

Relatório Parcial

Título do projeto de pesquisa: **Identificação de Parâmetros Aplicada a Ensaios de Penetração em Placas Metálicas**

Bolsista: Milena Silva Barbosa

Orientador (a): Maurício Guimarães da Silva

Período a que se refere o relatório: Março de 2014 a Maio de 2014

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo estudar um modelo semi empírico para identificação de parâmetros associados a ensaios de penetração em blindagens balísticas metálicas, aplicável à placas metálicas de grandes espessuras associadas a uma placa *bumper*, o qual permite estimar a profundidade de penetração bem como simular as condições finais de impacto para diversas configurações de ensaio. A metodologia proposta permite elaborar matrizes de ensaios balísticos, estimando resultados de profundidade de penetração de maneira a otimizar e viabilizar a racionalização do número de ensaios necessários para o desenvolvimento de blindagens.

1. Introdução

Para o desenvolvimento de blindagens balísticas, normalmente são utilizados métodos analíticos, numéricos e experimentais, algumas vezes de forma isolada, outras de formas combinadas. Bouma e Burkitt (1966) apresentaram um estudo relacionando profundidade de penetração versus velocidade de impacto em chapas metálicas de espessura infinitas. Com isso, identificou-se um padrão através de uma única correlação empírica, que permitiu prever os resultados de profundidade de penetração das crateras.

Lama (2013) desenvolveu uma metodologia, essencialmente empírica, na qual utiliza dados que envolvem uma variedade de combinações de materiais metálicos para projéteis e blindagens, elevadas velocidades de impacto (da ordem de km/s) e diferentes diâmetros de

projéteis esféricos, permitindo com isso, a elaboração de matrizes de ensaios balísticos que possibilitam estimar resultados de profundidade de penetração e também identificar os principais parâmetros atuantes na fenomenologia do mecanismo de penetração e suas influências num experimento balístico. Neste trabalho é realizada uma adaptação do trabalho de Lama (2013), de forma a ser possível o estudo de configurações de alvos metálicos sobrepostos (ALVOS INFINITOS + PLACA BUMPER).

1.1 Objetivos Gerais

- i. Descrever um modelo empírico capaz de estimar a profundidade de penetração de projéteis em alvos metálicos sobrepostos (*bumpered target*);
- ii. Simular as condições finais de impacto para diversas configurações entre o projétil/blindagens bem como racionalizar o número de ensaios balísticos.
- iii. Estabelecer a assinatura de uma placa metálica;

Neste relatório são apresentados os resultados obtidos no cumprimento dos objetivos (ii) e (iii). Os resultados apresentados no relatório parcial anterior (objetivo-i) serão reapresentados neste relatório de forma a facilitar o entendimento do texto.

2. Material e Métodos

A Figura 1 exibe a geometria do experimento realizado para análise de impacto. Essencialmente o experimento consiste em estimar a profundidade de penetração no caso de um impacto normal utilizando um projétil esférico em alvos metálicos sobrepostos (*bumpered target*). As variáveis geométricas apresentadas na Figura 1 caracterizam a configuração do experimento. O parâmetro d é o diâmetro do projétil esférico, o parâmetro v é a velocidade do projétil, o parâmetro t_1 é a espessura do alvo (*bumpered*), o parâmetro l é a distância entre os alvos (*bumpered* e *target*), o parâmetro t_2 é a espessura perfurada no impacto nas mesmas condições que formaram a calota h , o parâmetro h é a profundidade penetrada no impacto entre o projétil e o alvo que apresenta espessura t_1 na presença da placa *bumpered*.

