

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

LUCAS RUSSO VASCONCELOS MACHADO

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE ARMAMENTO LEVE QUE POSSUI
MECANISMO DE TRANCAMENTO**

**RIO DE JANEIRO
2021**

LUCAS RUSSO VASCONCELOS MACHADO

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE ARMAMENTO LEVE QUE POSSUI
MECANISMO DE TRANCAMENTO

Projeto de Final de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador(es): TC QEM Maurício Gruzman, D.Sc.

Rio de Janeiro

2021

©2021

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, microfilmар 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(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

Russo Vasconcelos Machado, Lucas.

Modelagem e simulação de armamento leve que possui mecanismo de trancamento / Lucas Russo Vasconcelos Machado. – Rio de Janeiro, 2021.

119 f.

Orientador(es): TC QEM Maurício Gruzman.

Projeto de Final de Curso (graduação) – Instituto Militar de Engenharia, Engenharia Mecânica, 2021.

1. Simulação. 2. Recuo. 3. Munição. 4. MATLAB. i. Gruzman, TC QEM Maurício (orient.)

LUCAS RUSSO VASCONCELOS MACHADO

Modelagem e simulação de armamento leve que possui mecanismo de trancamento

Projeto de Final de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador(es): TC QEM Maurício Gruzman.

Aprovado em Rio de Janeiro, 14 de Outubro de 2021, pela seguinte banca examinadora:



Prof. TC QEM Maurício Gruzman - D.Sc. do IME - Presidente



Prof. Maj QEM Gustavo Simão Rodrigues - D.Sc. do IME



Prof. Cap QEM Diogo Lopes Fernandes M.Sc. do IME

Rio de Janeiro
2021

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste Projeto de Final de Curso contou com a ajuda dentre as quais agradeço:

Ao professor orientador TC QEM Maurício Gruzman, que durante meses incluindo o Projeto de Iniciação à Pesquisa e este presente trabalho me acompanhou pontualmente, fornecendo todo auxílio necessário para elaboração do projeto e desempenhando tal função com dedicação e amizade.

Aos demais professores do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia pelos conselhos, correções e que através dos seus ensinamentos me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do Curso.

Aos meus amigos e colegas que tive a honra de encontrar no IME, com quem convivi intensamente durante os últimos anos, pelo companheirismo e pela troca de experiências que me permitiram crescer não só como pessoa, mas também como formando.

Por fim, aos meus familiares, em especial meus pais José Ascari e Cláudia Russo, e minha namorada Alexia Alcantarino por todo o apoio e pela ajuda que muito contribuíram para a realização deste trabalho. Pelo incentivo nos momentos difíceis e compreensão da minha ausência enquanto eu me dedicava à faculdade. Por estarem sempre ao meu lado, pela amizade incondicional e por não me permitirem desistir ao longo de toda minha formação.

RESUMO

No presente trabalho foi realizada a modelagem, simulação e análise dos esforços e movimentos que ocorrem nos componentes de um armamento leve com mecanismo de trancamento, tendo por finalidade prever possíveis falhas de funcionamento. No modelo foram contempladas diversas características do sistema como a munição, recuo, pressão interna decorrente da queima do propelente, atritos internos, impactos e vibração. A modelagem utilizada poderá ser adaptada para armas com trancamento em geral, porém como forma de validação considerou-se a munição $5.56 \times 45 \text{ mm}$ sendo disparada pelo *Fuzil de Assalto 5.56 IA2*. Os parâmetros de entrada do modelo como dimensões do armamento, constante de rigidez das molas e peso dos componentes foram obtidos experimentalmente, com a desmontagem da arma e realização das medições. Finalmente, após compilar as informações referentes à munição, mecanismo da culatra e mecanismo de trancamento são descritas as equações de movimento do sistema levando em consideração as forças atuantes no ferrolho, na munição que será ejetada e na munição que será carregada. As equações foram resolvidas numericamente por meio do *MATLAB* através de um método de integração numérica, tendo como principais objetivos verificar a ocorrência de falhas de carregamento, alimentação ou ejeção e gerar as curvas cinemáticas da posição, velocidade e aceleração dos corpos modelados. Os resultados obtidos através das simulações são coerentes e esperados de acordo com a literatura, constatando a adequação do modelo.

Palavras-chave: Simulação. Recuo. Munição. MATLAB.

ABSTRACT

The present work consists of performing the modeling, simulation and analysis of the efforts and motions that occur in the components of a light weapon with locking, in order to predict possible malfunctions. In the model, several characteristics of the system will be considered, such as ammunition, recoil, internal pressure due to the burning of the propellant, internal friction, impacts and vibration. The modeling used can be adapted for weapons with locking in general, but as a form of validation will be considered the *5.56 x 45 mm* ammunition being fired by *5.56 IA2 Assault Rifle*. The model's input parameters such as armament dimensions, constant spring stiffness and component weight will be obtained experimentally, with the disassembly of the weapon and measurements. Finally, after compiling the information related to the ammunition, recoil system and locking mechanism, the equations of motion of the system will be described taking into account forces acting on the bolt, the ammunition that will be ejected and the ammunition that will be loaded. The equations will be solved numerically by *MATLAB* through a numerical integration method, with the main objectives of verifying if there will be a failure in loading or extraction and generating the kinematic curves of the position, speed and acceleration of the modeled bodies. The results obtained through the simulations are coherent and expected according to the literature, verifying the adequacy of the model.

Keywords: Simulation. Recoil. Ammunition. MATLAB.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Armas próprias e impróprias respectivamente (MARCONDES, 2015)	19
Figura 2 – Conceito de uma arma de fogo (FREITAS, S.d)	20
Figura 3 – Falha de ejeção e alimentação respectivamente (TACTICAL, S.d)	21
Figura 4 – Classificação quanto à alma do cano (FREITAS, S.d)	23
Figura 5 – Classificação quanto ao carregamento (FREITAS, S.d)	24
Figura 6 – Classificação quanto à portabilidade (FREITAS, S.d)	25
Figura 7 – Classificação quanto ao efeito (FREITAS, S.d)	26
Figura 8 – Exemplo de sistema de operação Blowback (AMCP, 1970)	26
Figura 9 – Exemplo de sistema de operação Recoil Operated tipo longo recuo do cano (AMCP, 1970)	27
Figura 10 – Exemplo de sistema de operação Recoil Operated tipo curto recuo do cano (AMCP, 1970)	27
Figura 11 – Exemplo de sistema de operação Gas Operated (AMCP, 1970)	28
Figura 12 – Diferentes tipos de munição (HENRIQUES, 2019)	29
Figura 13 – Componentes da munição de armamento leve (HENRIQUES, 2019)	29
Figura 14 – Classificação estojo (HENRIQUES, 2019)	30
Figura 15 – Classificação cápsula de deflagração (HENRIQUES, 2019)	31
Figura 16 – Classificação e divisão projétil (HENRIQUES, 2019)	32
Figura 17 – Calibre real e do projétil (FREITAS, S.d)	33
Figura 18 – Cartuchos produzidos pela CBC no Brasil (JUDICIARIO, 2012)	34
Figura 19 – Fuzil de Assalto 5.56 IA2 (IMBEL, 2017)	35
Figura 20 – Desenho técnico munição 5.56x45mm (ARMAS, 2020)	36
Figura 21 – Variações do calibre 5.56x45mm fabricados pela CBC (ARMAS, 2020)	37
Figura 22 – Lista momentos de inércia de massa (SANTOS, 2001)	40
Figura 23 – Deformação ao longo das seções para carregamento axial (HIBBELER, 2010)	41
Figura 24 – Equivalência matemática entre estrutura e mola correspondente (GRUZMAN, 2020)	42
Figura 25 – Parâmetros geométricos na montagem de tubos (JUNIOR, 2019)	45
Figura 26 – Fases da balística (FREITAS, S.d)	46
Figura 27 – Componentes da balística interna (MOSS; LEEMING; FARRAR, 1996)	47
Figura 28 – Gráfico pressão e velocidade em função da posição do projétil (MOSS; LEEMING; FARRAR, 1996)	48
Figura 29 – Curvas balísticas relativas à munição 5.56mm M193 (PRODAS)	49
Figura 30 – Curvas balísticas adaptadas (Autoria Própria)	51
Figura 31 – Sistema de tomada de gases (IMBEL, 2017)	52

Figura 32 – Sistema de trancamento por ferrolho rotativo (IMBEL, 2017)	53
Figura 33 – Extrator e ejetor desmontados respectivamente (IMBEL, 2017)	54
Figura 34 – Carregador desmontado (IMBEL, 2017)	54
Figura 35 – Origem e eixos utilizados na modelagem (Autoria Própria)	55
Figura 36 – Desenho simplificado para visualização das forças dos gases propelentes (Autoria Própria)	56
Figura 37 – Desenho simplificado para visualização das forças durante o destranca- mento (Autoria Própria)	58
Figura 38 – Desenho simplificado para visualização da obturação (Autoria Própria)	60
Figura 39 – Bloco de todos componentes móveis acoplados (Autoria Própria)	61
Figura 40 – Primeiro desacoplamento (Autoria Própria)	63
Figura 41 – Segundo desacoplamento (Autoria Própria)	64
Figura 42 – Munição dentro do carregador antes da apresentação (Autoria Própria)	65
Figura 43 – Fase de apresentação (Autoria Própria)	66
Figura 44 – Primeira fase carregamento (Autoria Própria)	67
Figura 45 – Segunda fase carregamento (Autoria Própria)	68
Figura 46 – Terceira fase carregamento (Autoria Própria)	69
Figura 47 – Centro de massa dos corpos (Autoria Própria)	70
Figura 48 – Centro de massa ferrolho (Autoria Própria)	70
Figura 49 – Centro de massa munição (Autoria Própria)	71
Figura 50 – Amortecimento final do avanço (Autoria Própria)	72
Figura 51 – Primeira fase ejeção (Autoria Própria)	73
Figura 52 – Segunda fase ejeção (Autoria Própria)	75
Figura 53 – Segunda fase ejeção - Força de contato (Autoria Própria)	76
Figura 54 – Segunda fase ejeção - Força da mola do extrator (Autoria Própria) . . .	77
Figura 55 – Primeira fase carregamento - Força de contato (Autoria Própria)	79
Figura 56 – Início segunda fase carregamento (Autoria Própria)	80
Figura 57 – Início segunda fase carregamento - Força de contato F''_{CM} (Autoria Própria)	80
Figura 58 – Início segunda fase carregamento - Força de contato F'_{CM} (Autoria Própria)	81
Figura 59 – Início segunda fase carregamento - Força de contato F_{CM} (Autoria Própria)	82
Figura 60 – Segunda fase carregamento - Casos (Autoria Própria)	84
Figura 61 – Final segunda fase carregamento (Autoria Própria)	85
Figura 62 – Terceira fase carregamento - Força de contato F_{CSM} (Autoria Própria) .	86
Figura 63 – Casos de rotação para conjunto impulsor e ferrolho (Autoria Própria) .	88
Figura 64 – Caso 1 rotação para conjunto ferrolho e impulsor (Autoria Própria) . .	88
Figura 65 – Caso 2 rotação para conjunto ferrolho e impulsor (Autoria Própria) . .	90
Figura 66 – Forças no conjunto ferrolho e impulsor (Autoria Própria)	91
Figura 67 – Primeira iteração utilizando o método de Euler (MACHADO, 2020) . . .	93
Figura 68 – Fluxograma do algoritmo desenvolvido - Parte 1 (Autoria Própria) . . .	95

Figura 69 – Fluxograma do algoritmo desenvolvido - Parte 2 (Autoria Própria) . . .	96
Figura 70 – Equipamentos utilizados na medição(Autoria Própria)	97
Figura 71 – Medição da posição do evento de admissão (Autoria Própria)	98
Figura 72 – Pressão no evento de admissão (Autoria Própria)	98
Figura 73 – Pesagem do conjunto ferrolho e impulsor (Autoria Própria)	99
Figura 74 – Centros de massa munição e estojo (Autoria Própria)	100
Figura 75 – Atuação êmbolo e distância para apresentação (Autoria Própria)	101
Figura 76 – Desmontagem em 1º Escalão e recuo máximo (Autoria Própria)	103
Figura 77 – Posição do impulsor durante destrancamento (Autoria Própria)	104
Figura 78 – Velocidade do impulsor durante destrancamento (Autoria Própria) . . .	105
Figura 79 – Posição conjunto impulsor e ferrolho (Autoria Própria)	106
Figura 80 – Velocidade conjunto impulsor e ferrolho (Autoria Própria)	106
Figura 81 – Rotação do conjunto impulsor e ferrolho (Autoria Própria)	107
Figura 82 – Velocidade angular do conjunto impulsor e ferrolho (Autoria Própria) .	108
Figura 83 – Posição X do estojo (Autoria Própria)	108
Figura 84 – Velocidade X do estojo (Autoria Própria)	109
Figura 85 – Posição Y do estojo (Autoria Própria)	110
Figura 86 – Velocidade Y do estojo (Autoria Própria)	110
Figura 87 – Rotação do estojo (Autoria Própria)	111
Figura 88 – Velocidade angular do estojo (Autoria Própria)	111
Figura 89 – Posição X da munição (Autoria Própria)	112
Figura 90 – Velocidade X da munição (Autoria Própria)	113
Figura 91 – Posição Y da munição (Autoria Própria)	113
Figura 92 – Velocidade Y da munição (Autoria Própria)	114
Figura 93 – Rotação da munição (Autoria Própria)	115
Figura 94 – Velocidade angular da munição (Autoria Própria)	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Calibre nominal dos cartuchos produzidos pela CBC (JUDICIARIO, 2012)	34
Tabela 2 – Especificações do Fz Ass 5.56 IA2 (IMBEL, 2017)	35
Tabela 3 – Especificações dos cartuchos 5.56x45mm fabricados pela CBC (ARMAS, 2020)	37
Tabela 4 – Especificações munição e armamento (PRODAS)	48
Tabela 5 – Especificações adaptadas para munição e armamento (Autoria Própria)	50
Tabela 6 – Etapas do algoritmo desenvolvido (Autoria Própria)	94
Tabela 7 – Massas dos elementos (Autoria Própria)	99
Tabela 8 – Centros de massa e momentos de inércia (Autoria Própria)	100
Tabela 9 – Parâmetros das molas (Autoria Própria)	101
Tabela 10 – Propriedades Latão e Aço (MACHADO, 2020)	102
Tabela 11 – Coeficientes de atrito cinemático (MACHADO, 2020)	102
Tabela 12 – Rigidez equivalente (COSTA; ARAUJO; REIS, 2018)	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APFSDS	Armour Piercing Fin Stablished Discarding Sabot
CAD	Computer Aided Design
CBC	Companhia Brasileira de Cartuchos
CONARC	Continental Army Command
FAL	Fuzil Automático Leve
Fz Ass	Fuzil de Assalto
IMBEL	Indústria de Material Bélico do Brasil
IME	Instituto Militar de Engenharia
LSD	Linear Spring and Dashpot
MATLAB	Matrix Laboratory
PRODAS	Projectile Rocket Ordnance Design and Analysis Software
SCHV	Small Caliber High Velocity
CM	Centro de Massa
PVI	Problema de valor inicial

LISTA DE SÍMBOLOS

$\delta_{Apresentação}$	Elevação máxima da munição durante a apresentação
$\delta_{Carregador}$	Deformação inicial da mola do carregador
$\delta_{Destrancamento}$	Comprimento horizontal do entalhe do impulsor
$\delta_{Êmbolo}$	Deformação inicial da mola do êmbolo
δ_{Estojo}	Folga inicial entre estojo e câmara
$\delta_{Extrator}$	Deformação inicial da mola extrator
$\delta_{Ferrolho}$	Deformação inicial da mola recuperadora
ΔP	Perda de carga do gases ao longo do cano
θ_E	Rotação do estojo
θ_F	Rotação do conjunto impulsor do ferrolho e ferrolho
θ_M	Rotação da munição
μ_{CG-A}	Coefficiente de atrito cinético entre cilindro de gases e armação
μ_{E-A}	Coefficiente de atrito cinético entre êmbolo e armação
μ_{E-C}	Coefficiente de atrito cinético entre estojo e câmara
μ_{E-E}	Coefficiente de atrito cinético entre estojo e ejetor
μ_{E-F}	Coefficiente de atrito cinético entre estojo e ferrolho
μ_{IF-F}	Coefficiente de atrito cinético entre impulsor do ferrolho e ferrolho
$\mu_{(IF+F)-A}$	Coefficiente de atrito cinético entre conjunto e armação
μ_{M-A}	Coefficiente de atrito cinético entre munição e aba do carregador
μ_{M-C}	Coefficiente de atrito cinético entre munição e câmara
μ_{M-F}	Coefficiente de atrito cinético entre munição e ferrolho
μ_{M-R}	Coefficiente de atrito cinético entre munição e rampa de carregamento
ν_C	Coefficiente de poisson câmara
ν_E	Coefficiente de poisson estojo

γ	Ângulo rampa de carregamento
a_A	Aceleração da munição durante apresentação
a_D	Aceleração do impulsor do ferrolho durante o destrancamento
a_E	Aceleração do estojo
a_F	Aceleração do ferrolho
a_M	Aceleração da munição
$D_{iCâmara}$	Diâmetro interno da câmara
$D_{iEstojo}$	Diâmetro interno do estojo
$D_{oCâmara}$	Diâmetro externo da câmara
$D_{oEstojo}$	Diâmetro externo do estojo
e_E	Espessura estojo
E_E	Módulo de elasticidade estojo
E_C	Módulo de elasticidade câmara
Fat_{CG-A}	Força de atrito entre cilindro de gases e armação
Fat_{E-A}	Força de atrito entre êmbolo e armação
Fat_{E-E}	Força de atrito entre estojo e ejetor
Fat_{E-F}	Força de atrito entre estojo e ferrolho
Fat_{IF-F}	Força de atrito entre impulsor do ferrolho e ferrolho
$Fat_{(IF+F)-A}$	Força de atrito entre conjunto e armação
Fat_{M-A}	Força de atrito entre munição e aba do carregador
Fat_{M-C}	Força de atrito entre munição e câmara
Fat_{M-F}	Força de atrito entre munição e ferrolho
Fat_{M-R} e Fat'_{M-R}	Força de atrito entre munição e rampa de carregamento
F_{CA}	Força de contato e amortecimento entre conjunto e armação
F_{CE}	Força de contato entre estojo e ejetor
F'_{CE}	Força de contato entre estojo e ferrolho

F_{CF_1} e F_{CF_2}	Forças de contato entre ferrolho e armação
F'_{CM} e F_{CM}	Forças de contato entre munição e rampa
F''_{CM}	Força de contato entre munição e ferrolho
F_{G_1}	Força dos gases no culote do estojo
F_{G_2}	Força dos gases no evento
$F_{M_{\hat{E}mbolo}}$	Força da mola do êmbolo
$F_{M_{Extrator}}$	Força da mola do extrator
$F_{M_{Ferrolho}}$	Força da mola recuperadora
F_{obt}	Força de obturação
g	Aceleração gravitacional
$H_{Conjunto}$	Altura total do conjunto ferrolho e impulsor do ferrolho
H_{Ejetor}	Altura do ejeter
$H_{\hat{E}mbolo}$	Altura de atuação do êmbolo
$H_{Propelente}$	Altura do propelente
h_M	Altura do ressalto no culote do estojo
H_{Mola}	Altura de atuação da mola recuperadora
I_E	Momento de inércia de massa do estojo
I_F	Momento de inércia de massa do conjunto impulsor do ferrolho e ferrolho
I_M	Momento de inércia de massa da munição
$k_{Armação}$	Constante de rigidez correspondente da armação
$k_{Câmara}$	Constante de rigidez correspondente da câmara
$K_{Carregador}$	Constante de rigidez mola do carregador
$K_{\hat{E}mbolo}$	Constante de rigidez mola do êmbolo
k_{Ejetor}	Constante de rigidez correspondente do ejeter
$K_{Extrator}$	Constante de rigidez mola extrator
$k_{Ferrolho}$	Constante de rigidez correspondente do ferrolho

$K_{Ferrolho}$	Constante de rigidez mola recuperador
k_{Rampa}	Constante de rigidez correspondente da rampa de carregamento
$L_{Conjunto}$	Comprimento total do conjunto ferrolho e impulsor do ferrolho
L_{Estojo}	Comprimento total do estojo
l_M	Largura do culote do estojo
$L_{Munição}$	Comprimento total da Munição
L'_{Estojo}	Comprimento efetivo de obturação
L_{Rampa}	Comprimento da rampa de carregamento
M_{CG}	Massa da câmara de gases
$M_{\hat{E}}$	Massa do êmbolo
M_E	Massa do estojo
M_F	Massa do ferrolho
M_{IF}	Massa do impulsor do ferrolho
M_M	Massa munição
$N_{\hat{E}}$	Normal entre êmbolo e conjunto ferrolho e impulsor
N_M	Normal entre munição e conjunto ferrolho e impulsor
P_a	Pressão atmosférica
P_b	Pressão os gases na base do projétil
P_c	Pressão dos gases no interior da câmara
P_{Evento}	Pressão dos gases no evento
P_i	Pressão na interface estojo câmara
P_{obt}	Pressão mínima para ocorrer a obturação
r_{mE}	Raio médio estojo
t_0	Tempo até saída do projétil pela boca do cano
t_D	Tempo necessário até o destrancamento
$t_{Acoplamento}$	Tempo necessário até o ferrolho entrar em contato com culote da munição

$t_{Apresentação}$	Tempo necessário até o fim da apresentação
$t_{Desacoplamento_1}$	Tempo para desacoplamento do conjunto cilindro de gases e êmbolo
$t_{Desacoplamento_2}$	Tempo para desacoplamento do estojo
$X_{Ejeção}$	Distância entre culote do estojo e ejetor no início do disparo
X_{Evento}	Posição do evento no cano
$X_{Carregador}$	Distância de recuo necessária para que ocorra a apresentação
X_{Rampa}	Distância até contato com rampa de carregamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	MOTIVAÇÃO	20
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
1.3	OBJETIVOS	22
1.4	CLASSIFICAÇÃO ARMAS DE FOGO	22
1.5	MUNIÇÃO	28
1.6	CALIBRE	32
1.7	VALIDAÇÃO	34
1.7.1	FUZIL DE ASSALTO 5.56 IA2	34
1.7.2	MUNIÇÃO 5.56	35
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	38
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	39
3.1	LEIS DE NEWTON E EULER	39
3.2	MOMENTO DE INÉRCIA DE MASSA	40
3.3	CARGA AXIAL	41
3.4	FORÇAS DE CONTATO	42
3.5	VASOS CILÍNDRICOS	43
3.6	BALÍSTICA	45
3.6.1	SEQUÊNCIA DE DISPARO	47
3.6.2	PRODAS	48
3.7	MECANISMO DA CULATRA	51
3.7.1	FASES DO FUNCIONAMENTO	51
3.7.1.1	AÇÃO DOS GASES	52
3.7.1.2	DESTRANCAMENTO E ABERTURA	53
3.7.1.3	EXTRAÇÃO E EJEÇÃO	53
3.7.1.4	APRESENTAÇÃO E CARREGAMENTO	54
3.7.1.5	FECHAMENTO E TRANCAMENTO	55
3.7.2	FORÇAS	55
3.7.2.1	FORÇA DOS GASES PROPELENTES	56
3.7.2.2	DESTRANCAMENTO	57
3.7.2.3	OBTURAÇÃO	59
3.7.2.4	MOVIMENTO FERROLHO	61
3.7.2.5	DESACOPLAMENTO	62
3.7.2.6	ACOPLAMENTO	64

3.7.3	CONDIÇÕES INICIAIS	69
3.7.4	FINAL AVANÇO	71
3.7.5	TORQUES	73
3.7.5.1	EJEÇÃO	73
3.7.5.2	CARREGAMENTO	78
3.7.5.3	FERROLHO	87
4	SOLUÇÃO NUMÉRICA	92
4.1	MÉTODO DIRETO	92
4.2	FLUXOGRAMA	94
5	PARÂMETROS CONSIDERADOS NA SIMULAÇÃO	97
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	104
6.1	FERROLHO	104
6.2	ESTOJO	108
6.3	MUNIÇÃO	112
7	CONCLUSÃO	116
	REFERÊNCIAS	117
	A – DADOS <i>PRODAS</i> MUNIÇÃO M193 556	119

1 INTRODUÇÃO

Uma arma é um instrumento ou uma ferramenta que permite atacar ou defender-se. Podem ser classificadas como próprias, objetos concebidos com a finalidade de ataque e defesa ou impróprias, objetos que não foram concebidos com essa finalidade, porém em algum momento podem ser utilizadas para esse fim, conforme Figura 1. O principal conceito de uma arma de fogo é arremessar projéteis empregando a força expansiva dos gases gerados pela combustão de um propelente confinado em uma câmara que, normalmente, está solidária a um cano que tem a função de propiciar continuidade à combustão do propelente, além de direção e estabilidade ao projétil (FREITAS, S.d).



Figura 1 – Armas próprias e impróprias respectivamente (MARCONDES, 2015)

De acordo com Marcondes (2015) as armas de fogo são utilizadas com os mais variados propósitos sendo dispositivos mecânicos ou um artefato capaz de disparar projéteis em alta velocidade através da ação pneumática provocada pela expansão dos gases resultantes da queima de um propelente de alta velocidade, como pode ser visualizado na Figura 2. Antigamente o propulsor era tipicamente a pólvora negra, já as armas de fogo mais modernas usam a pólvora sem fumaça de base simples ou dupla ou outros propelentes. A munição é considerada um elemento distinto da arma, porém imprescindível para o seu funcionamento.



Figura 2 – Conceito de uma arma de fogo (FREITAS, S.d)

Durante o disparo de um armamento leve, além das circunstâncias iniciais da realização, que envolvem desde parâmetros da munição e do armamento até a habilidade do atirador de empregar corretamente os fundamentos de tiro, diversos efeitos podem alterar a precisão, acurácia, velocidade de saída do projétil, pressão máxima dos gases gerados pela queima do propelente, recuo e correto funcionamento (MACHADO, 2020). Tais efeitos estão diretamente relacionados com parâmetros do próprio armamento e da munição, como dimensões e tolerâncias, lubrificação, material e forças de contato.

A fim de realizar previsões na ocorrência de falhas e análises sobre certas características do recuo e do armamento, garantindo assim, a autonomia, segurança, poder de fogo e as restrições do manual do armamento, faz-se necessário o estudo na área de simulações e modelagem pelo Exército Brasileiro, principalmente para aplicações como projetos, avaliações, perícia e até mesmo ajustes de tolerâncias (COSTA; ARAUJO; REIS, 2018).

No presente capítulo, são apresentados aspectos introdutórios referentes ao trabalho. Na Seção 1.1, são elencadas as razões que levaram ao surgimento da análise aqui desenvolvida. Na Seção 1.2, consta o modo de organização dos capítulos e conteúdos abordados de forma resumida em cada parte do trabalho. Já a Seção 1.3 contempla os objetivos que se espera alcançar por ocasião da conclusão do trabalho. A Seção 1.4 aborda sobre a classificação dos armamentos, a Seção 1.5 sobre componentes da munição e a Seção 1.6 sobre calibre. Por fim na Seção 1.7, são comentadas características, a origem e o emprego da munição e do armamento que serão utilizados como validação no presente trabalho.

1.1 Motivação

A área de modelagem e simulação vem crescendo cada vez mais em diversos setores. Este ferramental orienta o processo de tomada de decisões, auxilia nas análises e avaliações de sistemas e ajuda a propor soluções para a melhoria de performance. Na Engenharia, por

exemplo, a utilização desta técnica tem trazido benefícios como: a previsão de resultados na execução de uma determinada ação, a redução de riscos na tomada de decisão, a identificação de problemas antes de suas ocorrências, a redução na realização de testes que aumentam o custo do projeto e a revelação da integridade e viabilidade de um determinado projeto em termos técnicos (SILVA, 2019).

Dessa forma, é de grande importância a utilização dessa ferramenta na análise de armamentos e munições pelo Exército Brasileiro, principalmente por indicar se acontecerá algum tipo falha, Figura 3, e por ser um processo menos dispendioso em termos de tempo e recurso quando comparado a realização de testes em um campo de provas.



Figura 3 – Falha de ejeção e alimentação respectivamente (TACTICAL, S.d)

1.2 Organização do Trabalho

O trabalho é composto pelos seguintes capítulos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Fundamentação Teórica, Solução Numérica, Resultados e Discussão, Conclusão, Referências Bibliográficas e Apêndice. Ao longo da Introdução e Revisão Bibliográfica, são apresentados o tema, o armamento, a munição e diversas referências utilizadas neste trabalho. A Fundamentação Teórica trata dos conceitos referentes à teoria necessária para realizar a modelagem, como: explicação sobre balística e recuo, as forças atuantes nos corpos e seus respectivos equacionamentos. Na Solução Numérica são descritos todos os dados necessários para se realizar os equacionamentos, assim como uma breve explicação sobre o método numérico utilizado. No capítulo de Resultados e Discussão, são exibidos os resultados obtidos no trabalho junto com seus respectivos comentários. Referências Bibliográficas apresenta todas as referências utilizadas listada em ordem alfabética e no Apêndice estão disponíveis os códigos e comentários utilizados para obtenção dos resultados.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo realizar a modelagem e simulação da massa recuante, do estojo da munição que será ejetada após o disparo e da munição que será alimentada e carregada em seguida. A modelagem pode ser adaptada para qualquer armamento com trancamento de modo geral, e na condição inicial o armamento estará fechado e trancado pronto para o disparo e com apenas uma munição no carregador. Como forma de validação será utilizada o Fz Ass 5.56 IA2, um projeto nacional da IMBEL com o intuito de substituir o FAL M964, que começou a ser empregado pelo Exército Brasileiro recentemente em 2012 e sua variante com calibre 7.62 em 2016.

Não será o foco do trabalho realizar a simulação do projétil levando em consideração a balística interna, externa e terminal. Dessa forma a curva de pressão consequente da queima de propelente será obtida através do software PRODAS, que gera uma tabela com esses dados até o instante em que o projétil sai do cano. O problema é plano e devido à isso possui 3 graus de liberdade para cada corpo rígido: movimento em X e Y e rotação em Z, sendo possível analisar o efeito de vibração principalmente na massa recuante durante seu recuo e avanço. Para a obtenção dos resultados será utilizado um método iterativo de integração numérica realizado no software MATLAB. A maioria dos parâmetros de entrada do programa desenvolvido serão obtidos com a desmontagem do armamento e medições de seus componentes no laboratório de Engenharia Mecânica e de Armamento do IME. Vale ressaltar que os instrumentos de medição utilizados não são de alta precisão, então pode haver pequenas variações dos valores obtidos.

Como resultados gerados ao término deste Projeto de Fim de Curso, pretende-se estudar o movimento relativo entre os corpos e verificar se o armamento é seguro, sem apresentar alguma pane ou falha de ejeção, alimentação ou carregamento, e obter então, os gráficos cinemáticos da velocidade e posição que represente de forma satisfatória os 3 corpos modelados, por meio do emprego de conhecimentos diversos obtidos ao longo do curso de Engenharia Mecânica, contribuindo assim com a realização de novas pesquisas na área. Cabe ressaltar que a modelagem será feita de forma a considerar que os corpos se movem livremente e existem forças de contato entre eles, garantindo que os movimentos relativos entre os componentes do armamento ocorram de forma adequada e correta para as diversas operações. Esta abordagem, ao contrário da mais tradicional, que utiliza juntas para garantir esse movimento entre componentes, possui vantagens e desvantagens que serão comentadas posteriormente.

