

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS, ENGENHARIAS E
TECNOLOGIAS - UNACET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

MARIANA BORGES POLLA

**DESEMPENHO BALÍSTICO DE ESTRUTURA
MULTICAMADA A BASE DE ALUMINA/EPÓXI**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Agenor De Noni Júnior
Coorientador: Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo

**CRICIÚMA
2017**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

P771d Polla, Mariana Borges.

Desempenho balístico de estrutura multicamada a base de alumina/Epóxi / Mariana Borges Polla. - 2017.

82 p. : il.; 21 cm.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2017.

Orientação: Agenor De Noni Júnior.

Coorientação: Oscar Rubem Klegues Montedo.

1. Blindagem cerâmica. 2. Alumina. 3. Desempenho balístico. 4. Estrutura multicamada. I. Título.

CDD 23. ed. 620.14

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla – CRB 14/1101

Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

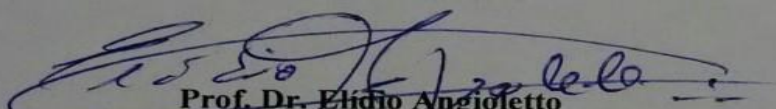
Mariana Borges Polla

Desempenho balístico de estrutura multicamada à base de Alumina/Epóxi.

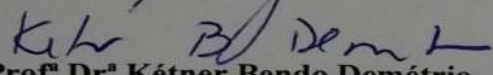
Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 14 de novembro de 2017.

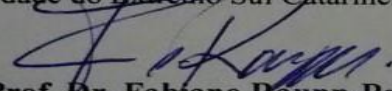
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Elídio Angioletto
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Kétner Bendo Demétrio
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Fabiano Raupp-Pereira
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

*Aos meus pais,
Odilor Polla e Simone B. Polla.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade e força para realizar e concluir este trabalho.

Aos meus pais, Simone Borges Polla e Odilor Polla, pelo apoio e pelas palavras de incentivo, que me ajudaram a superar todos os obstáculos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Agenor De Noni Jr, pela oportunidade, confiança e dedicação prestada durante este período.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo, pelos inúmeros conselhos e ajuda sempre que necessário.

À CAPES pelo apoio financeiro. À UNESC, IDT e aos professores do PPGCEM e também à Vivian pela cooperação com todas as atividades do programa.

Aos militares que colaboraram na realização dos ensaios balísticos, Sargento Furiati, Sargento Santiago, Sargento Paiva, Sub Tenente Lima, Tenente Diogo, Capitão Demengeon, e principalmente ao Tenente Coronel Malizia, que abriu as portas do Centro de Avaliações do Exército (CAEx).

Aos meus colegas e amigos de mestrado Debora, Maria Claudia, Luiz Filipe, Danila, Juliana, Radamez por compartilharem tantos momentos deste grande passo que demos, que nos fez crescer a cada dia.

A todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta com a realização deste trabalho.

“Viver é enfrentar um problema atrás do outro. O modo como você o encara é que faz a diferença”.

(Benjamin Franklin)

RESUMO

Alumina é comumente utilizada em blindagens compostas, devido a sua maior disponibilidade e melhor relação custo/benefício, comparadas as demais cerâmicas técnicas. No entanto, a alumina apresenta baixa tenacidade à fratura e esta propriedade esta relacionada à resistência a múltiplos impactos. Com o intuito de melhorar o desempenho balístico da blindagem, e conseqüentemente melhorar a durabilidade em campo, uma alternativa poderia ser utilizar cerâmicas multicamadas. Sendo assim, neste estudo foi avaliado o efeito do número de camadas de alumina (2 e 3 camadas) e da espessura da camada intermediária (0,5 e 1 mm) da estrutura multicamadas à base de alumina/epóxi. Foi também avaliado o efeito da adição de fibra de vidro como material de reforço da camada de epóxi. As propriedades mecânicas das aluminas estudadas foram determinadas por meio de tenacidade à fratura em três pontos, módulo de elasticidade e microdureza Knoop. Não ocorreu variação significativa nas propriedades mecânicas com a redução da espessura da alumina. Foi realizado ensaio de resistência à flexão em três pontos, para as aluminas de 6, 3 e 2 mm de espessura e estruturas multicamadas. Com a redução da espessura ocorreu uma diminuição na resistência, devido ao aumento do defeito natural. O desempenho balístico dos painéis em mosaico de Al_2O_3/Al foi avaliado por meio de ensaio balístico DOP com projétil 7,62 mm perfurante, conforme norma NIJ 0108.01 (nível IV). Os resultados do ensaio balístico indicaram que, com o aumento do número de camadas, a resistência balística diminuiu, ou seja, a profundidade de penetração do projétil (DOP) aumenta. No entanto, comparando as estruturas de 2 e 3 camadas, com o aumento do número de camadas a área danificada diminuiu. Com o aumento da espessura da camada de epóxi a DOP diminuiu. A elevada espessura da camada de epóxi aumentou a parcela de fratura por esforço de flexão durante o impacto. As condições com 0,5 mm de epóxi apresentaram melhor desempenho, comparadas com as de 1 mm nas mesmas condições (mesmo número de camadas). As estruturas com adição de fibra de vidro não apresentaram melhoras comparadas as sem fibra nas mesmas condições.

Palavras-chave: Blindagem cerâmica, alumina, estrutura multicamadas, desempenho balístico.

ABSTRACT

Alumina is generally used in composite shields, due to its greater availability and better cost/benefit compared to other technical ceramics. However, alumina presents low fracture toughness and this property is related to resistance to multiple impacts. In order to improve the ballistic performance of the shield, and consequently to improve the durability in the field, an alternative could be to use multilayer ceramics. Thus, in this study, the effect of the number of layers of alumina (2 and 3 layers) and the thickness of the intermediate layer (0,5 and 1 mm) of the multilayer structure based on alumina/epoxy was evaluated. The effect of the addition of glass fiber as reinforcing material of the epoxy layer was also evaluated. The mechanical properties of the studied aluminas were determined by means of three point fracture toughness, modulus of elasticity and Knoop microhardness. There was no significant variation in the mechanical properties with the reduction of alumina thickness. Three point flexural strength test was performed for 6, 3 and 2 mm thick aluminas and multilayer structures. With the reduction of the thickness a decrease in the resistance of the resistance occurred, due to the increase of the natural defect. The ballistic performance of the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ mosaic panels was evaluated using a DOP ballistic test with a projectile 7,62 mm perforating, according to NIJ 0108.01 (level IV). The results of the ballistic test indicated that with the increase of the number of layers the ballistic resistance decreases, that is, the depth of penetration of the projectile (DOP) increases. However, comparing the 2 and 3 layer structures, as the number of layers increases, the damaged area decreases. As the epoxy layer thickness increased DOP decreased. The high thickness of the epoxy layer increased the fracture portion by flexural stress during impact. Conditions with 0,5 mm epoxy will perform better, compared to 1 mm under the same conditions (same number of layers). The structures with fiberglass addition showed no improvement compared to those without fiber of the same conditions.

Keywords: Ceramic armor, alumina, multi-layer structure, ballistic performance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Blindado da Primeira Guerra Mundial (esquerda). Blindado moderno (direita).....	28
Figura 2: Blindagem mista cerâmica/metal.	29
Figura 3: Cone de fraturas em blindagem cerâmica.	31
Figura 4: Representação da formação do cone de fraturas.	32
Figura 5: Imagens de Raio-X que mostram o comprimento de um projétil 7,62 mm em função do tempo de penetração.....	32
Figura 6: Representação do processo de penetração de um projétil de tungstênio em uma placa cerâmica com confinamento lateral e frontal.34	
Figura 7: (a) Placa monolítica e (b) painéis em mosaico preenchidos com epóxi.	35
Figura 8: Dimensão mínima da placa cerâmica devido à formação do cone de fraturas.	36
Figura 9: Penetração residual versus velocidade de impacto de três espessuras diferentes de placas cerâmicas.....	38
Figura 10: Desenho esquemático dos sistemas estudados que mostra o perfil ao longo da espessura das peças.	41
Figura 11: Fluxograma com as principais etapas do procedimento experimental.....	42
Figura 12: Representação esquemática dos painéis balísticos Al_2O_3/Al	43
Figura 13: Tratamento químico dos tarugos de Al para formação de pits.	49
Figura 14: Etapas de montagem do painel balístico: (a) Montagem do mosaico; (b) espalhamento da camada adesiva; (c) colagem do mosaico.	51
Figura 15: Projétil calibre 7,62 mm.....	57
Figura 16: Túnel balístico (a) e provete calibre 7,62 mm (b) utilizados no trabalho.....	57
Figura 17: Tarugo de alumínio fixado para calibração da mira.....	58
Figura 18: Painel preparado para aplicação do material de reforço.	60
Figura 19: Tarugo de alumínio utilizado na calibração da mira.....	62
Figura 20: Imagens das estruturas multicamadas após ensaio de resistência à flexão.	66
Figura 21: Plot dos resíduos de MRF previsto vs. MRF observado.	67
Figura 22: Micrografias (MEV) das superfícies fraturadas após ensaio de resistência à flexão das estruturas multicamadas.....	68
Figura 23: Profundidade de penetração vs. distância a partir do centro.71	

Figura 24: Imagem dos painéis após ensaio balístico.....	71
Figura 25: Painel multicamadas de Al_2O_3 /epóxi após ensaio balístico.	72
Figura 26: Profundidade de penetração vs. espessura da alumina.....	73
Figura 27: Profundidade de penetração vs. espessura epóxi.	73
Figura 28: Resíduos do DOP previsto vs. DOP observado.	75
Figura 29: Resíduos DOP observado vs. DOP previsto.	76
Figura 30: Micrografia (MEV) da alumina monolítica (a) e trinca radial de um fragmento após ensaio balístico (b).	76
Figura 31: Micrografias (MEV) da trinca radial dos fragmentos das estruturas multicamadas após ensaio balístico.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais características das cerâmicas balísticas.	30
Tabela 2: Propriedades dos materiais e seu efeito no desempenho balístico.	33
Tabela 3: Configuração das estruturas cerâmicas multicamadas.	40
Tabela 4: Nomenclaturas adotadas para as corridas experimentais.	40
Tabela 5: Características da alumina 99,8% de pureza.	44
Tabela 6: Características da alumina 92,2% de pureza.	45
Tabela 7: Composição química da liga de alumínio 6063.	47
Tabela 8: Propriedades da resina epóxi.	48
Tabela 9: Composição química da fibra de vidro E.	48
Tabela 10: Nível de proteção do sistema de blindagem quanto ao impacto balístico da norma NIJ 0108.01.	56
Tabela 11: Ficha técnica do adesivo Sikadur® 32.	59
Tabela 12: Valores de densidade aparente, densidade relativa e porosidade, para as aluminas estudadas.	63
Tabela 13: Propriedades mecânicas das aluminas estudadas.	63
Tabela 14: Fragilidade e dissipação de energia balística das aluminas de 6, 3 e 2 mm de espessura.	64
Tabela 15: Resultados do ensaio de resistência à flexão.	65
Tabela 16: Estimativa dos valores de carga de ruptura para estruturas com camadas de 6 mm de alumina.	65
Tabela 17: Regressão linear para avaliar efeito da espessura da alumina, espessura do epóxi e adição de fibra na resistência a flexão.	67
Tabela 18: Velocidades do projétil durante ensaio balístico para cada condição experimental.	69
Tabela 19: Resultados do ensaio balístico das aluminas monolíticas e das estruturas multicamadas estudadas.	70
Tabela 20: Resultados da regressão linear para avaliar o efeito das variáveis analisadas no desempenho balístico.	74
Tabela 21: Resultados da regressão linear desconsiderando o efeito da espessura da camada de epóxi.	74

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
2 OBJETIVOS	27
2.1 OBJETIVO GERAL.....	27
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
3.1 HISTÓRICO DAS BLINDAGENS	28
3.2 BLINDAGEM CERÂMICA	29
3.3 MECANISMO DE IMPACTO BALÍSTICO.....	31
3.4 PROPRIEDADES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO BALÍSTICO	33
3.4.1 Sistema em mosaico.....	34
3.4.2 Efeito do confinamento das placas.....	34
3.4.3 Material de preenchimento.....	35
3.4.4 Geometria e dimensões das placas cerâmicas	35
3.5 BLINDAGENS MULTICAMADAS.....	37
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	40
4.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	40
4.2 OBTENÇÃO DOS COMPONENTES DO PAINEL	43
4.2.1. Configuração no painel	43
4.2.2 Placas cerâmicas.....	44
4.2.3 Suporte de alumínio	47
4.2.4 Material adesivo/preenchimento	47
4.2.5 Tecido de fibra de vidro.....	48
4.3 PREPARAÇÃO DOS PAINÉIS	49
4.3.1 Preparação dos tarugos de alumínio e placas de alumina	49
4.3.2 Preparação das estruturas multicamadas	50
4.3.3 Montagem do painel balístico.....	50
4.4 CARACTERIZAÇÃO DA ALUMINA	52
4.4.1 Densidade aparente, densidade real e porosidade.....	52
4.4.2 Módulo de elasticidade.....	52
4.4.3 Módulo de resistência à flexão.....	53
4.4.4 Tenacidade à fratura.....	53
4.4.5 Dureza Knoop	54
4.4.6 Fragilidade e capacidade de dissipação de energia balística ..	55
4.4.7 Análise microestrutural	55
4.4 ENSAIO BALÍSTICO	56
4.4.1 Reforço dos painéis.....	58
4.4.2 Avaliação do desempenho balístico.....	60
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	62

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	62
5.1.1 Suporte de alumínio	62
5.1.2 Propriedades da alumina	63
6. CONCLUSÃO	79
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81
REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

Materiais cerâmicos apresentam elevada dureza, resistência à compressão e baixa densidade em relação aos materiais metálicos. Tais propriedades qualificam as cerâmicas para aplicações em blindagem balística. O desenvolvimento de blindagens cerâmicas tornou os sistemas de proteção mais leves e eficientes em comparação com as blindagens metálicas convencionais (PUENTE, 2005; LIU, 2015; CROUCH, 2015).

As blindagens cerâmicas geralmente são compostas por uma camada de cerâmica apoiada a uma placa de metal (uma liga de alumínio ou aço) ou um polímero reforçado com fibra (CROUCH, 2015). O material cerâmico compõe a primeira camada da armadura. Sua função é fragmentar o projétil e melhorar a distribuição da pressão de impacto sobre a camada de apoio. A segunda camada é formada pelo material dúctil (metal ou polímero reforçado com fibra) e tem a função de absorver a energia cinética residual do projétil, conter os fragmentos de projétil e cerâmica, evitando deformações excessivas a fim de garantir a integridade do sistema protegido (ZAERA et al., 2000; GAMA; 2001; COUTO, 2011; DA SILVA, 2014).

Atualmente os materiais cerâmicos mais utilizados em blindagens são o carbeto de boro (B_4C) e o carbeto de silício (SiC) para calibres pesados, e a alumina (Al_2O_3) para calibres leves (VYSHNYAKOV, 2004; LIU, 2015; SILVA, 2014). Entre as cerâmicas avançadas, a alumina apresenta a melhor relação custo/benefício e maior disponibilidade. Possui excelentes propriedades mecânicas, como resistência à compressão (1000-2800 MPa), alta dureza (16,0-20,0 GPa) e facilidade de processamento, podem ser obtidas utilizando-se vários métodos de conformação e não necessita de atmosferas diferenciadas na sinterização, o que reduz os custos de produção (VYSHNYAKOV, 2004; MEDVEDOVSKI, 2010; SILVA, 2014). No entanto, a alumina apresenta baixa tenacidade à fratura (3-5 MPa.m^{1/2}) e devido a esta propriedade o material absorve uma pequena quantidade de energia antes que ocorra a sua fratura (COUTO, 2011).

