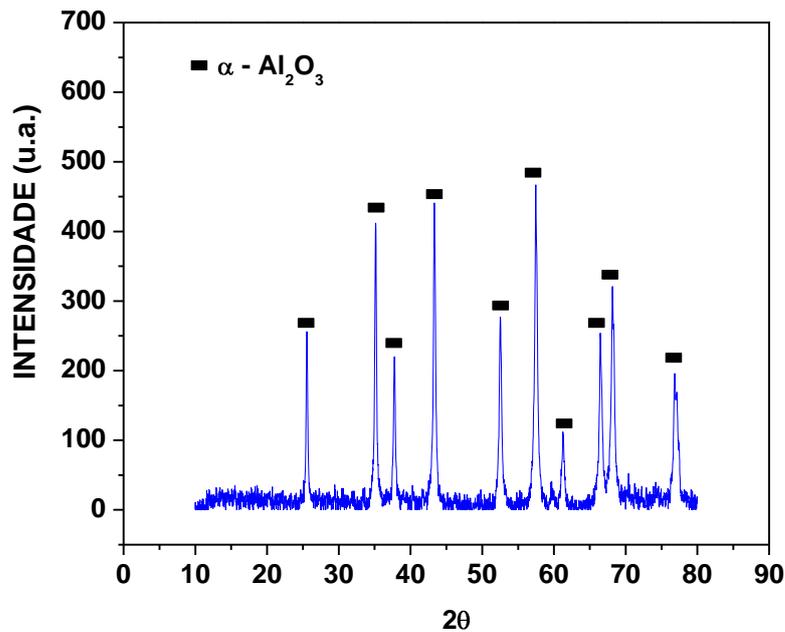


Figura 4.2 - Difratograma de raios X do pó de Al_2O_3 .

4.2 Características do pó de zircônia

A curva de distribuição de tamanhos de partículas do pó de zircônia mostrada na Figura 4.3, apresenta o valor do diâmetro médio das partículas de $1,6 \mu\text{m}$. Trata-se de uma distribuição de tamanhos do tipo bimodal, com o maior pico localizado em $1,8 \mu\text{m}$ e o menor em $8,5 \mu\text{m}$. A curva de distribuição apresenta que o pó é composto por partículas com tamanhos nas escalas nanométrica ($\cong 3 \%$, com partículas $\leq 100 \text{ nm}$ ou $0,1 \mu\text{m}$), sub micrométrica ($\cong 24 \%$, com partículas entre $0,1$ e $1 \mu\text{m}$) e micrométrica ($\cong 73 \%$, com partículas entre 1 e $10 \mu\text{m}$).

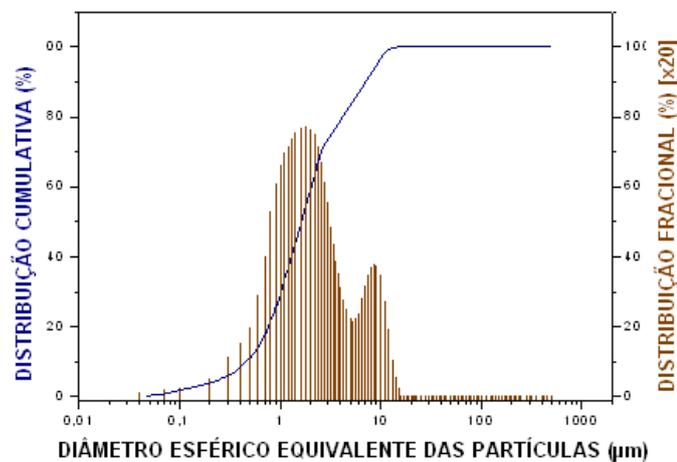


Figura 4.3 - Curva da distribuição de tamanho de partículas e respectiva curva de distribuição cumulativa do pó de zircônia.

Na Figura 4.4 é mostrada a imagem obtida por MEV do pó de zircônia. Pode ser observado na Figura 4.4 (a) que existe a presença de aglomerados grandes. Entretanto, na Figura 4.5 (b) pode ser observado que estes aglomerados são formados por aglomerados e/ou agregados de partículas muito menores, da ordem de 1 a 3 μm . A curva de distribuição da Figura 4.3 mostra que os aglomerados possuem tamanhos entre 0,06 e 14,8 μm . Entretanto, a área superficial do pó de zircônia obtida pelo método de adsorção superficial de nitrogênio apresentou o valor de 42 m^2/g . O diâmetro médio dos poros apresentou o valor de 6,6 nm e o volume total de poros apresentou o valor de 0,07 cm^3/g . O fato do valor da área superficial específica ser alto e o diâmetro médio de poros ser baixo, indica que este pó é formado por aglomerados de nanopartículas. Portanto, o resultado apresentado pela curva de distribuição de tamanhos de partículas não representa a realidade, pois apresentou o tamanho dos aglomerados e não das partículas do pó. O pó de zircônia é na verdade composto por partículas com tamanhos majoritariamente na escala nanométrica.

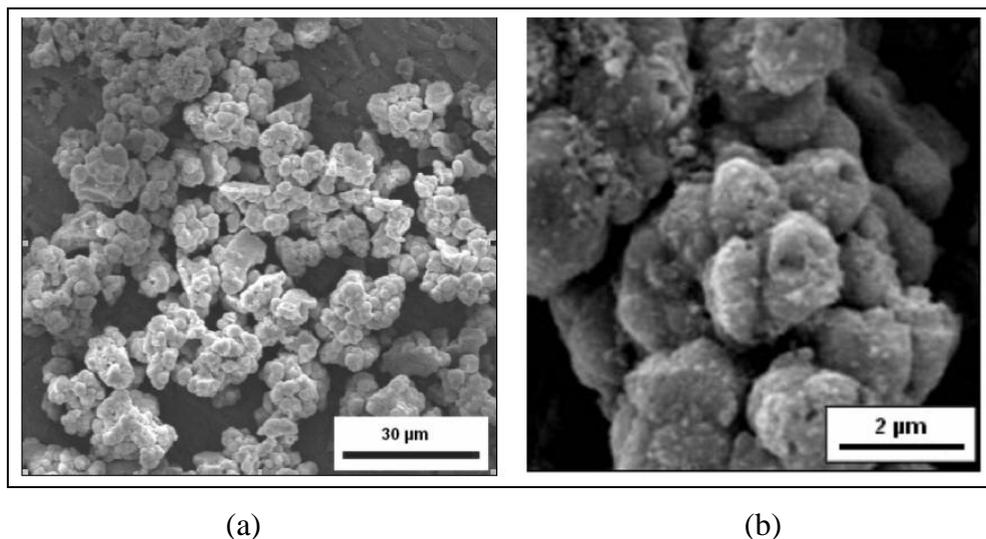


Figura 4.4 - Imagens obtidas por MEV do pó de zircônia: (a) aglomerados grandes e (b) detalhe de um aglomerado grande formado por pequenos aglomerados

Esses aglomerados acabam se formando em função do pequeno tamanho das partículas com tamanhos na escala nanométrica, ligadas fracamente por força de Van der Waals. Durante a etapa de compactação dos pós, estes aglomerados devem ser desfeitos, minimizando as falhas de empacotamento e contribuindo para a melhoria da densificação durante a etapa de sinterização.

□ Figura 4.5 mostra o difratograma de raios X do pó de zircônia, indicando a predominância da fase cristalina tetragonal deste material. Os picos de difração de raios X característicos da fase tetragonal foram indexados com o auxílio da microficha JCPDS 17-923.

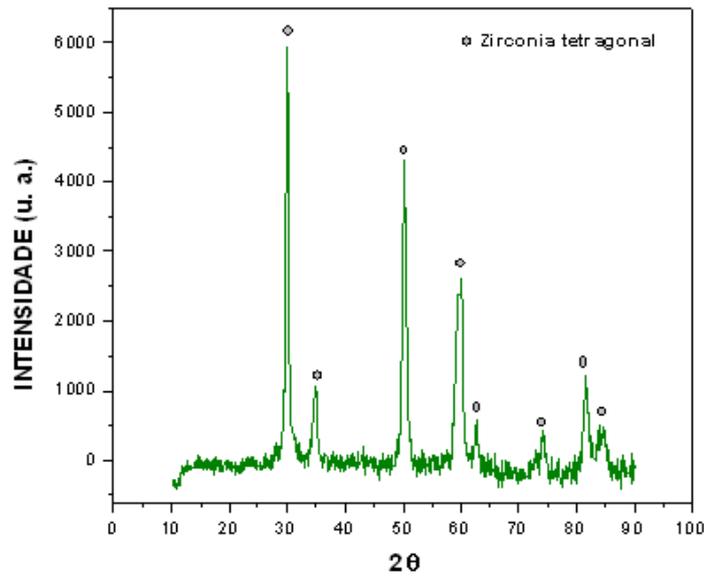


Figura 4.5 - Difratoograma de raios X do pó de zircônia (3Y-TZP), onde os picos representam à fase cristalina tetragonal da zircônia.

4.3 Estudo do comportamento da dilatação térmica linear dos compósitos cerâmicos

O ensaio de dilatometria foi realizado nas amostras dos compósitos de alumina – zircônia. A Figura 4.6 apresenta a curva de comportamento da dilatação térmica linear em função da temperatura para o composto B, os demais compostos apresentaram resultados semelhantes. A temperatura de densificação máxima, conforme a curva, está acima de 1550 °C. Por esta razão as cerâmicas foram inicialmente sinterizadas nas temperaturas de 1550, 1600 e 1650 °C, para uma avaliação da melhor temperatura de sinterização. Após sinterização, as cerâmicas foram submetidas aos ensaios de flexão em 4 pontos, dureza e indentação *Vickers*. As cerâmicas que obtiveram os melhores valores de parâmetros de resistência à fratura, dureza e tenacidade à fratura foram aquelas sinterizadas em 1600 °C.

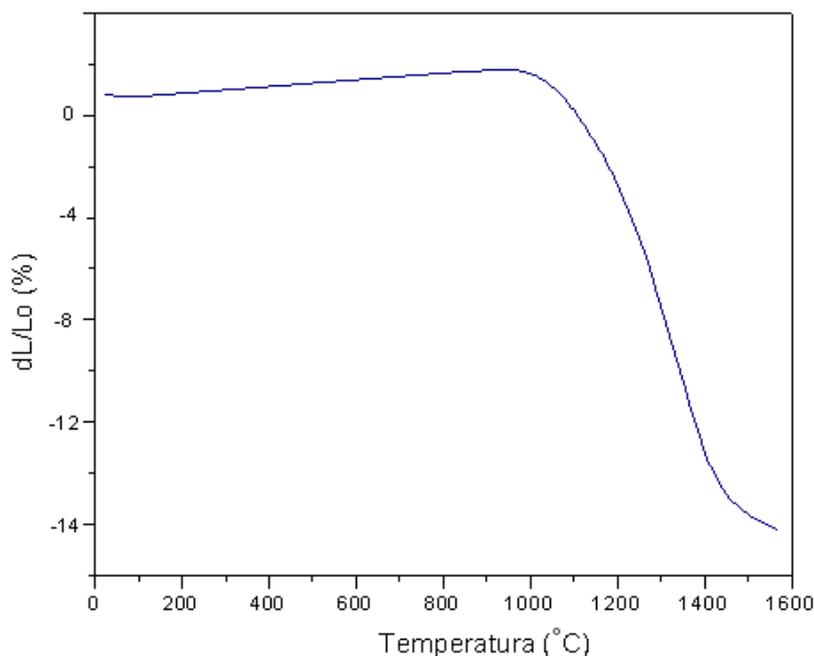


Figura 4.6 – Curva do comportamento da dilatação térmica linear em função da temperatura do composto B.

4.4 Densidade dos compactados

Os valores de massa específica e de densidade relativa dos pós compactados são mostrados na Tabela 4.1. O compactado com dimensões pequenas utilizado no ensaio de flexão, submetido a prensagem isostática de 300 MPa, foi descrito como compactado 1. O compactado na geometria retangular submetido a prensagem uniaxial de 60 MPa, foi descrito como compactado 2. O compactado na geometria cilíndrica submetido a prensagem uniaxial de 40 MPa, foi descrito como compactado 3.

As densidades dos pós compactados por prensagem isostática, para todos os compósitos, A (15% ZrO₂), B (18% ZrO₂) e C (20% ZrO₂) tem seus valores superiores aos obtidos por compactação uniaxial. Essa diferença é resultado da pressão distribuída uniformemente por toda a superfície do corpo compactado, minimizando o gradiente de pressão e proporcionando uma densidade maior e uma homogeneidade melhor do corpo compactado. Os compactados 2 obtiveram densidade relativa pouco superior aos compactados 3, influenciado pela maior pressão aplicada.

Tabela 4.1 - Valores obtidos para a massa específica e densidade relativa dos compactados 1, 2 e 3.

| COMPÓSITO CERÂMICO | A | B | C |
|---|------|------|------|
| Massa específica teórica (g/cm ³) | 4,18 | 4,22 | 4,25 |
| Massa específica do compactado 1 (g/cm ³) | 2,61 | 2,65 | 2,68 |
| Massa específica do compactado 2 (g/cm ³) | 2,32 | 2,37 | 2,40 |
| Massa específica do compactado 3 (g/cm ³) | 2,27 | 2,31 | 2,35 |
| Densidade relativa compactado 1 (%) | 66 | 65 | 65 |
| Densidade relativa compactado 2 (%) | 59 | 59 | 58 |
| Densidade relativa compactado 3 (%) | 54 | 55 | 55 |

Considerando: massa específica da alumina = 3,96 g/cm³ e massa específica da zircônia = 6,04 g/cm³.