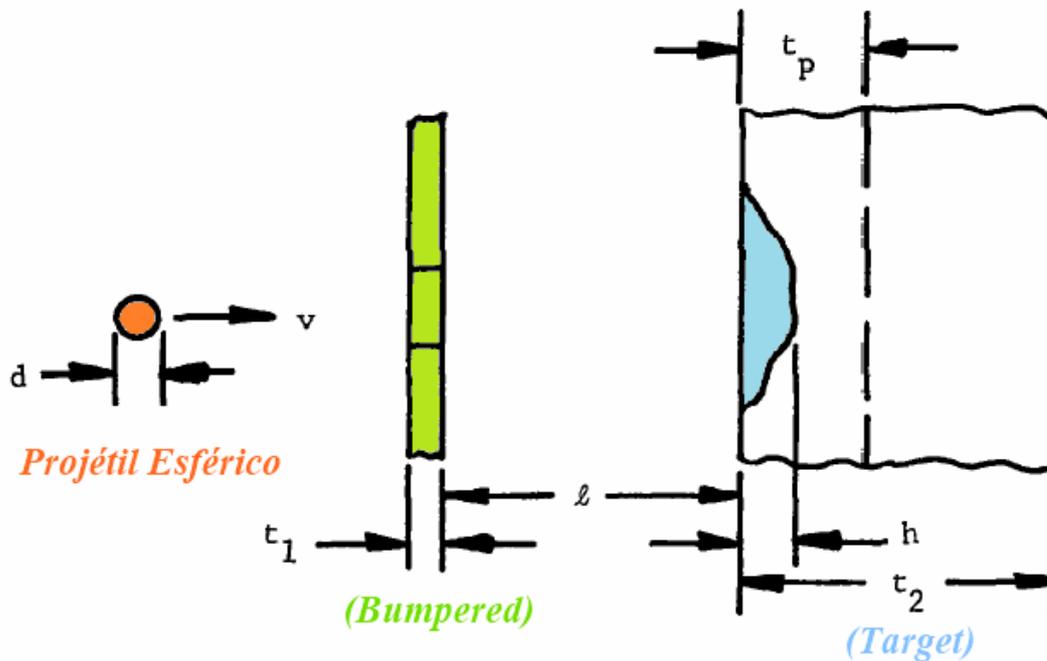


Figura 1 – Geometria do Experimento

Os projéteis utilizados nos experimentos são do tipo esférico e confeccionados com materiais metálicos cuja respectiva massa específica (ρ) está exibida na Tabela 1. Os alvos (*targets*) estão identificados na Tabela 2.

Tabela 1 – Projéteis utilizados no experimento

MATERIAL	PROPRIEDADE FÍSICA [g/cm ³]
Alumínio	$\rho = 2,79$
Cádmio	$\rho = 8,67$
Aço	$\rho = 7,85$
Cobre	$\rho = 8,90$
Titânio	$\rho = 4,54$

Tabela 2 – Alvos utilizados no experimento

ALVO	MATERIAL	PROPRIEDADE FÍSICA [g/cm ³]
$L/d = 32,0$	Alumínio	$\rho = 2,79$
$L/d = 59,38$	Cádmio	$\rho = 8,67$
$L/d = 16,0$	Aço	$\rho = 7,85$
$L/d = 24,42$	Cobre	$\rho = 8,90$
$L/d = 19,39$	Titânio	$\rho = 4,54$

É interessante ressaltar que este tipo de experimento pode ser reproduzido no Túnel Balístico do Departamento de Ciências e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), utilizando-se os mesmos moldes realizados nos laboratórios da NASA (Bouma e Burkitt, 1966). A Figura 2 exibe o Túnel Balístico do DCTA.

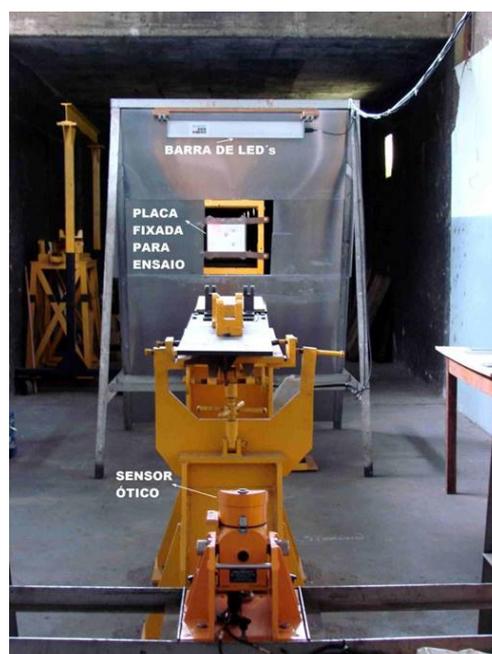


Figura 2 – Laboratório Balístico do DCTA (Lama, 2013)

Segundo a norma NIJ Standard 0108.01 (1985), existem algumas condições que devem ser obedecidas para os ensaios de resistência balística, tais como temperatura ambiente entre 20 e 28°C, distância do alvo a 5 ou 15 metros afastado do provete. A Figura 3 exibe estas distâncias e a metodologia utilizada na medição da velocidade de impacto. Segundo Lama (2013), a velocidade dos projéteis é medida pela interferência no feixe de luz infravermelha emitido pelas duas barreiras ópticas “BARRA DE LED’s”, quando da passagem do projétil. Um cronógrafo marca “Chrony”, modelo delta, cuja precisão é de 1%, é acoplado a estas barreiras, e realiza a medida do tempo gasto na passagem do projétil entre os dois pontos do registro ótico, e, conhecendo-se a distância entre eles, calcula-se a velocidade média do projétil. A energia de impacto do projétil na placa é considerada igual à energia cinética calculada, considerando-se a massa e a velocidade média do projétil.