1.4 Classificação Armas de Fogo

Classificação é o ato ou a ação de organizar os objetos ou seres por classes, de dividi-los em grupos com características comuns. Obviamente, para classificar fazem-se necessários

um método e a definição dos atributos a serem observados. A grande variação das armas de fogo nos projetos e nas características faz com que existam armas extremamente diferentes. O interesse em classificar armas de fogo reside em identificá-las tomando-se por base critérios que vão do geral para o particular e que contemplem objetivamente as especificidades de cada uma (SENASP, S.db). A seguir estão listadas as principais classificações com exemplificações para melhor entendimento:

Quanto à alma do cano: A alma é a parte oca do interior do cano de uma arma de fogo, que vai geralmente desde a culatra até a boca do cano, Pode ser lisa ou raiada dependendo do tipo de munição para qual a arma foi projetada (JUDICIARIO, 2012). As raias são sulcos feitos na parte interna da alma, geralmente de forma helicoidal, que têm a finalidade de propiciar o movimento de rotação dos projéteis, ou granadas, que lhes garante estabilidade na trajetória (SENASP, S.db).

- Alma lisa
- Alma raiada

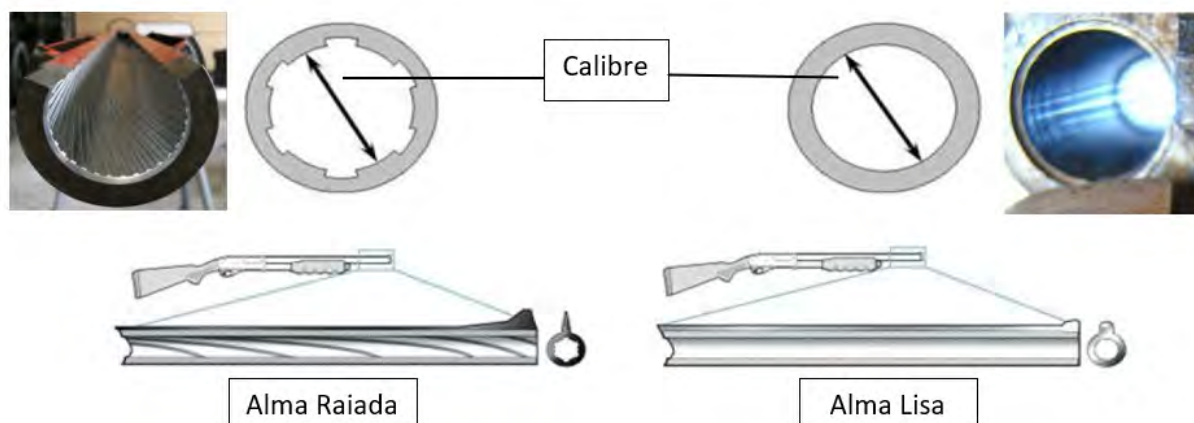


Figura 4 – Classificação quanto à alma do cano (FREITAS, S.d)

Quanto ao sistema de carregamento: Para que as primeiras armas de fogo estivessem em condições de efetuar um disparo, era necessário introduzir pela boca do cano a pólvora com a utilização de ferramentas e as buchas. Este processo era muito lento e se tornou obsoleto com a invenção do cartucho, unidade de munição completa (SENASP, S.db).

- Antecarga - Carregamento feito pela boca ou parte anterior do cano
- Retrocarga manual - Carregamento feito pela parte posterior do cano, com o emprego da força muscular do atirador

- Retrocarga automática - Carregamento feito pela parte posterior do cano, por meio do aproveitamento da energia do disparo, dispensando a intervenção humana



Figura 5 – Classificação quanto ao carregamento (FREITAS, S.d)

Quanto ao funcionamento:

- De tiro unitário - Armas de carregamento manual e, conforme o próprio nome diz, dotadas de carga para um único tiro
- De repetição - Arma capaz de ser disparada mais de uma vez antes que seja necessário recarregá-la, as operações de realimentação são feitas pela ação do atirador
- Semiautomática - Sistema pelo qual cada disparo é realizado com o acionamento da tecla do gatilho. As operações de extração, ejeção e realimentação se darão pelo reaproveitamento dos gases oriundos do disparo
- Automática - Arma em que o carregamento, disparo e todas as operações de funcionamento ocorrem continuamente enquanto o gatilho estiver sendo acionado

Quanto ao emprego:

- Individual - Necessitam de apenas um indivíduo para seu uso como por exemplo pistolas, fuzis e espingardas
- Coletivo - Necessitam de mais de um operador para seu correto funcionamento como por exemplo armamentos de artilharia

Quanto à mobilidade ou portabilidade:

- De porte - Arma de fogo com dimensões e peso reduzidos, que pode ser portada por um indivíduo em um coldre e disparada, comodamente, com somente um das mãos do atirador
- Portátil - Arma cujo peso e dimensões permitem que seja transportada por um único homem, mas não conduzida em um coldre, exigindo, em situações normais, ambas as mãos para realização eficiente do disparo
- Não portátil - Arma que, devido às suas dimensões ou ao seu peso, não pode ser transportada por um único homem



Figura 6 – Classificação quanto à portabilidade (FREITAS, S.d)

Quanto ao efeito:

- Leve - Possuem peso e volume relativamente reduzidos, podendo ser transportadas geralmente por um homem, além de possuírem o seu calibre inferior ou igual a 0.5"(meia polegada) ou 12.7 mm
- Pesado - Empregadas em operações militares devido ao seu poderoso efeito destrutivo sobre o alvo, possuem calibre maior que 12.7 mm



Figura 7 – Classificação quanto ao efeito (FREITAS, S.d)

De acordo com Freitas (S.d) ainda existem outras classificações como quanto à refrigeração (Ar ou ar e água), ao tamanho (Curtas ou longas), ao uso (Permitido ou restrito) e ao sistema de acionamento (Ação simples ou dupla ou híbrido). Como pode ser visto, pode ser adotado inúmeros critérios, entretanto, no interesse de melhor identificá-las, esses critérios devem obedecer a requisitos técnico-científicos e contemplar características intrínsecas da própria arma.

AMCP (1970) traz outra classificação importante sobre armas automáticas de acordo com o seu sistema de operação. Blowback ou culatra desaferrolhada é o único sistema que não possui os processos de trancamento e destrancamento, utiliza a pressão dos gases propelentes para forçar o ferrolho para retaguarda. Possui somente a resistência oferecida pela inércia do próprio ferrolho e a força de atrito entre o estojo e a câmara do armamento devido a expansão do mesmo com o aumento da pressão junto com a queima do propelente. Não possui o processo de trancamento e destrancamento e o cano, a caixa da culatra e as demais partes permanecem fixas. Embora seja o sistema mais simples, como pode ser visto na Figura 8, não possui uma alta cadência de tiro devido ao peso elevado do ferrolho para garantir que não haja abertura prematura do armamento. Existem mecanismos para amenizar essa principal desvantagem das armas Blowback, como a ignição avançada em que a percussão ocorre antes do total fechamento e o destrancamento retardado em que ocorre um trancamento entre o ferrolho e a caixa da culatra.

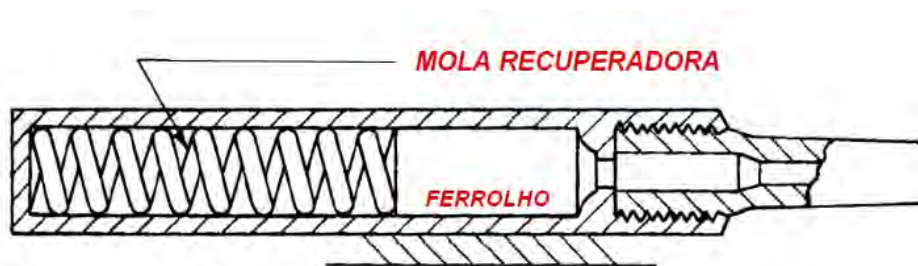


Figura 8 – Exemplo de sistema de operação Blowback (AMCP, 1970)

Armas com sistema de operação Recoil Operated ou armas de culatra aferrolhada utilizam a energia das partes recuantes para operar com o auxílio do recuo do cano para garantir o correto trancamento do armamento. Pode ser longo recuo do cano, em que o cano e o ferrolho recuam juntos durante todo o comprimento de recuo ou curto recuo do cano, em que o cano e ferrolho recuam juntos por um curto comprimento de recuo. O sistema de operação longo recuo do cano se tornou obsoleto pelo fato de existirem dois tempos para avanço, um para o cano e outro para o ferrolho, e isso em conjunto com uma grande massa recuante. Observe que na Figura 9, o destrancamento do armamento ocorre no fim do recuo enquanto na Figura 10 ocorre após um curto deslocamento do ferrolho.

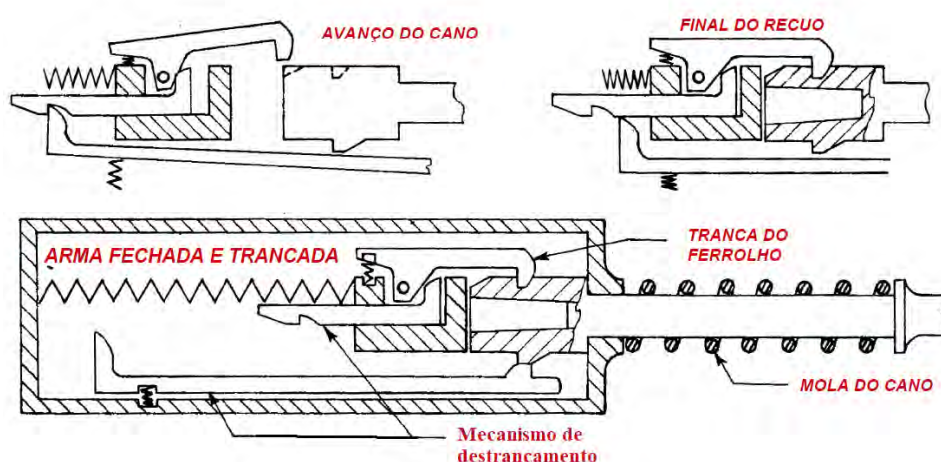


Figura 9 – Exemplo de sistema de operação Recoil Operated tipo longo recuo do cano (AMCP, 1970)

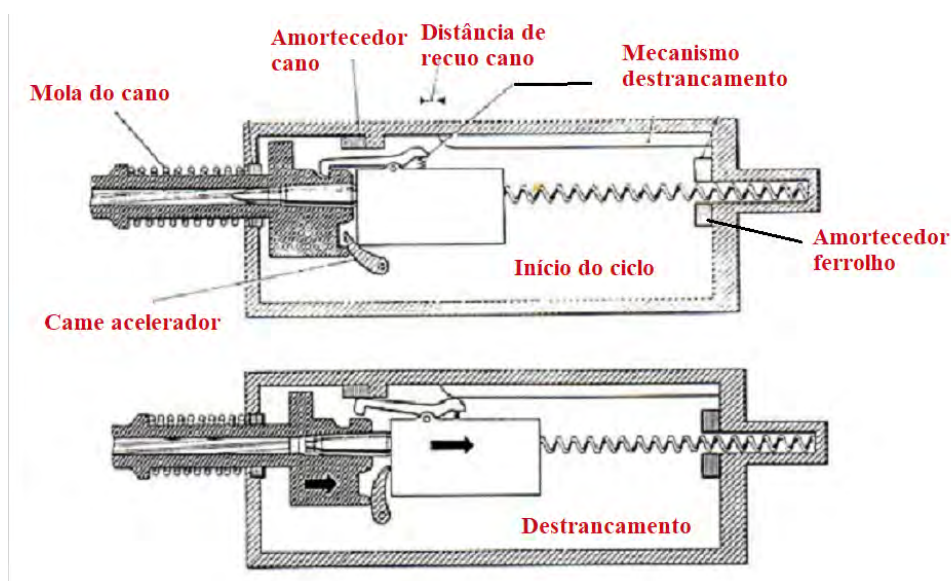


Figura 10 – Exemplo de sistema de operação Recoil Operated tipo curto recuo do cano (AMCP, 1970)

Além dos dois sistemas de operação citados anteriormente ainda existe o Gas Operated ou armas com tomada de gás. É o sistema que utiliza os gases propelentes, forçados a passar por um evento no interior da alma, com objetivo de deslocar um pistão que aciona o ferrolho através de algum mecanismo para a retaguarda. O pistão inicialmente destranca o ferrolho, para depois fazer com que ele recue, isso garante um correto destrancamento e trancamento da arma. A Figura 11 exemplifica um sistema de operação com tomada de gás e mostra o procedimento resumido anteriormente.

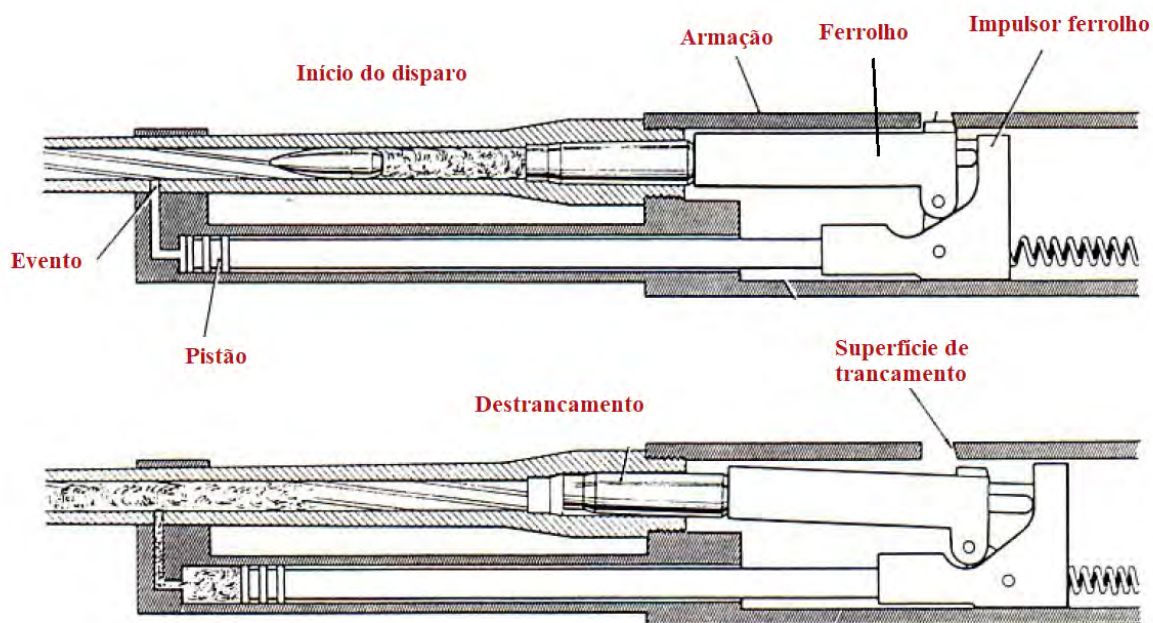


Figura 11 – Exemplo de sistema de operação Gas Operated (AMCP, 1970)

1.5 Munição

De acordo com Judiciário (2012), munição é o conjunto de cartuchos necessários ou disponíveis para uma arma ou uma ação qualquer que serão usadas armas de fogo. Para Wikipedia (2020a) munição é a designação do material ou componente disparado a partir de qualquer arma, como por exemplo: uma bola de ferro disparada de um canhão. Tem como principal objetivo projetar uma força contra um alvo selecionado para ter um efeito desejado, sendo o cartucho de arma de fogo a mais icônica munição, pois inclui todos os componentes necessários para entregar o efeito da arma em um único pacote.

A munição vem em uma grande variedade de tamanhos e tipos e geralmente é projetada para funcionar apenas em sistemas específicos. No entanto, existem padrões internacionalmente reconhecidos para certos tipos de munições que permitem seu uso em diferentes armas e por diferentes usuários. Existem também tipos específicos de munição

que são projetados para ter um efeito especializado em um alvo, como projéteis perforantes e munição traçante. A munição é comumente colorida para auxiliar na identificação e evitar que os tipos de munição incorretos sejam usados acidentalmente (WIKIPEDIA, 2020a).



Figura 12 – Diferentes tipos de munição (HENRIQUES, 2019)

De acordo com Freitas (S.d) os principais componentes de uma munição são estojo, cápsula de deflagração, pólvora e projétil, como pode ser visualizado na Figura 13. O cartucho para arma de defesa contém um tubo oco, geralmente de metal, com um propelente em seu interior, em sua parte aberta fica preso o projétil e na sua base ou lateral encontra-se o elemento iniciador.

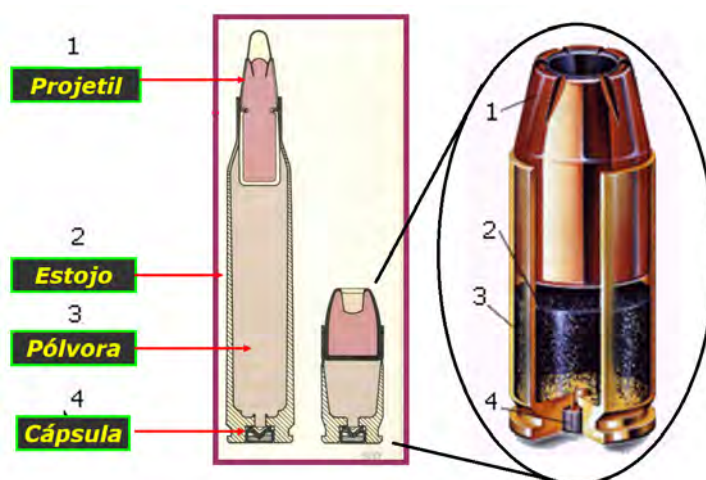


Figura 13 – Componentes da munição de armamento leve (HENRIQUES, 2019)

O estojo é o componente de união mecânica do cartucho, apesar de não ser essencial ao disparo, já que algumas armas de fogo utilizam munição desencartuchada, ou seja, sem estojo. Ele possibilita que todos os componentes necessários ao disparo fiquem unidos em uma peça, de forma a facilitar o manejo da arma (JUDICIARIO, 2012). Uma de suas extremidades é aberta, denominada boca do estojo, onde fica engastado o projétil, e outra fechada denominada culote, em que se aloja a cápsula de deflagração e onde estão impressos os caracteres que identificam o calibre e o fabricante (LIMA, 2017).

Atualmente a maioria dos estojos são construídos de metais não-ferrosos como latão ou cobre e seu formato é muito importante, pois as armas modernas são construídas de forma a aproveitar essas características físicas. Podem ser classificados de acordo com a forma do corpo, tipo de base e tipo de iniciação, como pode ser visualizado na Figura 14.

Em relação a forma do corpo, o cilíndrico mantém seu diâmetro constante por toda sua extensão, o cônico possui diâmetro reduzido na boca, sendo pouco comum e o garrafa possui um estrangulamento conhecido como gargalo. Na prática não existe estojo totalmente cilíndrico pois sempre haverá uma pequena conicidade para facilitar o processo de extração. Os estojos tipo garrafa foram criados com o objetivo de conter grande quantidade de pólvora, sem ter necessariamente um grande calibre, sendo encontrado comumente em cartuchos de fuzis (JUDICIARIO, 2012).

Em relação ao tipo de base, é importante para o processo de carregamento e extração, pois sua forma determina o ponto de apoio do cartucho na câmara, além de possibilitar a ação do extrator sobre o estojo. Em relação ao tipo de iniciação, no fogo circular a mistura detonante é colocada no interior do estojo e no fogo central a mistura detonante esta disposta em uma cápsula fixada no centro da base (JUDICIARIO, 2012).



Figura 14 – Classificação estojo (HENRIQUES, 2019)

A cápsula de deflagração é um pequeno recipiente, as vezes parte do estojo e as vezes neste montado, em que é colocada a mistura iniciadora, um explosivo primário, altamente sensível à pressão, que quando detonado gera uma chama para iniciar o propelente. Essa mistura queima com facilidade, bastando o atrito gerado pelo amassamento da cápsula contra a bigorna, provocado pelo percussor. Atualmente, a CBC usa em seus cartuchos misturas iniciadoras à base de estifinato de chumbo, nitrato de bário, trissulfeto de antimônio, tetrazena e alumínio (LIMA, 2017).

De acordo com Henriques (2019), os tipos mais comuns de cápsula são: boxer, berdan e bateria, como pode ser visualizado na Figura 15. No sistema boxer, a bigorna faz parte da cápsula e seu alojamento no estojo possui um único furo central para a passagem da chama iniciadora. No sistema berdan, a bigorna faz parte do alojamento da cápsula no estojo, o qual possui dois ou mais furos para a passagem da chama. No sistema bateria, a cápsula é totalmente independente do estojo, de forma que possui seu próprio alojamento, muito utilizado em cartuchos de caça.

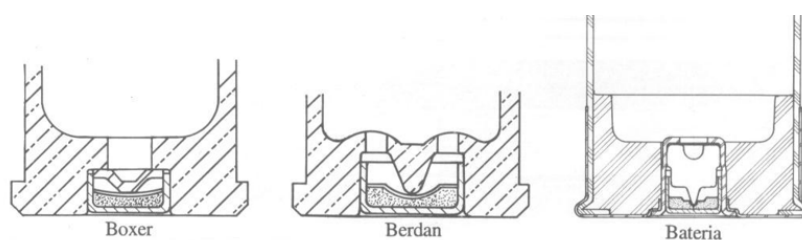


Figura 15 – Classificação cápsula de deflagração (HENRIQUES, 2019)

Propelente, ou carga de projeção, é a fonte de energia química capaz de arremessar o projétil a frente com alta velocidade. A energia é produzida pelos gases resultantes da queima do propelente, que possuem volume muito maior que o sólido original. Essa rápida expansão dos gases no interior do estojo gera grande pressão para impulsionar o projétil (JUDICIARIO, 2012). Sua composição química e a forma de seus grãos definem a taxa de queima, e isso é utilizado a depender do tamanho do cano da arma empregada, de forma a escolher pólvoras mais lentas para armas com cano longo e pólvoras mais rápidas, ou ditas vivas, para armas de cano curto (LIMA, 2017).

De acordo com Judiciario (2012), atualmente o propelente usado nos cartuchos de armas é a pólvora química ou pólvora sem fumaça. Desenvolvida no final do século XX, substituiu com grande eficiência a pólvora negra, pois produz muita pouca fumaça e muito menos resíduos, além de ser capaz de gerar muito mais pressão com pequenas quantidades. Dois tipos de pólvoras sem fumaça são utilizadas em armas de defesa, a de base simples é fabricada a base de nitrocelulose e gera menos calor durante a queima e a de base dupla é fabricada com nitrocelulose e nitroglicerina e possui maior conteúdo energético.

O projétil é a parte da munição que deverá produzir o efeito principal do disparo no

alvo. Inicialmente engastada na boca do estojo, deste se desprende sob a pressão dos gases e é acelerado através do cano. Os cartuchos são carregados em geral com um único projétil, o qual está alojado parcialmente no estojo. São divididos em três grupos: projéteis de liga de chumbo, encamisados ou semiencaimados. Além disso, é dividido em três principais partes: ponta, corpo e base e também pode ser classificado de acordo com seu formato. Todas estas divisões e classificações podem ser visualizadas na Figura 16.

A base ou culote do projétil favorece as propriedades balísticas, no que concerne ao arrasto, o corpo é a área que se engraza ao raiamento e realizada a vedação durante a balística interna, a ogiva ou ponta favorece as propriedades balísticas no que concerne a resistência do ar e a camisa, apenas em projéteis encamisados ou semiencaimados, protege o núcleo e auxilia nas propriedades aerodinâmicas e na balística interna, de forma a impedir o derretimento do núcleo quando sujeito a altas temperaturas e reduzir o desgaste do cano. Em geral, os projéteis possuem um núcleo de liga de chumbo e um revestimento de liga de cobre, alguns deles com zinco e/ou níquel (Liga Tombak) (HENRIQUES, 2019).

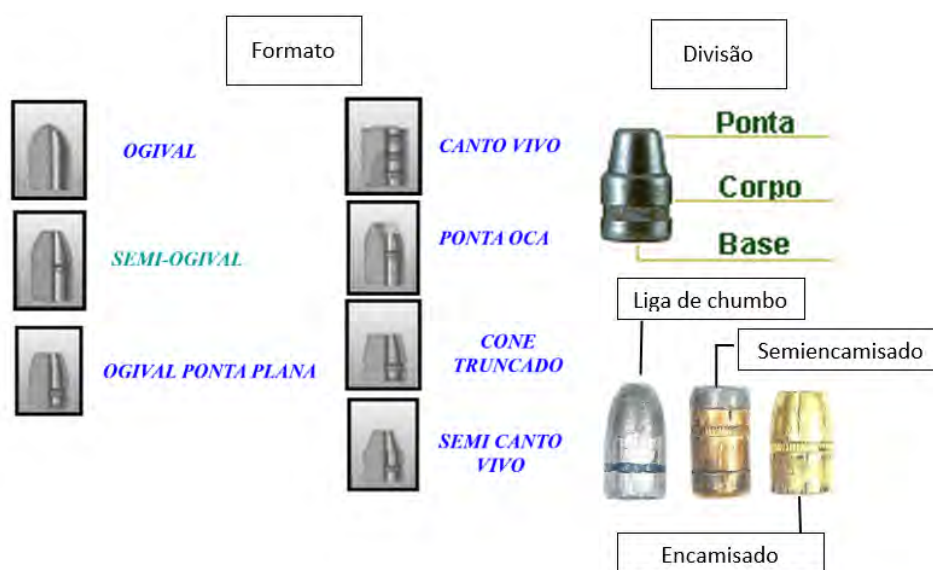


Figura 16 – Classificação e divisão projétil (HENRIQUES, 2019)

1.6 Calibre

De forma geral o termo calibre é usado para indicar o diâmetro interno do cano da arma, a ser medido de acordo com critérios específicos, mas também é empregado para designar um tipo particular de munição. Nesse caso, não traduz somente o diâmetro do projétil, mas também detalhes da interação do estojo à câmara da arma, como o seu comprimento e a forma de extração quando deflagrado. Dessa forma, a definição de calibre das armas de fogo gera uma série de confusões aos usuários e normalmente essas terminologias são empregadas erroneamente, o que pode levar a erros de interpretação

principalmente sobre a compatibilidade de determinada munição (SENASP, S.da).

De acordo com (JUDICIARIO, 2012) pode-se afirmar que existem três sistemas de medidas aplicadas aos calibres de armas em geral. Calibres especificados em centésimos de polegadas, mais utilizado nos Estados Unidos, calibres especificados em milímetros e por fim a medida inglesa denominada gauge que é empregada nas armas de alma lisa.

Para Freitas (S.d) existem também três nomenclaturas distintas para calibres, sendo que cada uma delas representa uma medida, seja internamente do cano ou do projétil. São elas: calibre real, calibre nominal e calibre do projétil. O calibre real é uma grandeza medida na boca do cano da arma e corresponde ao diâmetro interno entre os cheios diametralmente opostos. É sempre uma medida exata, dentro de escassos limites de tolerância (SENASP, S.da).

Já o calibre do projétil é uma grandeza medida na boca do cano da arma e corresponde ao diâmetro interno entre as raiais diametralmente opostas. É de extrema importância para garantir a rotação e estabilidade adequada do projétil e a vedação dos gases (FREITAS, S.d). A Figura 17 apresenta na forma visual a diferença entre os dois calibres citados.

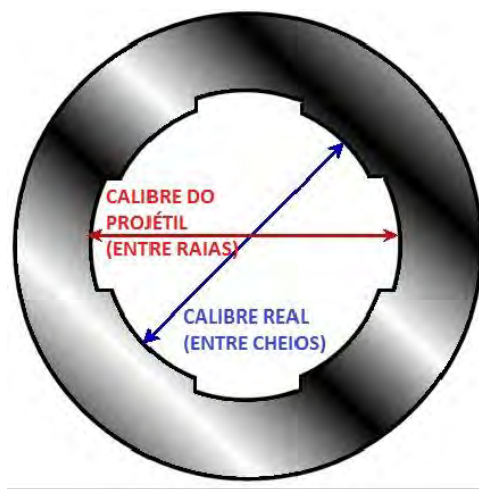


Figura 17 – Calibre real e do projétil (FREITAS, S.d)

O calibre nominal é usado para designar um tipo particular de munição e também é utilizado nas armas nas quais esse tipo de munição é empregado, por isso deve-se descrever com maior detalhamento este calibre. De forma diferente do calibre real e do projétil, este não se refere apenas ao diâmetro especificado, mas apresenta também diversos outros parâmetros como comprimento e classificação do estojo em relação ao seu formato, tipo de base e tipo de iniciação (SENASP, S.da). A Figura 18 apresenta diversos cartuchos produzidos pela CBC no Brasil e a Tabela 1 indica suas respectivas nomenclaturas e em destaque quais são considerados restritos no Brasil e só podem ser utilizados por forças policiais, militares e atiradores esportivos.

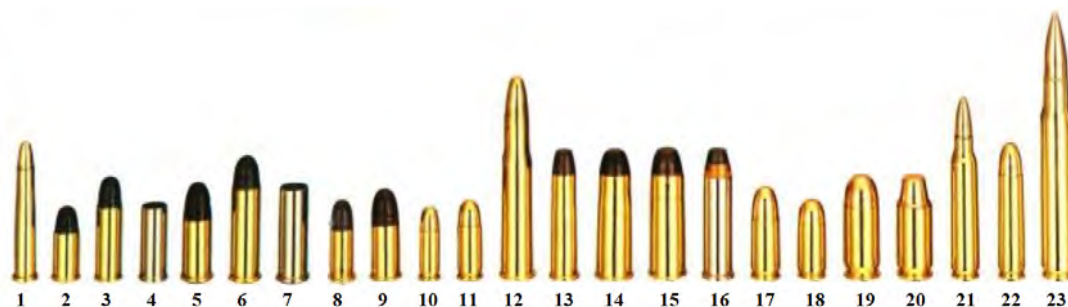


Figura 18 – Cartuchos produzidos pela CBC no Brasil (JUDICIARIO, 2012)

Tabela 1 – Calibre nominal dos cartuchos produzidos pela CBC (JUDICIARIO, 2012)

1	.22 Hornet	13	.32-20 Winchester
2	.32 S&W	14	.38-40 Winchester
3	.32 S&W Long	15	.44-40 Winchester
4	.32 S&W Long Canto Vivo	16	.357 Magnum
5	.38 S&W	17	9mm Parabellum (9x19)
6	.38 Special	18	.380 Auto (9mm Browning Short)
7	.38 Special Canto Vivo	19	.45 ACP
8	.320 Short Revolver	20	.45 ACP Match
9	.380 Short Revolver	21	5,56mm (223 NATO)
10	.25 Auto (6,35mm Browning)	22	.30 M1
11	.32 Auto (7,65mm Browning)	23	.30-06 Springfield (7,62x63)
12	.30 WCF (30-33 Winchester)		

1.7 Validação

Como foi especificado anteriormente, a validação da modelagem e dos resultados obtidos será realizada com o armamento Fz Ass 5.56 IA2. Nesta seção estará descrito um maior detalhamento sobre o fuzil e sua munição, assim como a introdução de parâmetros importantes que futuramente serão utilizados na modelagem.

1.7.1 Fuzil de Assalto 5.56 IA2

De acordo com IMBEL (2017), o Fuzil de Assalto 5.56 IMBEL IA2, Figura 19, é uma arma que funciona por aproveitamento indireto dos gases resultantes da queima da carga de projeção e utiliza como munição a 5.56x45mm. Para o aproveitamento da força de expansão existe uma tomada de gases em um ponto do cano, colocado acima da linha geral da arma para manter seu centro de gravidade na sua linha longitudinal e proporcionar maior estabilidade durante o tiro. Possui um sistema de trancamento por ferrolho rotativo que permite que o destrancamento e abertura da arma, durante o ciclo de funcionamento, só ocorra após o projétil ter ultrapassado a boca da arma.

Este fuzil possui um cano menor do que um fuzil tradicional e sua diferenciação com relação à Carabina 5.56 IA2 é a existência do regime de tiro automático. Dessa forma, possui seletor para, a partir da posição de segurança, os regimes de tiro intermitente ou tiro contínuo, sendo não recomendado ultrapassar 180 disparos sequenciais para se evitar danos no armamento e o efeito de cook-off ou auto deflagração. Além disso, pode funcionar como arma de repetição, para lançamento de granada de bocal, e possui uma coronha rebatível com intuito de redução de tamanho. A alimentação se faz através de carregadores tipo cofre com movimento de baixo para cima, com capacidade para 30 cartuchos. A Tabela 2 mostra algumas especificações sobre o armamento de acordo com seu manual.



