

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

1º TEN PEDRO DE OLIVEIRA CRONEMBERGER

**PROBLEMA INVERSO DE ESTIMATIVA DE PARÂMETROS
DE PROPELENTES A PARTIR DA BALÍSTICA INTERNA DE
UMA ARMA**

Rio de Janeiro

2012

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

1º Ten PEDRO DE OLIVEIRA CRONEMBERGER

**PROBLEMA INVERSO DE ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE
PROPELENTES A PARTIR DA BALÍSTICA INTERNA DE UMA ARMA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Orientador: Maj Aldélio Bueno Caldeira – D.C.

Rio de Janeiro

2012

C2012

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro - RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmar ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do autor e do orientador.



INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

1º Ten PEDRO DE OLIVEIRA CRONEMBERGER

**PROBLEMA INVERSO DE ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE
PROPELENTES A PARTIR DA BALÍSTICA INTERNA DE UMA ARMA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Orientador: Maj Aldélio Bueno Caldeira – D.C.

Aprovada em 09 de outubro de 2012 pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Aldélio Bueno Caldeira – D.C. do IME – Presidente

Prof. Jorge Audrin Morgado de Gois – Dr. Ing. do IME

Prof. Marcelo José Colaço – D.C. da UFRJ

Rio de Janeiro

2012

3

Ao meu pai Almir, minha mãe Aulair e ao meu irmão João,
pelo apoio e carinho.

AGRADECIMENTOS

Ao Cap Édio Pereira Lima Júnior do IME pelo apoio prestado no contato com o CAEx e pelas experiências trocadas durante o curso de Mestrado.

Ao Maj Alexandre Malízia de Macedo do CAEx pelas informações fornecidas sobre ensaios com tiro de 7,62m.

Ao colega Bruno dos Reis Jaccoud pelas experiências trocadas no desenvolvimento de algoritmos.

“Aprender sem pensar é tempo perdido.”

CONFÚCIO

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	9	
LISTA DE TABELAS.....	12	
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	13	
1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Organização do Trabalho	22
1.1.1	Problema Direto	22
1.1.2	Problema Inverso	23
1.1.3	Determinação de Parâmetros Otimizados	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1	Balística Interna	25
2.2	Problema Inverso	32
2.3	Problema Inverso e otimização em Balística Interna.....	34
3	METODOLOGIA	37
3.1	Primeira Etapa – Modelo do Problema Direto.....	37
3.2	Segunda Etapa – Problema Inverso de Estimativa de Parâmetros.....	38
3.3	Terceira Etapa – Otimização da Balística Interna.....	39
3.4	Técnica de Problema Inverso	40
4	MODELO DO PROBLEMA DIRETO.....	45
4.1	Problema Físico.....	45
4.2	Formulação Matemática.....	47
5	DETERMINAÇÃO DAS FUNÇÕES DESCONHECIDAS.....	50
6	ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DO PROPELENTE.....	58
6.1	Análise de Sensibilidade	58
6.1.1	Coeficientes de Sensibilidade	58
6.1.2	Análise da Correlação entre os Parâmetros.....	62
6.1.3	Lugar Geométrico das Soluções (a,B)	63
6.2	Verificação do Código Computacional – Recuperação dos parâmetros de uma curva com ruído.....	

6.3	Estimativa de Parâmetros de Propelente a Partir de Dados Experimentais	66
7	OTIMIZAÇÃO DA CURVA DE PRESSÃO	67
7.1	Aumento da Velocidade de Boca Mantendo a Pressão Máxima	67
7.1.1	Variação da Força do Propelente e do Expoente da Lei de Queima.....	69
7.2	Redução da Pressão Mantendo a Velocidade de Boca Original	71
7.3	Otimização da Pressão Alterando Somente a Geometria dos Grãos	73
8	CONCLUSÃO	76
8.1	Primeira Parte: Problema Direto	77
8.2	Segunda Parte: Problema Inverso	77
8.3	Terceira Parte: Busca de Curvas Otimizadas	78
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG 1.1 Etapas da balística.....	17
FIG 2.2 Diagrama esquemático de alguns conceitos de balística interna	18
FIG 1.3 Curva de pressão experimental plotada ao longo do tempo	19
FIG 1.4 Curvas de pressão real e otimizada.....	21
FIG 1.1.1 Diagrama esquemático do problema direto	22
FIG. 1.1.3 Diagrama esquemático do problema inverso.....	24
FIG 2.1 Propulsão com propelente sólido.....	26
FIG 2.2 Comparação entre curvas de pressão	27
FIG 2.3 Queima de um grão heptaperfurado.....	29
FIG 2.4 Comparação entre curvas de pressões	36
FIG 3.1 Diagrama esquemático da primeira etapa do trabalho.....	38
FIG 3.2 Diagrama esquemático da segunda etapa do trabalho	39
FIG 3.3 Diagrama esquemático da terceira etapa do trabalho	40

FIG 3.4 Procedimento iterativo do PSO.....	42
FIG 4.1 Subprocessos 1 e 2.....	45
FIG 4.2 Subprocessos 3, 4, 5 e 6.....	45
FIG 5.1 Comparação das parcelas da energia total	52
FIG 5.2 Curva de pressão do problema direto comparada com a do PRODAS	55
FIG 5.3 Curva de pressão do problema direto, do PRODAS e do	55
FIG 5.4 Convergência da curva do problema direto em relação à curva do PRODAS	56
FIG 5.5 Energia perdida como função da energia cinética	57
FIG 5.6 Energia perdida como função da quantidade de movimento.....	57
FIG 6.1 Sensibilidade da pressão em relação ao expoente da lei de queima.....	60
FIG 6.2 Comparação das sensibilidades	61
FIG 6.3 Comparação entre curvas variando a massa inicial do propelente	62
FIG 6.4 Lugar geométrico das possibilidades de solução (a,B).....	64
FIG 6.5 Problema inverso com ruído	65
FIG 6.6 Curva experimental e curva gerada	66

FIG 7.1 Variação da força propelente e do expoente da lei de queima.....	70
FIG 7.2 Redução da pressão mantendo a velocidade de boca original	72
FIG 7.3 Otimização da pressão alterando somente a geometria dos grãos $K=-1/3$	75

LISTA DE TABELAS

TAB. 2.1 Frações da energia química total do propelente	30
TAB. 3.1 Parâmetros do PSO	42
TAB 4.1 Dados de entrada do problema direto.....	49
TAB 5.1 Energias envolvidas num tiro 7,62mm	51
Tab 5.2 Trecho da planilha para cálculo da força de resistência	54
TAB. 5.3 Constantes da lei de queima	54
TAB 6.1 Comparação dos parâmetros	65
TAB 7.1 Variação da força do propelente e do expoente da lei de queima	70
TAB 7.2 Redução da pressão mantendo a velocidade de boca original	71
TAB 7.3 Otimização da pressão alterando somente a geometria dos grãos $K=-1/3$	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

- CSR - Coeficiente de Sensibilidade Relativo
- PSO - Algoritmo de otimização por enxame de partículas “Particle Swarm Optimization”

SÍMBOLOS

- α - parâmetro empírico de inércia (PSO)
- β - parâmetro empírico de mudança de velocidade (PSO)
- a - índice de pressão (expoente da lei de queima)
- B - constante da taxa de queima que multiplica a pressão [m^2/sPa^a]
- c - covolume dos gases [m^3/kg]
- Calc^k - Curva calculada na iteração k
- D - calibre da arma [mm]
- E_h - energia interna do gás [J]
- E^k - média dos desvios na k-ésima iteração [Pa]
- E_l - energia perdida [J]
- E_p - energia cinética do projétil [J]
- E_t - energia total do propelente [J]
- F - constante de força [MJ/kg]
- F_r - força de resistência [N]
- J - matriz jacobiana dos coeficiente de sensibilidade relativos [Pa]
- k - fator de forma
- K_v - constante da taxa de queima que multiplica a velocidade
- K_x - constante da taxa de queima que multiplica a posição [s^{-1}]
- l - comprimento do grão [mm]
- L - comprimento do cano [mm]
- m_c - massa inicial de propelente [g]

m_p	-	massa do projétil [g]
N	-	número de partículas do PSO
n	-	número de pontos calculados para as curvas de pressão
P	-	pressão dos gases [MPa]
p_g	-	melhor valor encontrado na população
p_i	-	melhor valor achado para a partícula i
P_{\min}	-	pressão mínima para que haja movimento do projétil [MPa]
r	-	números randômicos com distribuição uniforme entre 0 e 1
Ref	-	Curva de referência
t	-	tempo [s]
T_g	-	temperatura absoluta do gás [K]
V	-	velocidade do projétil [m/s]
V_o	-	velocidade de boca do projétil [m/s]
V_i	-	vivacidade [m/sPa ^a]
Vol_{cc}	-	volume da câmara [m ³]
Vol_g	-	volume dos gases [m ³]
W	-	comprimento balístico (web) [mm]
x_i	-	x_i é o i -ésimo vetor individual de parâmetros
z	-	fração volumétrica
γ	-	razão dos calores específicos do gás
ρ_c	-	massa específica do propelente [kg/m ³]
σ	-	desvio-padrão do ruído [MPa]

RESUMO

Este trabalho aborda o problema inverso de estimativa de parâmetros do propelente a partir da curva de pressão da balística interna de uma arma, sendo o fuzil 7.62 adotado como caso de estudo. Um modelo de parâmetros concentrados é utilizado para resolver o problema direto. Funções representativas da energia perdida e da força de resistência ao movimento do projétil no interior da arma são propostas, com base em simulações numéricas realizadas com software PRODAS, e introduzidas no modelo de parâmetros concentrados. Parâmetros da lei de queima do propelente que visam contabilizar os efeitos convectivos e de pressão variável durante combustão no interior da arma são estimados e empregados no modelo de parâmetros concentrados. A solução numérica do problema direto é obtida pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem. O problema inverso de estimativa de parâmetros é resolvido pela técnica de otimização do enxame de partículas. A influência dos parâmetros do propelente sobre a pressão é revelada pela análise de sensibilidade e os parâmetros do propelente são estimados a partir de uma curva experimental de pressão, bem como a partir de curvas teóricas de pressão. Estas curvas teóricas possibilitam a utilização do problema inverso como instrumento de otimização da balística interna, permitindo identificar parâmetros ótimos do propelente ou quantidades ótimas de diferentes grãos de propelentes. Os resultados mostram que o procedimento proposto pode complementar a análise química do propelente, realizando a medida indireta dos parâmetros da lei de queima a partir de dados experimentais da balística interna. Ademais, possibilidades de otimização da balística interna são identificadas, indicando direções de pesquisa na área de propelentes sólidos, e revelando soluções viáveis na atualidade.

ABSTRACT

This paper addresses the inverse problem of parameter estimation of propellant from the pressure curve of the internal ballistics of a gun, the rifle 7.62 being adopted as a case study. A lumped parameters model is used to solve the direct problem. Representative functions of the energy lost and the resistance force to the projectile movement within the gun are proposed, based on numerical simulations performed with the software PRODAS, and introduced into the model of lumped parameters. Parameters of the law of burning propellant designed to account for the convective effects and the effects of variable pressure during the combustion within the gun are estimated and used in the model of lumped parameters. The numerical solution of the direct problem is obtained by the Runge-Kutta of 4th order method. The inverse problem of parameter estimation is solved by the technique of particle swarm optimization. The influence of parameters on the pressure of the propellant is revealed by analysis of sensitivity and the propellant parameters are estimated from an experimental pressure curve, as well as from theoretical pressure curves. These theoretical curves allow the use of the inverse problem as a tool for optimization of internal ballistics, making it possible to identify optimal parameters of the propellant or optimal quantities of different propellant grains. The results show that the proposed procedure can complement chemical analysis of the propellant, performing the indirect measurement of parameters of the law of combustion from experimental data of the internal ballistics. Moreover, possibilities of optimization of internal ballistics are identified, indicating research directions in the area of solid propellants, and revealing viable solutions for today.

1 INTRODUÇÃO

1.1 FUNDAMENTOS

A balística é o ramo da ciência mecânica que estuda o comportamento dos projéteis em diversos aspectos, destacando-se três: a propulsão, o voo e os efeitos no alvo. Para cada um desses aspectos, há uma subdivisão da balística. São elas: balística interna, externa e terminal, respectivamente. Além desses três subgrupos de estudo, a balística investiga ainda um quarto conjunto de fenômenos, relacionado não propriamente ao projétil, mas aos efeitos dos gases propelentes que são ejetados da arma no momento do tiro. Este quarto ramo de estudo se chama balística intermediária. Todos esses quatro ramos podem também ser entendidos como etapas de um mesmo fenômeno, seguindo uma cronologia temporal do disparo até o efeito sobre o alvo. A FIG. 1.1 abaixo ilustra essa cronologia.

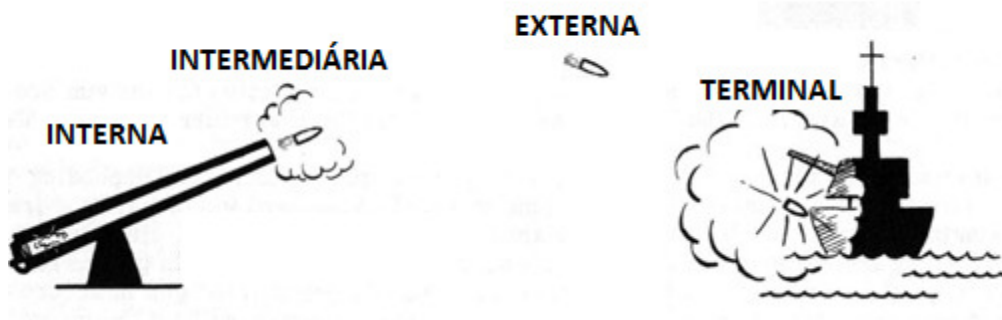


FIG. 1.1 Etapas da balística

A balística interna é o campo de estudo dos fenômenos que produzem, essencialmente, a aceleração do projétil. No caso das armas automáticas e semiautomáticas, a balística interna também se interessa pela adequada realização do ciclo mecânico do armamento. Essas duas funções são cumpridas pela expansão de gases gerados com a iniciação e deflagração de uma quantidade de propelente. Os gases são gerados a uma determinada taxa, fazendo com que a sua pressão seja uma função do tempo. Os gases propelentes simultaneamente aceleram o projétil e atuam no mecanismo de ciclagem da arma (dinâmica do projétil e dinâmica da arma). A queima do propelente com subseqüentes aumento e diminuição da pressão dos gases

e a dinâmica do projétil são os fenômenos da balística interna que serão explorados na presente pesquisa, conforme se observa na FIG. 1.2.

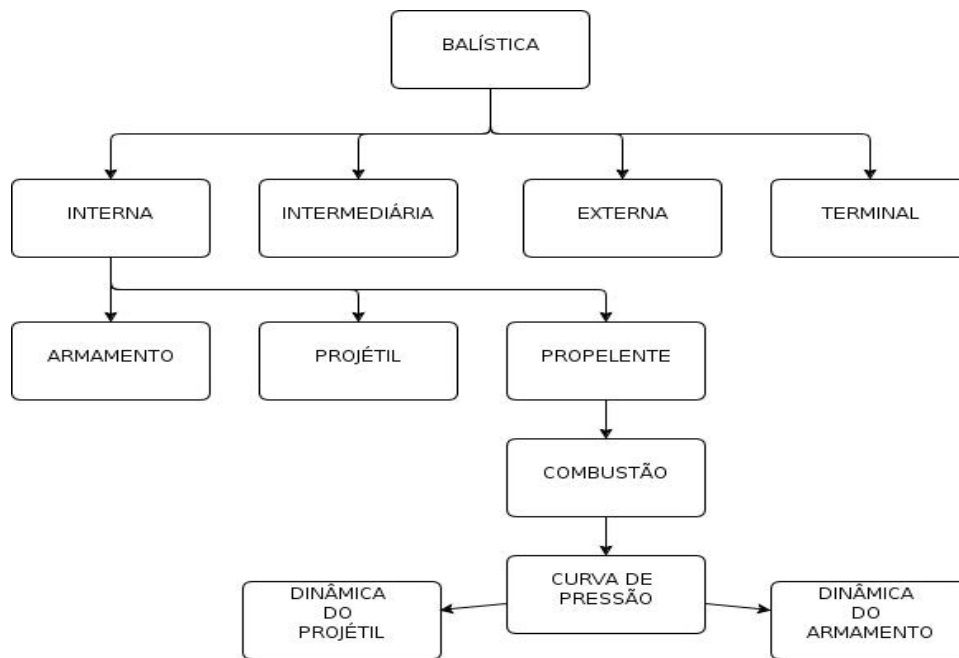


FIG. 1.2 Diagrama esquemático do posicionamento de algumas áreas de estudo da balística interna

A balística interna também estuda diversos aspectos, dentre os quais, podemos citar: temperatura dos gases e conseqüente aquecimento do cano, velocidade de boca do projétil, acelerações sofridas pelo projétil, recuo sentido pelo atirador, cadência de tiro, rotação final do projétil, entre outros.

O início do fenômeno da balística interna se dá no momento da iniciação da estopilha ou cápsula, em geral mecanicamente, pelo impacto de um percutor. A estopilha ocasiona a ignição de uma quantidade de material sólido altamente energético que fornece a chama que inicia a carga propelente. Uma vez iniciada a carga propelente, dá-se início a um complexo processo de transformação de sólido em gás através da combustão da carga propelente. Essa combustão ocorre em um curto intervalo de tempo e é classificada como deflagração. A deflagração é a combustão na qual a frente de chama se propaga com velocidades abaixo da

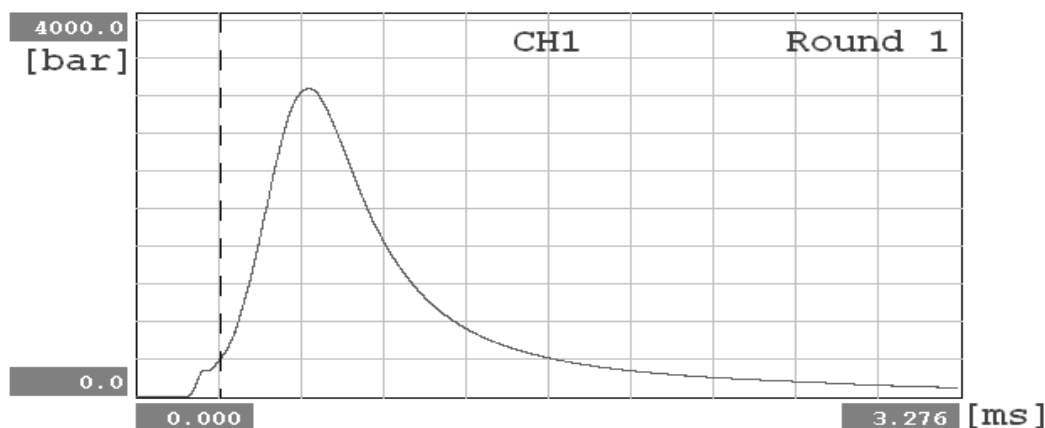
velocidade do som no meio combustível. A deflagração difere da detonação (ou explosão), que é a combustão onde a chama se propaga com velocidades supersônicas.

A deflagração de uma carga propelente gera uma quantidade de gases que se expande. No caso de uma arma, o volume onde ocorre essa reação é delimitado pela base do projétil e pelas paredes do cano e da câmara. Os gases aceleram o projétil, expandindo o volume onde a deflagração ocorre. O projétil atinge sua velocidade máxima, conhecida como velocidade de boca, ao sair da arma. Neste momento, os gases se expandem para a atmosfera, causando o estampido do tiro.

O tempo da balística interna é delimitado entre a percussão da estopilha (ou cápsula) até a saída do projétil pela boca da arma. Durante este intervalo de tempo, ocorrem fenômenos envolvendo reações químicas e escoamentos multifásicos, já que a carga propelente queima durante todo fenômeno e, ocasionalmente, não queima por inteira.

As características geométricas e químicas do propelente determinam de que forma os referidos gases são gerados. O principal instrumento de avaliação do desempenho dos gases propelentes é a chamada curva de pressão. Esta curva registra o desenvolvimento da pressão dos gases ao longo do cano da arma ou ao longo do tempo. A partir da curva de pressão, é possível avaliar o desempenho da arma em alguns de seus aspectos mais relevantes, como velocidade de boca e força de recuo.

A maneira usual de se obter a curva de pressão é a instalação de transdutores de pressão através da furação do cano da arma em determinados pontos. Dessa maneira, obtém-se uma curva da pressão ao longo do tempo para cada ponto onde foi instalado o transdutor. Um exemplo de curva de pressão obtida por este método pode ser observado na FIG. 1.3, que



mostra a curva de pressão obtida na câmara de um fuzil calibre 7,62mm.

FIG. 1.3 Curva de pressão experimental ao longo do tempo

A curva de pressão dos gases provenientes da queima do propelente contém informações fundamentais para o projeto de uma arma. A primeira é a pressão máxima sofrida pelo cano (ou tubo). Outra é o formato da curva, que, em geral, apresenta um rápido crescimento da pressão nos instantes iniciais da balística interna, atingindo um máximo, e em seguida observa-se uma redução da pressão ao longo do tempo, conforme verificado na FIG. 1.3. Ademais, a área sob a curva de pressão determina o impulso que o projétil sofre e, portanto, a velocidade de boca.

Há basicamente dois elementos que influenciam na amplitude e formato da curva de pressão de uma determinada arma: o projétil e o propelente que estão sendo utilizados. O projétil é o mais simples, pois a única variável que acrescenta ao fenômeno é a sua massa. Já com o propelente, a análise não é tão simples. Há diversas variáveis relacionadas ao propelente que influenciam o formato e a amplitude da curva de pressão, como, por exemplo, a energia contida em cada unidade de massa do propelente, a denominada força do propelente, e a velocidade com que o propelente libera essa energia.