Conforme Zaera (2000) em blindagens mistas cerâmica/metal, após o primeiro disparo os danos causados pelo projétil reduzem significativamente o desempenho do sistema de proteção. Com o intuito de melhorar a durabilidade e resistência à fratura das placas cerâmicas uma alternativa seria utilizar materiais compósitos de estrutura laminada (GORIK, 2001). Segundo Akella (2017) demonstrou-se que, em cerâmicas dispostas em camadas, a absorção de energia é melhorada. As

cerâmicas em camadas têm maior resistência a múltiplos impactos comparadas com cerâmicas monolíticas, e a área danificada é reduzida consideravelmente com o aumento do número de camadas.

A propagação do dano ao longo da blindagem, também pode ser reduzida utilizando-se mosaicos ao invés de placas cerâmicas monolíticas. Dessa forma, quando o painel é atingido o dano fica concentrado apenas na peça atingida e nas adjacentes (GRUJIC, 2012). Quanto à geometria, placas quadradas são as mais utilizadas por apresentar facilidade de produção. Mas essas placas apresentam vulnerabilidade criada pelos pontos de contato que ficam localizados entre quatro peças (COUTO, 2011). Com o intuito de reduzir esta vulnerabilidade, uma alternativa seria fixar as placas ao suporte de modo que fiquem desalinhadas, pois o ponto de junção fica entre três placas ao invés de quatro (VYSHNYAKOV, 2004).

Neste estudo foi avaliado o efeito do número de camadas de alumina (2 e 3 camadas) e da espessura da camada intermediária (0,5 e 1 mm de epóxi) da estrutura multicamadas a base de alumina/epóxi. Foi também avaliado o efeito da adição de fibra de vidro como material de reforço da camada intermediária. Foram confeccionados sistemas em mosaico com placas quadradas (Al_2O_3) colocadas de forma desalinhadas com o intuito de garantir o melhor desempenho balístico, ou seja, reduzir os danos causados após o primeiro disparo. O desempenho balístico dos painéis Al_2O_3/Al foi avaliado através de ensaio balístico DOP com projétil 7,62 mm perfurante, conforme norma NIJ 0104 (nível IV).

Este trabalho é parte integrante de um projeto CAPES Pró-Defesa nº 31/2013, intitulado “Desenvolvimento de materiais funcionais para blindagem balística”. Que tem por objetivo implantar redes de cooperação entre instituições de ensino superior na área de defesa civil.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito das estruturas multicamadas a base de alumina/epóxi e alumina/epóxi/fibra de vidro no desempenho balístico, comparadas com placas de alumina monolíticas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o comportamento mecânico da alumina e das estruturas cerâmicas estudadas;
- Analisar o efeito do número de camadas de alumina, no desempenho balístico das estruturas cerâmicas multicamadas;
- Analisar o efeito da espessura da camada de epóxi, no desempenho balístico das estruturas cerâmicas multicamadas;
- Estudar o efeito da adição de fibra de vidro como material de reforço da camada intermediária das estruturas alumina/epóxi.

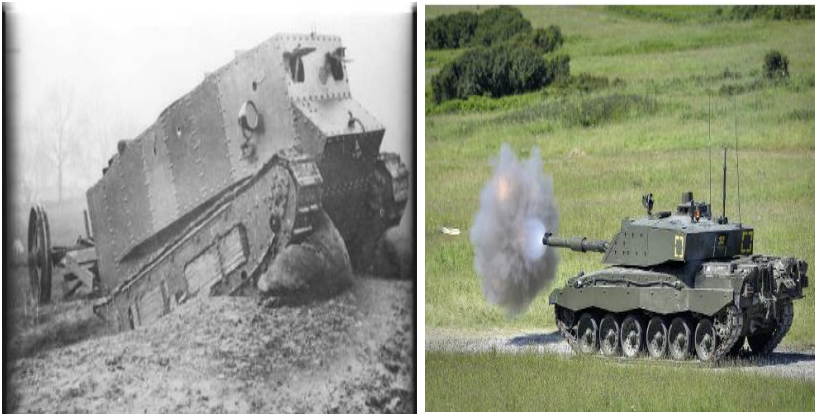
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 HISTÓRICO DAS BLINDAGENS

Ao longo da história, a evolução das blindagens vem acompanhando o desenvolvimento de novos armamentos. Durante a Primeira Guerra Mundial eram utilizadas em carros de combate chapas de aço de aproximadamente 12 mm de espessura. Estas chapas tinham a dupla função de blindagem e estrutural. No final da Segunda Guerra Mundial, esta espessura situava em torno de 280 mm, conferindo aos veículos pesos acima de 60 toneladas e densidade superficial de quase 3 toneladas por metro quadrado (FONSECA, 2002).

Dentro deste cenário, devido ao desenvolvimento das munições anti-tanque, constatou-se que blindagens monolíticas não eram capazes de deter as novas ameaças, sem que fosse aumentado excessivamente o peso dos carros de combate. Um único material não era mais capaz de proporcionar um nível de proteção adequado. Sendo assim, tornou-se necessário utilizar diferentes tipos de materiais em conjunto, de modo que se combinassem suas propriedades formando uma blindagem composta (WILKINS, 1978; FONSECA, 2002). A Figura 1 mostra um blindado da Primeira Guerra Mundial e um blindado moderno.

Figura 1: Blindado da Primeira Guerra Mundial (esquerda). Blindado moderno (direita).



Fonte: Crouch, 2017.

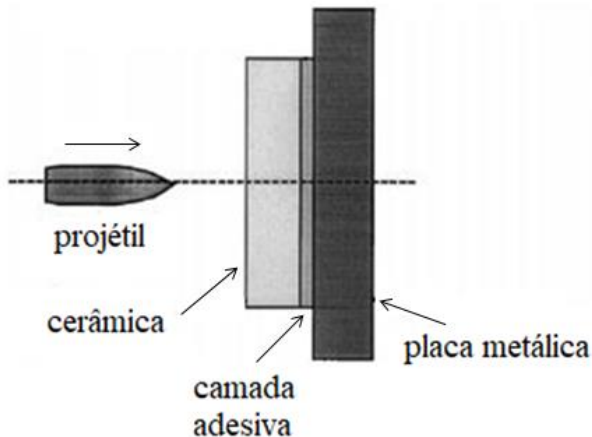
Os materiais cerâmicos, comparados com os materiais metálicos, apresentam elevada dureza, boa resistência à compressão e baixa

densidade. Tais propriedades tornaram a utilização desses materiais adequada em sistemas de blindagens composta. Há relatos de que os primeiros a utilizarem materiais cerâmicos em blindagens foram soldados americanos, durante a Guerra do Vietnã (1955-1975), em sistemas de proteção de helicópteros e pequenas aeronaves. O sistema utilizado era composto por uma placa de carbetto de boro (B_4C) apoiada a uma placa de fibra de vidro ou aramida, recoberta por um tecido desprendido que tinha a função de conter os estilhaços que seriam produzidos durante o impacto do projétil. A utilização dessa nova armadura apresentou como principal vantagem à redução de peso do sistema de proteção, o que melhorou a capacidade de locomoção dos veículos e redução do consumo de combustível (YADAV e RAVICHANDRAN, 2003).

3.2 BLINDAGEM CERÂMICA

As blindagens cerâmicas geralmente são formadas por uma camada de cerâmica apoiada a uma placa de metal (uma liga de alumínio ou aço) ou um polímero reforçado com fibra (CROUCH; KESHARAJU; NAGARAJAH, 2015), conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2: Blindagem mista cerâmica/metal.



Fonte: Zaera et al., 2000.

A primeira camada da blindagem é composta pela placa cerâmica e recebe o impacto inicial do projétil. O material cerâmico é utilizado

devido sua dureza e tem como função desgastar a ponta do projétil e fragmentá-lo, dissipando grande parte de sua energia cinética, melhorando assim a distribuição da pressão do impacto sobre a segunda camada (SILVA, 2014). Nos primeiros instantes do impacto balístico a maior parte da energia cinética é dissipada na erosão do projétil (10-15%) e pelos detritos de cerâmica ejetados, o processo de fratura da cerâmica absorve uma pequena quantidade de energia (~0,2%) (GAMA; 2001). A segunda camada, por sua vez, tem como objetivo absorver a energia cinética residual (20-40%) do projétil e da própria cerâmica, suportado as tensões de compressão que são transferidas para a cerâmica após o impacto, contendo os fragmentos de projétil e cerâmica e também evitando deformações excessivas garantindo assim a integridade do sistema protegido (SILVA, 2014; GAMA; 2001).

Sendo assim, esse sistema misto combina propriedades interessantes da cerâmica para um evento balístico, que são a alta resistência à compressão e dureza, com a ductilidade e resistência à flexão dos metais. Dado que as cargas envolvidas durante o impacto do projétil são primeiramente compressivas, para tornarem-se cargas trativas e, enfim, cisalhantes (COUTO, 2011).

Atualmente os materiais cerâmicos mais utilizados em blindagens são o carbetos de boro (B_4C), o carbetos de silício (SiC) e a alumina (Al_2O_3), entre outros (VYSHNYAKOV, 2004). Na Tabela 1 são apresentadas a principais características desses materiais.

Tabela 1: Principais características das cerâmicas balísticas.

Material	ρ , g.cm ⁻³	σ Flexão, MPa	Hv, GPa	K_{IC} , MPa.m ^{1/2}
B_4C	2,48-2,52	200-250	29,0-31,0	2,00-3,70
SiC	3,12-3,28	326-330	22,3-22,4	3,00-5,23
Al_2O_3	3,65-3,75	200-300	16,0-20,0	3,50-5,00

Fonte: Vyshnyakov, 2004.

O carbetos de boro (B_4C) e o carbetos de silício (SiC) são utilizados em blindagens mistas para calibres pesados (SILVA, 2014). O carbetos de boro é o que apresenta maior dureza, módulo de elasticidade, tenacidade à fratura e a menor densidade, mas como desvantagem possui um elevado custo de produção. O carbetos silício apresenta propriedades mecânicas inferiores as do carbetos de boro, porem seu custo de produção é de 2 a 3 vezes menor (VYSHNYAKOV, 2004).

A alumina é utilizada geralmente para calibres leves, apresenta como vantagens uma melhor relação custo/benefício e maior disponibilidade em relação aos carbetos. A alumina é mais densa, porém

apresenta módulo de elasticidade elevado, alta dureza e facilidade de processamento, podendo ser utilizada uma variedade de métodos de conformação e não necessita de atmosfera diferenciada na sinterização, o que reduz os custos de produção (MEDVEDOVSKI, 2010; SILVA, 2014).

3.3 MECANISMO DE IMPACTO BALÍSTICO

O mecanismo de penetração do projétil em materiais cerâmicos e metálicos é significativamente diferente, enquanto que a armadura metálica absorve a energia do impacto através de deformação plástica, a blindagem cerâmica, por sua vez, absorve essa energia através da formação de fraturas (MEDVEDOVSKI, 2010).

Wilkins (1978) estudou a penetração e características de perfuração do sistema alumina / alumínio utilizando projéteis de 7,62 mm. Ele demonstrou que a formação de um conjunto de trincas, que apresenta um aspecto de cone (Figura 3) é o principal mecanismo de dano para uma blindagem composta.

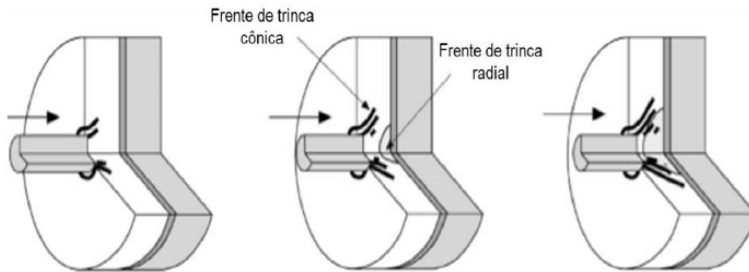
Figura 3: Cone de fraturas em blindagem cerâmica.



Fonte: Gonçalves et al., 2004.

Conforme Gonçalves et al. (2004) o mecanismo de impacto balístico ocorre em dois estágios, conforme mostra a Figura 4.

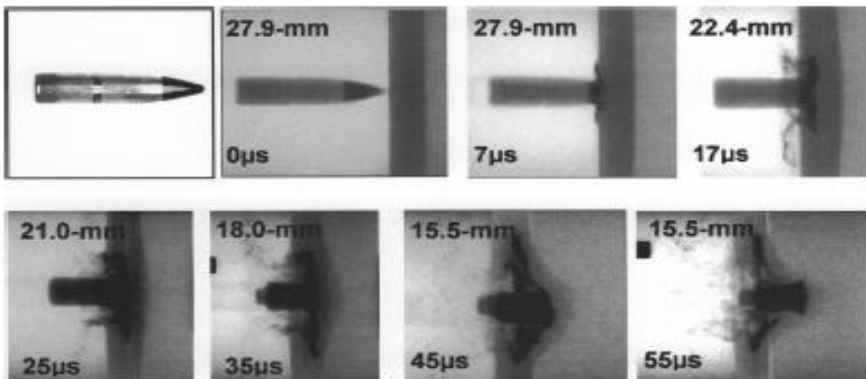
Figura 4: Representação da formação do cone de fraturas.



Fonte: López-Puente et al., 2005.

O primeiro estágio é caracterizado pela destruição da ponta do projétil e formação do cone de fratura, sem ocorrer a penetração na cerâmica. Durante a formação do cone, a cerâmica e a base da blindagem não se movem e a velocidade de penetração é nula. No segundo estágio, o projétil penetra na blindagem e as trincas se propagam espalhando lateralmente os fragmentos de cerâmica. No último estágio, a base deforma-se plasticamente para absorver a energia cinética residual do projétil. Na Figura 5 pode-se observar o comprimento do núcleo em função do tempo e onde está ocorrendo a maior parte da erosão.

Figura 5: Imagens de Raio-X que mostram o comprimento de um projétil 7,62 mm em função do tempo de penetração.



Fonte: Gooch, W.A.; Burkins, M.S., 2002.

3.4 PROPRIEDADES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO BALÍSTICO

É difícil prever o desempenho da blindagem, visto que o evento balístico ocorre em um tempo extremamente curto (nano e microssegundos) e o mecanismo de fratura é influenciado por diferentes fatores de estresse. Segundo Medvedovski (2010) o desempenho balístico dos materiais cerâmicos não depende exclusivamente de uma única propriedade, mas de um conjunto de propriedades como: densidade, porosidade, dureza, resistência à ruptura, módulo de Young, resistência mecânica, entre outras. No entanto, algumas propriedades da cerâmica podem ser relacionadas a determinadas funções no desempenho balístico, como apresentadas na Tabela 2. Tais propriedades são afetadas diretamente pela microestrutura do material, na forma de tamanho de grão, fases cristalinas, transformação de fase e porosidade. Dessa forma, o controle microestrutural é importante no desenvolvimento de uma cerâmica balística.

Tabela 2: Propriedades dos materiais e seu efeito no desempenho balístico.

Propriedades	Efeito no desempenho balístico
Densidade	Peso do sistema de proteção
Dureza	Dano ao projétil
Módulo de Young	Propagação das ondas de tensão
Resistência à Flexão	Resistência a múltiplos impactos
Tenacidade à Fratura (K_{IC})	Resistência a múltiplos impactos, durabilidade em campo.
Modo da fratura (inter ou transgranular)	Absorção de energia

Fonte: Da Silva, 2014.

Além dos fatores intrínsecos o desempenho da blindagem também é influenciado por fatores extrínsecos como: velocidade e massa do projétil, espessura da placa, material de suporte, geometria das placas, placa monolítica ou sistema em mosaico, confinamento da placa cerâmica, entre outros. Nos próximos tópicos serão descritos alguns dos fatores que influenciam de modo significativo o desempenho balístico.

3.4.1 Sistema em mosaico

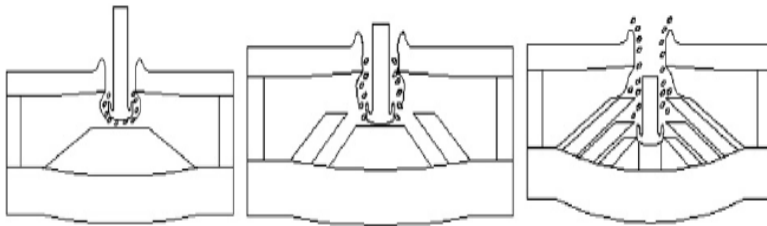
O desempenho balístico de uma placa monolítica é reduzido significativamente após o primeiro disparo. Com o intuito de melhorar o desempenho a múltiplos disparos são utilizados painéis montados em formato de mosaico, essa configuração limita os danos a placa atingida e a algumas placas vizinhas (HAZELL; ROBERSON; MOUTINHO, 2008; GRUJICIC; PANDURANGAN; D'ENTREMONT, 2012).