Figura 19 – Fuzil de Assalto 5.56 IA2 (IMBEL, 2017)

Tabela 2 – Especificações do Fz Ass 5.56 IA2 (IMBEL, 2017)

Características do Fz Ass 5.56 IA2	
Munição	5.56x45mm
Peso sem carregador e acessórios	3.38Kg
Peso do carregador completo	0.63Kg (Aço) e 0.50Kg (Alumínio)
Comprimento cano	0.35 m
Velocidade de boca	780 m/s (SS109)
Energia cinética de boca	1015 J
Cadência	730 a 890 tpm
Alcance máximo	1800 m
Alcance de utilização	300 m
Funcionamento	Repetição, Semiautomático e Automático

1.7.2 Munição 5.56

O calibre 5.56x45mm que conhecemos hoje é muito diferente do calibre que foi desenvolvido originalmente. A evolução dos calibres de fuzis de assalto tende a levar um

calibre menor se comparado com um calibre convencional de fuzis. Menos propelente, com um projétil mais leve e de tamanho menor, tem-se um calibre que satisfaz o alcance estimado com uma velocidade maior e um poder de parada melhor. Dessa forma, o calibre 5.56x45mm segue esse caminho. Ele se torna mais leve, menor ainda para gerar um calibre de alta velocidade, onde é justamente nesse quesito que se aposta a sua eficácia (ANDRE, 2018). A Figura 20 representa o desenho técnico de uma munição deste calibre.

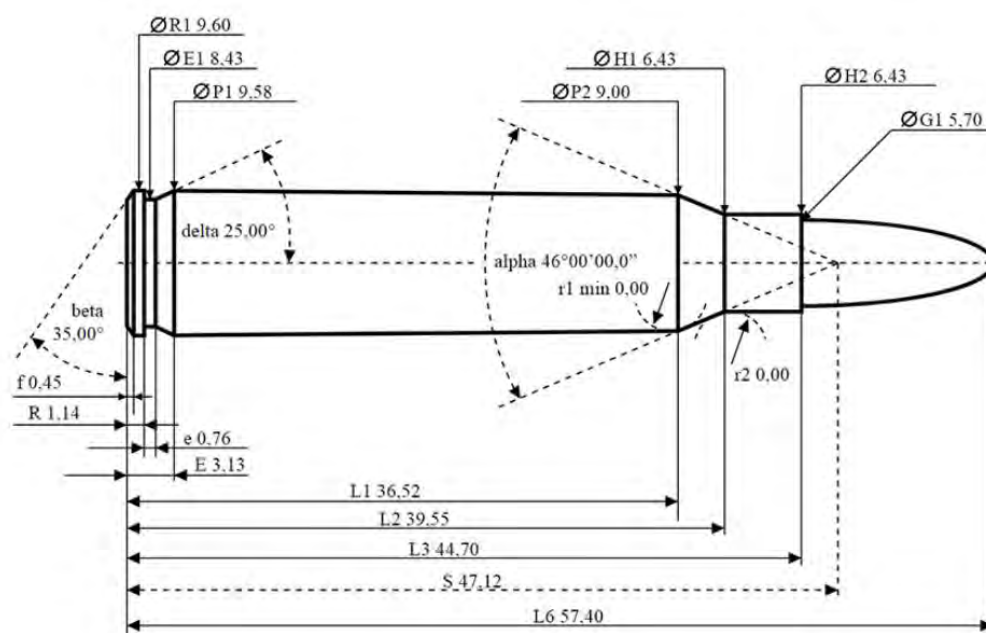


Figura 20 – Desenho técnico munição 5.56x45mm (ARMAS, 2020)

A origem do conceito de projétil de alta velocidade surgiu com o programa SCHV - Small Caliber High Velocity, algo como calibre de alta velocidade. Como forma de aprofundar esses estudos, em 1957, o CONARC - Continental Army Command coloca como requisito desse novo calibre que ele fosse .22 e tivesse um alcance efetivo de 457 metros. Na época somente duas empresas se interessaram pelo pedido do CONARC, a ArmaLite e a Winchester. Naquela época custaria muito tempo e dinheiro começar um calibre a partir do zero, então uma opção mais barata e rápida seria trabalhar com um calibre já existente. Este calibre base foi o .222 Remington com um projétil de 55 grains. Dessa forma, a ArmaLite cria o .222 Remington Special com 55 grains e a Winchester cria o .224 Winchester LMR com 53 grains (ANDRE, 2018).

O calibre .222 Remington Special se mostrou melhor que seu concorrente da Winchester. Em 1959 seu fabricante altera o nome do calibre para .223 Remington para evitar confusões. Em 1963, a Força Aérea o denomina 5.64 mm e no mesmo ano o Exército altera novamente para 5.56x45mm. Atualmente, a CBC fabrica diversas variações dessa munição com o intuito de atender diferentes objetivos para seu emprego. Na Figura 21 estão representados algumas dessas variações, sendo as mais utilizadas 5.56x45mm Comum

(Ball) - M193 e 5.56x45mm Comum (NATO Ball) - SS109. A Tabela 3 apresenta algumas especificações dos calibres produzidos pela CBC citados anteriormente, onde a velocidade de boca explicitada é considerando um cano com aproximadamente 508 mm. Todos os cartuchos possuem um comprimento de 57mm, material do estojo latão e o mesmo tipo de iniciação boxer.



Figura 21 – Variações do calibre 5.56x45mm fabricados pela CBC (ARMAS, 2020)

Tabela 3 – Especificações dos cartuchos 5.56x45mm fabricados pela CBC (ARMAS, 2020)

	M193	SS109	SAT	L110	IR Tracer
Velocidade de boca (m/s)	995	940	926	900	900
Massa do projétil (g)	3.56	4	4	3.97	3.97
Massa da munição (g)	11.5	12.1	12.7	12.4	12.4

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta uma revisão bibliográfica a respeito do tema abordado, contendo um resumo dos principais trabalhos e fontes de referência consultados para a compreensão do problema estudado.

Rezende (1996) realizou a modelagem e simulação do mecanismo da culatra de um armamento leve automático com o objetivo de analisar seus esforços reativos. Para isso, aplicou a teoria de mecanismo e trabalhou com diversas juntas que surgem ao longo do recuo do ferrolho. Como forma de validação utilizou a submetralhadora *Beretta M12*, um armamento tipo *Blowback*. Em sua modelagem, os gráficos referentes à balística interna foram dados de entrada e os resultados obtidos foram coerentes com o esperado. Isso indica a validação do método empregado de juntas ao longo do movimento das peças móveis.

Machado (2020) seguiu a mesma linha de pesquisa de Rezende (1996), porém seu principal objetivo ao invés de analisar esforços reativos foi realizar a modelagem e simulação do projétil e do recuo para analisar os gráficos cinemáticos e verificar a existência de alguma falha no armamento. Também utilizou a *Beretta M12* como forma de validação, mas não empregou na modelagem o conceito de juntas, de forma a trabalhar apenas com forças e a dinâmica de corpos rígidos. A simulação foi realizada de forma simplificada, não contemplando a ejeção e nem o carregamento de uma nova munição. Os resultados obtidos para o ferrolho e projétil foram coerentes, indicando a possibilidade de emprego de um método utilizando apenas forças para esse tipo de modelagem.

Costa, Araujo e Reis (2018) fizeram a análise do fenômeno de vibração do tubo de um armamento pesado durante o tiro, por meio da simulação computacional de um disparo de munição APFSDS - *Armour Piercing Fin Stablised Discarding Sabot*, de alta energia cinética. Realizou a modelagem apenas para o projétil, com três graus de liberdade e dessa forma fez-se necessário a utilização do conceito de força de contato. O tubo e o projétil foram modelados como corpos independentes, e nos pontos de contato entre eles surgiam essas forças de contato para não ocorrer a sobreposição de dois corpos. Os resultados obtidos foram satisfatórios, indicando a validade na utilização de forças de contato na modelagem.

Rodrigues e Weber (2017) realizaram um estudo sobre o emprego de metamateriais na mitigação de esforços impulsivos ocorridos em disparos de um armamento. Destaca-se seu amplo estudo sobre impacto entre dois corpos, como os modelos de Hertz, LSD, Hunt-Crossley e Kuwabara-Kono. Tais modelos são particularmente aplicáveis no estudo da colisão entre as peças móveis durante o recuo de um armamento.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, discorre-se sobre as principais teorias relacionadas à modelagem do tema apresentado. Na Seção 3.1, apresenta-se uma breve explanação a respeito da segunda lei de Newton e da lei de Euler que será utilizada na obtenção das equações de movimento dos sistemas. Na Seção 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5, apresenta-se a parte teórica relativa ao estudo das cargas axiais, momento de inércia, forças de contato e vasos cilíndricos respectivamente. O estudo sobre balística interna do projétil e o mecanismo da culatra, assim como a identificação de suas respectivas forças é desenvolvido nas Seções 3.6 e 3.7.

3.1 Leis de Newton e Euler

As leis de Newton são um conjunto de três leis que relacionam as forças exercidas sobre um corpo com o seu movimento, sendo suficientes para descrever completamente e de forma determinista a dinâmica de qualquer sistema clássico (ROSA, 2009). Para o presente trabalho, o foco será mais na aplicação da segunda lei, a lei fundamental da dinâmica. Na Equação 3.1, F_i são as forças externas, p o momento linear, v a velocidade, m a massa do corpo a ser modelado e t o tempo.

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = \frac{d\vec{p}}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{dm}{dt} \vec{v} \quad (3.1)$$

Para armamentos leves, a massa das peças móveis se mantém constante ao longo de seu movimento, ou seja, a derivada da massa ao longo do tempo $\frac{dm}{dt}$ é nula. Dessa forma, a Equação 3.1 pode ser simplificada para a Equação 3.2, onde a é a aceleração do corpo.

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a} \quad (3.2)$$

Como a proposta do trabalho é utilizar a modelagem plana com três graus de liberdade, será necessário além das equações de movimento em X e Y uma equação para rotação ao longo do eixo Z. Através da lei de Euler, é possível estender esse conceito para rotações, substituindo as forças externas F_i por torques externos τ_i , a aceleração a por aceleração angular α e a massa m por momento de inércia I e assim obter a Equação 3.3, tendo como hipóteses simplificadora a massa constante e velocidades angulares em outros eixos nulas.

$$\sum_{i=1}^N \vec{\tau}_i = I\vec{\alpha} \quad (3.3)$$

3.2 Momento de inércia de massa

Assim como um corpo massivo apresenta sua tendência de permanecer em seu estado inicial de movimento com uma velocidade constante, também existe uma resistência à mudança no movimento rotacional. O momento de inércia é uma grandeza física que estima essa dificuldade de alterar o estado de movimento de um corpo em rotação e consequentemente sua velocidade angular (SANTOS, 2001).

Essa grandeza depende principalmente da massa m e da geometria do corpo. Não será o foco do trabalho deduzir as fórmulas para cada situação. Dessa forma, serão listadas a seguir na Figura 22 as principais geometrias e seus respectivos momentos de inércia que serão utilizados posteriormente.

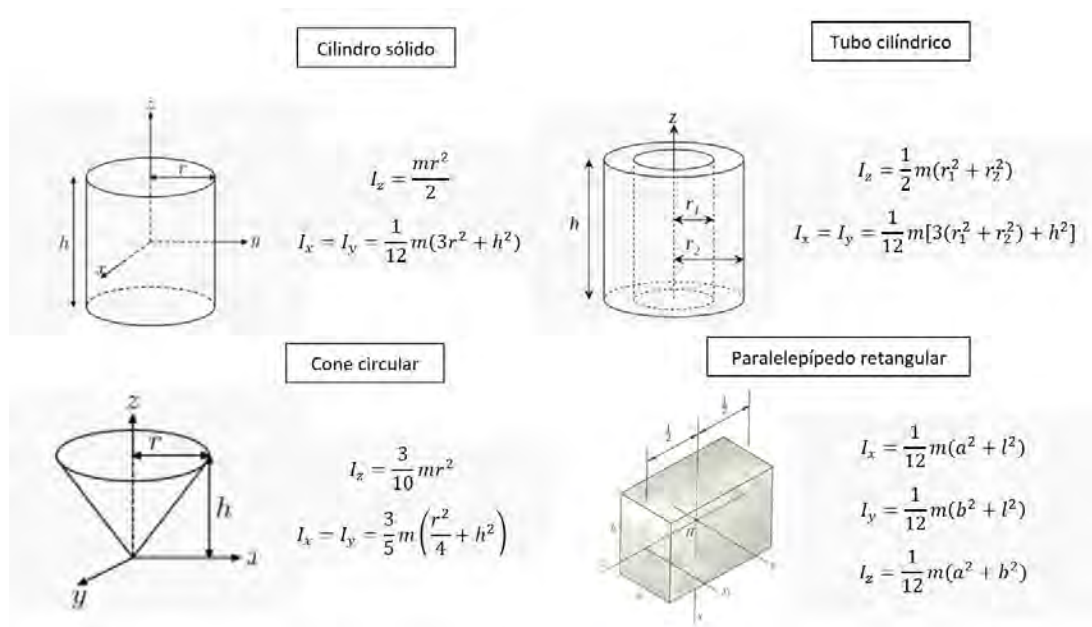


Figura 22 – Lista momentos de inércia de massa (SANTOS, 2001)

Muitas vezes têm-se informações sobre os momentos e produtos de inércia do corpo em relação a um determinado ponto, geralmente o centro de massa, e deseja-se obter os mesmos em relação a um outro ponto, distante em relação ao centro de massa de D_x na direção X, D_y na direção Y e D_z na direção Z (SANTOS, 2001). Utiliza-se então para o cálculo do novo momento de inércia o Teorema dos Eixos Paralelos ou Teorema de Steiner, Equação 3.4.

$$I_{x'} = I_x + m(D_y^2 + D_z^2) \tag{3.4a}$$

$$I_{y'} = I_y + m(D_x^2 + D_z^2) \tag{3.4b}$$

$$I_{z'} = I_z + m(D_x^2 + D_y^2) \tag{3.4c}$$

3.3 Carga axial

Segundo Hibbeler (2010) o princípio de Saint-Venant afirma que os efeitos localizados causados por qualquer carga que age sobre um corpo serão dissipados ou atenuados em regiões suficientemente afastadas do ponto de aplicação da carga. Além disso, a distribuição de tensão resultante nessas regiões será a mesma que a causada por qualquer outra carga estaticamente equivalente aplicada ao corpo dentro da mesma área localizada.

Como exemplo do que foi comentado no parágrafo anterior, observe a Figura 23. A barra está presa a um apoio em uma de suas extremidades, e a força é aplicada em um furo na outra extremidade. Devido ao carregamento, a barra deforma-se como indicam as distorções das linhas de grade desenhada sobre a barra. O efeito de deformação localizada tende a diminuir conforme as medições são feitas cada vez mais distante das extremidades, de forma a se nivelarem e se tornarem uniformes ao longo da seção (HIBBELER, 2010).

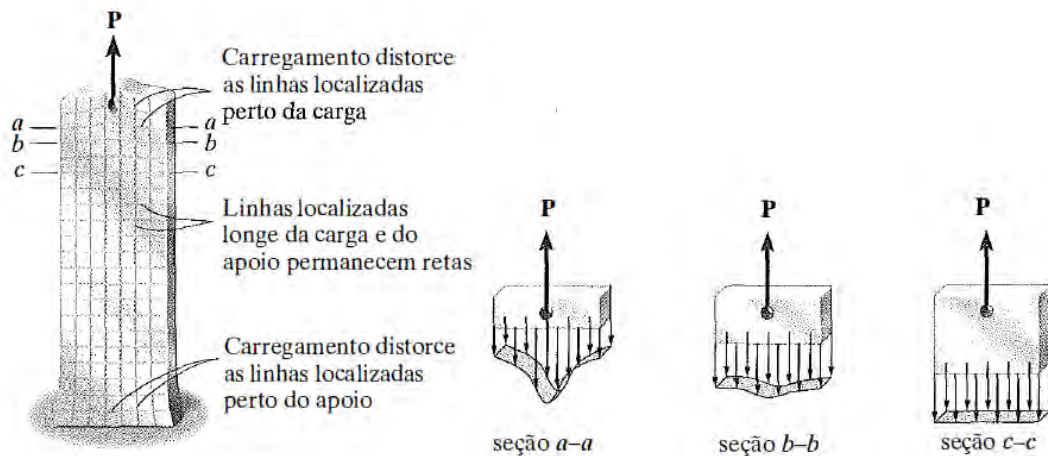


Figura 23 – Deformação ao longo das seções para carregamento axial (HIBBELER, 2010)

A deformação elástica de um elemento submetido a carga axial pode ser expressa pela Equação 3.5, em que δ é o deslocamento relativo de uma das extremidades da barra em relação à outra, P a força axial interna resultante, dx um elemento diferencial de comprimento, A a área da seção transversal e E o módulo de elasticidade.

$$\delta = \int_0^L \frac{P(x)dx}{A(x)E(x)} \quad (3.5)$$

Para um material homogêneo, módulo de elasticidade E constante, com área transversal A e força interna P constante ao longo da barra, a Equação 3.5 pode ser simplificada para a Equação 3.6.

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad (3.6)$$

A Equação 3.6 é equivalente ao deslocamento de uma mola, onde a força é diretamente proporcional ao deslocamento. Dessa forma, o elemento estrutural pode ser substituído por uma mola ideal correspondente com uma constante de rigidez $k_{corresp}$. Essa substituição, assim como a fórmula para essa constante de rigidez podem ser visualizadas na Figura 24.

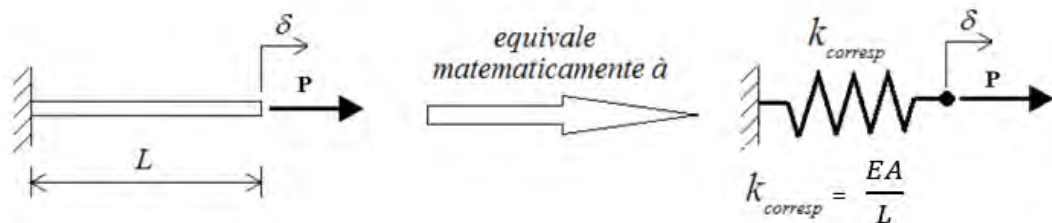


Figura 24 – Equivalência matemática entre estrutura e mola correspondente (GRUZMAN, 2020)

O armamento como um todo é composto por diversas estruturas, e o foco do trabalho é realizar a modelagem baseado em forças de contato e impactos entre os corpos que se movem livremente, como já foi mencionado na Introdução. Dessa forma, essa teoria de utilizar molas com constantes de rigidez correspondentes para substituir estruturas nos pontos de contato será amplamente utilizada. Cabe ressaltar que essas fórmulas possuem limitações, tendo em vista que para serem deduzidas foram consideradas algumas hipóteses simplificadoras. Uma vez que a lei de Hooke é usada no desenvolvimento da Equação 3.5, é importante que as cargas não provoquem escoamento do material e conseqüentemente que o material se comporte de maneira linear elástica.

3.4 Forças de Contato

O fenômeno do impacto surge quando dois corpos colidem entre si, com referência em uma linha de impacto normal à superfície de contato dos corpos, e compreende duas fases principais: a compressão e a restituição. Os efeitos observados podem variar dependendo da geometria dos corpos envolvidos, material e velocidade. Dentre as características de tal fenômeno estão a curta duração, valores elevados de forças, rápida dissipação de energia e presença de grandes acelerações e desacelerações (RODRIGUES; WEBER, 2017).

Como mencionado na seção anterior, pode-se utilizar como simplificação e aproximação para o fenômeno de impacto, a força elástica da mola, a qual é descrita por meio da Lei de Hooke, Equação 3.7. Em que F_c é a força de contato e k_c a rigidez correspondente.

$$F_c = k_c \delta \quad (3.7)$$

Esse conceito pode ser estendido de forma a considerar o amortecimento da estrutura. Com isso, a Equação 3.8 se refere à força de contato para um sistema mola-amortecedor, em que c_c é o amortecimento correspondente.

$$F_c = k_c\delta + c_c\dot{\delta} \quad (3.8)$$

De acordo com o modelo Hertz para colisão, uma das primeiras abordagens matemáticas a surgirem nesse campo, a força repulsiva resultante entre dois corpos perfeitamente elásticos é dada pela Equação 3.9

$$F_c = k_c\delta^{1.5} \quad (3.9)$$

Já o modelo *LSD* - *Linear Spring and Dashpot*, mola e amortecedor linear, leva em consideração a taxa de deformação. Sua expressão matemática é semelhante à Equação 3.8. O modelo proposto por Kuwabara e Kono consiste em uma variante dos modelos de Hertz e *LSD*, sendo uma combinação entre esses modelos e cuja formulação matemática é dada pela Equação 3.10. Em que γ_c é uma constante que pode ser calculada a partir das características geométricas dos corpos em contato.

$$F_c = k_c\delta^{1.5} + \gamma_c\delta^{0.5}\dot{\delta} \quad (3.10)$$

Para superar as limitações do modelo *LSD* e manter as vantagens do modelo Hertz, Hunt e Crossley introduziram um modelo alternativo para dissipação de energia que inclui um termo de amortecimento não linear, representado pela Equação 3.11, em que n_c é uma constante de impacto.

$$F_c = k_c\delta^{n_c}\left(1 + \frac{c_c}{k_c}\dot{\delta}\right) \quad (3.11)$$

No presente trabalho, o modelo utilizado dependerá dos resultados apresentados. Como a modelagem de uma forma geral é inovadora e complexa, a princípio será utilizado o modelo de Hertz pela sua simplicidade. Porém, caso ocorra uma vibração excessiva das peças móveis, será utilizado um modelo que engloba o amortecimento como o Hunt e Crossley.

3.5 Vasos Cilíndricos

De acordo com Junior (2019) o estudo de vasos cilíndricos pode ser dividido em duas classificações: vasos de paredes finas e cilindros de paredes grossas. Os vasos de paredes finas é um caso particular de cilindros de paredes grossas, onde a razão entre o

raio interno r e a espessura t do vaso é maior que 10. Dessa forma, como simplificação as tensões nas direções longitudinal σ_z , circunferencial σ_θ e radial σ_r são consideradas constantes e funções da pressão interna p . Além disso, como hipótese é considerado a pressão externa, geralmente a atmosférica, desprezível quando comparada à interna. As tensões para o caso de vasos de paredes finas podem ser expressas pela Equação 3.12.

$$\sigma_z = \frac{pr}{2t} \quad \sigma_\theta = \frac{pr}{t} \quad \sigma_r = p \quad (3.12)$$

Esse teoria tem uma clara aplicação quando se trata de estojos de munições. Como a pressão desenvolvida pelos gases propelentes com a queima da carga de projeção é elevada e a razão r/t é maior que 10, a Equação 3.12 pode ser utilizada. Para o presente trabalho, é interessante encontrar o valor da pressão interna que fará com que o estojo se expanda o suficiente para que sua parede externa encontre a parede interna da câmara e dessa forma ocorra a obturação. Para isso, pode-se utilizar a Equação 3.13, que indica a deformação circunferencial em função das tensões, do módulo de Elasticidade e do coeficiente de poisson ν .

$$\epsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} - \nu \frac{\sigma_r}{E} \quad (3.13)$$

Essa deformação circunferencial, também pode ser expressa pela Equação 3.14, que relaciona a deformação com o alongamento do raio do cilindro δ .

$$\epsilon_\theta = \frac{2\pi(r + \delta) - 2\pi r}{2\pi r} = \frac{\delta}{r} \quad (3.14)$$

Após substituir as Equações 3.14 e 3.12 em 3.13, é possível obter a relação direta da dilatação do raio com a pressão, expressa pela Equação 3.15.

$$\delta = \frac{pr}{2tE}(2r - \nu r - 2\nu t) \quad (3.15)$$

Após a pressão ser grande o suficiente para fazer com que o estojo se expanda e encontre a parede da câmara, não se pode utilizar mais a teoria de vasos de paredes finas. Devido ao fato de que a câmara possui uma espessura considerável, sendo assim um cilindro de parede grossa. A principal diferença desse caso mais geral é que as tensões não são consideradas constantes. Para o cálculo da força de obturação que será realizado posteriormente, será necessário primeiramente o cálculo da pressão na interface estojo câmara P_i . De acordo com Junior (2019), a fórmula que indica a compatibilidade na montagem entre dois dispositivos por interferência pode ser expressa pela Equação 3.16, em que os parâmetro geométricos podem ser visualizados na Figura 25.

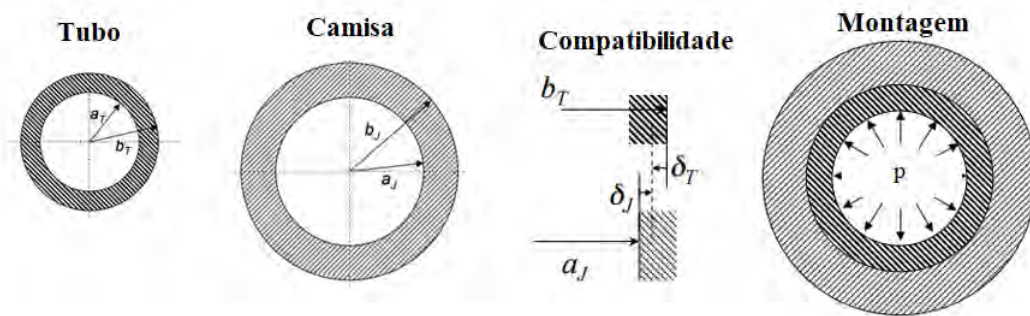


Figura 25 – Parâmetros geométricos na montagem de tubos (JUNIOR, 2019)

$$a_J + \delta_J = b_T - \delta_T \quad (3.16)$$

Através da teoria de cilindros de paredes grossas é possível obter valores numéricos para δ_J e δ_T de acordo com o material dos cilindros, a pressão interna e a pressão de interface. Como foi dito anteriormente, esse conceito começará a ser utilizado no momento exato em que ocorrer a obturação. Dessa forma uma boa aproximação é considerar que a_J é igual à b_T . A expressão final que relaciona a pressão interna com a de interface pode ser vista na Equação 3.17.

$$\frac{P_i a_J}{E_J (b_J^2 - a_J^2)} [(1 - \nu_J) a_J^2 + (1 + \nu_J) b_J^2] = \frac{2 a_T^2 b_T p}{E_T (b_T^2 - a_T^2)} - \frac{P_i b_T}{E_T (b_T^2 - a_T^2)} [(1 - \nu_T) b_T^2 + (1 + \nu_T) a_T^2] \quad (3.17)$$

A expressão anterior fornece uma relação direta entre ambas as pressões, o que indica que são proporcionais. Além disso, novamente foi utilizada a hipótese de que a pressão externa, geralmente a atmosférica, é desprezível quando comparada tanto com a pressão interna quanto com a de interface. Para o presente trabalho, o subíndice T irá se referir ao estojo e o subíndice J à câmara.

3.6 Balística

De acordo com Freitas (S.d), a balística é a ciência que estuda o movimento dos projéteis, especialmente das armas de fogo, seu comportamento no interior destas e também no seu exterior, como trajetória, voo e impacto. Subdivide-se em quatro principais fases: balística interna, intermediária, externa e terminal, como pode ser visualizado na Figura 26. A única fase que interessa para o presente trabalho, pois possui relação direta de como se dará o comportamento da pressão dos gases no interior do armamento, é a balística interna.



Figura 26 – Fases da balística (FREITAS, S.d)

A balística interna é o estudo dos processos, mecanismos e ações que ocorrem internamente no armamento. Se inicia quando o mecanismo de disparo é liberado pela ação do operador e este não mais tem influência sobre sua ação e resultados, até a perda de contato do projétil com o cano. Ela pode ser subdividida em três tempos distintos: tempo de bloqueio, equivalente ao acionamento do gatilho e percussão, tempo de ignição, até o projétil começar seu movimento dentro do cano e tempo de cano, até sua saída pela boca do cano (FREITAS, S.d).

Para Moss, Leeming e Farrar (1996) o armamento leve pode ser visto como um dispositivo mecânico no qual o calor liberado por um propelente é convertido em energia cinética útil para um projétil. A balística interna é o estudo científico dos processos operacionais dentro da arma a partir do momento que a queima do propulsor é iniciada. Visa à análise da interação da arma, projétil e carga propelente antes da saída do projétil pela boca do armamento. Inclui os seguintes aspectos: o processo de ignição do propelente, bem como sua queima no interior da câmara, a pressurização da câmara, o movimento inicial do projétil, o engrazamento do projétil nas raia, a obturação no tubo e na câmara e a dinâmica do projétil e do tubo.

As diferenças principais entre os projetos internos de armas são geralmente diferenças no tamanho e na forma dos componentes balísticos, Figura 27. Assim, mesmo conhecendo a arma e a munição a ser utilizada, pode-se obter resultados variados devido a mudança de alguns parâmetros. As propriedades do propelente e as forças atuantes no projétil são de extrema importância na modelagem do movimento do projétil ao longo do cano. Como o presente trabalho visa estudar o comportamento das partes recuantes, não será realizada a modelagem para o projétil, e assim será necessário outra forma para obtenção das curvas de pressão, que serão descritas na próxima seção.

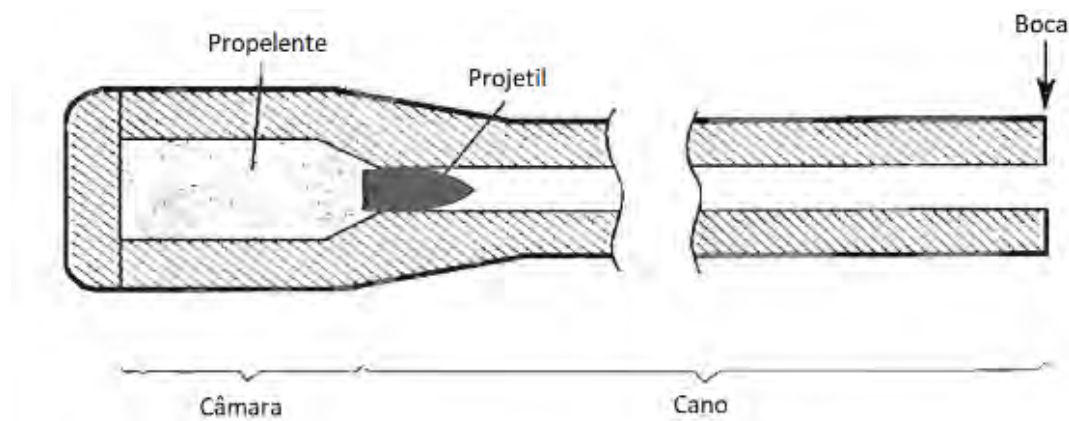


Figura 27 – Componentes da balística interna (MOSS; LEEMING; FARRAR, 1996)

3.6.1 Sequência de disparo

A sequência de disparo, Figura 28, é iniciada quando ocorre a ignição da cápsula de deflagração, liberando gases quentes e partículas incandescentes para dentro do propelente e gerando energia necessária para iniciar a queima do mesmo. A princípio, o estojo está selado pelo próprio projétil, não deixando os gases gerados escaparem. Isso faz com que a pressão dos gases, a temperatura e a taxa de queima do propelente aumentem rapidamente.

Após a pressão atingir um valor determinado, o projétil começa seu movimento. Com o percurso do projétil dentro do tubo, a pressão começa a se moderar, pois os gases acabam ocupando um volume maior entre a base do projétil e o estojo. Como ainda está ocorrendo queima, no início do movimento o aumento da massa do gás é mais rápido que o aumento de volume disponível para o mesmo, de forma que a pressão permanece aumentando. Aproximadamente em um décimo do comprimento do cano, a aceleração do projétil já é relativamente grande e o aumento do volume para ocupação do gás compensa o aumento de sua massa, o que faz a curva de pressão ter seu pico e posteriormente começar a decair.

