

DESENVOLVIMENTO DE UMA CERÂMICA A BASE DE ALUMINA PARA APLICAÇÃO EM BLINDAGEM BALÍSTICA

Daniel Bürger, bur.daniel@gmail.com¹
Maurício Vicente Donadon, donadon@ita.br²
Sérgio Frascino Muller de Almeida, frascino@ita.br²
Francisco Cristóvão Lourenço de Melo, frapi@iae.cta.br¹

¹Instituto de Aeronáutica e Espaço, Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias - CEP 12.228-904 – São José dos Campos – SP – Brasil

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias - CEP 12.228-900 – São José dos Campos – SP – Brasil

Resumo: Neste trabalho foram avaliadas composições cerâmicas a base de alumina, com tamanhos de grão diferentes, para aplicação em blindagem balística. As cerâmicas foram avaliadas quanto à massa específica, dureza, microscopia eletrônica de varredura, módulo de elasticidade e tensão de ruptura. A composição que apresentou o melhor desempenho, com tensão de ruptura de 280MPa, foi utilizada para confecção de blindagens visando proteção contra projéteis 7.62 x 51 mm perfurantes (AP). As blindagens foram produzidas com 2 espessuras de cerâmicas, 5 e 10 mm, além de uma base de polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE). Paralelamente os impactos foram simulados utilizando-se um modelo de elementos finitos, para prever o comportamento da blindagem e do projétil durante o impacto.

Palavras-chave: Alumina, cerâmica, blindagem balística, munição perfurante.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente as blindagens balísticas mais eficientes, considerando-se o peso, são feitas a base de fibra, em especial a aramida e o polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMWPE). Entretanto estas blindagens são eficientes apenas quando a munição utilizada é comum. Quando são usados projéteis perfurantes, que contêm um núcleo com um material de dureza mais elevada, a blindagem deixa de atuar da forma desejada. Para contornar este problema utilizam-se blindagens compostas por mais de um material, normalmente uma placa cerâmica, de elevada dureza que fragmenta o projétil, e uma base de material composto que absorve a energia dos fragmentos e impede a passagem destes pela blindagem. Neste trabalho foi feito o desenvolvimento de uma cerâmica a base de alumina (Al_2O_3) para utilização em blindagens balísticas contra projéteis perfurantes 7.62 x 51 mm (AP), além de uma simulação em elementos finitos do impacto balístico.

2. PROCESSAMENTO DOS MATERIAIS

2.1. Cerâmica

Foram utilizados dois tipos de alumina (A e B) com diferentes tamanhos de grão, fornecido pela Altamis, sendo que a alumina A possui tamanho de grão menor que a B. Foram feitas amostras nas proporções mostradas na Tab (1).

Tabela 1. Descrição das amostras ensaiadas

Amostra	Alumina A (%)	Alumina B (%)
1	100	0
2	95	5
3	90	10
4	85	15
5	80	20
6	70	30
7	0	100

As composições analisadas foram misturadas em um moinho de bolas durante 30 minutos, sendo então peneiradas e prensadas uniaxialmente a 40MPa e, após isso, isostaticamente a 300MPa. As amostras foram sinterizadas durante uma hora a 1600°C com taxa de aquecimento de 30°C/min. Após a sinterização o forno foi desligado e deixado resfriar naturalmente.

Foram feitos os seguintes ensaios nas amostras:

- massa específica, pelo método de Archimedes segundo a norma ASTM C343-82;
- microdureza Vickers com carga de 0,5kg e tempo de indentação de 10 segundos;
- flexão em quatro pontos, determinando a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade;
- microscopia eletrônica de varredura.

Após a realização dos ensaios os resultados foram analisados e foram produzidas placas com a cerâmica que apresentou o melhor desempenho.

2.2. Compósito

O compósito utilizado foi o Dyneema®, fornecido pela DSM. A base de compósito foi feita empilhando-se 72 camadas de Dyneema®. O material foi processado de acordo com as especificações do fabricante, DSM corporate. e consiste de:

- desenrolar o tecido, cortá-lo nas dimensões adequadas (0,45 x 0,45m) e empilhá-lo em camadas;
- aquecer a prensa a 125°C;
- aplicar uma pressão de 1MPa até que o centro do painel atinja 125°C;
- aplicar uma pressão de 16,5MPa por 20 minutos;
- desligar o sistema de aquecimento da prensa e manter a pressão até que o centro atinja 65°C;
- desmoldar a placa.