Blindagens cerâmicas montadas em formato de mosaico são utilizadas em veículos militares. As placas podem ser colocadas diretamente sobre a carroceria do veículo ou são colocados painéis onde as placas já estão inseridas. Nos dois casos o mosaico é montado encostando as placas uma na outra, desse modo, após o impacto do projétil, a placa danificada pode ser trocada facilmente, o que reduz os custos de manutenção (GONÇALVES, 2000; COUTO, 2011).

3.4.2 Efeito do confinamento das placas

Tan et al. (2010) estudaram o efeito do confinamento da placa cerâmica no mecanismo de falha do sistema alumina AD95 / aço 4340 utilizando projétil de tungstênio 6,72 mm e velocidade nominal de 820 m/s. Eles observaram que durante o processo de penetração da cerâmica não confinada, os fragmentos de cerâmica foram ejetados na direção radial e na direção oposta ao impacto, o projétil permaneceu em alta velocidade e acabou perfurando a placa de apoio. Os resultados obtidos utilizando confinamento mostraram-se satisfatórios, pois neste caso a perfuração do suporte não foi completa (Figura 6).

Figura 6: Representação do processo de penetração de um projétil de tungstênio em uma placa cerâmica com confinamento lateral e frontal.



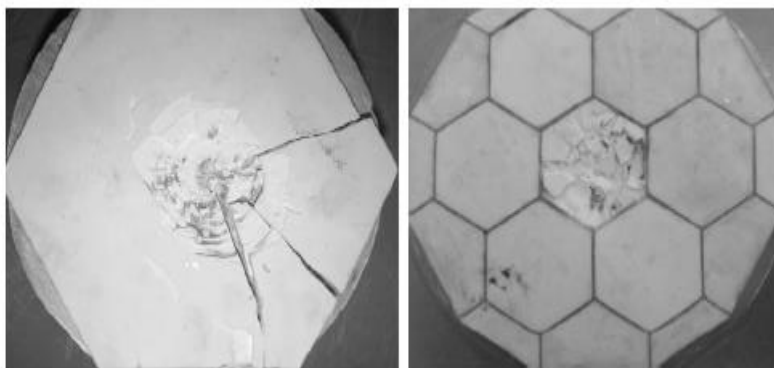
Fonte: Tan et al, 2010.

Durante o processo de penetração os fragmentos foram ejetados na direção oposta do impacto e o confinamento lateral limitou a deformação da cerâmica no sentido radial, o que proporcionou à desaceleração do projétil de modo mais eficaz.

3.4.3 Material de preenchimento

Jiusti (2017) estudou o efeito do material de preenchimento no desempenho de painéis alumina/alumínio em forma de mosaico e comparou com placas monolíticas. O autor observou que a placa monolítica apresentou desempenho comprometido, devido à concavidade da placa que afetou a qualidade da camada adesiva (Figura 7.a). Este comportamento evidenciou a importância de uma camada adesiva sem defeitos para garantir o desempenho da blindagem. O uso de mosaico preenchido com epóxi apresentou melhor desempenho (Figura 7.b). O preenchimento evitou o contato direto entre as placas durante o impacto e confinou os fragmentos, ocasionando maior erosão ao projétil.

Figura 7: (a) Placa monolítica e (b) painéis em mosaico preenchidos com epóxi.



Fonte: Jiusti, 2016.

3.4.4 Geometria e dimensões das placas cerâmicas

Segundo Couto (2011) placas quadradas são as mais utilizadas porque são fáceis de serem processadas, pois seu molde de compactação é relativamente simples. Mas essas placas apresentam como desvantagem a vulnerabilidade criada pelos pontos de contato que ficam

localizados entre quatro placas adjacentes. No entanto, é possível reduzir essa vulnerabilidade deslocando as placas de modo que o ponto de contato fique apenas entre três placas (VYSHNYAKOV, 2004).

A dimensão da placa cerâmica (L_c) deve atender ao critério da capacidade de impacto (distância mínima entre dois impactos sem falha da blindagem), conforme mostrado na Figura 8.

Após o impacto do projétil ocorre a formação do cone de fraturas, que ajuda na distribuição da carga sobre uma maior área da placa de apoio. 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. Woodward (1990) observou experimentalmente que geralmente o ângulo de propagação do cone de fraturas é de 68° . A dimensão da placa cerâmica pode ser calculada através da Equação 1.

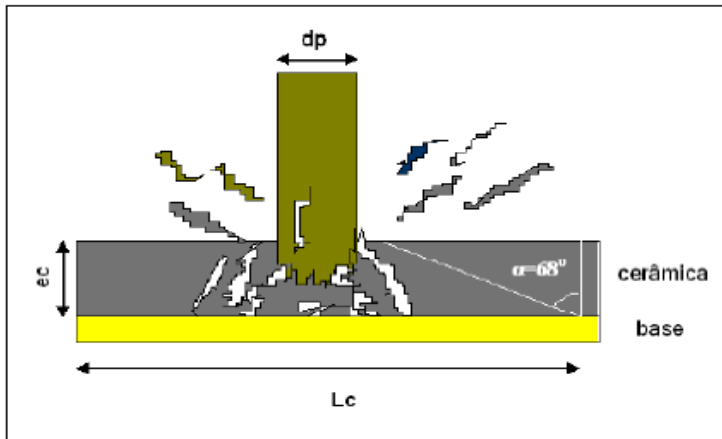
$$L_c = d_p + 2(e_c \cdot \text{tg}68^\circ) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

d_p : é o diâmetro do projétil;

e_c : é a espessura da placa cerâmica.

Figura 8: Dimensão mínima da placa cerâmica devido à formação do cone de fraturas.



Fonte: Gonçalves, 2000.

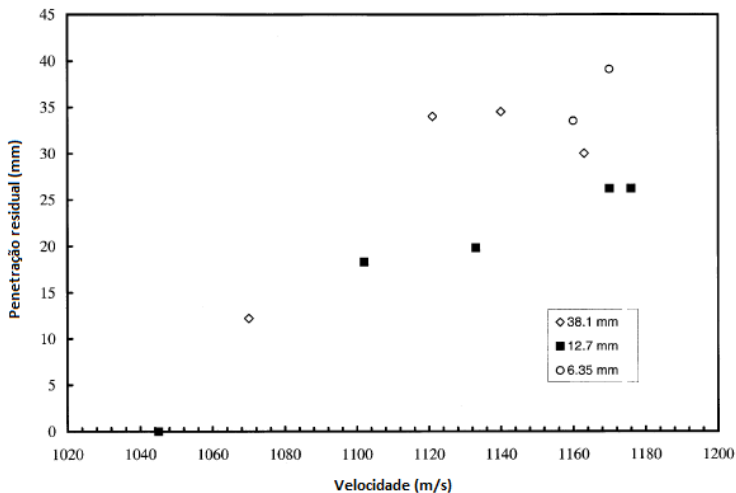
3.5 BLINDAGENS MULTICAMADAS

Segundo Crouch (2017) os materiais e sistemas de blindagem mais eficientes são os lamelares (*lamellar*), e os que apresentam um laminado (*laminated*) ou uma estrutura em camadas (*layered structure*). Isto pode ser observado através do uso de anisotropia em microestruturas metálicas, utilização de polímeros reforçados com fibras ou através do desenvolvimento de um sistema de blindagem composto. No caso de blindagens cerâmicas, o desempenho é reduzido significativamente após o primeiro disparo, devido à natureza frágil do material cerâmico. Com o intuito de reduzir os danos causados a cerâmica, o que aumentaria a resistência balística, uma alternativa seria utilizar materiais compósitos de estrutura laminada (GORIK, 2001).

Akella (2017) avaliou a possibilidade de utilizar cerâmicas em camadas para aplicação em blindagem com base em análises numéricas validadas com experimentos. Foram analisadas as velocidades de saída de alvos feitos de cerâmica monolítica (5 mm de espessura) e de cerâmica em camadas (5 camadas de 1 mm e 50 camadas de 0,1 mm). Os resultados indicaram que, no caso das cerâmicas monolíticas, a velocidade de saída diminui com o aumento da resistência da camada. No caso das cerâmicas em camadas, observou-se que a resistência da camada tem menor influência na velocidade de saída. Com o aumento do número de camadas, aumenta a absorção de energia devido ao aumento do número de interfaces, a resistência à penetração diminui e a área danificada é reduzida consideravelmente. Ou seja, a DOP aumenta e a área do cone de fraturas diminui. Isto indica que cerâmicas em camadas têm uma resistência a múltiplos impactos superiores as de cerâmicas monolíticas.

Yadav e Ravichandran (2003) estudaram a resistência à penetração de estruturas cerâmicas multicamadas à base de AlN/polímero, através de um ensaio que consistia em disparar uma haste cilíndrica de tungstênio variando a velocidade de 1000 a 1200 m/s. As resistências à penetração das estruturas cerâmica/polímero foram comparadas com a de placas monolíticas com a mesma espessura total. Os resultados experimentais demonstraram que o desempenho das estruturas cerâmicas laminadas compostas por três placas cerâmicas de 12,7 mm foram superiores a da cerâmica monolítica de 38,1 mm. Na Figura 9 são apresentados os resultados obtidos por Yadav e Ravichandran (2003).

Figura 9: Penetração residual versus velocidade de impacto de três espessuras diferentes de placas cerâmicas.



Fonte: Yadav e Ravichandran (2003).

Este desempenho melhorado da estrutura laminada é atribuído a redução da velocidade de propagação de ondas e danos na estrutura cerâmica/polímero e também a mecanismos de travamento de fissuras da interface polimérica. No entanto, um aumento da estratificação para 6 camadas de 6,35 mm de cerâmica, ocorreu uma redução na resistência devido aos danos causados pelo aumento da flexão das placas cerâmicas.

Segundo Ignatova et al. (2017), placas finas são amplamente utilizadas em aplicações de engenharia porque as estruturas de proteção multicamadas são mais confiáveis do que as monolíticas. Um exemplo são vidros blindados dos para-brisas de carros blindados, que são formados por lâminas de vidro e polímero intercaladas. A camada polimérica serve tanto para colar um vidro no outro quanto para amortecer o impacto do projétil e impedir o estilhaçamento do vidro. Por sua vez, como o vidro é um material abrasivo, sua função é desgastar e deformar o projétil.

Outra razão para trabalhar com “tijolos” finos é a capacidade de construir “parede de proteção” de diferentes espessuras. Camadas cerâmicas finas apresentam melhor relação custo/benefício do que cerâmicas monolíticas espessas. No caso de ameaças maiores, cerâmicas monolíticas não são adequadas devido à dificuldade de produção de

placas espessas. Com a escolha de uma interface da resistência certa, as cerâmicas em camadas podem ser projetadas para oferecer mais resistência à penetração do que as cerâmicas monolíticas (AKELLA, 2017).

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Conforme os objetivos e a abordagem da revisão bibliográfica, no presente trabalho avaliou-se o desempenho balístico de estruturas multicamadas a base de alumina/epóxi, comparadas com placas de alumina monolítica. Avaliou-se também o efeito da adição de fibra de vidro como material de reforço da camada polimérica intermediária.

Na Tabela 3 são apresentadas as configurações das estruturas multicamadas à base de Al_2O_3 /epóxi e Al_2O_3 /epóxi/fibra de vidro (corridas 5 e 6). Onde: N é o número de placas de alumina empilhadas; L_1 é a espessura das placas de alumina; L_2 é a espessura das camadas de epóxi; L_3 é a espessura do tecido de fibra de vidro e w é a espessura total das estruturas.

Tabela 3: Configuração das estruturas cerâmicas multicamadas.

Corrida	N	L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	w (mm)
1	2	3	0,5	-	6,5
2	2	3	1,0	-	7,0
3	3	2	0,5	-	7,0
4	3	2	1,0	-	8,0
5	2	3	0,5	0,15	6,65
6	3	2	0,5	0,15	7,30

Fonte: Da Autora, 2017.

No decorrer do trabalho as corridas experimentais serão indicadas utilizando-se as nomenclaturas apresentadas na Tabela 4, sendo a última corrida a placa de referência (placa de alumina monolítica de 6 mm de espessura).

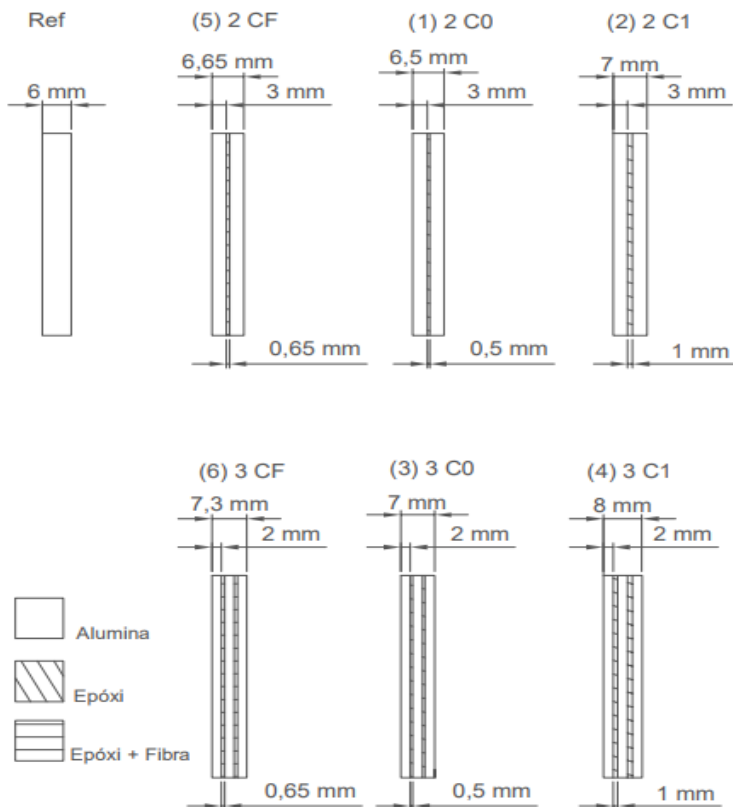
Tabela 4: Nomenclaturas adotadas para as corridas experimentais.

Corridas	1	2	3	4	5	6	7
Nomenclatura	2C0	2C1	3C0	3C1	2CF	3CF	REF

Fonte: Da Autora, 2017.

Na Figura 10 é apresentado um desenho esquemático que mostra o perfil ao longo da espessura das peças, indicando os materiais e as espessuras de constituição de cada sistema.

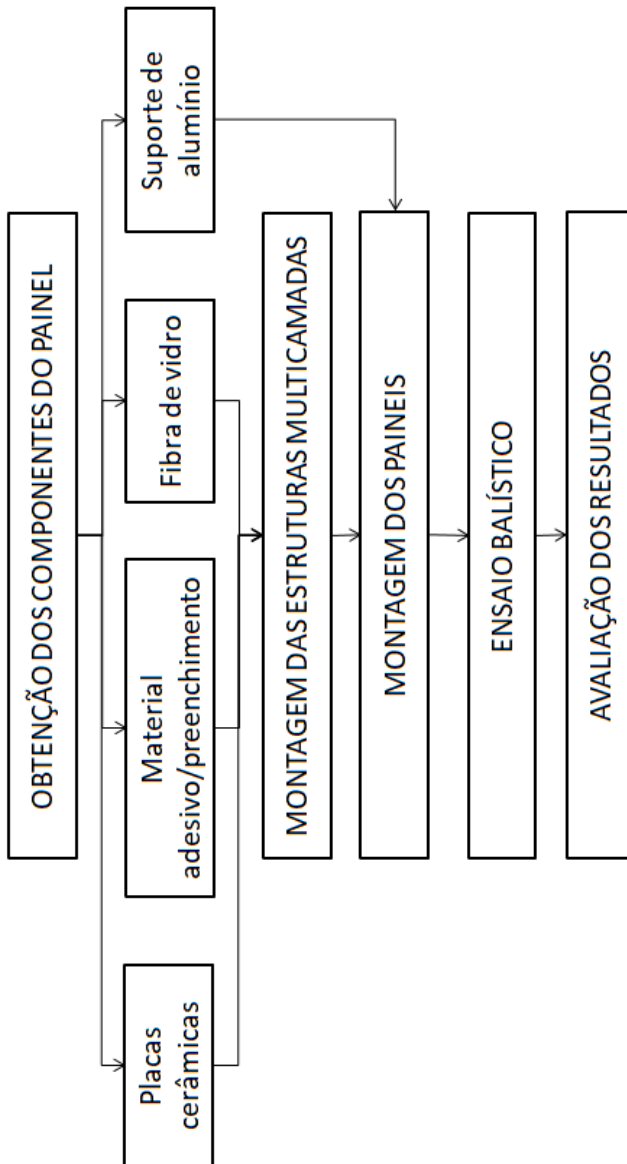
Figura 10: Desenho esquemático dos sistemas estudados que mostra o perfil ao longo da espessura das peças.



