

ESTUDO DE BALÍSTICA INTERNA PARA O OBUS M114 A1 155 MM/23

Daniel Marques ^{a1}, Aires dos Santos ^b, Bruno Pereira ^c

^a CINAMIL - Centro de Investigação da Academia Militar, Academia Militar, Lisboa, Portugal

^b Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal

^c Departamento de Matemática Aplicada à Tecnologia e à Empresa, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal

ABSTRACT

The knowledge and understanding of the processes that occur inside a firearm's tube, since the propeller charge ignition until the projectile's exit, is crucial in weapons research and development. This study was performed in the framework of the project FIREEND, as a result of the cooperation between the Academia Militar and the Instituto Superior Técnico. Using mathematical modelling it is possible to optimise the explosive charge and the choice of materials. The mathematical model developed was applied to a system including the weapon, the propeller charge and the projectile, and the results were validated with the software PRODAS. To get a better understanding of the importance of the variables involved, a sensitivity analysis was made with several ballistic parameters, keeping constant the dimensions of the weapon. Results show that the rotating band is paramount in the pressure and speed values obtained. Using the mathematical model it was also possible to quantify, for propeller charges with different deflagration power, the maximum pressure and speed at the exit.

Keywords: Internal ballistic; Artillery Projectile; Pressure; Velocity; Mathematic modelling.

RESUMO

O conhecimento e a compreensão dos processos que ocorrem no interior do tubo de uma arma de fogo, desde a ignição da carga propulsora, até à saída do projétil, é importante no desenvolvimento do armamento, de uma forma económica e segura.

¹ O presente artigo resultou do trabalho desenvolvido para a Dissertação de Mestrado elaborado pelo autor.
Email para contacto: marques.dff@mail.exercito.pt

Com a modelação matemática destes processos, que é uma abordagem muito utilizada atualmente, é possível otimizar a carga explosiva e os materiais utilizados. Este estudo foi realizado no âmbito do projeto FIREEND, resultante da colaboração entre a Academia Militar e o Instituto Superior Técnico.

O modelo desenvolvido foi aplicado a um sistema, arma, carga propulsora e projétil, já existente, tendo os resultados obtidos sido validados com o software PRODAS e tabelas referentes ao presente sistema.

Para melhor compreender a importância das variáveis envolvidas, é feita uma análise de sensibilidade a diversos parâmetros balísticos, mantendo constante as dimensões da arma em estudo.

Na análise dos resultados verifica-se que a cinta de travamento é um elemento muito importante, alterando significativamente os valores da pressão e da velocidade. Verificou-se também que com cargas propulsoras de maior taxa de queima é possível obter valores mais elevados de pressão máxima e velocidade à saída.

Palavras-Chave: Balística interna; Projétil de Artilharia; Pressão; Velocidade; Modelação matemática.

Nomenclatura

A - Área transversal do interior do tubo estriado

b - Covolume

c - Massa de carga propulsora

d - Diâmetro do tubo estriado

D - Espessura balística ou Dimensão característica de um grão de pólvora

f - Fração da espessura balística restante (*Web fraction*)

l - Comprimento inicial da câmara de combustão

L - Comprimento do tubo após *l*

M - Parâmetro Balístico Central

m_2 - Massa Efetiva 2 (massa do projétil com correção)

p - Pressão dos gases

p - Pressão média dos gases

p_s - Pressão dos gases na base do projétil

p_B - Pressão dos gases na culatra

p_{Bc} - Pressão dos gases na culatra no instante do burnout

p_r - Resistive pressure

R_L - Lagrange Ratio

u_g - Velocidade do gás

- u_s - Velocidade do projétil
- V_i - Volume livre atrás do projétil
- x - Posição entre a culatra e a base do projétil
- x_s - Posição da base do projétil

Símbolos gregos

- β - Taxa de Queima
- γ - Razão dos calores específicos
- θ - Caraterística de forma do grão
- λ - Energia específica da pólvora
- ρ - Massa volúmica
- ϕ - Fração de massa de pólvora queimada

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho enquadra-se num projeto mais amplo denominado FIREND, no qual se pretende desenvolver um projétil de elevado calibre a ser propulsado por um obus de Artilharia para o auxílio no combate aos fogos florestais. Os principais dados que se pretendem fornecer para o projeto FIREND são as pressões e temperaturas que ocorrem durante todo o processo de balística interna. Assim para uma melhor compreensão de todo o processo que sucede no interior do tubo de um obus, desde que a carga propulsora é inflamada até à saída do projétil, é efetuada uma análise de sensibilidade a diversos parâmetros balísticos e feita a análise de como estes parâmetros afetam o disparo.

Para a recolha de resultados é desenvolvido um modelo matemático que tem por base o modelo de Carlucci exposto no livro *ballistics Theory and Design of Guns and Ammunition*, considerado o livro de referência no presente trabalho, efetuando-se algumas alterações com o objetivo de se aproximar um pouco mais da realidade do processo. Na análise de resultados, por impossibilidade da realização de medições às pressões e velocidades em tiro real, são considerados valores de referência.