4.5 Microestruturas das cerâmicas compactadas

A superfície de fratura da amostra compactada A apresenta uma distribuição heterogênea dos agregados das partículas com tamanhos na escala sub micrométrica e exibe algumas placas com tamanhos na escala micrométrica. O empacotamento de partículas é irregular e apresenta muitos vazios com diversos tamanhos (Figura 4.7).

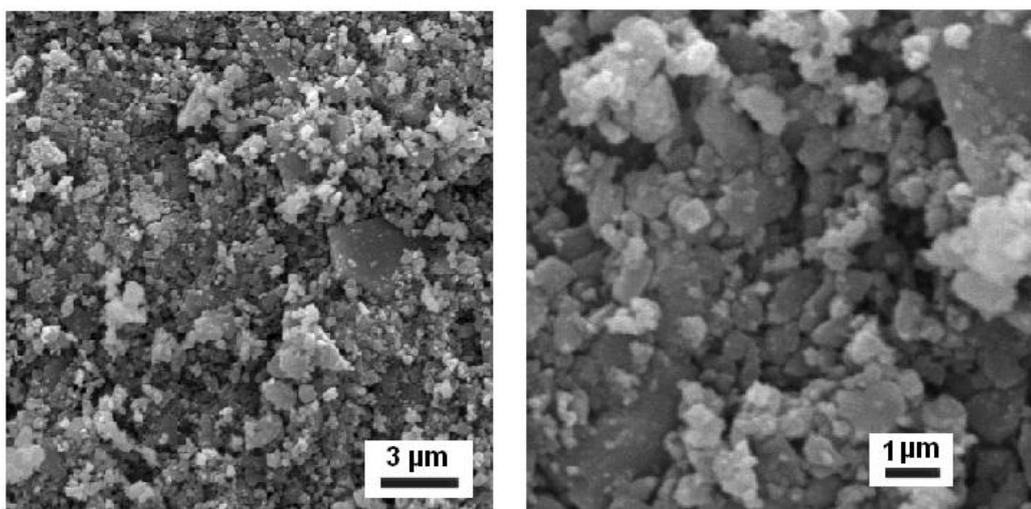


Figura 4.7 - Micrografias da superfície de fratura do compósito A (alumina +15 % de zircônia) compactado por prensagem uniaxial com 60 MPa.

A superfície de fratura da amostra compactada B apresenta uma distribuição heterogênea dos agregados das partículas com tamanhos na escala sub-micrométrica e exibe várias placas com tamanhos na escala micrométrica. O empacotamento de partículas é irregular e apresenta muitos vazios com diversos tamanhos. A porosidade é distribuída de forma irregular na microestrutura (Figura 4.8).

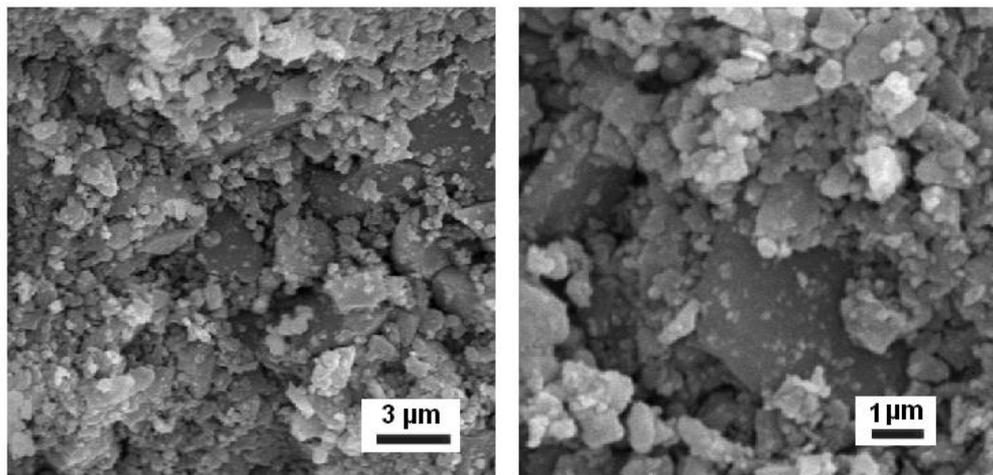


Figura 4.8 - Micrografias da superfície de fratura do composto B (alumina +18 % de zircônia) compactado por prensagem uniaxial com 60 MPa.

Apesar do aspecto semelhante das microestruturas destas três amostras a superfície de fratura da amostra compactada C (Figura 4.9) apresenta uma distribuição mais homogênea dos agregados das partículas com tamanhos na escala sub-micrométrica e mostra um grau de

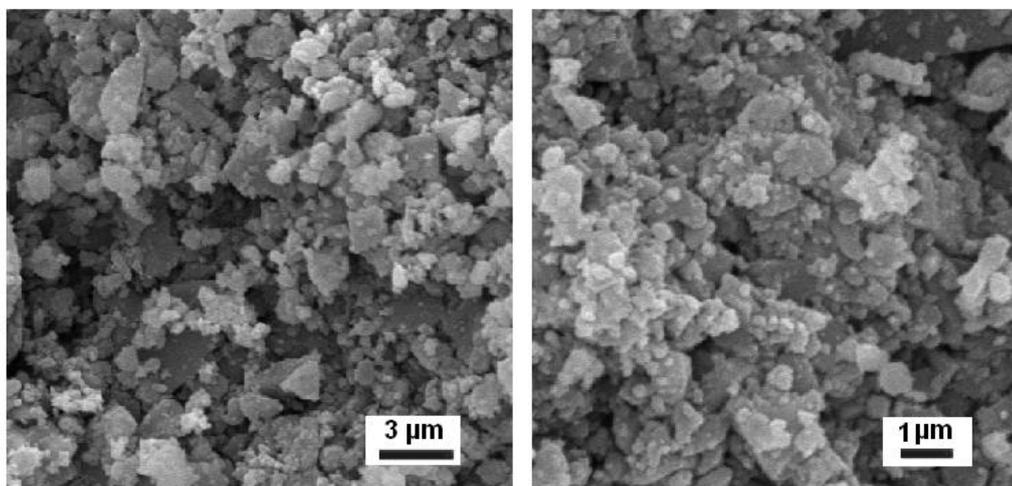


Figura 4.9 - Micrografias da superfície de fratura do composto C (alumina +20 % de zircônia) compactado por prensagem uniaxial com 60 MPa.

empacotamento maior do que as amostras A e B. A porosidade mostra-se distribuída de forma mais homogênea na microestrutura

4.6 Fases cristalinas das cerâmicas sinterizadas

A Figura 4.8 mostra o difratograma da cerâmica sinterizada da composição B, que foi compactada uniaxialmente com 70 MPa, isostaticamente com 300 MPa e sinterizada em 1600 °C. Pode ser observada a estrutura cristalina de Al_2O_3 composta por alumina α e a estrutura cristalina tetragonal de ZrO_2 com a estrutura tetragonal. Este resultado mostra que a cerâmica é um compósito cerâmico de alumina-zircônia tetragonal.

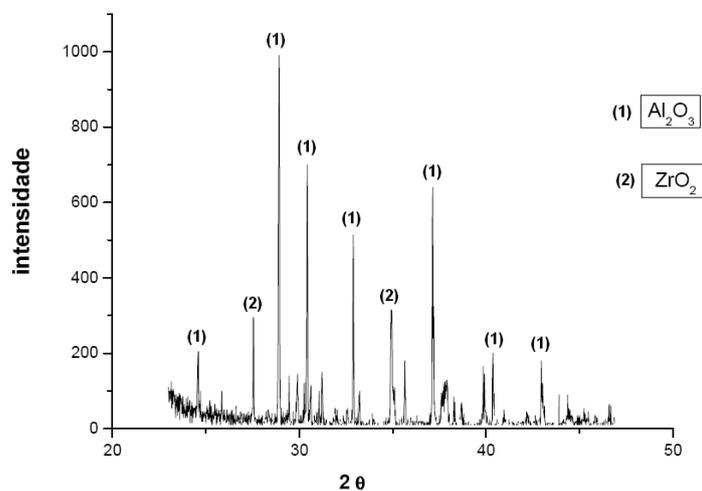


Figura 4.10 - Difratograma de raios X da amostra B sinterizada.

As intensidades relativas dos picos de difração estão consistentes com as quantidades de alumina e de zircônia utilizadas na composição B. Os difratogramas de raios X das demais composições apresentaram os picos característicos semelhantes aos da composição B.

4.7 Retração linear das cerâmicas sinterizadas

Os valores de retração linear foi um dos parâmetros utilizados para a definição das dimensões dos compactados, de forma a garantir as dimensões finais das cerâmicas sinterizadas, conforme cálculo realizado no item 3.2.1.

As amostras compactadas nas dimensões de $38,0 \times 4,8 \times 4,8$ mm, utilizadas no ensaio de flexão, foram submetidas à prensagem isostática de 300 MPa e sinterizada em 1600 °C (descrita como amostra 1). As dimensões da amostra 1 após sinterização foram de $33,0 \times 4,0 \times 4,0$ mm.

As amostras compactadas na geometria retangular nas dimensões nominais de $114,4 \times 25,5 \times 11,0$ mm, foram submetida à prensagem uniaxial de 60 MPa e sinterizada em 1600 °C (descrita como amostra 2). As dimensões da amostra 2 após sinterização foram de $96 \times 21 \times 8,5$ mm.

A Tabela 4.2 mostra os valores da retrações lineares das amostras 1 e 2 nas três composições estudadas: A, B e C. A retração da amostra 2 foi maior que a da amostra 1 influenciada pela baixa densificação durante a compactação, por ter sido exclusivamente por prensagem uniaxial. A baixa compactação foi compensada pela maior densificação durante a sinterização. A cerâmica cilíndrica não está sendo apresentada pelo fato de ter geometria diferente das cerâmicas retangulares (amostra 1 e 2).

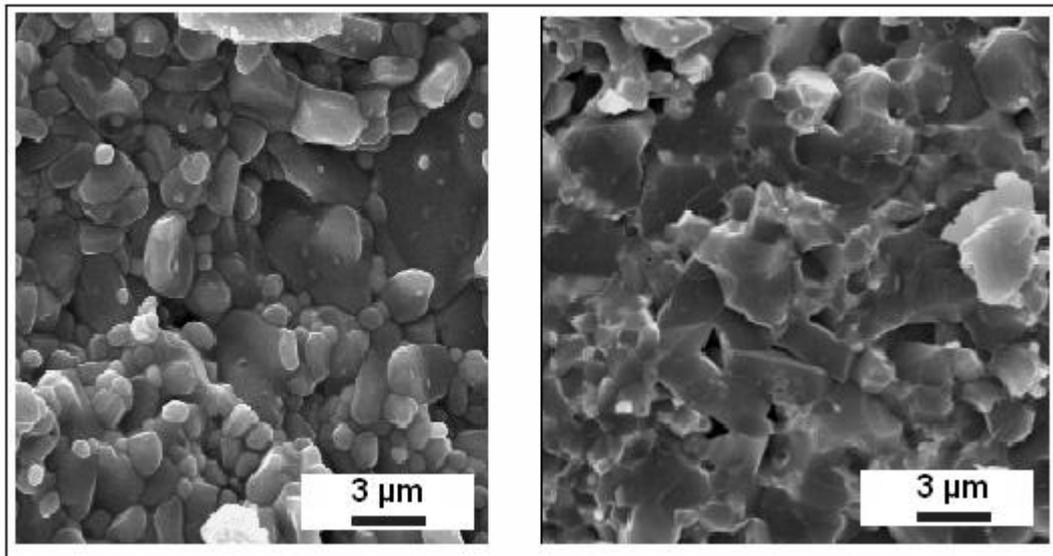
Tabela 4.2 - Valores das retrações lineares das amostras 1 e 2 nas composições A, B e C.

| COMPÓSITO CERÂMICO | A | B | C |
|-------------------------------|----------|----------|----------|
| L amostra 1 compactada (mm) | 38,06 | 38,07 | 37,85 |
| L amostra 1 sinterizada (mm) | 33,07 | 33,12 | 32,82 |
| Retração linear amostra 1 (%) | 13,12 | 13,02 | 13,30 |
| L amostra 2 compactada (mm) | 114,4 | 114,4 | 114,4 |
| L amostra 2 sinterizada (mm) | 95,78 | 95,50 | 95,15 |
| Retração linear amostra 2 (%) | 16,28 | 16,52 | 16,83 |

Onde: L é o comprimento das amostras.