É intuitivo concluir que um propelente que armazene muita energia proporcionará ao projétil um maior impulso, e um propelente que libere essa energia muito rápido causará um notável pico de pressão durante o disparo. Entretanto, há restrições que devem ser observadas, como a pressão máxima que o cano do armamento pode suportar, a aceleração máxima que o projétil pode suportar e a velocidade de queima máxima que o propelente pode atingir sem que ocorra uma detonação do mesmo.

O conhecimento dos fatores que influem no formato da curva de pressão é fundamental para que se possa obter curvas adequadas a determinados armamentos e munições. A noção de como cada característica do projétil altera a forma da curva, possibilita a manipulação dessas a fim de se obter curvas de formatos desejados. Estas curvas poderiam, por exemplo, manter um valor máximo de pressão atuando por um tempo maior; ou ainda diminuir a pressão máxima, mantendo o impulso total sobre o projétil. Essas curvas otimizadas gerariam um ganho de desempenho tanto no aspecto da propulsão do projétil, quanto no projeto do cano da arma, que poderia ficar mais leve. A FIG. 1.4 ilustra uma situação hipotética em que uma curva A, que possui um acentuado pico de pressão, poderia ser modificada pela manipulação das características do propelente a fim de se obter uma curva B

com um pico menos acentuado e mesmo impulso total (dado pela área sob a curva). Dessa maneira, teríamos uma arma disparando o mesmo projétil com a mesma velocidade, porém submetida a menores esforços devidos à pressão dos gases propelentes.

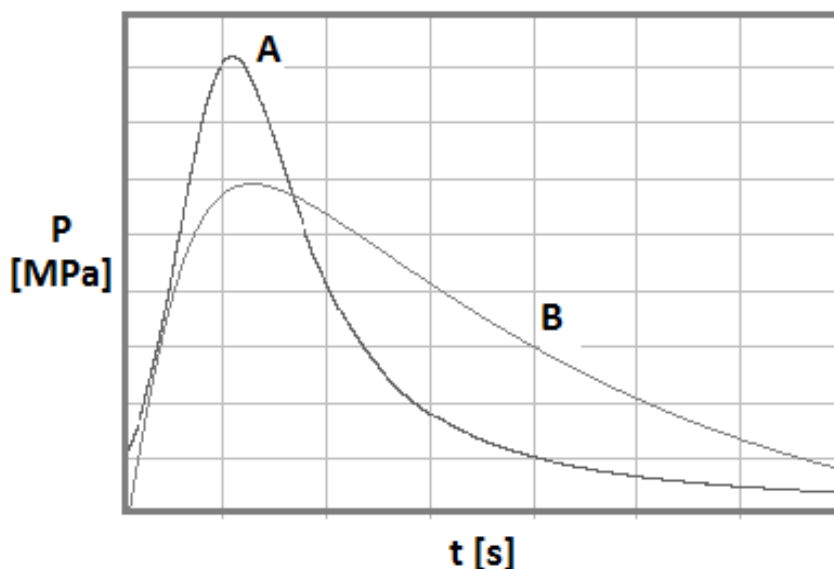


FIG. 1.4 Curvas de pressão real e otimizada.

Técnicas computacionais podem ser utilizadas para identificar como os parâmetros do propelente alteram o formato da curva de pressão e, ainda, simular o efeito de modificações nestes parâmetros. Uma abordagem matemática que permite aliar informações experimentais com modelos físico-matemáticos, buscando a identificação de parâmetros ou funções, recebe o nome de problema inverso.

Um problema inverso consiste em buscar os parâmetros desconhecidos de um modelo matemático que descreve determinado fenômeno. Os dados iniciais para resolver um problema inverso geralmente são medidas experimentais. Um bom exemplo de problema inverso seria tentar determinar o formato de um tambor pelo som que ele emite (SILVA NETO et al. 2005). Na presente pesquisa, o que se pretende inicialmente é determinar os parâmetros balísticos de um propelente a partir da curva de pressão que este propelente produz.

Para atingir a finalidade de obter os parâmetros balísticos do propelente a partir da sua curva de pressão, é necessário que haja um modelo físico-matemático da balística interna. A

primeira parte do presente estudo é a construção e verificação de um modelo matemático que descreva o fenômeno apropriadamente. Este modelo constitui o chamado problema direto.

Uma vez obtido um modelo que descreva o fenômeno da balística interna, pode-se agregar métodos de otimização, visando identificar melhores valores de parâmetros balísticos, de forma a atender a condições de projeto. Ou ainda, como já citado, identificar parâmetros balísticos relacionados a dados experimentais.

1.1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho é dividido em três etapas. Partindo do desenvolvimento e verificação de um código numérico para o problema direto da balística interna, passando pela utilização de problema inverso na determinação de parâmetros de um determinado propelente, até a utilização do modelo construído para otimizar parâmetros balísticos do propelente a partir da especificação de curvas de pressão de referência.

1.1.1 PROBLEMA DIRETO

Nessa etapa desenvolve-se um código numérico em SciLab que implementa o modelo de balística interna de parâmetros concentrados ou *lumped parameters* (FARRAR e LEEMING, 1983). A FIG. 1.2.1 representa os dados de entrada e saída do problema direto da balística interna.

PROBLEMA DIRETO

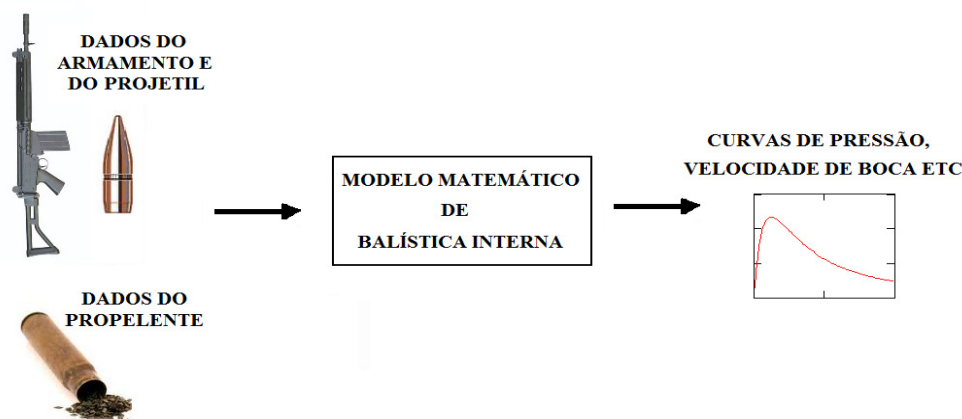


FIG. 1.1.1 Diagrama esquemático do problema direto

O modelo matemático necessita de uma série de parâmetros e funções inicialmente desconhecidos. A obtenção desses parâmetros e funções é feita pela confrontação dos resultados numéricos com os resultados experimentais conhecidos e ainda outros resultados numéricos obtidos pelo software PRODAS. Uma vantagem da utilização do PRODAS é a possibilidade de se levantar diversas informações da balística interna que não são facilmente obtidas experimentalmente. Podemos citar, entre outras: a força de atrito sofrida pelo projétil, a temperatura dos gases e as acelerações sofridas pelo projétil.

1.1.2 PROBLEMA INVERSO

Tendo solucionado o problema direto, o presente estudo passa então a utilizar técnicas de otimização para obter os parâmetros de um determinado propelente a partir de sua curva de pressão (Problema Inverso). As curvas de pressão inicialmente escolhidas são as de um tiro de 7,62mm, devido à disponibilidade desses dados obtidos experimentalmente pelo Centro de Avaliações do Exército - CAEx. É utilizada uma técnica de caráter heurístico, chamada Enxame de Partículas.

Duas diferentes fontes de dados são utilizadas como dados para a solução do problema inverso: curvas de pressão experimentais obtidas por transdutores de pressão instalados em pontos fixos do cano de um fuzil e curvas teóricas de pressão na base do projétil, calculadas pelo software de balística PRODAS.

O modelo de parâmetros concentrados ou *lumped parameters* (FARRAR e LEEMING, 1983), como proposto, considera um único valor de pressão que vale tanto para a culatra, quanto para a base do projétil. Dessa forma, as curvas fornecidas pelo PRODAS estão prontas para serem inseridas no procedimento de solução do problema inverso. Contudo, no caso do dado ser uma curva experimental de pressão em um ponto fixo, a pressão expressa pela curva não é exatamente a pressão que atua na base do projétil. Entretanto, observou-se comparando os valores da curva de ponto fixo com a curva de pressão na base, que a diferença entre os valores é da ordem de 1%, sendo considerada insignificante.

Um diagrama esquemático do problema inverso de determinação de parâmetros balísticos do propelente a partir da balística interna de uma arma é ilustrado na FIG. 1.2.3.

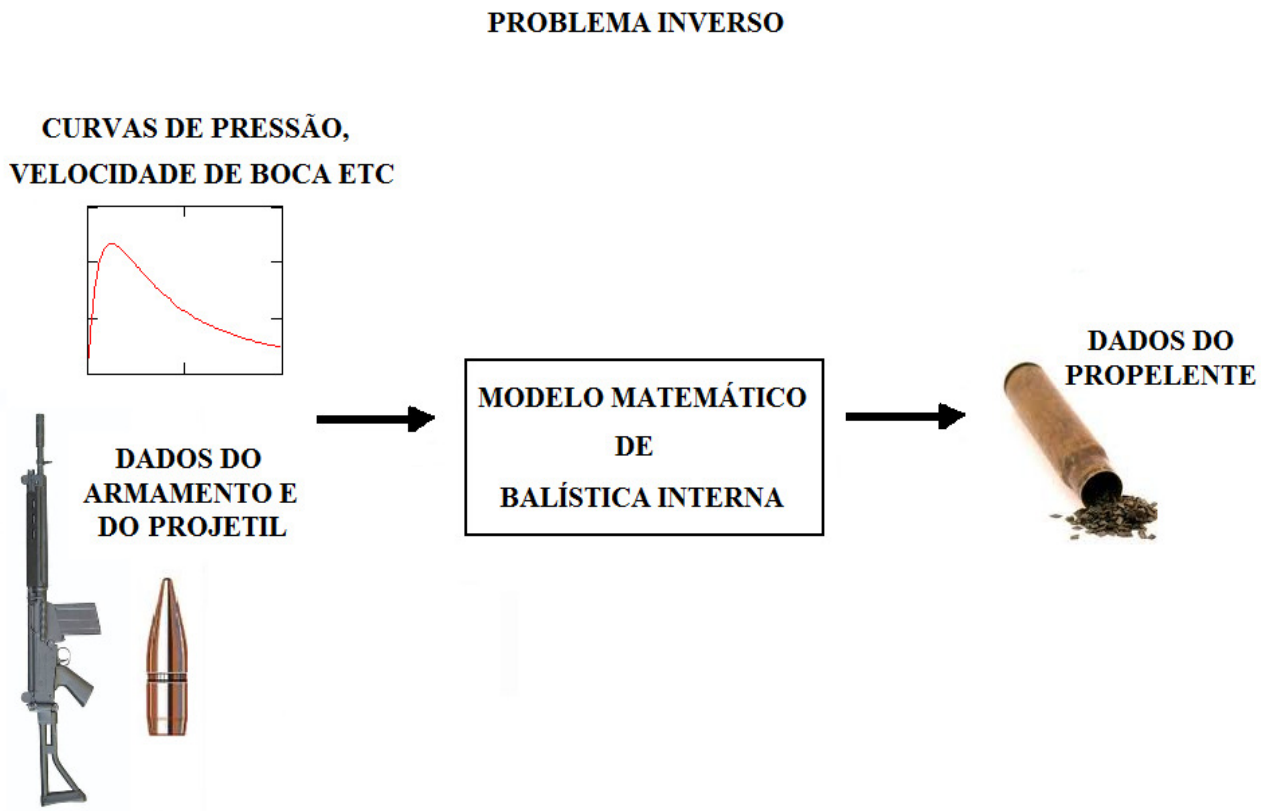


FIG. 1.1.3 Diagrama esquemático do problema inverso

1.1.3 DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS OTIMIZADOS

Na terceira etapa do trabalho, utiliza-se tanto o modelo físico-matemático construído na etapa 1 (problema direto), quanto os procedimentos de solução de problemas inversos utilizados na etapa 2. O escopo dessa última etapa é estimar valores ótimos de parâmetros do propelente que exerçam influências desejáveis na curva de pressão. Por influências desejáveis, pode-se ter, por exemplo a minimização da pressão máxima sofrida pelo cano (ou tubo), mantendo a velocidade de boca do projétil. Ou ainda, pode-se manter a pressão máxima em um nível aceitável e maximizar a velocidade de boca. Em ambos os casos, tais modificações resultariam em uma curva de pressão com um pico menos acentuado, aproximando-se, na medida do possível, de um formato retangular. Este formato maximiza a área da curva de pressão, maximizando portanto o impulso do projétil (KLINGENBERG et al., 1996).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta as fontes de informação utilizadas para o desenvolvimento da presente dissertação. O capítulo está dividido em três partes. Na primeira, são apresentados trabalhos relacionados à balística interna. Na segunda parte, são apresentados trabalhos relacionados às técnicas de otimização e problema inverso, e a terceira parte destina-se a revisão bibliográfica voltada para problema inverso e otimização em balística interna.

Os trabalhos que versam sobre balística interna ilustram, entre outros aspectos, as tendências mais recentes dessa área e as perspectivas futuras. Já os trabalhos que tratam das técnicas de otimização e problema inverso fornecem o embasamento teórico necessário.

2.1 BALÍSTICA INTENTERNA

KLINGENBERG et al. (1995) inicialmente enumera as motivações do estudo das técnicas de propulsão (i.e. balística interna) modernas que visam: aumentar a energia cinética do projétil, aumentar a letalidade, reduzir custos, aumentar a confiabilidade e diminuir a vulnerabilidade a falhas. O trabalho refere-se à velocidade de boca do projétil, ou energia cinética de boca, como um fator fundamental ao desempenho da arma, influenciando em alcance, precisão e efeitos terminais. Entretanto, o aumento da velocidade de boca não pode ser indiscriminado, visto que este provoca também efeitos indesejados, como alta detectabilidade

da arma e efeitos possivelmente letais sobre o(s) atirador(es) devido ao escape súbito de gases em alta pressão pela boca da arma. Este trabalho ainda aborda a possibilidade de melhorar a balística interna (essencialmente a curva de pressão) por meio do uso de propelentes alternativos. Recentemente, os pesquisadores vêm experimentando novas formas de propulsão, a fim de otimizar os fatores de desempenho das armas (mais especificamente a velocidade de boca) e minimizar a pressão máxima experimentada pelo tubo. Destacam-se como novas técnicas, o uso de propelentes líquidos e a propulsão eletromagnética.

As *travelling charges* são uma alternativa para o aumento da performance da balística interna. Neste tipo de propulsão, uma carga de propelente químico (que pode ser sólido ou líquido) fica presa ao projétil e viaja junto com este pelo tubo. Dessa forma, consegue-se um impulso adicional com uma característica muito interessante: o impacto na pressão máxima é pequeno. Isso ocorre, porque as *travelling charges* queimam de forma independente da carga principal de propelente, mantendo uma taxa de geração de gases independente da taxa do propelente principal (KLINGENBERG et al. 1995).

Na propulsão química, o projétil é acelerado pelos gases gerados na queima de propelentes sólidos, líquidos ou gasosos que, estando sob extrema pressão, aplicam uma força na base do projétil. A energia química é convertida em questão de milissegundos, gerando um gás com elevada energia interna, resultando em altas pressões e temperaturas. A energia deste gás é então convertida em energia cinética do projétil. O desenvolvimento dessas etapas pode ser observado na FIG 2.1. Ademais, todo este processo de conversão de energias é extremamente rápido e deve ocorrer de forma controlada e com repetibilidade entre um tiro e outro. A final, a arma deve sempre disparar uma mesma munição com uma mesma velocidade de boca.

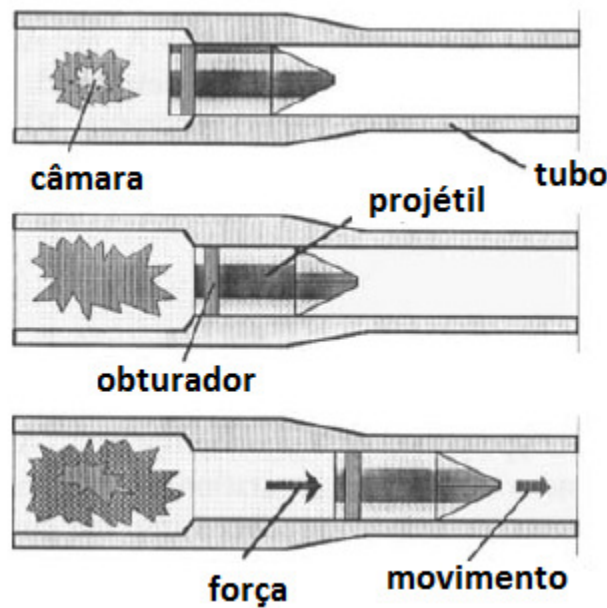


FIG 2.1 – Propulsão com propelente sólido (KLINGENBERG et al. 1996)

Armas convencionais que utilizam propelentes sólidos datam do séc. XIV. Essa é a espécie mais comum de armamento, e continuam sendo investigados possíveis aprimoramentos no seu desempenho.

Uma técnica muito promissora tanto no campo teórico, quanto no campo prático, é o uso de propelentes líquidos. As vantagens sobre os propelentes sólidos residem em diversos aspectos, como a facilidade de utilização de sistemas automáticos e de *travelling charges*.

Entretanto, o aspecto vantajoso mais relevante para a presente pesquisa, é a possibilidade de modificar a evolução temporal da pressão no interior da arma a fim de conseguir uma melhor performance em velocidade, mantendo os níveis máximos de pressão em um patamar aceitável (KLINGENBERG et al. 1996).

A FIG 2.2 ilustra duas curvas de pressão de tiros de canhão. Uma com propelente sólido e outra com propelente líquido. Observa-se que o impulso total de ambas, dado pela área sob as curvas, é semelhante. Porém, a curva do propelente líquido apresenta valores de pressão máxima substancialmente inferiores aos da curva de propelente sólido.

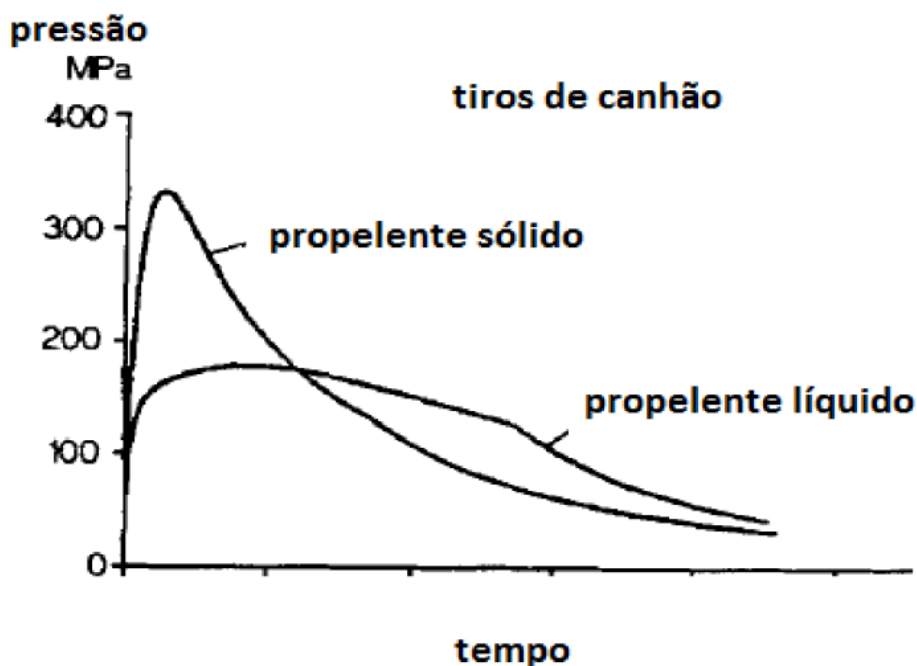


FIG 2.2 – Comparação entre curvas de pressão (KLINGENBERG et al. 1996)

Um detalhe interessante a se observar na FIG. 2.2 é a descontinuidade na derivada da curva do propelente líquido. Essa descontinuidade está relacionada com a queima total do propelente (o chamado “ponto de *all burnt*”).

Propelentes sólidos convencionais são projetados como pequenos corpos chamados grãos, que são definidos por sua forma geométrica, cujas geometrias mais comuns são: discos, esferas, cilindros, cilindros perfurados ou ainda cilindros com múltiplas perfurações. Além da geometria, os propelentes sólidos são caracterizados pela possível existência de cobertura de uma ou mais de suas superfícies por uma substância inibidora da queima. O desenho geométrico, juntamente com a presença de superfícies quimicamente inibidas, caracterizam a maneira como o grão irá queimar e gerar gases. De acordo com as características do grão, três tipos de queima podem ocorrer: progressiva, regressiva ou neutra. Na queima progressiva, a superfície de queima do grão aumenta conforme ele é consumido, gerando gases a uma taxa cada vez maior. Exemplos de grãos de queima progressiva são os cilindros com múltiplas perfurações. Na queima regressiva, a superfície de queima do grão diminui conforme ele é consumido, gerando gases a uma taxa cada vez menor. Um exemplo de grão de queima regressiva é o esférico. Na queima neutra, a superfície de queima do grão mantém-se

constante, gerando gases a uma taxa constante. Um exemplo de grão de queima neutra é o disco.