3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Para a simulação do modelo foi utilizado o *software* ABAQUS. Para o modelo foram usados elementos hexaedrais, chamados na biblioteca do ABAQUS de C3D8R. A única região do modelo que não usou estes elementos foi a ponta do projétil, que, devido ao seu formato, requereu o uso de elementos tetraedrais, chamados de C3D4.

Para poupar recursos computacionais, o modelo foi dividido em quatro partes, e simulado apenas um quarto do modelo. Para tanto, foram usadas condições de contorno de simetria, tanto ao alvo quanto ao projétil. As faces externas do alvo foram consideradas engastadas.

O contato utilizado foi *contac inclusion* com erosão nodal, disponível na biblioteca do ABAQUS. A configuração simulada é apresentada na Fig. (1). Para cada tipo de material envolvido na simulação (metal, cerâmica, adesivo e compósito) foi utilizado um modelo de material.

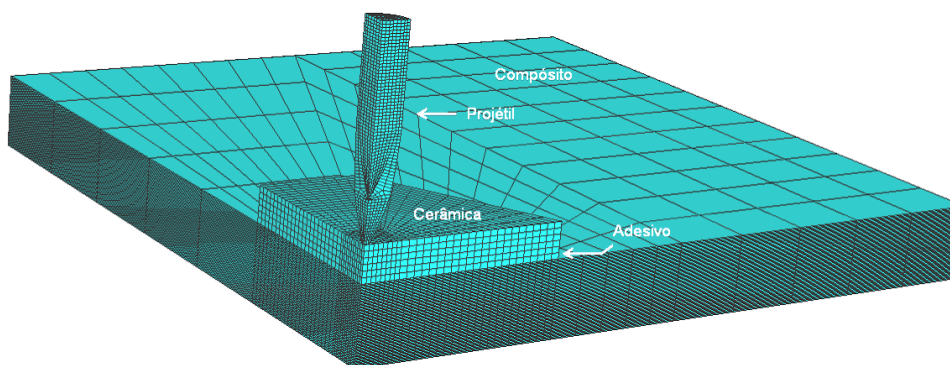


Figura 1. Configuração simulada.

3.1. Modelo da cerâmica

Para a simulação do comportamento da cerâmica foi utilizado o modelo desenvolvido por Johnson e Holmquist (1994) chamado JH-2. Este modelo é adequado para descrever o comportamento de materiais frágeis quando sujeitos a cargas de compressão. As principais características do modelo são: resistência do material dependente da pressão, dano e fratura, resistência significativa do material após a fratura, efeitos de taxa de deformação e de volume. A tensão equivalente normalizada é definida pela Eq. (1), onde σ_i^* é a tensão normalizada inicial, σ_f^* é a tensão normalizada residual e D é o dano.

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (1)$$

O dano acumula de forma semelhante ao modelo de falha de Johnson e Cook (1985) e é dado pela Eq. (2), onde $\Delta\varepsilon_p$ é o incremento de deformação plástica equivalente durante um ciclo de integração e ε_f^p é dado pela Eq. (3), onde D_1 e D_2 são constantes do material, e P^* e T^* são a pressão e a tensão hidrostática respectivamente normalizadas pela componente de pressão no limite elástico de Hugoniot.

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon_p}{\varepsilon_f^p} \quad (2)$$

$$\varepsilon_f^p = D_1(P^* + T^*)^{D_2} \quad (3)$$

3.2. Modelo do metal

Para a simulação do comportamento do metal foi utilizado o modelo desenvolvido por Johnson e Cook (1983). Este modelo é comumente utilizado para prever a resposta de metais sujeitos à impacto e penetração, uma vez que pode reproduzir encruamento, efeitos da taxa de deformação, e efeitos termomecânicos. Essas propriedades são combinadas em uma única expressão para a tensão de escoamento dada pela Eq. (4), onde C_1, C_2, C_3, C_4 e C_5 são constantes do material, ε_{eff}^p é a deformação plástica efetiva; $\dot{\varepsilon}_{eff}^p$ é a taxa de deformação plástica efetiva; $\dot{\varepsilon}_0$ é a taxa de deformação de referência, utilizada para determinação das constantes do material; T_a é a temperatura; T_R é a temperatura de referência, utilizada para determinação das constantes do material; e T_M é a temperatura de fusão do material.

$$\sigma_y = \left[C_1 + C_2 (\varepsilon_{eff}^p)^{C_4} \right] \left[1 + C_3 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{eff}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T_a - T_R}{T_M - T_R} \right)^{C_5} \right] \quad (4)$$