A área de estudo em que se encontra inserido o presente trabalho pode ser considerada como um ramo da mecânica e da química designado por Balística, que se ocupa do estudo dos fenómenos relacionados com a partida, o voo e a chegada dos projéteis, e também dos efeitos provocados pelo impacto do projétil no objetivo. Apoiando-se em leis físicas e em ensaios experimentais, tem-se vindo a desenvolver ao longo dos tempos métodos de estudo, tanto a nível teórico e de modelação computacional como a nível experimental.

Para que se possa estudar a balística mais em pormenor, esta é tipicamente dividida em três áreas distintas, referentes a momentos diferentes do tiro. A balística interna, onde se insere o presente trabalho, aborda as propriedades das pólvoras e todos os processos que ocorrem desde a ignição da carga propulsora até à saída do projétil à boca do cano da arma, baseando-se para tal em várias áreas da mecânica, como por exemplo, a termodinâmica e a mecânica de fluidos. A balística externa é responsável pelo estudo dos processos que ocorrem após a saída do projétil da arma e durante o seu percurso na atmosfera (movimentos de translação e de rotação) até que o projétil atinja o alvo. Por último, a balística terminal (ou dos efeitos) estuda os efeitos causados pelo impacto do projétil no alvo (Carlucci e Jacobson, 2014). Existe ainda quem considere a balística intermédia ou de transição, referente ao período de tempo que ocorre desde a saída do projétil do obus até que este deixe de ser atuado pelos gases resultantes da combustão da carga propulsora.

1.1 OBJETIVOS

Pretende-se desenvolver um projétil, leve e com o menor impacto ambiental possível, que transporte substâncias químicas para o combate a incêndios, garantindo velocidades à saída desejáveis e condições de estabilidade durante o voo, bem como a adaptação às tabelas de tiro existentes. De modo a alcançar estes objetivos, é necessário quantificar as condições adversas a que a munição está sujeita durante todo o processo do disparo. Só assim será possível selecionar novos materiais capazes de aguentar elevadas pressões e temperaturas. Para determinar estes valores foi desenvolvido um modelo matemático baseado no modelo de Carlucci e Jacobson (2014), fazendo algumas alterações consideradas pertinentes.

2. MODELO MATEMÁTICO DE BALÍSTICA INTERNA

O presente modelo encontra-se integrado nos modelos zero dimensional, uma vez que não são consideradas variações de densidade do gás resultante da combustão da pólvora em qualquer uma das direções do sistema de coordenadas cilíndrico. Como referido anteriormente o sistema utilizado no presente estudo de balística interna, é constituído por um conjunto, Arma (Obus de Artilharia), carga propulsora e projétil existente.

O obus utilizado no presente estudo de balística interna é o obus M114 A1 155 mm/23 de origem Americana, usado atualmente na Artilharia do Exército Português, apresentado na figura 1. O projétil é o M107 155 mm (Figura 2). Por último a carga propulsora é a M3A1 *Green Bag* (Figura 3), a qual tem um fator de forma nulo ($\theta = 0$).



Figura 1 - Obus M114 A1 155 mm/23 - posição de tiro



Figura 2 - Projétil M107
155 mm



Figura 3 - Carga propulsora
M3A1 Green Bag

2.1. HIPÓTESES DO MODELO

Para o desenvolvimento do modelo assumiram-se diversas hipóteses simplificativas: (i) as perdas térmicas através das paredes do tubo do obus são desprezadas; (ii) a massa volúmica do gás resultante da combustão não varia espacialmente (modelo zero dimensional); (iii) para simplificação das equações, na equação da continuidade (e apenas nesta equação) considera-se que toda a carga explosiva é convertida instantaneamente em gás; (iv) o tubo do obus tem secção constante e igual ao menor valor medido; (v) o gás propulsor não é considerado ideal, utilizando-se a equação de estado de Noble-Abel; (vi) tanto a resistência de atrito (contacto entre projétil e tubo) como a do ar no interior do tubo, são contabilizadas, substituindo a massa real do projétil por uma massa efetiva; (vii) após toda a carga propulsora se ter transformado em gás (instante designado na literatura por burnout), a evolução do gás é isentrópica; (viii) considerou-se constante a taxa de queima β , independentemente do valor da pressão na câmara de combustão. Apresenta-se na figura 1 um esquema simplificado do interior do obus:

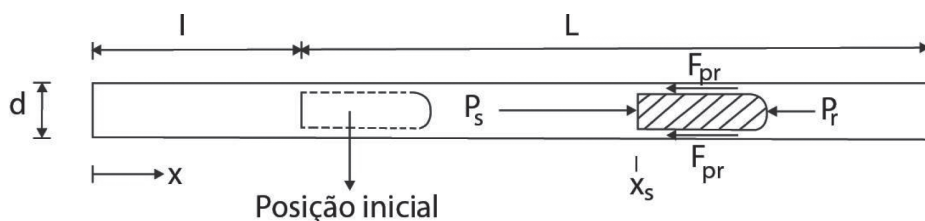


Figura 4 - Esquema simplificado do interior do tubo do obus

2.2 DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO DO MODELO

Partindo da equação da continuidade obtém-se a equação da velocidade do gás e do projétil, em função da posição:

$$u_g = \frac{x}{x_s} u_s \quad (1)$$

Com $u_g(0) = 0$

Verificando-se que a velocidade no gás varia linearmente desde a culatra até à base do projétil.