O próximo estágio é a queima completa do propelente, ainda existindo uma pressão considerável para acelerar o projétil no restante do trajeto. Quando o projétil chega na boca do cano, os gases se expandem e a pressão cai junto com a aceleração, pois são proporcionais. Nesse momento a pressão chega a aproximadamente um sexto da pressão máxima (MOSS; LEEMING; FARRAR, 1996).

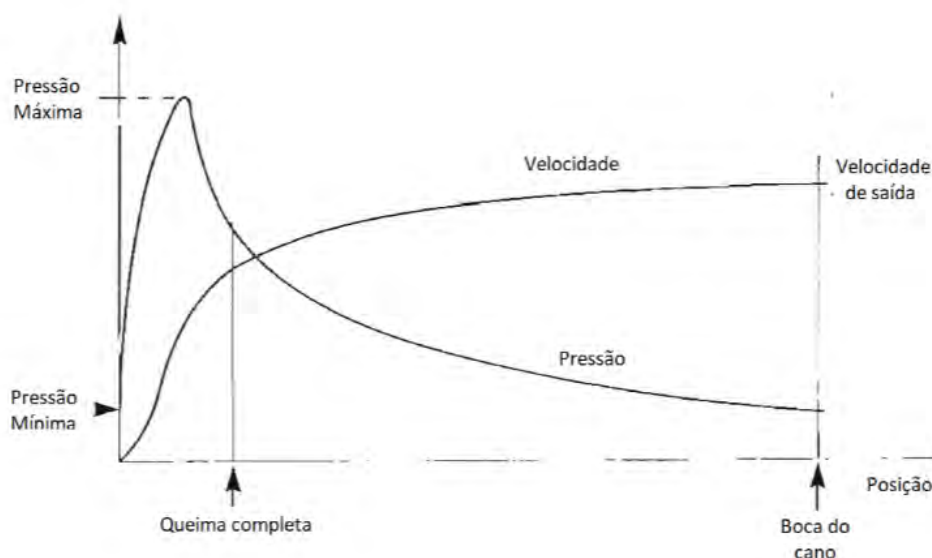


Figura 28 – Gráfico pressão e velocidade em função da posição do projétil (MOSS; LEE-MING; FARRAR, 1996)

3.6.2 PRODAS

Projectile Rocket Ordnance Design and Analysis Software, também conhecido como PRODAS, é um software criado pela empresa *Arrow Tech Associates* e que possui uma coleção integrada de análises em um ambiente projetado para acelerar o processo de design de munições. Suas capacidades incluem: modelagem geométrica, propriedades de massa, previsão aerodinâmica, desenvolvimento de protótipo, tabelas de tiro, balística interna e balística terminal. O próprio software possui uma base de dados com diversas munições distintas, incluindo a munição 5.56mm que será utilizada na validação do código. Dessa forma, a partir dele será possível obter as curvas relativas a balística interna, principalmente as curvas de pressão, que irão influenciar diretamente no movimento das partes recuantes. A Tabela 4 mostra algumas especificações da munição e do armamento do banco de dados e a Figura 29 as curvas da balística interna relativa a esta munição.

Tabela 4 – Especificações munição e armamento (PRODAS)

Cartucho - 5.56mm US M193 Ball Bullet	
Formato grão do propelente	Esférico
Diâmetro do grão	0.287 mm
Massa projétil	3.6396 g
Deslocamento projétil	482.6 mm
Calibre real	5.5626 mm
Velocidade de boca	991.29 m/s
Fração de propelente queimada	0.92
Tempo até saída do projétil do cano	0.927 ms

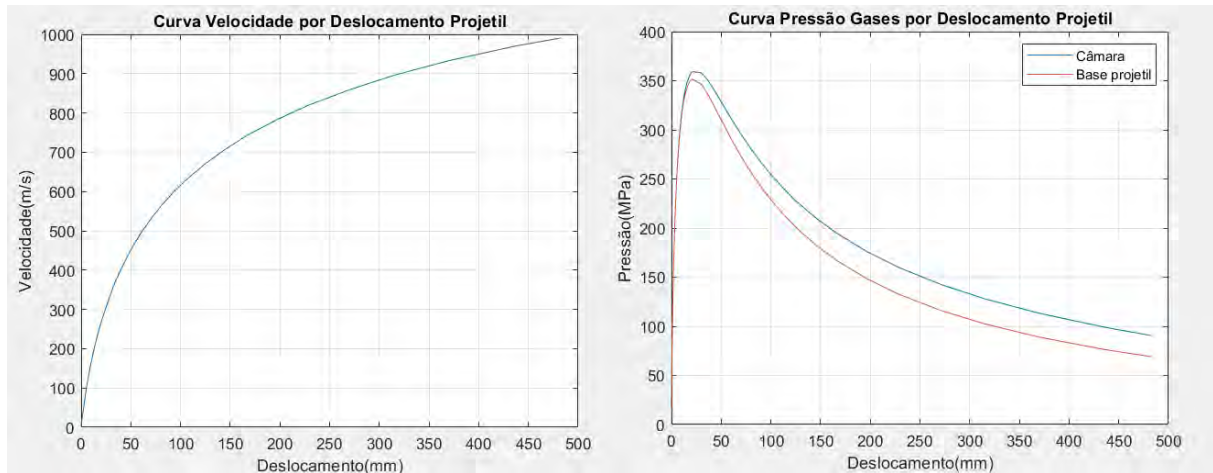


Figura 29 – Curvas balísticas relativas à munição 5.56mm M193 (PRODAS)

É possível tirar algumas conclusões a respeito da Tabela 4 e da Figura 29 apresentadas. A primeira é que as curvas de pressão e velocidade por deslocamento são coerentes com as expressas na Figura 28, indicando a validade da utilização do software *PRODAS*. Outra observação importante é a existência de um gradiente de pressão entre o interior da câmara, onde a pólvora está sendo queimada, e a base do projétil. Esse gradiente pode ser justificado através da perda de carga e será importante para cálculos futuros. Por fim, é válido comparar os dados obtidos do *PRODAS* com a Tabela 3. Esta tabela indica para a munição *M193* uma velocidade de boca de 995 m/s para um cano de 508 mm de comprimento e uma massa de projétil de 3.56 g. Já a Tabela 4 indica uma velocidade de boca de 991.29 m/s para um cano de 482.6 mm e uma massa de projétil de 3.64 g. Os valores expressos são bem semelhantes, o que mostra novamente a validade na utilização do software.

Porém, do modo que o *PRODAS* expressa seus resultados não seria possível aplicar diretamente no presente trabalho por dois motivos. O primeiro deles é o fato de o *PRODAS* claramente utilizar um armamento diferente do *Fz Ass 5.56 IA2*. Isso pode ser notado a partir do deslocamento do projétil utilizado de 482.6 mm, enquanto que o fuzil que será utilizado na modelagem, de acordo com a Tabela 2, possui um cano de 350 mm. O segundo é que o software não calcula o comportamento dos gases, e conseqüentemente da pressão, após a saída do projétil pela boca do cano. De acordo com AMCP (1970), o decaimento da pressão após a saída do projétil tem forma exponencial e alcança a pressão atmosférica P_a em um tempo 2.5 vezes maior que o tempo até a saída do projétil t_0 .

A Equação 3.18 representa esse decaimento, onde os e_i são constantes de ajuste da exponencial que podem ser obtidos com a substituição dos valores numéricos, P_c e P_b são

as pressões na câmara e na base do projétil respectivamente.

$$P_c = e_1 e^{-e_2 t} \quad P_b = e_3 e^{-e_4 t} \quad (3.18)$$

Com a resolução do sistema e obtenção das constantes de ajuste, a Equação 3.18 após a substituição das variáveis pode ser expressa pela Equação 3.19

$$P_c = 1.558 \cdot 10^4 e^{-6.464t} \quad P_b = 1.0699 \cdot 10^4 e^{-6.25t} \quad (3.19)$$

Após realizar todos as modificações necessárias nos dados obtidos do *PRODAS* para adaptá-los ao armamento que será utilizado na modelagem, pode-se gerar uma nova tabela e um novo gráfico com as principais informações. O gráfico representado pela Figura 30 será utilizado para obtenção das forças devido à pressão dos gases que irão atuar nas partes móveis. Observe que a velocidade de boca indicada pela Tabela 5 de 888 m/s é relativamente superior à esperada pela Tabela 2 do manual do armamento de 780 m/s. Isso pode ser justificado pelo fato de que a velocidade expressa no manual ser com a munição *SS109*, cujo projétil possui uma massa maior e conseqüente sofrerá uma aceleração menor dos gases.

Tabela 5 – Especificações adaptadas para munição e armamento (Autoria Própria)

Cartucho - 5.56mm US M193 Ball Bullet	
Comprimento cano	350 mm
Velocidade de boca	888 m/s
Fração de propelente queimada	0.806
Tempo até saída do projétil do cano	0.739 ms
Tempo de atuação da pressão dos gases	1.84765 ms

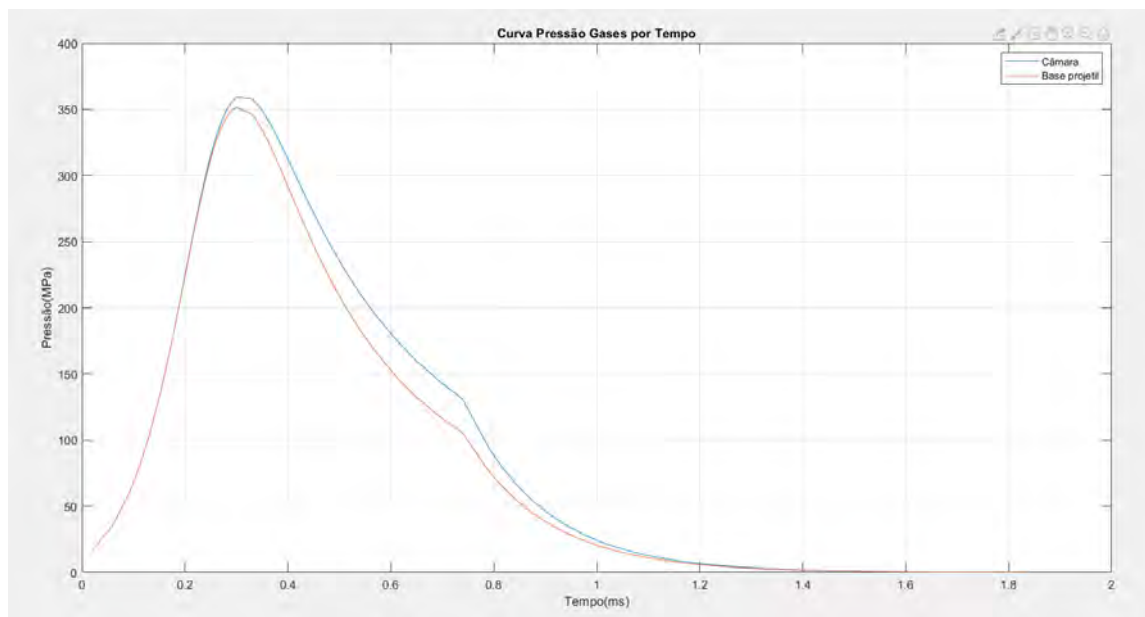


Figura 30 – Curvas balísticas adaptadas (Autoria Própria)

É importante levar em consideração que a curva característica da pressão para o *Fz Ass IA2* não é a mesma obtida e expressa pela Figura 29 principalmente pela diferença no raçamento, material e revestimento da superfície interna do cano. Porém a correção feita a partir do gráfico do *PRODAS* é válida pois a variação devido à esses fatores é desprezível, tendo em vista que apenas 3% da energia liberada pelo propelente é distribuída para as perdas de fricção entre projétil e cano (MOSS; LEEMING; FARRAR, 1996).

3.7 Mecanismo da Culatra

Para entender melhor todas as forças que irão atuar nas partes móveis e nos corpos rígidos que serão modelados, é necessário estudar com maior detalhamento todas as operações que ocorrerão no *Fz Ass 5.56 IA2* após a realização do disparo. Como já foi comentado anteriormente, o princípio de funcionamento deste armamento é a ação dos gases propelentes do tipo *Gas Operated* ou tomada de gás. Como a munição utilizada é encartuchada, não há aparelho de obturação pois o próprio estojo ao se expandir exerce essa função.

3.7.1 Fases do Funcionamento

As fases do funcionamento se processam conforme a sequência dada a seguir, partindo da situação inicial: arma alimentada, carregada, destravada e então é efetuado o disparo. Todas as informações desta subseção foram referenciadas a partir de IMBEL (2017).

3.7.1.1 Ação dos Gases

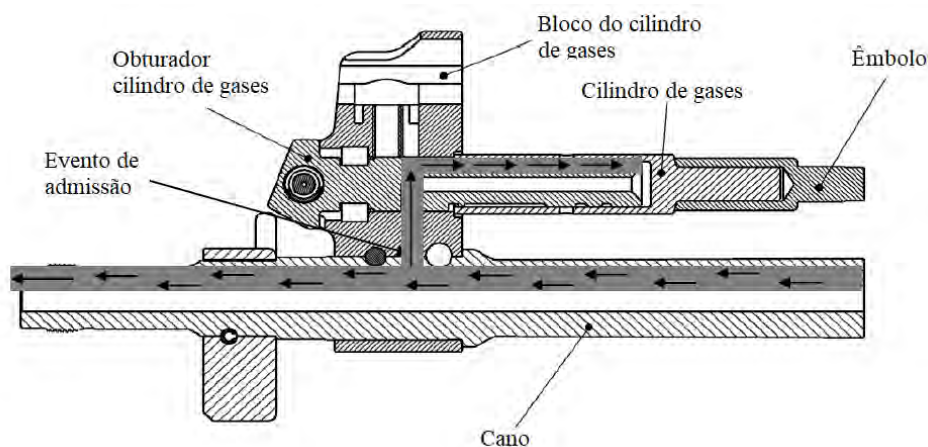


Figura 31 – Sistema de tomada de gases (IMBEL, 2017)

De acordo com a Figura 31, o projétil percorre o cano e ultrapassa o evento de admissão. Parte dos gases provenientes da queima da pólvora atravessam este evento e atingem o obturador do cilindro de gases montado no bloco do cilindro de gases. O obturador pode assumir duas posições distintas, identificadas pelas letras "A" e "G", gravadas na cabeça da peça. O posicionamento é feito por ação em seu retém, com os dedos ou, em caso de aquecimento ou acúmulo de pólvora, com um cartucho ou ferramenta auxiliar.

Caso o obturador esteja fechado, cabeça do obturador para baixo - Posição "G", os gases não penetram no cilindro de gases e a arma funciona como de repetição. Com o obturador aberto, cabeça do obturador para cima - Posição "A", os gases passam através do evento de admissão e se expandem no interior da câmara do cilindro de gases. Sob a ação dos gases, o cilindro de gases recua empurrando consigo o êmbolo que, por sua vez, irá empurrar o impulsor do ferrolho para trás destrancando e abrindo a arma. A mola do êmbolo, que foi comprimida durante o recuo, se distende, retornando as peças do sistema de gases à sua posição inicial.

3.7.1.2 Destrancamento e Abertura

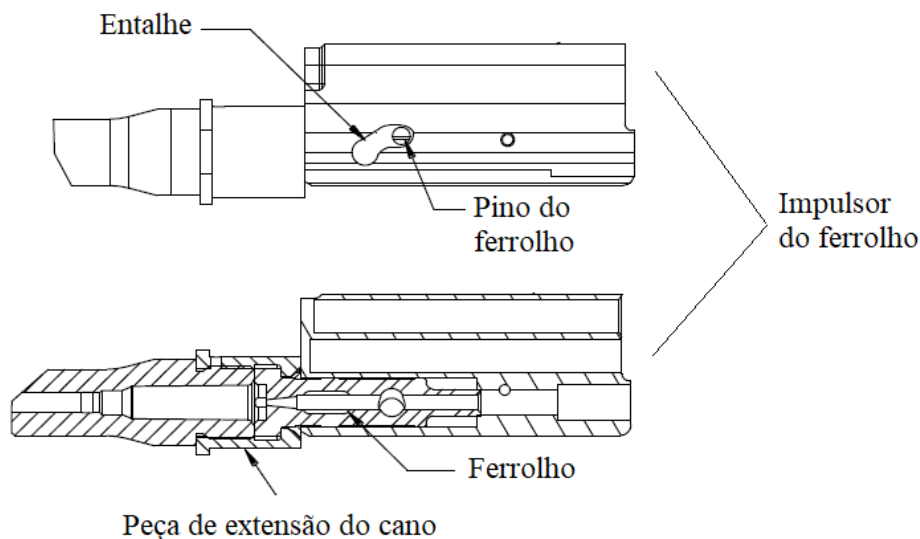


Figura 32 – Sistema de trancamento por ferrolho rotativo (IMBEL, 2017)

De acordo com a Figura 32, ao recuar, impulsionado pelo êmbolo, o impulsor do ferrolho faz com que o pino do ferrolho deslize ao longo do entalhe em forma de came existente no impulsor, fazendo o ferrolho girar. Ao girar, os dentes do ferrolho perdem contato com os dentes da peça de extensão do cano, configurando o destrancamento e permitindo que o ferrolho passe a recuar junto com o impulsor, dando-se assim a abertura. Durante o recuo, as molas recuperadoras são comprimidas.

3.7.1.3 Extração e Ejeção

Simultaneamente ao recuo do conjunto ferrolho-impulsor do ferrolho, o estojo do cartucho deflagrado é extraído da câmara empolgado pela garra do extrator que o mantém preso ao ferrolho. Ao perder o contato com as paredes da câmara, o estojo tende a girar para cima e para direita, impulsionado pela ação da mola do ejetor. Ao atingir a altura da janela de ejeção, o estojo fica livre para girar para fora da arma dando-se assim a ejeção. Tanto o ejetor quanto o extrator fazem parte do ferrolho, e ambos componentes podem ser melhor visualizados na Figura 33.

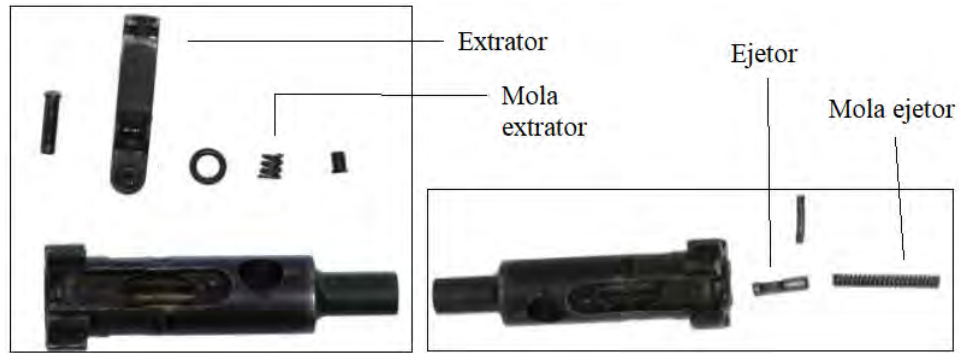


Figura 33 – Extrator e ejetor desmontados respectivamente (IMBEL, 2017)

3.7.1.4 Apresentação e Carregamento

No final do recuo do conjunto ferrolho-impulsor do ferrolho, os cartuchos existentes no carregador, sob ação da mola do transportador, sobem e o cartucho superior apresenta seu culote de maneira a ser empurrado para frente pelo ferrolho, quando o conjunto avançar por ação das molas recuperadoras. Ao avançar, o ferrolho encontra no seu caminho o culote do cartucho apresentado, levando-o consigo para frente liberando-o das abas do carregador e sendo guiado pelas rampas de carregamento para o interior da câmara. O extrator, obrigado pelo movimento do ferrolho, ergue-se e empolga a virola do estojo que é introduzido completamente câmara, dando-se assim o carregamento. A Figura 34 mostra o carregador desmontado, e caso este esteja vazio, o transportador atuará no retém do do ferrolho, mantendo a arma aberta.

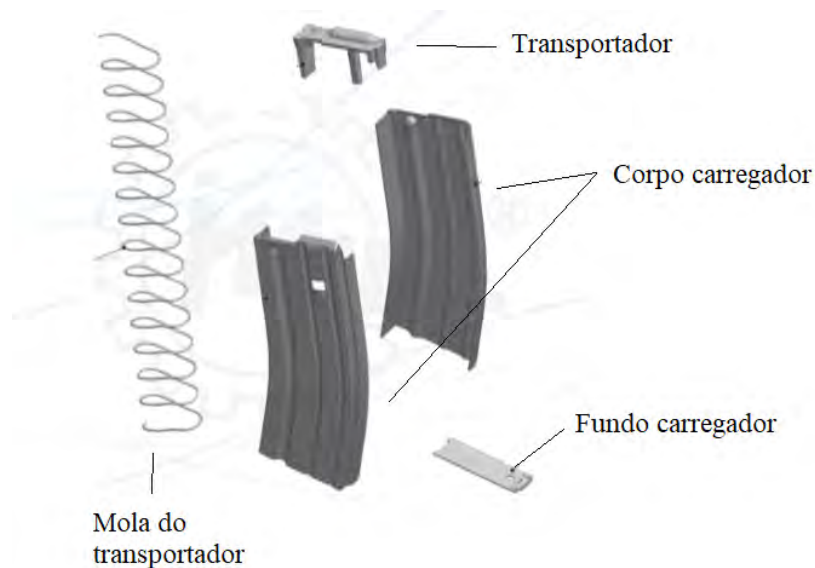


Figura 34 – Carregador desmontado (IMBEL, 2017)

3.7.1.5 Fechamento e Trancamento

No instante que o ferrolho não pode mais avançar completa-se o fechamento. O movimento final do impulsor do ferrolho obriga o ferrolho a girar sob ação do pino do came fazendo com que os dentes do ferrolho se posicionem a frente dos dentes da peça de extensão do cano. Neste instante dá-se o trancamento.

3.7.2 Forças

Os desenhos realizados foram feitos com o auxílio do *SolidWorks*, um *software* de CAD 3D desenvolvido inicialmente pela *SolidWorks Corporation* que funciona no sistema operativo *Windows*. Dispõe de um amplo leque de funcionalidades e baseia-se na computação paramétrica, criando formas tridimensionais a partir de operações geométricas elementares. No ambiente do programa, a criação de um sólido ou superfície tipicamente começa com a definição de um esboço 2D que depois é transformado através de uma operação em um modelo tridimensional (WIKIPEDIA, 2020b). Para o presente trabalho, como o objetivo da utilização do *software* é apenas a realização dos desenhos, não foram desenvolvidos os modelos tridimensionais das peças.

A Figura 35 mostra visualmente a origem e orientação dos eixos que serão utilizados no sistema de modelagem. Os corpos poderão se deslocar ao longo dos eixos X e Y e rotacionar ao longo do eixo Z, de forma que todos os movimentos sejam no mesmo plano. A origem está posicionada na linha de simetria e parte posterior da câmara, inicialmente em contato com o ferrolho.

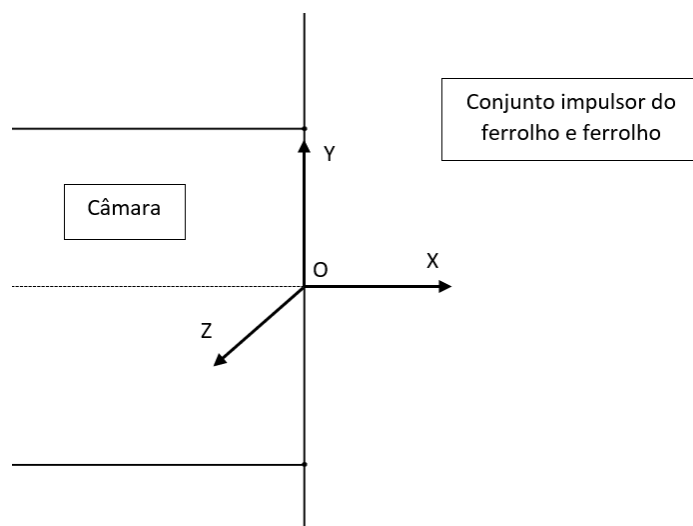


Figura 35 – Origem e eixos utilizados na modelagem (Autoria Própria)

3.7.2.1 Força dos Gases Propelentes

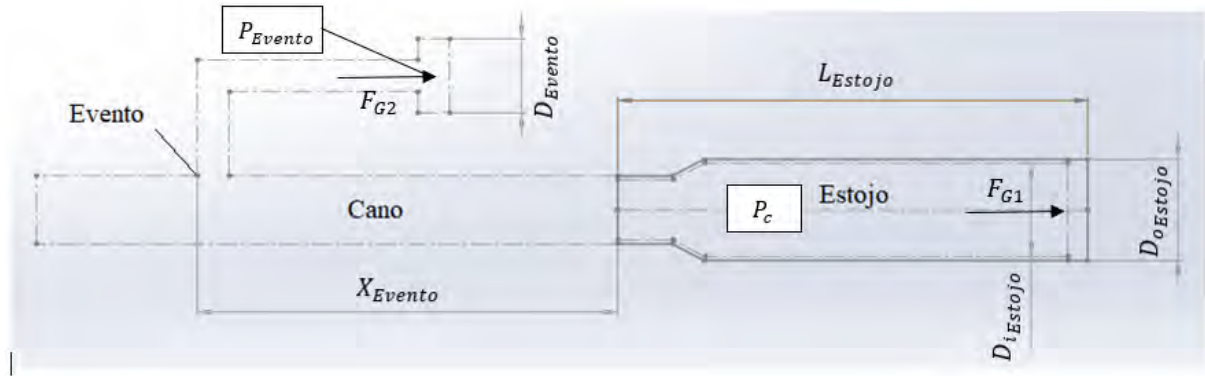


Figura 36 – Desenho simplificado para visualização das forças dos gases propelentes (Autoria Própria)

A Figura 36 representa as duas forças F_{G_1} e F_{G_2} devido aos gases gerados na queima do propelente que irão atuar no culote do estojo e no evento respectivamente. A força que irá atuar no culote do estojo vai depender da pressão no interior do mesmo e do diâmetro interno do estojo $D_{i_Estojó}$, e pode ser expressa pela Equação 3.20.

$$F_{G_1} = P_c \frac{\pi D_{i_Estojó}^2}{4} \quad (3.20)$$

O valor de P_c ao longo do tempo é conhecido e representado pela Figura 30 e o $D_{i_Estojó}$ pode ser obtido pela Figura 20 ou através de medições. De forma análoga, a força que irá atuar no evento vai depender da pressão no interior do evento P_{Evento} e do diâmetro do evento D_{Evento} , e pode ser expressa pela Equação 3.21.

$$F_{G_2} = P_{Evento} \frac{\pi D_{Evento}^2}{4} \quad (3.21)$$

Diferente da obtenção de F_{G_1} , para esse caso P_{Evento} ainda não é conhecida. A obtenção dessa pressão será feita novamente com o auxílio do PRODAS, porém também será necessário a obtenção da posição do evento no cano X_{Evento} através de medições. Com o X_{Evento} conhecido, será possível descobrir através da Figura 30 as pressões $P_c(X_{Evento})$, $P_b(X_{Evento})$ e conseqüentemente a perda de carga ΔP para aquela posição. Dessa forma P_{Evento} pode ser expressa pela Equação 3.22 e D_{Evento} obtido através de medições.

$$P_{Evento} = P_a \quad \text{Deslocamento projétil} \leq X_{Evento} \quad (3.22a)$$

$$P_{Evento} = P_c - \Delta P \quad \text{Deslocamento projétil} > X_{Evento} \quad (3.22b)$$

$$\text{Ou } P_{Evento} = P_c - [P_c(X_{Evento}) - P_b(X_{Evento})] \quad (3.22c)$$

A partir dessas equações é possível concluir algumas informações relevantes. A primeira é que a pressão se mantém constante e igual à pressão atmosférica até que o projétil ultrapasse o evento de admissão, Equação 3.22a. Além disso, foi considerado o percurso do gás desde a entrada até o final do evento de admissão e o deslocamento do êmbolo desprezíveis quando comparados com X_{Evento} . Caso isso fosse levado em consideração, existiria uma perda de carga variando com o tempo, ligeiramente maior e conseqüentemente P_{Evento} ligeiramente menor. Por fim, conclui-se que o gráfico da pressão do evento será constante até determinado tempo e depois terá o mesmo formato que P_c com um deslocamento de ΔP para baixo, sentido negativo. Após a saída do projétil, o decaimento de P_{Evento} também será na forma de exponencial até que a pressão alcance a atmosférica. De forma análoga para obtenção de P_c e P_b , Equação 3.18, a pressão do evento pode ser expressa pela Equação 3.23.

$$P_{Evento} = e_5 e^{-e_6 t} \quad (3.23)$$

As constantes da exponencial e_5 e e_6 só poderão ser descobertas após a realização da medição e obtenção de X_{Evento} . Dessa forma, através das Equações 3.20, 3.21, 3.22 e 3.23 é possível descrever as forças devido aos gases propelentes ao longo do tempo que atuam no culote do estojo e no interior do evento de admissão, tendo papel primordial para o funcionamento do armamento como será visto nas próximas seções.

3.7.2.2 Destrancamento

Como já foi mencionado, o armamento utilizado para validação possui um mecanismo de trancamento por ferrolho rotativo. Será considerado que este trancamento é eficiente e o movimento do ferrolho só será possível após o total destrancamento da arma. Caso contrário, os dentes do ferrolho ou os dentes da peça de extensão do cano que possuem a função de realizar o trancamento seriam cisalhados.

Dessa forma, é de extrema importância calcular o tempo para que ocorrera o total destrancamento. Para isso terão que ser analisadas as forças que atuam no conjunto cilindro de gases, êmbolo e impulsor do ferrolho. Essas forças podem ser visualizadas na Figura 37. As forças de atrito entre a câmara de gases e o êmbolo com a armação não estão representadas na imagem mas existem e serão consideradas nas contas.