3.3. Modelo do compósito

Para a simulação do compósito foi utilizado o modelo desenvolvido por Donadon et al (2009a). A formulação deste modelo é baseada na mecânica de dano contínuo e permite o controle da energia dissipada associada a cada modo de falha, independentemente do refinamento da malha e da orientação do plano de fratura, pelo uso de uma formulação de trincas distribuídas no volume representativo do material. Os modos de falha e os critérios são apresentados na Tab. (2), onde σ_1 é a tensão na direção da fibra, σ_2 é a tensão na direção da matriz, σ_m é a tensão tangencial ao plano de fratura na direção nt , σ_{mn} é a tensão normal ao plano potencial de fratura, σ_{nl} é a tensão tangencial ao plano de fratura na direção nl , μ_{nt} é o coeficiente de atrito na direção nt , μ_{nl} é o coeficiente de atrito na direção nl , τ_{12} é a tensão de cisalhamento no plano, τ_{23} é a tensão de cisalhamento fora do plano, X_T é a resistência a tração na direção da fibra, X_C é a resistência a compressão na direção da fibra, Y_T é a resistência a tração na direção da matriz, S_{23} é a resistência ao cisalhamento fora do plano, S_{12} é a resistência ao cisalhamento no plano e S_{23}^A é a resistência ao cisalhamento transversal no plano de fratura potencial.

Tabela 2. Modos de falha e critérios utilizados

Modo de falha	Critério
Falha da fibra em tração	$\sigma_1 \geq X_T$
Falha da fibra em compressão	$ \sigma_1 \geq X_C$
Falha na matriz	$\left(\frac{\sigma_2}{Y_T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 \geq 1$
Falha na matriz em compressão	$\left(\frac{\sigma_m}{S_{23}^A + \mu_{nt}\sigma_{mn}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{nl}}{S_{12} + \mu_{nl}\sigma_{mn}} \right)^2 \geq 1$
Falha por cisalhamento no plano	$ \tau_{12} \geq S_{12}$

3.4. Modelo do adesivo

Para a simulação do adesivo foi utilizado o modelo desenvolvido por Donadon et al (2009b). O comportamento da interface entre os materiais é definido em termos de tração e deslocamentos relativos entre a superfície inferior e superior que definem a interface. O vetor deslocamento relativo é composto por uma resultante normal e paralela à superfície. Dessa forma, é definido um movimento relativo entre as faces inferior e superior (Fig. (2)).

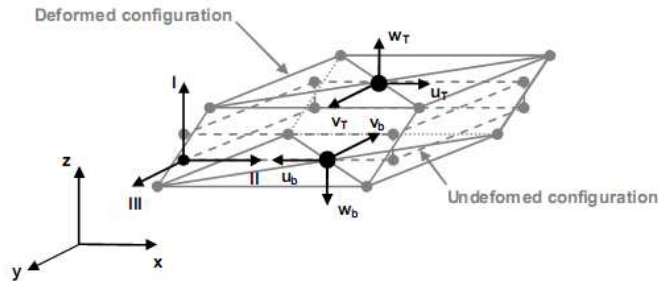


Figura 2. Elemento de contato tridimensional.

O critério para iniciação do dano é dado pela Eq. (5), onde σ_i é a tensão interfacial na direção i e σ_i^0 é a resistência interfacial na direção i . A progressão do dano é dada pela Eq. (6), onde G_i é a taxa de liberação de energia à fratura interlaminar no modo i , e G_{iC} é a tenacidade à fratura no modo i .

$$\left(\frac{\sigma_I}{\sigma_I^0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{II}}{\sigma_{II}^0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{III}}{\sigma_{III}^0}\right)^2 = 1 \quad (5)$$

$$\left(\frac{G_I}{G_{iC}}\right)^\lambda + \left(\frac{G_{II}}{G_{iC}}\right)^\lambda + \left(\frac{G_{III}}{G_{iC}}\right)^\lambda = 1 \quad (6)$$

3.5. Constantes utilizadas

As constantes utilizadas nos modelos foram retiradas da literatura, e constam na Tab. (3) e (4). Detalhes dos modelos e da implementação deles podem ser obtidos em Bürger (2009).