Aplicando a equação da quantidade de movimento do gás e fazendo um balanço de forças ao projétil, os resultados apresentados são similares aos apresentados em Ballistics (Carlucci e Jacobson, 2014). A pressão média na câmara de combustão é dada por:

$$\bar{p} = p_s \left(1 + \frac{c}{3m_2} \right) \quad (2)$$

E definindo o coeficiente *Lagrange Ratio*, R_L como:

$$R_L = \frac{1 + \frac{c}{2m_2}}{1 + \frac{c}{3m_2}} \quad (3)$$

Considerando a equação de estado de Noble-Abel, são definidos também:

$$l_1 = \frac{cb}{A}; x_{s1} = x_s - l_1 \phi$$

A pressão na culatra é:

$$p_B = \bar{p}R_L \Rightarrow p_B = \frac{c \phi \lambda}{Ax_{s1}} R_L \quad (4)$$

Com a definição do parâmetro balístico central M, definido por Corner em 1950, (Corner, 1950):

$$M = \frac{A^2 D^2}{m_2 c \lambda \beta^2} \left[\frac{1 + \frac{c}{3m_2}}{\left(1 + \frac{c}{2m_2} \right)^2} \right] \quad (5)$$

Verifica-se que, x_s varia em função de f da seguinte forma:

$$\text{Para } \theta=0: \quad \frac{dx_s}{df} = - \frac{Mx_{s1}}{1 + \theta f} \quad (6)$$

Partindo da equação (6), considerando o fator de forma nulo, resolvendo a equação diferencial e definindo Q, para simplificar as equações. Pode-se determinar a pressão na culatra, até ao *burnout*, através da seguinte expressão:

$$p_B = Q \frac{(1-f)Ml}{l_1 + e^{M(1-f)}(Ml - l_1)}$$

Com: (7)

$$Q = \frac{\lambda c R_L}{V_i}$$

Sendo V_i o volume inicial, $V_i = Al$.

De modo a determinar a pressão máxima, determina-se f , numericamente de tal forma que:

$$l_1 - e^{M(1-f)}(Ml - l_1)[M(1-f) - 1] = 0 \quad (8)$$

Com o valor de f determinado em (8) aplicando-o em (7), determina-se o valor da pressão máxima atingida.

Após o *burnout*, a expressão utilizada para determinar a pressão é:

$$\text{Para } \theta \neq 0: \quad p_B = Q \left(\frac{x_s - l_1}{le^M - l_1} \right)^{-\gamma} e^{-M} \quad (9)$$

Caso o fator de forma seja diferente de zero, seguindo o mesmo raciocínio aplicado no caso de $\theta=0$, tem-se, até ao *burnout*:

$$\text{com:} \quad p_B = Q \frac{l}{\frac{x_s}{\phi} - l_1} \quad (10)$$

$$x_s = l \left(\frac{1+\theta}{1+\theta f} \right)^{M/\theta} + c_1 \left[(1+\theta f)c_2 - (1+\theta f)^2(M+\theta) - (1+\theta f)^{-\frac{M}{\theta}} c_3 \right] \quad (11)$$

Sendo: $c_1 = \frac{Ml_1}{\theta(M+\theta)(M+2\theta)}$; $c_2 = (1+\theta)(M+2\theta)$; $c_3 = \theta(1+\theta)^{M/\theta+2}$

Também com este fator de forma, de modo a determinar a pressão máxima, a seguinte equação tem de ser resolvida numericamente:

$$(1+\theta f)^{-M/\theta-1} - (M+\theta)(1-f)(1+\theta f)^{-\frac{M}{\theta}-2} = c_4 \quad (12)$$

$$\text{Com: } c_4 = \frac{c_1(M + \theta)(1 + \theta) - c_1c_2}{l(1 + \theta)^{M/\theta} - c_1c_3}$$

Desta equação obtém-se numericamente o valor de f para o qual se obtém a pressão máxima e, sabendo este, calcula-se o respetivo x_s com (11) e $p_{B\text{máx}}$ com (10).

Após o *burnout*, de modo a determinar a pressão, segue-se a expressão:

$$p_B = p_{Bc} \left(\frac{x_s - l_1}{x_c - l_1} \right)^{-\gamma} e^{-M} \quad (13)$$

No estudo da velocidade do projétil, as equações são iguais independentemente de θ .

Com ϕ a ser um parâmetro adimensional, com o objetivo de simplificar as equações, já definido em Carlucci e Jacobson (2014).

$$\phi = \frac{2}{1 - \gamma} \left[\left(\frac{x_s - l_1}{x_c - l_1} \right)^{1-\gamma} - 1 \right]$$

Tem-se até ao *burnout*:

$$u_s^2 = \frac{\lambda c M (1 - f)^2}{m_2 + \frac{c}{3}} \quad (14)$$

A partir do *burnout*, a velocidade do projétil é dada por:

$$u_s^2 = \frac{\lambda c}{m_2 + \frac{c}{3}} (M + \phi) \quad (15)$$

2.2.1. Considerando a Cinta de Travamento

É apresentado um complemento ao modelo desenvolvido em, no qual através da introdução de uma condição inicial se pretende simular o efeito da cinta de travamento.