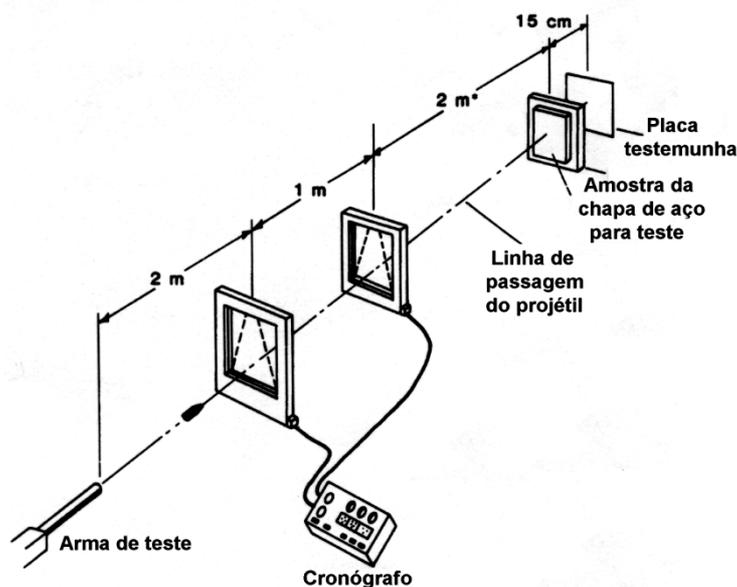


Figura 3 – Diagrama esquemático do ensaio balístico (NIJ Standard 0108.01, 1985)

O ajuste das curvas experimentais associadas às variações $\frac{t_p}{h} \times \frac{h}{t_2}$ foi deduzido por Maiden at alli (1963) e é dado pela função representada na Eq.(1).

$$\frac{t_p}{h} = \frac{R}{1 + (R - 1) \left(\frac{h}{t_2}\right)^2} \quad (1)$$

$$R = \frac{t_p}{h_{co}}$$

Ressalta-se que h_{co} , e h_{co} é a profundidade de penetração na condição de ensaio sem placas sobrepostas e mesma velocidade de impacto. Esta relação apresenta uma característica bastante interessante. A partir desta é possível colecionar todos os ensaios disponibilizados por Bouma e Burkitt (1966) em uma única função de ajuste. Note que é considerado um grande número de variáveis no ajuste destas curvas (tais como, velocidade de impacto, distância entre as placas *bumper* e alvo, diferentes materiais de projéteis e de alvos) e, ainda assim, todos os dados podem ser ajustados com apenas uma função. A Figura 4 exhibe os dados associados a todos os materiais metálicos ajustados segundo a função apresentada na Eq.(1).

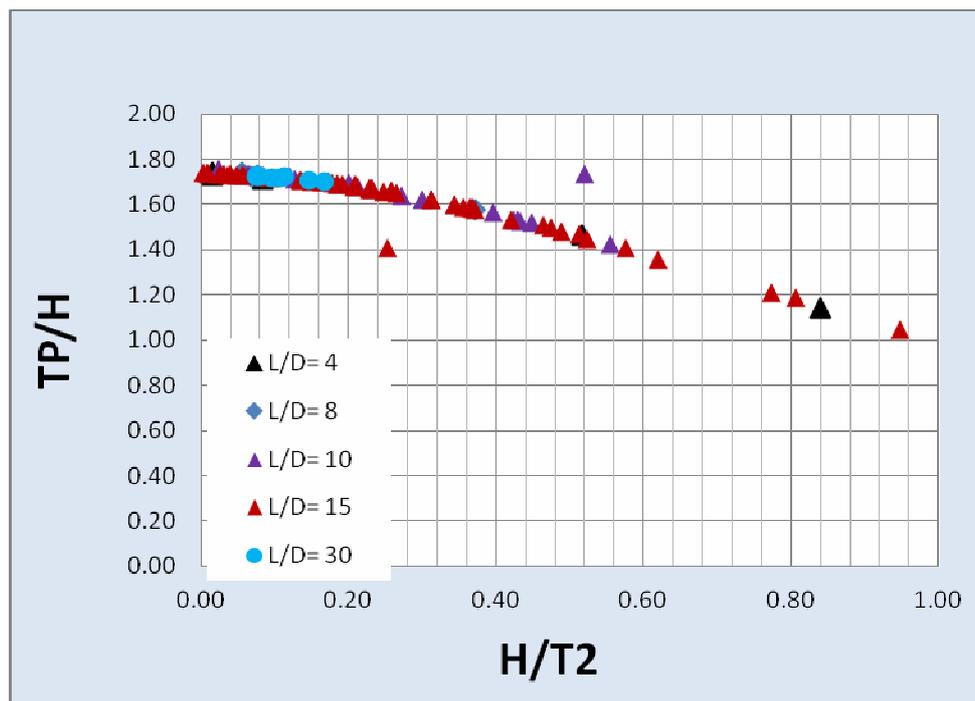


Figura 4 – Padrão de comportamento em ensaios de impacto com alvos sobrepostos

A função definida na Eq.(1) baseia-se nos seguintes conceitos, Equações (2) e (3):

$$R = \frac{t_p}{h_\infty} \quad (2)$$

$$\frac{t_p}{d} = f \frac{h}{d} \quad (3)$$

Neste trabalho é sugerida uma nova função representativa da fenomenologia do problema. Considere a Eq.(1). Isolando o parâmetro R é possível deduzir que:

$$R = \frac{f(1 - \varphi)}{1 - \varphi f} \quad (4)$$

sendo

$$\varphi = \left(\frac{h}{t_p} \right)^2. \quad (5)$$

Considere a transformação de variáveis:

$$\frac{H_\infty}{d} = \left(\frac{\rho_p f}{\rho_T R} \right) \frac{h}{d} \quad (6)$$