Tabela 3. Constantes para os modelos de cerâmica e compósito

Cerâmica (Zhang et al, 2007)		Compósito (Dingenen, 1989)	
ρ	3840 kg/m ³	ρ	970 kg/m ³
E	210 GPa	E_1	24,9 GPa
ν	0,17	E_2	24,9 GPa
HEL	2,79 GPa	E_3	3,6 GPa
P_{HEL}	1,46 GPa	ν_{12}	0,046
A	0,93	ν_{13}	0,046
B	0,31	ν_{23}	0,046
C	0	G_{12}	1,08 GPa
N	0,6	G_{13}	1,73 GPa
M	0,6	G_{23}	1,73 GPa
D_1	0,005	X_T	530 MPa
D_2	1	G_{1T}	100 kJ/m ³
S_{Fmax}	1	X_C	64,3 MPa
T	200 MPa	G_{1C}	30 kJ/m ³
K_2	0	Crushing factor	25%
K_3	0	Y_C	64,3 MPa
β	1	S_{12}	77 MPa
		G_{2C}	30 kJ/m ³
		Y_T	530 MPa
		G_{2T}	100 kJ/m ³
		S_{23}	543 MPa

Tabela 4. Constantes para os modelos de metal e adesivo

Adesivo (Donadon, 2005)		Metal		
ρ	1750 kg/m ³		Cobre (Poizat et al, 2005)	Aço (Rusinek et al, 2008)
Módulo de elasticidade normal à espessura	1,0 GPa	ρ	8900 kg/m ³	7850 kg/m ³
Módulo de cisalhamento fora do plano	1,0 GPa	E	124 GPa	200 GPa
Resistência normal associada ao modo de falha I	60 MPa	ν	0,34	0,33
Resistência ao cisalhamento associada ao modo de falha II	100 MPa	C ₁	440 MPa	490 MPa
Resistência ao cisalhamento associada ao modo de falha III	100 MPa	C ₂	150 MPa	807 MPa
Tenacidade à fratura do modo de falha I	600 J/m ²	C ₃	0,025	0,012
Tenacidade à fratura do modo de falha II	2,0 kJ/m ²	C ₄	0,31	0,73
Tenacidade à fratura do modo de falha III	2,0 kJ/m ²	C ₅	1,09	0,94
		T _M	1357 K	1800 K
		T _R	300 K	300 K
		$\dot{\epsilon}$	1,0	5.10 ⁻⁴
		D ₁	0,30	0,0705
		D ₂	0,28	1,732
		D ₃	-3,03	-0,54
		D ₄	0,014	-0,0123
		D ₅	1,12	0,0

4. RESULTADOS

4.1. Resultado das composições cerâmicas

Os resultados obtidos com as composições de cerâmicas avaliadas são apresentados nas Tab. (5) e (6). Como pode ser visto nas Tab. (5) e (6), a amostra que apresentou os melhores resultados para os itens avaliados, foi a amostra 5. As Fig. (3) e (4) apresentam a microestrutura das amostras 1 e 5 respectivamente. Nelas pode ser visto que a amostra 1 apresenta-se de forma homogênea, justificado pela presença de alumina de apenas uma granulometria, e como os grãos são menores as elevadas propriedades mecânicas são justificadas. Já a amostra 5 alterna grãos maiores e menores, apresentando também elevadas propriedades mecânicas, entretanto esta diversidade nos tamanhos de grãos é interessante na aplicação balística, uma vez que os grãos menores garantem boas propriedades mecânicas e os grãos maiores, no instante do impacto atuam como ferramentas de corte, usinando o projétil, fazendo com que ele seja degradado. Dessa forma, a composição da amostra 5 foi escolhida para a confecção dos alvos.

Tabela 5. Resultados de dureza e massa específica para as composições avaliadas

Amostra	Alumina A (%)	Alumina B (%)	Dureza (GPa)	Massa específica (10 ³ kg/m ³)
1	100	0	13,87	3,64
2	95	5	13,11	3,81
3	90	10	13,33	3,70
4	85	15	13,43	3,79
5	80	20	14,30	3,84
6	70	30	11,67	3,45
7	0	100	Não realizado	3,16

Tabela 6. Resultados do ensaio de flexão em quatro pontos para as composições avaliadas

Amostra	σ_{rup} (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)	E (GPa)	Desvio-Padrão (GPa)
1	191	12	60	16
2	208	22	81	17
3	188	30	83	13
4	238	32	103	10
5	280	27	121	17
6	132	35	101	19
7	Não realizado		Não realizado	