A condição inicial sugerida é a seguinte: $t = 0$; $x_s = l$; $u_s = 0$; $f = f_0$; $\theta = \theta_0$

A equação diferencial é agora:

$$\frac{dx_s}{df} = -\frac{Mx_{s1}(f_0 - f)}{(1 - f)(1 + f\theta)} \quad (16)$$

Tem-se até ao burnout:

$$u_s^2 = \frac{\lambda c M (f_0 - f)^2}{m_2 + \frac{c}{3}} \quad (17)$$

e

$$u_c^2 = \frac{\lambda c M f_0^2}{m_2 + \frac{c}{3}} \quad (18)$$

Como após o burnout, a velocidade do projétil é dada por:

$$u_s^2 = \frac{\lambda c}{m_2 + \frac{c}{3}} (M f_0^2 + \phi) \quad (19)$$

Para $\theta = 0$:

Determina-se x_s , utilizando a seguinte expressão:

$$x_s = \frac{\Omega}{(1 - f)^{M(1-f_0)} e^{Mf}} \quad (20)$$

Com:

$$\begin{aligned} \Omega = & (1 - f)^{1+M(1-f_0)} l_1 [e^{fM} + e^M E_n(z)] + l(1 - f_0)^{M(1-f_0)} e^{Mf_0} \\ & - (1 - f_0)^{1+M(1-f_0)} l_1 [e^{f_0 M} + e^M E_n(-n)] \end{aligned}$$

Onde $E_n(z)$ é a equação exponencial integral definida da seguinte forma:

$$E_n(z) = \int_1^\infty \frac{e^{-zt}}{t^n} dt$$

e

$$n = (f_0 - 1)M; z = M(1 - f)$$

Para $\theta \neq 0$:

Determina-se x_s , utilizando a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} x_s(1 + \theta f)^{\frac{M(1+f_0\theta)}{\theta(1+\theta)}} (1 - f)^{\frac{M(1-f_0)}{1+\theta}} \\ = Ml_1 \int (f_0 - f)(1 + \theta f)^{\frac{M(1-\theta f_0)}{\theta(1+\theta)}} (1 - f)^{\frac{M(1-f_0)}{1+\theta}} df + const. \end{aligned} \quad (21)$$

Com a condição inicial: $x_s(f_0) = l$, consegue-se obter o valor da constante e usando novamente a função exponencial integral, é possível deduzir uma equação para $x_s = x_s(M, f_0, f, l_1, l)$.

Para qualquer valor de θ , a equação que determina a evolução da pressão é:

$$p_B = Q \frac{\phi l}{x_s - l_1 \phi} \quad (22)$$

Com a simples alteração da condição inicial para $f_0 \neq 1$, verifique-se como aumenta significativamente a complexidade matemática do problema.

2.2.2. Correção do Parâmetro Balístico Central

Considerou-se de interesse verificar qual a alteração nos resultados devido à aproximação feita no capítulo 3 de *Ballistics* (Carlucci e Jacobson, 2014), em que se considera a aproximação:

$$D \frac{df}{dt} = -\beta \bar{p} \approx \beta p_B \quad (23)$$

As deduções apresentadas anteriormente foram feitas utilizando a aproximação, faz-se agora a sua contabilização, percebendo até que ponto afeta ou não os resultados, aplicando o resultado exato onde é considerado a pressão média em vez da pressão na culatra.

A alteração faz com que nas equações desenvolvidas M seja substituído por MR_L^2 , termo que foi designado de M_1 .

2.3. LIMITAÇÕES DO MODELO

Como principais limitações do modelo tem-se a impossibilidade de representar exatamente o efeito da cinta de travamento, elemento chave na pressão que se cria na câmara de combustão e na estabilidade de voo do projétil através do movimento de rotação induzido quando se desloca no interior do tubo estriado. O coeficiente da taxa de queima é considerado constante, devida à falta de informação mais precisa, e não função da pressão, é outra limitação importante. Por último o facto de o modelo só apresentar valores próximos dos reais no caso de se considerar a carga 2 (como se mostra de seguida), pretende-se que futuramente funcione corretamente para as diversas cargas.

3. RESULTADOS

3.1. DEFINIÇÃO DA CARGA IDEAL

Antes de se iniciar o estudo de balística interna é determinado a **carga ideal**, definida como a carga de pólvora que, através de um aumento em massa do projétil, minimiza os erros obtidos.

Como referências são utilizados os valores de pressão máxima na base do projétil facultados no *software* PRODAS e os valores de velocidade do projétil à saída do obus apresentados nas Tábuas de Tiro.

Verifica-se nas figuras 2 e 3 que a carga 2, minimiza os erros de velocidade e pressão, respetivamente, em relação aos valores de referência.