Utilizando-se as Equações (2), (3) e (6), obtém-se:

$$\frac{t_p}{d} = R \frac{\rho_T H_\infty}{\rho_p d} \quad (7)$$

Esta relação é obtida com base nos conceitos:

$$\frac{h_\infty}{d} = \frac{1 t_p}{R d} \quad (8)$$

e

$$\frac{h}{d} = \frac{1 t_p}{f d} \quad (9)$$

Desde que (Eq.(8) e (9)):

$$\frac{h_\infty}{d} = \frac{f h}{R d} \quad (10)$$

Tem-se, a partir da Eq.(6):

$$\frac{H_{\infty}}{d} = \frac{\rho_T h_{\infty}}{\rho_P d} \quad (11)$$

As relações (7) e (11) constituem outra opção de modelo matemático que estabelece um padrão entre todos os ensaios apresentados na referência Bouma e Burkitt(1966). Esta relação leva em consideração as propriedades físicas do projétil e do alvo. É interessante observar que se a relação (7) exibir um comportamento parabólico (por exemplo) a função apresentará um valor mínimo ou máximo. Este resultado é interessante, pois auxiliará no dimensionamento da espessura equivalente (t_p) ótima para um dado conjunto de aplicação da proteção balística.

3. Resultados

Os principais produtos e resultados obtidos neste desenvolvimento foram:

- i. Banco de dados de impacto.
- ii. Curva $\frac{t_p}{h} \times \frac{h}{t_a}$, a qual indica um padrão de comportamento entre os ensaios de impacto analisados. Este padrão foi identificado por Bouma e Burkitt(1966).
- iii. Curva $\frac{t_p}{d} \times \frac{H_{\infty}}{d}$, a qual indica uma outra opção de padrão de comportamento entre os ensaios de impacto analisados, principal contribuição deste trabalho.

O banco de dados de impacto para o caso de alvos sobrepostos (*bumpered targets*) foi organizado utilizando-se o *software Microsoft Exce*® 2010. A Figura 5 exibe a planilha de rosto do banco de dados. A partir do botão ENSAIOS NASA é possível visualizar na forma gráfica todos os ensaios de impacto analisados na derivação das curvas de impacto. Um exemplo está ilustrado na Figura 6.

1	HOME	
2		
3		
4		
6		
7		
8		
9		
10	ENSAIOS NASA	
11		Ensaio realizado pela NASA
12		
13		
14	ENSAIOS DCTA	
15		Ensaio a ser realizado no DCTA
16		no desenvolvimento da pesquisa.
17		
18	OBSERVAÇÕES	
19		Comentários e observações obtidas
20		durante a pesquisa.
21		
22		
23		

Figura 5 – Planilha inicial do banco de dados gerado

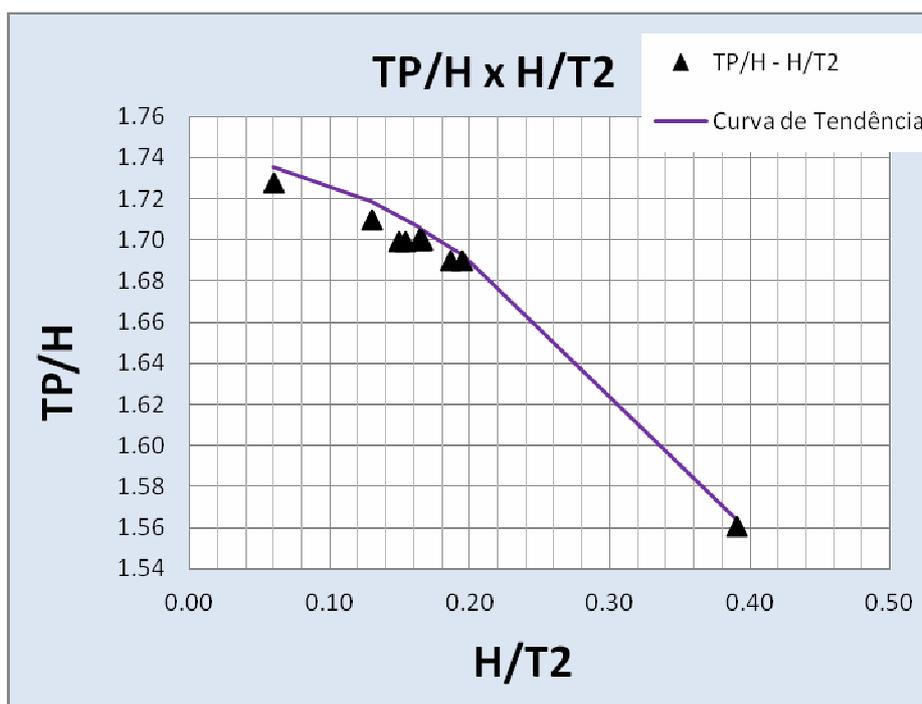


Figura 6 – Exemplo de resultado de impacto: Al 2017 contra Al 7075T6 ($l/d = 3,99$)