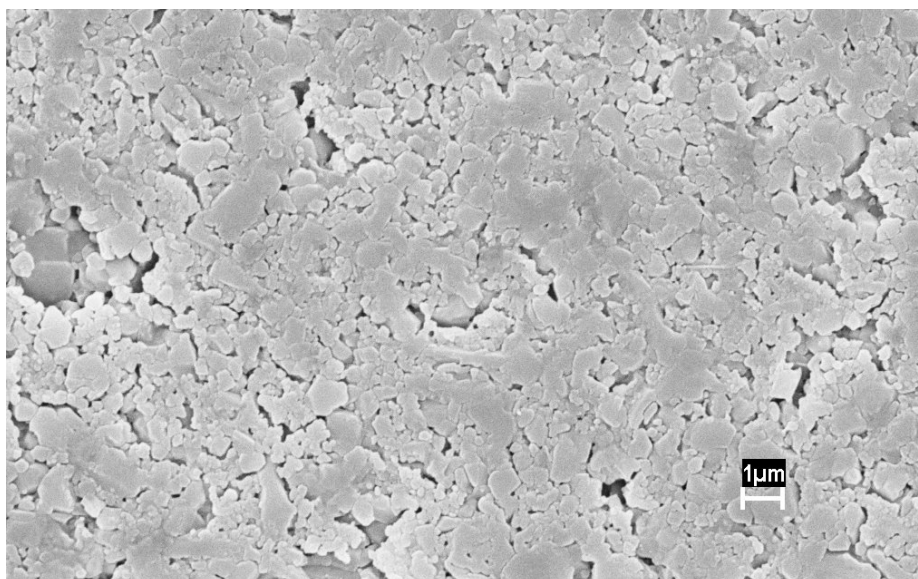


Figura 3. Microscopia eletrônica de varredura – amostra 1 – aumento de 5000x.

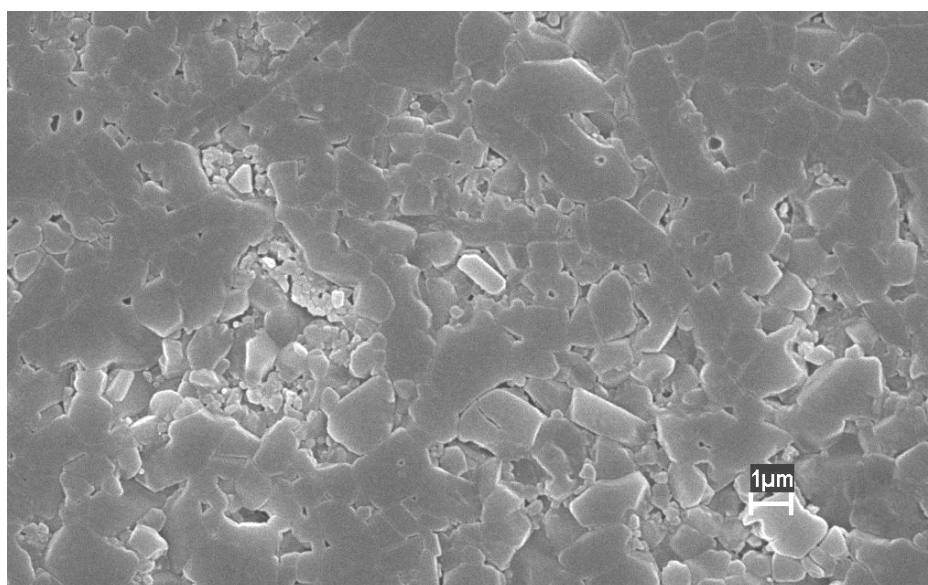


Figura 4. Microscopia eletrônica de varredura – amostra 5 – aumento de 5000x.

4.2. Resultado dos ensaios balísticos e simulações

4.2.1. Cerâmica com espessura de 5 mm

Os resultados obtidos com a cerâmica de 5 mm de espessura são apresentados na Tab. (7), onde PC significa penetração completa, ou seja, o projétil perfurou completamente a blindagem. A Fig. (5) a face do alvo que sofreu o impacto. Como pode ser visto na Tab. (7) a blindagem avaliada não tem boas propriedades de proteção balística, uma vez que mesmo com cerca de 60% da velocidade que este projétil atinge houve penetração completa. A simulação obteve como velocidade limite para a blindagem 550m/s, ou seja, acima desta velocidade houve penetração completa, e abaixo houve penetração parcial (nenhum fragmento do projétil ou alvo ultrapassou a blindagem). As Fig. (6a) a (6d) apresentam a evolução da simulação obtida para o caso em que a velocidade simulada foi 700m/s. Avaliando-se o resultado experimental conclui-se que a velocidade limite deve ser abaixo de 525m/s. Já a simulação obteve 550m/s como velocidade limite. Esta diferença deve-se, principalmente, ao fato de que as constantes utilizadas foram retiradas de literatura, e não foram obtidas diretamente dos materiais utilizados nos ensaios. Mas mesmo assim a simulação conseguiu prever a baixa propriedade balística da configuração utilizada.