Conforme a carga propelente queima, os gases gerados aumentam de pressão dentro do espaço confinado da câmara, até que atinjam uma pressão suficientemente alta para que o projétil comece a se mover. Os gases então se expandem, impulsionando o projétil. O deslocamento do projétil faz com que o volume ocupado pelos gases aumente e, como consequência, a pressão decaia rapidamente. KLINGENBERG et al. (1996) estabelece essa competição entre a quantidade de gases gerados e o crescente volume que eles ocupam como a característica determinante do ciclo da balística interna. Se muito gás é gerado inicialmente, então o pico de pressão pode exceder o limite tolerado pela arma. Dessa maneira, deve-se limitar a superfície de queima inicial da carga de propelente sólido. Entretanto, depois que o projétil começou a se mover e o volume ocupado pelos gases aumentou significativamente, é necessário que o propelente gere gases a uma taxa maior, para compensar a perda de pressão. Nessa etapa, seria desejável uma maior superfície de queima. A busca por propelentes que apresentassem tais características fez com que os grãos em forma cilindros multiperfurados passassem a apresentar 7, 19 e até 37 perfurações.

A área sob a curva de pressão, ou, em termos matemáticos, a integral da função da pressão ao longo do tempo multiplicada pela área da seção circular do tubo, é o impulso exercido pelos gases na base do projétil. Este impulso total é o determinante da velocidade de boca do projétil, que, por sua vez é o fator de desempenho da arma. O trabalho de KLINGENBERG et al. (1996) destaca o fato de que uma curva de pressão ideal seria retangular, ou seja, sem um ponto de máximo bastante destacado como ocorre, usualmente, com os propelentes sólidos. Existem diversas maneiras de se melhorar a curva de pressão de propelentes sólidos. O trabalho cita exemplos como cargas modulares encapsulados em envólucros de nitrocelulose; propelentes LOVA (*low vulnerability*) que utilizam materiais energéticos alternativos como o RDX; os grãos de *programmed splitting* que em certo ponto da queima se dividem, aumentando bruscamente a superfície de queima e as cargas consolidadas, que apresentam grãos colados uns aos outros, formando um corpo maciço de propelente. Uma dessas técnicas é de especial interesse para a presente dissertação: as cargas multiplex. Tais cargas apresentam uma mistura de dois ou mais tipo de grão, que podem se diferenciar em forma e/ou composição química. KLINGENBERG et al. (1996) afirma que o uso de tais cargas é uma forma de se modificar as curvas de pressão com a finalidade de

maximizar o impulso, sem ultrapassar o valor máximo de pressão suportado pelo tubo da arma. Propelentes alternativos, como os propelentes líquidos podem originar curvas de pressão mais próximas das ideais.

Ademais, espera-se que os propelentes sólidos dominem o cenário pelas próximas décadas. Pequenos aperfeiçoamentos e inovações incrementais podem ser feitas. Contudo, não parece ser uma perspectiva realística a existência de canhões de artilharia a propulente sólido disparando projéteis a velocidades superiores a 2000 m/s (KLINGENBERG et al. 1996).

FARRAR e LEEMING (1983) enfatizam uma importante característica geométrica dos grãos de propulente sólido: o comprimento balístico. Este comprimento é definido pela menor distância entre duas superfícies de queima paralelas em um grão. Usualmente essa é a dimensão do grão que primeiro se extingue. Porém, há o caso dos cilindros com múltiplas perfurações, nos quais, mesmo após o total consumo do comprimento balístico, ainda resta massa de propulente a ser queimada. A essa massa restante é dado o nome de *slivers* (que significa fragmentos), conforme ilustrado na FIG 2.3.

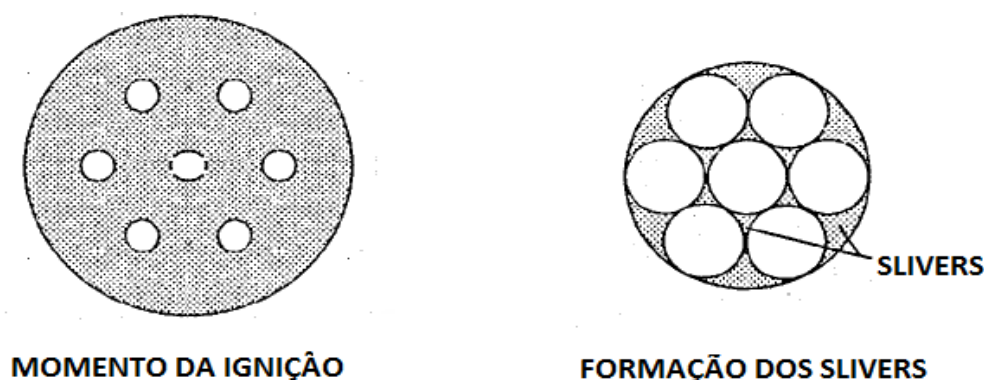


FIG 2.3 – Queima de um grão heptaperfurado (FARRAR e LEEMING, 1983)

Durante a balística interna, a energia química armazenada no propulente é convertida em calor, energia interna do gás, atrito, energia cinética do gás e energia cinética do projétil. A distribuição típica dessas frações da energia química total para armas convencionais pode ser vista na TAB. 2.1 (FARRAR e LEEMING, 1983 e AMCP 706-150, 1965)

TAB. 2.1 – Frações Típicas da Energia Química Total do Propulente

Fração da Energia Química Total	Percentual
Calor	20%
Energia Interna do Gás	42%
Atrito	2%
Energia Cinética do Gás	3%
Energia Cinética de Rotação do Projétil	1%
Energia Cinética de Translação do Projétil	32%

DE OLIVEIRA et al. (2005) apresenta dois modelos físico-matemáticos para descrever o fenômeno da combustão de propelente em um recinto hermético chamado bomba manométrica. Este trabalho identifica parâmetros balísticos de um propelente. A diferença essencial entre a balística interna de uma arma e o experimento em uma bomba manométrica é o fato de que no segundo caso o propelente queima dentro de um recipiente isovolumétrico, enquanto na arma o volume aumenta com o deslocamento do projétil. As diferenças entre os dados obtidos entre experimentos em bomba manométrica e tiros reais foram enumerada por POCOCK et al. (2007):

- 1) bombas manométricas geralmente utilizam densidades de carregamento menores, logo as pressões obtidas são menores do que em armas;
- 2) bombas manométrica possuem volume fixo, enquanto nas armas o volume onde o propelente queima se expande; e
- 3) bombas manométricas geram uma curva monotonicamente crescente, em oposição à curva de pressão típica de armas ilustrada na FIG 1.2.

O trabalho de FAYON et al. (1965) ressalta a simplicidade do procedimento experimental de levantamento dos parâmetros da lei de queima através de ensaio em bomba manométrica. Este trabalho também ressalta a utilidade da bomba manométrica para levantar outras características do propelente, como sua resistência mecânica à fragmentação durante a queima. Observa-se que os valores típicos do expoente da lei de queima estão entre 0,58 e 0,81.

A AMCP 706-150 - Interior Ballistics of Guns (1965) destaca que os dados experimentais obtidos pelo ensaio em bomba manométrica são diferentes do que se observa

em armas, no que se refere à taxa de queima do propelente. Em um recipiente hermético isovolumétrico, não há escoamento relevante de gás e o propelente queima de forma estática. Em um armamento, o propelente escoava junto ao gás e queima a diversas pressões ao longo do tubo da arma, enquanto os gases se expandem em alta velocidade. A queima em recipiente isovolumétrico e a queima em um tiro, com rápida expansão de volume, são fenômenos bastante distintos. Assim, o expoente da lei de queima levantado para propelentes de canhão em bomba manométrica são consideravelmente menores do que os observados em tiros.

JANZON et al. (2007) ressalta o fato de que, apesar de já ter sido exaustivamente estudada ao longo de séculos por nomes como Euler, Laplace e Lagrange, a balística interna é um fenômeno muito complexo e que se abre a novas possibilidades conforme ocorrem avanços em outras áreas do conhecimento como a química e a ciência dos materiais. Outro fato tido como diferencial da época atual em relação ao passado é a possibilidade de utilizar computadores para resolver modelos numéricos. Um aspecto relevante da balística interna é ressaltado em termos semelhantes aos que o faz FARRAR e LEEMING (1983): grande parte do impulso gerado é consumido para acelerar os gases propelentes. Motivado por este fato, JANZON et al. (2007) propõe a utilização de gases propelentes de baixo peso molecular, que consumiriam menos impulso. Neste contexto, o propelente ótimo seria o hidrogênio metálico, caso no qual a propulsão ocorreria apenas por gás hidrogênio, o mais leve de todos. O trabalho também faz referência aos propelentes líquidos e suas capacidades de manter pressões elevadas por um período maior, sem o pico característico dos propelentes sólidos.

POCOCK et al. (2007) observa como sendo tendências da pesquisa em balística interna o uso de inibidores de queima e de novas geometrias não usuais de grãos de propelente. Inibidores de queima são coberturas químicas aplicadas aos grãos de propelente a fim de retardar a ação da chama sobre os mesmos. Dessa maneira, os inibidores modificam a taxa de queima e/ou o rendimento energético de um grão propelente independentemente de sua espessura. Sendo assim, pode-se ter, por exemplo uma taxa de geração de gases mais lenta no início da queima, com um pico menos acentuado. Essas modificações nos grãos têm por finalidade tornar a curva de pressão mais próxima a um retângulo, ou onda quadrada.

2.2 PROBLEMA INVERSO

A metodologia de problemas inversos possui aplicações em engenharia, medicina, geofísica, astrofísica e em outros ramos da ciência. SILVA NETO et al. (2005) atribui essa ampla aplicabilidade ao fato da área de problemas inversos ser essencialmente interdisciplinar, e ao fato de que tal metodologia compatibiliza a análise matemática aos dados experimentais, sendo uma verdadeira interface entre teoria e prática.

Segundo SILVA NETO et al. (2005), a estimação de propriedades ou parâmetros utilizadas na modelagem matemática de problemas físicos constitui, por si só, uma classe de problemas inversos. Esse tipo de problema inverso é utilizado na presente dissertação a fim de estimar parâmetros químicos do propelente da munição 7,62mm.

Outra importante classe de problemas inversos é a reconstrução/restauração de imagens. A partir da estimativa de propriedades do meio, podem ser identificados defeitos em peças, para o caso de aplicação em ensaios não destrutivos na indústria, ou regiões com alteração no tecido biológico, para o caso de tomografias computadorizadas.

SILVA NETO et al. (2005) descreve os conceitos fundamentais de problema inverso e levanta pontos relevantes sobre a solução dos mesmos. Um tema importante abordado é a questão da existência e da unicidade de solução desses problemas. Muitas vezes, os problemas inversos são ambíguos e apresentam mais de uma possível resposta. Esta característica faz com que certos problemas inversos possam ser definidos pelos matemáticos como problemas mal-postos.

Algumas dificuldades encontradas na resolução de problemas inversos estão relacionadas a aspectos dos dados experimentais disponíveis, como quantidade (insuficiência ou excesso) e qualidade. Dados em quantidade insuficiente geram um modelo físico incompleto. Dados em demasia, quando exatos, geram uma solução completa para o problema inverso. Entretanto, dados em demasia e inexatos, o que é o caso mais comum na prática, geram incongruências matemáticas. SILVA NETO et al. (2005) sugere que tais incongruências sejam analisadas e resolvidas por uma abordagem estatística dos dados disponíveis.

CAMPOS VELHO (2001) procura definir o conceito de problema inverso em contraposição ao conceito de problema direto. Para isso ele recorre inicialmente às palavras de Oleg Mikailivitch Alifanov, proeminente pesquisador russo na área de problemas inversos: “a solução de um problema inverso consiste em determinar causas baseado na observação dos seus efeitos”. E afirma que, do ponto de vista prático, convencionou-se chamar problema direto

àquele em que o estudo antecedeu-se historicamente. Além disso, existe uma diferença prática entre os dois tipos de problema. Nos problemas inversos, em geral, as observações são imprecisas (dados contaminados com ruídos ou erros experimentais) e incompletas. Diferentemente, problemas diretos requerem um conhecimento completo e preciso das causas para a determinação dos efeitos. Causas, num modelo matemático, são as condições iniciais e de contorno, como termo fontes e outras propriedades do sistema. Efeitos são as propriedades calculadas a partir de um modelo direto, como o campo de temperatura, velocidades de partículas, corrente elétrica, etc.

CAMPOS VELHO (2001) faz a mesma observação quanto a natureza matemática dos problemas inversos feita por SILVA NETO et al. (2005): problemas inversos pertencem à classe de problemas mal-postos. O matemático francês Jacques Hadamard definiu um problema bem-posto como sendo aquele que cumpre as três condições:

- (i) Existe solução;
- (ii) A solução é única;
- (iii) A solução tem uma dependência contínua (suave) com os dados de entrada.

O problema é classificado como sendo mal-posto se alguma das condições acima não é satisfeita. CAMPOS VELHO (2001), ao dizer que, em geral, nenhuma das condições de Hadamard é satisfeita nos problema inversos, classifica-os como sendo mal-postos.

COLAÇO et al. (2006) consideram que as técnicas de análise por problema inverso são um novo paradigma de pesquisa. Estas técnicas permitem que resultados experimentais e numéricos sejam obtidos sinergicamente, por meio da comparação simultânea dos mesmos por pesquisadores do campo teórico e experimental. O trabalho descreve e compara diversos métodos de otimização e de problema inverso. Dentre os quais podem ser destacados: os métodos de Levenberg-Marquadt, do gradiente conjugado e do enxame de partículas. O método do Enxame de Partículas possui alguns parâmetros numéricos empíricos que determinam a velocidade e a capacidade de convergência do algoritmo.

SOUZA (2009) utiliza e compara algumas técnicas como Enxame de Partículas e Levenberg-Marquardt para otimizar parâmetros de um laser em uma cirurgia ocular. O laser possui parâmetros que são ajustados de forma a causar no olho do paciente uma determinada erosão. Porém, a aplicação do laser não deve lesionar tecidos sadios adjacentes. A intensidade

das lesões térmicas produzidas pela ação do laser é quantificada pela função dano. Essa erosão deve seguir definições médicas de forma e se obter o resultado esperado. Essas definições são modeladas matematicamente pela chamada função dano. SOUZA (2009) expõe o perfil ideal dessa função dano e procura, por meio de técnicas de problema inverso, parâmetros do laser que correspondam a esse perfil ideal de dano. Esse trabalho guarda uma semelhança com a presente pesquisa, pelo fato de ambos estimarem parâmetros (de um laser ou de um propelente) a partir de uma curva ideal (uma função dano ou uma curva de pressão)

2.3 PROBLEMA INVERSO E OTIMIZAÇÃO EM BALÍSTICA INTETERNA

Nessa seção são apresentados trabalhos que, assim como a presente dissertação, aplicam técnicas de problema inverso e otimização para investigar o fenômeno da balística interna.

O artigo de ARKHIPOV et al. (2010) compara dois métodos distintos para fazer a medição da taxa de queima transiente de propelentes sólidos. São eles: fotografia de alta velocidade e um método baseado na solução do problema inverso da balística interna. Um ensaio em bomba manométrica é realizado e são levantadas curvas de pressão e temperatura. Uma metodologia simples de problema inverso é aplicada para obter a função temporal da taxa de queima. Tal metodologia consiste basicamente em ajuste por tentativa e erro, tomando como referência o experimento em bomba manométrica e os dados de velocidade de queima obtidos pela experiência com fotografias de alta velocidade do propelente queimando. Na continuação desse trabalho, ARKHIPOV et al. (2010b), faz uma comparação entre os mesmos dois métodos de medição da taxa de queima, para propelentes homogêneos e propelentes compósitos. Conclui-se que, para o caso dos compósitos, o fenômeno é mais complexo, apresentando inclusive caráter oscilatório. Dessa forma, ele não pode ser eficazmente mensurado por apenas um método. Além disso, devem ser complementarmente utilizadas a fotografia de alta velocidade e a bomba manométrica para mensurar os parâmetros de queima de propelentes compósitos.

NOVOZHILOV e MARSHAKOV (2011) procuram obter parâmetros de um modelo de balística interna de motor de foguete utilizando o problema inverso. O dado experimental utilizado é uma curva de pressão ao longo do tempo, essa é a chamada curva de referência. Os parâmetros desconhecidos são a geometria da câmara de combustão e a difusividade térmica

característica do propelente. Um modelo físico-matemático para o problema direto é implementado computacionalmente. O problema direto é então resolvido para diferentes valores dos parâmetros desconhecidos, até que se obtenha uma curva suficientemente próxima da curva de referência. Os parâmetros assim obtidos, são a solução do problema inverso.

LIPANOV (2000) também aborda um problema de balística pela via do problema inverso. No caso, o problema é estimar a temperatura interna e a geometria de uma câmara de combustão de motor de foguete a propelente sólido (parâmetros desconhecidos), dada a sua curva de pressão ao longo do tempo (parâmetro conhecido). Esse trabalho resolve o problema inverso analiticamente, pela manipulação matemática das equações constitutivas do fenômeno. Isso possibilita que soluções exatas para o problema inverso sejam obtidas pela simples substituição de valores nas equações.

O trabalho de CHENG et al. (2012) trata da otimização do tiro de um canhão calibre 130mm. O problema de balística interna é resolvido por um modelo de parâmetros concentrados. Os parâmetros de desempenho que o referido estudo procura otimizar são a eficiência energética da carga propelente, a pressão de boca e a velocidade de boca do projétil. Para resolver o problema de otimização são utilizadas e comparadas três variantes do PSO e uma de algoritmo genético. Além disso, a lógica *fuzzy* é empregada para tratar a eficiência energética da carga propelente, que é um número entre 0 e 1. A conclusão é que, para esse problema de otimização da balística interna, o ganho de eficiência entre o PSO tradicional e suas variantes é menor que 1%. Na FIG 2.4, observa-se que as curvas de pressão apresentam uma descontinuidade em sua derivada semelhante à da curva de propelente líquido da FIG 2.2. A curva (a) corresponde ao caso não otimizado, enquanto as curvas (b) e (c) resultam da aplicação do procedimento de otimização. A curva (b) é obtida considerando o propelente sem inibição e a curva (c) advém do emprego de um propelente com inibição.

É importante observar as diferenças existentes entre otimização e problema inverso. Em problemas de otimização, busca-se minimizar ou maximizar uma função objetivo. Por outro lado, no problema inverso, técnicas de otimização podem ser empregadas visando estimar parâmetros ou funções que minimizem as diferenças entre a solução do problema direto e uma solução de referência, a qual, em muitas aplicações, corresponde a dados experimentais. Portanto, o trabalho de CHENG et al. (2012) é um trabalho de otimização, enquanto a presente dissertação se dedica a solução de problemas inversos.

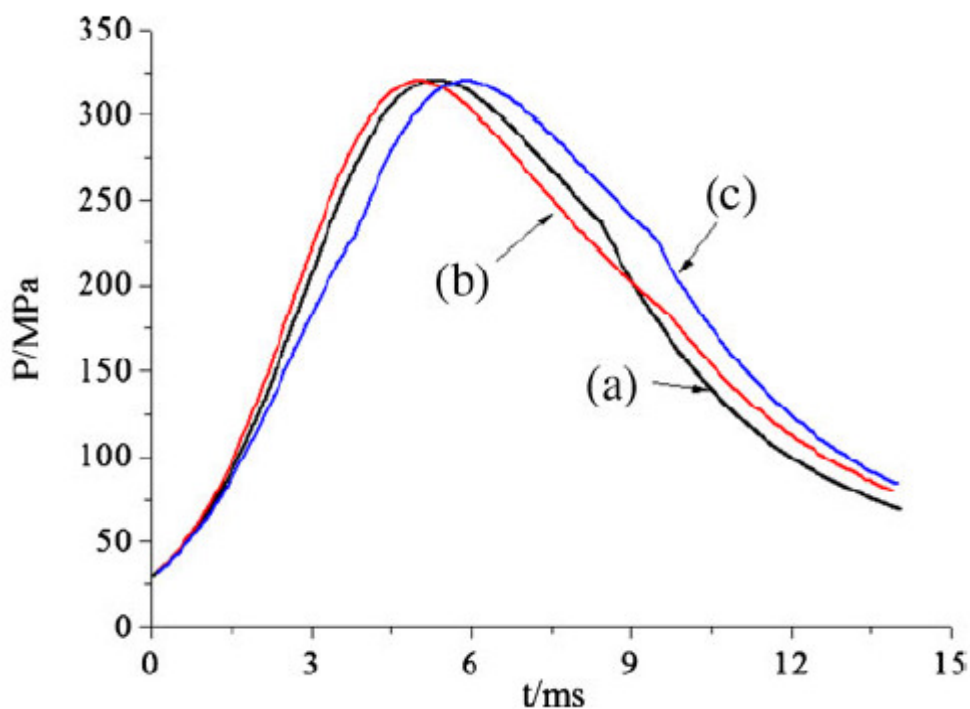


FIG. 2.4 Comparação entre curvas de pressões (CHENG et al., 2012)

3 METODOLOGIA

O presente trabalho é dividido em três etapas, partindo do desenvolvimento e verificação de um código numérico para o problema direto da balística interna, passando pelo problema inverso na determinação de parâmetros de um determinado propelente, até a utilização do modelo construído para otimizar parâmetros balísticos do propelente.

Neste capítulo serão apresentados cada um dos objetivos e as metas intermediárias da presente pesquisa, assim como a metodologia aplicada a fim de alcançá-los. O capítulo é dividido em três subseções, cada uma correspondendo a uma das etapas do trabalho.

3.1 PRIMEIRA ETAPA – MODELO DO PROBLEMA DIRETO

O objetivo principal da presente dissertação consiste em fazer a estimativa de parâmetros de propelentes a partir da balística interna de uma arma usando problema inverso.

A fim de implementar um algoritmo de problema inverso, é necessário que haja primeiro um algoritmo que resolva o problema direto. Assim, o problema direto é a primeira meta intermediária da presente pesquisa.

A primeira etapa do trabalho desenvolve um código numérico em SciLab que implementa o modelo da balística interna de parâmetros concentrados ou *lumped parameters* (FARRAR e LEEMING, 1983). Tal modelo encontra-se descrito no Capítulo 4 da dissertação – Modelo Físico-Matemático.