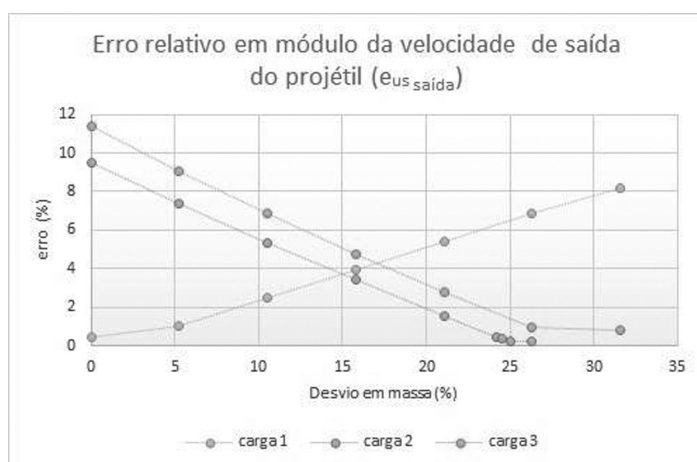


Figura 5 - Erro da velocidade à saída em função do desvio em massa

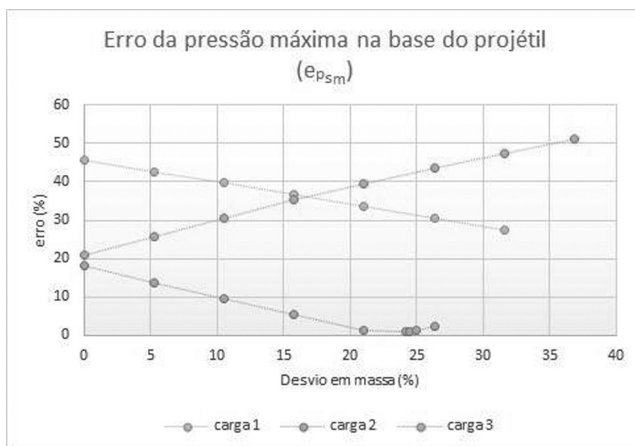


Figura 6 - Erro da pressão máxima na base do projétil em função do desvio em massa

Considera-se a carga 2 como ideal ao sistema, verificando-se na tabela 1 que o desvio em massa de 24,21% permite obter resultados bastante satisfatórios. De notar que se aumentar um pouco o desvio em massa, o erro em velocidade continua a diminuir.

Tabela 1 - Evolução dos erros de u_s saída e $p_{s,max}$ para a carga 2 em função do desvio em massa

Desvio (%)	$e u_{s0}$	$e p_{s,max}$
0	9,5	18,27
10,53	5,34	9,43
15,79	3,4	5,3
21,05	1,54	1,36
24,21	0,47	0,92
24,5	0,37	1,12
25	0,21	1,48

3.2. COMPARAÇÃO GÁS PERFEITO E GÁS REAL

Não considerando o desvio em massa utilizado para a escolha da carga ideal, foi realizada uma comparação entre o modelo apresentado em Carlucci

e Jacobson (2014) e o modelo desenvolvido no presente trabalho no qual é considerado a equação de Noble-Abel, ainda sem considerar as restantes alterações ao sistema (atrito e correção de M), isto é, o apresentado em 2.2. Como seria de esperar, analisando as equações de estado de Noble-Abel e dos gases perfeitos, nota-se um aumento de pressão máxima e de velocidade à saída quando não se considera o gás perfeito (Figuras 4 e 5). A alteração da pressão ainda é significativa (aproximadamente 9%), sendo o desvio na velocidade apenas de 2%.

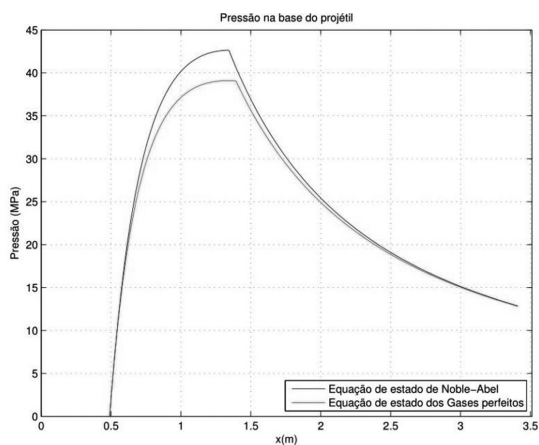


Figura 7 - Pressão na base do projétil (p_s) considerando gás perfeito e gás real

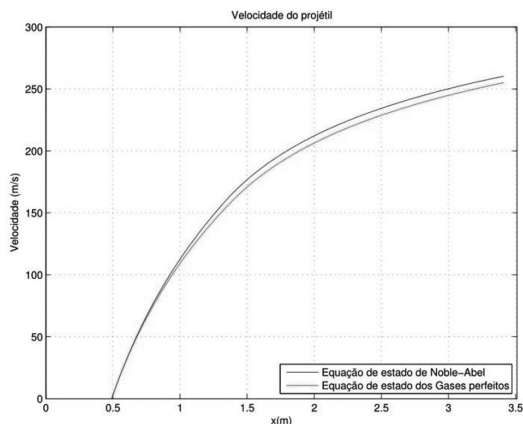


Figura 8 - Velocidade (u_s) considerando gás perfeito e gás real

Verifica-se que a análise fica mais próxima dos valores de referência quando se considera a equação de estado de Noble-Abel.