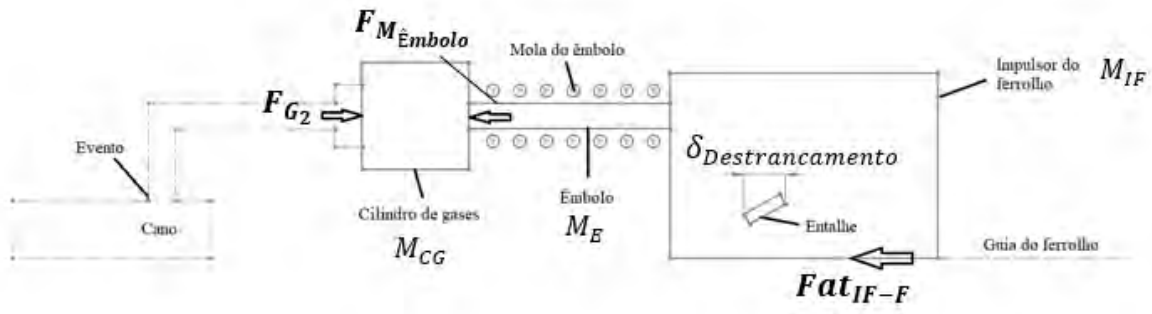


Figura 37 – Desenho simplificado para visualização das forças durante o destrancamento (Autoria Própria)

No instante em que o projétil ultrapassar o evento, os gases irão se expandir e forçar a câmara de gases, de massa M_{CG} para a retaguarda com uma força F_{G_2} , expressa pela Equação 3.21. Conseqüentemente o êmbolo, de massa $M_{\hat{E}}$ será também deslocado para a retaguarda e fará com quem sua mola seja comprimida, contribuindo para o aumento da força da mola do êmbolo $F_{M_{\hat{E}embolo}}$ que atua sobre o mesmo. Com o recuo do êmbolo o impulsor do ferrolho, de massa M_{IF} também é obrigado recuar sujeito à uma força de atrito devido ao seu contato com o ferrolho Fat_{IF-F} . As forças de atrito que atuam no cilindro de gases e no êmbolo são Fat_{CG-A} e Fat_{E-A} respectivamente. O destrancamento estará completo após o impulsor recuar uma distância $\delta_{Destrancamento}$, comprimento horizontal do entalhe. Já que os três corpos se movimentam juntos, é possível realizar a modelagem utilizando o conjunto como um todo, de forma a eliminar as normais de contato entre os corpos. A equação de movimento desse sistema pode ser expressa pela Equação 3.24.

$$F_{G_2} - Fat_{CG-A} - F_{M_{\hat{E}embolo}} - Fat_{E-A} - Fat_{IF-F} = (M_{CG} + M_{\hat{E}} + M_{IF}) \cdot a_D \quad (3.24)$$

Para esta etapa inicial da modelagem como o foco é apenas encontrar o tempo necessário até o destrancamento t_D , a simulação será interrompida quando o deslocamento do conjunto for igual à $\delta_{Destrancamento}$. Será analisado somente a aceleração no eixo X e serão desprezados os efeitos de rotação, não havendo necessidade de analisar o torque resultante. A força da mola será expressa pela Equação 3.25, em que $K_{\hat{E}embolo}$ é a constante de rigidez da mola do êmbolo, $\delta_{\hat{E}embolo}$ é a deformação da mola devido à montagem e x_D é o deslocamento do conjunto nessa fase inicial.

$$F_{M_{\hat{E}embolo}} = K_{\hat{E}embolo}(\delta_{\hat{E}embolo} + x_D) \quad (3.25)$$

As forças devido ao atrito podem ser expressas pela Equação 3.26, em que os μ são os coeficientes de atrito cinético das superfícies de contato e g a gravidade.

$$Fat_{CG-A} = \mu_{CG-A} \cdot M_{CG} \cdot g \quad (3.26a)$$

$$Fat_{E-A} = \mu_{E-A} \cdot M_E \cdot g \quad (3.26b)$$

$$Fat_{IF-F} = \mu_{IF-F} \cdot M_{IF} \cdot g \quad (3.26c)$$

3.7.2.3 Obturação

O cálculo da força de obturação F_{obt} é importante pois ela auxilia a força de trancamento à manter o ferrolho imóvel enquanto a arma está trancada. Após o destrancamento, esta força ainda pode atuar, e por isso existe a necessidade de se encontrar uma forma numérica para sua expressão. A força de obturação só irá começar a atuar após a pressão interna no estojo ser suficiente para causar sua expansão radial e fazer com que as paredes externas do estojo e interna da câmara entrem em contato. De acordo com a Equação 3.15, a pressão necessária para que F_{obt} deixe de ser nula pode ser expressa pela Equação 3.28, em que δ_{Estojo} é a folga inicial entre estojo e câmara, E_E é o módulo de elasticidade do estojo e ν_E é o coeficiente de poisson do estojo. O raio utilizado foi o raio médio r_{mE} , ou seja, a semi-soma dos raios interno e externo do estojo e a espessura e_E a semi-diferença dos diâmetros interno e externo.

$$r_{mE} = \frac{D_{iEstojo} + D_{oEstojo}}{4} \quad (3.27a)$$

$$e_E = \frac{D_{oEstojo} - D_{iEstojo}}{2} \quad (3.27b)$$

$$P_{obt} = \frac{2e_E E_E \delta_{Estojo}}{r_{mE} (2r_{mE} - \nu_E r_{mE} - 2\nu_E e_E)} \quad (3.28)$$

Como pode ser visto na Figura 38, após a pressão dos gases superar P_{obt} , surge uma força normal ao longo de toda a superfície do estojo indicando o contato com a câmara. A força de obturação atuará como uma força de atrito circunferencial, e para descobrir seu valor numérico primeiramente é preciso conhecer a normal de contato. Conseqüentemente, será necessário obter a pressão de interface P_i através da Equação 3.17, onde $D_{iCâmara}$ e $D_{oCâmara}$ são os diâmetros interno e externo da câmara, E_C e ν_C são o módulo de elasticidade e coeficiente de poisson para a câmara e P_C a pressão interna da câmara obtida pelo *PRODAS*.

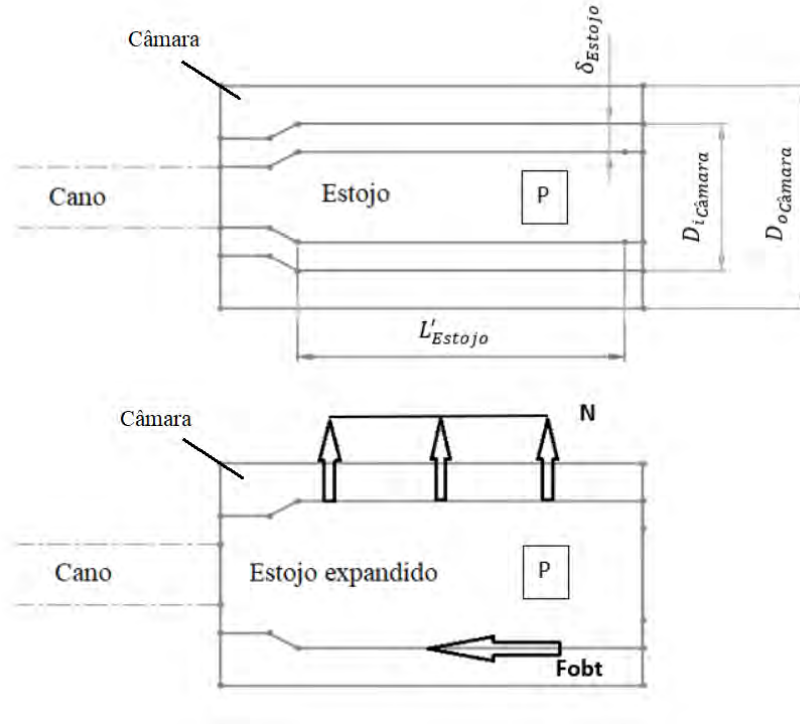


Figura 38 – Desenho simplificado para visualização da obturação (Autoria Própria)

$$a_1 = \frac{D_{i\text{Estojo}}}{2} + \delta_{\text{Estojo}} \quad b_1 = \frac{D_{i\text{Câmara}}}{2} \quad (3.29a)$$

$$a_2 = b_1 \quad b_2 = \frac{D_{o\text{Câmara}}}{2} \quad (3.29b)$$

$$P_i = \frac{2a_1^2 P_c E_C (b_2^2 - a_2^2)}{E_E (b_1^2 - a_1^2) [(1 - \nu_C) a_2^2 + (1 + \nu_C) b_2^2] + E_C (b_2^2 - a_2^2) [(1 - \nu_E) b_1^2 + (1 + \nu_E) a_1^2]} \quad (3.30)$$

A normal é expressa pelo produto entre a pressão de interface e a área lateral do estojo em contato com a câmara, Equação 3.31. Será considerado que o corpo do estojo até o estrangulamento e redução de diâmetro será o maior responsável pela obturação. Dessa forma, para o cálculo da área de contato não será utilizado o comprimento total do estojo, mas sim um comprimento até a redução de diâmetro L'_{Estojo} . Embora a dilatação axial do estojo seja desprezível, é importante considerar que a força de obturação pode continuar a atuar mesmo com o deslocamento do ferrolho após a abertura do armamento. Tendo isso em vista, x_F representa esse deslocamento.

$$N = P_i \cdot \pi D_{i\text{Câmara}} (L'_{\text{Estojo}} - x_F) \quad (3.31)$$

Por fim, a força de obturação será calculada da mesma forma que as forças devido ao atrito, através do produto de uma normal e um coeficiente, Equação 3.32, em que μ_{E-C}

é o coeficiente de atrito cinético entre câmara e estojo. Vale ressaltar que tanto a normal quanto a pressão de interface também serão nulas para uma pressão abaixo da pressão de obturação, porém como forma de não gerar equações redundantes essa condição foi aplicada diretamente na força de obturação.

$$F_{obt} = \mu_{E-C} \cdot P_i \cdot \pi D_{iCâmara} (L'_{Estojo} - x_F) \quad P_c \geq P_{obt} \quad (3.32a)$$

$$F_{obt} = 0 \quad P_c < P_{obt} \quad (3.32b)$$

Para valores de x_F maiores que L'_{Estojo} a força de obturação se torna nula pois o estojo perde o contato com a parede da câmara.

3.7.2.4 Movimento ferrolho

Após um tempo t_D desde o disparo até o total destrancamento do ferrolho, o mesmo inicia seu movimento. Esse movimento será modelado apenas na direção do eixo X, pois será considerado que a folga inicial entre o conjunto ferrolho e impulsor do ferrolho com a tampa da caixa da culatra e a armação é desprezível, não tendo movimento no eixo Y. Além disso, será considerado também a rotação ao longo do eixo Z que será apresentada melhor na próxima seção sobre torques. No movimento do sistema será considerado que o impulsor de ferrolho se permanecerá imóvel em relação ao ferrolho.

Inicialmente, o conjunto todo que se desloca para a retaguarda devido principalmente à força dos gases está acoplado. Esse conjunto contempla o cilindro de gases, êmbolo, impulsor do ferrolho, ferrolho e estojo que será ejetado. Com este acoplamento, tendo em vista que todos esses componentes se deslocam com a mesma aceleração, o conjunto pode ser visto como um bloco e as normais de contato entre eles não são consideradas forças externas. A Figura 39 representa as forças externas desse conjunto.

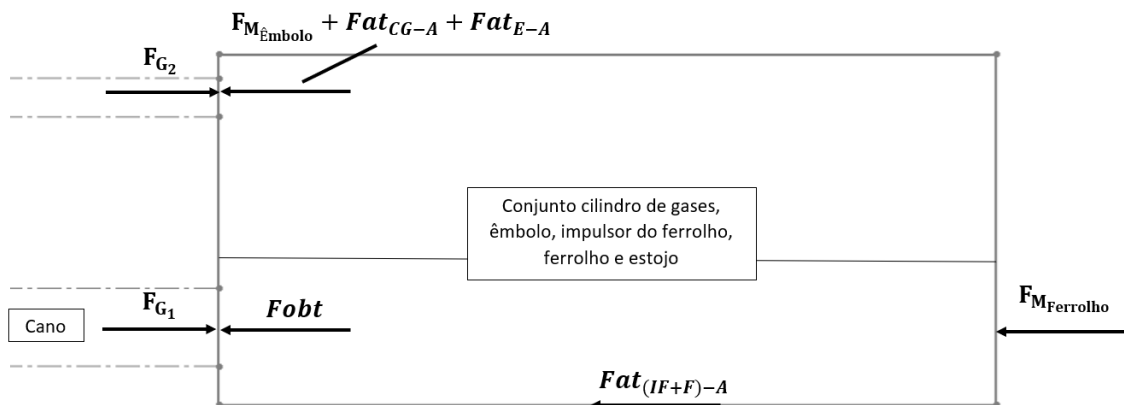


Figura 39 – Bloco de todos componentes móveis acoplados (Autoria Própria)

A maioria das forças contidas no sistema apresentado já são conhecidas. Como o impulsor do ferrolho permanece imóvel em relação ao ferrolho, a força de atrito $F_{at_{IF-F}}$ será uma força interna e dessa forma não influenciará o bloco como um todo. A força da mola recuperadora $F_{M_{Ferrolho}}$ é expressa pela Equação 3.33, em que $K_{Ferrolho}$ é a constante de rigidez da mola recuperadora, $\delta_{Ferrolho}$ é a deformação inicial da mola devido à montagem e x_F o deslocamento do ferrolho e consequentemente do conjunto.

$$F_{M_{Ferrolho}} = K_{Ferrolho}(\delta_{Ferrolho} + x_F) \quad (3.33)$$

A força de atrito entre o conjunto impulsor do ferrolho e ferrolho com a armação $F_{at_{(IF+F)-A}}$ não pode ser expressa simplesmente da mesma maneira que as demais, produto entre coeficiente de atrito e peso do conjunto. Isso ocorre porque este conjunto pode rotacionar, e dessa forma será necessário analisar mais detalhadamente as normais que irão surgir com a armação para depois definir essa força de atrito. Esta etapa será realizada na próxima seção.

A Equação 3.34 representa o movimento do conjunto todo acoplado para um tempo maior que t_D , em que M_F é a massa do ferrolho, M_E a massa do estojo e os demais parâmetros já foram apresentados anteriormente.

$$F_{G_1} + F_{G_2} - F_{M_{\hat{E}mbolo}} - F_{M_{Ferrolho}} - F_{obt} - F_{at_{CG-A}} - F_{at_{E-A}} - F_{at_{(IF+F)-A}} = (M_{CG} + M_{\hat{E}} + M_{IF} + M_F + M_E) a_F \quad (3.34)$$

3.7.2.5 Desacoplamento

É importante ter o conhecimento que ocorrerão dois desacoplamentos durante o recuo. O êmbolo perderá o contato com o impulsor do ferrolho devido ao aumento da força da mola do êmbolo, e o estojo será ejetado após se chocar com o ejetor. Dessa forma, a massa recuante do conjunto não será mais a soma de todas as massas como mostrado na Equação 3.34. Por isso é relevante encontrar o momento, e consequentemente o deslocamento, em que esses dois desacoplamentos acontecerão. Como forma didática, será considerado que o primeiro desacoplamento será o do conjunto cilindro de gases e êmbolo, mas nada impede que a ejeção ocorra primeiro.

Ao analisar separadamente o primeiro desacoplamento através da Figura 40, a separação do conjunto êmbolo e cilindro de gases ocorrerá no instante $t_{Desacoplamento_1}$ em que a normal de contato se torna nula. A Equação 3.35 representa o movimento deste conjunto separadamente, levando em consideração a normal de contato N .

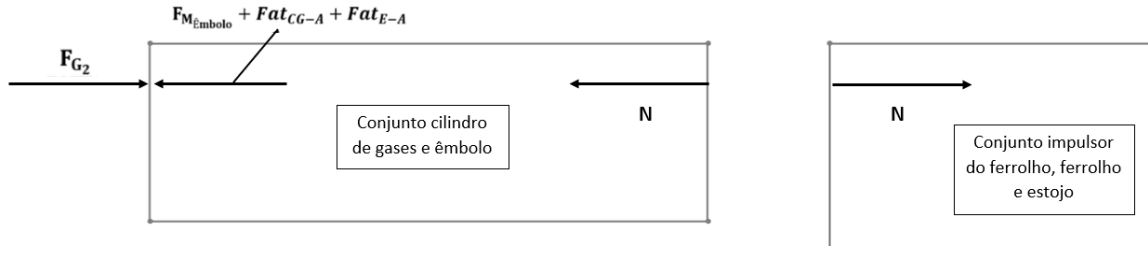


Figura 40 – Primeiro desacoplamento (Autoria Própria)

$$F_{G_2} - F_{M_{\text{êmbolo}}} - Fat_{CG-A} - Fat_{E-A} - N = (M_{CG} + M_{\text{ê}}) a_F \quad (3.35)$$

Para um tempo $t_{\text{Desacoplamento}_1}$ a normal N é igual à zero. Dessa forma, a aceleração do ferrolho em que ocorrerá o desacoplamento do conjunto cilindro de gases e êmbolo pode ser representado pela Equação 3.36. Com isso, será possível encontrar esse tempo e consequentemente o deslocamento do ferrolho até que esse desacoplamento ocorra.

$$a_F(t_{\text{Desacoplamento}_1}) = \frac{F_{G_2} - F_{M_{\text{êmbolo}}} - Fat_{CG-A} - Fat_{E-A}}{(M_{CG} + M_{\text{ê}})} \quad (3.36)$$

Para um deslocamento do ferrolho maior que o necessário para que ocorra o primeiro desacoplamento, a equação de movimento principal se altera de 3.34 para a Equação 3.37, em que as forças externas e as massas relativas ao conjunto que se desacoplou não influenciam mais o movimento. Como o foco do trabalho não está na modelagem do êmbolo, mas sim do ferrolho, não há necessidade de continuar a simulação para o conjunto êmbolo e cilindro de gases.

$$F_{G_1} - F_{M_{\text{ferrolho}}} - F_{obt} - Fat_{(IF+F)-A} = (M_{IF} + M_F + M_E) a_F \quad (3.37)$$

O segundo desacoplamento ocorrerá após o choque do culote do estojo com o ejetor, que para modelagem será fixo e em uma distância X_{Ejetor} conhecida na armação do armamento. Dessa forma, surgirá uma força de contato F_c entre o estojo e a armação, sendo assim uma força externa. A Equação 3.37 se modificará para a 3.38 enquanto não houver uma separação completa entre estojo e ferrolho, indicando que este choque irá reduzir ou até mesmo frear rapidamente o recuo.

$$F_{G_1} - F_{M_{\text{ferrolho}}} - F_{obt} - Fat_{(IF+F)-A} - F_c = (M_{IF} + M_F + M_E) a_F \quad (3.38)$$

Vale ressaltar que essa força de contato só existirá durante o processo de ejeção. O desacoplamento pode ser visualizado na Figura 41, em que estará completo quando a

normal N for nula. Encontrar o tempo para o segundo desacoplamento $t_{Desacoplamento_2}$ não é tão simples quanto o primeiro, principalmente pelo fato de que a força de contato com o ejetor depende da rotação do estojo durante a ejeção. Por esse motivo, essa força não é necessariamente horizontal e o $t_{Desacoplamento_2}$ será calculado apenas na próxima seção.

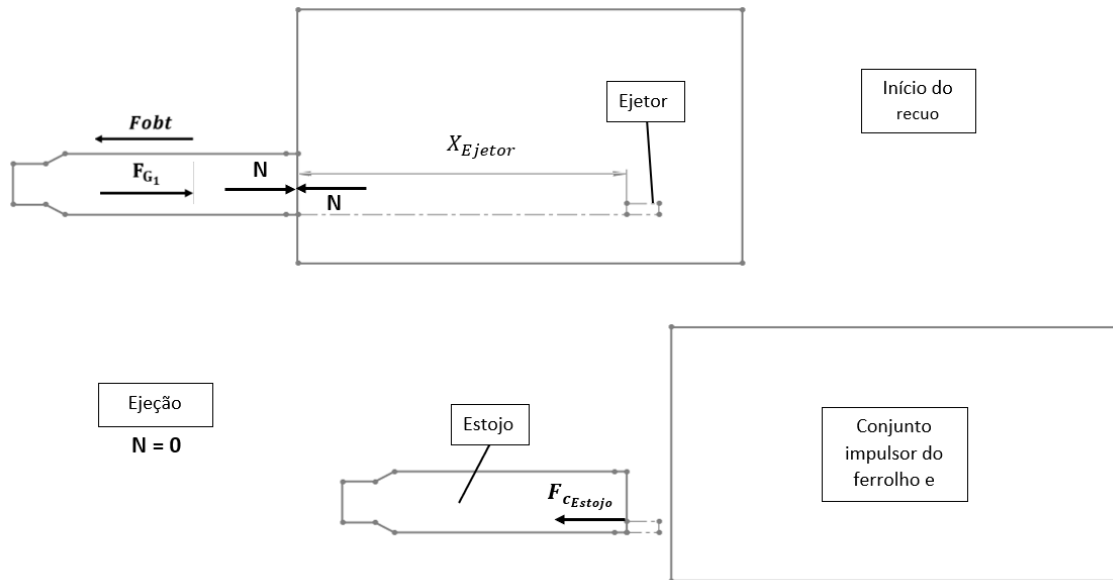


Figura 41 – Segundo desacoplamento (Autoria Própria)

Após a ejeção do estojo, o movimento do sistema será representado pela Equação 3.39. Para o avanço, o sinal da força de atrito será positivo devido ao sentido do movimento da massa recuante. Após a ejeção do estojo a força dos gases poderá ser desprezada devido ao tempo ser suficiente para a pressão reduzir até a atmosférica.

$$-F_{M_{Ferrolho}} - Fat_{(IF+F)-A} = (M_{IF} + M_F) a_F \quad (3.39)$$

3.7.2.6 Acoplamento

Além dos dois desacoplamentos que ocorrem durante o recuo do ferrolho, referentes à perda de contato entre o êmbolo e o impulsor e à ejeção, existe também um acoplamento durante o avanço. Esse acoplamento indica um aumento de massa do sistema e ocorre quando o ferrolho entra em contato com a munição apresentada para que ocorra o carregamento posteriormente. Esta munição que no final do recuo está presa pelas abas do carregador ao ser empurrada pelo ferrolho entra em contato com a rampa de carregamento que a guia em direção ao cano. A Figura 42 representa o desenho da munição durante o recuo do ferrolho antes da apresentação.

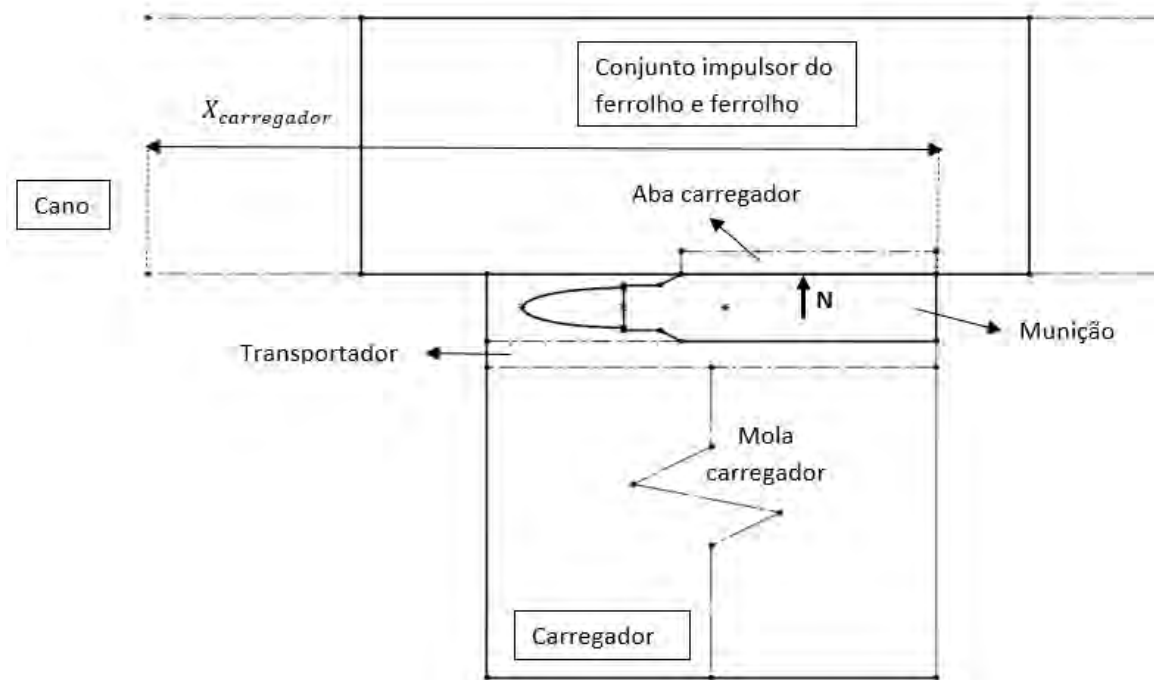


Figura 42 – Munição dentro do carregador antes da apresentação (Autoria Própria)

Na Figura 42 o perfil do projétil foi considerado oval para simplificação e o desenho é didático, não possuindo as proporções corretas para os tamanhos dos componentes. No início do recuo do ferrolho, o mesmo se posiciona sobre a munição que se encontra dentro do carregador, a forçando para baixo e comprimindo a mola do carregador. Conseqüentemente surge uma normal devido ao contato entre esses elementos. Como a munição está inicialmente estática, a normal pode ser calculada pelo equilíbrio de forças através da Equação 3.40, em que $K_{Carregador}$ é a constante de rigidez da mola do carregador, $\delta_{Carregador}$ a deformação inicial de montagem da mola e M_M a massa do cartucho completo. Vale ressaltar que foi considerado apenas uma munição no carregador, o transportador com espessura e massa desprezível e ligeiramente menor que o carregador, de forma que não tenha atrito para interferir na normal.

$$N = K_{Carregador}(\delta_{Carregador} + D_{oEstorjo}) - M_M g \quad (3.40)$$

Após um recuo de $X_{Carregador}$ o ferrolho perde o contato com a munição e a mesma fica livre para se movimentar no eixo Y devido à distensão da mola do carregador até uma elevação máxima de $\delta_{Apresentação}$, quando a aba do carregador começa a atuar e restringe seu movimento. A Figura 43 representa o processo de apresentação.

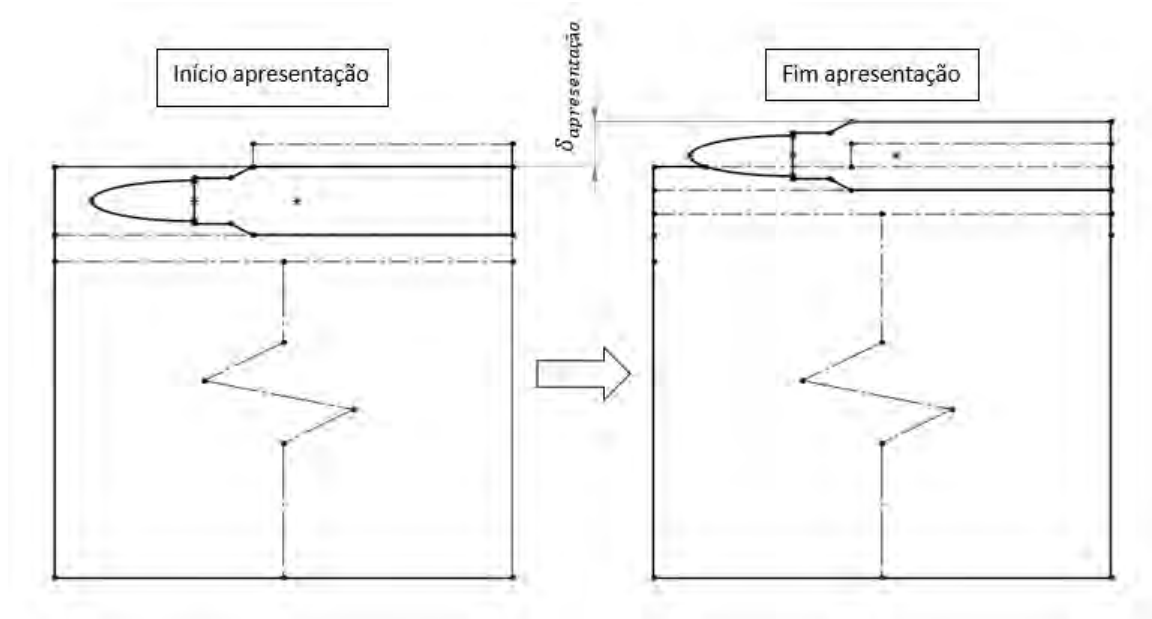


Figura 43 – Fase de apresentação (Autoria Própria)

Durante essa fase a dinâmica da munição pode ser expressa pela Equação 3.41, em que a_A é a aceleração vertical. Esta expressão é válida até o deslocamento de $\delta_{Apresentação}$, que ocorrerá em um tempo $t_{Apresentação}$. Determinar este tempo é importante para verificar se alguma falha de apresentação irá acontecer, analisando em conjunto o tempo que o ferrolho irá levar para avançar e entrar em contato com o culote da munição $t_{Acoplamento}$.

$$M_M a_A = K_{Carregador}(\delta_{Carregador} + D_{oEstojó} - \Delta y_A) - M_M g \quad (3.41)$$

Para modelar o carregamento foi adotada a seguinte hipótese simplificadora: o contato entre a munição e a rampa de carregamento é realizado através do estojo. Esta hipótese tem o objetivo de simplificar a análise pois não será necessário verificar o perfil exato do projétil para encontrar a direção da força de contato entre a munição e a rampa. Esta mesma situação irá se aplicar ao fim do carregamento quando a munição entrar em contato com a câmara.

O carregamento pode ser dividido em três fases distintas, com o intuito de analisar as forças atuantes em cada uma delas. A primeira fase pode ser visualizada na Figura 44 e representa o contato do ferrolho com a munição apresentada durante o avanço e o deslocamento horizontal da mesma de X_{Rampa} até o contato com a rampa de carregamento que possui uma angulação de γ .

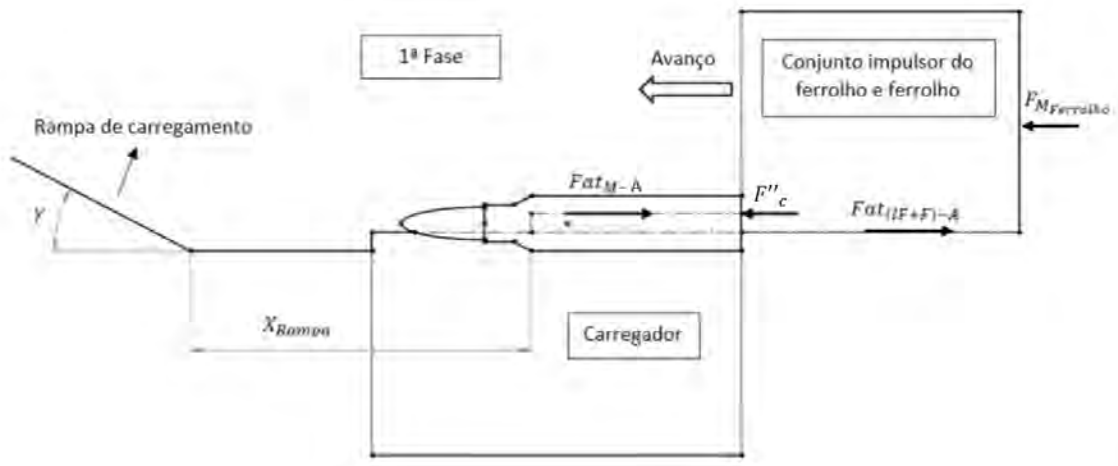


Figura 44 – Primeira fase carregamento (Autoria Própria)

Nesta fase a munição não possui aceleração no eixo Y e nem rotação no eixo Z devido à limitação que a aba do carregador exerce sobre a mesma. Devido ao acoplamento, surge uma força de contato F''_C devido ao choque do ferrolho com a munição. Esta força de contato será calculada na próxima seção junto com as demais forças de contato que irão surgir durante o carregamento. Dessa forma, a aceleração dos corpos podem ser expressas pela Equação 3.42, em que Fat_{M-A} é a força de atrito entre a munição e a aba do carregador.

$$-F_{M_{Ferrolho}} + Fat_{(IF+F)-A} + F''_C = (M_{IF} + M_F) a_F \quad (3.42a)$$

$$Fat_{M-A} - F''_C = M_M a_{Mx} \quad (3.42b)$$

Como a munição não possui movimento no eixo vertical, a força de atrito com a aba do carregador será calculada pela Equação 3.43, que depende principalmente de seu próprio peso e da força da mola do carregador. O coeficiente de atrito cinético entre as superfícies é μ_{M-A}

$$Fat_{M-A} = \mu_{M-A} [K_{Carregador} (\delta_{Carregador} + D_{oEstoj} - \delta_{Apresentação}) - M_M g] \quad (3.43)$$

A segunda fase pode ser visualizada na Figura 45 e representa o contato da munição com a rampa de comprimento L_{Rampa} , o que faz surgir uma força de contato, sua subida e direcionamento até a câmara. Nesta fase, diferentemente da primeira a munição não possui nenhuma restrição de movimento. O encerramento da segunda fase será descrito com o contato do estojo com a parte superior da câmara.