Este modelo necessita de uma série de parâmetros (e funções desconhecidas como a energia perdida e a força de atrito). A obtenção destes parâmetros e funções é feita pela confrontação dos resultados numéricos obtidos com o modelo de parâmetros concentrados com os resultados numéricos obtidos pelo software PRODAS. Uma vantagem da utilização do PRODAS é a possibilidade de se levantar diversas informações da balística interna que não são facilmente obtidas experimentalmente. Podemos citar, entre outros: a força de atrito sofrida pelo projétil, a temperatura dos gases e as acelerações sofridas pelo projétil. O PRODAS é utilizado nessa etapa como fonte dos dados indispensáveis ao modelo e indisponíveis sob a forma de dados experimentais e, posteriormente como referência comparativa para a solução numérica do modelo de parâmetros concentrados. A FIG. 3.1 mostra um diagrama esquemático da primeira etapa da pesquisa.

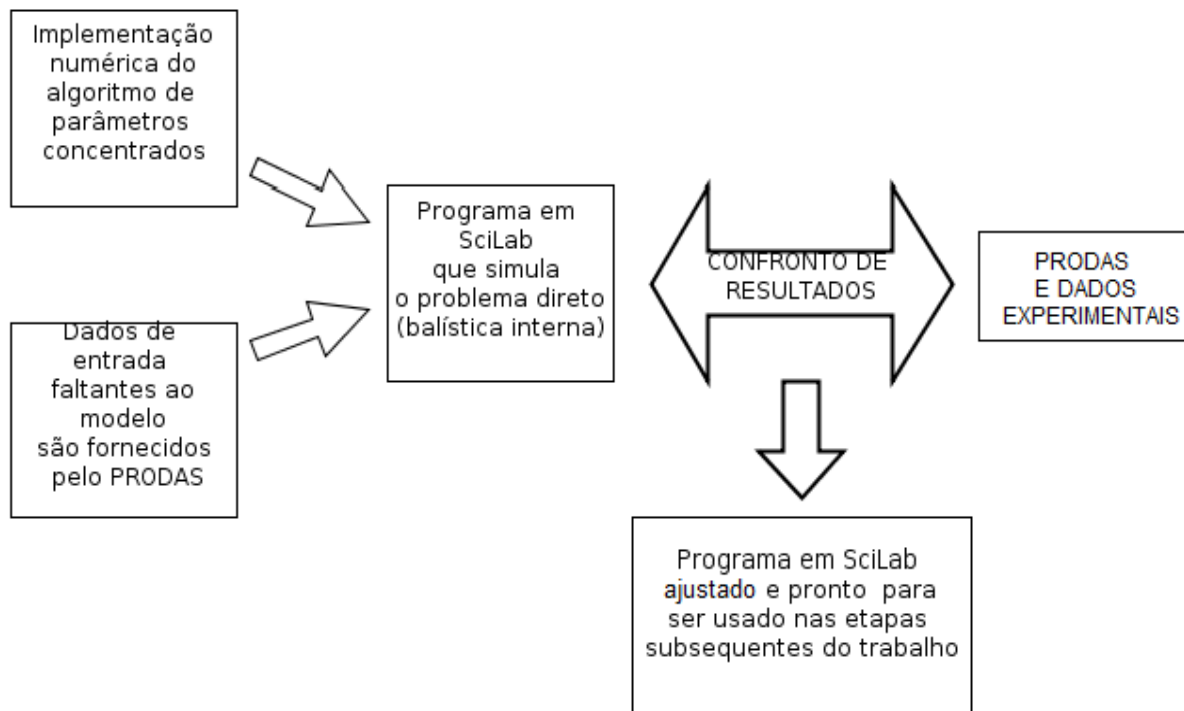


FIG 3.1 Diagrama esquemático da primeira etapa do trabalho

As equações diferenciais do problema direto, que estão descritas no capítulo 4, são resolvidas pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem. O intervalo de integração utilizado foi de 0,01 ms. Tal intervalo foi escolhido após uma análise de convergência. Isso é, o intervalo foi reduzido gradualmente até que não se observasse mais mudanças na simulação devidas à redução do mesmo.

3.2 SEGUNDA ETAPA – PROBLEMA INVERSO DE ESTIMATIVA DE PARÂMETROS

Tendo o problema direto, o presente estudo passa a utilizar técnicas de problema inverso para obter os parâmetros de um determinado propelente a partir de sua curva de pressão. As curvas de pressão escolhidas são as de um tiro de 7,62mm, obtidos experimentalmente pelo Centro de Avaliações do Exército - CAEx.



FIG 3.2 Diagrama esquemático da segunda etapa do trabalho

A FIG. 3.2 apresenta um diagrama esquemático dos elementos dessa etapa da pesquisa. A diferença entre a curva de pressão experimental e a do problema direto fundamenta a definição da função objetivo a ser minimizada pelo algoritmo de problema inverso, permitindo a estimativa dos parâmetros balísticos do propelente.

3.3 TERCEIRA ETAPA – OTIMIZAÇÃO DA BALÍSTICA INTERNA

Na terceira etapa do trabalho, utiliza-se o mesmo procedimento de estimativa de parâmetros de propelentes realizado na segunda etapa. A diferença é que, agora, a curva a ser confrontada não é mais uma curva experimental, mas sim uma curva de pressão de referência. O escopo dessa última etapa é determinar valores ótimos de parâmetros balísticos que exerçam influências desejáveis na curva de pressão. Por influências desejáveis, pode-se ter, por exemplo a minimização da pressão máxima sofrida pelo cano (ou tubo), mantendo a velocidade de boca do projétil. Ou ainda, pode-se manter a pressão máxima em um nível aceitável e maximizar a velocidade de boca. Em ambos os casos, tais modificações resultariam em uma curva de pressão com um pico menos acentuado, aproximando-se, na medida do possível, de um formato retangular. Este formato maximiza a área da curva de

pressão, maximizando, portanto, o impulso do projétil. A FIG. 3.3 mostra o diagrama esquemático da terceira etapa da pesquisa.

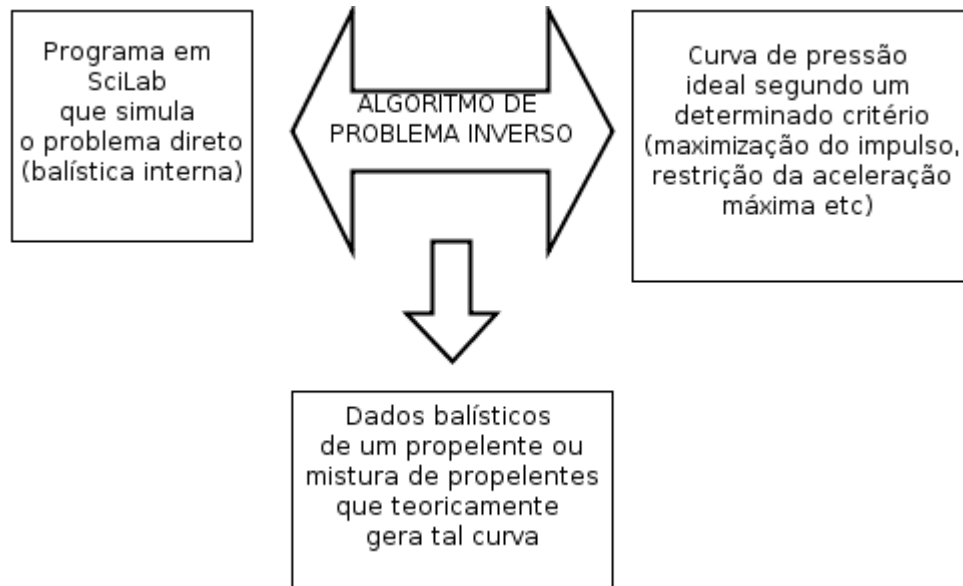


FIG 3.3 Diagrama esquemático da terceira etapa do trabalho

3.4 TÉCNICA DE PROBLEMA INVERSO

Em ciência da computação, a chamada otimização por enxame de partículas (particle swarm optimization - PSO) é um método computacional de otimização que se enquadra na categoria de método evolutivo. O método PSO foi criado em 1995 como uma alternativa para o também evolutivo algoritmo genético. O PSO é baseado no comportamento social de várias espécies animais e tenta equilibrar a individualidade e a sociabilidade dos indivíduos, a fim de se atingir uma situação ótima de interesse (COLAÇO et al., 2006). O PSO otimiza um problema, analisando uma população de soluções candidatas, chamadas partículas, que se movem no espaço de pesquisa (o domínio da solução do problema) de acordo com fórmulas matemáticas que descrevem a posição de cada partícula e sua velocidade. O movimento de cada partícula é influenciado pela posição da partícula que está mais próxima da solução do problema, dessa maneira, o enxame se move em direção à solução.

O PSO foi originalmente destinado para simular o comportamento social de animais, como uma representação do movimento de rebanhos, cardumes ou exames de insetos. É o que

se denomina inteligência coletiva. No entanto, como todos os métodos heurísticos, o PSO não garante que a solução encontrada é realmente a melhor, ele apenas encontra mínimos que podem não ser os únicos. A característica de sociabilidade das partículas, isto é, a tendência que elas têm de seguir as partículas mais bem posicionadas, pode fazer com que todo o enxame convirja para um mínimo que pode não ser o mínimo global, mas apenas um mínimo local (COLAÇO et al., 2006).

O procedimento iterativo do PSO é dado por:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (1)$$

$$v_i^{k+1} = \alpha v_i^k + \beta r_{1i} (p_i - x_i^k) + \beta r_{2i} (p_g - x_i^k) \quad (2)$$

onde:

x_i é o i -ésimo vetor individual de parâmetros

$v_i=0$ para $k=0$

r_{1i} e r_{2i} são números randômicos com distribuição uniforme entre 0 e 1.

p_i é o melhor valor achado para a partícula x_i

p_g é o melhor valor encontrado na população

α e β são parâmetros numéricos empíricos e $0 < \alpha < 1$; $1 < \beta < 2$

Na EQ. 2, o primeiro termo da esquerda para a direita representa a inércia do movimento das partículas; o segundo termo da esquerda para a direita representa a individualidade das partículas e o terceiro termo representa a sociabilidade delas. O termo da individualidade compara a posição atual do i -ésimo indivíduo x_i com a melhor posição que ele já atingiu no passado p_i . Já o termo da sociabilidade compara a posição atual do i -ésimo indivíduo x_i com a melhor posição já atingida por um indivíduo de toda a população p_g (COLAÇO et al., 2006). A FIG. 3.4 mostra o diagrama do procedimento iterativo do PSO.

O PSO utiliza quatro constantes em seu algoritmo. São elas: N , que é o número de partículas; α que é um parâmetro empírico que determina o peso da influência da velocidade v^k das partículas na próxima iteração (v^{k+1}), funciona como uma componente inercial atuando no movimento das partículas; e β , que determina o peso da influência dos valores p_i

e p_g na direção e na velocidade das partículas v^k . A TAB 3.1 mostra os valores que foram utilizados para tais constantes. Estes valores são determinados de maneira empírica, isto é, observando a adequação dos mesmos por tentativa e erro. Os valores utilizados são apropriados para as simulações realizadas, mas não necessariamente são valores ótimos.

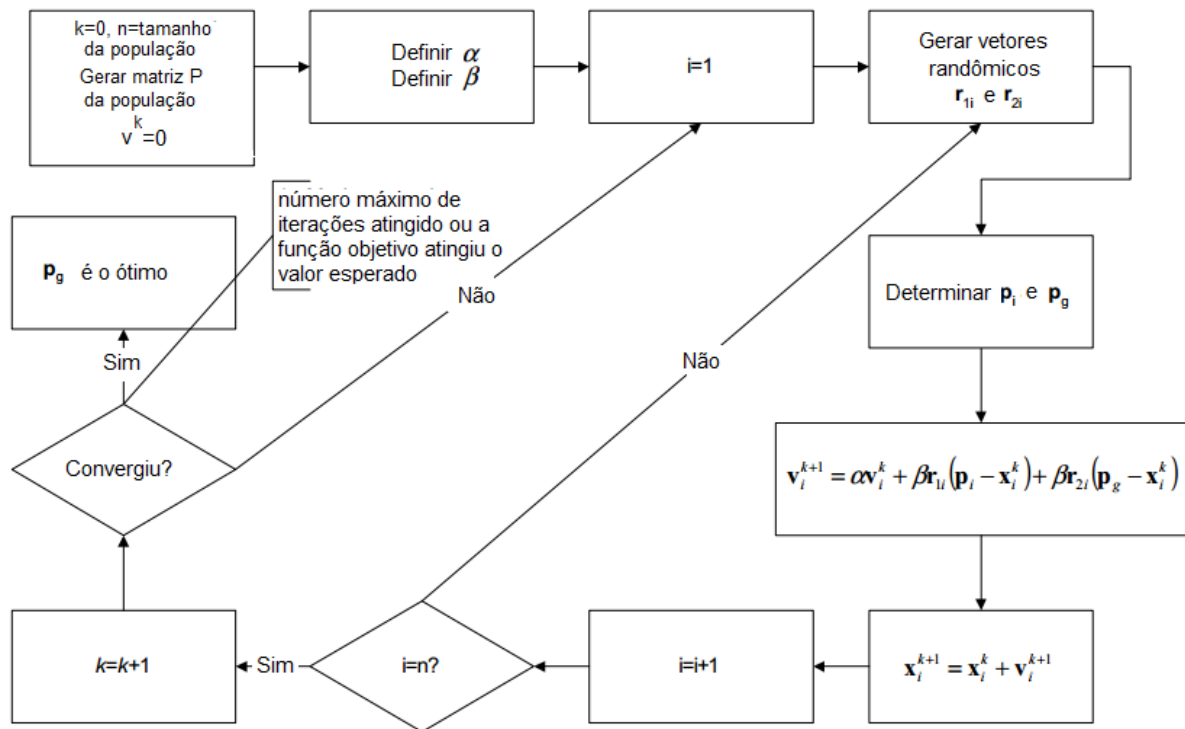


FIG. 3.4 Procedimento iterativo do PSO (COLAÇO et al., 2006)

TAB 3.1 – Parâmetros do PSO

Constante	Descrição	Valor
N	Quantidade de partículas	30
α	Parâmetro empírico de “inércia”	0,5
β	Parâmetro empírico de mudança de velocidade	2

O critério de parada adotado compara curva pressão obtida na k-ésima iteração do problema inverso com a curva de referência. Essa comparação se dá pela soma dos valores

absolutos da diferença entre as duas curvas em cada intervalo de tempo da simulação, dividida pelo número de intervalos. A essas diferenças é dado o nome de desvio. O critério é, portanto, relacionado à média dos desvios entre as duas curvas. O valor máximo de média de desvio adotado como critério de parada no presente trabalho foi de 20 MPa, o que equivale a 6,2% da pressão máxima típica das curvas. A EQ. (3) mostra a formulação matemática da média dos desvios.

$$E^k = \frac{1}{n} \sum_i^n |\text{Ref}(t_i) - \text{Calc}^k(t_i)| \quad (3)$$

Onde

E^k é a média dos desvios na k-ésima iteração;

n é o número de pontos da malha no tempo;

$\text{Ref}(t_i)$ é o valor da curva de referência no i-ésimo instante de tempo da malha e

$\text{Calc}^k(t_i)$ é o valor da curva calculada pelo algoritmo na k-ésima iteração, no i-ésimo instante de tempo da malha.

4 MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO

4.1 PROBLEMA FÍSICO

O problema físico a ser estudado consiste no processo de aceleração de um projétil, dentro do cano de um armamento, por meio da expansão de gases propelentes. O início deste processo se dá no momento da iniciação de uma estopilha (ou cápsula), que ocorre, em geral, mecanicamente, pelo impacto de um percutor. A estopilha ocasiona a ignição de uma quantidade de material sólido altamente energético que fornece a chama que inicia a carga propelente.

Inicia-se então um complexo processo de transformação de sólido em gás através da combustão da carga propelente. Essa combustão ocorre em um curto intervalo de tempo e gera uma quantidade de gases que se expandem. No caso de uma arma, o volume onde ocorre essa reação é delimitado pela base do projétil e pelas paredes do cano e da câmara. Os gases aceleram o projétil, expandindo o volume onde a combustão ocorre. O projétil atinge sua velocidade máxima, conhecida como velocidade de boca, ao sair da arma. O problema físico em questão delimita-se portanto pela iniciação da estopilha (ou cápsula) até a saída do projétil pela boca da arma.

Podemos dividir o fenômeno da aceleração do projétil nos seguintes subprocessos:

- 1) iniciação mecânica da estopilha (ou cápsula);
- 2) iniciação da carga propelente pela chama gerada pela estopilha (ou cápsula);
- 3) deflagração da carga propelente a uma determinada taxa de queima;
- 4) geração de gases advindos da deflagração com determinadas características físicas;
- 5) gases em expansão obturados pelo projétil;
- 6) projétil sendo acelerado pelos gases em expansão que pressionam sua base.

Todo o processo da balística interna se inicia com o acionamento (geralmente mecânico, em alguns casos elétrico) da estopilha (ou cápsula). A ação do percussor contra a cápsula, subprocesso 1 ilustrado na FIG 4.1, ignita uma pequena carga de material energético sensível ao impacto. Este material gera uma chama suficiente para iniciar a carga (maior) de propelente (subprocesso 2).

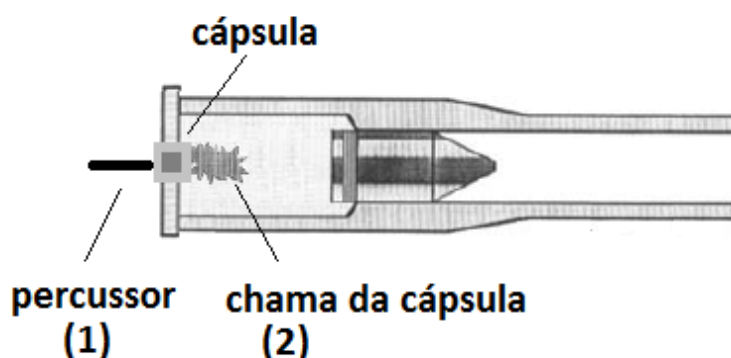


FIG 4.1 Subprocessos 1 e 2 (KLINGENBERG et al. 1996)

Uma vez iniciada, a carga propelente deflagra-se (subprocesso 3), gerando, a uma elevada taxa, gases confinados em um pequeno volume (subprocesso 4). A elevada pressão destes gases empurra a base do projétil (subprocesso 5), causando sua aceleração (subprocesso 6). Os subprocessos de 3 a 6 estão ilustrados na FIG 4.2.

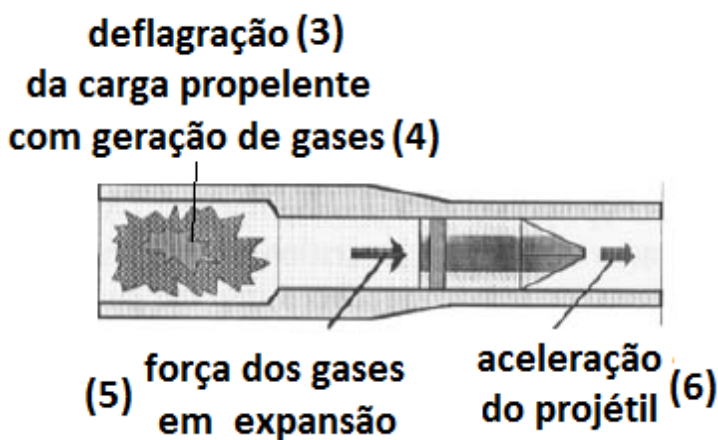


FIG 4.2 Subprocessos 3, 4, 5 e 6 (KLINGENBERG et al. 1996)

Em virtude do objetivo principal deste trabalho ser a estimativa dos parâmetros balísticos do propelente e estudar seus efeitos sobre o desempenho da arma em termos de pressão dos gases e velocidade de boca, optou-se pelo uso de um modelo que descrevesse o processo da balística interna e, ao mesmo tempo, não apresentasse complexidade excessiva na sua elaboração e manipulação.

4.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O modelo físico-matemático utilizado no presente trabalho é conhecido como método dos parâmetros concentrados (*lumped parameters*) (FARRAR e LEEMING, 1983). Este método é baseado na lei de queima do propelente, na termodinâmica dos gases gerados pela queima e na dinâmica do projétil. A lei de queima do propelente segue a Lei de Robert:

$$\frac{df}{dt} = -\frac{B}{W} P^a \quad (4)$$

Onde f é a função de forma propelente, B é a constante da taxa de queima, P é a pressão do gás, a é o índice de pressão do propelente e W a espessura característica a ser queimada. A razão B/W é denominada vivacidade.