No gráfico apresentado na Figura 6 foi utilizado para R o valor de 1,74 na Eq.(1). A

Figura 7 exibe o comportamento da curva $(\frac{t_p}{h} \times \frac{h}{t_s})$. Ressalta-se que todos os ensaios analisados estão sobrepostos naquela figura. Os pontos assinalados com seta vermelha não fazem parte da curva de ajuste. Contudo, a partir da análise destes pontos assinalados, pode-

se concluir que a profundidade de penetração h era maior que a profundidade de penetração h_{∞} , fato este que não representa a fenomenologia física envolvida, desde que h_{∞} representa a profundidade de penetração em alvos “semi-infinitos” (de grande espessura). Desconsiderando-se estes poucos pontos, é possível concluir que deve existir um padrão de comportamento entre todos os ensaios de impacto analisados desde que é possível selecionar apenas uma curva de tendência para todos os ensaios analisados.

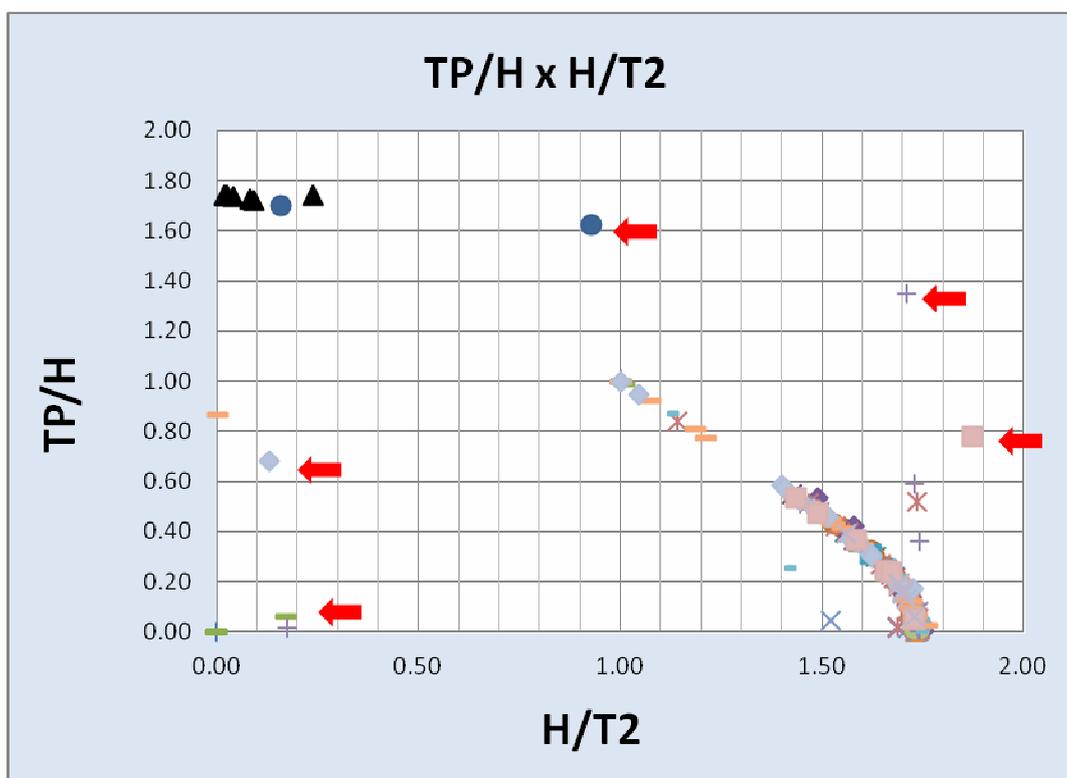


Figura 7 – Padrão de comportamento em ensaios de impacto com alvos sobrepostos
(Bouma e Burkitt, 1966)

A Figura 8 exibe o ajuste de todos os ensaios apresentados na referência Bouma e Burkitt (1966) utilizando-se a Eq.(2), qual seja $\frac{t_p}{d} = R \frac{h_{\infty}}{d}$. Note que, o valor do parâmetro R , representativo da inclinação da curva de ajuste é praticamente constante para todos os casos representados na Figura 8. Com o uso da função de ajuste representada pela Eq.(7) é possível identificar a influência da variação da razão das massas específicas do projétil e do alvo

$r = \frac{\rho_T}{\rho_P}$ no valor da variável de projeto t_P (a espessura perfurada no impacto nas mesmas condições que formaram a calota h), Figura 9. Desta vez, os valores das inclinações de cada uma das curvas de ajuste (retas) são praticamente constante para cada valor associado à relação de massas específica r . Doravante, este valor será denominado de R equivalente (Eq.12), os quais estão alocados na Tabela 3.

$$R_{Eq} = \frac{\rho_P f}{\rho_T R} \quad (12)$$

Outro aspecto interessante verificado nesta pesquisa diz respeito à variação de R_{Eq} com relação à variação de r , dado por $\frac{\rho_T}{\rho_P}$, Figura 10. Não foi objetivo desta pesquisa caracterizar esta influência (parabólica), contudo, tendo em vista que a base de dados foi obtida a partir de ensaios realizados em diferentes laboratórios, é importante averiguar esta informação em outras bases de dados ou mesmo em simulações numéricas. Neste contexto, as conclusões obtidas nesta fase da pesquisa ainda não podem ser consideradas como efetivas.