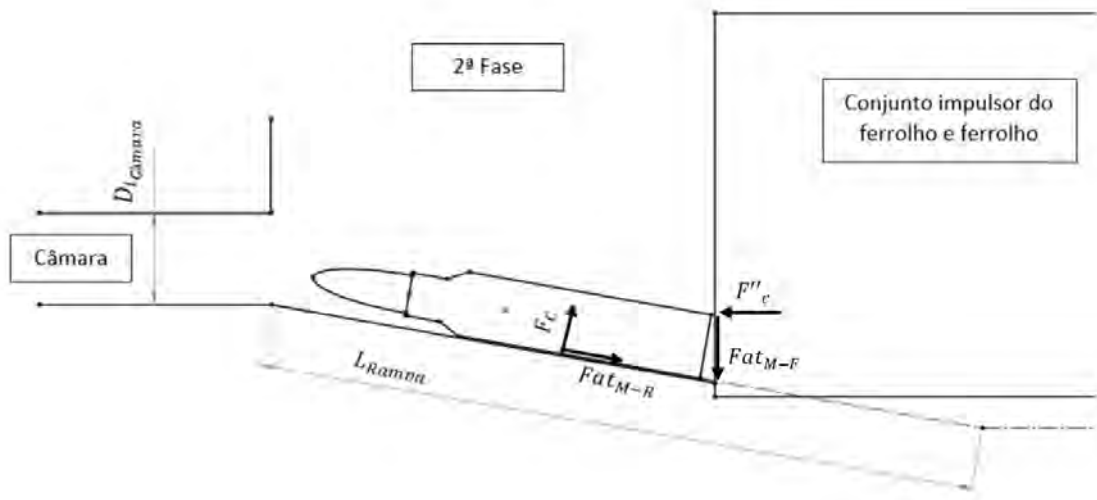


Figura 45 – Segunda fase carregamento (Autoria Própria)

Nesta fase a aceleração em X dos corpos podem ser expressas pela Equação 3.44, em que F_C é a força de contato que será calculada no próximo tópico pois depende de fatores geométricos e da rotação da munição, Fat_{M-R} a força de atrito entre a munição e a rampa e μ_{M-R} o coeficiente de atrito cinético entre a munição e a rampa.

$$F_C'' + Fat_{(IF+F)-A} - F_{M_{Ferrolho}} = (M_{IF} + M_F) a_F \quad (3.44a)$$

$$Fat_{M-R} \cos \gamma + F_C \sin \gamma - F_C'' = M_M a_{Mx} \quad (3.44b)$$

A Fat_{M-R} será calculada através do produto entre F_C e μ_{M-R} . Com auxílio novamente da segunda lei de Newton é possível encontrar a aceleração no eixo Y da munição a_{My} através da Equação 3.45, sendo Fat_{M-F} a força de atrito entre a munição e o ferrolho que pode ser obtida pelo produto entre F_C'' e o coeficiente de atrito cinético entre a munição e o ferrolho μ_{M-F} .

$$F_C \cos \gamma - Fat_{M-R} \sin \gamma - M_M g - Fat_{M-F} = M_M a_{My} \quad (3.45)$$

A terceira e última fase, Figura 46, representa o contato da munição com a parte superior da câmara, o que faz surgir outra força de contato F_{C_s} numericamente diferente das fases anteriores. Como pode ser visto no desenho, o projétil entra em contato com a câmara antes do estojo, porém devido à hipótese estabelecida, o ponto de aplicação na força será no estojo. O fim desta fase é caracterizado pelo alinhamento da munição com a câmara, instante no qual o extrator começa a atuar sobre a mesma e mantém sua orientação correta. Dessa forma, ao término da terceira fase, ambas as forças de contato irão deixar de atuar no sistema.

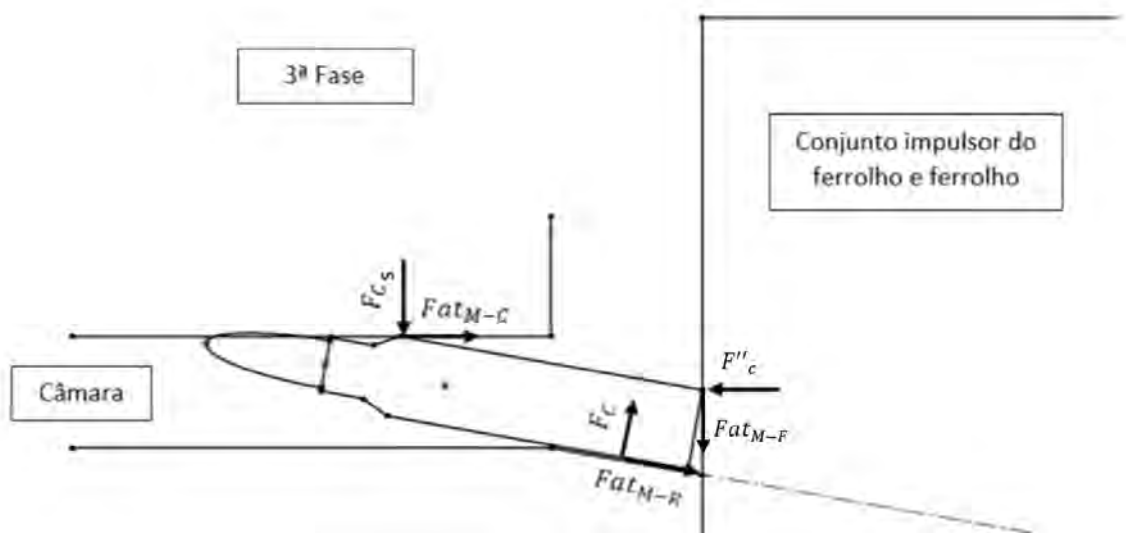


Figura 46 – Terceira fase carregamento (Autoria Própria)

Para esta fase, as equações dinâmicas do problema são modificadas para as Equações 3.46 e 3.47, que indicam a aceleração do ferrolho e da munição na direção X e a aceleração da munição na direção Y respectivamente. F_{C_s} será calculada no próximo tópico pois depende da rotação e geometria do problema e a força de atrito entre a munição e a câmara durante o carregamento Fat_{M-C} através do produto do coeficiente de atrito cinético μ_{M-C} e F_{C_s} .

$$F''_C + Fat_{(IF+F)-A} - F_{M_{Ferrolho}} = (M_{IF} + M_F) a_F \quad (3.46a)$$

$$Fat_{M-R} \cos \gamma + F_C \sin \gamma + Fat_{M-C} - F''_C = M_M a_{M_x} \quad (3.46b)$$

$$F_C \cos \gamma - Fat_{M-R} \sin \gamma - F_{C_s} - M_M g - Fat_{M-F} = M_M a_{M_y} \quad (3.47)$$

3.7.3 Condições iniciais

Como a origem do sistema já é conhecida, será importante também definir a posição e velocidade inicial dos corpos para cada fase de acoplamento e desacoplamento. Dessa forma, analisar o centro de massa CM é imprescindível para determinação das condições iniciais pois a aceleração e conseqüentemente o deslocamento obtidos pela segunda lei de Newton são válidos para o CM . A Figura 47 apresenta os parâmetros geométricos relativos ao CM do estojo, conjunto ferrolho e impulsor do ferrolho e munição. Vale ressaltar que os centros de massa do estojo e da munição foram considerados sobre a linha de simetria.

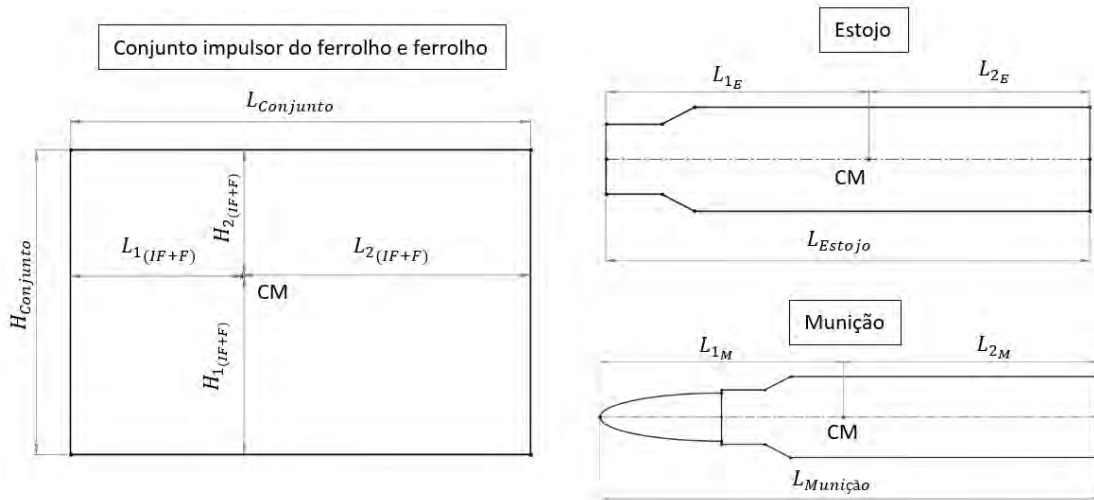


Figura 47 – Centro de massa dos corpos (Autoria Própria)

Para o instante inicial, $t = 0$, nenhum corpo possui velocidade linear e angular, ou seja, todos estão em repouso. Os centros de massas dos corpos podem ser obtidos através de parâmetros geométricos já citados anteriormente. As Figuras 48 e 49 auxiliam na visualização do centro de massa do conjunto impulsor e ferrolho e da munição. Para o estojo não será necessário imagem pois o cálculo pode ser realizado de forma mais simples. As Equações 3.48, 3.49 e 3.50 indicam as posições dos CM para o instante inicial dos três corpos.

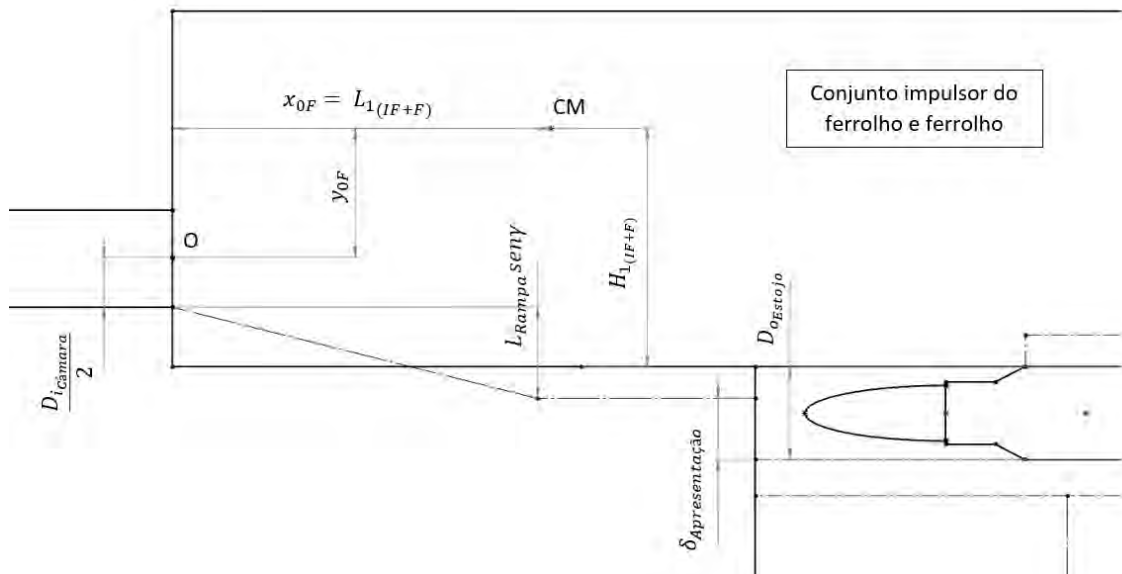


Figura 48 – Centro de massa ferrolho (Autoria Própria)

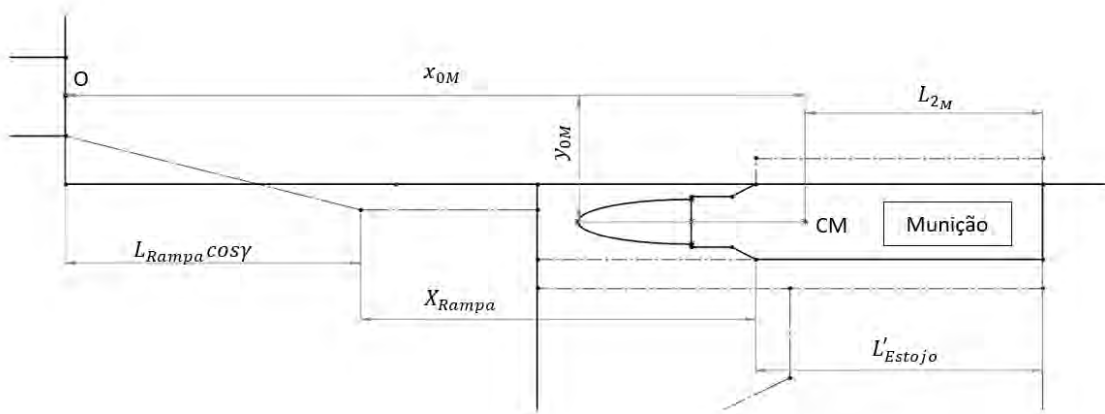


Figura 49 – Centro de massa munição (Autoria Própria)

Posição inicial do centro de massa para o estojo:

$$\begin{aligned} x_{0E} &= -L_{2E} \\ y_{0E} &= 0 \end{aligned} \quad (3.48)$$

Posição inicial do centro de massa para o conjunto ferrolho e impulsor do ferrolho:

$$\begin{aligned} x_{0F} &= L_{1(IF+F)} \\ y_{0F} &= -\frac{D_{iCâmara}}{2} - L_{Rampa} sen \gamma - \delta_{Apresentação} + D_{oEstojo} + H_{1(IF+F)} \end{aligned} \quad (3.49)$$

Posição inicial do centro de massa para a munição:

$$\begin{aligned} x_{0M} &= L_{Rampa} cos \gamma + X_{Rampa} + L'_{Estojo} - L_{2M} \\ y_{0M} &= -\frac{D_{iCâmara}}{2} - L_{Rampa} sen \gamma - \delta_{Apresentação} + \frac{D_{oEstojo}}{2} \end{aligned} \quad (3.50)$$

Após um recuo do ferrolho de $X_{Carregador}$, ocorrerá a apresentação e a posição do centro de massa da munição irá se deslocar verticalmente até a mesma ficar presa pela aba do carregador. Essa nova posição em Y pode ser calculada adicionando uma parcela $\delta_{Apresentação}$ à Equação 3.50.

3.7.4 Final Avanço

No fim do avanço o conjunto ferrolho e impulsor do ferrolho ainda terá energia cinética pois o mesmo estará sendo acelerado pela força da mola recuperadora. Dessa

forma, será considerado que a própria armação do armamento desempenhará o papel de amortecer essa fase final do ciclo, com o surgimento de uma força de contato F_{CA} que irá começar a atuar no instante em que ocorrer a sobreposição dos componentes. Essa sobreposição pode ser visualizada na Figura 50.

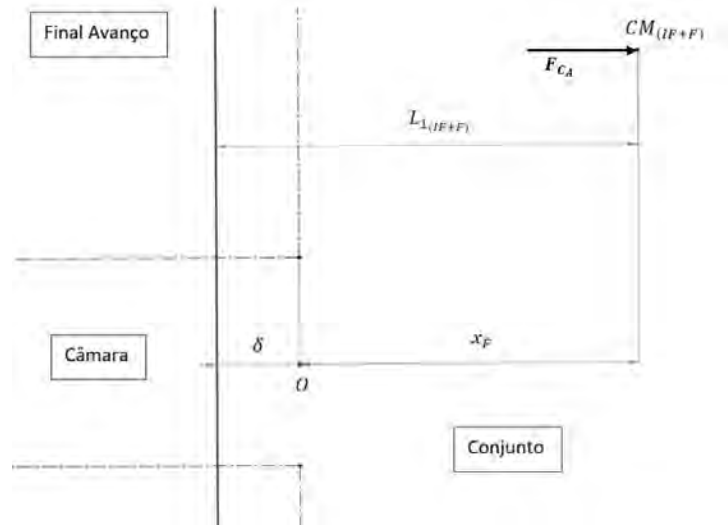


Figura 50 – Amortecimento final do avanço (Autoria Própria)

A partir da Equação 3.9, a Equação 3.51 calcula a força de contato entre o conjunto e a armação nessa fase de amortecimento, sendo $k_{Armação}$ a constante de rigidez correspondente da armação e δ a deformação. Essa deformação pode ser obtida através da geometria do problema de acordo a Equação 3.52.

$$F_{CA} = k_{Armação} \delta^{1.5} \quad (3.51)$$

$$\delta = L_{1(IF+F)} - x_F \quad (3.52)$$

Conseqüentemente, com essa nova força atuando no final do avanço, a dinâmica do problema irá se alterar. A Equação 3.53 apresenta a aceleração do conjunto ferrolho e impulsor do ferrolho nessa fase de amortecimento. Vale ressaltar que o fim da simulação ocorrerá no instante em que a velocidade do ferrolho se tornar nula, indicando que o sistema voltou para posição inicial.

$$F_{CA} - F_{M_{Ferrolho}} - Fat_{(IF+F)-A} = (M_{IF} + M_F) a_F \quad (3.53)$$

3.7.5 Torques

3.7.5.1 Ejeção

A ejeção pode ser subdividida em três fases distintas. A primeira representa o instante de contato entre o culote do estojo e o ejetor, com o estojo ainda sem rotação. Na segunda fase o estojo possui velocidade angular e rotação mas ainda está preso ao ferrolho devido à atuação do extrator. Na terceira fase ocorre finalmente o desacoplamento e o fim da ejeção. Como o trabalho se trata de um estudo plano do problema, a análise da ejeção será feita principalmente pelo deslocamento em Y da munição e rotação ao longo do eixo Z. A Figura 51 representa a primeira fase da ejeção e indica alguns parâmetros geométricos importantes para os cálculos.

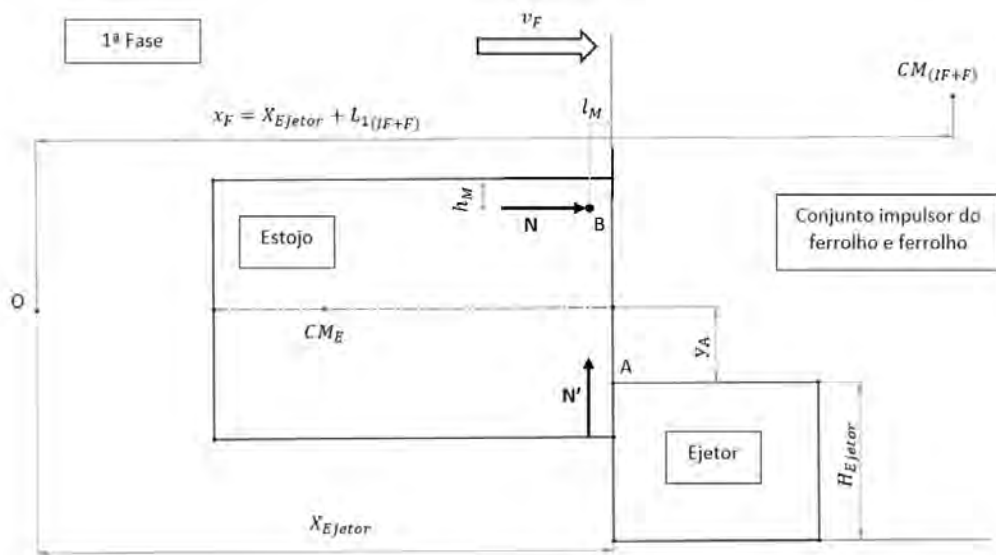


Figura 51 – Primeira fase ejeção (Autoria Própria)

A condição para o início da ejeção é a posição do centro de massa do conjunto $CM_{(IF+F)}$ ser aquela indicada na Figura 51. Isto ocorre durante o recuo do ferrolho, indicado pelo sentido da velocidade v_F do mesmo. O ponto B é o ponto de atuação do extrator, ligeiramente abaixo da extremidade do estojo devido ao ressalto de altura h_M no culote de largura l_M , e a normal N é a força que faz com que a aceleração em X do estojo e do conjunto sejam iguais, já que o estojo nessa fase não possui rotação. Esse ponto B pode ser definido pela Equação 3.54 através da geometria do problema.

$$\begin{aligned} x_B &= x_F - L_{1(IF+F)} - l_M \\ y_B &= \frac{D_{oEstojo}}{2} - h_M \end{aligned} \quad (3.54)$$

A normal N' , Equação 3.55, representa a força que sustenta o estojo e impede seu movimento em Y desde o início do recuo até a primeira fase da ejeção. Dessa forma:

$$N' = M_E g \quad (3.55)$$

O ponto A é o ponto de atuação do ejeter de altura H_{Ejeter} . É neste ponto que atuará a força de contato entre estojo e ejeter que será a principal força durante a ejeção. O ponto A é fixo pois o ejeter está solidário à armação do armamento e suas coordenadas podem ser definidas utilizando a Equação 3.56.

$$\begin{aligned} x_A &= X_{Ejeter} \\ y_A &= y_{0F} - H_{1(IF+F)} + H_{Ejeter} \end{aligned} \quad (3.56)$$

A Figura 52 indica a segunda fase da ejeção. Nesta fase a aceleração do estojo e do conjunto não podem ser igualadas, e para eliminar as forças intermediárias entre os corpos podem ser adotadas duas estratégias: utilização de vínculo geométrico para garantir que o ponto C mantenha o contato entre os corpos ou utilização de força de contato. Será utilizado o segundo método devido ao escopo do próprio trabalho.

A Equação 3.58 calcula a força de contato entre o estojo e o ferrolho F'_{cE} , sendo $k_{Ferrolho}$ a constante de rigidez correspondente do ferrolho e δ a deformação. Essa deformação pode ser obtida através da geometria do problema de acordo a Equação 3.59. O sinal negativo para a rotação do estojo θ_E é devido a orientação do eixo Z.

Primeiramente será necessário definir o ponto C em função da posição do centro de massa do estojo, Equação 3.57.

$$\begin{aligned} x_C &= x_E + L_{2E} \cos\theta_E - \frac{D_{oEstojo}}{2} \sin\theta_E \\ y_C &= y_E + L_{2E} \sin\theta_E + \frac{D_{oEstojo}}{2} \cos\theta_E \end{aligned} \quad (3.57)$$

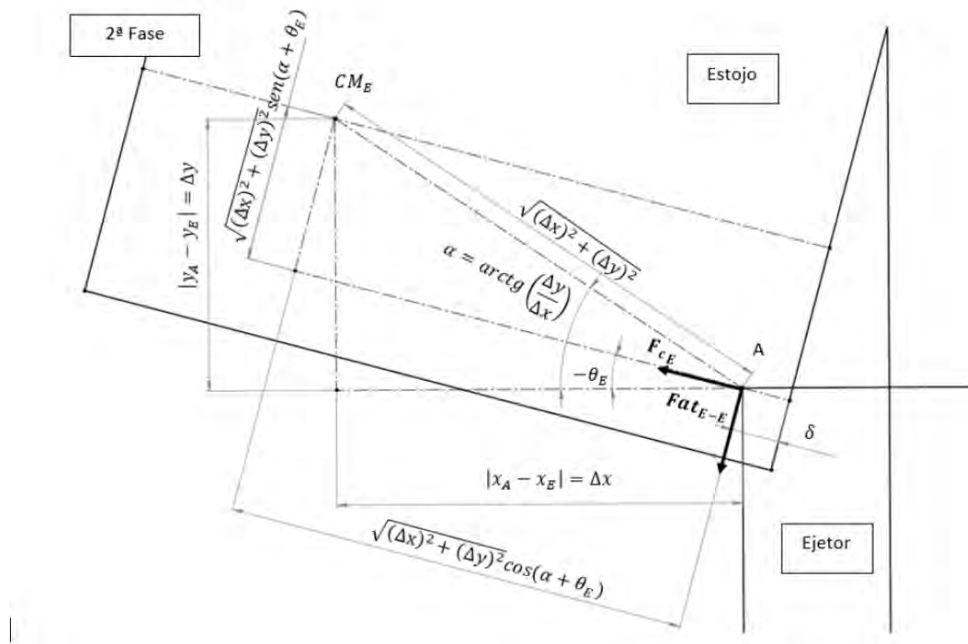


Figura 53 – Segunda fase ejeção - Força de contato (Autoria Própria)

A Equação 3.61 calcula a força de contato entre o estojo e o ejetor F_{cE} , sendo $k_{Ejettor}$ a constante de rigidez correspondente do ejetor e δ a deformação. Essa deformação pode ser obtida através da geometria do problema de acordo a Equação 3.62.

$$F_{cE} = k_{Ejettor} \delta^{1.5} \quad (3.61)$$

$$\delta = L_{2E} - \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \cos(\alpha + \theta_E) \quad (3.62)$$

Além da força de contato, como consequência, surge também uma força de atrito entre o estojo e o ejetor Fat_{E-E} . Essa força pode ser calculada pela Equação 3.63 em que μ_{E-E} é o coeficiente de atrito cinético entre os componentes.

$$Fat_{E-E} = \mu_{E-E} F_{cE} \quad (3.63)$$

Além das duas forças de contato apresentadas, também existirá a força que o extrator exerce sobre o estojo. Para o cálculo dessa força, será considerado que o extrator está acoplado ao ferrolho através de uma mola de constante de rigidez $K_{Extrator}$ e deformação inicial $\delta_{Extrator}$. Como auxílio, será utilizada a Figura 54, em que o ponto de atuação do extrator sai do ponto B para o ponto B'. Isso causa a distensão da mola do extrator δ e consequentemente uma força contrária $F_{M_{Extrator}}$.

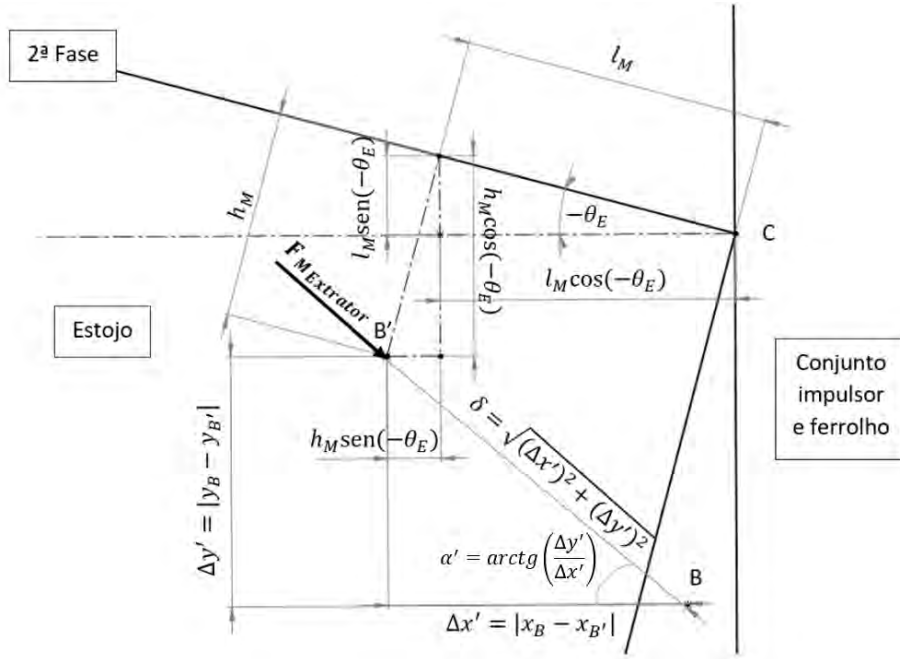


Figura 54 – Segunda fase ejeção - Força da mola do extrator (Autoria Própria)

O novo ponto de atuação do extrator B' pode ser definidor pela Equação 3.64.

$$\begin{aligned} x_{B'} &= x_C - l_M \cos \theta_E + h_M \sin \theta_E \\ y_{B'} &= y_C - l_M \sin \theta_E - h_M \cos \theta_E \end{aligned} \quad (3.64)$$

A força da mola possui um direção de α' em relação à horizontal e seu valor pode ser encontrado pela Equação 3.65.

$$F_{M_{Extrator}} = K_{Extrator} (\sqrt{(\Delta x')^2 + (\Delta y')^2} + \delta_{Extrator}) \quad (3.65)$$

Com todas as forças definidas é possível construir as expressões dinâmicas do estojo e do ferrolho. A Equação 3.66 indica a aceleração no eixo X para o conjunto ferrolho e impulsor do ferrolho durante a segunda fase de ejeção.

$$F'_{C_E} - F_{M_{Ferrolho}} - Fat_{(IF+F)-A} = (M_{IF} + M_F) a_F \quad (3.66)$$

A Equação 3.67 indica a aceleração no eixo X e a Equação 3.68 a aceleração no eixo Y do estojo para a segunda fase de ejeção.

$$-F'_{C_E} - F_{C_E} \cos \theta_E + Fat_{E-E} \sin \theta_E + F_{M_{Extrator}} \cos \alpha' = M_E a_{E_x} \quad (3.67)$$

$$-M_E g - Fat_{E-F} - Fat_{E-E} \cos \theta_E - F_{C_E} \sin \theta_E - F_{M_{Extrator}} \sin \alpha' = M_E a_{E_y} \quad (3.68)$$

Por fim, a Equação 3.69 indica a aceleração angular do estojo $\ddot{\theta}_E$, em que I_E é o momento de inércia de massa do estojo que será calculado na próxima seção.

$$\begin{aligned} (y_C - y_E)F'_{cE} - (x_C - x_E)F_{at_{E-F}} - \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \text{sen}(\alpha + \theta_E)F_{cE} \\ - \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \text{cos}(\alpha + \theta_E)F_{at_{E-E}} - (x_{B'} - x_E)F_{M_{Extrator}} \text{sen}\alpha' \\ -(y_{B'} - y_E)F_{M_{Extrator}} \text{cos}\alpha' = I_E \ddot{\theta}_E \end{aligned} \quad (3.69)$$

O final da segunda fase ocorre quando o contato entre o estojo e o conjunto é desfeito, ou seja, a força F'_{cE} se torna nula. Com isso é possível se obter o tempo de desacoplamento. A imagem ilustrativa da terceira fase é muito semelhante à Figura 52, porém sem o contato no ponto C. Conseqüentemente, será necessário corrigir as equações dinâmicas dos corpos representadas pelas Equações 3.66, 3.67, 3.68 e 3.69. Para essa correção bastar anular nas expressões os termos relacionado com F'_{cE} e $F_{M_{Extrator}}$, simulando que o extrator deixou de atuar e o contato deixou de existir.

O fim da terceira fase ocorrerá quando a ejeção estiver completa. Para fins de análise, será observado o ângulo final que o estojo se encontra e a altura que o estojo alcança para determinar se a ejeção foi eficiente ou não.

3.7.5.2 Carregamento

Como já foi comentado anteriormente, o carregamento pode ser subdividido em três fases. Deslocamento horizontal da munição, subida na rampa e alinhamento com a câmara. Dessa forma, serão utilizadas as Figuras 44, 45 e 46 como base para identificar os parâmetros geométricos necessários para o cálculo das três forças de contato que surgem nesse processo.

Os cálculos das forças de contato serão realizados seguindo a mesma lógica utilizada no processo de ejeção do estojo, através da sobreposição dos componentes. A Figura 55 indica o instante inicial da primeira fase do carregamento e seus principais parâmetros geométricos. Vale ressaltar que as equações dinâmicas para movimento em X e Y já foram descritas anteriormente, sendo o foco deste capítulo encontrar o valor numérico das forças de contato e da aceleração angular da munição.