Fonte: Da Autora, 2017.

Na Figura 11 são apresentadas as principais etapas do procedimento experimental, desde a obtenção dos componentes do painel, até o ensaio de desempenho balístico e análise dos resultados.

Figura 11: Fluxograma com as principais etapas do procedimento experimental.



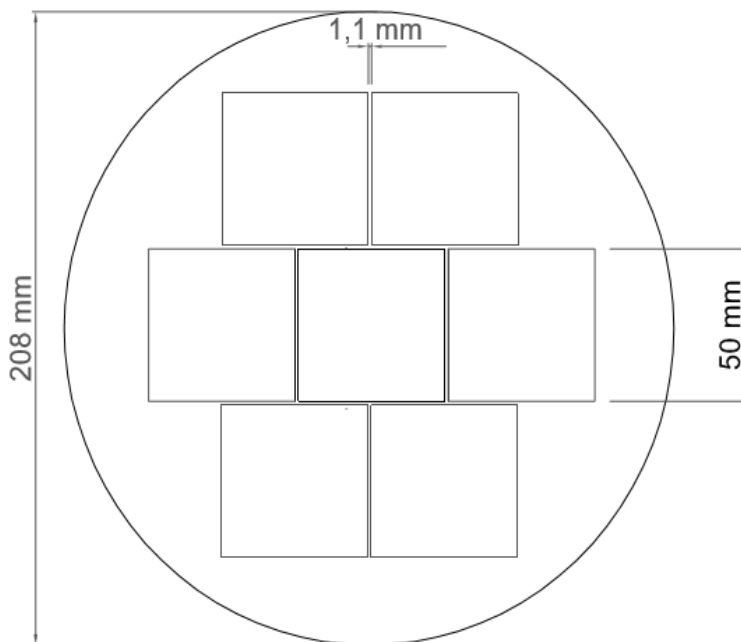
Fonte: Da Autora, 2017

4.2 OBTENÇÃO DOS COMPONENTES DO PAINEL

4.2.1. Configuração no painel

A Figura 12 mostra a configuração do painel balístico de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$. Como material de suporte foi utilizado um tarugo de alumínio de 208 mm de diâmetro e 50 mm de espessura. Na montagem do mosaico foram utilizadas placas cerâmicas quadradas de 50 mm de lado. Optou-se por utilizar placas quadradas devido as limitações de estampo da prensa utilizada. Foram utilizadas seis placas de alumina de 92,2% de pureza e uma placa alvo (placa no centro do mosaico), composta por uma alumina de alto teor de pureza (99,8%). As configurações das placas de centro foram apresentadas na Tabela 3. As placas cerâmicas foram fixadas ao suporte utilizado como material adesivo resina epóxi. Entre as placas de alumina utilizou-se um espaçamento de 1,1 mm, que foi preenchido com epóxi.

Figura 12: Representação esquemática dos painéis balísticos $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$.



Fonte: Da Autora, 2017.

A escolha da configuração do painel foi baseada nos resultados obtidos por Jiusti (2017), que avaliou a profundidade de penetração de aluminas em painéis de mosaico com diferentes tipos de materiais de rejunte. Comparando o desempenho dos mesmos com o de placas monolíticas. Os painéis em mosaico preenchidos com epóxi apresentaram os melhores resultados, os danos permaneceram limitados apenas à placa atingida.

Todas as atividades referentes à etapa de obtenção das placas cerâmicas foram realizadas no Laboratório de Cerâmica Técnica (CerTec/Unesc). No caso dos suportes de alumínio, o tratamento térmico foi realizado no Laboratório de Cerâmica (Unesc) e o tratamento químico foi feito no Laboratório de Valorização de resíduos (LabValora/Unesc). Nos próximos subtítulos os componentes do painel são descritos de modo mais detalhado.

4.2.2 Placas cerâmicas

Na confecção das placas cerâmicas alvo foi utilizada uma alumina com alto teor de pureza (99,8%), fornecida pela empresa Almatís. Na Tabela 5 são mostradas as características e propriedades da alumina de acordo com o fornecedor.

Tabela 5: Características da alumina 99,8% de pureza.

Composição química (%)						
Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	CaO	B ₂ O ₃
99,8	0,07	0,02	0,04	0,02	0,03	<0,01
Propriedades Físicas						
Área de superfície BET (m ² .g ⁻¹)					4,9	
% Passante # 325 - a úmido					99,8	
d ₉₀ (µm)					5,7	
d ₅₀ (µm)					1,7	
d ₁₀ (µm)					0,2	
Propriedades da Cerâmica						
Densidade a verde (g.cm ⁻³)					2,55	
Densidade a queimado (g.cm ⁻³)					3,84	
Retração (%)					13,0	
Temperatura de sinterização (°C)					1670	

Fonte: Almatís.

As placas de confinamento foram produzidas utilizando uma alumina com 92,2% de pureza (linha Granalox), fornecida pela empresa Nabaltec. Na Tabela 6 são mostradas as propriedades da alumina de acordo com o fornecedor.

Tabela 6: Características da alumina 92,2% de pureza.

Composição química (%)					
Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	CaO
92,2	0,1	0,1	2,8	2,5	2,3
Propriedades Físicas					
d ₅₀ (grânulos) (mm)				180-230	
d ₁₀ (partículas) (µm)				0,58	
d ₅₀ (partículas) (µm)				2,16	
d ₉₀ (partículas) (µm)				6,53	
Propriedades da Cerâmicas					
Tempo de permanência na temperatura de sinterização (h)				2	
Retração (%)				15-16	
Temperatura de sinterização (°C)				1580	

Fonte: Nabaltec.

Durante a confecção das placas alvo, primeiramente foi realizada a etapa de preparação do pó. A granulação do pó foi feita manualmente, adicionou-se com o auxílio de um pulverizador 10% de água deionizada, 0,6% de ligante (PVA) e 0,4% de plastificante (DEG-Dietilenoglicol). Em seguida, o pó foi passado em peneira de 24 mesh, para homogeneizar a umidade, e em peneira de 710 µm, para formar grânulos pela formação de pontes líquidas entre as partículas. Com o intuito de melhorar a compactação e esfericidade dos grânulos, a massa foi colocada em recipiente polimérico e mantida em rotação durante 1 h, utilizando um moinho gira-jarros laboratorial. Em fim, os grânulos foram passados em peneira de malha 300 µm, para limitar o tamanho (FABRIS, 2017). A importância desta etapa é devido ao fato de que, diferenças na distribuição de massa (dentro do molde), podem resultar em diferenças de densidade ao longo da peça prensada.

Após a etapa de preparação do pó, o pó obtido foi seco em estufa por 2 h a uma temperatura de 110°C a fim de eliminar a umidade requerida no processo. A umidade de granulação é maior que a utilizada na conformação, podendo causar defeitos de prensagem e fragilizar as

peças prensadas. Após o resfriamento do pó adicionou-se 2% de umidade e o pó foi mantido em repouso por 8 h, a fim de garantir a homogeneidade. No caso das placas de confinamento, como foi utilizada uma alumina granulada e pronta para prensagem, à etapa de preparação do pó não foi realizada.

As placas de alumina foram conformadas pelo processo de prensagem uniaxial, utilizando uma prensa hidráulica laboratorial da marca Gabbrielli, modelo GT 0785. A prensagem das placas alvo e de confinamento foi realizada em três estágios, sendo dois deles de desaeração (60 e 140 bar) e o último estágio de compactação final (140 MPa). Foram obtidas peças de 62,5 x 12 mm. A quantidade de massa necessária para obter as espessuras desejadas foi calculada utilizando a Equação 2.

$$m = \frac{e_f \cdot 100}{100 - R_q} \cdot d_s \cdot c \cdot l \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

m = massa seca para prensagem (g);

e_f = espessura final (cm);

R_q = retração de queima (%);

d_s = densidade da peça seca ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$);

c = comprimento da peça (cm);

l = largura da peça (cm).

As peças foram sinterizadas em um forno laboratorial da marca Fortelab, modelo FE 1700 V 200. A sinterização das placas de alumina 99,8% de pureza (placas alvo) ocorreu a uma temperatura máxima de 1670 °C, taxa de aquecimento de 10 °C/min e tempo de permanência na máxima temperatura de 3 h. No caso das peças de confinamento, na sinterização foi utilizada uma temperatura máxima de 1580°C, taxa de aquecimento de 10 °C/min e tempo de permanência na máxima temperatura por 2 h. Como a retração de ambas as aluminas eram conhecidas, as placas alvo e de confinamento foram cortadas utilizando um estilete e lixadas antes de sinterizadas.

4.2.3 Suporte de alumínio

Foram utilizados como suporte tarugos cilíndricos de alumínio liga 6063 de 208 mm de diâmetro e 50 mm de espessura. Os tarugos de alumínio foram adquiridos da empresa ALUMASA Ltda. Na Tabela 7 é apresentada a composição química da liga de alumínio.

Tabela 7: Composição química da liga de alumínio 6063.

Elemento	Al	Mg	Si	Cr	Mn	Ti
% (massa)	Máx. 97,5	0,45-0,9	0,2-0,6	Máx. 0,1	Máx. 0,1	Máx. 0,1
Elemento	Cu	Zn	Fe	Outros, cada	Outros, total	
% (massa)	Máx. 0,1	Máx. 0,1	Máx. 0,35	Máx. 0,05	Máx. 0,15	

Fonte: Metals Handbook, 1990.

A capacidade de penetração do projétil na placa de alumínio diminui com o aumento da dureza do alumínio (ÜBEYLI; YILDIRIM; ÖGEL, 2008). Com o intuito de aumentar a dureza das placas de apoio, os tarugos foram submetidos à tratamento térmico. Este tratamento se constituiu em uma primeira etapa de solubilização, seguida por uma etapa de envelhecimento para obtenção de uma dureza de aproximadamente 73 HB (ASM Handbook, 2000). Na etapa de solubilização a temperatura utilizada foi de 520°C, com um tempo de permanência de 2 h. O resfriamento ocorreu em um tanque de água à temperatura ambiente. O envelhecimento foi realizado em estufa na temperatura de 175°C durante 7 h.

Após realizado o tratamento a dureza do alumínio foi avaliada através de ensaio de dureza Brinell, de acordo com a norma ASTM E10 em durômetro Brinell Panantec. Foram realizadas três impressões em cada tarugo.

4.2.4 Material adesivo/preenchimento

Como material adesivo e de preenchimento dos espaços entre as placas utilizou-se resina epóxi, que é o adesivo bicomponente comumente empregado em proteções balísticas. A resina é comercialmente disponível como Araldite, produzida pela Huntsman®. O agente de cura é à base de poliamidas. Na Tabela 8 são apresentadas algumas propriedades do epóxi.

Tabela 8: Propriedades da resina epóxi.

Propriedade	Valor
Densidade da Resina (g.cm ⁻³)	1,17
Densidade do Endurecedor (g.cm ⁻³)	0,92
Razão Resina/Endurecedor (Volume)	100:100
Razão Resina/Endurecedor (Massa)	100:80
Tempo de Trabalho (min)	60
Tempo para Manuseio (h)	7
Tempo Mínimo de Cura (h)	12
Resistência ao Cisalhamento - 72 h (MPa)	15,7

Fonte: Jiusti, 2017.

4.2.5 Tecido de fibra de vidro

Segundo Soares (2012), fibras de vidro apresentam baixo custo, inércia química e alta resistência à tração, o que as torna um dos materiais de reforço mais utilizados em compósitos de matriz polimérica. No desenvolvimento do trabalho foi utilizada uma fibra de vidro, adquirida da empresa Redelease, a fim de reforçar a camada de epóxi das estruturas Al₂O₃/epóxi. A fibra que foi utilizada é um tecido bidirecional de fibra de vidro do tipo E, fabricada para utilização em resinas poliéster, epóxi, fenólicas ou ester vinílicas (Redelease, 2017). Na Tabela 9 é mostrada a composição química típica para a fibra de vidro E.

Tabela 9: Composição química da fibra de vidro E.

Constituintes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	MgO	CaO
Vidro E	55,2	14,8	7,3	3,3	18,7

Fonte: Adaptado de LEVY NETO; PARDINI, 2006

4.3 PREPARAÇÃO DOS PAINÉIS

4.3.1 Preparação dos tarugos de alumínio e placas de alumina

Antes da montagem dos painéis, as superfícies de alumínio, onde seriam colados os mosaicos, foram primeiramente lixadas. Esta etapa foi realizada, com o objetivo de deixar as superfícies mais homogêneas eliminando possíveis irregularidades, visto que os tarugos foram cortados com serra de fita e não passaram por processo de usinagem. Em seguida, as superfícies foram desengorduradas com tolueno durante 15 min e lavadas com detergente e água. Depois de limpas e secas, a fim de formar pits e aumentar a área superficial, as superfícies foram atacadas com uma solução de ácido sulfúrico (25% de concentração volumétrica) e 67 g/L de dicromato de sódio ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) durante 15 min (Figura 13) (ÜBEYLI, 2008). Após o tratamento químico os tarugos foram novamente lavados com detergente e água.

Figura 13: Tratamento químico dos tarugos de Al para formação de pits.



Fonte: Da Autora, 2017.

A rugosidade superficial do alumínio foi determinada, conforme a norma JIS B0601-1994, utilizando um rugosímetro Mitutoyo Surf test S-210. Este ensaio foi realizado após o lixamento das superfícies. Foram realizadas medidas longitudinais e transversais ao sentido de corte em três corpos de prova. A rugosidade pode influenciar na adesão do epóxi, que afeta a qualidade da adesão das placas cerâmicas.

As placas de alumina (placas de confinamento e placas alvos de 6, 3 e 2 mm de espessura) também foram desengorduras com tolueno durante 15 minutos e lavadas com detergente e água, antes da montagem das estruturas Al_2O_3 /epóxi e dos mosaicos.

4.3.2 Preparação das estruturas multicamadas

Durante o preparo das estruturas multicamadas à base de alumina/epóxi, primeiramente, as estruturas foram montadas apoiando as placas de alumina (de 2 ou 3 mm de espessura) que melhor se encaixavam. Em seguida, foram coladas utilizando epóxi. A quantidade de epóxi necessária, para formar a camada adesiva com as espessuras determinadas (0,5 ou 1,0 mm), foi pesada diretamente sobre a placa de alumina e, com o auxílio de uma espátula, espalhou-se o epóxi até formar uma camada bem uniforme. No caso das estruturas com três camadas de alumina, a segunda camada adesiva foi aplicada após a cura completa (72 horas) da primeira camada adesiva. Para as camadas de epóxi reforçadas com fibra de vidro, espalhou-se metade do epóxi sobre a peça e aplicou-se o tecido, sendo então colocado o restante do epóxi.