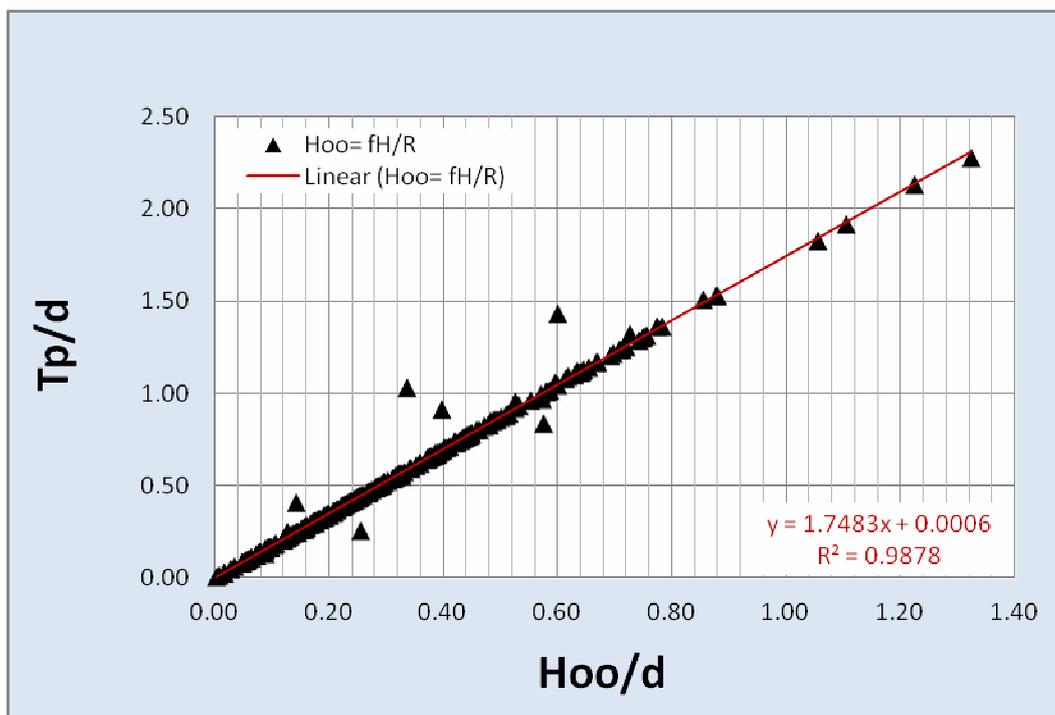


Figura 8 – Padrão de comportamento em ensaios de impacto com alvos sobrepostos

(Bouma e Burkitt, 1966)

Tabela 3 – Parâmetro R equivalente

$r = \frac{\rho_T}{\rho_P}$	R Equivalente
0,41	4,2354
0,80	2,1658
1,00	1,7474
3,00	0,5776