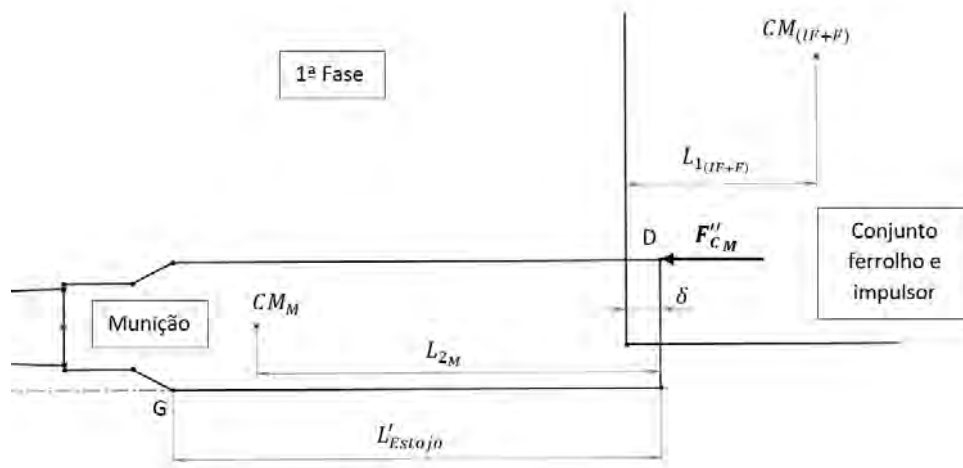


Figura 55 – Primeira fase carregamento - Força de contato (Autoria Própria)

Como pode ser visualizado na Figura 55, a deformação δ causa uma força de contato F''_{cM} entre o ferrolho e a munição no ponto de aplicação D. Nesta fase, como a coordenada Y do ponto D se mantém inalterada, não será considerado atrito proveniente da força de contato. Esta força pode ser calculada pela Equação 3.70 e a deformação pela Equação 3.71.

$$F''_{cM} = k_{Ferrolho} \delta^{1.5} \quad (3.70)$$

$$\delta = x_M + L_{2M} + L_{1(IF+F)} - x_F \quad (3.71)$$

Definir o lugar geométrico da rampa também será importante para análise das demais forças de contato. Com auxílio das Figuras 48 e 49, é possível definir a rampa através da Equação 3.72.

$$y_{Rampa} = -x_{Rampa} \tan \gamma - \frac{D_{iCâmara}}{2}, \quad 0 \leq x_{Rampa} \leq L_{Rampa} \cos \gamma \quad (3.72)$$

O fim da primeira fase ocorrerá no instante que o ponto G, Figura 55, entrar em contato com a rampa. Dessa forma, a Equação 3.73 indica a condição para o encerramento da primeira fase do carregamento.

$$\begin{aligned} x_G &= x_M + L_{2M} - L'_{Estojo} = L_{Rampa} \cos \gamma \\ x_M &= L_{Rampa} \cos \gamma + L'_{Estojo} - L_{2M} \end{aligned} \quad (3.73)$$

O início da segunda fase, subida na rampa, é mais difícil de se modelar pelo fato de ocorrer a situação descrita na Figura 56. Nela, além das duas forças de contato já

comentadas F_{CM} e F''_{CM} também surge outra força entre a munição e a rampa F'_{CM} no ponto de aplicação H devido à rotação da mesma.

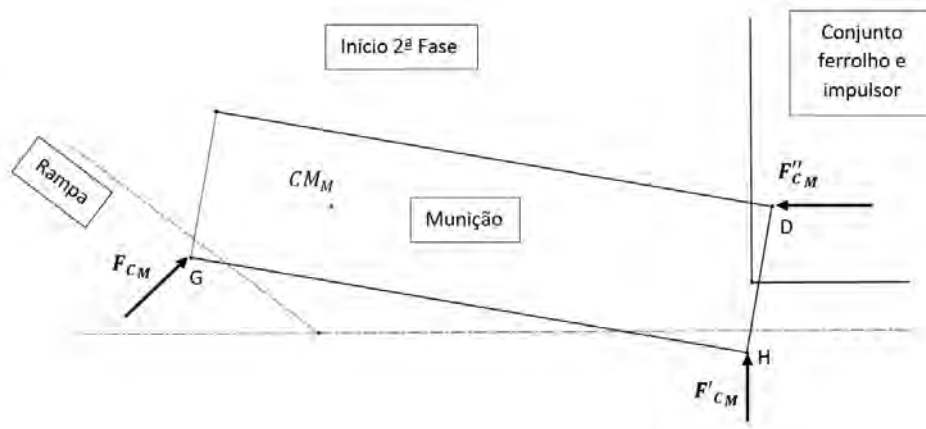


Figura 56 – Início segunda fase carregamento (Autoria Própria)

Será necessário analisar de forma mais detalhada os parâmetros geométricos relacionados à cada força. As Figuras 57, 58 e 59 irão auxiliar nessa análise. O ângulo de rotação da munição θ_M é negativo devido ao sentido positivo do eixo Z. As coordenadas do ponto D podem ser descritas pela Equação 3.74. A Equação 3.75 calcula novamente a força de contato F''_{CM} para a segunda fase do carregamento em que a deformação δ pode ser expressado pela Equação 3.76.

$$\begin{aligned}
 x_D &= x_M + L_{2M} \cos \theta_M - \frac{D_{o\text{Estojó}}}{2} \text{sen} \theta_M \\
 y_D &= y_M + L_{2M} \text{sen} \theta_M + \frac{D_{o\text{Estojó}}}{2} \cos \theta_M
 \end{aligned}
 \tag{3.74}$$

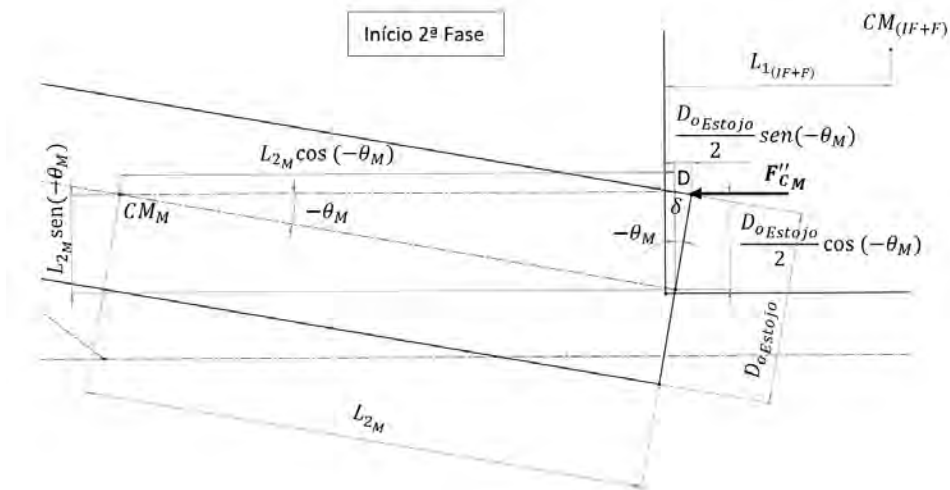


Figura 57 – Início segunda fase carregamento - Força de contato F''_{CM} (Autoria Própria)

$$F''_{cM} = k_{Ferrolho} \delta^{1.5} \quad (3.75)$$

$$\delta = x_D + L_{1(IF+F)} - x_F \quad (3.76)$$

Com auxílio da Figura 58 e da Equação 3.74 é possível encontrar as coordenadas do ponto H através da Equação 3.77.

$$\begin{aligned} x_H &= x_D + D_{oEstojjo} \text{sen}\theta_M \\ y_H &= y_D - D_{oEstojjo} \text{cos}\theta_M \end{aligned} \quad (3.77)$$

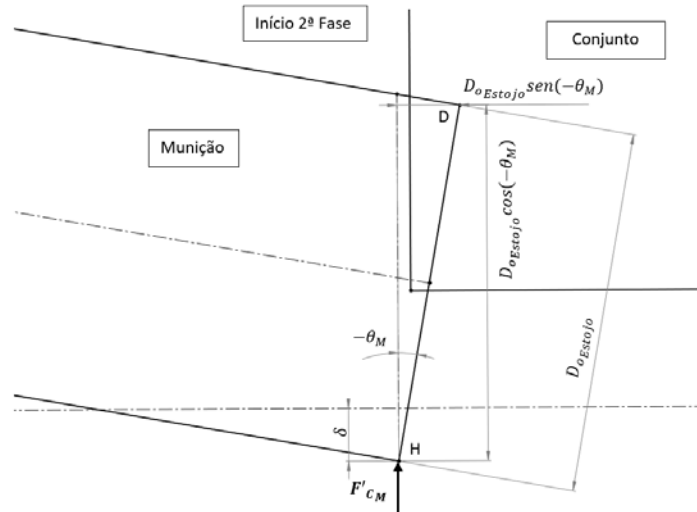


Figura 58 – Início segunda fase carregamento - Força de contato F'_{cM} (Autoria Própria)

A Equação 3.78 calcula a força de contato F'_{cM} para o início da segunda fase do carregamento em que a deformação δ pode ser expressado pela Equação 3.79 e k_{Rampa} é a constante de rigidez equivalente da rampa de carregamento.

$$F'_{cM} = k_{Rampa} \delta^{1.5} \quad (3.78)$$

$$\delta = y_{Rampa}(x_{Rampa} = L_{Rampa} \text{cos}\gamma) - y_H = -\frac{D_{iCâmara}}{2} - L_{Rampa} \text{sen}\gamma - y_H \quad (3.79)$$

Através da Figura 59 é possível encontrar as coordenadas do ponto G utilizando a Equação 3.80.

$$\begin{aligned} x_G &= x_M - (L'_{Estojo} - L_{2M})\cos\theta_M + \frac{D_{oEstojo}}{2}\sen\theta_M \\ y_G &= y_M - (L'_{Estojo} - L_{2M})\sen\theta_M - \frac{D_{oEstojo}}{2}\cos\theta_M \end{aligned} \quad (3.80)$$

O ponto G' é a projeção vertical do ponto G na reta da rampa de carregamento. Dessa forma, o ponto G' possui coordenadas descritas pela Equação 3.81.

$$\begin{aligned} x_{G'} &= x_G \\ y_{G'} &= y_{Rampa}(x_{Rampa} = x_{G'}) = -x_G \tan\gamma - \frac{D_{iCâmara}}{2} \end{aligned} \quad (3.81)$$

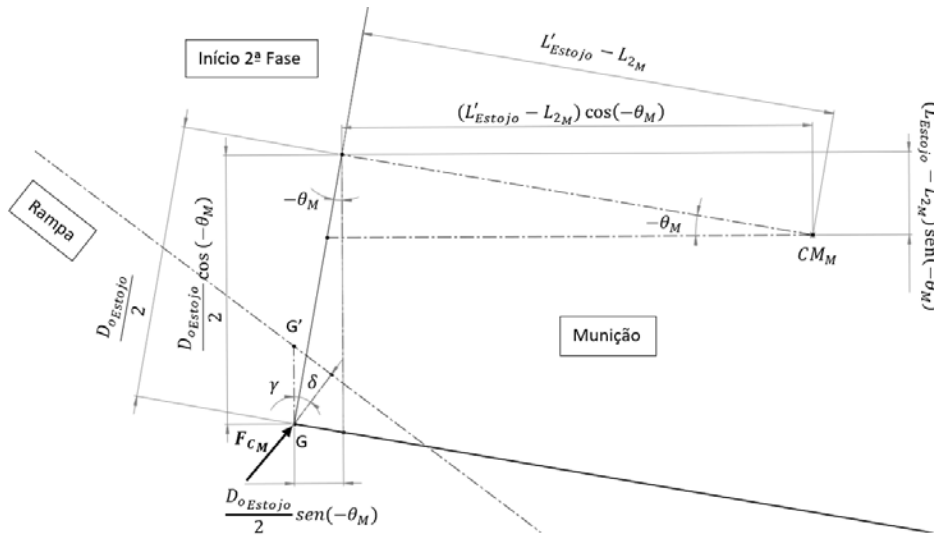


Figura 59 – Início segunda fase carregamento - Força de contato F_{C_M} (Autoria Própria)

A Equação 3.82 calcula a força de contato F_{C_M} para segunda fase do carregamento em que a deformação δ pode ser expressa pela Equação 3.83. Os pontos G e G' foram definidos anteriormente.

$$F_{C_M} = k_{Rampa} \delta^{1.5} \quad (3.82)$$

$$\delta = |(y_{G'} - y_G)|\cos\gamma \quad (3.83)$$

As Equações 3.84a, 3.84b e 3.84c indicam os torques gerados pelas forças F''_{C_M} , F'_{C_M} e F_{C_M} respectivamente.

$$\tau_{F_{C_M}''} = F_{C_M}''(y_D - y_M) \quad (3.84a)$$

$$\tau_{F_{C_M}'} = F_{C_M}'(x_H - x_M) \quad (3.84b)$$

$$\tau_{F_{C_M}} = F_{C_M} \text{sen}\gamma(y_M - y_G) - F_{C_M} \text{cos}\gamma(x_M - x_G) \quad (3.84c)$$

Além dos torques devido às forças de contato, existe também o torque relativo aos atritos. Esse torque pode ser expresso pela Equação 3.85. A força de atrito Fat'_{M-R} será calculada de forma semelhante à Fat_{M-R} , porém utilizando a força de contato F'_{C_M} ao invés de F_{C_M} .

$$\begin{aligned} \tau_{Fat} = & -Fat_{M-F}(x_D - x_M) + Fat'_{M-R}(y_M - y_H) \\ & + Fat_{M-R} \text{sen}\gamma(x_M - x_G) + Fat_{M-R} \text{cos}\gamma(y_M - y_G) \end{aligned} \quad (3.85)$$

Por fim, a Equação 3.86 indica a aceleração angular da munição $\ddot{\theta}_M$, em que I_M é o momento de inércia de massa da munição que será calculado na próxima seção.

$$\tau_{F_{C_M}''} + \tau_{F_{C_M}'} + \tau_{F_{C_M}} + \tau_{Fat} = I_M \ddot{\theta}_M \quad (3.86)$$

O início da segunda fase se encerra no instante em que o ponto H entra em contato com a subida da rampa de carregamento. Dessa forma, a condição para que isso ocorra é expressa pela Equação 3.87.

$$x_H = L_{Rampa} \text{cos}\gamma \quad (3.87)$$

Após a condição exposta pela Equação 3.87 ser atendida, a força de contato F'_{C_M} deixa de existir. Porém, a segunda fase possui outra complicação. O ponto de aplicação da força de contato com a rampa F_{C_M} dependendo da rotação da munição pode ser em G ou H. Para solucionar isso, o problema será dividido em dois casos como pode ser visto pela Figura 60.

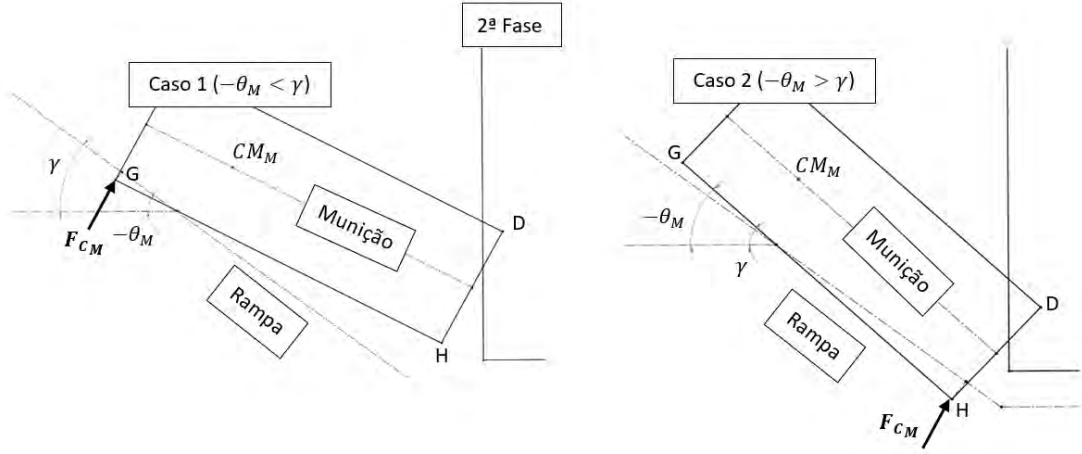


Figura 60 – Segunda fase carregamento - Casos (Autoria Própria)

Para o caso 1, o cálculo de F_{CM} será realizado de forma idêntica ao início da segunda fase, através das Equações 3.82 e 3.83. Para o caso 2, utilizando a mesma lógica de projeção vertical do ponto H até H' na rampa para encontrar a deformação δ , é possível encontrar definir o ponto H' através da Equação 3.88 e a deformação pela Equação 3.89.

$$x_{H'} = x_H$$

$$y_{H'} = y_{Rampa}(x_{Rampa} = x_{H'}) = -x_H \tan \gamma - \frac{D_{iCâmara}}{2} \quad (3.88)$$

$$\delta = |(y'_{H'} - y_H)| \cos \gamma \quad (3.89)$$

Conseqüentemente, os torques do problema também irão se alterar nessa etapa. A primeira modificação é que o torque devido à força F'_C não existirá mais. O torque devido à força F_{CM} para o caso 2 será diferente e pode ser expresso pelo Equação 3.90. O torque referente à força F''_{CM} se mantém inalterado.

$$\tau_{F_{CM}} = F_{CM} \sin \gamma (y_M - y_H) + F_{CM} \cos \gamma (x_H - x_M) \quad (3.90)$$

De forma análoga, o torque devido aos atritos também irá se modificar. As alterações que devem ser realizadas são retirar da expressão a força Fat'_{M-R} que atua somente no início da segunda fase e modificar a parcela referente à força Fat_{M-R} somente para o caso 2, Equação 3.91.

$$\tau_{Fat} = -Fat_{M-F}(x_D - x_M) - Fat_{M-R} \sin \gamma (x_H - x_M) + Fat_{M-R} \cos \gamma (y_M - y_H) \quad (3.91)$$

A Equação 3.92 indica a aceleração angular modificada da munição, aplicando as alterações comentada anteriormente.

$$\tau_{F_{C_M}''} + \tau_{F_{C_M}} + \tau_{Fat} = I_M \ddot{\theta}_M \quad (3.92)$$

No final da segunda fase ocorre outra modificação pois o ponto G perde o contato com a rampa de carregamento como pode ser visualizado na Figura 61. Novamente o problema pode ser dividido em dois casos, porém o caso 2 será o mesmo descrito pela Figura 60, assim como a força e o torque resultante. Para isso, a condição descrita pela Equação 3.93 deve ser atendida.

$$x_G \leq 0 \quad (3.93)$$

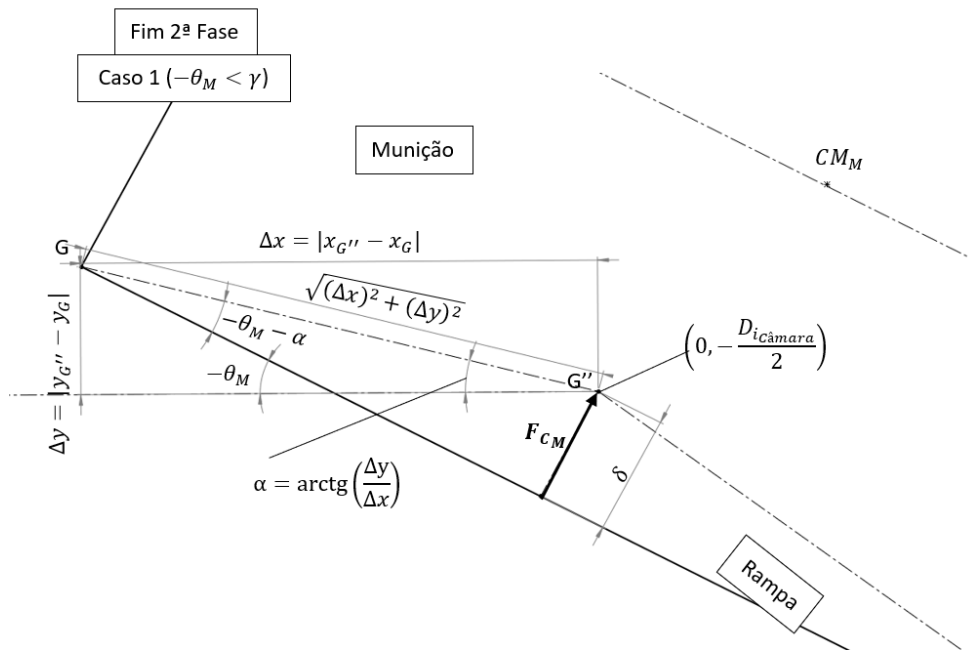


Figura 61 – Final segunda fase carregamento (Autoria Própria)

Observe que diferente das outras etapas, para o caso 1 a força de contato F_{C_M} é perpendicular à munição e não à superfície inclinada da rampa de carregamento e o ponto de aplicação da força é G'' , final da subida da rampa, cujas coordenadas estão descritas na Figura 61. A força de contato será calculada da mesma forma, porém utilizando uma deformação δ descrito pela Equação 3.94.

$$\delta = -sen(\theta_M + \alpha) \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (3.94)$$

Conseqüentemente, o torque devido à força F_{C_M} para o caso 1 irá se alterar, assim como o torque devido aos atritos. De forma análoga ao caso anterior, a força de contato

com o ferrolho F''_{C_M} se mantém inalterada. Com isso, as Equações 3.95 e 3.96 indicam o torque da força de contato com a rampa e o torque relativo aos atritos para o caso 1 no fim da segunda fase do carregamento.

$$\tau_{F_{C_M}} = -F_{C_M} \text{sen}\theta_M (y_M - y_{G''}) - F_{C_M} \text{cos}\theta_M (x_M - x_{G''}) \quad (3.95)$$

$$\begin{aligned} \tau_{Fat} = & -Fat_{M-F}(x_D - x_M) - Fat_{M-R} \text{sen}\theta_M (x_M - x_{G''}) \\ & + Fat_{M-R} \text{cos}\theta_M (y_M - y_{G''}) \end{aligned} \quad (3.96)$$

O cálculo da aceleração angular da munição pode ser realizado pela Equação 3.92. O final da segunda fase do carregamento ou começo da terceira e última fase ocorre no instante em que o estojo entra em contato com a parte superior e interna da câmara. Essa condição pode ser representada pela Equação 3.97.

$$\begin{aligned} x_I &= x_G - D_{o_{Estojo}} \text{sen}\theta_M \leq 0 \\ y_I &= y_G + D_{o_{Estojo}} \text{cos}\theta_M = \frac{D_{i_{Câmara}}}{2} \end{aligned} \quad (3.97)$$

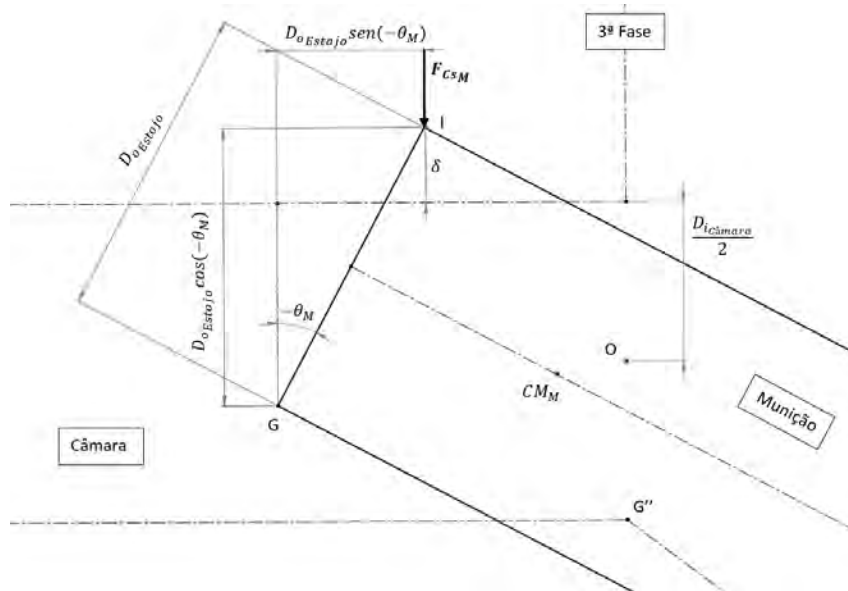


Figura 62 – Terceira fase carregamento - Força de contato $F_{C_{SM}}$ (Autoria Própria)

Note que devido ao contato do estojo com a câmara, surge a força de contato $F_{C_{SM}}$ no ponto de aplicação I, cujas coordenadas podem ser obtidas pela Equação 3.97. Nesta última fase não faz sentido dividir o problema em dois casos novamente como foi feito na segunda fase pois a força $F_{C_{SM}}$ fará com a rotação da munição diminua e se mantenha sempre no caso 1.

A Equação 3.98 calcula a força de contato F_{CsM} para terceira fase do carregamento em que a deformação δ pode ser expressa pela Equação 3.83. $k_{C\hat{a}mara}$ é a constante de rigidez correspondente da câmara do armamento.

$$F_{CsM} = k_{C\hat{a}mara} \delta^{1.5} \quad (3.98)$$

$$\delta = y_I - \frac{D_{iC\hat{a}mara}}{2} \quad (3.99)$$

Novamente o torque devido à força F_{C_M}'' não se altera e durante a terceira fase para o cálculo do torque da força F_{C_M} será utilizado a Equação 3.95, caso 1 do final da segunda fase. As Equações 3.100 e 3.101 indicam o torque da força de contato com a câmara e o torque relativo aos atritos durante a terceira fase.

$$\tau_{F_{CsM}} = F_{CsM}(x_M - x_I) \quad (3.100)$$

$$\begin{aligned} \tau_{Fat} = & -Fat_{M-F}(x_D - x_M) - Fat_{M-R} \text{sen}\theta_M(x_M - x_{G''}) \\ & + Fat_{M-R} \text{cos}\theta_M(y_M - y_{G''}) - Fat_{M-C}(y_I - y_M) \end{aligned} \quad (3.101)$$

Para a terceira fase, a aceleração angular será calculada através da Equação 3.102. O fim da terceira fase e conseqüentemente o fim do carregamento ocorrerá no instante em que a rotação da munição for nula, ou seja, alinhamento com a câmara. Quando isto ocorrer será considerado que o extrator irá começar a atuar e manterá seu correto alinhamento até a que ejeção ocorra após o disparo.

$$\tau_{F_{C_M}''} + \tau_{F_{C_M}} + \tau_{F_{CsM}} + \tau_{Fat} = I_M \ddot{\theta}_M \quad (3.102)$$

3.7.5.3 Ferrolho

De forma semelhante ao estojo e à munição, o conjunto ferrolho e impulsor do ferrolho também possui grau de liberdade para rotacionar ao longo do eixo Z. Porém esse movimento é muito mais limitado devido ao próprio espaço dentro da armação. Devido à isso, como já foi comentado anteriormente, não foi considerado que a rotação do ferrolho irá interferir na rotação dos demais corpos.

Pode-se dividir a rotação do ferrolho em dois casos distintos, como pode ser observado na Figura 63. Para melhor análise das forças de contato para cada caso, serão separados os casos com os parâmetros geométricos importantes para os cálculos.

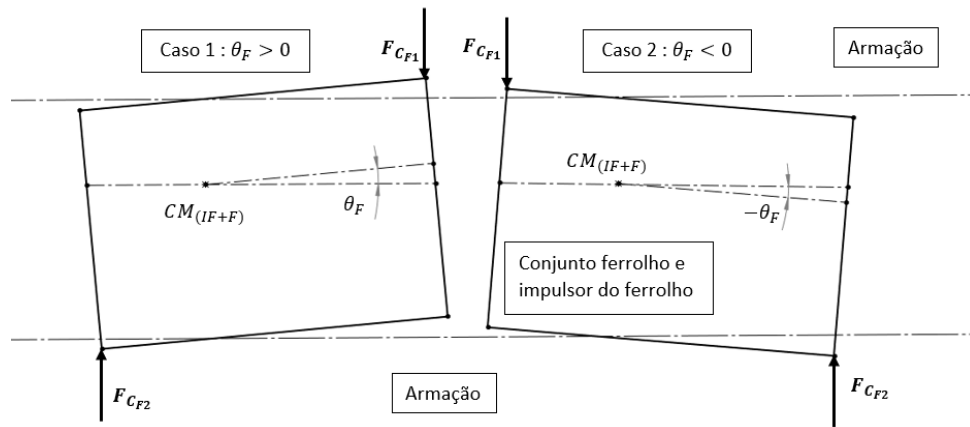


Figura 63 – Casos de rotação para conjunto impulsor e ferrolho (Autoria Própria)

A Figura 64 representa o caso 1, no qual as forças de contato com a armação $F_{C_{F1}}$ e $F_{C_{F2}}$ estão aplicadas nos pontos J e K respectivamente, assim como as forças de atrito F_{at1} e F_{at2} . O sentido das forças de atrito variam de acordo com o sentido de movimento do conjunto. Os pontos J e K podem ser representados pelas Equações 3.103 e 3.104.

$$\begin{aligned} x_J &= x_F + L_{2(IF+F)} \cos\theta_F - H_{2(IF+F)} \text{sen}\theta_F \\ y_J &= y_F + L_{2(IF+F)} \text{sen}\theta_F + H_{2(IF+F)} \cos\theta_F \end{aligned} \quad (3.103)$$

$$\begin{aligned} x_K &= x_F - L_{1(IF+F)} \cos\theta_F + H_{1(IF+F)} \text{sen}\theta_F \\ y_K &= y_F - L_{1(IF+F)} \text{sen}\theta_F - H_{1(IF+F)} \cos\theta_F \end{aligned} \quad (3.104)$$

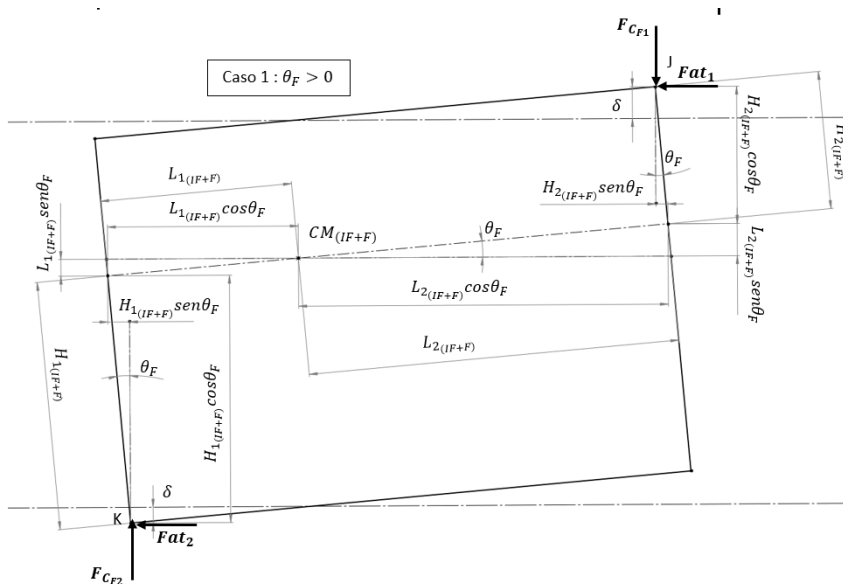


Figura 64 – Caso 1 rotação para conjunto ferrolho e impulsor (Autoria Própria)

A Equação 3.105 calcula a força de contato $F_{c_{F1}}$ para o primeiro caso de rotação do conjunto, em que a deformação δ pode ser expressada pela Equação 3.106.

$$F_{c_{F1}} = k_{Armação} \delta^{1.5} \quad (3.105)$$

$$\delta = y_J - (y_{0F} + H_{2(IF+F)}) \quad (3.106)$$

As forças de atrito Fat_1 e Fat_2 serão calculadas pelo produto entre a força de contato correspondente e o coeficiente de atrito cinético entre o conjunto e a armação $\mu_{(IF+F)-A}$. A Equação 3.107 calcula a força de contato $F_{c_{F2}}$ para o primeiro caso de rotação do conjunto, em que a deformação δ pode ser expressada pela Equação 3.108.

$$F_{c_{F2}} = k_{Armação} \delta^{1.5} \quad (3.107)$$

$$\delta = y_{0F} - H_{1(IF+F)} - y_K \quad (3.108)$$

Os torques gerados pelas forças de contato $\tau_{F_{CF}}$ e pelos atritos $\tau_{Fat_{(IF+F)-A}}$ podem ser expressos pelas Equações 3.109 e 3.110.

$$\tau_{F_{CF}} = -F_{c_{F1}}(x_J - x_F) - F_{c_{F2}}(x_F - x_K) \quad (3.109)$$

$$\tau_{Fat_{(IF+F)-A}} = Fat_1(y_J - y_F) - Fat_2(y_F - y_K) \quad (3.110)$$

A Figura 65 representa o caso 2, no qual as forças de contato com a armação $F_{c_{F1}}$ e $F_{c_{F2}}$ estão aplicadas nos pontos L e N respectivamente, assim como as forças de atrito Fat_1 e Fat_2 . Os pontos L e N podem ser representados pelas Equações 3.111 e 3.112, tomando como base o ponto K já definido anteriormente.

$$x_L = x_K - H_{Conjunto} \text{sen} \theta_F \quad (3.111)$$

$$y_L = y_K + H_{Conjunto} \text{cos} \theta_F$$

$$x_N = x_K + L_{Conjunto} \text{cos} \theta_F \quad (3.112)$$

$$y_N = y_K + L_{Conjunto} \text{sen} \theta_F$$

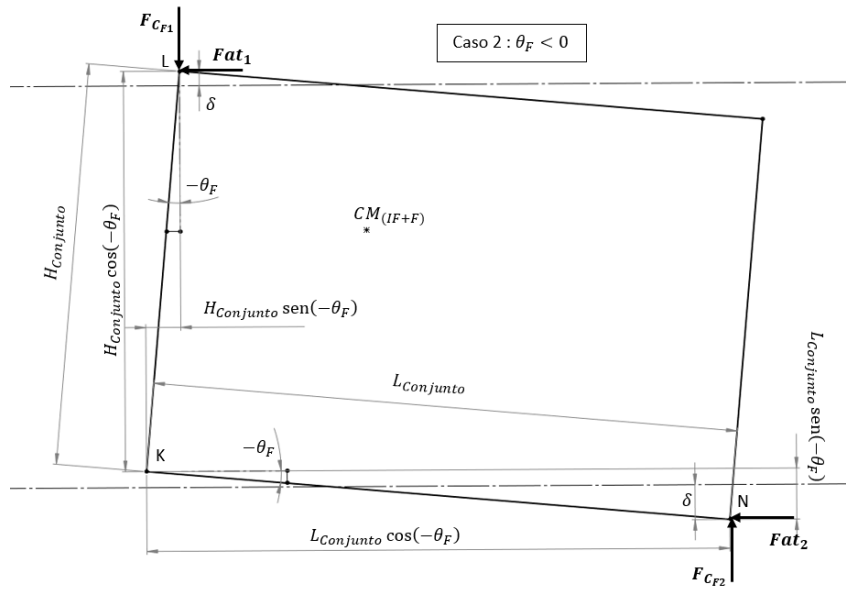


Figura 65 – Caso 2 rotação para conjunto ferrolho e impulsor (Autoria Própria)

De maneira análoga ao primeiro caso, as forças de contato serão calculadas da mesma forma, assim como as deformações e as forças de atrito, trocando apenas os índices J e K por L e N respectivamente. Para ambos os casos, a força total de atrito que atua no conjunto pode ser expressa pela Equação 3.113.

$$Fat_{(IF+F)-A} = Fat_1 + Fat_2 \quad (3.113)$$

Além das forças de contato e atrito com a armação, outras forças influenciam na dinâmica do conjunto ferrolho e impulsor. como pode ser visualizado na Figura 66. Vale ressaltar que essas forças não atuam de forma simultânea no conjunto, sendo numericamente nulas na maior parte do ciclo.