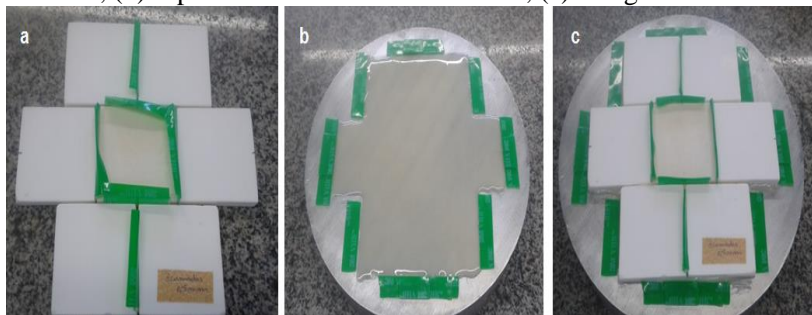
Como um dos principais objetivos deste trabalho, foi avaliar a influência da camada adesiva no desempenho balístico das estruturas, o controle das espessuras da camada adesiva foi de suma importância. Durante o preparo das estruturas cerâmicas multicamadas, este controle foi realizado através pesagem da resina e pela aplicação de fita adesiva nas bordas das placas para evitar o escoamento do epóxi.

4.3.3 Montagem do painel balístico

A preparação dos painéis (Figura 14) compreendeu as seguintes etapas: montagem do mosaico cerâmico, espalhamento da camada adesiva, colagem do mosaico, remoção da fita adesiva e preenchimento com epóxi dos espaçamentos entre as placas. Durante a montagem do mosaico, foi utilizada fita adesiva dupla-face transparente VHB da 3M, de aproximadamente 1,1 mm de espessura, com o intuito de garantir homogeneidade no espaçamento entre as placas (Figura 14.a). Espaçamentos maiores levam a maior vulnerabilidade da proteção e espaçamentos menores dificultam o preenchimento com o material de rejunte. A camada adesiva deve apresentar a mesma espessura abaixo de todas as peças e não ter bolhas, a fim de evitar espaços vazios que acabam reduzindo o desempenho balístico. A mistura de epóxi para colagem das placas foi preparada em quantidade suficiente para formar

uma camada de 1,0 mm de espessura abaixo da área da placa. A resina foi espalhada com o auxílio de uma espátula (Figura 14.b). Então o mosaico foi apoiado sobre a camada adesiva e pressionado a fim de distribuir bem o epóxi para evitar a formação de bolhas e garantir a homogeneidade da camada adesiva (Figura 14.c).

Figura 14: Etapas de montagem do painel balístico: (a) Montagem do mosaico; (b) espalhamento da camada adesiva; (c) colagem do mosaico.



Fonte: Da Autora, 2017.

Após a cura completa da camada adesiva (aproximadamente 72 h), a fita adesiva foi completamente removida com o auxílio de solvente (tolueno) e os espaçamentos foram preenchidos com epóxi. Segundo Juisti (2017) os mosaicos preenchidos com epóxi apresentaram melhor desempenho balístico comparado com outros materiais de preenchimento (geopólimero, cimento, entre outros). O epóxi também apresenta facilidade de aplicação, após o aquecimento a resina escoava preenchendo os espaços vazios entre as placas.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DA ALUMINA

Nos próximos tópicos são descritos os métodos de caracterização e ensaios mecânicos que foram realizados para a alumina utilizada na produção das placas alvo.

4.4.1 Densidade aparente, densidade real e porosidade

A densidade aparente das aluminas sinterizadas, de 6, 3 e 2 mm de espessura, foi determinada pelo método de Arquimedes em água, em balança Shimadzu modelo AUY 220. As peças foram impermeabilizadas com 24 horas de antecedência utilizando-se oleofugante. Determinou-se a massa dos corpos de prova e, em seguida, estes foram imersos individualmente em água. O valor de densidade é fornecido pelo próprio equipamento em g.cm^{-3} . Sendo a densidade real da alumina- α $4,05 \text{ g.cm}^{-3}$, a densidade relativa e a porosidade foram calculadas através da relação entre densidade aparente e densidade real, conforme Equações 3 e 4.

$$d_{rel} = \frac{d_{ap}}{d_{real}} * 100 \quad \text{Equação 3}$$

$$P = \left(1 - \frac{d_{ap}}{d_{real}}\right) * 100 \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

d_{rel} = densidade relativa (%);

d_{ap} = densidade aparente (g.cm^{-3});

d_{real} = densidade real (g.cm^{-3});

P = porosidade (%).

4.4.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade da alumina foi determinado utilizando-se um equipamento Sonelastic (ATCP Engenharia Física), através da medida da velocidade de propagação do som no material. O ensaio foi realizado com três peças de 6 x 12 x 48 mm.

O módulo de elasticidade está diretamente relacionado com a porosidade do material cerâmico. Segundo Hirata e Shimonosono (2016), conhecendo-se a porosidade da alumina (V_p), o módulo de elasticidade da alumina (E_c) pode ser estimado, utilizado a Equação 5.

$$E_c = E_2(1 - \nu_p^{2/3}) \quad \text{Equação 5}$$

Segundo Asmani et al. (2001) para porosidades de até 12% ocorre pouca variação no coeficiente de Poisson. Jiusti (2017) observou que o valor médio do coeficiente de Poisson, para as aluminas estudadas, foi de 0,23. Sendo assim, a velocidade de propagação do som foi calculada utilizando a Equação 6 (Chang et al.,2000), considerando um valor de 0,23.

$$V = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

V = velocidade de propagação do som (m.s⁻²);

E = módulo de elasticidade (Pa);

ν = coeficiente de Poisson;

ρ = densidade (kg.m⁻³).

4.4.3 Módulo de resistência à flexão

A resistência à flexão das placas de aluminas (de 6, 3 e 2 mm de espessura) e estruturas multicamadas (para cada configuração estuda) foi avaliada em três pontos, conforme norma ASTM 1161-13, utilizando uma máquina de ensaios universal EMIC DL10000. A resistência à flexão a três pontos foi calculada pela Equação 7.

$$\sigma = \frac{3}{2} * \frac{P * L}{B * h^2} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

σ = tensão máxima de ruptura (MPa);

P = carga máxima aplicada (N);

L = espaçamento dos apoios (mm);

B = largura do corpo de prova (mm);

H = espessura do corpo de prova (mm).

4.4.4 Tenacidade à fratura

O ensaio de tenacidade à fratura (K_{IC}) foi realizado através da resistência à flexão a 3 pontos de peças entalhadas. O ensaio foi realizado com 3 corpos de prova que foram entalhados em uma fresa. O

entalhe corresponde a 40% da espessura do corpo de prova. O K_{IC} do material é determinado pela Equação de Griffith (Equação 8).

$$K_{IC} = \sigma \cdot Y \cdot \sqrt{a} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

K_{IC} = tenacidade à fratura ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$);

Y = fator de forma;

a = defeito natural (m).

O fator de forma para este tipo de entalhe é dado pela Equação 9.

$$Y = 1,99 - 2,47 \left(\frac{a}{b}\right) + 12,97 \left(\frac{a}{b}\right)^2 - 23,17 \left(\frac{a}{b}\right)^3 + 24,8 \left(\frac{a}{b}\right)^4 \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

Y = fator de forma;

a = defeito natural (m);

b = largura do corpo de prova (m).

A energia de fratura pode ser calculada a partir da Equação 10.

$$K_{IC} = \sqrt{2 \cdot E \cdot \gamma} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

K_{IC} = tenacidade à fratura ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$);

E = módulo de elasticidade (GPa);

γ = energia de fratura (N.m).

4.4.5 Dureza Knoop

A dureza é uma das propriedades mais relevantes para cerâmicas balísticas, sendo que a principal função da cerâmica durante o impacto é erodir o projétil. A determinação da microdureza ocorreu utilizando-se um microdurômetro (Future Tech, FM 700), de acordo com a norma ASTM C1327-15. Para realização dos ensaios os corpos de prova foram previamente seccionados na transversal, lixados, polidos e tingidos com “caneta para retroprojektor” para facilitar a leitura dos resultados. Para cada amostra foram consideradas 5 indentações válidas, com carga de 2 kg por 10 s.

4.4.6 Fragilidade e capacidade de dissipação de energia balística

Segundo Medvedovski (2010) o desempenho balístico da cerâmica é diretamente afetado pela relação entre fragilidade e capacidade de dissipação de energia balística. Esta relação tem influência na propagação das ondas de tensão durante o impacto balístico. A fragilidade e a capacidade de dissipação de energia balística estão relacionadas com as propriedades mecânicas do material cerâmico, e, podem ser calculadas utilizando-se as Equações 11 e 12.

$$B = \frac{H \cdot E}{K_{IC}^2} \quad \text{Equação 11}$$

$$D = 0,36 \cdot B \cdot c \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

B = fragilidade;

H = microdureza Knoop (GPa);

E = módulo de elasticidade (GPa);

c = velocidade de dissipação do som (m/s);

K_{IC} = tenacidade à fratura ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$);

D = capacidade de dissipação de energia balística.

4.4.7 Análise microestrutural

A análise microestrutural dos corpos de prova de alumina, da superfície fraturada após ensaio de resistência à flexão e dos fragmentos de alumina do ensaio balístico, foi realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Foi utilizado um equipamento Zeiss EVO-MA10. Antes da análise as amostras foram deixadas em lavadora ultrassônica (Branson 1800) durante dois ciclos de 10 min.

4.4 ENSAIO BALÍSTICO

O desempenho balístico dos painéis foi avaliado através de ensaio de profundidade de penetração D.O.P. (*Depth of Penetration*), de acordo com a norma NIJ- 0108.01 (*National Institute of Justice*), seguindo as especificações do nível balístico IV (Tabela 10).

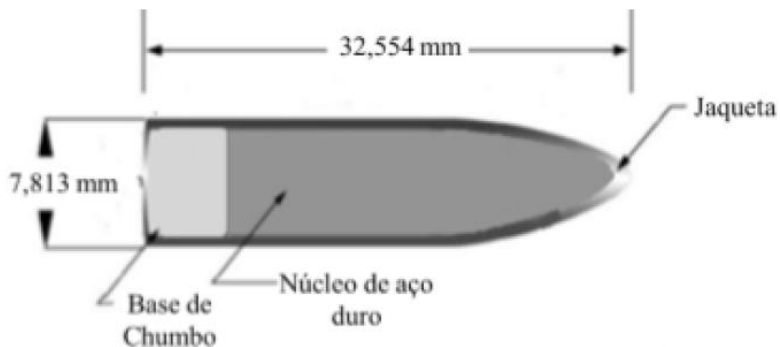
Tabela 10: Nível de proteção do sistema de blindagem quanto ao impacto balístico da norma NIJ 0108.01.

Nível Balístico	Munição	Massa do Projétil (g)	Velocidade m/s	Nº de Impactos
I	.22 LRHV Chumbo	2.6 +/- 0,1	320 +/- 10	5
	380 RN Chumbo	10,2 +/- 0,1	254 +/- 15	5
II-A	9mm FMJ	8.0 +/- 0,1	332 +/- 12	5
	357 Magnum JSP	10,2 +/-0,1	381 +/- 12	5
II	9mm FMJ	8.0 +/-0,1	358 +/- 15	5
	357 Magnum JSP	10.2 +/-0,1	425 +/- 15	5
III-A	9mm FMJ	8.0 +/-0,1	426 +/- 15	5
	44 Magnum SWC GC	15.6 +/-0,1	426 +/- 15	5
III	7.62x51 FMJ	9.7 +/- 0,1	838 +/- 15	5
	(.308 – Winchester)			
IV	.30 - 06 AP	10.8 +/- 0,1	868 +/- 15	1

Fonte: NIJ 0108.01.

Os testes foram realizados no Centro de Avaliações do Exército (CAEx), do Centro Tecnológico do Exército (CTEx), na linha de ensaios para armas leves (TRINDADE, 2012). Durante os ensaios foram utilizados projéteis AP (perfurante) de 7,62 x 51 mm, representado na Figura 15. Esta munição possui jaqueta de latão 70/30 e enchimento de chumbo na base. O núcleo é de aço SAE 4340, apresenta dureza de 60 HRC, com dimensões de aproximadamente 24 mm de comprimento e 6,26 mm de diâmetro. A massa do projétil é de 9,8 g.

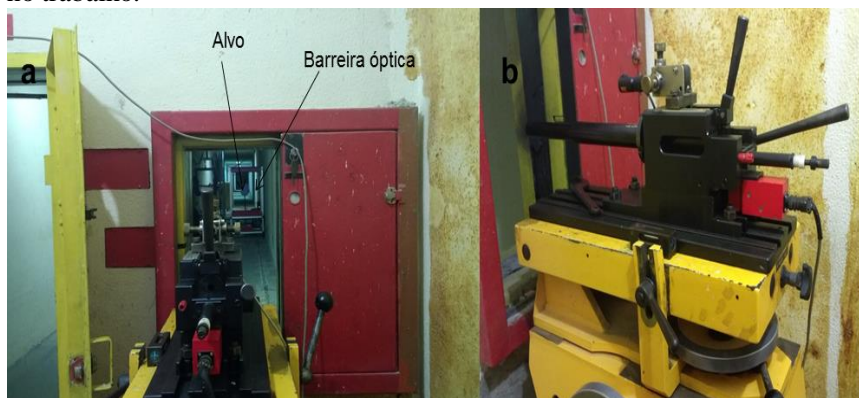
Figura 15: Projétil calibre 7,62 mm.



Fonte: Santos, 2012.

As munições foram disparadas a partir de um provete. A velocidade do projétil é medida com o auxílio de uma barreira óptica, a uma distância de 3 mm do alvo. Na Figura 16 são mostrados o túnel balístico e o provete calibre 7,62 mm.

Figura 16: Túnel balístico (a) e provete calibre 7,62 mm (b) utilizados no trabalho.



Fonte: Da Autora, 2017.

As placas a serem ensaiadas são fixadas em um suporte por meio de grampos (Figura 17), à uma distância de 15 m do provete, como especificado pela norma NIJ- 0108.01. A pontaria foi feita por meio de um feixe de laser, centrando o ponto do feixe com o local determinado

para o impacto. Cada painel de teste recebeu um único disparo, no total foram realizados 21 disparos.

Figura 17: Tarugo de alumínio fixado para calibração da mira.



Fonte: Da Autora, 2017.

Determinada a velocidade do projétil, por meio da barreira óptica, pode-se calcular a energia de impacto do projétil a partir da Equação 13.

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

E = Energia inicial do projétil (J);

M = massa do projétil (g);

V = velocidade do projétil (m/s²).

4.4.1 Reforço dos painéis

Durante a realização dos primeiros disparos, as placas de confinamento descolaram do suporte. Então, realizou-se o teste balístico para um painel de cada condição experimental, e verificou-se que ocorria o desprendimento das placas durante o impacto em todas as condições. Com o intuito de evitar que este efeito comprometesse o desempenho das estruturas cerâmicas, antes de realizar os ensaios no restante dos painéis, a área superficial do tarugo que permanecia vazia

foi preenchida com um material de reforço, a fim de melhorar o confinamento. Como material de reforço foi utilizado um adesivo estrutural à base de resina epóxi, da marca Sikadur® 32, os dados técnicos da resina são apresentadas na Tabela 11.

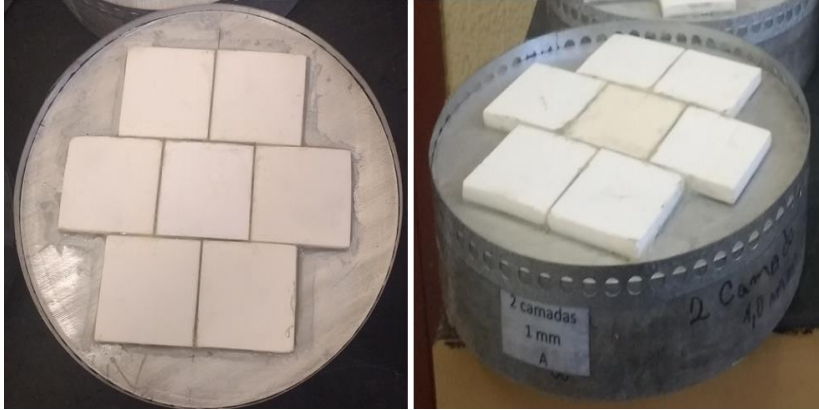
Tabela 11: Ficha técnica do adesivo Sikadur® 32.