3.3. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO θ

De modo a estudar a influência da geometria do grão de pólvora, fez-se uma análise considerando a geometria da carga M4A2 *white bag*, também utilizada no Obus em estudo. Trata-se de um grão multiperfurado, progressivo, com $\theta = -0,172$. De resto considerou-se as propriedades da carga 2 de M3A1 *green bag* (carga ideal).

Com este formato de grão verificou-se que não ocorre burnout enquanto o projétil está no interior do tubo, o que é sempre de evitar porque não se aproveita a totalidade da energia potencial da carga propulsora. Na figura 9 apresenta-se isso mesmo, notando-se um decréscimo significativo da velocidade do projétil à saída e da pressão máxima atingida.

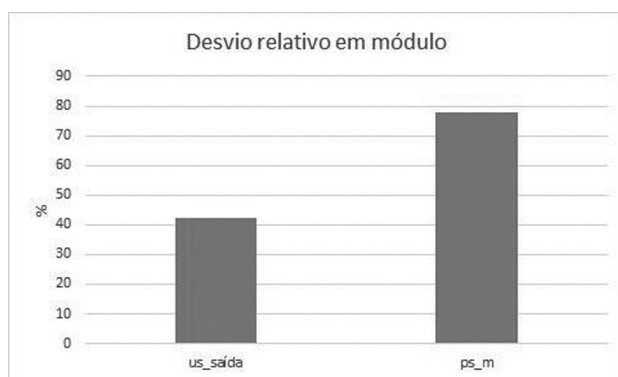


Figura 9 - Desvio relativo em módulo de grão de geometria progressiva em relação ao grão de geometria

Apesar do burnout ocorrer fora do obus, a existência de um máximo na pressão explica-se devido a dois efeitos antagônicos: a expansão da câmara de combustão, que tende a reduzir a pressão, e a inflamação da carga propulsora, que tende a aumentá-la.

3.4. INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO β

Fez-se uma análise de sensibilidade à taxa de queima do grão de pólvora β , a partir do valor de referência para a carga M3A1, fornecido pela base de dados do software PRODAS.

Apresenta-se em forma gráfica (Figuras 8 e 9), como a alteração deste parâmetro afeta a evolução da pressão e da velocidade ao longo do processo de balística interna. O valor fornecido pelo software é designado por β_0 e

$$\beta_1 < \beta_2 < \beta_3 < \beta_4 < \beta_0 < \beta_5 < \beta_6$$

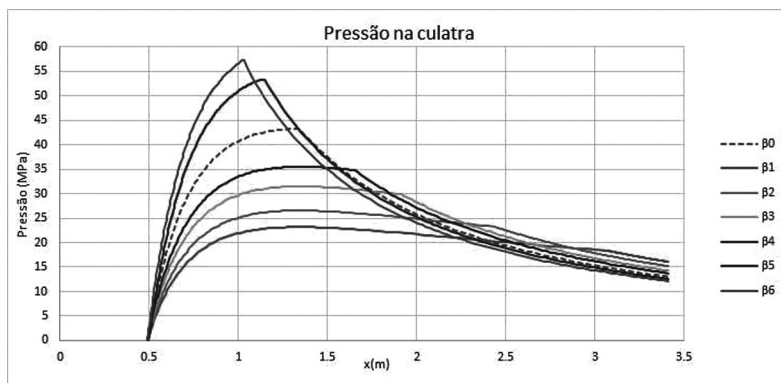


Figura 10 – Pressão na culatra para diversos β

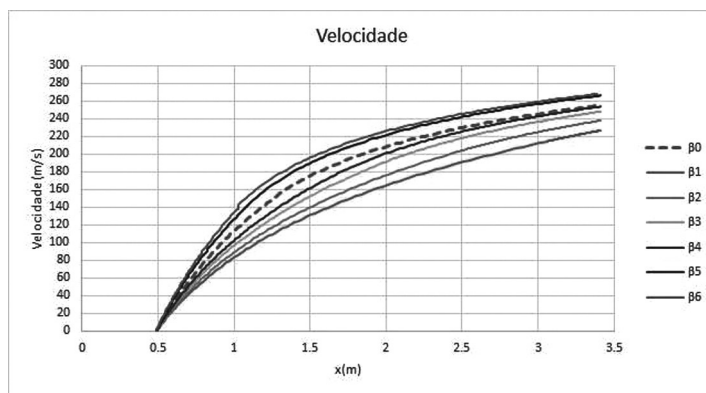


Figura 11 – Velocidade do projétil para diversos β

Na análise realizada verificou-se que a taxa de queima do grão de pólvora β é um parâmetro que influencia consideravelmente os valores obtidos.