Neste trabalho foi utilizada uma versão mais sofisticada da lei de queima, presente no modelo de balística interna de BAER e FRANKLE (1962). Esta lei de queima considera a influência não só da pressão, mas também da posição (x) e da velocidade (v) do projétil. Assim, com a introdução dos parâmetros K_x e K_v , procura-se contabilizar os efeitos convectivos durante o processo de combustão do propelente. Na EQ. 5, K_x e K_v são constantes.

$$\frac{df}{dt} = -\frac{B}{W} P^a + K_x x + K_v v \quad (5)$$

A fração volumétrica z , e o fator de forma, k , introduzem no modelo informações sobre a geometria dos grãos de propelente.

$$z = (1-f)(1+k f) \quad (6)$$

A fim de descrever o comportamento dos gases, é adotada a equação de estado de Nobel-Abel, que se adapta melhor às altas pressões e é amplamente empregada em problemas de combustão de propelentes sólidos. Vol_g , R_g , m_g e T_g são, respectivamente, o volume, a constante, a massa e a temperatura absoluta do gás e c é o co-volume do propelente.

$$P (\text{Vol}_g - m_g c) = m_g R_g T_g \quad (7)$$

A energia total fornecida pela queima do propelente (E_t) divide-se em energia cinética do projétil (E_p), energia interna do gás (E_h) e energia perdida (E_l).

$$E_t = E_p + E_h + E_l \quad (8)$$

As três equações a seguir detalham as parcelas de energia, onde F é a constante de força do propelente, γ é a razão dos calores específicos do gás e m_c é a massa do propelente.

$$E_t = \frac{m_c z F}{(\gamma - 1)} \quad (9)$$

$$E_p = m_p \frac{V^2}{2} \quad (10)$$

$$E_h = \frac{P}{\gamma - 1} (\text{Vol}_g - m_c z c) \quad (11)$$

Na EQ. 9, m_p é a massa do projétil. Para calcular o volume do gás, é necessário considerar o volume inicial de gás na câmara de combustão, a queima do propelente e ainda o movimento do projétil. A EQ. 12 descreve o volume do gás, onde ρ_c é a massa específica do propelente, D é o calibre e S a distância percorrida pelo projétil.

$$\text{Vol}_g = \left(\text{Vol}_{cc} - \frac{m_c}{\rho_c} \right) + \left(\pi \frac{D^2}{4} S \right) + \left(\frac{m_c}{\rho_c} z \right) \quad (12)$$

Combinando as equações anteriores, podemos expressar a pressão pela EQ. 13:

$$P = \frac{m_c z F - (\gamma - 1) \left(0.5 m_p V^2 + E_1 \right)}{\left(Vol_{cc} - \frac{m_c}{\rho_c} \right) + \left(\pi \frac{D^2}{4} S \right) + \left(\frac{m_c}{\rho_c} z \right) - m_c z c} \quad (13)$$

A dinâmica de translação do projétil é descrita pela 2ª Lei de Newton, considerando a pressão P atuando na base do projétil, a atmosfera, atuando à frente deste, e uma força de resistência, F_r , temos:

$$m_p \frac{dV}{dt} = \pi \frac{D^2}{4} (P - P_{atm}) - F_r \quad (14)$$

Determina-se a posição do projétil integrando a equação abaixo, que nada mais é do que a definição de velocidade instantânea:

$$\frac{dS}{dt} = V \quad (15)$$

No modelo de parâmetros concentrados proposto, a energia perdida E_1 (EQ. 13) e a força de resistência F_r (EQ. 14) são funções desconhecidas. Portanto, para o fechamento do modelo do problema direto, as mesmas precisam ser determinadas. Da mesma maneira, os parâmetros B, K_x , e K_v da lei de queima (EQ. 5) também são desconhecidos e devem ser estimados. No capítulo 5, as funções E_1 e F_r são determinadas e os parâmetros da lei de queima B, K_x e K_v são estimados.

A condição inicial para o problema de balística interna considera o projétil em repouso e o propelente sólido não ignitado. A pressão inicial da câmara de combustão é igual a 101 kPa, que é a pressão atmosférica. Além disso, considera-se que o gás na câmara possui as mesmas propriedades do gás proveniente da combustão do propelente.

A TAB. 4.1 apresenta valores de parâmetros relativos ao propelente, ao gás proveniente da combustão do propelente e à arma, que, no caso em estudo é um fuzil 7,62 x 51mm.

É importante ressaltar que o fator de forma que o PRODAS utiliza é o da sua biblioteca da munição 7,62 x 51mm. Já o fator de forma utilizado no modelo de parâmetros concentrados é o real, da munição utilizada pelo Exército Brasileiro. Todos os outros

parâmetros da TAB. 4.1 são os mesmos empregados na simulação com o PRODAS e com o modelo de parâmetros concentrados.

TAB 4.1 – Dados de entrada do problema direto

ASPECTOS FÍSICOS DA CARGA PROPELENTE		
Parâmetro	Símbolo	Valor
Comprimento balístico (web)	W	0,28 mm
Comprimento do grão	l	2,13 mm
Fator de forma	k	0 (cilindro monoperfurado)
Massa inicial de propelente	m_c	2,67 g
Massa específica do propelente	ρ_c	1578 kg/m ³
ASPECTOS QUÍMICOS DA CARGA PROPELENTE		
Índice de pressão (expoente)	a	0,69
Co-volume dos gases	c	0,001 m ³ /kg
Índice adiabático do gás	γ	1,24
Constante de força	F	0,9774 MJ/kg
CARACTERÍSTICAS DA ARMA		
Calibre da arma	D	7,62 mm
Massa do projétil	m_p	8,949 g
Volume da câmara	Vol _{cc}	3,209 cm ³
Comprimento do cano	L	533 mm
Pressão mínima para que haja movimento do projétil	P_{min}	7,5757 MPa

5 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS E DAS FUNÇÕES DESCONHECIDAS

O modelo balístico de parâmetros concentrados, adotado na presente pesquisa, necessita de vários dados de entrada para, em sua solução, calcular as variáveis dependentes do problema direto: pressão, velocidade, posição e fração mássica. Entretanto, alguns destes dados não estão disponíveis na literatura e nem podem ser obtidos experimentalmente. Esse é o caso da função força de resistência oferecida ao projétil, da função energia perdida ao longo do tempo e das constantes B , K_x e K_v da lei de queima. Estes dados são fundamentais para o modelo e, portanto, devem ser obtidos.

A função perda de energia descreve a quantidade de energia que é dissipada cumulativamente desde o disparo até a saída do projétil pela boca da arma. Este dado é utilizado na EQ. 13 do modelo de parâmetros concentrados descrito no capítulo 4. A energia perdida acumulada é representada pelo símbolo E_l . A EQ. 13 mostra E_l implicitamente como parte da fórmula da pressão. Explicando E_l encontra-se a EQ. 16.

$$E_l = \frac{m_c z F - \left(\left(\text{Vol}_{cc} - \frac{m_c}{\rho_c} \right) + \left(\pi \frac{D^2}{4} S \right) + \left(\frac{m_c z}{\rho_c} \right) - m_c z c \right) P}{(\gamma - 1)} - 0.5 m_p V^2 \quad (16)$$

A energia perdida E_l é composta pela soma de todas as perdas de energia no tiro. Podemos citar algumas parcelas dessa energia: perda na deformação do projétil, som do tiro, aquecimento do projétil e do cano, energia usada para executar o ciclo automático da arma etc. A parcela mais relevante é provavelmente a relativa à transmissão de calor, conforme

dados da TAB 2.1. Naturalmente, é inviável obter experimentalmente tal dado, devido à sua complexidade.

A função força de resistência descreve o somatório de todas as forças que se opõe ao movimento do projétil, exceto a pressão atmosférica e sua própria inércia. A EQ. 14 descreve a dinâmica translacional do projétil. O lado direito dessa equação descreve a diferença de pressão e a função força de resistência F_r . As EQ. 13 e EQ. 14 estão descritas detalhadamente no capítulo 4.

Neste trabalho optou-se inicialmente por ignorar esses dois dados, visto a impossibilidade de obtê-los. Porém, tal procedimento revelou-se inadequado, gerando erros muito grandes nas simulações do problema direto. A estratégia adotada então foi de utilizar o PRODAS como fonte para os dados faltantes para a simulação do problema direto, dentre eles, a energia perdida E_l e a força de resistência F_r . Ocorre que o PRODAS não fornece explicitamente tais grandezas e as mesmas tiveram que ser obtidas indiretamente por meio de outros dados que o PRODAS fornece.

Para tanto, o dados fornecidos pelo PRODAS foram agrupados em uma planilha e as diferentes parcelas da energia total do tiro foram calculadas a partir deles. A EQ. 8 da conservação de energia representa as três parcelas que compõe a energia total fornecida pela queima do propelente E_t ; a energia cinética do projétil E_p , a energia interna do gás E_h , e a energia perdida E_l .

A partir dos dados obtidos usando o PRODAS, as energias: total fornecida pela queima do propelente (E_t), cinética do projétil (E_p) e interna do gás (E_h) foram computadas por meio das EQ. 9 - 11. A energia perdida (E_l) foi então calculada subtraindo E_p e E_h , de E_t , de acordo com a EQ. 8. A TAB 5.1 é um exemplo das energias envolvidas num tiro 7,62mm simulado com o PRODAS.

TAB 5.1 Energias envolvidas num tiro 7,62mm

Tempo [ms]	Energia Total [J]	Energia Cinética [J]	Energia Interna dos Gases [J]	Energia Perdida [J]
0,040	126,013	0,000	83,067	42,946
0,100	245,900	0,076	200,267	45,511
0,140	365,787	0,384	324,245	40,935
0,180	540,168	1,371	497,209	40,732
0,200	649,156	2,092	605,045	40,455
0,220	769,043	3,458	729,383	33,554
0,240	921,627	5,484	871,434	40,620
0,260	1085,109	8,771	1031,480	38,931
0,280	1270,389	14,350	1208,963	38,803
0,300	1477,467	23,244	1405,673	37,302

A TAB. 5.1 mostra apenas uma pequena parte da planilha utilizada para calcular a energia perdida (E_l). Há muitas outras colunas com dados fornecidos pelo PRODAS como velocidade, intervalos de tempo, posição etc. As colunas mostradas equivalem à energia total (E_t) e suas frações: energia cinética do projétil (E_p) e interna do gás (E_h).

Assim, observou-se que a energia perdida acumulada (E_l) chega a 2051 Joules no momento em que o projétil deixa o cano da arma. Esse valor equivale a 18,6% da energia total (E_t), valor muito relevante que não pode ser desprezado. Dessa maneira foi obtido um dado fundamental à adequada modelagem do problema direto e que não pode ser omitido da EQ. 10: a função energia perdida acumulada ao longo do tempo (E_l).

A energia perdida (E_l) foi plotada ao longo do tempo e comparada com as demais parcelas da energia total. No gráfico da FIG 5.1, as linhas verticais correspondem aos pontos de pressão máxima e de queima total do propelente (*all burnt*). O conhecimento da energia perdida (E_l) faz com que o balanço de energia do problema direto esteja completo.

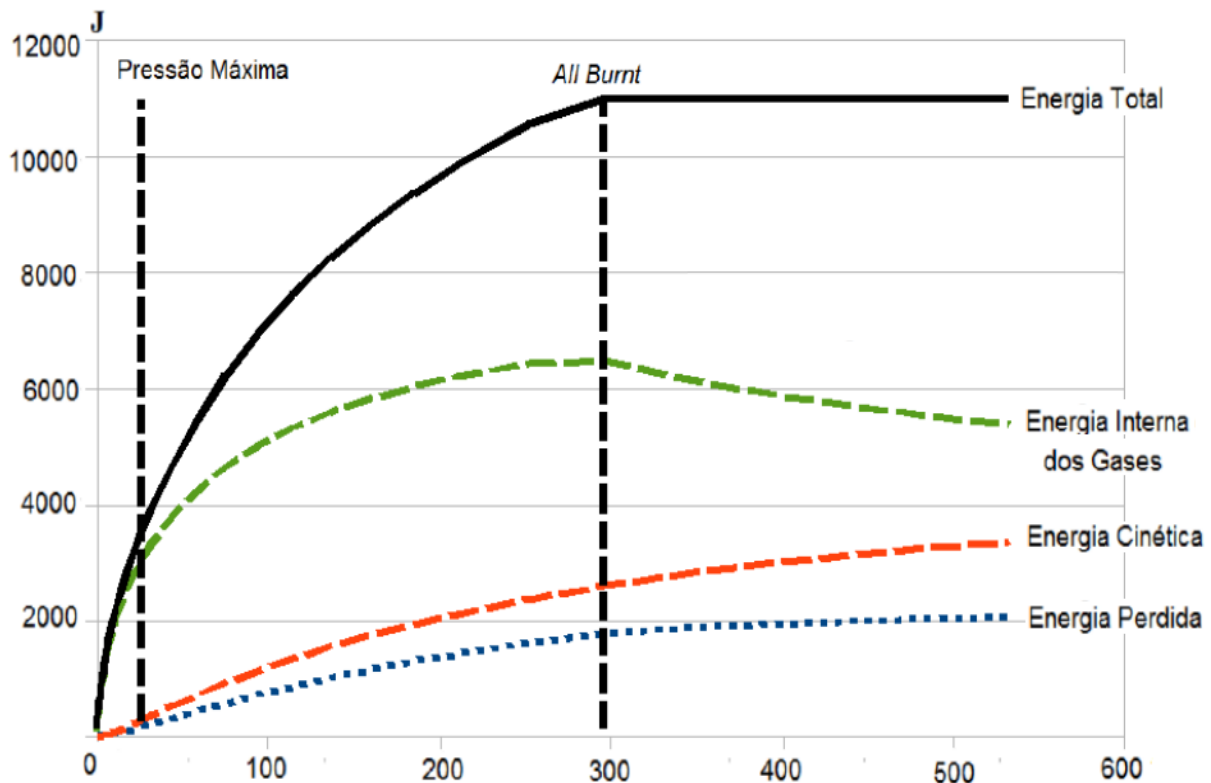


FIG 5.1 Comparação das parcelas da energia total

Para o cálculo da função força de resistência F_r , adotou-se um procedimento semelhante ao utilizado para a função perda de energia. A EQ. 17 é um rearranjo da EQ. 14 e explicita F_r . Utilizando a planilha mostrada na TAB. 5.2, foi realizada a soma das parcelas que resultam em F_r , (lado direito da equação). Todos os dados necessários são fornecidos diretamente pelo PRODAS: D é o calibre, P é a pressão dos gases, P_{atm} é a pressão atmosférica, m_p é a massa do projétil e dV/dt é a aceleração do projétil.

$$F_r = \pi \frac{D^2}{4} (P - P_{atm}) - m_p \frac{dV}{dt} \quad (17)$$

A TAB. 5.2 mostra uma planilha onde todas essas parcelas são somadas para calcular a força de resistência F_r em cada instante de tempo. O resultado deste cálculo é um vetor F_r com os valores da força de resistência para cada instante de tempo discretizado pelo

PRODAS. Tanto o vetor E_l , quanto o F_r , são utilizados no problema direto por meio de uma interpolação cúbica dos seus pontos. Isso significa que, apesar de F_r e E_l somente oferecerem valores para pontos discretos, pode-se levantar o valor dessas grandezas para qualquer instante de tempo, por meio de interpolação.

Além da energia perdida e da força de resistência, as constantes da lei de queima também são dados fundamentais para o modelo que não estão disponíveis na literatura e nem o PRODAS as fornece. Portanto, precisam também ser calculadas. As três constantes B , K_x e K_v aparecem na EQ. 5.

Para determinar essas constantes, foi utilizada a mesma técnica de problema inverso aplicada posteriormente no trabalho. O algoritmo de problema inverso foi configurado para procurar um conjunto com estes três valores que tornasse mínima a diferença entre a curva de pressão gerada por eles e a curva de pressão do PRODAS. O resultado do problema inverso encontra-se na TAB 5.3.

Após o procedimento de problema inverso ter levantado os dados da TAB. 5.3, estes dados foram inseridos como dados de entrada no problema direto, gerando curva de pressão da FIG. 5.2. A média dos desvios entre a curva calculada pelo PRODAS e a calculada pelo problema direto menor do que 19 MPa, o que é cerca de 6% da pressão máxima. Conclui-se, portanto que o problema direto, utilizando os parâmetros e funções obtidos neste capítulo, simula adequadamente o fenômeno.

TAB 5.2 Trecho da planilha para cálculo da força de resistência

Pressão [MPa]	Aceleração linear [g]	Força de Resistência [N]	Pressão de Resistência [MPa]
13,2	2832	348,7	7,7
32,0	10678	517,2	11,0
51,9	16792	887,9	19,0
79,4	22691	1624,1	34,8
96,3	25302	2165,5	46,6
115,5	32179	2437,3	52,3
137,0	43110	2458,1	52,3
160,5	55055	2481,1	52,3
185,4	67783	2499,2	52,3
211,3	80941	2525,1	52,3
237,0	100745	1958,5	39,2
261,1	117380	1597,1	30,6
282,0	131071	1348,2	24,6
298,7	140449	1286,5	22,9
310,8	147582	1212,1	21,0
317,9	152378	1114,8	18,7
320,3	154948	998,6	16,1
318,6	155012	915,5	14,2
313,4	152739	877,9	13,5
305,8	149248	837,8	12,7
286,0	140052	742,2	11,0

TAB. 5.3 Constantes da lei de queima

Constante	Valor
B	$5,771 \cdot 10^{-7} \text{ [m}^2/\text{sPa}^{0,69}]$
K_x	$-0,459 \text{ [s}^{-1}]$
K_v	0,380

A FIG. 5.3 compara a curva gerada pelo algoritmo de parâmetros concentrados, a curva gerada pelo PRODAS e os dados experimentais. A TAB. 5.4 compara outros dados de desempenho do tiro para os três casos supracitados. Ressalta-se que não há dado disponível sobre a fração mássica consumida de propelente no experimento e a velocidade é medida experimentalmente por um sensor localizado a 2,5 metros da boca, portanto, na realidade, a velocidade de boca no experimento é maior do que a registrada.

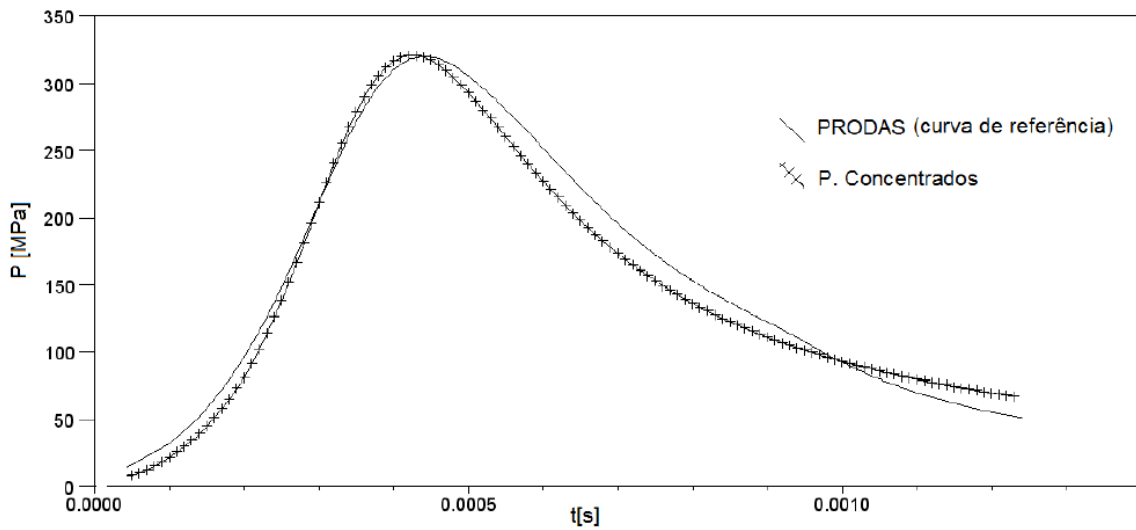


FIG 5.2 Curva de pressão do problema direto comparada com a do PRODAS

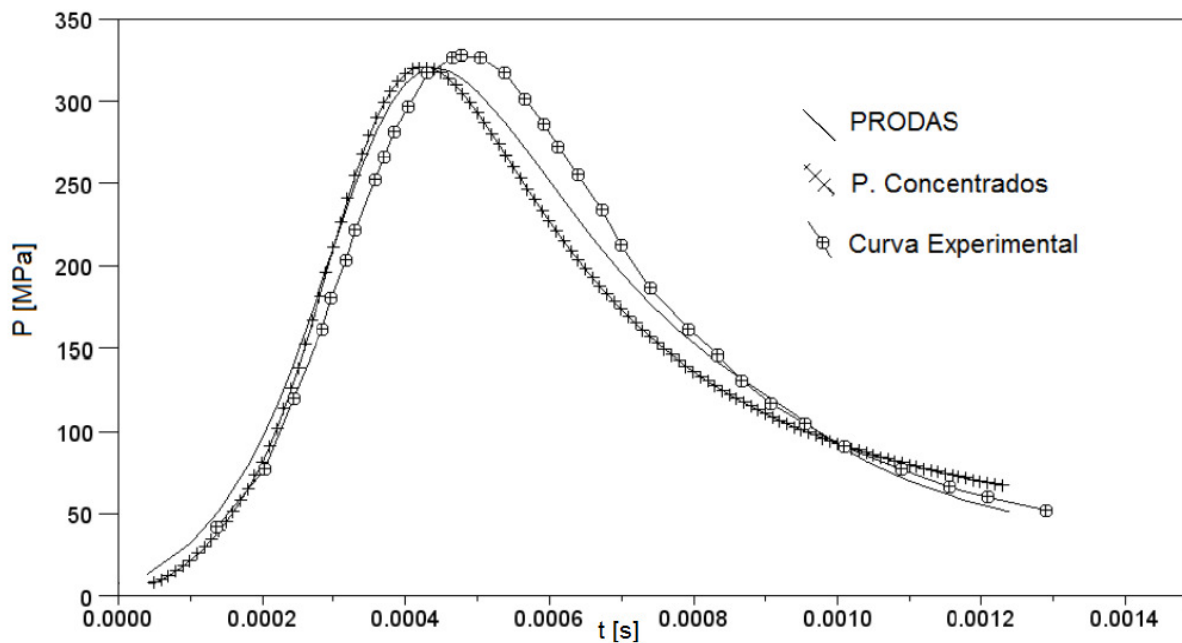


FIG 5.3 Curva de pressão do problema direto, do PRODAS e do experimento

A FIG. 5.4 mostra o histórico de convergência do algoritmo de problema inverso que calculou os parâmetros K_x , K_v e B . Observa-se que nas primeiras iterações o erro dado pela média dos desvios entre a curva gerada e a curva de referência do PRODAS é alto e cai até um patamar de 16,1 MPa onde se estabiliza. Após 500 iterações, não houve mudança alguma nesse erro.