4.8 Microestrutura das cerâmicas sinterizadas

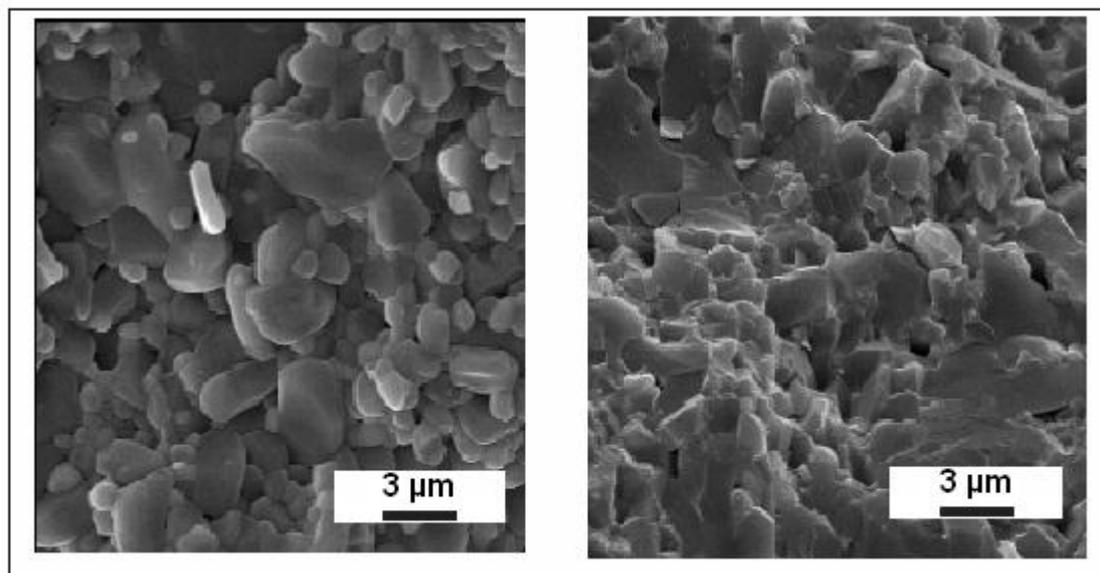
Conforme apresentado no capítulo anterior a amostra 1 foi compactada com prensagem isostática e a amostra 2 com prensagem uniaxial. Para mostrar as diferenças da microestrutura das amostras que foram utilizadas no ensaio balístico (amostra 2) e das cerâmicas para ensaio de flexão (amostra 1) são mostradas as imagens obtidas por MEV das superfícies de fratura das duas amostras, nas três composições (Figuras 4.11, 4.12 e 4.13). As imagens não mostram alterações no tamanho de grãos e no grau de densificação dos compósitos cerâmicos sinterizados na temperatura de 1600 °C por 2 horas.



(a)

(b)

Figura 4.11 - Imagens obtidas por MEV do composto cerâmico alumina-zircônia sinterizado A: (a) amostra 2 e (b) amostra 1.



(a)

(b)

Figura 4.12 - Imagens obtidas por MEV do composto cerâmico alumina-zircônia sinterizado B: (a) amostra 2 e (b) amostra 1.

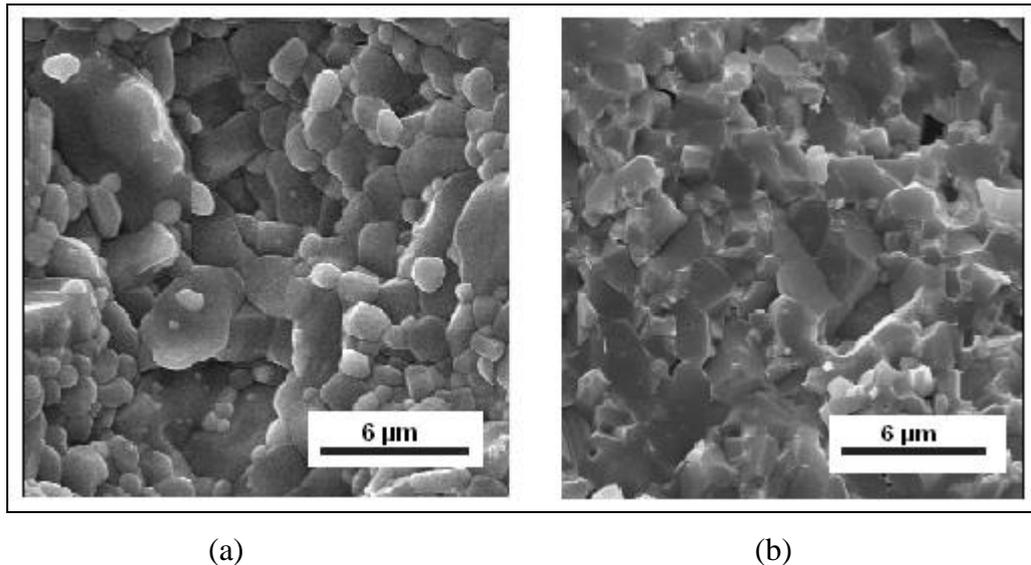


Figura 4.13 - Imagens obtidas por MEV do composto cerâmico alumina-zircônia sinterizado C: (a) amostra 2 e (b) amostra 1.

4.9 Densidade das cerâmicas sinterizadas

Os valores de massa específica e de densidade relativa dos compostos cerâmicos sinterizados são mostrados na Tabela 4.3. As cerâmicas foram sinterizadas em 1600 °C por 2 horas.

A cerâmica com dimensões pequenas ($30 \times 4 \times 4$ mm), que foi compactada com prensagem isostática de 300 MPa, foi nomeada como cerâmica 1. A cerâmica na geometria retangular ($8,5 \times 21 \times 96$ mm), que foi compactada com prensagem uniaxial de 60 MPa, foi nomeada como cerâmica 2. A cerâmica na geometria cilíndrica ($\text{Ø } 51 \times 11,3$ mm), que foi compactada com prensagem uniaxial de 40 MPa, foi nomeada como cerâmica 3.

A prensagem isostática mostrou grande influência na etapa de compactação, aumentando a densidade da cerâmica 1. A cerâmica 2 que apresentou densidade relativa baixa após a compactação, durante a sinterização houve uma compensação na densificação, de forma que a cerâmica 2 apresentou massa específica próxima à da cerâmica 1 após a etapa de sinterização. A cerâmica 3 apresentou a menor densidade relativa das três cerâmicas em todas as composições, efeito que pode ser justificado pela pressão baixa de compactação utilizada.

As cerâmicas 1 foram desenvolvidas para uso no ensaio de flexão em quatro pontos. As cerâmicas 2 foram desenvolvidas para a blindagem 1 e as cerâmicas 3 para a blindagem 3. As cerâmicas desenvolvidas para a blindagem 2 foram as cerâmicas cilíndricas iguais às cerâmicas 3, variando apenas na espessura ($\text{Ø } 51 \times 6,5$ mm), cujos resultados não foram apresentados na

Tabela 4.3, pois apresentaram os mesmos valores de massa específica das cerâmicas 3. A Figura 4.14 apresenta um desenho das formas das três cerâmicas utilizadas neste ensaio.

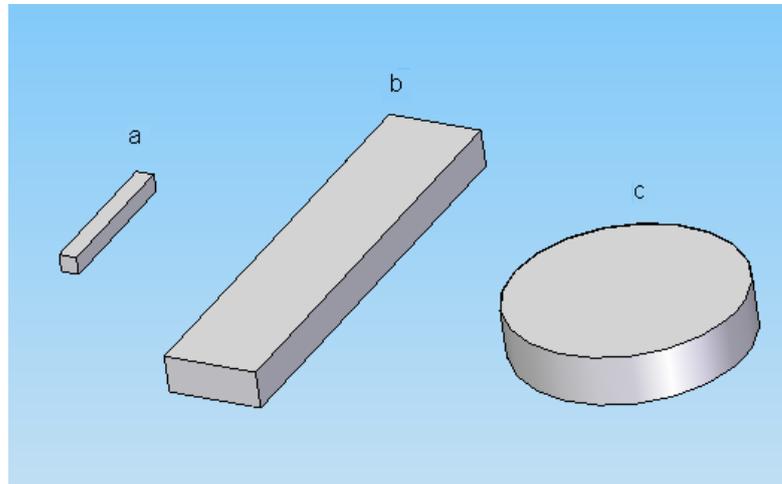


Figura 4.14 – Ilustração dos formatos das cerâmicas utilizadas: (a) Cerâmica 1, (b) Cerâmica 2 e (c) Cerâmica 3.

Tabela 4.3 - Valores obtidos para a massa específica e a densidade relativa das cerâmicas 1 e 2.

| COMPÓSITO CERÂMICO | A | B | C |
|---|----------|----------|----------|
| Massa específica teórica (g/cm ³) | 4,18 | 4,22 | 4,25 |
| Massa específica da cerâmica 1 (g/cm ³) | 3,97 | 4,05 | 4,15 |
| Massa específica da cerâmica 2 (g/cm ³) | 3,93 | 4,03 | 4,11 |
| Massa específica da cerâmica 3 (g/cm ³) | 3,91 | 3,99 | 4,05 |
| Densidade relativa da cerâmica 1 (%) | 95,0 | 96,0 | 97,6 |
| Densidade relativa da cerâmica 2 (%) | 94,0 | 95,5 | 97,4 |
| Densidade relativa da cerâmica 3 (%) | 93,5 | 94,5 | 95,0 |

Considerando: massa específica da alumina = 3,96 g/cm³ e massa específica da zircônia = 6,04 g/cm³.

4.10 Tensão de fratura das cerâmicas sinterizadas

A Tabela 4.4 mostra os valores médios da tensão de ruptura, desvio padrão, $\sigma_{50\%}$ e módulo de Weibull das cerâmicas 1 que foram submetidas à prensagem isostática de 300 MPa e sinterizadas em 1600 °C. Foram ensaiadas 20 cerâmicas de cada composição de Al₂O₃ - ZrO₂.

Os valores obtidos para os compósitos cerâmicos de alumina - zircônia mostraram um aumento máximo da tensão de ruptura da matriz para cerâmica com 18 % (em peso) de ZrO₂.

O módulo de Weibull (m), que representa o espalhamento das tensões de fratura apresentou o valor maior para a composição A. Isto significa que a composição A apresentou o menor espalhamento dos valores de tensão de fratura, porém, é a composição que obteve o menor valor médio deste parâmetro de propriedade mecânica.

Tabela 4.4 - Valores de tensão de fratura para as cerâmicas sinterizadas em 1600°C.

| COMPÓSITO CERÂMICO | A (15 % ZrO ₂) | B (18 % ZrO ₂) | C (20 % ZrO ₂) |
|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Tensão de fratura - σ (MPa) | 401 | 439 | 410 |
| Desvio padrão (MPa) | 46 | 52 | 45 |
| $\sigma_{50\%}$ (MPa) | 398 | 452 | 410 |
| Módulo de Weibull - m | 10,1 | 7,4 | 6,1 |

As cerâmicas 2 (retangulares) que foram compactadas com pressão uniaxial de 60 MPa e sinterizadas em 1600°C, foram submetidas ao ensaio de flexão em 4 pontos, utilizando-se três amostras de cada composição. Os valores obtidos para os compósitos de alumina - zircônia para essas amostras mostraram melhor desempenho na composição B. Na composição A ocorreu uma redução drástica na resistência à fratura, inviabilizando sua aplicação no ensaio balístico. Todas as composições destas cerâmicas mostraram um decréscimo no valor da tensão de fratura em relação às cerâmicas 1.

A redução dos valores das propriedades mecânicas para estas amostras é justificada pelo fato de não terem sido compactadas por prensagem isostática. Este fator influenciou o empacotamento das partículas do pó, resultando em um grau menor de densificação durante a sinterização. Outro fator que pode ter influenciado é fato das cerâmicas 2 serem cerâmicas bem maiores que as cerâmicas 1, o que aumenta a probabilidade de aparecerem imperfeições e trincas nas cerâmicas sinterizadas.

A utilização de apenas três cerâmicas para este ensaio mostrou não ser confiável para a comprovação dos resultados, por isso não foram apresentados.

4.11 Dureza superficial das cerâmicas sinterizadas

A Figura 4.15 apresenta as imagens das indentações realizadas com o uso de um microdurômetro Digital FM-700 do Laboratório de Caracterização de Materiais da Vale Soluções em Energia - VSE, nas três composições (A, B e C), aplicando-se carga de 1000 gf, valor máximo do microdurômetro e que não foi capaz de gerar trincas. Por esta razão foi necessário realizar outro ensaio de dureza utilizando outro equipamento com capacidade de aplicação de carga maior. Portanto, foi realizado ensaio de dureza no durômetro da marca Instron do AMR/IAE/DCTA. Os valores de dureza obtidos em ambos equipamentos foram semelhantes.

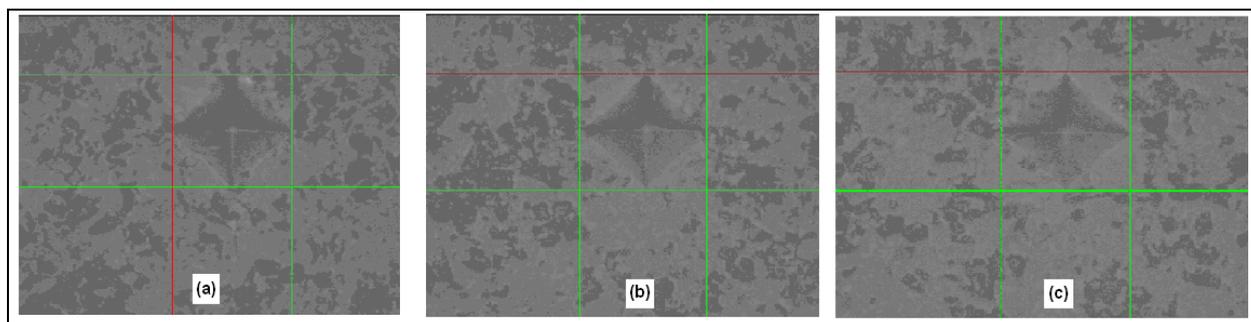


Figura 4.15 - Imagens obtidas do microdurômetro Digital FM-700 da VSE: (a) Composição A, (b) Composição B e (c) Composição C.