Composição básica	Resina epóxi e poliamidas
Densidade (25°C)	1,70 kg/l (A+B)
Temperatura de aplicação	Mín. +10°C / Máx. +30°C
Temperatura de Serviço	Mín. +10°C / Máx. +60°C
Resistência à compressão	1 dia: 60 MPa 7 dia: 90 MPa
Resistência de aderência	Concreto: 18,4 MPa (14 dias) Concreto: 3,80 MPa (7 dias) Aço: 3,30 MPa (7 dias)
Tempo de Manuseio	Pot Life: 35 minutos
Razão de Mistura	A : B = 2 : 1 (em peso)
Cura Inicial	24 horas
Cura Final	7 dias

Fonte: <https://bra.sika.com/dms/getdocument.get/19acdd97-0467.../Sikadur%2032.pdf>

Para garantir uma boa aderência entre o painel o material adesivo, antes da aplicação do material adesivo as superfícies de alumínio foram lixadas, os painéis foram lavados, com detergente e água, e secos. Foram colocadas cintas de metal, em volta dos tarugos para conter o epóxi que seria colocado, conforme mostrado na Figura 18.

Figura 18: Painel preparado para aplicação do material de reforço.



Fonte: Da Autora, 2017.

4.4.2 Avaliação do desempenho balístico

Após o ensaio balístico, o desempenho dos painéis foi determinado, avaliando a proporção dos danos causados às placas cerâmicas (volume do cone de fratura), e medindo a profundidade de penetração do projétil no suporte. No primeiro caso, a região danificada foi preenchida com silicone, para determinar o volume do cone de fratura. O volume de silicone foi medido utilizando a técnica de picnometria a hélio em picnômetro Quantachrome, modelo Ultrapyc 1200e. Posteriormente os painéis foram colocados em estufa laboratorial e ficaram por 2 horas a uma temperatura de 200°C, para degradar a resina a fim de remover as placas cerâmicas. Por último, os tarugos de alumínio foram cortados utilizando serra fita (lâmina: Univers Starret, modelo 1101-1), para determinação da profundidade de penetração.

O desempenho balístico é avaliado por um fator adimensional, chamado de fator de eficiência balística (q^2), que combina a eficiência da massa (E_m) e da espessura (E_t) do material. Muitas vezes considera-se apenas a E_m . Estas eficiências são calculadas pelas equações 14, 15 e 16 (WILLIAM, 2004 apud TRINDADE, 2012):

$$E_t = \frac{P_{ref} - P_{res}}{T_t} \quad \text{Equação 14}$$

$$E_m = E_t \cdot \frac{\rho_{ref}}{\rho_t} \quad \text{Equação 15}$$

$$q^2 = E_m \cdot E_t \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

P_{ref} = é a profundidade de penetração no alumínio sem a cerâmica;

P_{res} = é a profundidade com a cerâmica;

T_t = dimensão da placa cerâmica;

ρ_{ref} = é a densidade do alumínio;

ρ_t = é a densidade da cerâmica.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

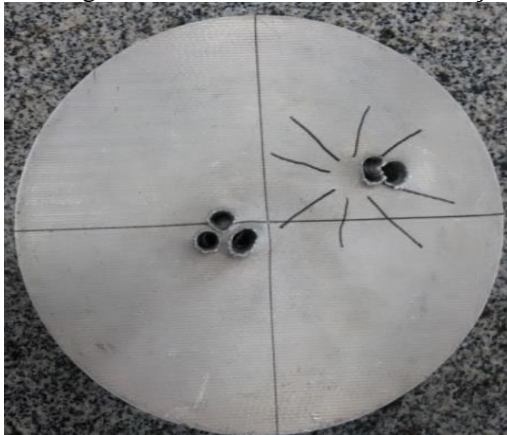
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1 Suporte de alumínio

Antes do tratamento térmico, os tarugos de alumínio apresentavam dureza de $44,4 \pm 0,9$ HB. Após o tratamento, a dureza do alumínio passou para 74 ± 8 HB. A rugosidade superficial medida na direção transversal ao sentido de corte foi de $4,2 \mu\text{m} \pm 2,2$ e $1,1 \mu\text{m} \pm 0,4$ na direção longitudinal. Estes valores são próximos aos obtidos por Justi (2017), que utilizou tarugos com dureza de aproximadamente 73 HB e rugosidade de $4,6 \mu\text{m}$ na direção transversal e $0,4 \mu\text{m}$ na direção longitudinal.

Como referência de eficiência balística para as placas de apoio, foram utilizados os resultados obtidos por Justi (2017). Em seu trabalho Justi (2017) utilizou tarugos de 100 mm de espessura e a profundidade de penetração medida foi de 63 ± 4 mm para o mesmo material utilizado neste trabalho. No presente trabalho, foram utilizados tarugos de alumínio de 50 mm de espessura, sendo realizados três disparos em sequência contra o tarugo para a calibração da mira. Observou-se que os disparos não atingiram o mesmo ponto no alvo, devido aos desvios de trajetória dos projéteis. A distância entre centros das perfurações nos três disparos realizados foi de $15,6 \pm 0,7$ mm (Figura 19).

Figura 19: Tarugo de alumínio utilizado na calibração da mira.



Fonte: Da Autora, 2017.

5.1.2 Propriedades da alumina

Na Tabela 12 são apresentados os valores de densidade aparente, densidade relativa e porosidade para as aluminas de 6, 3 e 2 mm de espessura. Como pode ser observado, os valores encontrados para as aluminas de 6 e 3 mm são semelhantes. As peças de 2 mm de espessura apresentaram maior porosidade, estando provavelmente relacionado com dificuldades da etapa de conformação.

Tabela 12: Valores de densidade aparente, densidade relativa e porosidade, para as aluminas estudadas.

Alumina	$\rho_{\text{aparente}} \text{ (g.cm}^{-3}\text{)}$	$\rho_{\text{relativa}} \text{ (\%)}$	Porosidade (%)
6 mm	3,85	95,1	4,9
3 mm	3,84	94,8	5,2
2 mm	3,82	94,3	5,7

Fonte: Da Autora, 2017.

Medvedovski (2010) estudou o desempenho balístico de aluminas com diferentes teores de pureza. As aluminas com 98,5% de pureza apresentaram densidade de 3,81 a 3,84 g.cm^{-3} , enquanto que aluminas de 98% de pureza apresentaram densidades de 3,78 a 3,82 g.cm^{-3} . Comparando as densidades encontradas com as utilizadas no trabalho de Medvedovski (2010), as densidades das aluminas de 6 e 3 mm estão próximas a da alumina de 98,5% de pureza e a densidade da alumina de 2 mm de espessura esta na faixa da alumina 98%.

Embora tenha ocorrido redução da densidade das aluminas, esta diferença não causou grande variação nas propriedades mecânicas. Na Tabela 13 são apresentadas as propriedades mecânicas das aluminas estudadas.

Tabela 13: Propriedades mecânicas das aluminas estudadas.

Alumina	E (GPa)	Vsom (m.s^{-1})	K_{Ic} ($\text{MPa.m}^{1/2}$)	Microdureza (GPa)
6 mm	329	9945	3,8	11,6
3 mm	319	9816	3,7	13,6
2 mm	318	9832	3,7	14,1

Fonte: Da Autora, 2017.

Justi (2017) utilizou uma alumina com módulo de elasticidade de 337 GPa, tenacidade à fratura de $3,6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ e microdureza Knoop de 14,2 GPa. As propriedades das aluminas utilizadas neste trabalho são semelhantes as das aluminas utilizadas por Justi (2017).

De acordo Krell e Strassburger (2014) o módulo de elasticidade e a dureza, são as propriedades mecânicas de maior significância para resistência balística. Pode-se observar que as propriedades são equivalentes para as condições de alumina testadas. Assim, pode ser esperado que os resultados balísticos encontrados sejam característicos das estruturas estudadas.

Conhecendo-se as propriedades das aluminas, foi possível calcular os valores de fragilidade (B) e capacidade de dissipação de energia balística (D) das aluminas de 6, 3 e 2 mm de espessura (Tabela 14).

Tabela 14: Fragilidade e dissipação de energia balística das aluminas de 6, 3 e 2 mm de espessura.

Alumina	B (10^{-8} m^{-1})	D (10^{-12} s^{-1})
6 mm	2,64	0,95
3 mm	3,09	1,09
2 mm	3,20	1,13

Fonte: Da Autora, 2017.

A fragilidade e a capacidade de dissipação de energia balística são relações das propriedades mecânicas. Como entre as propriedades das aluminas de 6, 3 e 2 mm de espessura não ocorreu uma variação significativa, os valores de B e D são semelhantes. Os resultados encontrados por Justi (2017), tratando-se das placas de mosaico, foi de fragilidade igual a $4 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$ e capacidade de dissipação de energia de $1,5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$.

Na Tabela 15 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à flexão das aluminas de 6, 3 e 2 mm de espessura e das configurações estudadas. Pode-se observar que a carga de ruptura diminuiu com a redução da espessura. No caso das estruturas multicamadas, o aumento da espessura do epóxi e a adição de fibra de vidro causaram um aumento na carga de ruptura.

Tabela 15: Resultados do ensaio de resistência à flexão.

Amostras	Al ₂ O ₃ de 6 mm		Al ₂ O ₃ de 3 mm		Al ₂ O ₃ de 2 mm	
	$\sigma_{flexão}$ (MPa)	Carga (kgf)	$\sigma_{flexão}$ (MPa)	Carga (kgf)	$\sigma_{flexão}$ (MPa)	Carga (kgf)
Placa monolítica	247	334	189	61	166	24
Epóxi 0,5 mm	-	-	106	179	89	165
Epóxi 1,0 mm	-	-	96	187	75	182
Epóxi 0,5 mm + Fibra	-	-	124	202	102	203

Fonte: Da Autora, 2017.

*Teste F indicou variância equivalentes, sendo o desvio-padrão também equivalente e igual a 14 MPa.

Utilizando os valores de carga de ruptura das placas de 3 e 2 mm de espessura e das estruturas multicamadas, foi feita uma estimativa para encontrar valores de carga de ruptura para estruturas com 2 e 3 camadas com placas de alumina de 6 mm. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 16. Neste caso, também se pode observar que ocorre um aumento na carga de ruptura com o aumento da espessura de epóxi e adição de fibra.

Tabela 16: Estimativa dos valores de carga de ruptura para estruturas com camadas de 6 mm de alumina.

	Epóxi 0,5 mm	Epóxi 1,0 mm	Epóxi + fibra
2 camadas de 6 mm	725	735	748
3 camadas de 6 mm	761	778	799

Fonte: Da Autora, 2017.

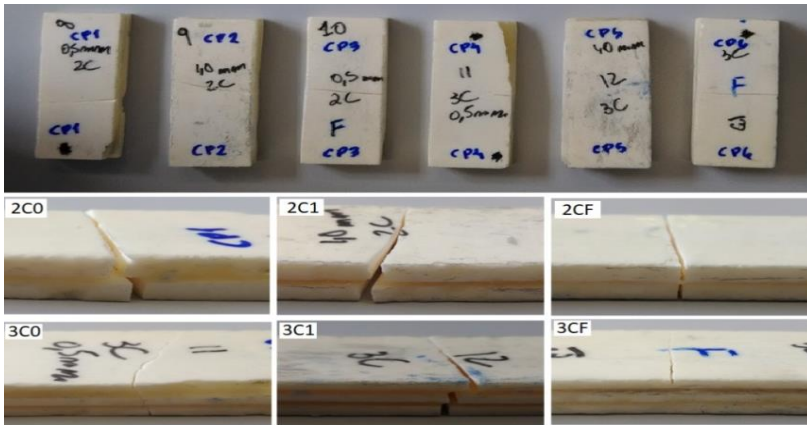
*Estimativa das cargas de ruptura em kgf.

As aluminas de 6, 3 e 2 mm de espessura apresentaram tamanho de defeito de $7,59 \times 10^{-5}$, $1,08 \times 10^{-4}$ e $1,36 \times 10^{-4}$ m, respectivamente. Com a redução da espessura da peça, o tamanho do defeito natural aumentou. As propriedades mecânicas foram afetadas devido a sua dependência do tamanho de defeito natural. No trabalho de Fabris (2017), o aumento do tamanho de partícula inicial da alumina pura resultou em menor defeito natural, ao contrário do que seria esperado. Isso ocorreu pela maior porosidade da alumina 0,5 μ m em relação a alumina 1,7 μ m, onde foram

obtidos tamanhos de defeito natural de respectivamente 117,1 e 99,8 μm . Os resultados de ensaio balístico mostraram que até 7 vol% de adição de vitrocerâmico não afetam o desempenho dos sistemas em mosaico.

A fragilidade e baixa resistência à tração da cerâmica limitam a sua capacidade de absorção de energia (KAUFMANN et al., 2003). Conforme Minatto (2015) em cerâmicas multicamadas a fratura ocorre por etapas, devido ao desvio da trajetória da trinca em propagação camada após camada. Este mecanismo de fratura pode ser observado na Figura 20.

Figura 20: Imagens das estruturas multicamadas após ensaio de resistência à flexão.



Fonte: Da Autora, 2017.

Foi realizada uma regressão linear para avaliar efeito da espessura da alumina (X1), espessura do epóxi (X2) e adição de fibra (X3) no módulo de resistência à flexão (MRF). Na Tabela 17 são apresentados os resultados da análise estatística.

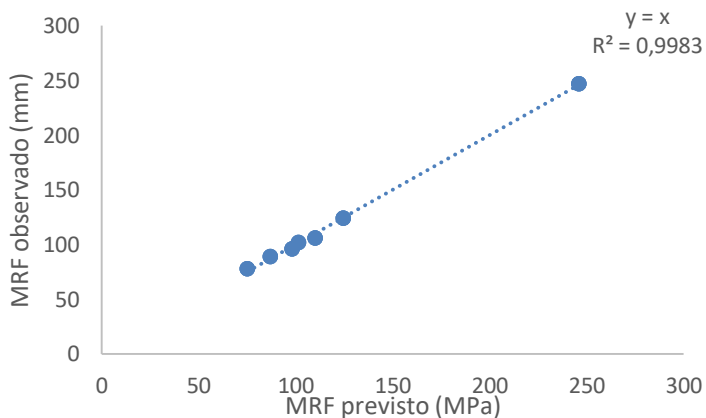
Tabela 17: Regressão linear para avaliar efeito da espessura da alumina, espessura do epóxi e adição de fibra na resistência a flexão.

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	80,7	2,60	31,02	2,08E-16
X1 ²	4,59	0,084	54,9	1,42E-20
X2	-24,0	2,71	-8,9	8,81E-08
X3	14,5	1,39	10,4	8,31E-09

Fonte: Da Autora, 2017.

A Figura 21 mostra os resíduos de MRF previsto versus MRF observado.

Figura 21: Plot dos resíduos de MRF previsto vs. MRF observado.

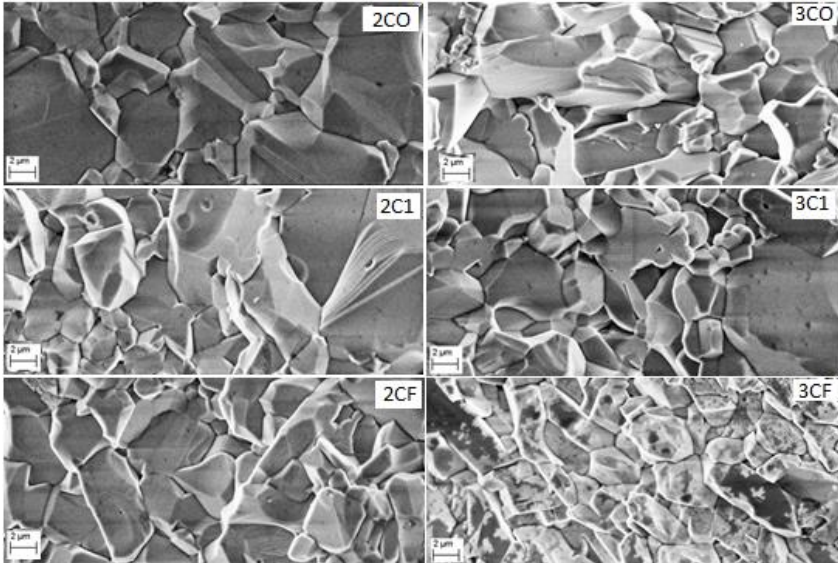


Fonte: Da Autora, 2017.