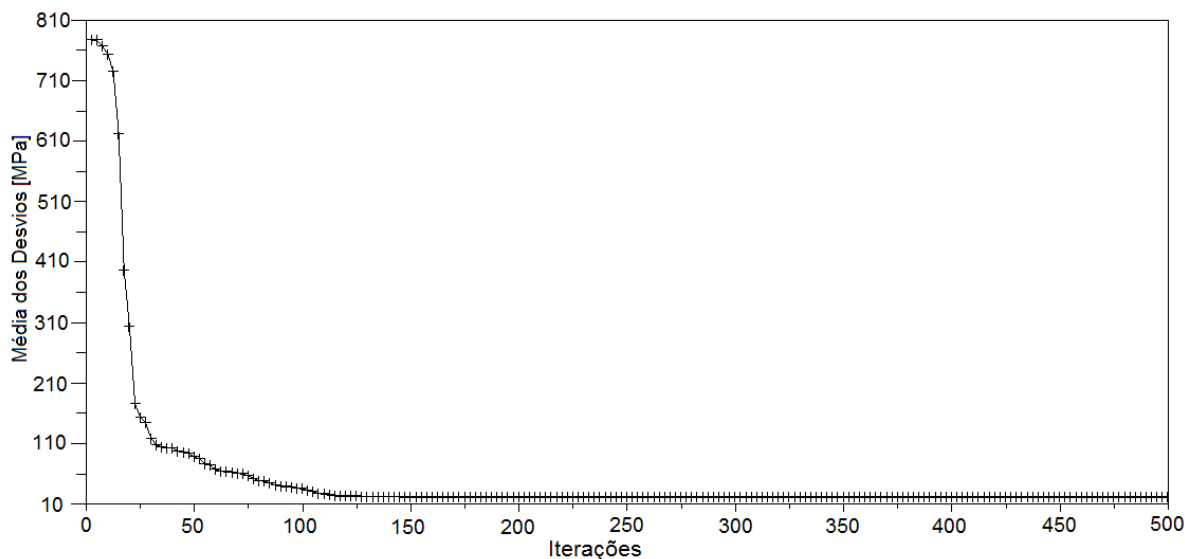


FIG 5.4 Convergência da curva do problema direto em relação à curva do PRODAS

TAB. 5.4 Comparação dos parâmetros desempenho

	Parâmetros Concentrados	PRODAS	Experimento
Pressão Máxima [MPa]	320,7	320,3	327,7
Velocidade de Boca [m/s]	842,6	842,0	828,0*
Fração mássica consumida de propelente	93%	100%	Desconhecida

* velocidade medida a 2,5 metros da boca da arma.

Os resultados das TAB 5.1 e 5.2 para energia perdida e força de resistência respectivamente, foram obtidos como função do tempo. Isso significa que foram levantados, ao longo de instantes de tempo, esses dois parâmetros, para um determinado tiro de fuzil 7,62mm. Entretanto, tiros com propelentes diferentes podem apresentar características como máximo de pressão e ponto de queima completa em instantes de tempo distintos. Por esse motivo, resolveu-se utilizar a energia perdida e a força de resistência como funções da energia cinética e da quantidade de movimento. Entende-se que tal associação possui um significado físico maior e, dessa maneira, tais parâmetros, ao serem extrapolados para tiros com

propelentes distintos, apresentariam uma distorção menor. As FIG 5.5 e 5.6 apresentam a energia perdida e a força de resistência como funções da energia cinética e da quantidade de movimento, respectivamente.

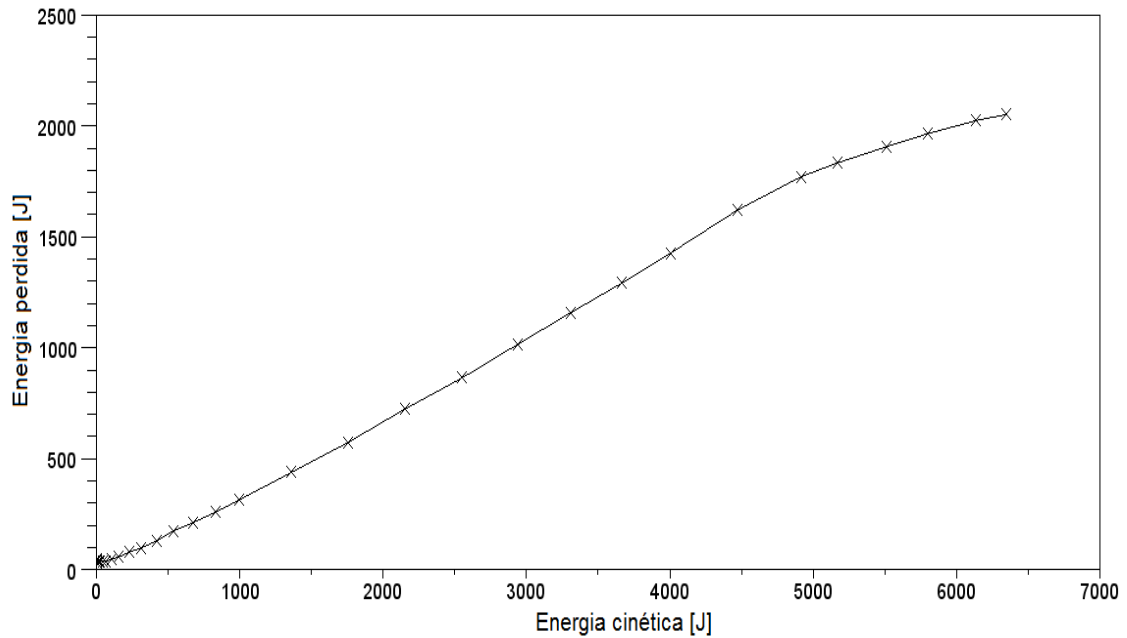


FIG 5.5 Energia perdida como função da energia cinética

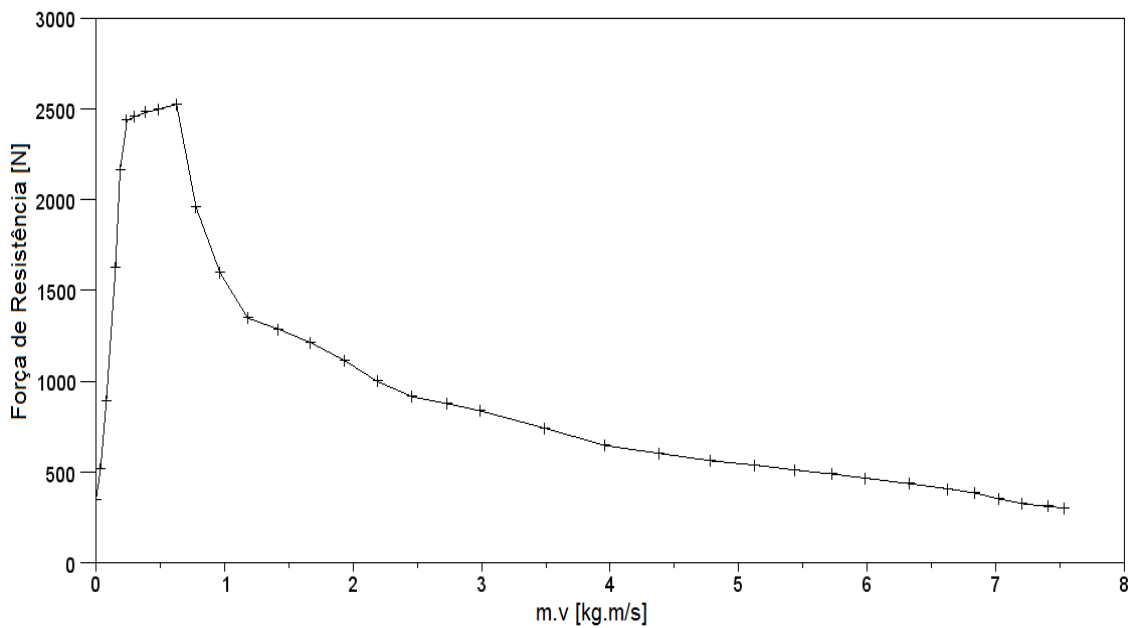


FIG 5.6 Energia perdida como função da quantidade de movimento (m.v)

6 PROBLEMA INVERSO – ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DO PROPELENTE

O presente capítulo aborda a estimativa de parâmetros do propelente por meio do uso da técnica de otimização conhecida como enxame de partículas e do problema direto desenvolvido no Capítulo 4.

Foram realizadas estimativas de parâmetros para duas curvas de pressão: a gerada pelo software PRODAS e uma curva obtida experimentalmente por meio de transdutor de pressão instalado na câmara de um fuzil 7,62mm.

Previamente, dois procedimentos devem ser realizados para assegurar a validade dessas duas estimativas. O primeiro é a análise de sensibilidade. Essa análise procura identificar a influência dos diversos parâmetro na curva de pressão, assim como a região do domínio (no caso, o tempo) na qual essa influência é mais significativa. O segundo é a verificação do código computacional por meio da recuperação de parâmetros.

A verificação do código computacional do problema direto é realizada por meio da comparação da solução ora proposta com a solução obtida com o PRODAS, bem como com dados experimentais. Por outro lado, a verificação do código do problema inverso é realizada atribuindo valores aos parâmetros do modelo matemático e, em seguida, resolvendo o problema direto. A solução obtida é utilizada como pseudo dados experimentais no problema inverso.

Portanto, se o problema inverso estiver implementado corretamente, os valores inicialmente atribuídos aos parâmetros do problema direto devem ser recuperados. Ademais, é usual adotar soluções distintas do problema direto, uma dentro do algoritmo do problema inverso e outra para gerar os pseudo dados experimentais.

6.1. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

6.1.1 COEFICIENTES DE SENSIBILIDADE

O objetivo da análise de sensibilidade é identificar como os diversos parâmetros do problema direto influenciam as variáveis dependentes. No presente trabalho, a variável dependente mais importante é a pressão, pois é a que pode ser medida. Assim, a análise de

sensibilidade ora conduzida verifica a influência dos parâmetros a serem estimados sobre o comportamento temporal da pressão.

Sendo assim, a análise de sensibilidade realizada consiste em determinar a derivada da pressão em relação a cada um dos parâmetros em estudo. Tal derivada é calculada para cada instante de tempo do fenômeno. Desta forma, são obtidas curvas do coeficiente de sensibilidade da pressão, em relação a cada parâmetro, ao longo do tempo.

O conceito de sensibilidade é matematicamente definido pela EQ. 18, onde P é o vetor com os valores da pressão em diversos instantes de tempo e p_j é o j-ésimo parâmetro em estudo.

$$J_{p_j} = \frac{\partial P}{\partial p_j} \quad (18)$$

Em problemas envolvendo parâmetros com diferentes ordens de magnitude, a análise de sensibilidade pode ser conduzida empregando os coeficientes de sensibilidade relativos (CSR) (OZISIK e ORLANDE, 2000).

$$CSR = p_j \frac{\partial P}{\partial p_j} \quad (19)$$

Este procedimento favorece a comparação dos efeitos de cada parâmetro sobre a variável de interesse, que, no caso em tela, é a pressão.

Neste trabalho, adota-se a seguinte aproximação para a EQ. 19.

$$CSR_{p_j} = p_j \frac{P(p_j + p_j \varepsilon) - P(p_j)}{p_j \varepsilon} \quad (20)$$

Onde ε é igual a 0,001.

A análise de sensibilidade é conduzida considerando como valores de referência os presentes na TAB. 4.1, representativos de uma munição real 7,62mm. Ou seja, a perturbação ε é aplicada sobre estes valores, avaliando-se numericamente seu efeito sobre a curva de pressão da balística interna.

As FIG. 6.1 e 6.2 apresentam as curvas do CSR ao longo do tempo relativas aos seguintes parâmetros:

- ⤴ expoente da lei de queima (a)
- ⤴ vivacidade (V_i)
- ⤴ fator de forma (k)
- ⤴ força do propelente (F)
- ⤴ massa inicial de propelente (m_c)

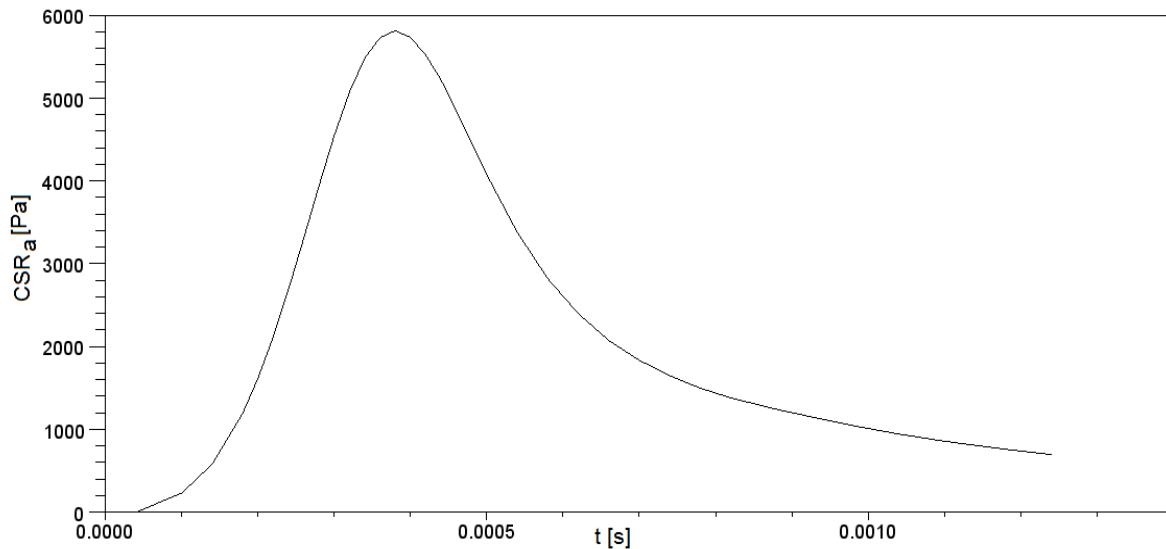


FIG 6.1 Sensibilidade da pressão em relação ao expoente da lei de queima

A partir da FIG 6.2, podemos obter várias informações relevantes, como por exemplo a hierarquia de influência de cada parâmetro na curva de pressão e a capacidade dos parâmetros de influenciar a pressão no intervalo de tempo após o máximo de sensibilidade observado. Nota-se que o único dos parâmetros que é capaz de influenciar positivamente a pressão nos instantes finais do intervalo de tempo em estudo é a força do propelente. A sensibilidade da pressão em relação aos demais parâmetros cai rapidamente para zero. Os pontos de queima total do propelente (*all burnt*) e de saída do projétil pela boca da arma estão marcados no eixo do tempo.

O parâmetro a (expoente da lei de queima) possui um coeficiente de sensibilidade máximo cerca de 5 vezes maior do que a massa, por isso não foi plotado na mesma figura dos demais parâmetros.

Observa-se na FIG. 6.2 que o CSR do parâmetro massa inicial de propelente torna-se negativo para determinados instantes de tempo. Este fato indica que um aumento da massa inicial de propelente diminuiria a pressão nesses instantes de tempo. A fim de averiguar este fato, foram plotadas a curva de pressão para o tiro com os parâmetros originais (conforme constam na TAB. 4.1) e a curva de pressão com um aumento de 0,1 g de massa inicial de propelente. A FIG. 6.3 mostra a comparação entre as duas curvas. Observa-se que, de fato, apesar da curva com acréscimo de massa possuir uma pressão máxima maior, ela cai para valores abaixo da curva original após o ponto de máximo.

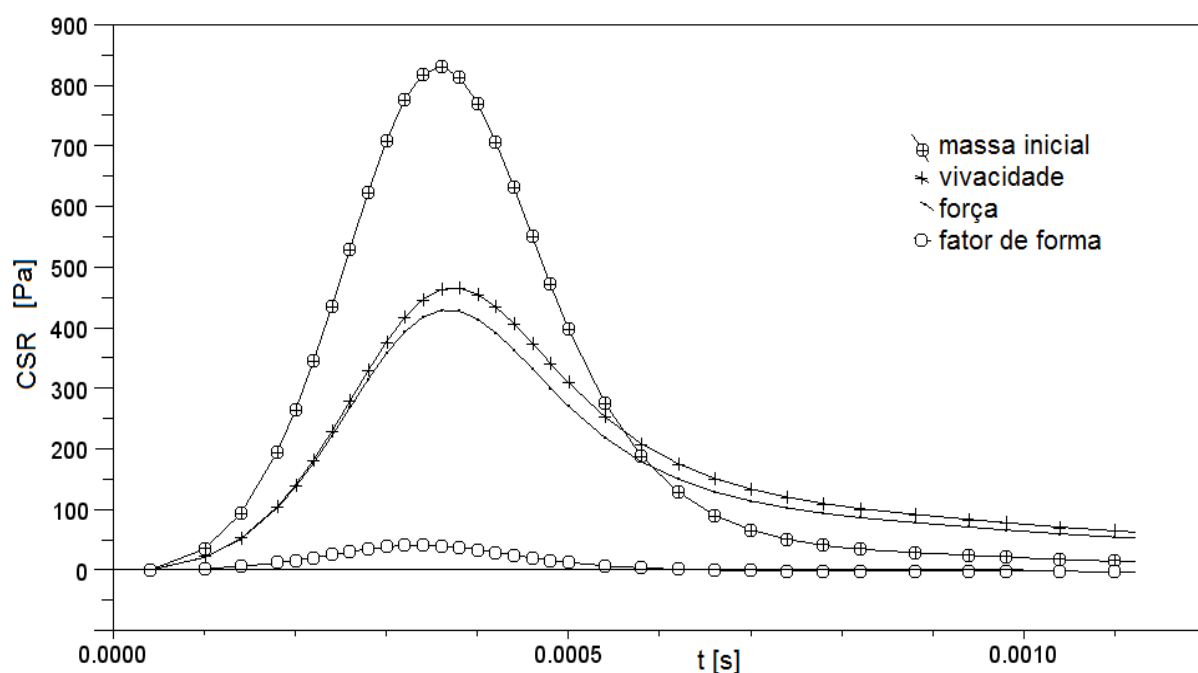


FIG 6.2 Comparação das sensibilidades

Este fenômeno pode ser explicado pelo fato do grão propelente em tela possuir um comportamento de queima regressiva. Ou seja, a área de queima do grão cilíndrico reduz ao longo do tempo. Além disso, a taxa de queima é proporcional à pressão. Portanto, aumentar a massa de propelente implica em acelerar o processo de consumo do grão, o que resulta em uma quantidade de gás gerada insuficiente para manter a pressão elevada nos instantes finais da balística interna.

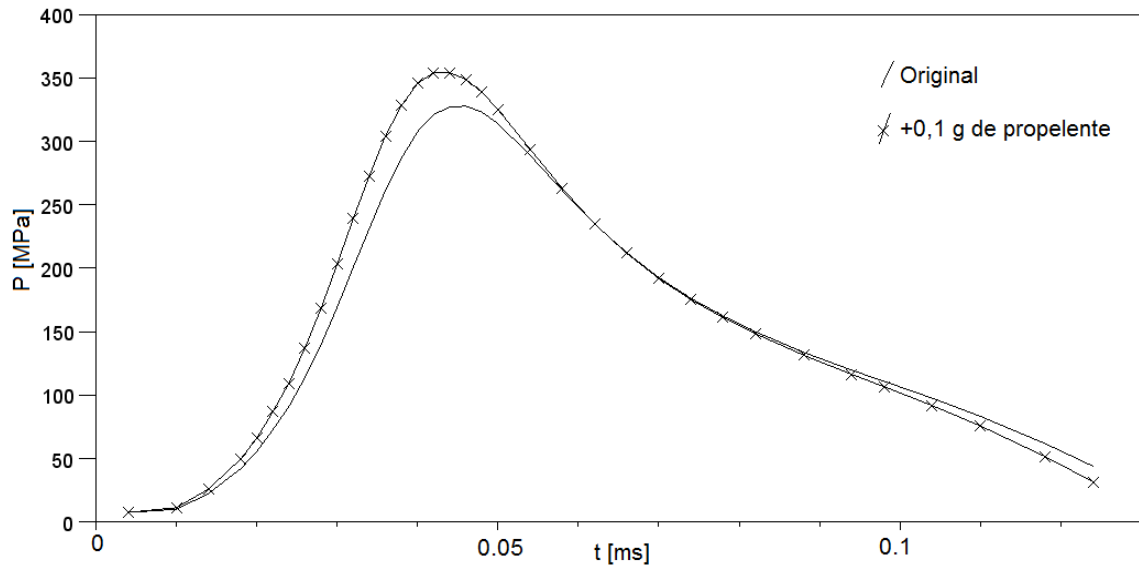


FIG 6.3 Comparação entre curvas variando a massa inicial de propelente

6.1.2 ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS

O estudo da correlação da sensibilidade entre os diversos parâmetros serve para verificar e a interdependência destes, assim como a possibilidade de estimá-los simultaneamente. A análise consiste no cálculo do determinante do produto da matriz jacobiana transposta J^t pela matriz jacobiana J . A matriz jacobiana J é obtida pela justaposição dos vetores que contém os coeficientes de sensibilidade dos parâmetros em estudo para diversos intervalos de tempo, conforme observa-se na EQ. 21. O índice i equivale aos diferentes instantes de tempo analisados e o índice j aos diferentes parâmetros a serem analisados simultaneamente. No caso, o índice j só recebe os valores 1 e 2, pois os parâmetros foram analisados 2 a 2. Para esse estudo, subdividiu-se o domínio do tempo em 35 pontos, sendo assim, i varia de 1 até 35. A derivada da pressão P em relação ao parâmetro p_j é o coeficiente de sensibilidade relativo, descrito anteriormente na EQ. 20.

$$J_{ij} = p_j \frac{\partial P}{\partial p_j}(t_i) \quad (21)$$

Foram estudadas todas as possibilidades de combinações 2 a 2 dos 5 parâmetros (expoente da lei de queima, fator de forma, vivacidade, massa inicial de propelente e força do propelente), o que equivale a 10 análises, ou seja 10 determinantes da matriz $J^t \times J$. Para cada

uma dessas 10 análises, foram realizadas análises subordinadas. Essas análises subordinadas consistiram em calcular o determinante de algumas submatrizes de $J^t \times J$.