A Tabela 4.5 apresenta os valores das durezas *Vickers* obtidas no durômetro Instron do AMR com aplicação de carga de 20 kgf. Foram realizadas 5 indentações em cada amostra: A, B e C. Estes valores serão utilizados no cálculo da tenacidade à fratura por indentação *Vickers*.

Tabela 4.5 - Valores de dureza *Vickers* das cerâmicas produzidas para o ensaio de flexão sinterizadas em 1600 °C.

| CERÂMICA | A (15 % ZrO ₂) | B (18 % ZrO ₂) | C (20 % ZrO ₂) |
|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Hv (GPa) | 15,02 | 15,98 | 16,42 |
| Desvio padrão (GPa) | 0,62 | 0,66 | 0,65 |

4.12 Tenacidade à fratura

Os valores de tenacidade à fratura (K_{IC}) foram obtidos pelo cálculo da média de cinco medições em cada composição da cerâmica 1. Para obtenção de trincas visíveis foi necessária aplicação de carga de 20 kgf. Outros valores de carga menores foram testados sem gerar trincas visíveis. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.6 e apresentam os valores obtidos pelo uso de duas equações distintas, entretanto, os valores são bastante próximos. O valor do módulo de elasticidade utilizado na Equação 2 foi de 310 GPa. Os valores de tenacidade à fratura apresentaram-se altos, por isso foi utilizada uma segunda equação para comprovação dos valores. O valor da tenacidade à fratura foi alto pelo fato da carga para geração das trincas ter sido elevada.

Tabela 4.6 - Valores de tenacidade à fratura das cerâmicas sinterizadas em 1600 °C.

| CERÂMICA | A | B | C |
|---|-------|-------|-------|
| 1. $K_{IC} = \frac{0,0726 \cdot F_a}{C^{3/2}}$ (MPa.m ^{1/2}) | 11,60 | 12,22 | 12,77 |
| Desvio padrão (MPa.m ^{1/2}) | 1,83 | 1,77 | 1,84 |
| 2. $K_{IC} = 0,036 \cdot E^{0,4} \cdot F_a^{0,6} \cdot a^{-0,7} \cdot (c/a)^{-1,5}$ (MPa.m ^{1/2}) | 11,07 | 11,92 | 12,62 |
| Desvio padrão (MPa.m ^{1/2}) | 2,07 | 1,57 | 1,72 |

As Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 apresentam as imagens das superfícies que foram indentadas com penetrador Vickers com carga de 20 kgf para a geração de trincas. Para melhor visualização e precisão na medição dos comprimentos das trincas foi utilizado o microscópio Olympus BX51M da VSE com aumento de 200 vezes. O posicionamento das extremidades das trincas foi realizado manualmente, entretanto o equipamento fornece os comprimentos destas.

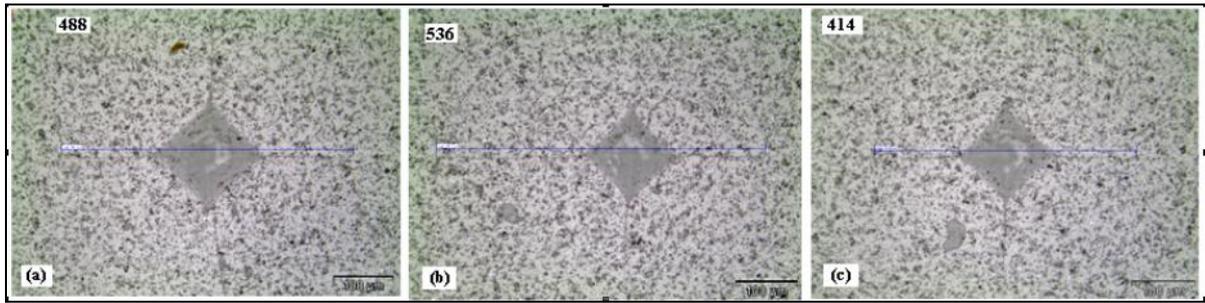


Figura 4.16 - Imagens obtidas por microscopia ótica mostrando as trincas geradas pela penetração *Vickers* em 3 regiões na cerâmica da composição A.

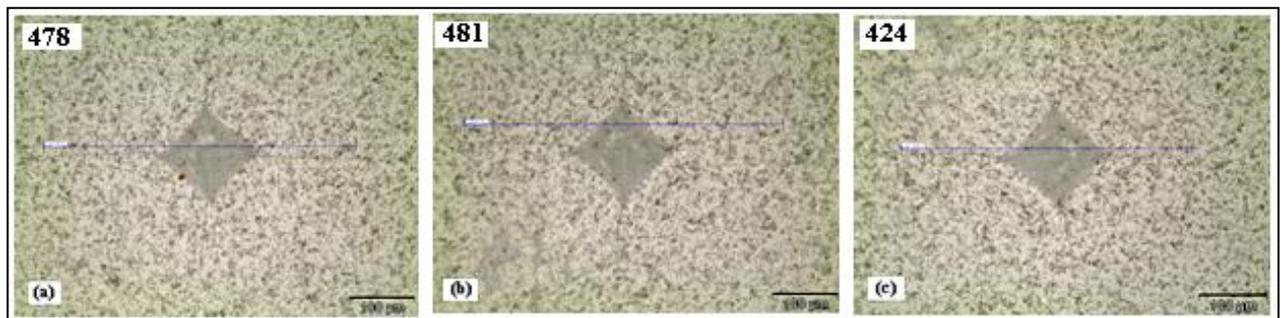


Figura 4.17 - Imagens obtidas por microscopia ótica mostrando as trincas geradas pela penetração *Vickers* em 3 regiões na cerâmica da composição B.

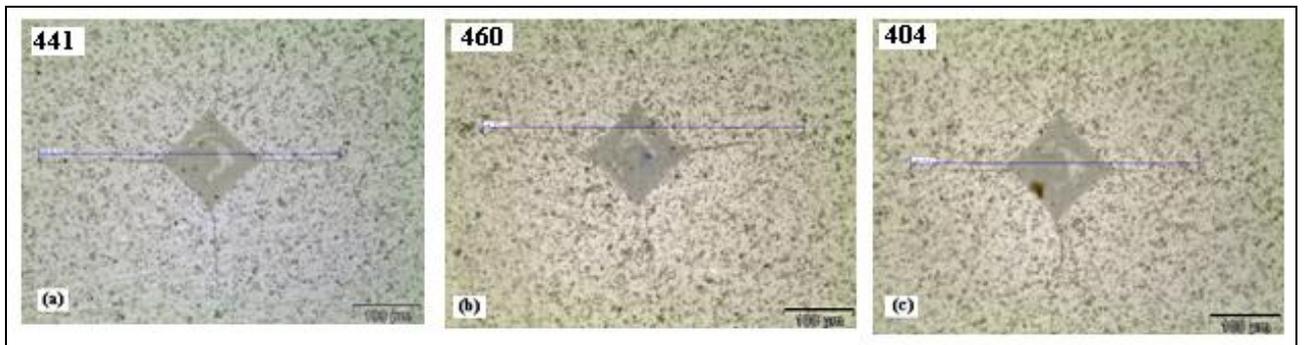


Figura 4.18 - Imagens obtidas por microscopia ótica mostrando as trincas geradas pela penetração *Vickers* em 3 regiões na cerâmica da composição C.

4.13 Absorção de energia do painel sanduíche-colméia e chapa de aço inox Aisi 304

Através do ensaio de queda de 12 m foi construída a curva experimental de absorção de energia de impacto do painel sanduíche-colméia de 61,5 mm de espessura. Os pesos foram posicionados dentro de um tubo de PVC de 4” de diâmetro e soltos da altura de 12 m conforme apresentado no item 3.8.1. Os pesos utilizados foram barras de aço com diâmetro de 32 mm de comprimentos variados.

O valor máximo de absorção de energia cinética deste painel, sem considerar a deformação da chapa de alumínio da face inferior ao impacto, foi de 240 J, o valor máximo ideal considera uma deformação de 70 %, que equivale a 222 J. Este dado será útil para avaliar o grau de absorção de energia cinética no ensaio balístico. A Figura 4.19 mostra a deformação do painel sanduíche-colméia ocasionado pelo impacto de um peso de diâmetro de 32 mm em queda livre na altura de 12 m, onde pode ser visto o diâmetro da barra e o diâmetro de deformação da chapa (\varnothing 80 mm). O painel sanduíche-colméia é formado por duas chapas de face coladas a uma colméia que fica do lado interno. Esta explicação visa elucidar os comentários seguintes.

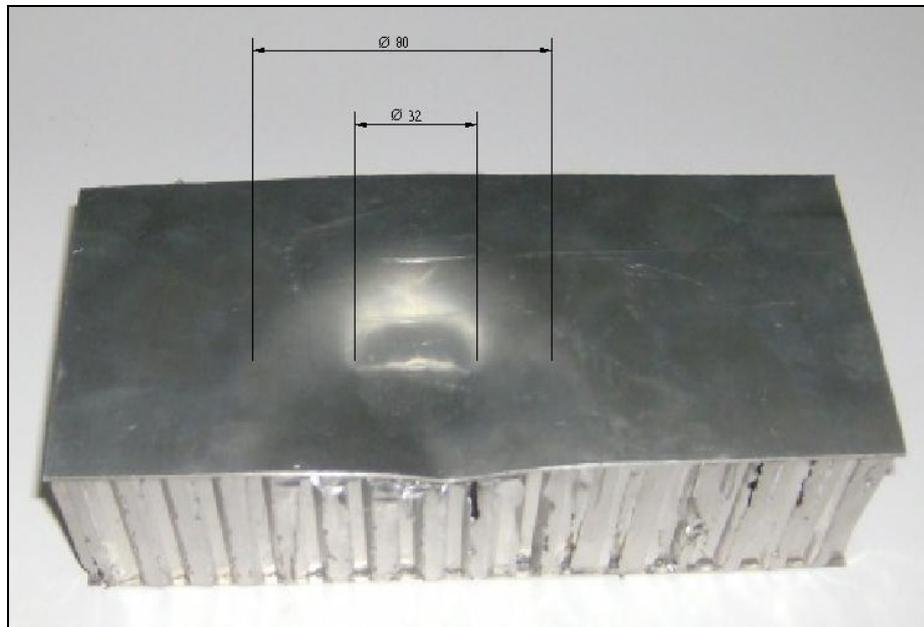


Figura 4.19 – Deformação do painel sanduíche-colméia após impacto de um peso.

A Figura 4.20 apresenta a curva da energia absorvida em função da deformação causada pelo impacto dos pesos sobre o painel sanduíche-colméia de espessura 61,5 mm. Esta curva foi obtida através de uma série de impactos sobre os painéis utilizando o ensaio de queda de 12 m. O resultado dos impactos mostrou que quando ocorre até 20 % de deformação na espessura total do

painel sanduíche-colméia, tanto a chapa de alumínio superior do painel quanto a colméia interna exercem resistência ao deslocamento do peso de forma linear. A partir deste valor a chapa de alumínio começa a se romper e o ângulo de inclinação da curva começa a diminuir até aproximadamente 45 % de deformação, ponto em que a chapa se rompe totalmente e a resistência mecânica ao deslocamento do peso é efetuada somente pela colméia, através da dobra sobre a dobra da colméia.

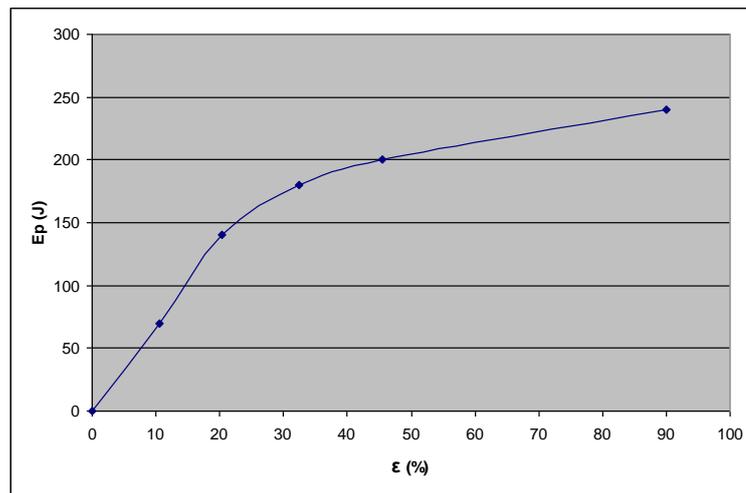


Figura 4.20 – Curva de absorção de energia de impacto no painel sanduíche-colméia.

A energia de absorção teórica calculada no item 3.8.1 apresentou o valor de 214 J, para uma deformação de 70 % da espessura total do painel sanduíche-colméia. O valor da energia de absorção do painel sanduíche-colméia testado no ensaio de 12 metros obteve o valor de 222 J para a deformação de 70%, uma variação de apenas 3,7 %.

Para auxiliar no projeto da configuração das blindagens mistas foi realizada uma série de impactos sobre as chapas de aço inox AISI 304 na espessura de 1,5 mm utilizando o ensaio de queda de 12 m, cujo resultado da energia absorvida é apresentado na Figura 4.21.