Tabela 7. Resultados do ensaio de com cerâmica de 5 mm de espessura

Disparo	Velocidade(m/s)	Resultado
1	810	PC
2	771	PC
3	711	PC
4	626	PC
5	645	PC
6	622	PC
7	552	PC
8	525	PC

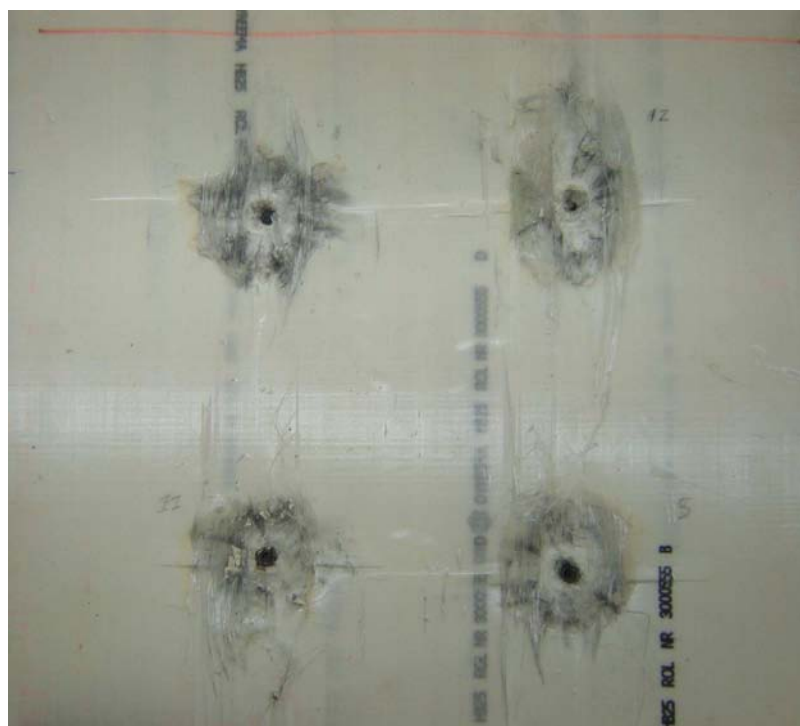


Figura 5. Face do alvo que sofreu o impacto com cerâmica de 5mm de espessura.