Essas submatrizes equivalem a intervalos de tempo nos quais o comportamento do determinante pode ser diferente do comportamento do determinante da matriz completa (que equivale a todo o intervalo de tempo do domínio estudado). As submatrizes escolhidas foram três: i índices de zero a 6; índices de 6 a 15, índices de 15 a 35. A palavra “índices” refere-se a i e j variados simultaneamente, de forma a se extrair uma submatriz quadrada de $J^t \times J$. Os intervalos escolhidos equivalem, em termos gráficos, ao início, ao pico e a cauda final das curvas.

Um total de 30 determinantes foram calculados usando esse procedimento. Todos eles são aproximadamente nulos. Isso significa que todos os parâmetros analisados correlacionam-se e, portanto, não podem ser estimados deterministicamente em conjunto. Isso também significa dizer que, quando tais parâmetros forem estimados, o resultado não será um único par, ou conjunto determinado, mas sim uma infinidade de possíveis soluções que atenderão ao problema inverso proposto. Dessas soluções, uma deverá ser escolhida. Esses dados corroboram com o comportamento das curvas do CSR apresentadas nas FIG. 6.1 e 6.2, que revelam qualitativamente uma evolução linearmente dependente.

6.1.3 LUGAR GEOMÉTRICO DAS SOLUÇÕES (a,B)

Conforme discutido na seção 6.1.2, para uma determinada curva de pressão, não existe um conjunto único de parâmetros que a gere. Para ilustrar este fato, foram selecionados os parâmetros a e B, da lei de queima.

O algoritmo de problema inverso foi configurado para buscar o conjunto de possíveis soluções variando o valor de a em torno do valor conhecido de 0,69. Para cada valor de a, o algoritmo calcula um valor de B. Assim, gerou-se um conjunto com diversos pares de soluções possíveis que está ilustrado graficamente na FIG 6.4. Para valores acima de 0,72, o algoritmo de problema inverso não foi capaz de encontrar soluções. Quanto ao limite inferior de a, foram investigados valores até 0,60. Entretanto, não se pode afirmar que este seja um limite inferior.

Além do procedimento descrito acima, o algoritmo de problema inverso foi configurado para recuperar um par (a,B) relativo a uma curva de referência gerada pelo

problema direto com o valor de 0,69 para a e o valor de B contido na TAB. 5.3. O par (a,B) recuperado pelo problema inverso não foi o mesmo usado para gerar a curva de referência, mas um outro par que também está contido na curva de possibilidades de solução de (a,B). A FIG. 6.4 destaca estes dois pontos na curva.

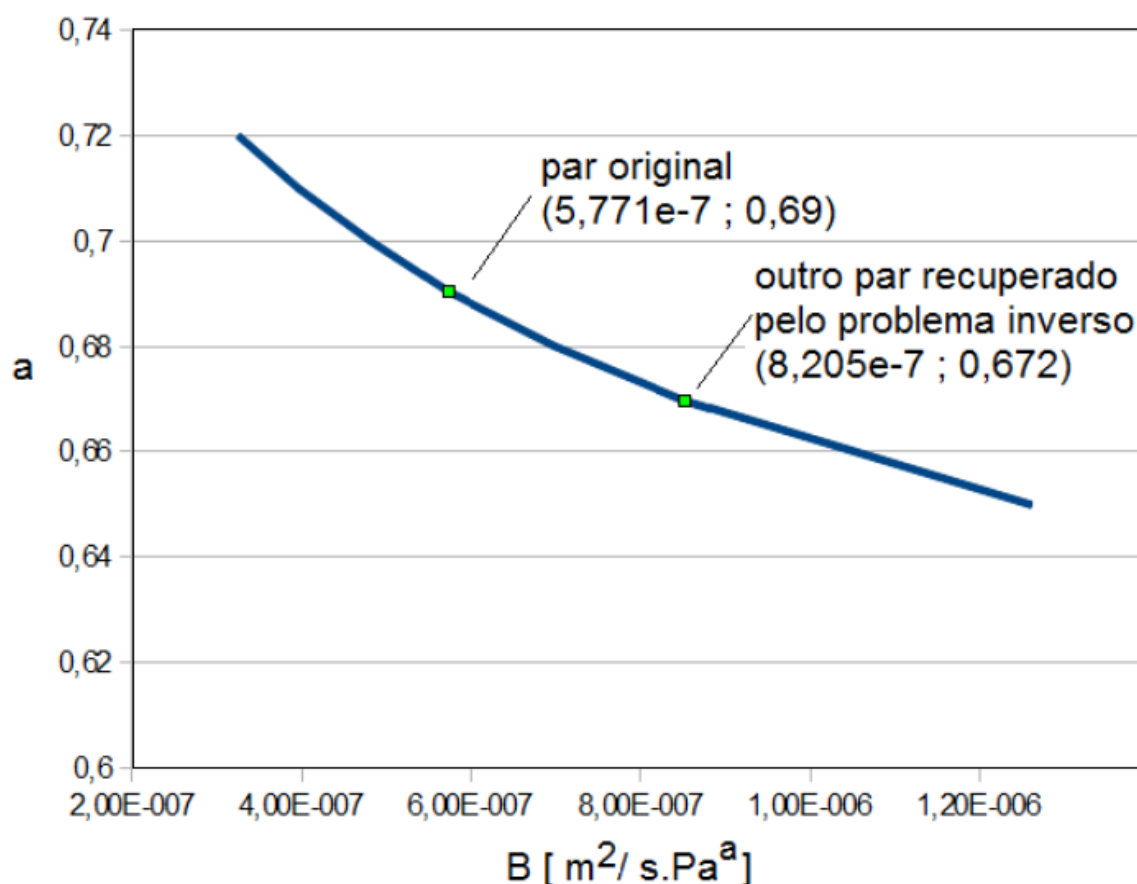


FIG 6.4 Lugar geométrico das possibilidades de solução (a,B)

6.2.VERIFICAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL – RECUPERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UMA CURVA COM RUÍDO

A fim de assegurar a robustez do do procedimento de solução de problema inverso adotado neste capítulo, testou-se a eficácia do mesmo para estimar parâmetros balísticos a partir de uma curva com um erro adicionado. Para tanto, foi utilizada a curva gerada pelo problema direto com os valores da TAB. 4.1 adicionada de um ruído aleatório em cada um de seus pontos. Tal ruído foi definido como um valor randômico obtido de uma distribuição

gaussiana (normal) cuja média é o valor da pressão em cada ponto e o desvio-padrão (σ) equivale a 5% dessa média.

Ao adicionar tal ruído à curva original do problema direto, obteve-se a curva deformada que aparece na FIG 6.5. O algoritmo de problema inverso foi então executado, para tentar levantar os parâmetros a e B relativos a essa curva com ruído. O resultado foi muito próximo ao obtido a partir da curva original. Observa-se que o procedimento de problema inverso foi capaz também de recuperar parâmetros adequados mesmo quando a curva de referência possui ruído. A TAB 6.1 mostra a comparação dos parâmetros obtidos com os parâmetros originais. O erro, em termos de média dos desvios, entre a curva de referência (curva com ruído) e a curva gerada com os parâmetros a e B calculados pelo problema inverso foi de 19,19 MPa. Ressalta-se que os valores de a e B obtidos para a curva com ruído estão contidos na curva de possibilidades de valores de a e B mostrada na FIG 6.4.

TAB 6.1 Comparação dos parâmetros

	a	B[m ² /s.Pa ^a].10 ⁻⁷
Curva suave	0,690	5,771
Curva com ruído	0,680	6,963

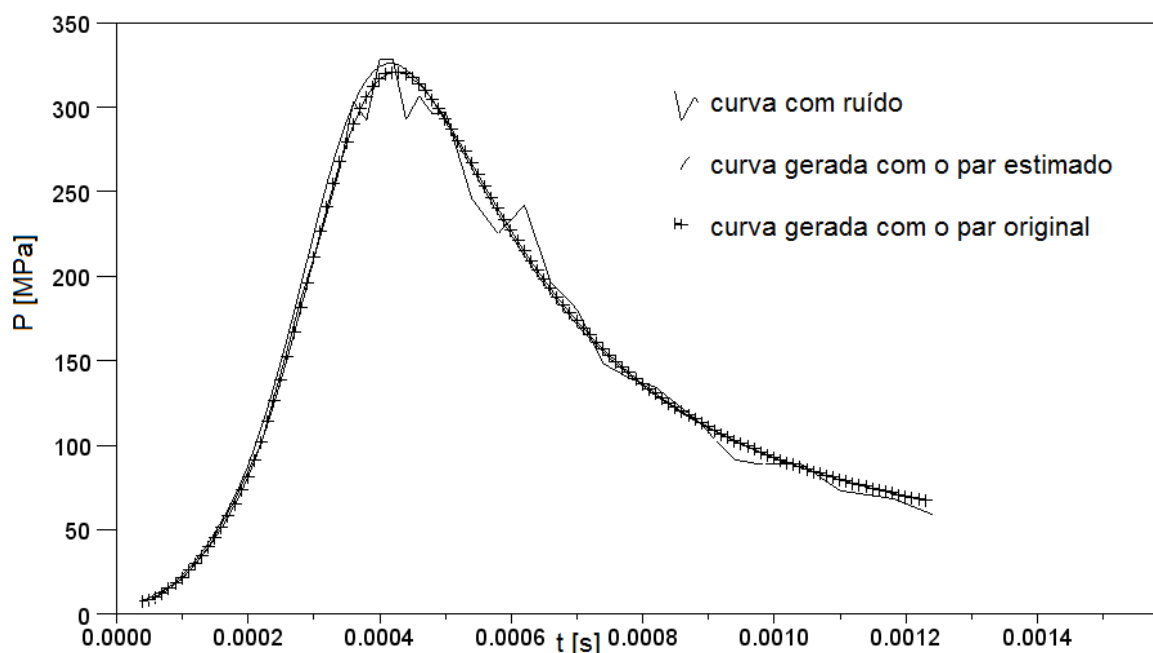


FIG 6.5 Problema inverso com ruído

6.3 ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DO PROPELENTE A PARTIR DE DADOS EXPERIMENTAIS

A primeira aplicação prática do procedimento de problema inverso estabelecido por este trabalho é a estimativa dos parâmetros a e B da lei de queima a partir de uma curva experimental. A curva em questão foi levantada com a instalação de transdutores de pressão através da furação do cano da arma na sua câmara. Dessa maneira, obtém-se uma curva da pressão ao longo do tempo na câmara da arma, que é o local onde se registra a pressão máxima. A curva de pressão foi obtida experimentalmente pelo Centro de Avaliações do Exército - CAEx em ensaio com fuzil calibre 7,62mm.

A estimativa desses parâmetros foi discutida no capítulo 3 deste trabalho. A FIG 6.6 mostra a curva resultante do procedimento de problema inverso comparada com a a curva experimental. O erro em termos de média dos desvios entre as curvas foi menor do que 15 MPa. Os valores de a e de B são respectivamente iguais a 0.676 e $3.551e-7 \text{ m}^2/\text{s.Pa}^a$.

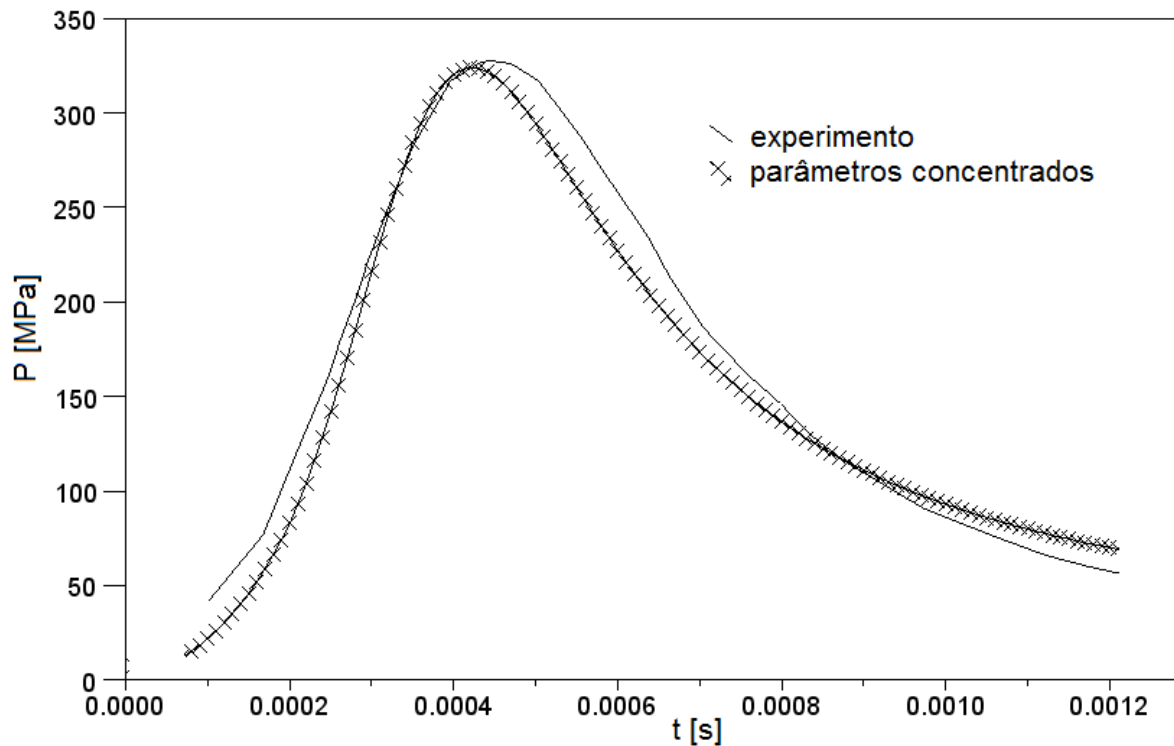


FIG 6.6 Curva experimental e curva gerada

7 OTIMIZAÇÃO DA CURVA DE PRESSÃO

Neste capítulo a metodologia de problema inverso desenvolvida é empregada para otimizar a curva de pressão do fuzil 7,62mm. Foram escolhidos três diferentes objetivos de otimização:

- ⤴ aumento da velocidade de boca, mantendo a pressão máxima;
- ⤴ redução da pressão, mantendo a velocidade de boca original;
- ⤴ otimização da pressão variando apenas a geometria dos grãos.

Para cada um destes objetivos, foi escolhida uma curva de pressão de referência. Nos capítulos anteriores, as curvas de referência adotadas foram a curva do modelo de parâmetros concentrados, do PRODAS e uma curva experimental. Neste capítulo, as curvas de referência serão funções com valor constante de pressão ao longo do tempo. Sendo assim, o problema

inverso buscará parâmetros que tornem a curva calculada mais próxima o possível da curva de referência.

Todos os três objetivos tem em comum o fato de que uma queima mais progressiva é desejável. Por esse motivo, foi escolhido para os três casos um fator de forma de $-1/3$. Tal fator de forma descreve a queima de um grão com formato de cilindro monoperfurado com inibição de queima na parede externa.

7.1 AUMENTO DA VELOCIDADE DE BOCA MANTENDO A PRESSÃO MÁXIMA

Uma espécie de curva de pressão otimizada, é aquela que consegue manter a pressão próxima ao máximo por um período de tempo grande. Matematicamente, uma curva ideal nesse sentido seria uma função degrau, de valor igual à pressão máxima admitida (KLINGENBERG et al. 1995).

Nesta seção foram feitas tentativas de variação de diversos parâmetros. Observou-se, após vários testes com diferentes parâmetros, que para se obter uma curva de pressão com valores mais elevados durante um período de tempo maior, é necessário que haja um aumento na energia total disponível de propelente.

$$E_t = \frac{m_c z F}{(\gamma - 1)} \quad (9)$$

Observa-se na EQ. 9 que a energia total é função da massa inicial de propelente (m_c), da fração queimada (z), da força do propelente (F) e do índice adiabático do gás (γ). A fração queimada não é um parâmetro de entrada do problema direto. O índice adiabático do gás, que é a razão entre seus calores específicos, é uma característica química difícil de ser manipulada diretamente. Restam a massa e a força do propelente. As tentativas de otimização se concentraram nestes dois parâmetros, juntamente com o expoente da lei de queima. As tentativas de otimização da curva de pressão pela modificação da massa inicial de propelente não foram bem-sucedidas. O motivo da escolha do expoente da lei de queima é o seu coeficiente de sensibilidade altíssimo, como pode ser visto no capítulo 6 deste trabalho.

Outra linha de trabalho adotada foi a de estudar o efeito somente dos parâmetros que possam ser modificados com facilidade em um propelente real. Isso é, parâmetros cuja manipulação possa ser feita sem grandes dificuldades tecnológicas. Os parâmetros escolhidos

foram os relacionados com a geometria do grão. São eles: o fator de forma (k) e o comprimento balístico (W).

Para cada tentativa de otimização, foi escolhida uma curva de referência. Todas as curvas utilizadas são constantes, entretanto cada uma apresenta um valor diferente. A escolha destes valores foi feita por tentativas, de forma que a curva otimizada apresentasse as características desejadas, sem violar a restrição de que suas pressões máximas não podem ser superiores à pressão máxima da curva original (320 MPa). O algoritmo de PSO utilizado não possui restrição quanto ao valor máximo que cada curva de pressão obtida nas sucessivas iterações pode atingir. Dessa forma, curvas de referência próximas a 300 MPa muitas vezes geram curvas otimizadas com erro pequeno, mas que violam a restrição de não apresentar pressões maiores que 320 MPa. O uso de curvas de referência constantes com valores entre 190 e 270 MPa mostrou-se adequado para a otimização.

Cada iteração do PSO consiste na geração de uma nova população de N partículas. O problema direto é executado para cada uma dessas partículas. O tempo aproximado de execução de cada iteração do PSO foi de 15 segundos. Ou seja, o PSO implementado é capaz de testar em média quatro populações de 30 partículas por minuto.

O critério de parada utilizado nos casos anteriores de aplicação do problema inverso mostrou-se inadequado nesta seção. O motivo é o fato de que as curvas otimizadas não se aproximam o bastante das curvas de referência para que o critério da média dos desvios seja aplicável com êxito.

Para resolver este problema, modificou-se o critério de parada. O novo critério foi o de um número máximo de 100 iterações sem que uma solução melhor seja encontrada. Isso equivale a, em média, 25 minutos de tempo computacional sem evolução na qualidade da solução. Ressalta-se que o PSO obtém a cada iteração uma solução que é melhor ou, no mínimo igual, à da iteração anterior. Dessa maneira, quanto mais tempo computacional for aplicado, ou seja, quanto mais iterações forem feitas, melhor (ou no mínimo igual) será o resultado.

7.1.1 VARIAÇÃO DA FORÇA DO PROPELENTE E DO EXPOENTE DA LEI DE QUEIMA

Nesta seção, o problema inverso buscou aproximar a curva calculada com a curva de referência, por meio da variação dos parâmetros expoente da lei de queima (a) e força do propelente (F). Ressalta-se que o valor de força encontrado é teórico. O maior valor de força encontrado na bibliografia foi de cerca de 1,4MJ/kg (DAMSE et al., 2003), o valor encontrado pelo problema inverso foi 2,2317 MJ/kg. A existência ou não de substância energética com tal propriedade não é objeto de estudo do presente trabalho. Os resultados da otimização encontram-se na TAB. 7.1. A FIG. 7.1 compara a curva de pressão obtida por essa variação de parâmetros com a curva de pressão original.

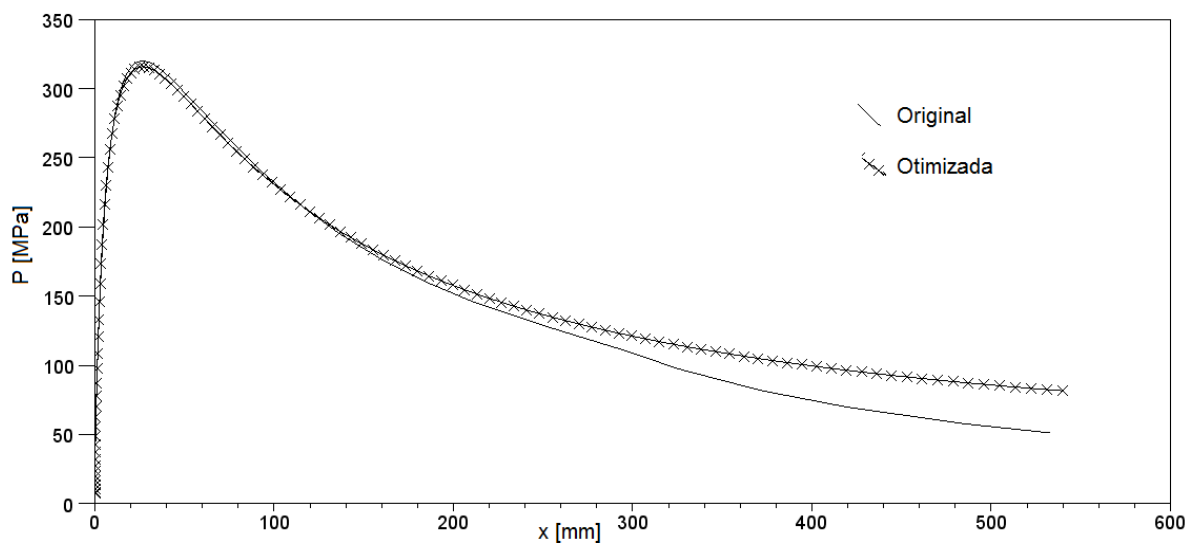


FIG 7.1 Variação da força propelente e do expoente da lei de queima

TAB 7.1 Variação da força do propelente e do expoente da lei de queima

OBJETIVO	AUMENTO DA VELOCIDADE DE BOCA MANTENDO A PRESSÃO MÁXIMA – VARIAÇÃO DA FORÇA	
CURVA DE REFERÊNCIA	CONSTANTE = 220 MPa	
PARÂMETROS ALTERADOS PELO PSO	NOVO VALOR	VALOR ORIGINAL

a	0,6650	0,69	
F	2,317 MJ/kg	0,977 MJ/kg	
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO			
	VALOR	VALOR ORIGINAL	VARIAÇÃO APROXIMADA
PRESSÃO MÁXIMA	315,9 MPa	320,3 MPa	-1,4%
VELOCIDADE DE BOCA	889,3 m/s	842 m/s	5,6%

7.2 REDUÇÃO DA PRESSÃO MANTENDO A VELOCIDADE DE BOCA ORIGINAL

Outra espécie de curva de pressão otimizada é aquela que possibilita uma velocidade de boca no mínimo igual à original, combinada com uma relevante diminuição da pressão máxima. Essa situação é desejável porque possibilita o projeto de uma arma com cano menos espesso e com o mesmo desempenho da arma original em termos de velocidade de boca. Poder-se-ia projetar um fuzil mais leve e com a mesma eficiência balística do fuzil original.