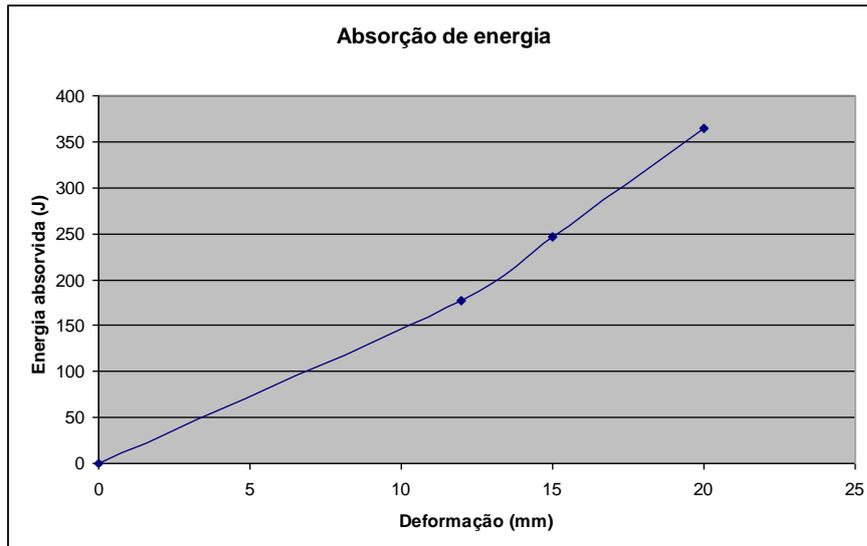


Figura 4.21 – Curva de absorção de energia de impacto em uma chapa de aço inox 304 com espessura de 1,5 mm.

A curva de absorção de energia da chapa de aço inox AISI 304 ficou muito próxima de uma reta inclinada. O limite de absorção de energia desta chapa não foi atingido, seriam necessários mais alguns pontos superiores até ocorrer a ruptura da chapa.

A Figura 4.22 ilustra a representação da deformação F ocorrida na chapa de aço inox AISI 304 de espessura de 1,5 mm após o impacto de uma barra com diâmetro de 32 mm no ensaio de queda de 12 m.

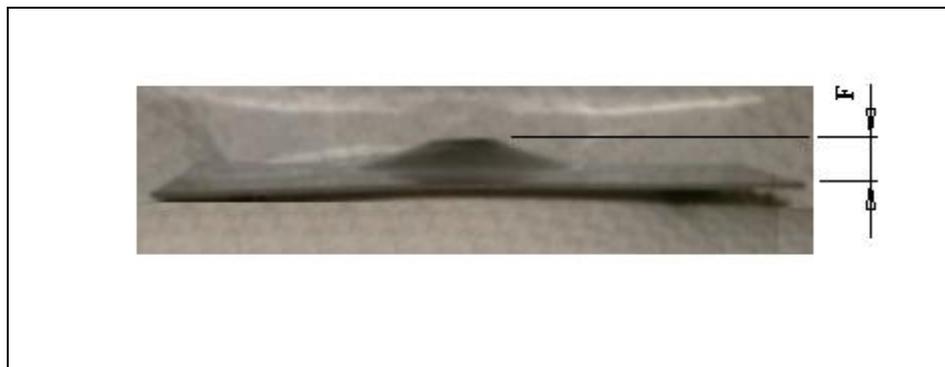


Figura 4.22 – Amostra de chapa de aço inox após impacto no ensaio de queda de 12 m.

4.14 Densidade de área dos materiais e das blindagens mistas

A densidade de área (d_a) dos materiais está classificada conforme a utilização nas blindagens mistas e as cerâmicas estão divididas nas três composições A, B e C.

Blindagem mista 1:

- Pastilha retangular (cerâmica 2)

Dimensões: 95 × 21 × 8,5 mm

d_a A: 33,4 kg/m² d_a B: 34,2 kg/m² d_a C: 34,9 kg/m²

- Painel sanduíche-colméia de alumínio

Dimensões: 210 × 170 × 61,6 mm

d_a : 8,4 kg/m²

Blindagem mista 2:

- pastilha cilíndrica (cerâmica 4)

Dimensões: 51 (diâmetro) x 6,5 mm (espessura)

d_a A: 25,4 kg/m² d_a B: 25,9 kg/m² d_a C: 26,3 kg/m²

- Placa de aço inox AISI 304

Dimensões: 200 × 200 × 1 mm

d_s : 7,9 kg/m²

- Painel sanduíche-colméia de alumínio

Dimensões: 200 × 200 × 20 mm

d_a : 2,5 kg/m²

Blindagem mista 3:

- pastilha cilíndrica (cerâmica 3)

Dimensões: 51 (diâmetro) x 11,3 mm (espessura)

d_a A: 44,2 kg/m² d_a B: 45,1 kg/m² d_a C: 45,8 kg/m²

- Placa de aço inox AISI 304 com espessura de 1,5 mm.

d_a : 11,8 kg/m²

A Tabela 4.7 mostra os valores de densidade de área de todas as blindagens desenvolvidas neste projeto, o valor contempla as blindagens completas com as bases e cerâmicas nas composições A, B e C.

Tabela 4.7 – Valores de densidade superficial das blindagens mistas.

| DENSIDADE DE ÁREA DAS BLINDAGENS MISTAS | | | | | | | | |
|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| BLINDAGEM 1 | | | BLINDAGEM 2 | | | BLINDAGEM 3 | | |
| Cerâmica A | Cerâmica B | Cerâmica C | Cerâmica A | Cerâmica B | Cerâmica C | Cerâmica A | Cerâmica B | Cerâmica C |
| 41,8 (kg/m ²) | 42,6 (kg/m ²) | 43,3 (kg/m ²) | 35,8 (kg/m ²) | 36,3 (kg/m ²) | 37,0 (kg/m ²) | 56,0 (kg/m ²) | 56,9 (kg/m ²) | 57,6 (kg/m ²) |

O menor valor de densidade de área foi obtida pela blindagem mista 2, que foi submetida aos mesmos níveis balísticos da blindagem mista 1. Considerando o critério de densidade de área a blindagem 2 é mais eficiente que a blindagem 1 em 17 %. A blindagem mista 3 (nível III) embora tenha a maior densidade de área entre as blindagens, tem eficiência (energia cinética/densidade de área) superior à blindagem mista 2 (nível IIIA), pois o nível balístico III tem energia cinética de 3.405 J e o nível IIIA 1405 J. A 4.8 apresenta a razão entre a energia cinética relativa ao nível do ensaio balístico e a densidade de área das blindagens mistas 1, 2 e 3. Este valor mostra a eficiência balística da blindagem em relação a uma mesma densidade de área, o melhor resultado obtido foi da blindagem 3.

Tabela 4.8 – Valores da razão entre a energia cinética e a densidade de área das blindagens mistas.

| RAZÃO - E_c / Densidade de área | | |
|---|-------------------|-------------------|
| Blindagem mista 1 | Blindagem mista 2 | Blindagem mista 3 |
| 33 | 39 | 60 |

4.15 Ensaio balístico

O ensaio balístico foi realizado na empresa BCA Ballistic Protection. Os ensaios foram realizados atendendo às especificações da Norma NBR 15000, nos níveis III e IIIA, conforme a tabela balística apresentada na Figura 3.10 do item 3.8.3.

Blindagem mista 1:

Foram realizados impactos com projéteis 9 mm FMJ e .44 Magnum na blindagem mista 1 com os compósitos cerâmicos de alumina-zircônia das composições B e C. Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 4.9 e mostram que os painéis com as cerâmicas de composição B e C suportaram os impactos, não ocorrendo perfuração completa, quando foram utilizados projéteis do tipo 9 mm. No entanto, para o impacto do projétil do tipo .44 Magnum, ocorreu perfuração completa dos painéis sanduíche-colméia, para ambas as cerâmicas.

Tabela 4.9 – Resultado dos ensaios balísticos realizados na blindagem mista 1.

| CERÂMICA | PROJÉTILO | DISTÂNCIA | VELOCIDADE | MASSA | E_C | LAUDO |
|----------|------------|-----------|------------|-------|-------|-------|
| A | | A (m) | E (m/s) | (g) | (J) | O |
| B1 | 9 mm FMJ | 5 | 412 | 8 | 679 | PP |
| C1 | 9 mm FMJ | 5 | 420 | 8 | 706 | PP |
| B2 | .44 Magnum | 5 | 420 | 15,6 | 1376 | PC |
| C2 | .44 Magnum | 5 | 425 | 15,6 | 1409 | PC |

A Figura 4.23 mostra a perfuração parcial do projétil 9 mm FMJ nos tecidos de aramida e o estilhaçamento da cerâmica da composição B sem que ocorresse a perfuração da chapa inferior do painel sanduíche-colméia da blindagem mista 1.

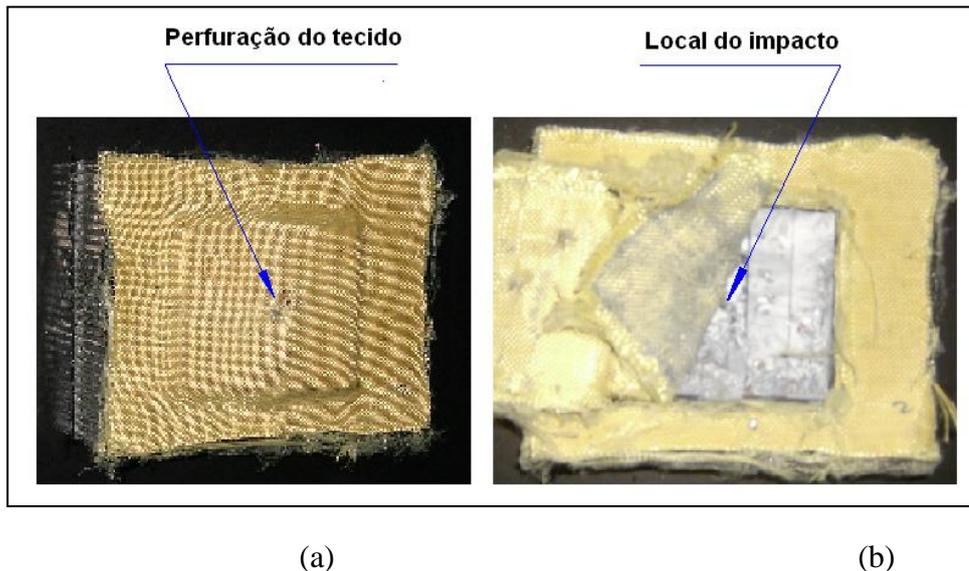


Figura 4.23 – Ensaio da blindagem mista 1, impactada por projétil 9 mm FMJ: (a) vista do tecido de aramida perfurado e (b) vista da cerâmica B impactada sob o tecido.

Os estilhaços do projétil e da cerâmica do ensaio da blindagem mista 1 apresentado acima foram coletados e são mostrados na Figura 4.24. O projétil e a cerâmica se fragmentaram totalmente.

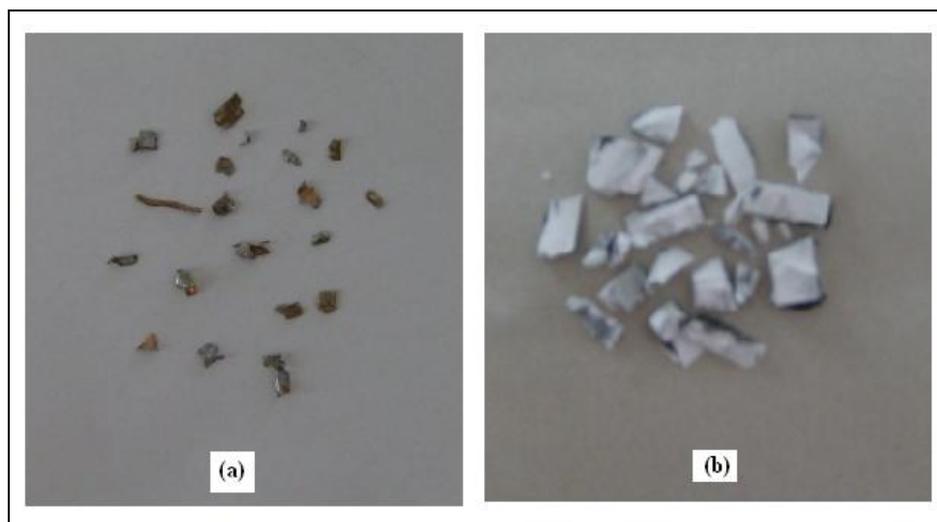


Figura 4.24 – Imagens mostrando os estilhaços resultantes dos impactos na blindagem mista 1: (a) do projétil 9 mm FMJ e (b) da cerâmica B impactada pelo projétil 9 mm FMJ.

Após a retirada dos fragmentos das cerâmicas nas amostras impactadas (9 mm FMJ) foi possível realizar a medição da profundidade e do diâmetro da deformação ocorrida no painel sanduíche-colméia de 61,5 mm de espessura, cujos valores são mostrados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Valores de deformação do painel sanduíche-colméia e absorção da energia cinética, resultante do impacto de projétil 9 mm FMJ.

| DEFORMAÇÃO E ABSORÇÃO DE ENERGIA CINÉTICA | | | | | |
|--|---------------|--|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| CERÂMICA | F (mm) | ÁREA DEFORMADA (cm²) | E_{ab} painel (J) | E_{ab} cerâmica (J) | E_{ab} colméia (%) |
| B | 13 | 8,7 | 140 | 539 | 26 |
| C | 14 | 9 | 150 | 556 | 27 |

Onde: F é a profundidade da deformação.