Analisando a evolução da pressão com o deslocamento do projétil, os resultados obtidos mostram que quanto maior for a taxa de queima do grão de pólvora maior é a pressão máxima atingida e o *burnout* ocorre com o projétil mais perto da culatra. Por outro lado, uma maior pressão máxima leva a uma menor pressão no momento da saída do projétil, porque aumenta o decaimento da curva de pressão. De reparar também que para elevados

valores de β a pressão máxima ocorre no *burnout*, o que já não é verdade para baixos valores deste parâmetro. Quanto a alteração da velocidade com β , é de notar que um aumento de deste implica uma maior velocidade à saída.

3.5. COMPARAÇÃO DE MODELOS E APROXIMAÇÕES COM O PRODAS

Feito o desenvolvimento do modelo, a recolha de resultados passou por diversas fases, começando-se pela solução mais simples ($f_0 = 1$, sem correções), a qual não considera nem correções em massa, nem de M e de atrito. Aplicando todas estas (desvio em massa, M e atrito) obteve-se a situação em que se minimizou os erros relativos aos valores de referência ($f_0 = 1$, Melhor solução), por último fez-se a análise complementar em que partindo da alteração da condição inicial se tenta simular a cinta de travamento ($f_0 = 0,9606$). O valor da fração de espessura balística restante (f_0) para esta última análise, obteve-se considerando o valor da pressão fornecido pelo PRODAS no instante antes do projétil se mover ($p_0 = 4,44\text{MPa}$), o que implica, devido à equação de estado o valor de f_0 apresentado.

Fez-se então uma comparação de todas estas aproximações com os valores do *software* PRODAS, apresentando-se os gráficos da evolução da pressão e da velocidade ao longo do seu deslocamento no interior do obus, expostos nas Figuras 6 e 7.

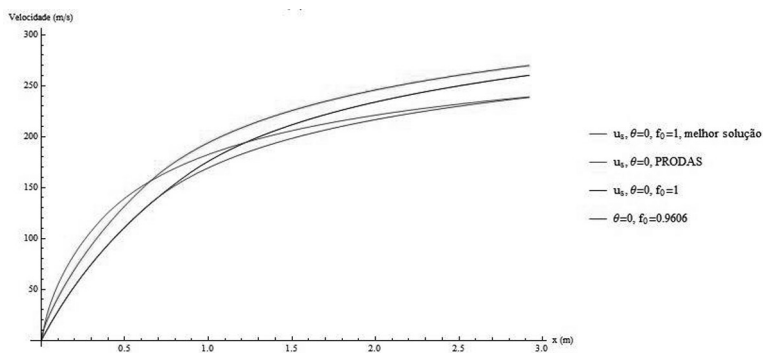


Figura 12 - Comparação simultânea de modelos - Velocidade do Projétil

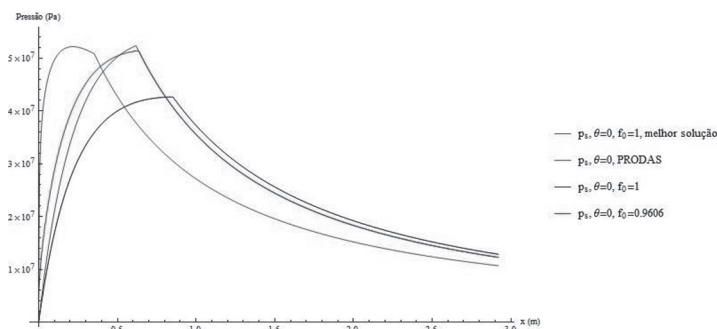


Figura 13 - Comparação simultânea de modelos - Pressão na base do projétil

De modo a completar a informação proveniente das imagens anteriores segue-se as tabelas resumo 2 e 3, com os resultados considerados mais significantes (pressão máxima e velocidade do projétil à saída).

	$P_s \text{ máx}$ [MPa]	$u_s \text{ saída}$ [m/s]
$f_0 = 1$, sem correções	42,64	260,28
$f_0 = 1$, melhor solução	52,37	238,57
$f_0 = 0.9606$	52,09	269,88
PRODAS	52,17	239,04
Tábuas de Tiro	-	237,7

Tabela 2 - Resultados de $p_{s\text{máx}}$ e u_s saída dos diversos modelos desenvolvidos

	$e p_{sm}$ [%]	$e u_s \text{ saída}$ [%]
$f_0 = 1$, sem correções	18,27	9,50
$f_0 = 1$, melhor solução	0,38	0,37
$f_0 = 0.9606$	0,153	13,54
PRODAS	0	0,56
Tábuas de Tiro	-	0

Tabela 3 – Erros relativos de $p_{s\text{máx}}$ e u_s à saída dos diversos modelos desenvolvidos

Conclui-se que, em relação à velocidade, a melhor solução continua a ser obtida com a correção em massa do projétil, sendo a pior solução, a que corresponde a $f_0 = 0,9606$. Para a pressão obtém-se, no entanto, uma boa

concordância entre a solução que considera a cinta de travamento, com $f_0 = 0,9606$, sendo de esperar que assim fosse, uma vez que para se atingir este valor se partiu de uma pressão fornecida pelo PRODAS.