Pode-se observar que os três fatores apresentaram correlação com o MRF do sistema, pois apresentaram valores para p menor que 0,05.

Na Figura 22 são apresentadas as micrografias (MEV) das superfícies fraturadas após ensaio de resistência à flexão das estruturas multicamadas de Al_2O_3 /epóxi e Al_2O_3 /epóxi/fibra de vidro.

Figura 22: Micrografias (MEV) das superfícies fraturadas após ensaio de resistência à flexão das estruturas multicamadas.



Fonte: Da Autora, 2017.

As micrografias das superfícies de fratura após o ensaio de flexão não demonstram variações significativas no modo de fratura da alumina, podendo ser observadas fraturas intergranulares. Conforme Kraft e Molinari (2008), a fratura da alumina é tipicamente mista, possuindo regiões de fratura intergranulares e transgranulares. O teor de cada modo de fratura afeta a resistência à fratura do material. Fraturas intergranulares requerem maior energia devido ao caminho percorrido total ser maior. Porém, uma interface muito fraca entre grãos pode resultar em baixa energia para propagação de trincas apesar da fratura intergranular.

5.2 ENSAIO BALÍSTICO

Na Tabela 18 são apresentadas a velocidade média e a energia cinética inicial dos projéteis durante o ensaio balístico para cada condição experimental. De acordo com a norma NIJ 0108.01 para o nível IV a velocidade do projétil deve ser de 868 ± 15 m/s. A energia cinética média, utilizada no ensaio balístico e calculada com base na velocidade média e massa do projétil (9,8 g), foi igual a 3654 J. Os valores de velocidade são similares ao especificado pela norma.

Tabela 18: Velocidades do projétil durante ensaio balístico para cada condição experimental.

Amostras	V₁ (m/s)	V₂ (m/s)	V₃ (m/s)	V_m (m/s)	E (J)
REF	870	869	860	866±6	3638±460
2C0	876	858	865	866±9	3638±77
2C1	874	862	857	864±8	3623±71
2CF	884	865	856	869±14	3658±118
3C0	884	860	860	868±14	3651±118
3C1	889	876	865	877±12	3726±101
3CF	876	861	862	866±9	3639±74

Fonte: Da Autora, 2017.

Os resultados do ensaio balístico para as aluminas monolíticas e estruturas multicamadas estudadas, são apresentados na Tabela 19. Os ensaios foram realizados em triplicata, para cada configuração estudada foram montados três painéis (A, B e C conforme apresentado na Tabela 19).

Tabela 19: Resultados do ensaio balístico das aluminas monolíticas e das estruturas multicamadas estudadas.

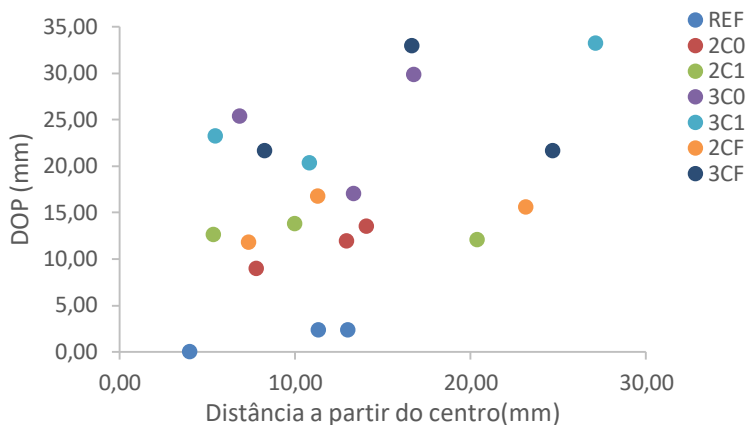
Amostras	Reforço epóxi	dcone (mm)	Vol. (cm ³)	d (mm)	DOP (mm)	Et	Em	q ²
REF/A	Não	55,89	5,64	13,0	2,34	10,11	7,12	71,95
REF/B	Sim	52,47	6,49	11,3	2,36	10,11	7,11	71,90
REF/C	Sim	59,83	6,86	3,96	0,00	10,50	7,39	77,60
2C0/A	Sim	57,40	6,22	12,9	22,46	8,52	6,01	51,19
2C0/B	Sim	63,57	13,48	7,75	28,88	9,01	6,36	57,29
2C0/C	Não	70,71	11,67	14,05	21,47	8,25	5,82	48,07
2C1/A	Sim	51,86	8,18	9,95	27,82	8,20	5,79	47,45
2C1/B	Sim	59,43	9,61	5,32	31,81	8,40	5,93	49,84
2C1/C	Não	-	-	20,4	15,76	8,49	5,99	50,91
3C0/A	Sim	48,46	7,17	6,82	28,54	6,28	4,45	27,93
3C0/B	Sim	45,95	8,96	13,33	27,94	7,67	5,44	41,70
3C0/C	Não	-	-	16,76	18,75	5,53	3,92	21,67
3C1/A	Não	-	-	27,09	8,80	4,97	3,53	17,54
3C1/B	Sim	61,45	9,50	5,43	30,59	6,63	4,70	31,18
3C1/C	Sim	49,34	7,83	10,8	25,60	7,12	5,05	35,93
2CF/A	Sim	70,71	11,49	7,32	28,16	8,53	6,02	51,39
2CF/B	Sim	49,10	6,26	11,23	24,07	7,71	5,44	41,95
2CF/C	Não	-	-	23,1	14,52	7,90	5,58	44,06
3CF/A	Sim	51,81	4,45	16,6	20,03	5,01	3,56	17,82
3CF/B	Sim	58,73	6,66	8,23	27,64	6,90	4,90	33,78
3CF/C	Não	-	-	24,6	13,11	6,89	4,89	33,68

Fonte: Da Autora, 2017.

* Para as amostras 2C1/C, 3C0/C e 3C1/A, não foi possível medir a diagonal e o volume do cone de fratura, devido ao desprendimento das placas do mosaico.

Os resultados balísticos demonstraram que para todas as condições experimentais, a utilização de reforço de epóxi não apresentou aumento da resistência balística. No entanto, a dispersão entre os resultados está fortemente correlacionada com a posição que o projétil atinge o alvo. Pode-se observar na Figura 23 que o distanciamento do ponto atingido pelo projétil em relação ao centro da placa alvo reduziu o desempenho balístico.

Figura 23: Profundidade de penetração vs. distância a partir do centro.



Fonte: Da Autora, 2017.

Conforme mostrado na Figura 24, as placas de referência apresentaram melhor resistência balística, pois a profundidade de penetração foi menor comparado aos sistemas multicamadas. A alumina de referência não apresentou variações de resistência balística significativas pela utilização de reforço de epóxi, pois as amostras REF/A e REF/B apresentaram DOP similares. No entanto, o distanciamento do ponto atingido pelo projétil em relação ao centro da placa alvo reduziu o desempenho balístico. A placa que foi atingida mais no centro ($d=3,96$ mm) apresentou a menor DOP (~ 0).

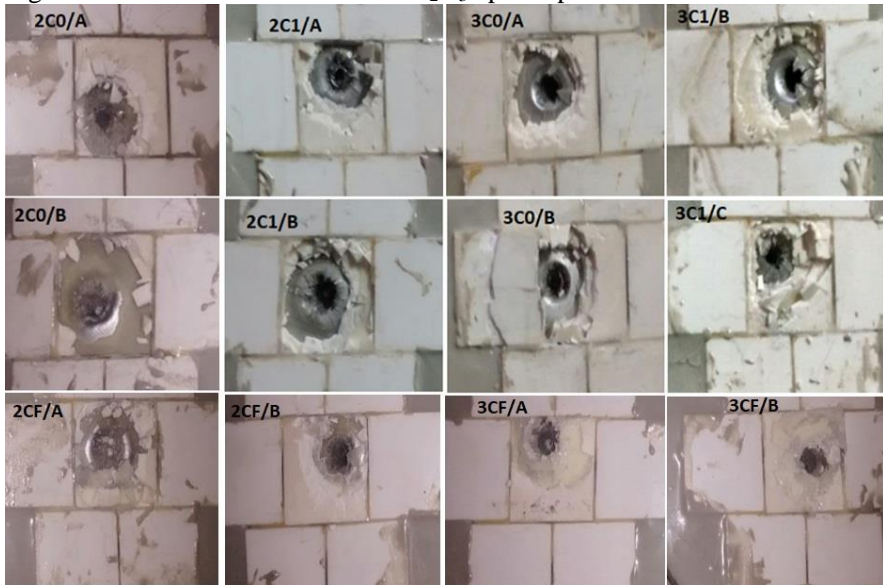
Figura 24: Imagem dos painéis após ensaio balístico.



Fonte: Da Autora, 2017.

No caso das estruturas multicamadas, o aumento do número de camadas resultou na diminuição da resistência balística (Figura 25). As estruturas de 2 camadas de alumina e epóxi apresentaram DOP entre 11,80-16,74 mm, enquanto que o DOP das estruturas de 3 camadas e epóxi foi de 17,00 a 33,17 mm. Com o aumento do número de camadas ocorreu uma diminuição na propagação dos danos ao longo da placa cerâmica, pois o diâmetro do cone de fraturas foi reduzido.

Figura 25: Painel multicamadas de Al_2O_3 /epóxi após ensaio balístico.

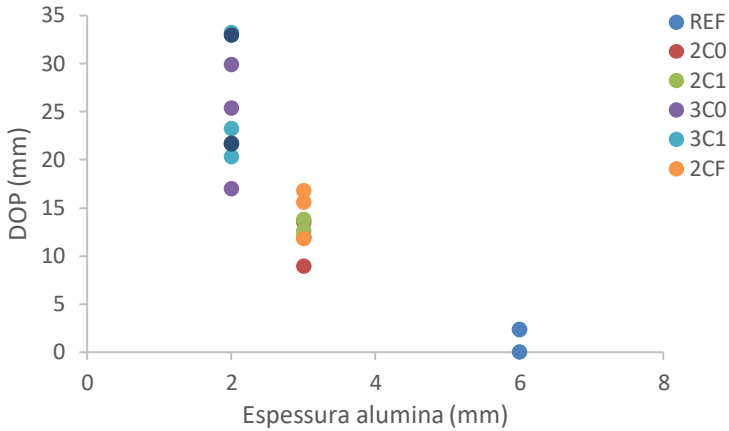


Fonte: Da Autora, 2017.

Akella (2017) observou que em cerâmicas multicamadas, com o aumento do número de camadas, a absorção de energia aumenta devido a introdução de interfaces, a resistência à penetração diminui e a área danificada é reduzida consideravelmente.

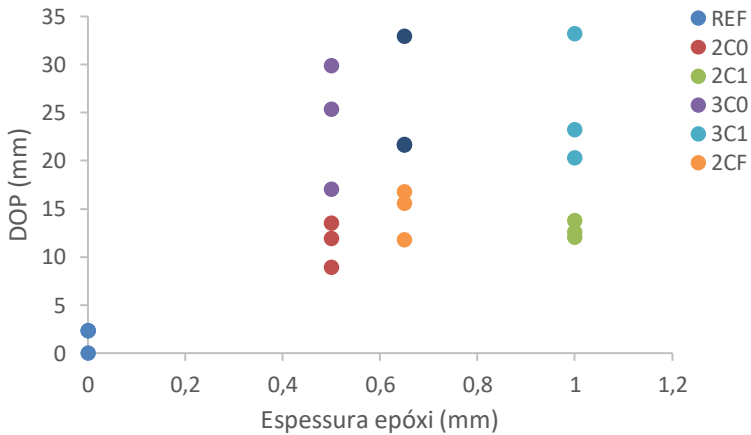
Os dados de profundidade de penetração (DOP) vs. espessura da camada de alumina plotados são apresentados na Figura 26. A variação da DOP com a variação das espessuras é apresentada na Figura 27. Analisando os gráficos da Figura 26 e 27 ficou evidente que a profundidade de penetração está diretamente relacionada com a redução da espessura da camada de alumina. Pode-se observar que conforme a espessura da alumina é reduzida ocorre um aumento na DOP.

Figura 26: Profundidade de penetração vs. espessura da alumina.



Fonte: Da Autora, 2017.

Figura 27: Profundidade de penetração vs. espessura epóxi.



Fonte: Da Autora, 2017.

Por meio de regressão linear foram verificados quais fatores tiveram efeito significativo no desempenho balístico das aluminas estudadas. Os fatores investigados foram: a velocidade do projétil (X1), a espessura da alumina (X2), a distância do centro (X3), a espessura da camada de epóxi (X4) e a adição de fibra de vidro (X5). Os resultados da análise estatística são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20: Resultados da regressão linear para avaliar o efeito das variáveis analisadas no desempenho balístico.

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	-111,83	77,04	-1,45	0,169
X1	0,19	0,09	2,18	0,047
X2	-20,26	4,64	-4,37	0,001
X2 ²	1,90	0,61	3,11	0,008
X3	0,27	0,13	2,06	0,059
X4	0,89	4,25	0,21	0,837
X5	8,84	14,25	0,62	0,545

Fonte: Da Autora, 2017.

Considerando uma confiabilidade estatística de 95% ($P < 0,05$), pode-se comprovar que os fatores, exceto a espessura da camada de epóxi e a adição de fibra, apresentaram efeito significativo no desempenho balístico. Sendo assim, foi realizada uma análise desconsiderando o efeito do epóxi e da fibra para verificar se ocorria uma melhora do modelo (Tabela 21).

Tabela 21: Resultados da regressão linear desconsiderando o efeito da espessura da camada de epóxi.

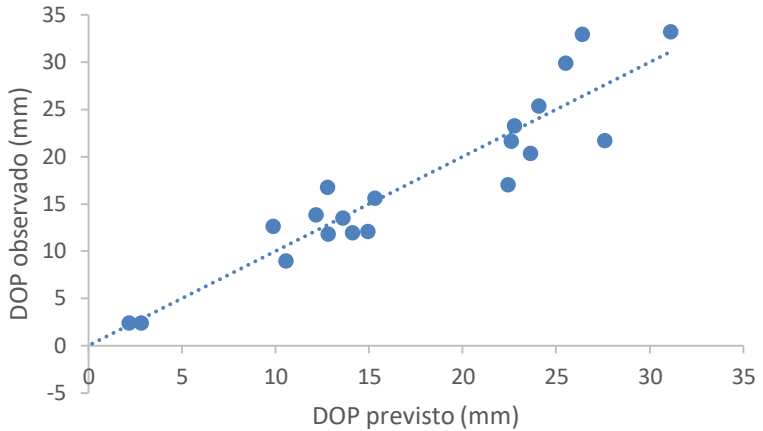
	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	-111,89	72,40	-1,5455	0,14
X1	0,19	0,08	2,3325	0,0331
X2	-19,77	4,17	-4,7472	0,0002
X2 ²	1,81	0,51	3,5277	0,0028
X3	0,29	0,12	2,3524	0,032

Fonte: Da Autora, 2017.

Pode-se verificar (Tabela 21), que desconsiderando a espessura da camada de epóxi e a adição de fibra ocorreu uma diminuição nos valores de P. Não ocorreu variação no ajuste do modelo.

Na Figura 28 é apresentado o gráfico dos resíduos da DOP previsto vs. o DOP esperado.

Figura 28: Resíduos do DOP previsto vs. DOP observado.