A fim de se obter os parâmetros que gerariam tal curva, uma curva de pressão constante com valor de 200 MPa foi prescrita como referência de otimização para o algoritmo de problema inverso. Outra prescrição foi o valor da força do propelente de 1,4 MJ/kg. O parâmetro força do propelente foi escolhido porque foi observado nas otimizações anteriores que tal parâmetro é bastante eficiente para tornar o formato da curva mais próximo ao de uma constante. O valor prescrito para a força foi escolhido por se tratar do maior valor de força de propelente encontrado na literatura (DAMSE et al., 2003). O objetivo da escolha deste valor foi obter um resultado mais factível em termos tecnológicos.

O algoritmo de problema inverso foi configurado para buscar somente o expoente a da lei de queima. Os resultados encontram-se resumidos na TAB. 7.2.

TAB 7.2 Redução da pressão mantendo a velocidade de boca original

OBJETIVO	REDUÇÃO DA PRESSÃO MANTENDO A VELOCIDADE DE BOCA ORIGINAL		
CURVA DE REFERÊNCIA	CONSTANTE = 200 MPa		
PARÂMETROS ALTERADOS PELO PSO	NOVO VALOR	VALOR ORIGINAL	
a	0,658	0,69	
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO	VALOR	VALOR ORIGINAL	VARIAÇÃO APROXIMADA
PRESSÃO MÁXIMA	298,5 MPa	320,3 MPa	-6,8%
VELOCIDADE DE BOCA	844,1 m/s	842 m/s	0,2%

Observa-se que foi possível conseguir uma relevante redução (6,8%) da pressão máxima e a velocidade de boca se manteve. Por um lado a diminuição da pressão máxima permite que se utilize um cano menos espesso para disparar essa munição hipotética e, por outro, consegue-se um desempenho balístico igual ao original, em termos de velocidade de boca.

Ressalta-se, mais uma vez, que os resultados obtidos tanto nesta seção, quanto na anterior são puramente teóricos, isso é, não necessariamente existem substâncias energéticas que se caracterizem por possuir tais parâmetros. O propósito dessa seção, assim como da anterior, é verificar a eficiência da ferramenta desenvolvida na presente dissertação para investigar parâmetros que otimizem a curva de pressão e não verificar se tais parâmetros são tecnologicamente factíveis.

A FIG 7.2 ilustra a curva de pressão obtida, plotada em conjunto com a curva de pressão da munição 7,62mm comum. Observa-se que, a pesar de possuir uma altura menor do que a curva da munição comum, a curva obtida possui um decaimento mais lento de pressão, o que lhe confere uma integral maior e, conseqüentemente um maior impulso e uma maior velocidade de boca associada.

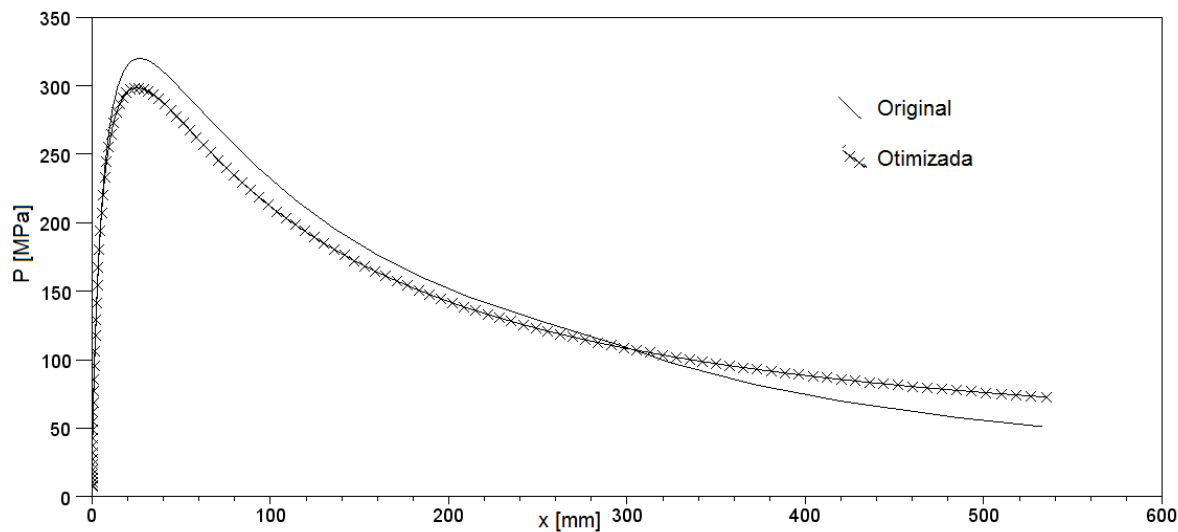


FIG 7.2 Redução da pressão mantendo a velocidade de boca original

7.3 OTIMIZAÇÃO DA PRESSÃO ALTERANDO SOMENTE A GEOMETRIA DOS GRÃOS

Os três resultados anteriores valem-se de modificações na química do propelente para otimizar a curva de pressão. A proposta dessa seção é fazer essa otimização sem alterar as características químicas da substância energética. Para tanto, o algoritmo do problema inverso variou apenas as seguintes características geométricas do grão:

- ▲ fator de forma, e
- ▲ comprimento balístico.

Além disso, o algoritmo permitiu que fossem utilizadas misturas de três propelentes com diferentes granulações. O objetivo foi tentar otimizar o propelente de maneira tecnologicamente viável em curto prazo, ou seja, modificando apenas sua geometria e mantendo a substância energética original.

O algoritmo de problema inverso variou tanto as proporções de três propelentes prescritos, quanto o comprimentos balísticos de um deles. O fator de forma não foi variado pelo algoritmo. Foram feitos testes com o valor de $k=0$ (tubo ou placa) e $k=-1/3$ (tubo com inibição externa), bem como com grãos esféricos. Estes fatores de forma corresponde a padrões de queima regressiva, neutra e progressiva, respectivamente.

As EQ. 5, 6 e 13 do modelo do problema direto descritas no Capítulo 4 foram modificadas de forma a representar a mistura de 3 tipos de propelentes com as mesmas características químicas, porém com geometrias distintas (BAER e FRANKLE, 1962). As EQ. 5b, 6b e 13b foram utilizadas nesta seção. O índice i varia de 1 a 3 e representa cada um dos propelentes da mistura. W_i é o comprimento balístico do propelente i , f_i é a função de forma do propelente i , z_i é a fração mássica queimada do propelente i e m_{ci} é a massa do propelente i .

$$\frac{df_i}{dt} = -\frac{B}{W_i} P^a + K_x x + K_v v \quad (5b)$$

$$z_i = (1-f_i)(1+k_i f_i) \quad (6b)$$

$$P = \frac{(\sum_i z_i m_{ci} F) - (\gamma-1)(0,5m_p V^2 + E_l)}{(\text{Vol}_{cc} - \frac{m_c}{\rho_c}) + \frac{\pi D^2 S}{4} + (\sum_i m_{ci} z_i)(\frac{1}{\rho_c} - c)} \quad (13b)$$

As misturas de propelentes simuladas consistiram de:

- 1) propelente original ($k=0$)
- 2) propelente tipo pó (esférico)
- 3) propelente com W variável e k prescrito

Ao algoritmo de problema inverso foi dada a liberdade de alterar 3 parâmetros:

- 1) proporção em termos de massa do propelente original (%)
- 2) proporção em termos de massa do propelente tipo pó (%)
- 3) W_3 (do terceiro propelente)

Ressalta-se que a alteração das proporções dos propelente 1 e 2 define automaticamente a proporção do propelente 3, pois a soma das 3 proporções é igual a 100%. Os melhores resultados encontrados utilizaram um valor próximo a 100% de um determinado tipo de grão e valores menores que 0,1% dos outros dois tipos tipos de grão, valor este que foi considerado como zero. Sendo assim, os resultados ótimos não são misturas.

O resultado obtido nesta seção utilizou um grão com fator de forma $k=-1/3$. Este fator de forma corresponde a um cilindro em cuja face externa foi aplicado um inibidor de queima. O resultado está descrito na TAB 7.3. Ressalta-se que a geometria encontrada corresponde a um cilindro de parede muito fina, e que a viabilidade técnica de se fabricar e utilizar tal grão parece improvável. Entretanto, o presente trabalho não entra nesse mérito. A FIG. 7.3 compara a curva de pressão obtida por essa variação de parâmetros com a curva de pressão original.

TAB 7.3 Otimização da pressão alterando somente a geometria dos grãos $k_3=-1/3$

OBJETIVO	OTIMIZAÇÃO DA PRESSÃO ALTERANDO SOMENTE A GEOMETRIA DOS GRÃOS	
CURVA DE REFERÊNCIA	CONSTANTE = 210 MPa	
PARÂMETROS ALTERADOS PELO PSO	NOVO VALOR	VALOR ORIGINAL
Proporção do propelente 1	< 0,1%	100%
Proporção do propelente 2	< 0,1%	0%
Proporção do propelente 3*	> 99%	0%
W	0,235 mm	0,28 mm

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO	VALOR	VALOR ORIGINAL	VARIAÇÃO APROXIMADA
PRESSÃO MÁXIMA	309,1 MPa	320,3 MPa	-3,4%
VELOCIDADE DE BOCA	910,1 m/s	842 m/s	8,1%

* A proporção do propelente 3 não foi alterada diretamente pelo PSO, ela é consequência das outras duas proporções.

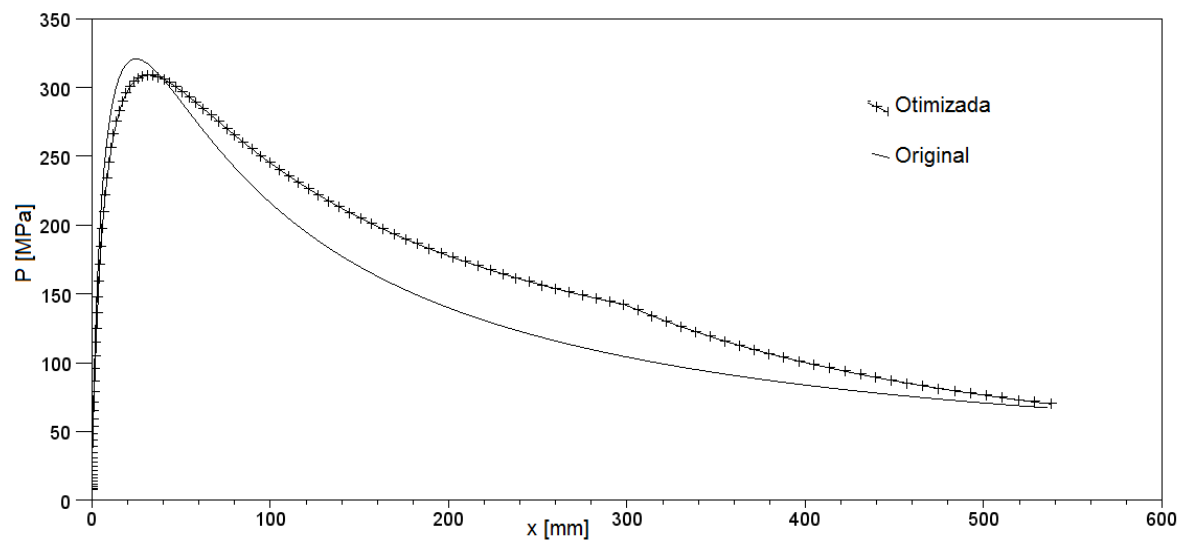


FIG 7.3 Otimização da pressão alterando somente a geometria dos grãos $k = -1/3$

8 CONCLUSÃO

O presente trabalho cumpriu plenamente as três metas inicialmente definidas:

- 1) desenvolver um algoritmo que simula a balística interna de um tiro de fuzil (o chamado problema direto);
- 2) desenvolver um algoritmo de problema inverso capaz de estimar parâmetros balísticos de um tiro de fuzil a partir de uma curva de pressão prescrita e
- 3) utilizar o algoritmo de problema inverso desenvolvido para estimar parâmetros que otimizem a curva de pressão de um tiro de fuzil.

8.1 PRIMEIRA PARTE: PROBLEMA DIRETO

A primeira parte do trabalho consistiu em elaborar um algoritmo capaz de descrever o problema direto da balística interna, com base no qual desenvolveu-se um programa capaz de gerar curvas de pressão, velocidade e fração mássica queimada a partir de parâmetros de entrada.

Os Capítulos 3 e 4 descrevem a maneira como o modelo de parâmetros concentrados foi implementado para descrever o problema direto da balística interna. A implementação não foi simples e direta, sendo necessário introduzir alguns ajustes nas equações do modelo básico, para que ele descrevesse a balística interna do fuzil com a qualidade exigida pelo presente trabalho. A lei de queima original do modelo, a chamada Lei de Robert, teve de ser substituída por outra mais complexa; e as funções de energia perdida e força de resistência precisaram ser estimadas conforme a metodologia descrita no Capítulo 5.

A adequação do programa que implementa o problema direto foi atestada pela sua comparação com os resultados gerados pelo software PRODAS. Verificou-se que o programa elaborado para essa pesquisa simula a balística interna do tiro de fuzil 7,62mm com qualidade semelhante à deste consagrado software comercial.

8.2 SEGUNDA PARTE: PROBLEMA INVERSO

Na primeira parte do trabalho, o algoritmo do problema direto foi usado para gerar curvas de pressão a partir de parâmetros de entrada dados. Na segunda parte, fez-se o caminho oposto: um algoritmo de problema inverso foi aplicado de maneira bem sucedida para obter os parâmetros balísticos a partir de uma curva experimental conhecida.

Estabeleceu-se assim a primeira aplicação prática da metodologia desenvolvida nessa pesquisa: a capacidade de estimar os parâmetros balísticos de um propelente desconhecido, dada a curva de pressão que ele gera em um tiro.

Ressalta-se que a presente pesquisa também elucidou o fato de que a relação da curva de pressão com os parâmetros que a geram não é biunívoca. Isso significa dizer que é possível determinar um conjunto de parâmetros que geram certa curva, porém esse conjunto não é o

único capaz de fazê-lo. Dessa maneira, a supracitada aplicação prática não determina o único propelente que gera certa curva de pressão, mas um dos propelentes que podem fazê-lo.

8.3 TERCEIRA PARTE: BUSCA DE CURVAS OTIMIZADAS

O conhecimento dos fatores que influem no formato da curva de pressão é fundamental para que curvas otimizadas possam ser empregadas em determinados armamentos. A compreensão de como cada característica do propelente altera a forma da curva possibilita a manipulação dessas características a fim de se obter curvas de formatos desejados. O Capítulo 6 tratou de investigar como cada parâmetro influencia a forma da curva de pressão, modelando o “poder de influência” de cada um desses parâmetros por meio do chamado coeficiente de sensibilidade.

Uma vez consolidada a metodologia de uso do problema direto e do problema inverso, o trabalho passou a investigar possibilidades teóricas e práticas de otimização da curva de pressão do fuzil 7,62mm. No Capítulo 7, estão expostos quatro resultados dessa investigação. Os dois primeiros requerem um trabalho posterior de pesquisa sobre propelentes capazes de atingir ou ao menos se aproximar dos parâmetros químicos calculados pelo problema inverso. Já o terceiro e quarto resultados modificaram apenas parâmetros geométricos do propelente. O terceiro resultado, em particular, requer apenas a simples modificação na geometria do grão do propelente de cilíndrica para a de placa fina. Dessa forma, ele possui aplicabilidade mais imediata, sem necessidade de modificar a substância energética original.

8.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho desenvolveu uma metodologia de estudo da influência dos diversos parâmetros de um propelente no desempenho de um armamento. O foco foi o fuzil 7,62mm e o objetivo básico do método foi aumentar a velocidade de boca, sem violar a pressão máxima de projeto da arma.

O algoritmo de PSO utilizado não impõe restrições de pressão máxima atingida pelas curvas calculadas a cada iteração ou limites máximos e mínimos para os parâmetros modificados. Uma melhoria interessante neste algoritmo seria impor tais limites. Dessa maneira, os resultados das otimizações realizadas no Capítulo 7 poderiam ser ainda melhores.

Uma linha de trabalho futura que pode tomar por base essa dissertação seria a aplicação da metodologia desenvolvida ao estudo de outras armas, como canhões e morteiros. Nestes casos, a margem de liberdade para alteração dos parâmetros do propelente seria consideravelmente maior, dando ao pesquisador mais alternativas para aperfeiçoar o desempenho da arma. Em um fuzil, assim como em qualquer arma portátil, há restrições de tamanho, forma e quantidade de propelente muito mais fortes do que em armas de grande calibre.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMCP 706-150 - Engineering Design Handbook, Ballistics Series, **“Interior Ballistics of Guns”**, 1965, United States Army Material Command, Washington DC.
- ARKHIPOV, V.A., BONDARCHUK, S. S., KOROTKIKH, A. G., 2010, **"Comparative Analysis of Methods for Measuring the Transient Burning Rate. I. Research Methods"** Combustion, Explosion and Shock Waves, Vol. 46 No. 5, pp. 564-569.
- ARKHIPOV, V.A., BONDARCHUK, S.S., KOROTKIKH, A.G., 2010 - B, **"Comparative Analysis of Methods for Measuring the Transient Burning Rate. II. Research Results"** Combustion, Explosion and Shock Waves, VOL. 46 NO. 5, PP. 570-577.
- BAER, P.G., FRANKLE, J.M., 1962, **“The Simulation of Interior Ballistics of Guns by Computer Program”**, Ballistics Research Labs, Report 1183, Aberdeen Proving Ground, Maryland.

- CAMPOS VELHO, H.F. de, 2001, **“Problemas inversos. Conceitos básicos e aplicações”**. IV Encontro de Modelagem Computacional. Nova Friburgo, RJ.
- CHENG, C., ZHANG, X.B., 2012, **"Interior Ballistic Charge Design Based on a Modified Particle Swarm Optimizer"**, Structural Multidisciplinary Optimization Journal, Industrial Application, vol. 46, p. 306 – 310.
- COLAÇO, M.J., ORLANDE, H.R.B., DULLIKRAVICH, G.S., 2006, **“Inverse and Optimization Problems in Heat Transfer”**, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 23, n. 1, pp. 1-24.
- DAMSE, R.S., SINGH, A. , 2003, **“Advanced Concepts of the Propulsion System for the Futuristic Gun Ammunition”**, Defence Science Journal, vol. 53, n. 4, pp. 341-450.
- DE OLIVEIRA, J. L.S.P., FILHO, A.A. M.F., PLATT, G.M. E PEIXOTO, F.C., 2005, **“Estimation of Ballistic Parameters of Gun Propellants through closed vessel experiment modeling.”** Engenharia Térmica (Thermal Engineering) Vol. 4. No. 1, p 50-55.
- FARRAR, C.L., LEEMING, D.W., 1983, **“Military ballistics: a basic manual, Brassey’s Battlefield Weapon System & Technology”**, v. X, Brassey’s Defense Publisher, England, 214 p.
- FAYON, A.M., GOLDSTEIN, J.B., 1965, **“Evaluation of Solid Propellant Ballistic Properties by Constant Volume Burning”**, American Cyanamid Company, Central Research Division, Stanford, Connecticut.
- JANZON, B., BACKOFEN, J.J., BROWN, R.E., GIRAUD, M., HORST, A.W., KLAUS, T., 2007, **“The future of warheads, armour and ballistics”**. 23rd International Symposium on Ballistics. Tarragona, Espanha.
- KLINGENBERG, G., KNOCHEL, H., MAAG, H.J., 1995, **“Gun propulsion concepts. Part I: Fundamentals”**, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 20, pp. 304-310.
- KLINGENBERG, G., KNOCHEL, H., MAAG, H.J., 1996, **“Gun propulsion concepts. Part II: Solid and Liquid Propellants”**, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 20, pp. 304-310.
- LIPANOV, A.M., 2000, **"Analytical Solution of the Inverse Problem of the Interior Ballistic of a Controlled Solid Rocket Motor"**, Combustion, Explosion and Shock Waves, vol. 36, n. 3, pp. 44-40.
- NOVOZHILOV, B.V., MARSHAKOV, V.N., 2011, **"The Inverse Problem Theory of Nonstationary Powder Combustion"**, Russian Journal of Physical Chemistry, vol. 5, n. 6, pp. 26-31.

OZISIK, M.N., ORLANDE, H.R.B, 2000, **“Inverse Heat Transfer: fundamentals and applications”**, Taylor & Francis, London.

POCOCK, M, GUYOTT, S.C., CARLUTTI, D., KLINGAMAN, K., MORAN, K.B., 2007, **“Challenges of internal ballistics modelling of novel propellants and propellant geometry”**. 23rd International Symposium on Ballistics. Tarragona, Espanha.

SILVA NETO, A.J. E MOURA NETO, F.D., 2005, **“Problemas inversos: conceitos fundamentais e aplicações.”** Rio de Janeiro, EdUERJ.

SOUZA, M.V.C. de, 2009, **“Otimização de termos fontes em problemas de biotransferência de calor.”** Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, Instituto Militar de Engenharia.