4. CONCLUSÕES

Para o desenvolvimento de armamento, quer do sistema propulsor, quer do projétil, é necessária uma boa compreensão dos fenómenos que ocorrem enquanto o projétil se desloca no interior da arma de fogo, de modo a garantir a segurança dos utilizadores, bem como a velocidade de saída do projétil. A necessidade de compreender e contabilizar os fenómenos de balística interna não constitui uma tarefa fácil, sendo uma área de estudo que iniciou o seu desenvolvimento há já alguns séculos. Devido à complexidade das equações que descrevem os processos envolvidos, a obtenção de resultados exige o recurso a computadores. As técnicas de aquisição de dados experimentais, tarefa essencial na validação dos também têm evoluído significativamente. No presente trabalho desenvolveu-se um modelo matemático com o objetivo de simular o disparo efetuado por um obus de artilharia, utilizando-se os conhecimentos adquiridos nas disciplinas de termodinâmica e mecânica dos fluidos. Considerou-se como referência Carlucci e Jacobson (2014), tendo-se em seguida generalizado a análise de Carlucci para o caso de um gás real.

O projétil considerado neste trabalho foi o M107 155 mm, de modo a poder comparar os resultados numéricos obtidos com valores já tabelados. Durante o decorrer do trabalho foi possível assistir, no campo militar de Santa Margarida, ao disparo do Obus M114 A1 155 mm/23, com o projétil M107 155 mm, utilizando a carga propulsora M3A1 *green bag*.

Concluído o modelo, a primeira preocupação foi valida-lo com os resultados de referência, tanto de forma qualitativa, através das curvas de pressão e velocidade, como também a nível quantitativo, comparando os resultados com os valores das tábuas de tiro e do *software* PRODAS.

Numa primeira análise dos resultados do modelo, verificou-se que sem aplicar correções à massa os valores apresentam erros significativos, o que está de acordo com o esperado, uma vez que, o modelo não simula o efeito da cinta de travamento. Contabilizando este efeito na forma de um aumento de massa do projétil. Verificou-se que o modelo melhorou significativamente, tendo-se escolhido a carga 2 da carga M3A1 *green bag*, como a carga ideal. Validado o modelo para esta carga, seguiu-se uma análise de sensibilidade de modo a verificar a importância de alguns parâmetros balísticos, nomeadamente, a hipótese de gás perfeito, a influência da geometria do grão de pólvora e da taxa de queima.

Em relação à hipótese de gás perfeito verificou-se que a aplicação da equação de estado dos gases perfeitos, em ambientes de elevadas pressões, não é a melhor opção a tomar. Obteve-se uma alteração significativa na pressão máxima (aproximadamente 9%) quando se considerou a equação de estado de Noble-Abel, o que faz sentido, pois, esta equação tem em conta o volume ocupado pelas moléculas do gás.

Já com a alteração da geometria do grão de pólvora, considerando a mesma massa de pólvora que a carga 2, verificou-se a não ocorrência do burnout enquanto o projétil se encontra no interior do tubo do obus.

Este fenómeno indesejado não permite aproveitar a totalidade da energia potencial da pólvora, uma vez que, momentos após a saída do projétil pelo tubo do obus, esta ainda não foi totalmente consumida.

Um parâmetro de fundamental importância no estudo realizado é o coeficiente de taxa de queima (β). Uma maior taxa de queima implica valores de pressão máxima e de velocidade à saída mais elevados, visto que, aumenta a quantidade de gases que se libertam nos primeiros instantes do movimento do projétil. Caso se reduza o valor de β , a pressão máxima é inferior, porém a pressão à saída é superior, o que se justifica pela menor velocidade na transformação de carga sólida em gás, levando a ocorrência do burnout mais próximo da saída. Com o objetivo de se aproximar ainda mais os resultados obtidos dos valores de referência, representou-se o atrito através de um aumento em massa do projétil. Considerou-se ainda o efeito da cinta de travamento, alterando para tal a condição inicial do modelo. Os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que, não se corrigiu a massa do projétil, embora os resultados com a correção em massa sejam mais precisos.

Como trabalho futuro pretende-se generalizar a análise efetuada para outras cargas e geometrias de grão de pólvora. O investimento em sistemas de aquisição de dados é também fundamental num país onde o desenvolvimento de modelos de balística começa a dar os primeiros passos. A este propósito a aquisição do Internal Pressure Gauge B251 e respetiva formação de pessoal técnico especializado, será um passo fundamental na obtenção da pressão atingida na câmara de combustão imediatamente antes do rebentamento da cinta de travamento e, de um modo geral na validação do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARLUCCI, Donald e JACOBSON, Sidney (2014). *Theory and Design of Guns and Ammunition*, CRC Press

CORNER, Jhon (1950). *Theory of Interior Ballistics of Guns*, Wiley, California

Daniel Marques é Tenente de Material e Mestre em Engenharia Mecânica Militar pela Academia Militar.

Aires dos Santos é Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico. Desenvolve as suas atividades de investigação no Laboratório de Robótica e Sistemas em Engenharia e Ciência (LARSYS).

Bruno Pereira é Professor do Departamento de Matemática Aplicada à Tecnologia e à Empresa, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