A profundidade da deformação (F) da chapa superior do painel sanduíche-colméia no ensaio do projétil 9 mm FMJ apresentou valor alto. Nas amostras foi observado um início de ruptura da chapa superior, o que explica o fato do ensaio com o projétil .44 Magnum ter ocorrido penetração completa. A energia absorvida pelo painel sanduíche-colméia do impacto do projétil 9 mm foi de 140 J para a amostra B e 150 J para a amostra C, a energia cinética de impacto do projétil foi da ordem de 700 J.

A energia cinética do impacto do projétil .44 Magnum é quase 100 % superior ao do projétil 9 mm FMJ, entretanto, o valor máximo de absorção do painel sanduíche-colméia é da

ordem de 240 J, ou seja, apenas 70 % superior ao obtido no ensaio e seria necessário 100%. Portanto, no caso do ensaio balístico com projétil .44 Magnum ocorreu a falha da base, que não suportou os esforços iniciais de compressão da cerâmica.

A Figura 4.25 apresenta o resultado do ensaio realizado na blindagem mista 1 com cerâmicas na composição C impactadas pelo projétil .44 Magnum. Neste ensaio ocorreu a penetração completa do painel sanduíche-colméia de 61,5 mm de espessura.



(a)

(b)

Figura 4.25 – Ensaio da blindagem 1, impactadas por projétil .44 Magnum: (a) vista do impacto frontal e (b) vista traseira da placa.

Blindagem mista 2:

A Figura 4.26 apresenta a blindagem mista 2 com painel sanduíche-colméia com espessura de 20 mm, que foi reforçada com uma chapa de aço inox AISI 304 com espessura de 1 mm e sobre a chapa de aço uma cerâmica cilíndrica de espessura de 6,5 mm nas composições B e C.

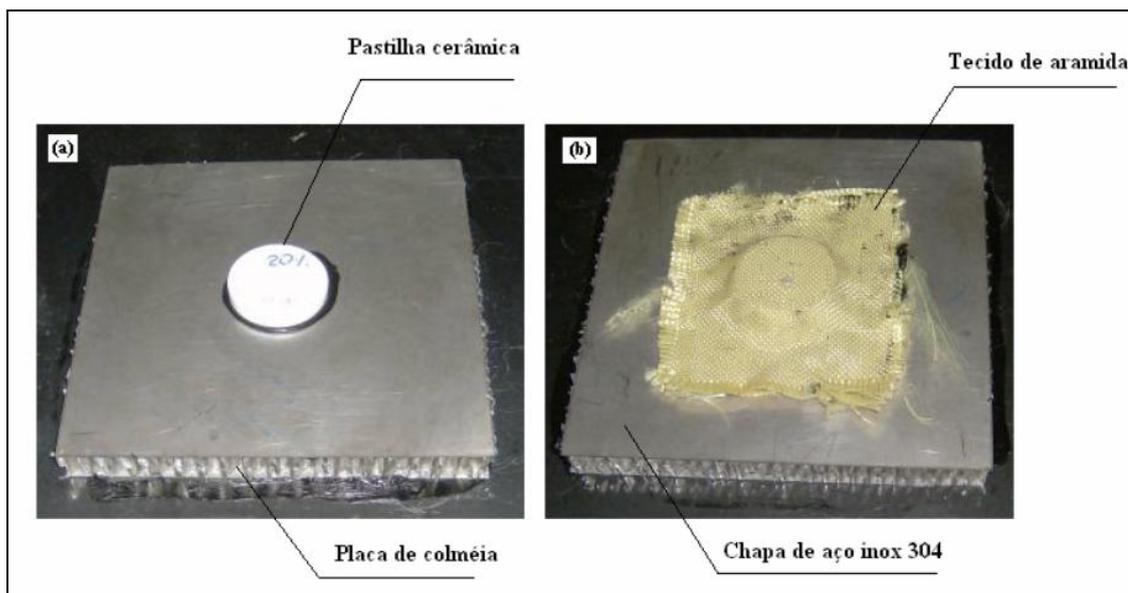


Figura 4.26 – Configuração da blindagem mista 2 para projétil .357 e .44 Magnum: (a) sem o tecido aramida e (b) após a colagem completa.

O objetivo desta blindagem foi resistir ao impacto de um projétil .357 e do projétil .44 Magnum, que apresentam energia cinética de 921 J e 1405,5 J respectivamente.

Foram realizados impactos com projéteis .357 Magnum e .44 Magnum na blindagem mista 2 com as cerâmicas das composições B e C. Os resultados apresentados na Tabela 4.11 mostraram que as blindagens mistas 2 com cerâmicas da composição B e C resistiram ao impacto do projétil .357 Magnum, não ocorrendo perfuração completa. No entanto, para o impacto do projétil .44 Magnum, ocorreu perfuração completa dos painéis sanduíche-colméia, para ambas as cerâmicas.

Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios balísticos realizados na blindagem mista 2.

| Amostra | Projétil | Distância (m) | Velocidade (m/s) | Massa (g) | E_c (J) | Laudo |
|---------|------------|---------------|------------------|-----------|-----------|-------|
| B1 | .357Magnum | 5 | 425 | 10,2 | 921 | PP |
| C1 | .357Magnum | 5 | 426 | 10,2 | 925 | PP |
| B2 | .44 Magnum | 5 | 428 | 15,6 | 1429 | PC |
| C2 | .44 Magnum | 5 | 427 | 15,6 | 1422 | PC |

A Figura 4.27 apresenta duas blindagens mistas 2 após serem impactadas pelo projétil .44 Magnum.

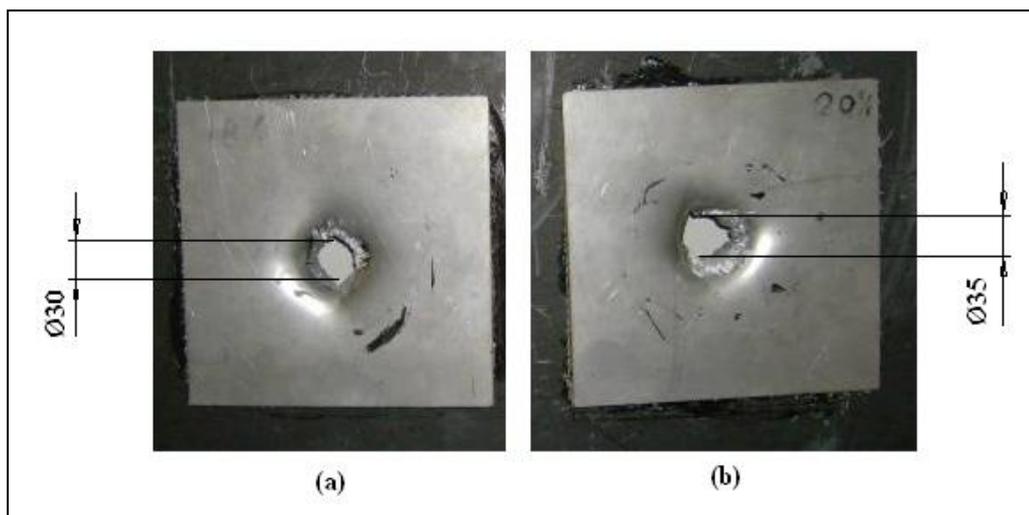


Figura 4.27 – Chapas frontais após impacto do projétil .44 Magnum na blindagem mista 2: (a) blindagem com cerâmica de composição B e (b) blindagem com cerâmica de composição C.

As cerâmicas estilhaçadas foram removidas para melhorar a visualização dos furos das chapas, gerados pela penetração completa do projétil. A chapa de aço inox, com a cerâmica B1, apresentou um furo menor (30 mm de diâmetro) do que a chapa com a cerâmica C1 (35 mm de diâmetro).

A força estática necessária para causar o cisalhamento das chapas considerando que ocorreu cisalhamento puro é de:

$$F_c = \tau_c \cdot A$$

Onde:

F_c : força de cisalhamento (N)

τ_c = tensão de cisalhamento (MPa)

A: área sujeita ao cisalhamento (m²)

$$\tau_c = 0,6 \cdot 935 = 561 \text{ MPa}$$

$$A_B (30 \text{ mm}) = 94,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$A_C (35 \text{ mm}) = 110,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$F_{c(B)} = 52.846 \text{ N}$$

$$F_{c(C)} = 61.710 \text{ N}$$

A diferença das forças capazes de causar o cisalhamento das chapas, entre a composição B e C foi da ordem de 17 %. A cerâmica que absorveu maior energia de impacto, descarregou uma carga inferior sobre a base, por isso a cerâmica da composição B apresenta um desempenho balístico levemente superior ao da cerâmica da composição C.

A Figura 4.28 apresenta a imagem do painel sanduíche-colméia da blindagem mista 1 e da blindagem mista 2 após o impacto do projétil .44 Magnum que ocasionou a penetração completa em ambas as blindagens. O painel sanduíche-colméia da blindagem mista 1 após o impacto se rompeu e apresentou um furo de 65 mm e o painel sanduíche-colméia da blindagem mista 2 apresentou um furo de 35 mm. A blindagem mista 2 teve um desempenho balístico superior ao da blindagem mista 1, em função do painel sanduíche-colméia ter se rompido com um furo bem menor.

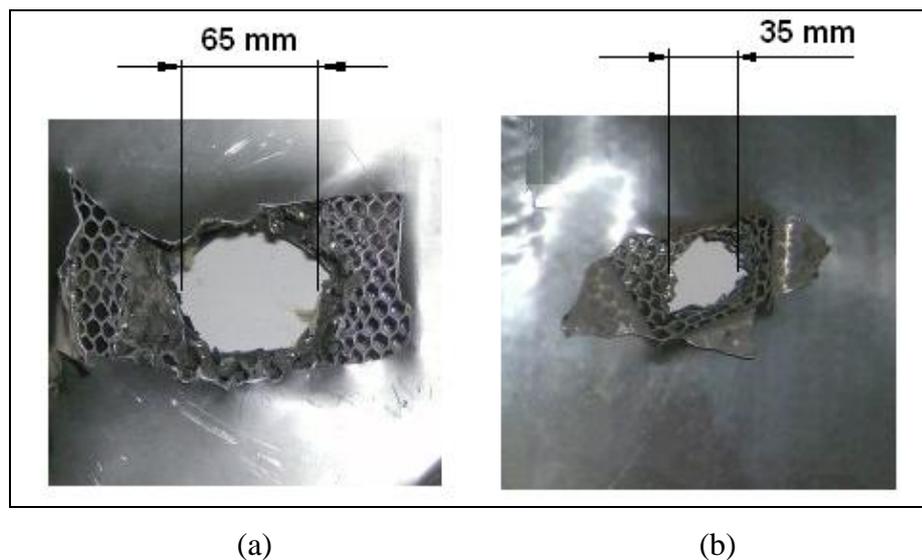
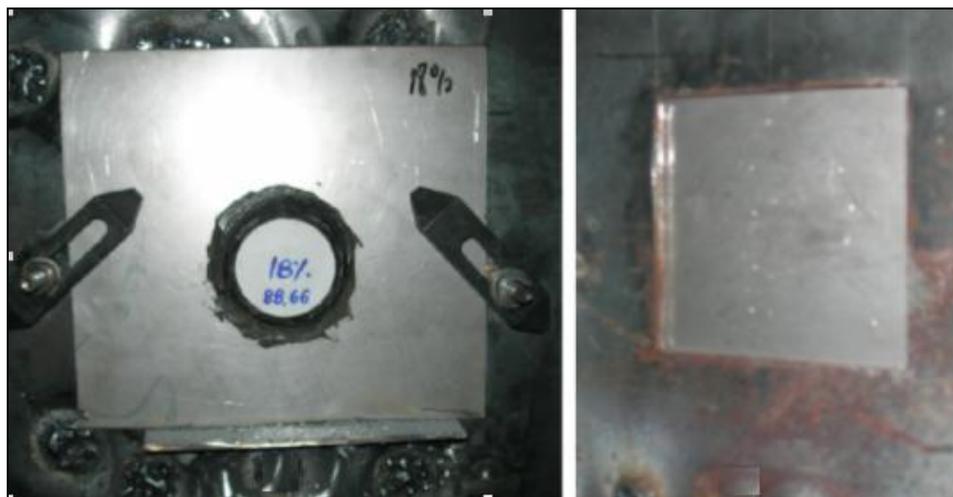


Figura 4.28 – Painéis traseiros após impacto do projétil .44 Magnum com penetração completa: (a) blindagem mista 1 e (b) blindagem mista 2.

Blindagem mista 3:

A Figura 4.29 apresenta o esquema de montagem da blindagem mista 3 com a cerâmica cilíndrica da composição B, sobre a placa de aço inox AISI 304 com espessura de 1,5 mm para o ensaio balístico do projétil 7,62×51 FMJ que apresenta energia cinética de 3.406 J .