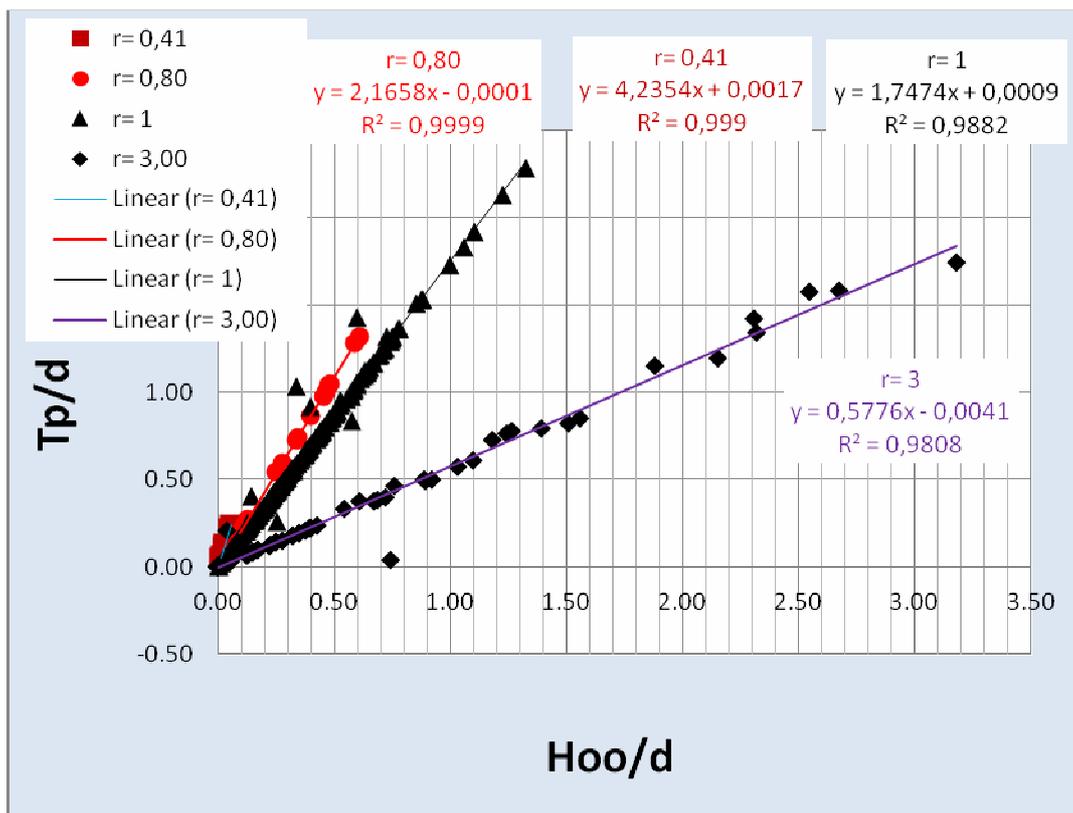


Figura 9 – Padrão de comportamento em ensaios de impacto com alvos sobrepostos (resultados obtidos neste trabalho)

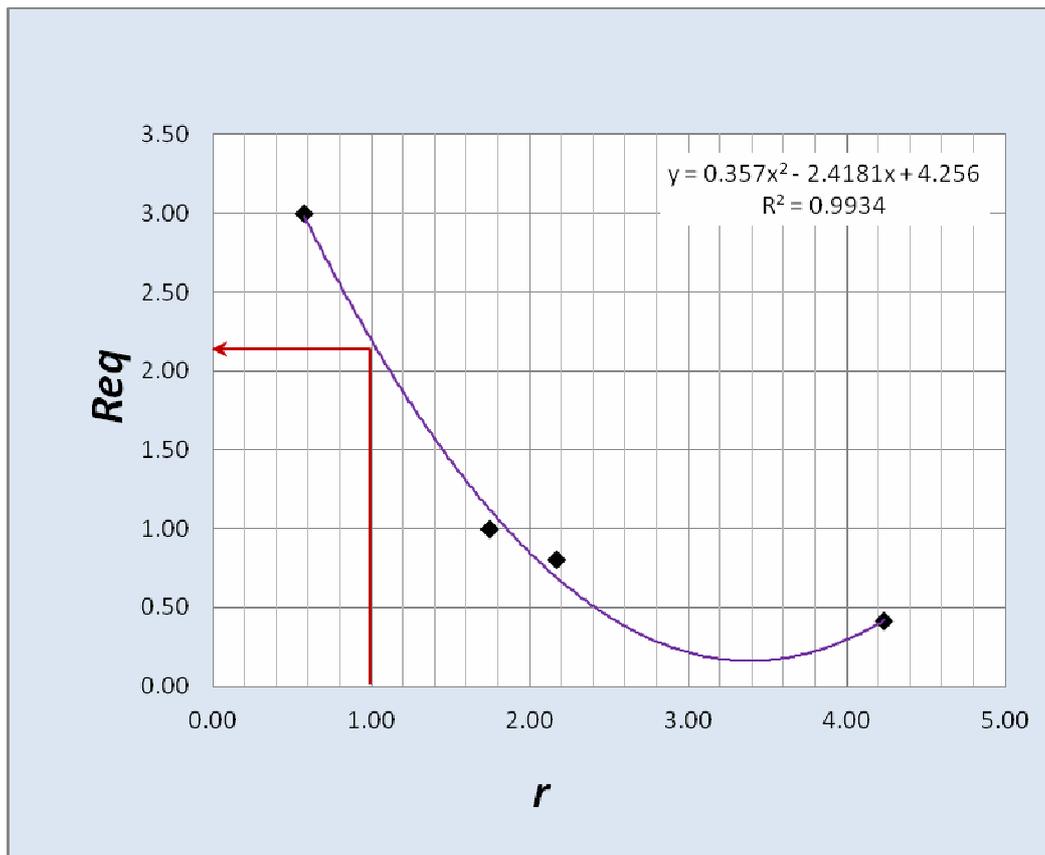


Figura 10 – Variação de R_{Eq} com relação às propriedades físicas do projétil e alvo