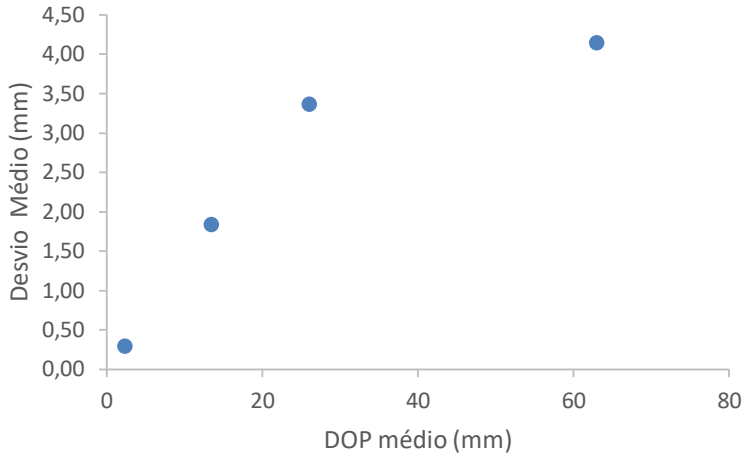


Fonte: Da Autora, 2017.

O desempenho balístico de um sistema composto cerâmica/metal não depende exclusivamente das propriedades e configuração do material cerâmico. As características do material de suporte também podem afetar o desempenho do sistema de proteção. As análises descritas acima não consideraram o efeito do alumínio.

Sendo assim, utilizando os resultados de DOP para os suportes de alumínio sem placa cerâmica, obtidos por Jiusti (2017), foi realizada uma análise estatística comparando com os resultados obtidos neste trabalho. Conforme mostrado na Figura 29, o resíduo do modelo aumenta com o aumento da profundidade de penetração. Pode-se observar que quanto maior o DOP maior será a dispersão nos valores medidos.

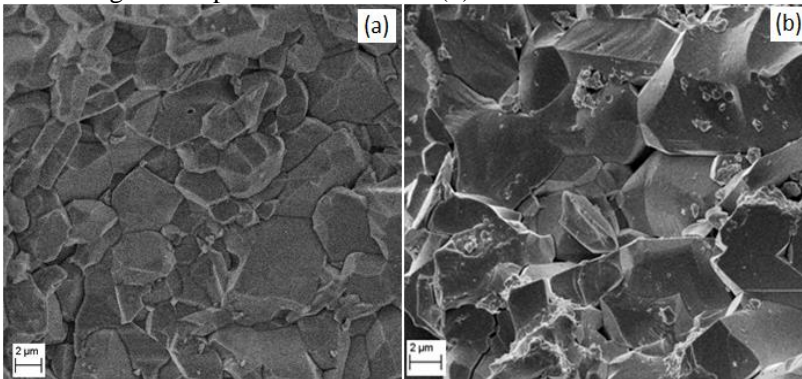
Figura 29: Resíduos DOP observado vs. DOP previsto.



Fonte: Da Autora, 2017.

Na Figura 30 é apresentada a micrografia da alumina monolítica (a) e da trinca radial de um fragmento após ensaio balístico (b).

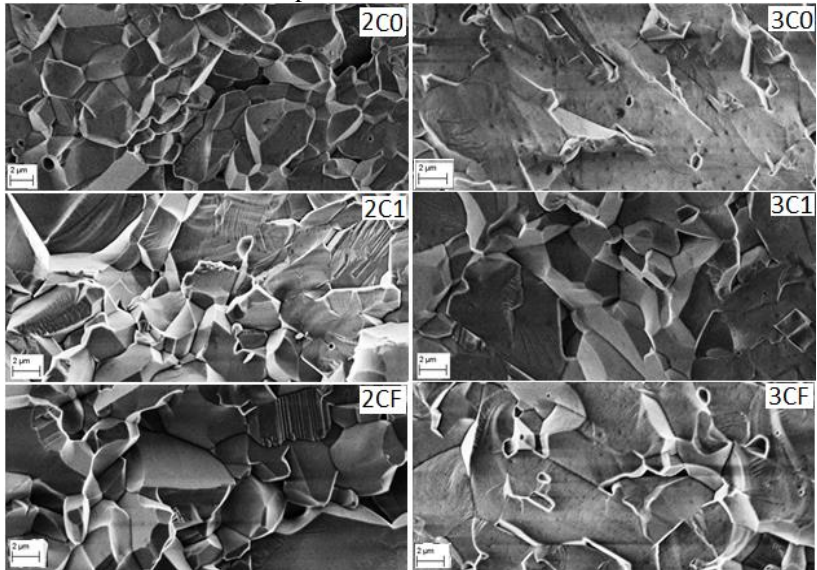
Figura 30: Micrografia (MEV) da alumina monolítica (a) e trinca radial de um fragmento após ensaio balístico (b).



Fonte: Da Autora, 2017.

Na Figura 31 são apresentadas as micrografias dos fragmentos das cerâmicas multicamadas provenientes do ensaio balístico.

Figura 31: Micrografias (MEV) da trinca radial dos fragmentos das estruturas multicamadas após ensaio balístico.



Fonte: Da Autora, 2017.

Analisando as micrografias (Figura 31) dos fragmentos das cerâmicas multicamadas provenientes do ensaio balístico, pode-se observar que:

- As microestruturas dos fragmentos de três camadas de alumina apresentaram mais poros comparadas com as de duas camadas. Isto ocorreu porque a camada de alumina é mais fina (2 mm de espessura), o que aumenta a tendência de defeitos de prensagem devido a dificuldade de distribuição do pó na prensa.
- Pode-se também observar que na microestrutura da alumina de 2 mm aparecem grãos maiores, e por isso ocorreram mais fraturas transgranulares.
- Pode-se observar que nas condições 3C0 e 3CF predominou a fratura do tipo transgranular. A condição 2C0 é semelhante à monolítica e apresenta menor quantidade de fratura transgranular que as 2C1 e 2CF.
- Comparando os fragmentos das estruturas com e sem adição de fibra de vidro, as amostras com 0,5 mm se assemelham mais com as de fibra do que as de 1 mm de espessura de epóxi. No

caso da alumina de 2 camadas predomina fratura intergranular. Enquanto que, nas aluminas de três camadas predomina fratura transgranular. Porém, com a camada de 1 mm de epóxi a situação inverte: 3 camadas intergranular e 2 camadas com pequena tendência a ter fratura transgranular em alguns pontos da microestrutura.

Analisando as micrografias dos fragmentos de cerâmica, ficou evidente que a forma em que os sistemas multicamadas foram montados, favoreceu a formação de fraturas intragranular. O que acabou prejudicando o desempenho do conjunto. Nos ensaios de flexção das peças, não foram observadas fraturas intragranulares, apenas no ensaio balístico.

6. CONCLUSÃO

Estruturas multicamadas alumina/epóxi para aplicação balística foram obtidas e testadas em comparação à alumina monolítica em painéis alumina/alumínio. O ensaio de profundidade de penetração (DOP) foi utilizado para a determinação do desempenho balístico.

As propriedades mecânicas das aluminas estudadas não variaram significativamente com a redução da espessura. As propriedades mais relevantes no desempenho balístico, ou seja, a dureza e o módulo de elasticidade são equivalentes para as condições de alumina testadas. Isto indica que os resultados balísticos encontrados foram característicos das estruturas estudadas. As placas com espessura reduzida apresentaram maior defeito natural com a redução da espessura da alumina o que justifica a redução na resistência à flexão.

Os testes balísticos demonstraram que as aluminas monolíticas apresentaram maior resistência balística. Pode-se observar que em todas as condições experimentais a utilização de reforço de epóxi não apresentou variações significativas de resistência balística. No entanto, o distanciamento do ponto atingindo pelo projétil em relação ao centro da placa alvo reduziu o desempenho balístico.

No caso das estruturas multicamadas, o aumento do número de camadas resultou na diminuição da resistência balística. As estruturas de 2 camadas de alumina e epóxi apresentaram DOP entre 11,80-16,74 mm, enquanto que o DOP das estruturas de 3 camadas e epóxi foi de 17,00 a 33,17 mm. Com o aumento do número de camadas ocorreu uma diminuição na propagação dos danos ao longo da placa cerâmica, pois o diâmetro do cone de fraturas foi reduzido.

As estruturas com 0,5 mm de epóxi apresentaram melhor desempenho balístico entre as estruturas multicamadas testadas. O aumento da camada adesiva resultou em um aumento da DOP. Para as condições de 2 camadas de alumina, a DOP variou de 8,94 a 13,48 mm para 0,5 mm de camada de epóxi e de 12,58-13,80 mm para 1 mm de camada de epóxi. A elevada espessura da camada de epóxi aumentou a parcela de fratura por esforço de flexão durante o impacto. Dessa forma, os conjuntos com espessura reduzida (aluminas de 2 mm) apresentaram pior desempenho balístico.

A adição de fibra de vidro às estruturas multicamadas com 0,5 mm de epóxi e 2 e 3 camadas de alumina não afetou o desempenho balístico. O diâmetro de cone de fratura foi reduzido para estas condições. Embora a fibra não apresente resistência balística, esta contribuiu com o confinamento, contendo os fragmentos de cerâmica.

Por fim, o sistema multicamadas em alumina poderia ter apresentado uma performance melhorada se as espessuras da alumina fosse reduzida sem o aumento do tamanho do defeito natural e a camada de epóxi ou adesiva muito fina (0,1 mm ou menos).

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos neste estudo as sugestões para realização de trabalhos futuros são:

- Avaliar a resistência a múltiplos disparos das estruturas multicamadas, utilizando placas com dimensões maiores do que as utilizadas neste trabalho;
- Estudar o efeito da redução da camada de epóxi no desempenho das estruturas multicamadas;
- Estudar o desempenho de estruturas multicamadas com reforço, substituindo a fibra de vidro por outro material que apresente resistência balística, como por exemplo kevlar;
- Avaliar o efeito do número de camadas e das espessuras no desempenho balístico utilizando simulação computacional.

REFERÊNCIAS

- AKELLA, K. Studies for improved damage tolerance of ceramics against ballistic impact using layers. **Procedia Engineering**, v. 173, p. 244-250, 2017.
- ASM. ASM Handbook Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation ASM International, 2000.
- ASMANI, M. et al. Influence of porosity on Young's modulus and Poisson's ratio in alumina ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 21, p. 1081–1086, 2001.
- National Institute of Justice (EUA). **Ballistic Resistant Protective Materials**: NIJ Standard 0108.01, 1985.
- CHANG, L. -S. et al. Characterization of alumina ceramics by ultrasonic testing. **Materials Characterization**, v. 45, p. 221-226, 2000.
- COUTO, C.A.O. **Estudo de blindagem para proteção contra impactos de micrometeoróides em satélites artificiais**. 2011. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- CROUCH, I. G.; KESHARAJU, M.; NAGARAJAH, R. Characterisation, significance and detection of manufacturing defects in Reaction Sintered Silicon Carbide armour materials. **Ceramics International**, v. 41, p. 11581–11591, 2015.
- Crouch, I. Laminated materials and layered structures. In: I.Crouch. **The Science of Armour Materials**. p. 675-692. Victoria, Australia: Armour Solutions Pty Ltd, 2017.
- DA FONSECA, M.B.A. Fabricação e caracterização de sistemas cerâmicos à base de alumina para emprego em blindagem balística. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- FABRIS, D.C.N. Efeito da adição de precursor vitrocerâmico de cordierita na densificação e nas propriedades mecânicas de alumina para

uso balístico. 128 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2017.

GONÇALVES, D.P.; DE MELO, F.C.L.; KLEIN, A.N.; AL-QURESHI, H.A. Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, V. 44, P. 307–316, 2004.

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.

Gooch, W.A., Burkins, M.S. **Dynamic X-ray imaging of tungsten carbide projectiles penetrating boron carbid.** Paper Presented at the 13th Annual Ground Vehicle Survivability Symposium, Monterey, CA, USA, April 2002.

GORIK, A.V.; GRIGOR'EV, O.N.; OSTROVOI, D. YU. Experimental and theoretical studies on the nonlinear stress-strain state of a laminated ceramic composite. **Probl. Prochn.** v.6, p.29-40, 2001.

GRUJICIC, M.; PANDURANGAN, B.; D'ENTREMONT, B. The role of adhesive in the ballistic/structural performance of ceramic/polymer-matrix composite hybrid armor. **Materials and Design**, v. 41, p. 380–393, 2012.

HAZELL, P. J.; ROBERSON, C. J.; MOUTINHO, M. The design of mosaic armour: The influence of tile size on ballistic performance. **Materials & Design**, v. 29, n. 8, p. 1497–1503, 2008.

IGNATOVA, A.V.; SAPOZHNIKOV, S.B.; DOLGANINA, N. Yu. Development of microstructural and voxel based models of deformation and failure of the porous ceramics for assessment of ballistic performance. **International Journal of Mechanical Sciences.** p.29, 2017.

JIUSTI, J. et al. Ballistic performance of Al₂O₃ mosaic armors with gap-filling materials. **Ceramics International**, n. November, p. 0–1, 2017.

KRAFT, R. H.; MOLINARI, J. F. A statistical investigation of the effects of grain boundary properties on transgranular fracture. *Acta Materialia*, v. 56, n. 17, p. 4739–4749, 2008.

LEVY NETO, Flávio; PARDINI, Luiz Claudio. *Compósitos Estruturais. Ciência e Tecnologia*. 1ª ed.: São Paulo. Ed. Edgard Blücher, 2006.

LIU, W. et al. Influence of different back laminate layers on ballistic performance of ceramic composite armor. *Materials & Design*, 2015.

LOPEZ-PUENTE, J. et al. The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study. **International Journal of Impact Engineering**, v. 32, n. 1-4, p. 321–336, 2005.

MEDVEDOVSKI, E. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1. **Ceramics International**, v. 36, p. 2103–2115, 2010.

MINATTO, F.D. *Compósito cerâmico multicamada alumina/LZSA: estudo das composições das camadas*. 107 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2015.

Acessado em 23 de março de 2017:
<http://www.redeleas.com.br/lojavirtual/tecido-de-fibra-de-vidro-110-m-linear-5x0-65-m.html>.

SILVA, M. V.; STAINER, D.; AL-QURESHI, H. A.; HOTZA, D. Blindagens cerâmicas para aplicações balísticas: uma revisão. **Cerâmica**, v. 60, p. 323-331, 2014.

SOARES, I.M. *Produção e caracterização de compósitos de matriz epóxi reforçada com fibra de rami para fins de reforço estrutural*. p. 23. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

TAN, Z.H.; HAN, X.; ZHANG, W.; LUO, S.H. An investigation on failure mechanisms of ceramic/metal armour subjected to the impact of

tungsten projectile. **International Journal of Impact Engineering**, v. 37, p. 1162-1169, 2010.

TRINDADE, W. **Influência da geometria e da microestrutura no comportamento dinâmico da alumina aditivada com nióbia**. [s.l.] Instituto Militar de Engenharia - Rio de Janeiro, 2012.

ÜBEYLI, M.; YILDIRIM, R. O.; ÖGEL, B. Investigation on the ballistic behavior of Al₂O₃/Al₂O₂₄ laminated composites. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 196, p. 356–364, 2008.

VYSHNYAKOV, L.R.; MAZNA, A.V.; NESHPOR, A.V.; KOKHANYI, V.A.; OLEKSYUK, O.N. Influence of structural and technological factors on the efficiency of armor elements based on ceramics. **Strength of Materials**, v. 36, n.6, 2004.

WILKINS, M.L. Mechanics of penetration and perforation. **International Journal of Engineering Science**, v. 16, p. 793–807, 1978.

WOODWARD, R.L. A simple one-dimensional approach to modeling ceramic composite armour defeat. **International Journal of Impact Engineering**, v. 9, n. 4, p. 455-475, 1990.

YADAV, S.; RAVICHANDRAN, G. Penetration resistance of laminated ceramic/polymer structures. **International Journal of Impact Engineering**, v. 28, p. 557-574, 2003.

ZAERA, R.; SÁNCHEZ-SÁEZ, S.; PÉREZ-CASTELLANOS, J.L.; NAVARRO, C. Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armours subjected to impact. **Composites: Part A**, v. 31, p. 823–833, 2000.

HIRATA, Y.; SHIMONOSONO, T. Theoretical prediction of compressive strength, Young's modulus and strain at fracture of sintered porous alumina compacts. **Ceramics International**, v. 42, p. 3014–3018, 2016.