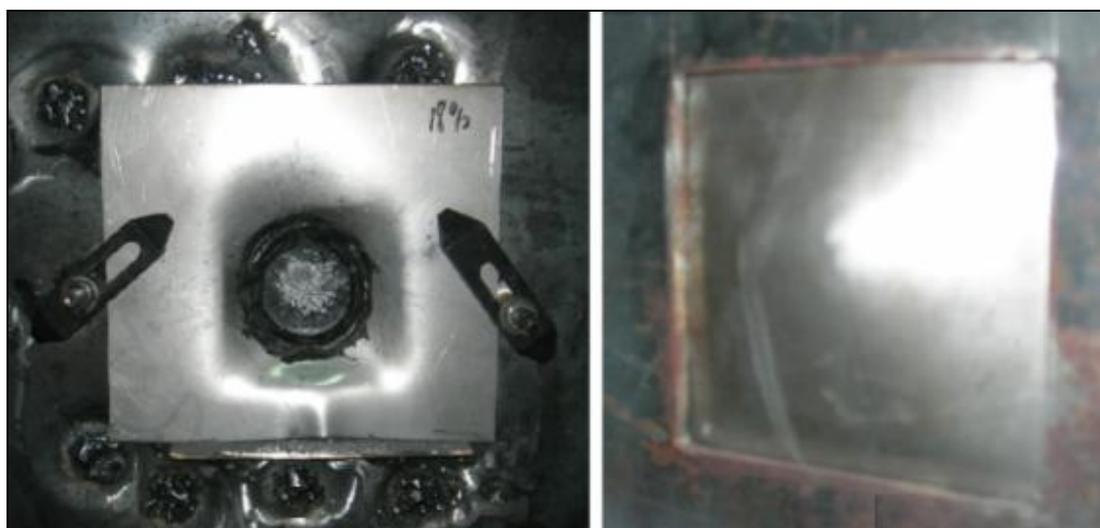


(a)

(b)

Figura 4.29 – Montagem da blindagem mista 3 com cerâmica de composição B para o ensaio balístico com projétil 7,62×51 FMJ: a) vista frontal, mostrando a cerâmica e b) vista traseira.

A Figura 4.30 apresenta a cerâmica de composição B após sofrer o impacto do projétil 7,62 × 51 FMJ, mostrando que a blindagem suportou os esforços do impacto e não houve perfuração completa da chapa de aço inox AISI 304. A cerâmica foi responsável por absorver a maior parte da energia cinética enquanto que a chapa de aço inox absorveu a energia restante através da sua deformação.



(a)

(b)

Figura 4.30 – Ensaio da blindagem mista 3 com cerâmica de composição B: (a) impacto frontal do projétil 7,62 × 51 FMJ e (b) vista traseira da chapa deformada.

A Figura 4.31 apresenta a blindagem mista 3 com cerâmica de composição C após ser impactada pelo projétil $7,62 \times 51$ FMJ, mostrando que a blindagem suportou os esforços do impacto e não houve perfuração completa da chapa de aço inox AISI 304.

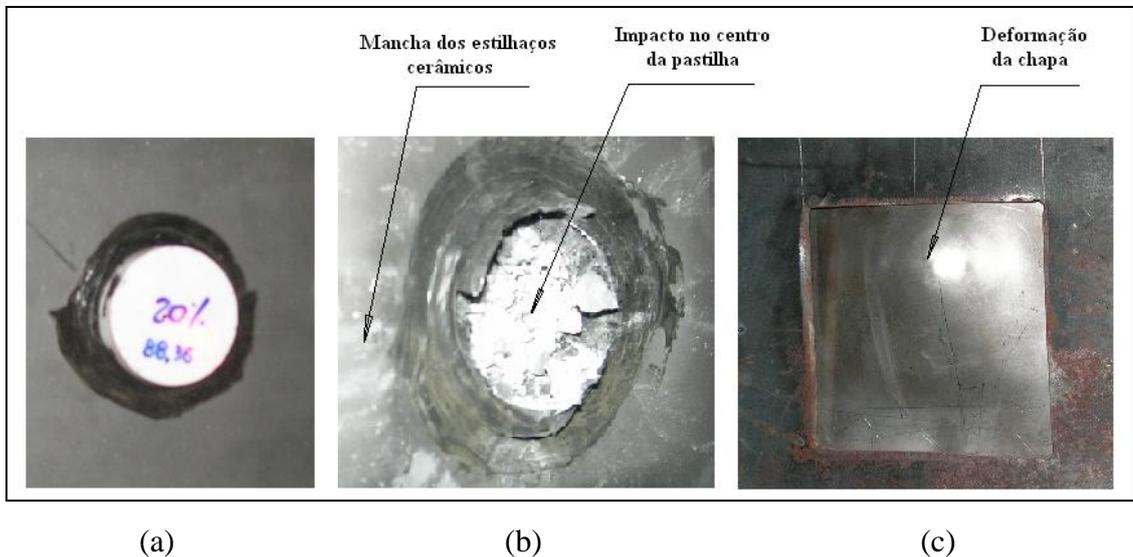


Figura 4.31 – Ensaio da blindagem mista 3 com cerâmica de composição C: (a) vista frontal antes do impacto, (b) vista frontal após impacto do projétil $7,62 \times 51$ FMJ e (c) vista traseira da chapa deformada.

A Figura 4.32 apresenta outra cerâmica de composição C que sofreu impacto do projétil $7,62 \times 51$ FMJ numa velocidade superior à da primeira apresentada na Figura 4.30, sendo que o impacto do projétil foi deslocado do centro da pastilha. A blindagem suportou os esforços mecânicos, não ocorreu a perfuração completa da chapa de aço inox AISI 304. Entretanto, é possível observar uma trinca pequena, indicando o início da ruptura da chapa conforme mostrado na Figura 4.31 (c).

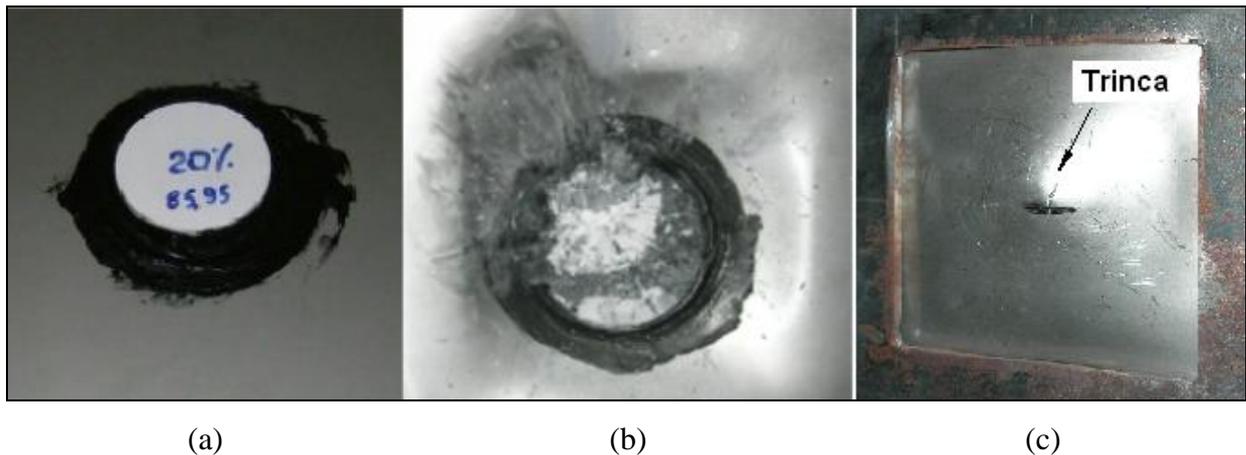


Figura 4.32 – Ensaio da segunda blindagem mista 3 com cerâmica de composição C: (a) vista frontal antes do impacto, (b) vista frontal após impacto do projétil 7,62 × 51 FMJ e (c) vista traseira da chapa com uma trinca.

A Tabela 4.12 apresenta o resultado dos ensaios da blindagem mista 3 que foi submetida ao impacto do projétil 7,62 × 51 FMJ, foi um total de quatro impactos, sendo dois na blindagem mista com cerâmica de composição B e dois de composição C. As cerâmicas se fragmentaram totalmente em todas as blindagens mistas 3, entretanto a base suportou os esforços dos impactos e não ocorreu a penetração completa.

Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios balísticos da blindagem mista 3 conforme nível III da norma NBR 15000.

| BLINDAGEM MISTA 3 | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------------|--------------|
| CERÂMICA/ ENSAIO | PROJÉTIL | DISTÂNCIA (m) | VELOCIDADE (m/s) | MASSA (g) | E_c (J) | LAUDO |
| B1 | 7,62 x 51 FMJ | 15 | 833 | 9,7 | 3365 | PP |
| B2 | 7,62 x 51 FMJ | 15 | 835 | 9,7 | 3382 | PP |
| C1 | 7,62 x 51 FMJ | 15 | 833 | 9,7 | 3365 | PP |
| C2 | 7,62 x 51 FMJ | 15 | 840 | 9,7 | 3422 | PP |

A Tabela 4.13 apresenta o resultado das profundidades das deformações das chapas de aço inox AISI 304 com espessura de 1,5 mm que foram impactadas pelo projétil 7,62 × 51 FMJ. Através do gráfico deformação x energia absorvida apresentado na Figura 4.21 foi determinada a energia absorvida pela chapa de aço inox e a partir deste valor foi determinado a absorção de energia relativa entre a chapa de aço inox e a cerâmica. A porcentagem de absorção de energia

cinética da chapa de aço inox AISI 304 foi da ordem de 10 % da energia cinética total do impacto.

Tabela 4.13 – Resultados de deformação da chapa de aço inox AISI 304 (1,5 mm) e valores de absorção da energia cinética das chapas e das cerâmicas dos impactos dos projéteis 7,62 × 51 FMJ.

| DEFORMAÇÃO E ABSORÇÃO DE ENERGIA CINÉTICA | | | | | |
|--|---------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Amostra | F (mm) | E_c impacto (J) | E_{ab} chapa inox (J) | E_{ab} cerâmica (J) | E_{ab} chapa Inox (%) |
| B1 | 18 | 3365 | 318 | 3047 | 9,4 |
| B2 | 19 | 3382 | 341 | 3041 | 10,0 |
| C1 | 18 | 3365 | 318 | 3047 | 9,4 |
| C2 | 20 | 3422 | 365 | 3057 | 10,6 |

A blindagem mista 3 suportou impactos com energia cinética superior a 3.000 J, a blindagem mista 2 não suportou impactos com energia cinética de 1400 J, ou seja, menos da metade da blindagem mista 3. A espessura da blindagem mista 3 é 11,3 mm de cerâmica e 1,5 mm de aço inox AISI 304, ou seja, total de 12,8 mm. A espessura da blindagem mista 2 é 6,5 mm de cerâmica e 1,0 mm de aço inox AISI 304 sem considerar o painel sanduíche-colméia, ou seja, total de 7,5 mm (sem o painel). A blindagem mista 3 suportou mais de 2,2 vezes a energia cinética que a blindagem mista 2, entretanto, a espessura foi apenas 1,7 vezes maior .

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

O compósito cerâmico de alumina - zircônia tetragonal apresentou-se como um material com potencial para a fabricação de uma blindagem mista capaz de proteger satélites contra impactos de meteoróides. A blindagem mista 2 estudada demonstrou ser uma solução mais adequada para aplicação em proteção de satélites contra impactos de meteoróides com energia cinética da ordem de 900 J.

A blindagem mista 3 mostrou excelente desempenho balístico e tem grande potencial para aplicação em proteção de satélites contra impactos de objetos espaciais com energia cinética superior a 3.000 J.

O painel sanduíche-colméia de alumínio é um material que garante montagem estrutural eficiente de satélites e tem um poder grande de absorção de impactos de corpos com densidade baixa. Entretanto, conforme foi observado nos ensaios balísticos apresentou resistência mecânica em compressão relativamente baixa, insuficiente para suportar os valores de energia cinética exigidos para a blindagem estudada.

Os compósitos cerâmicos de alumina-zircônia tetragonal que foram compactadas por prensagem uniaxial e isostática apresentaram valores de parâmetros propriedades mecânicas superiores àquelas compactadas por prensagem uniaxial somente.

Os parâmetros de propriedades mecânicas das cerâmicas investigados apresentaram valores muito próximos, o que era esperado, pois não houve grande variação na composição das misturas, ou seja, 15, 18 e 20 % de ZrO_2 (em peso) na matriz de alumina. Entretanto, o compósito cerâmico com a composição de 18 % de ZrO_2 (em peso) apresentou um desempenho superior nos ensaios balísticos.

Na blindagem mista contendo cerâmica e chapa de aço inox, o compósito cerâmico alumina-zircônia tetragonal foi responsável por 90 % da capacidade de absorção da energia cinética do impacto. Os estudos demonstraram que o aumento da espessura da cerâmica resultou em um aumento não linear de absorção de energia cinética.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1) Realizar de ensaios de impactos de energia alta utilizando um canhão de aceleração, com velocidades dos projéteis da ordem de 7.000 m/s;
- 2) Estudar materiais de densidade baixa para a aplicação como base, como por exemplo, a utilização de placa de compósito polímero – fibra de carbono;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GONÇALVES, D. P. **Análise e investigação de impactos em blindagem composta cerâmica / metal. 2000.** São José dos Campos, SP. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, 2000.
- [2] MATWEB MATERIAL PROPERTY DATA. **Alumina, alpha Al₂O₃, 99.5%.** Disponível em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=0654701067d147e88e8a38c646dda195> . Acesso em: 08 jan. 2011.
- [3] XAVIER, C.; COSTA, C. R. C. Study on mechanical behavior of alumina plates under ballistic impact. **Ceramic Brazilian Congress**, 28, p. 161 – 168, 1984.
- [4] EVANS, A. G. Engineering property requirements for high performance ceramics. **Mater. Sci. Eng.**, v.71, p. 2-3, 1995.
- [5] HIRSCHMANN, A. C. O. **Compósitos cerâmicos porosos de alumina -zircônia para aplicação em sistemas de controle térmico para satélites: obtenção e caracterização.** 140 p. (INPE-15324-TDI/1367). Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2008
- [6] BECK, H. **Estudo de cerâmicas de CeO₂ - ZrO₂ - Al₂O₃ consolidada por infiltração e sinterização na presença de vidro visando aplicações estruturadas.** 2006-02-24. 141 p. (INPE-14196-TDI/1098). Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2006. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/05.04.17.49>>. Acesso em: 02 maio 2011.
- [7] ASSIS, J. M. K. **Estudo comparativo de compósitos alumina-zircônia tetragonal e de cerâmicas de alumina aditivada com nióbia para aplicações estruturais.** 2007-02-26. 113 p. (INPE-15150-TDI/1282). Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/06.12.18.20>>. Acesso em: 02 maio 2011.