3.1 Exemplo de Aplicação

Neste tópico é ilustrado um exemplo de aplicação das correlações e dados levantados anteriormente. Considere uma demanda de análise, a qual não consta no banco de dados disponibilizado Bouma e Burkitt (1966), cujo valor de r é igual a 1(um). Contudo, a instituição de pesquisa dispõe de experimentos obtidos com r igual a 2,804 ($\rho_T = 7,85$ e $\rho_P = 2,8$). A partir da Figura 10 (seta vermelha), tem-se que, para o valor supracitado de r , $R_{Eq} = 2,1949$. A partir da Eq.(12) e da razão de massa específica disponível na instituição, tem-se:

$$\frac{f}{R} = R_{Eq} \frac{\rho_T}{\rho_P} = \frac{R_{Eq}}{r} \quad (13)$$

Ou seja, $\frac{f}{R}$ é dado por 0,783. Conforme visto na Figura 7, o valor de R igual a 1,74 é uma boa aproximação para todos os casos estudados. Portanto, para o valor de $\frac{f}{R}$ calculado anteriormente, tem-se que f é igual a 1,362. A partir da Eq.(4) tem-se:

$$\varphi = \left(\frac{h}{t_a}\right)^2 = \frac{f - R}{f(1 - R)} \quad (14)$$

Logo, $\frac{h}{t_a}$ é igual a 0,375. Finalmente, com a Eq.(1), obtém-se o valor de $\frac{t_p}{h}$, igual a 1,362. Uma vez realizado o ensaio na instituição de pesquisa (obtenção do valor de h), será possível estimar o valor de t_p associado à razão de massa específica solicitada na demanda, não disponível na instituição de pesquisa, qual seja, r igual a 1(um).

Este exemplo ilustra a potencialidade do método quando do uso da Eq.(7). Note também que estas relações de similaridade nem sempre serão fisicamente admissíveis. Por exemplo, considere que, no exemplo anterior, a instituição de pesquisa disponha de, apenas, ensaios com valores de r dados por 0,407 ($\rho_T = 1,14$ e $\rho_P = 2,8$). Utilizando o procedimento

descrito anteriormente, obtém-se $\sqrt{\frac{h}{t_a}} = -1,101$, claro indicativo de que o banco de dados disponível não têm dados suficientes para a execução desta demanda.

4. Conclusões

Neste desenvolvimento foram analisados dados de impacto referentes a ensaios utilizando placas sobrepostas (*bumpered target*). Todos os objetivos da pesquisa foram concluídos e, entre os principais produtos e contribuições obtidos, destacam-se: (i) geração de um banco de dados associados a ensaios com placas sobrepostas, (ii) confirmação dos

modelos matemáticos desenvolvidos Bouma e Burkitt(1966) $\left(\frac{t_p}{h} \propto \frac{h}{t_a}\right)$, Eq.(1) ;

$\left(\frac{t_p}{d} \propto R \frac{h_{\infty}}{d}\right)$, Eq.(8) e, (iii) desenvolvimento uma metodologia de análise de ensaios balísticos

baseada em relações de similaridade, Eq.(7). É importante ressaltar também que as relações apresentadas na Eq.(8) são lineares, ou seja, para a obtenção daqueles pontos experimentais

são necessárias apenas duas condições de ensaio. Esta característica reduz enormemente os custos que deverão ser alocados na elaboração de um banco de dados para placas sobrepostas.

Como sugestão para novas pesquisas nesta área, sugerem-se os seguintes temas:

- Confirmar o comportamento parabólico da relação $R_{Eq} \times T$;
- Implementar (automatizar) a metodologia apresentada no item 3.1 no banco de dados elaborado na primeira fase desta pesquisa;
 - Estabelecer a relação entre o parâmetro X^* desenvolvido no trabalho de Lama (2013) e o parâmetro R_{Eq} ,
 - Aplicar a metodologia supracitada utilizando outros bancos de dados e simulações numéricas.

Referências Consultadas

BOUMA D. D. and BURKITT W. C., **Multivariable Analysis of the Mechanics of Penetration of High Speed Particles** – NASA report CR-664, Prepared by Martin Marietta Corporation Denver, Colo. for Western Operations Office National Aeronautics And Space Administration . Washington, D. C. . December 1966. P. 1-185.

DOS SANTOS, C. V., **Uma proposta de metodologia para otimização em confiabilidade de blindagem aeronáutica a partir de simulações computacionais**. TESE DE DOUTORADO – Instituto de Engenharia Mecânica , Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, 157f, 2009.

GONÇALVES, D.P. **Análise e investigação de impactos em blindagem composta cerâmica/metal**. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 95f. 2000.



ISHIKURA, D., **Estudo analítico e investigação experimental de impactos em chapas metálicas e não metálicas**, DISSERTAÇÃO DE MESTRADO – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 95p, 1985.

LAMA, J. L. G., **Metodologia de Análise Aplicada a Ensaio de Impacto em Alvos Metálicos**. TESE DE DOUTORADO – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” (UNESP), Guaratinguetá, São Paulo, 115f, 2013.

NASA - National Aeronautics and Space Administration, **Orbital Debris Program Office**, Disponível em: <http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov>, Acesso em 2013.