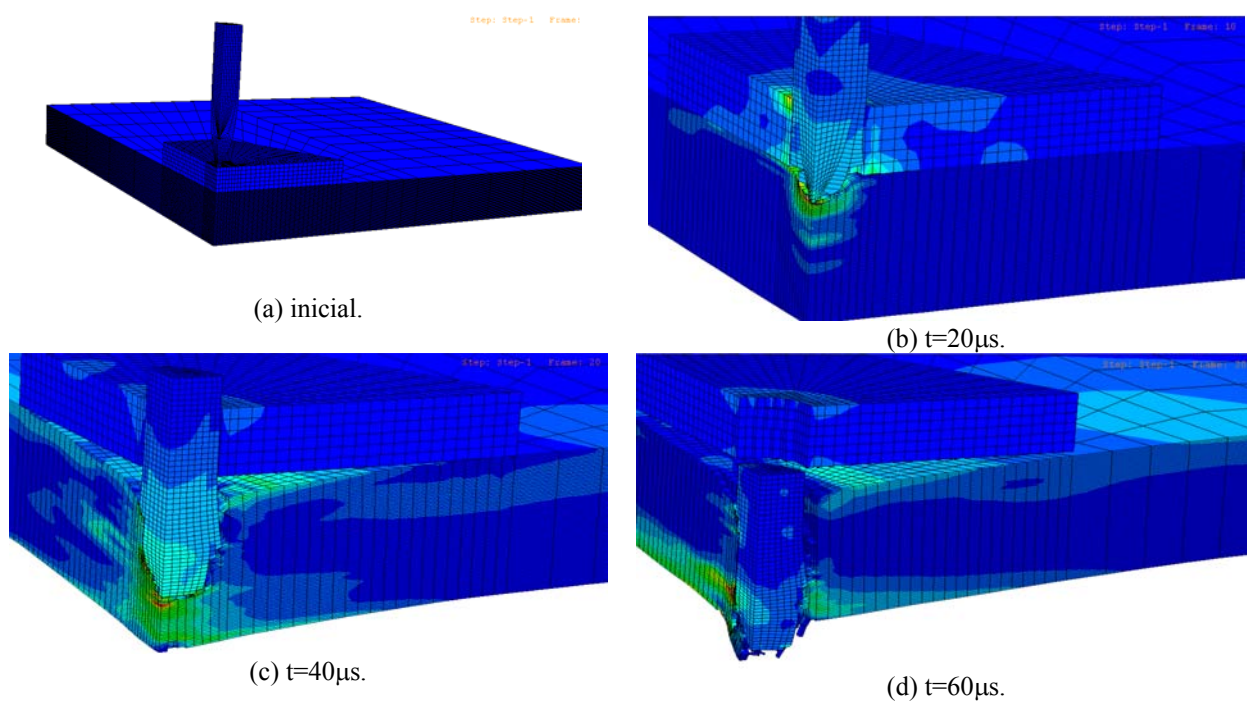


Figura 6. Evolução da penetração para a simulação com espessura de 5mm V=700m/s.

4.2.2. Cerâmica com espessura de 10 mm

Como no experimento descrito anteriormente houve penetração completa para todas as velocidades avaliadas foi realizado um segundo experimento colando duas placas cerâmicas, uma em cima da outra, para formar o alvo. A Fig. (7) apresenta o alvo após o impacto em que houve penetração parcial. Os resultados obtidos neste experimento e nas simulações são apresentados na Tab. (8), onde PC significa penetração completa, ou seja a blindagem foi perfurada, e PP significa penetração parcial, ou seja, nenhum fragmento ultrapassou a blindagem.

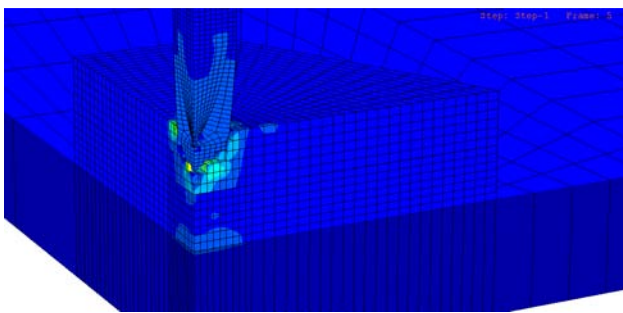


Figura 7. Placas coladas para o segundo experimento.

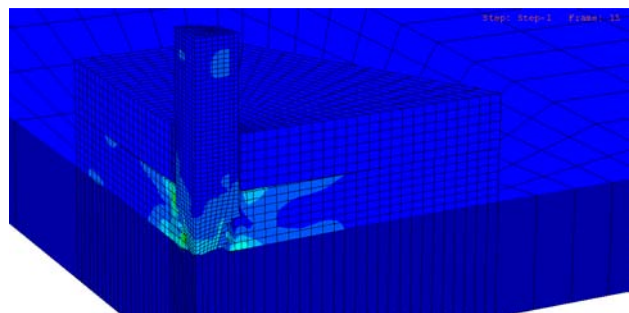
Avaliando-se a Tab. (8) nota-se que a simulação obteve o mesmo resultado que o experimento. Entretanto vale lembrar que as velocidades obtidas experimentalmente são muito distantes (100m/s). Logo o modelo conseguiria prever a diferença de resultados com maior precisão. As Fig. (8a) a (8d) apresentam a evolução da penetração para a velocidade de 665m/s.

Tabela 8. Resultados do ensaio de com cerâmica de 10 mm de espessura

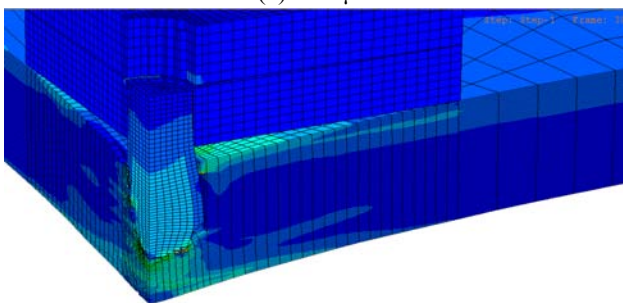
Disparo	Velocidade experimental (m/s)	Resultado experimental	Velocidade simulada (m/s)	Resultado simulado
1	765	PC	765	PC
2	665	PP	665	PP



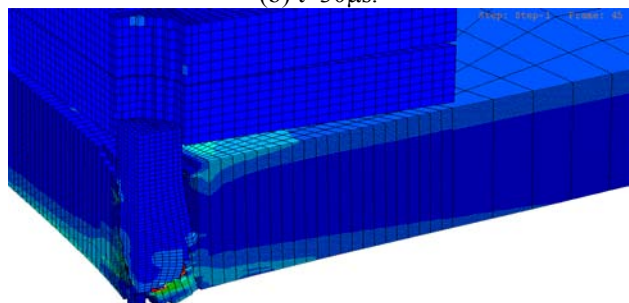
(a) $t=10\mu\text{s}$.