- [8] WILKINS, M. L. Mechanics of Penetration and Perforation. **Int. J. Eng. Sci.**, v. 16, p. 793-807, 1978.
- [9] INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE) **Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres – CBERS** – introdução - histórico . Disponível em: <http://www.cbbers.inpe.br/?content=orbital1e2e2b>> Acesso em: 23 nov. 2010.
- [10] B.G. COUR-PALAIS. **Meteoroid protection by multi-wall structures**. 1969. [S.l.]: AIAA Hypervelocity Impact Conference, AIAA Paper Number 69-372.
- [11] LEE, S. M. **International encyclopedia of composites**. New York, 1991. v. 6, p. 125-140.
- [12] MOH-9 Armour Ceramics. Disponível em: <<http://www.multotec.co.za/moh9.htm>> Acesso em: 20 dez. 2009.
- [13] BALLISTIC PROTECTION (BCA) . Tabela Balística – **NBR 15000** - Nível de proteção do sistema de blindagem quanto ao impacto balístico. Disponível em: http://www.bcatextil.com.br/portugues/tabela/tabela_1.pdf> Acesso em: 20 jan. 2011.
- [14] UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). **Origem dos meteoróides**. São Paulo. <http://www.cdcc.usp.br/cda/aprendendo-basico/sistema-solar/meteoroides>> Acesso em: 10 jan. 2011.
- [15] CHRISTIANSEN, E. L.; BERNHARD, R. P.; HARTSOUGH, N. Orbiter meteoroid/orbital debris impacts. **Advances in Space Research**, v.34, n. 5, p. 1097-1103, 2004, doi:10.1016/j.asr.2003.12.008 .
- [16] KERR, J. H. et al. Orbiter meteoroid/orbital debris impact damage analysis. Johnson Space Center, 2000. JSC-29136, STS-103.

- [17] CHRISTIANSEN, E. L.; BERNHARD, R.P.; HYDE, J. L.; KERR, J. H.; EDELSTEIN, K. S.; ORTEGA, J.; CREWS, J. L. Assessment of High Velocity Impacts on Exposed Space Shuttle Surfaces. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SPACE DEBRIS, 1., 1993, Darmstadt, Germany. **Proceedings...** Darmstadt: 1993. p. 447-452 (ESA SD-01).
- [18] LEVIN, G.; CHRISTIANSEN, E. L. The space shuttle program pre-flight meteoroid and orbital debris risk/damage predictions and post-flight damage assessments. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SPACE DEBRIS, 2., 1997, Darmstadt, Germany. **Proceedings...** Darmstadt: ESA, 1997. p. 633-636. (ESA SP-393).
- [19] Bernhard, R. P.; Christiansen, E. L.; Kessler, D. J. Orbital debris as detected on exposed spacecraft. **Int. J. Impact Eng.**, v. 20, p.111-120, 1997.
- [20] The NASA Johnson Space Center Hypervelocity Impact Technology Facility (HITF), web site, <http://hitf.jsc.nasa.gov/hitfpub/main/index.html>> Acesso em: 20 fev. 2010.
- [21] CREWS, J. L.; CHRISTIANSEN, E. L. **The NASA JSC HITF**. 1992. AIAA Paper No.92-1640.
- [22] CHRISTIANSEN, E. L. et al. Hypervelocity impact testing above 10 km/s of advanced orbital debris shields. In: CONFERENCE OF THE AMERICAN PHYSICAL SOCIETY TOPICAL GROUP ON SHOCK COMPRESSION OF CONDENSED MATTER, 1996, Houston. **Proceedings...** Houston: AIP , 1996. Part 2, p. 1183-1186.
- [23] SANCHEZ G.; CHRISTIANSEN, E. L. **FGB energy block meteoroid and orbital debris** . Houston: NASA Johnson Space Center, 1996. (M/OD) Shield Test Report.
- [24] SANCHEZ, G.A.; WESTBERRY, R.; CHRISTIANSEN, E. L. **International space station common module, node, and cupola windows meteoroid/debris development tests phase 1**. NASA Report No. JSC-27509, August 1998.
- [25] CHRISTIANSEN, E. L.; COUR-PALAIS, B. G.; FRIESEN, L. J. Extravehicular activity suit penetration resistance. **Int. J. Impact Eng.**, v. 23, p. 113-124, 1999.

- [26] CHRISTIANSEN, E.L.; CREWS, J. L.; WHITNEY J. P. Debris cloud ablation in gas-filled pressure vessels. **Int. J. Impact Eng.**, v. 20, p.173-184, 1997.
- [27] WHIPPLE, F. L. Meteorites and space travels. **Astronomical J.**, v.1161, p.131-135, 1947.
- [28] HexWeb® Honeycomb Energy Absorption Systems -Design Data. Disponível em: http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-sheets/Honeycomb_Energy_Absorption_Systems.pdf Acesso em: 05 jul 2010.
- [29] GARVIE, R. C.; HANNINK, R. H.; PASCOE, R. T. Ceramic Steel. **Nature**, v. 258, p. 703-704, 1975.
- [30] PEARSON, J., RINEHART, J. S. **Behavior of metals under impulsive loads**. Cleveland, Ohio: ASM, 1954.
- [31] WOODWARD, R.L. A simple one-dimensional approach to modeling ceramic composite armour defeat. **Int. J. Impact Eng.**, v. 9, n. 4, p. 455-474, 1990.
- [32] VIECHNICKI, D. J.; SLAVIN, M. J.; KLIMAN, M. I. Development and current status of armor ceramics. **Ceram Bull.**, v.70, n. 6, p. 1035-39, 1991.
- [33] MEDVEDOVSKI, E. Alumina ceramics for ballistic protection: Part 2. **Am. Ceram. Soc. Bull.**, v.81, n.4, p. 45-52, 2002.
- [34] TRESSLER, R. E. An assessment of low cost manufacturing technology for advanced structural ceramics and its impact on ceramic armor. In: J. W. McCAULEY et al. (Ed.) **Ceramic armor materials by design, ceramic transactions**. Ohio: The American Ceramic Society, 2002. V. 134, p. 451-462.
- [35] Ceramic armor protection. Disponível em: <http://www.coorstek.com/products/ceramic-armor.asp?gclid=COCq39TTmqgCFRIq7AodtFcvJA> Acesso em: 07 jul 2010.
- [36] STEVENS, R.; EVANS, A. G. Transformation toughening by polycrystalline zirconia. **Brit. Ceram. Trans. J.**, v. 83, p. 18-31, 1984.

- [37] MINEIRO, S. L. **Processamento e caracterização de cerâmicas de zircônia tetragonal policristalina estabilizada com mistura de óxidos de ítrio e de terras raras**. Dissertação de Mestrado. Lorena: FAENQUIL/DEMAR, 2000.
- [38] MINEIRO, S. L. **Processamento e caracterização física e mecânica de cerâmicas de zircônia-ítria total e parcialmente nanoestruturadas**. 2007. 196 p. (INPE-15156-TDI/1288). Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/12.07.12.32>>. Acesso em: 02 mai. 2011.
- [39] NONO, M. C. A. **Cerâmicas de zircônia tetragonal policristalina do sistema CeO₂-ZrO₂ (Ce-TZP)**. São José dos Campos, SP. Tese de Doutorado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), 1990.
- [40] GREEN, D. J. Critical microstructures for microcracking in Al₂O₃ – ZrO₂ composites. **J. Am. Ceram. Soc.**, v. 65, p. 610-614, 1982.
- [41] YOSHIMURA, M. Phase stability of zirconia. **Ceram. Bull.**, v. 67, n. 12, p. 1950-1955, 1988.
- [42] MIYOSHI, K.; FARMER, S. C.; SAIYR, A. Wear properties of two-phase Al₂O₃ / ZrO₂ (Y₂O₃) ceramics at temperatures from 296 to 1073 K. **Tribology Int.**, v. 38, p. 974-986, 2005.
- [43] RUHLE, M.; CLAUSEN, N.; HEVER, A. H. Transformation and microcrack toughening as complementary process in ZrO₂ toughened Al₂O₃. **J. Amer. Cer. Soc.**, v. 69, n. 3, p. 195-197, 1986.
- [44] EVANS, A. G.; FABER, K. T. Toughening of ceramics by circumferential microcracking. **J. Am. Ceram. Soc.**, v. 64, n.7, p. 394-398, 1981.
- [45] HART, L. D. **Alumina chemicals in science and technology handbook**. New York: The American Ceramic Society, 1990.

- [46] FISHER, G. R. et al. The eutetic and liquidus in the $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ system. **J. Mater. Sci.**, v. 16, p. 3447–3451, 1981.
- [47] MAZEROLLES, L.; MICHEL, D.; PORTIER, R. Interfaces in oriented $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ (Y_2O_3) eutectics. **J. Am. Ceram. Soc.**, v. 69, n. 3, 252-255, 1986.
- [48] LI, J. F.; WATANABE, R. Fracture toughness of Al_2O_3 – particle – dispersed Y_2O_3 – partially stabilised zirconia. **J. Am. Ceram. Soc.**, 78, 1079-1082, 1995.
- [49] RAO, P. G., et al. Preparation and mechanical properties of Al_2O_3 - 15 wt.% ZrO_2 composites. **Scripta Materialia**, v. 48, n. 4, p. 437-447, Feb. 2003.
- [50] LANGE, F. F. Transformation toughening, part 4 fabrication, fracture toughness and strength of $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ composites. **J. Mat. Sci.**, v. 17, n. p. 247–254, 1982.
- [51] BECHER, P. F. Transient thermal stress behavior in ZrO_2 – toughened Al_2O_3 . **J. Am. Ceram. Soc.**, v. 64, n. 1, p. 37–39, 1981.
- [52] ROUQUEROL, F.; ROUQUEROL, J.; SING, K. **Adsorption by powders and porous solids**. London: Academic Press, 1999.
- [53] CILAS LASER PARTICLE SIZE ANALYZERS - Fraunhofer theory. Disponível em: < <http://www.cilasus.com> >. Acesso em 16 dez. 2010.
- [54] WOOLFSON, M. M. **An introduction to X-ray crystallography**. 2. ed., Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [55] SCHNEIDER, S. J. (ed) **Ceramics and Glasses** - engineered materials handbook. v. 4, ASM International, 1991.
- [56] PIORINO, F. N.; FURLAM, J. P.; CUNHA, P. A.; MELLO, F. C. L.; CAIRO, C. A. A. Estudo comparativo para ensaios de tenacidade à fratura em cerâmicos de alto desempenho. **Cerâmica**, v. 36, n. 245, 1990.

- [57] WEIBULL, W. The phenomenon of rupture in solids. **Ingeniorsvetenskaps akademien handlingar**, v. 153, p. 1-55, 1939.
- [58] ANTON, R. J.; SUBHASH, G. Dynamic Vickers indentation of brittle materials. **Wear**, v. 239, p. 27-35, 2000.
- [59] CHANTIKUL, P., ANSTIS, G. R., LAWN, B. R., MARSHALL, D. B. A Critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness: II, strength method. **J. Am. Ceram. Soc.**, v. 64, n. 9, p. 539-543, 1981.
- [60] GOGOTSI, G. A. Mechanical behaviour of yttria- and ferric oxide-doped zirconia at different temperatures. **Ceram. Int.**, v. 24, p. 589-595, 1998.
- [61] CASELLAS, D.; RÀFOLS, I.; LLANES, L.; ANGLADA, M. Fracture toughness of zirconia – alumina composites. **Int. J. Ref. Met. & Hard Mat.**, v. 17, p. 11-20, 1999.
- [62] CASELLAS, D.; NAGL, M. M.; LLANE, L.; ANGLADA, M. Fracture toughness of alumina and ZTA ceramics: microstructural coarsening effects. **J. Mat. Proc. Tech.**, v. 143-144, p. 148-152, 2003.
- [63] EVANS, A. G.; CHARLES, E. A. Fracture toughness determinations by indentation. **J. Am. Ceram. Soc.**, v. 59, n.7-8, p. 371-372, 1976.
- [64] Norma MIL-STD-331B. Disponível em: [http://www.everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD+\(0300+-+0499\)/MIL-STD-331B_22114/](http://www.everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD+(0300+-+0499)/MIL-STD-331B_22114/)> Acesso em: 07 jan 2010.
- [65] YOSHIMURA, H. N.; MOLISANI, A. L.; NARITA, N. E. Efeito da composição da cerâmica de alumina no desempenho balístico níveis III e IV-NIJ de compósitos laminados cerâmica-mantas de fibras de aramida . In: CBECIMat, 17., 2006. **Proceedings...** Disponível em: <http://www.metallum.com.br/17cbecimat/resumos/17cbecimat-110-004.pdf>> Acesso em: 07 set 2010.