(b) $t=30\mu\text{s}$.



(c) $t=60\mu\text{s}$.



(d) $t=90\mu\text{s}$.

Figura 8. Evolução da penetração para a simulação com espessura de 10mm $V=675\text{m/s}$.

5. CONCLUSÃO

Com base no que foi exposto anteriormente conclui-se que a cerâmica para fins de proteção balística deve, além de apresentar altas propriedades mecânicas, apresentar também uma microestrutura particular, a fim de otimizar o nível de proteção balística. Conclui-se também que a ferramenta de simulação numérica pode ser utilizada para o estudo de novas configurações de blindagem e para o desenvolvimento de uma blindagem para um fim específico, o que possibilita uma economia tempo de desenvolvimento e de recursos.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido para este trabalho da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), contrato número, 2006/06808-6; da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), contrato número 2412/06; e (CNPq), contrato número 303287/2009-8.

7. REFERÊNCIAS

- Bürger, D., 2009, “Simulação de impacto balístico em blindagem mista cerâmica/compósito”, Dissertação (mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil.
- Dingenen, J., 1989, “High performance Dyneema fibres in composites”, *Materials Design*, Vol. 10, n. 2, pp. 101-104.
- Donadon, M.V., 2005, “The structural behavior of composite structures manufactured using Resin Infusion under Flexible Tooling”, Tese (Doutorado) – Imperial College London, United Kingdom.
- Donadon, M.V., Almeida, S.F.M., Arbelo, M.A., Faria, A.R., 2009a, “A three-dimensional ply failure model for composite structures”, *International Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 2009, pp. 1-22.
- Donadon, M.V., Almeida, S.F.M., Arbelo, M.A., Faria, A.R., 2009b, “A contact logic for mixed mode delamination modeling in composite laminates”, a ser publicado em um *International Journal*.
- DSM corporate. Manual for Dyneema® ballistic panels. Urmond, Netherlands: DSM
- Johnson, G., Cook, W., 1983, “A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperature”, *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, pp. 541-547.
- Johnson, G., Cook, W., 1985, “Fracture characteristics of three metals subjected to large strains, high strain rates, temperatures and pressures”, *Journal of Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 21, pp. 31-48.
- Johnson, G.R., Homquist, T.J., 1994, “An improved computational constitutive model for brittle materials”, *American Institute of Physics*, v.12, pp.981-984.
- Poizat, C., et al., 2005, “Modeling and simulation of thin sheet blanking using damage and rupture criteria”, *International Journal of Forming Processes*, Vol. 8, n. 1, pp. 29-47.
- Rusinek, A., et al., 2008, “Influence of conical projectile diameter on perpendicular impact of thin steel plate”, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, n. 10, pp. 2946-2967.
- Zhang, J., et al., 2007, “The prediction of the dynamic responses of ceramic particle reinforced MMCs by using multi-particle computational micro-mechanical method”, *Composite Science and Technology*, Vol. 67, n. 13, pp. 2775-2785.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

DEVELOPMENT OF AN ALUMINA CERAMIC BASED AND APPLICATION IN BALLISTIC SHIELD

Daniel Bürger, bur.daniel@gmail.com¹
Maurício Vicente Donadon, donadon@ita.br²
Sérgio Frascino Muller de Almeida, frascino@ita.br²
Francisco Cristóvão Lourenço de Melo, frapi@iae.cta.br²

¹Instituto de Aeronáutica e Espaço, Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias - CEP 12.228-904 – São José dos Campos – SP – Brazil

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Mal. Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias - CEP 12.228-900 – São José dos Campos – SP – Brazil

***Abstract.** This study evaluated alumina based ceramics with different grain sizes, for use in ballistic armor. The ceramics were evaluated in density, hardness, scanning electron microscopy, elastic modulus and tensile strength. The composition that had best performance, with tensile strength of 280MPa, was used in shields in order to protect against bullets 7.62 x 51 mm piercing (AP). The shields were produced with 2 thicknesses of ceramics, 5 and 10 mm, and a base of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE). At the same time the impacts were simulated using a finite element model to predict the behavior of the shield and the projectile during impact.*

***Keywords:** Alumina, ceramic, ballistic shield, armour piercing.*

1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.