A normal entre o êmbolo e o conjunto $N_{\hat{E}}$, com uma altura de atuação $H_{\hat{E}mbolo}$, pode ser obtida pela dinâmica do conjunto do êmbolo e irá influenciar apenas até o primeiro desacoplamento no instante $t_{Desacoplamento_1}$. As forças de contato e seus respectivos atritos que atuam nos pontos C e D são referentes às fases de ejeção e carregamento.

A normal entre a munição e o conjunto N_M atua enquanto a munição ainda se encontra no carregador e pode ser melhor visualizada na Figura 42. Numericamente é desprezível quando comparada com as demais forças. Por último, tem-se a força da mola recuperadora que irá atuar com uma altura de H_{Mola} tomando como referência o centro de massa do conjunto.

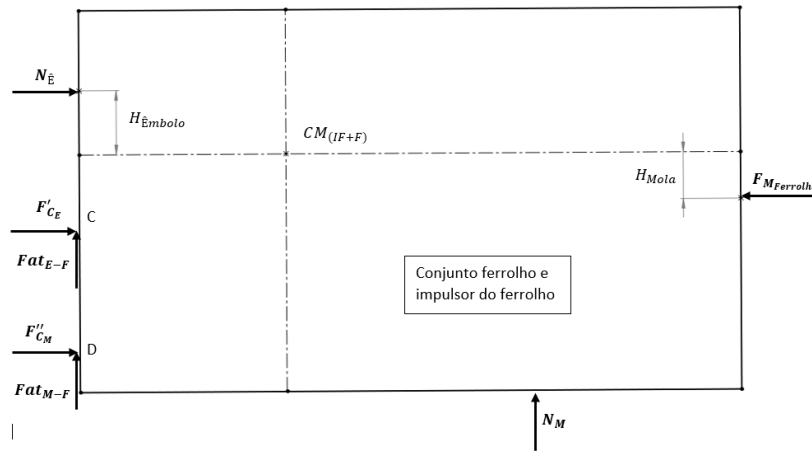


Figura 66 – Forças no conjunto ferrolho e impulsor (Autoria Própria)

O torque resultante das demais forças τ_F pode ser obtido pela Equação 3.114.

$$\tau_F = -N_{\tilde{E}}H_{\tilde{Embolo}} + F'_{C_E}(y_F - y_C) - Fat_{E-F}(x_F - x_C) + F''_{C_M}(y_F - y_D) - Fat_{M-F}(x_F - x_D) - F_{M_{Ferrolho}}H_{Mola} \quad (3.114)$$

Por fim, a Equação 3.115 indica a aceleração angular do conjunto ferrolho e impulsor $\ddot{\theta}_F$, em que I_F é o momento de inércia de massa do conjunto que será calculado na próxima seção.

$$\tau_F + \tau_{F_{C_F}} + \tau_{Fat_{(IF+F)-A}} = I_F \ddot{\theta}_F \quad (3.115)$$

4 SOLUÇÃO NUMÉRICA

No presente capítulo serão comentados aspectos importantes sobre a solução numérica. Vale ressaltar que devido à complexidade das equações e quantidade de variáveis, não foram encontradas soluções analíticas. Na Seção 4.1 será apresentado o método utilizado para realizar as integrações numéricas e na Seção 4.2 o fluxograma do código desenvolvido no *MATLAB*.

4.1 Método Direto

Foi utilizado nos programas desenvolvidos o método da reta tangente ou método de Euler explícito. De acordo com Machado (2020) é um dos métodos numéricos mais antigos, e devido à principalmente sua simplicidade é muito utilizado. Considerando um problema de valor inicial (PVI) qualquer expresso pela Equação 4.1.

$$y' = f(x, y) \quad y(x_0) = y_0 \quad (4.1)$$

O método de Euler é baseado na expansão da função $y(x)$ em séries de Taylor. Dessa forma, pode-se expandir a função $y(x)$ na vizinhança do ponto x_n até a primeira ordem, como pode ser visto na Equação 4.3.

$$y(x_n + h) \cong y(x_n) + h \cdot y'(x_n) \quad (4.2)$$

$$y(x_n + h) \cong y(x_n) + h \cdot f(x_n, y(x_n)) \quad (4.3)$$

Para $n = 0$ o método aproxima o valor y_1 do valor exato $y(x_1)$. Ao continuar esse procedimento para os pontos $x_2, x_3, x_4 \dots x_n$ encontram-se as aproximações $y_2, y_3, y_4 \dots y_n$ dos valores exatos $y(x_2), y(x_3), y(x_4) \dots y(x_n)$. Para o código do *MATLAB* o valor inicial de n será 1 por motivo de sintaxe, e a expressão utilizada para cada passo é representada pela Equação 4.4.

$$y_{n+1} = y_n + h \cdot f(x_n, y_n) \quad \text{para } n = 1, 2, 3 \dots \quad (4.4)$$

Na Figura 67 pode-se observar como o método realiza as aproximações graficamente. É traçada a reta tangente ao ponto inicial, índice 0, e a aproximação da função estará contida nessa mesma reta após um passo de h , índice 1. Tendo em vista que está sendo utilizado um passo grande, ocorre uma discrepância significativa em relação ao valor exato.

Com isso, é possível concluir que o erro e o passo são grandezas proporcionais (MACHADO, 2020).

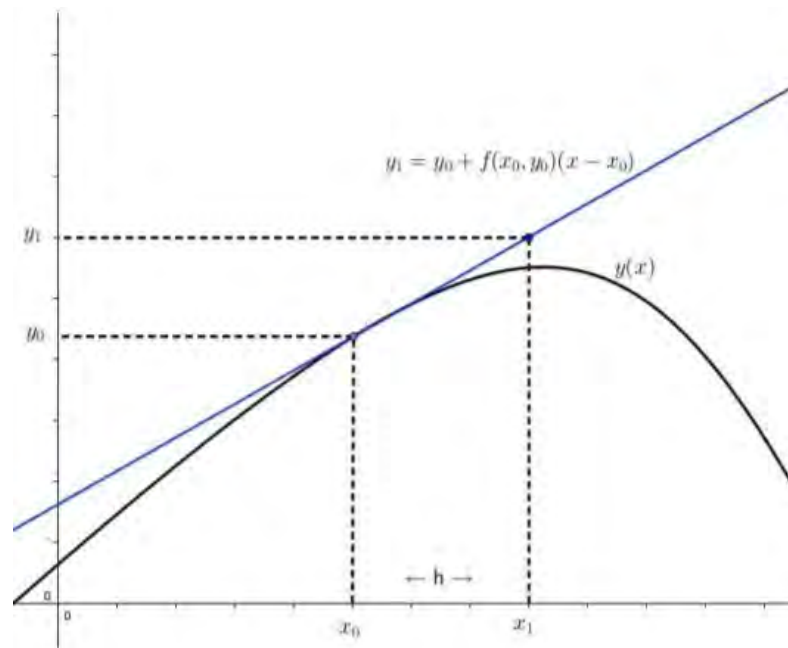


Figura 67 – Primeira iteração utilizando o método de Euler (MACHADO, 2020)

Existem outros métodos que possuem aproximações com menores erros como por exemplo o Euler melhorado e o Runge-Kutta, porém não foram empregados uma vez que os resultados utilizando Euler foram satisfatórios. Uma desvantagem do método de Euler é a propagação do erro, e por isso para este trabalho foram utilizados passos fixos h bem pequenos de 10^{-6} , como forma de compensar essa propagação e também devido a ordem de grandeza do tempo quando se trata de um disparo e ciclagem do armamento. É válido comentar que não é o foco do trabalho otimizar o código de uma maneira geral, e sim cumprir os objetivos propostos e obter resultados coerentes.

Para o código em si, foi utilizado o método para resolver integrais numericamente, por exemplo para se obter a velocidade a partir da aceleração e a posição a partir da velocidade em um determinado tempo, Equações 4.5 e 4.6, no qual a aceleração a_n é obtida pela força resultante e massa do corpo analisado e dt é o próprio passo fixo. Assim, foi possível encontrar e armazenar todos os parâmetros de interesse para cada instante, que serão utilizados na plotagem dos gráficos posteriormente.

$$v_{n+1} = v_n + a_n dt \quad (4.5)$$

$$x_{n+1} = x_n + v_{n+1} dt \quad (4.6)$$

4.2 Fluxograma

Segundo Fred (2015), o fluxograma é a representação gráfica da sequência de atividades de um processo. Além disso, mostra o que é realizado em cada etapa, as entradas e saídas e as decisões que devem ser tomadas. Auxilia principalmente na identificação de oportunidades de melhoria e disseminar informações sobre o processo.

O fluxograma representado pelas Figuras 68 e 69 contém um detalhamento do algoritmo desenvolvido. Pode-se observar que o problema foi dividido em 9 etapas, cada uma representando fases distintas que ocorrem na ciclagem do armamento. Essas etapas em ordem são: destrancamento, desacoplamento do êmbolo, contato do estojo com ejetor, contato do estojo com ferrolho, ejeção, fim do recuo/apresentação, avanço/contato com munição, carregamento e final do avanço. O fim de cada etapa representa o começo da próxima. A Tabela 6 apresenta qual processo ocorre em cada etapa, assim como as entradas, saídas e condições de parada.

Tabela 6 – Etapas do algoritmo desenvolvido (Autoria Própria)

Etapa	Entrada	Processo	Condição de parada	Saída
1	Vetor cinemático inicial impulsor	Movimento do impulsor até que o destrancamento ocorra	Deslocamento > Valor predefinido	Armazenamento Vetor cinemático impulsor
2	Vetor cinemático inicial conjunto impulsor e ferrolho	Movimento do conjunto até o êmbolo perder o contato com o impulsor	Normal de contato <0	Armazenamento Vetor cinemático conjunto
3	Vetor cinemático conjunto	Movimento do conjunto até o primeiro contato do ejetor com o estojo	Deslocamento >Xejeção	Armazenamento Vetor cinemático conjunto
4	Vetor cinemático inicial estojo + Vetor cinemático conjunto	Primeira fase da ejeção (Movimento conjunto + estojo) enquanto ainda existe contato entre ambos	Força de contato = 0	Armazenamento Vetor cinemático conjunto + Vetor cinemático estojo
5	Vetor cinemático estojo	Movimento do estojo até o final da ejeção	Tempo > Tempo predefinido	Armazenamento vetor cinemático estojo e Final da ejeção
6	Vetor cinemático conjunto + Vetor cinemático inicial munição	Movimento do conjunto até o final do recuo e Apresentação da munição	Velocidade conjunto <0	Armazenamento vetor cinemático conjunto + Vetor cinemático munição
7	Vetor cinemático conjunto	Movimento de avanço do conjunto até primeiro contato com a munição	Deslocamento <Xcarregador	Armazenamento vetor cinemático conjunto
8	Vetor cinemático conjunto + Vetor cinemático munição	Fase de carregamento (Movimento conjunto + estojo) até alinhamento da munição com câmara	Munição alinhada com câmara (Ângulo nulo)	Armazenamento vetor cinemático conjunto + Vetor cinemático munição
9	Vetor cinemático conjunto	Final do avanço do conjunto + Amortecimento	Velocidade conjunto >0	Armazenamento vetor cinemático conjunto

Vetor cinemático - (Posição, Velocidade, Ângulo, Velocidade angular)

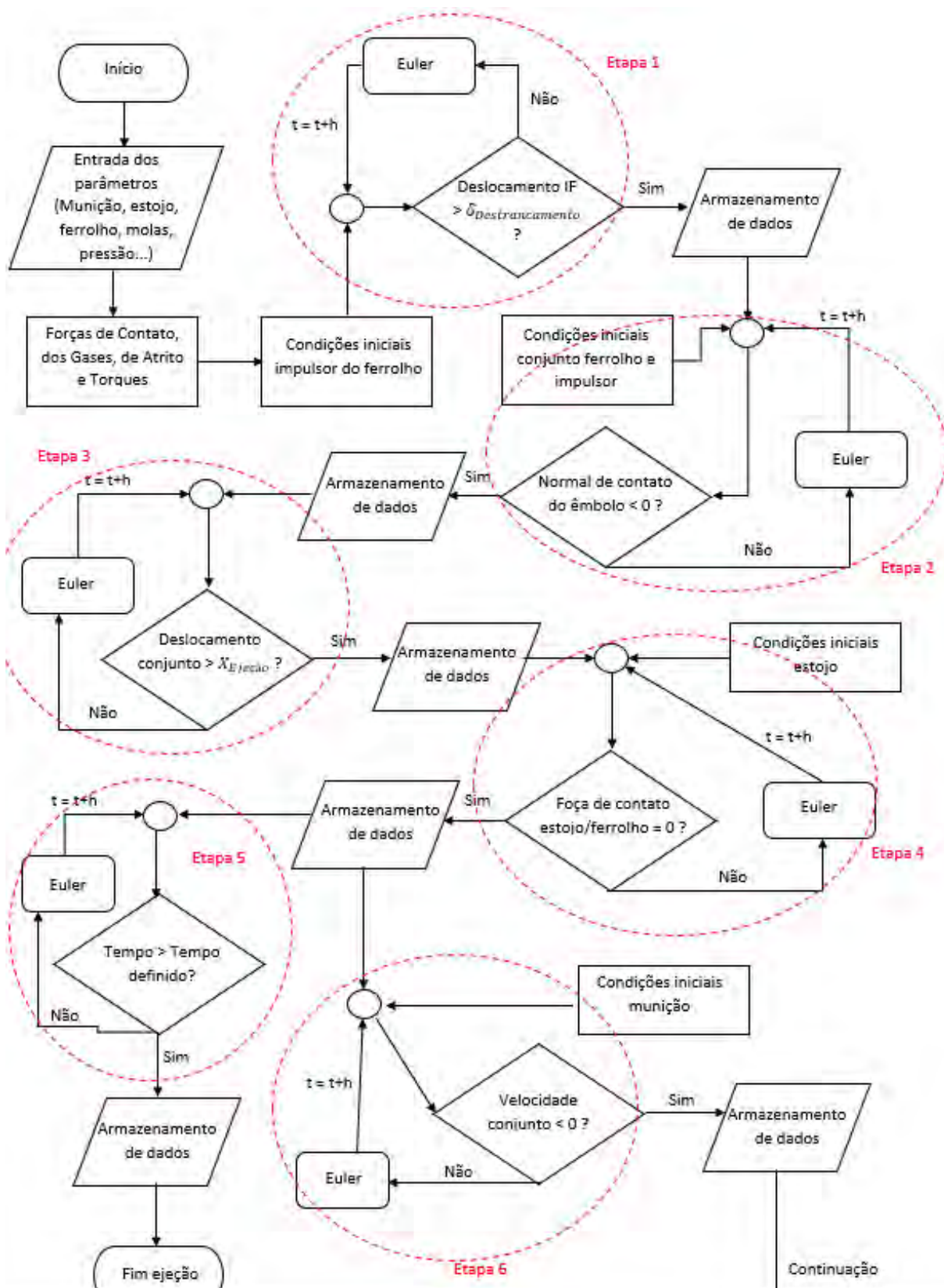


Figura 68 – Fluxograma do algoritmo desenvolvido - Parte 1 (Autoria Própria)

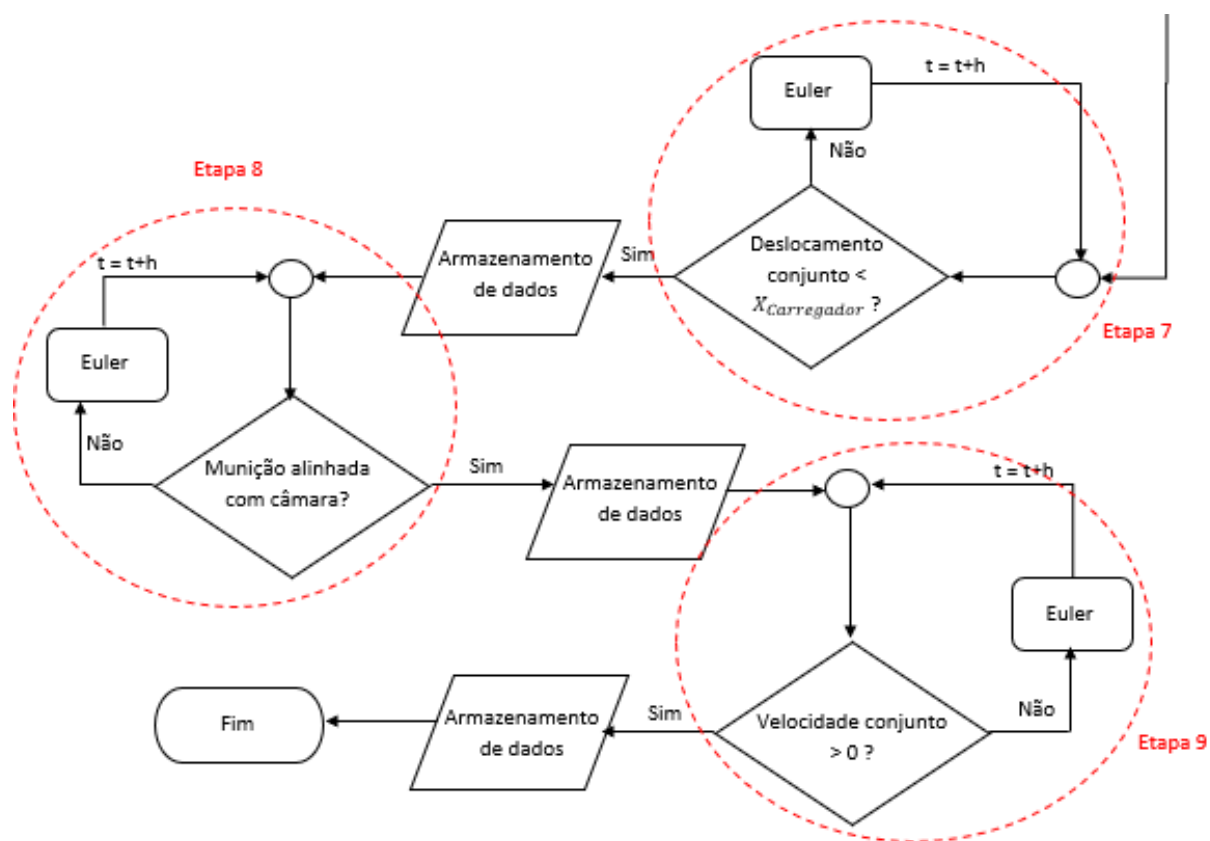


Figura 69 – Fluxograma do algoritmo desenvolvido - Parte 2 (Autoria Própria)

5 PARÂMETROS CONSIDERADOS NA SIMULAÇÃO

No presente capítulo será comentado sobre a obtenção de todos os parâmetros considerados na simulação citados anteriormente no texto do trabalho, necessários para o correto funcionamento do algoritmo e obtenção dos resultados que serão discutidos no Capítulo 6. Vale ressaltar que não foi possível realizar a medição de todos os parâmetros, principalmente pela dificuldade de certas medições e por não ser o foco do trabalho. Dessa forma, alguns parâmetros estarão aproximados e outros serão obtidos de referências externas. Os equipamentos utilizados nas medições foram paquímetro, balança e régua, como mostra a Figura 70. No Anexo A podem ser encontrados os dados retirados do *PRODAS*.

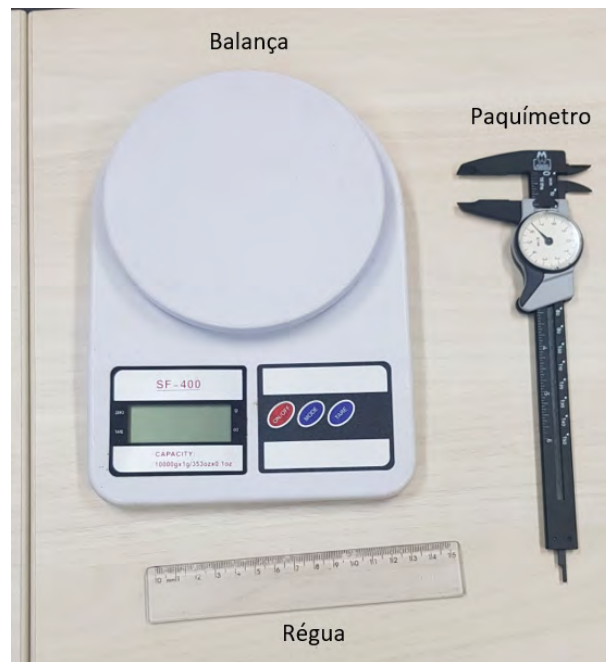


Figura 70 – Equipamentos utilizados na medição (Autoria Própria)

Na Figura 71 se verifica o valor de X_{Evento} e com isso calcula-se a distância que o projétil deve percorrer no cano após o disparo para que ocorra a admissão de gás no evento e o processo de destrancamento se inicie. Além disso, é possível visualizar também o cilindro de gases, o êmbolo e a mola do êmbolo.



Figura 71 – Medição da posição do evento de admissão (Autoria Própria)

Com a posição do evento definida e com auxílio do *PRODAS*, a perda de pressão em relação a câmara ΔP e a pressão P_{Evento} que atua no cilindro de gases podem ser visualizadas na Figura 72. O diâmetro do evento D_{Evento} que atuará essa pressão foi medido em $11.9mm$.

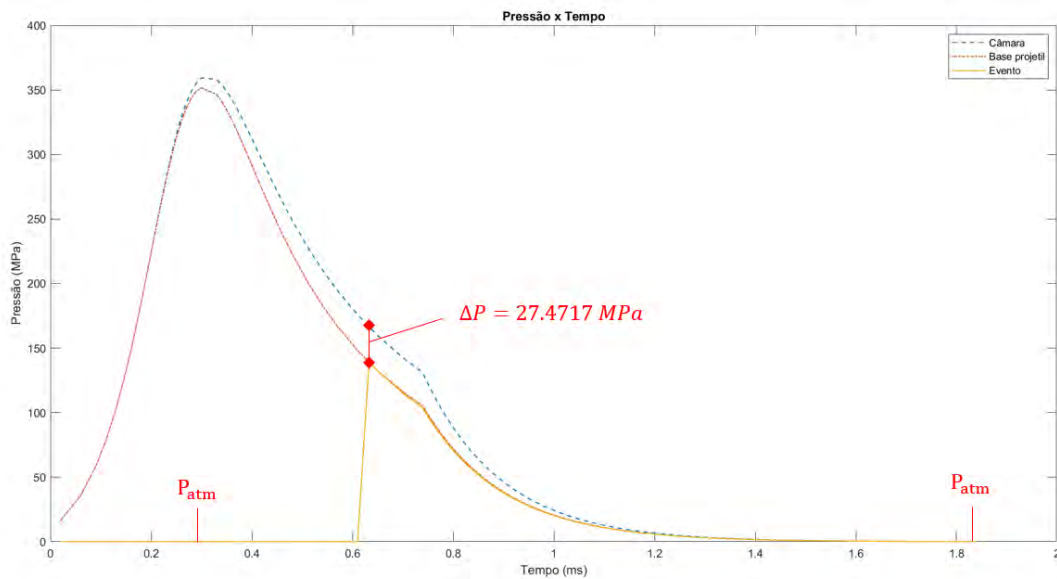


Figura 72 – Pressão no evento de admissão (Autoria Própria)

A obtenção das massas dos corpos foi realizada utilizando a balança, conforme mostra a Figura 73. De forma análoga foram obtidas as massas M_{IF} , M_F , M_{CG} e M_E . A pesagem da munição e do estojo não foi feita no laboratório pela falta desses elementos, até mesmo por questões de segurança. Para a munição foi utilizado o valor descrito na Tabela 3. Já a massa do estojo foi calculada subtraindo a massa do propelente e do projétil, obtidas pelo *PRODAS*, da massa total da munição. Com isso, a Tabela 7 indica todas as massa relevantes para o problema.



Figura 73 – Pesagem do conjunto ferrolho e impulsor (Autoria Própria)

Tabela 7 – Massas dos elementos (Autoria Própria)

Elemento	Impulsor	Ferrolho	Cilindro de Gases	Êmbolo
Massa (g)	350	63	25	61
Elemento	Munição	Propelente	Projétil	Estojo
Massa (g)	11.5	1.8	3.6396	6.0604

Outro parâmetro importante é a obtenção dos centros de massa dos três corpos envolvidos no problema. Para o conjunto impulsor e ferrolho, o centro de massa foi definido ao analisar o tombamento do conjunto em uma superfície plana com uma quina de aproximadamente 90° . Caso o centro de massa não esteja sobre a superfície, o momento irá fazer com que a peça tombe, então basta verificar o ponto em que ocorre o desequilíbrio. Utilizando esse método foram obtidos $L_{1(IF+F)}$, $L_{2(IF+F)}$, $H_{1(IF+F)}$ e $H_{2(IF+F)}$.

Para determinação dos centros de massa da munição e do estojo, a geometria da munição M foi aproximada de acordo com a Figura 74, no qual o projétil P foi considerado um cone, o estojo E dois tubos cilíndricos E_1 e E_2 e o propelente um cilindro sólido. A altura do propelente $H_{Propelente}$ foi determinada com sua massa e densidade e as demais cotas da munição foram retiradas da Figura 20. Nesta mesma imagem é possível verificar a posição do centro de massa da munição CM_M e do estojo CM_E , calculadas com a média ponderada das massas, além de outros parâmetros importantes referentes à câmara.

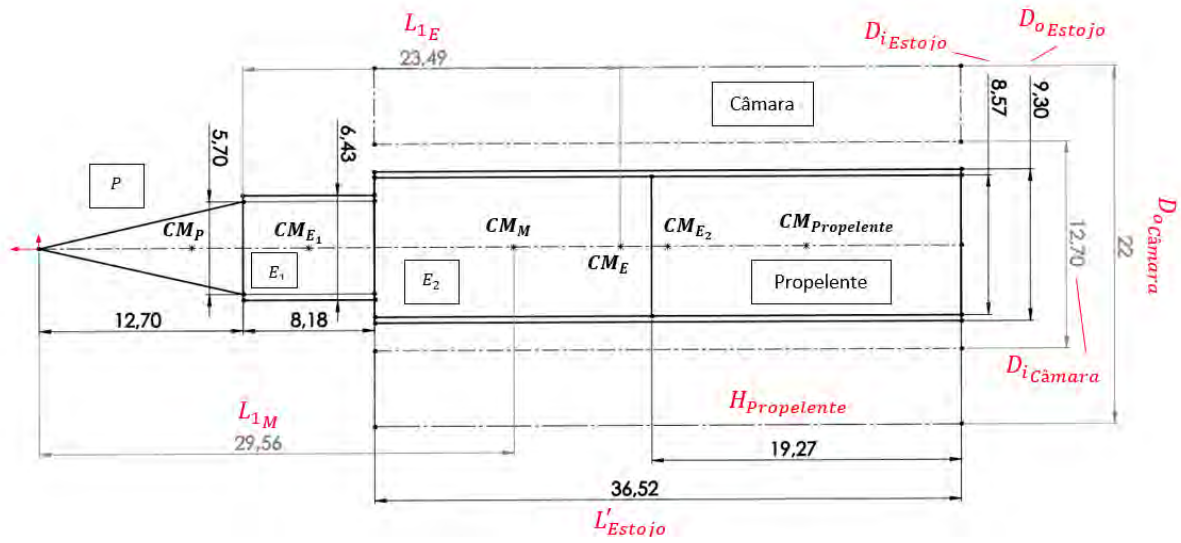


Figura 74 – Centros de massa munição e estojo (Autoria Própria)

Com os CM definidos para os três corpos e a geometria simplificada, foi calculado os momentos de inércia de massa I_F , I_E e I_M através da Equação 3.4 e dos momentos tabelados na Figura 22. Os valores encontrados podem ser visualizados na Tabela 8.

Tabela 8 – Centros de massa e momentos de inércia (Autoria Própria)

	Conjunto ferrolho impulsor	Estojo	Munição
Centro de Massa (mm)	$L_1 = 34$ $H_1 = 21$ $L_2 = 54$ $H_2 = 19$	$L_1 = 23.49$ $L_2 = 21.21$	$L_1 = 29.56$ $L_2 = 27.84$
Momento de Inércia (gmm^2)	363302.333	960.67623	3375

A Figura 75 mostra a distância necessária para que ocorra a apresentação da munição localizada dentro do carregador $X_{Carregador}$. Como no armamento utilizado o ejetor não é fixo na armação, mas sim localizado no ferrolho, Figura 33, foi-se utilizado um valor de $X_{Ejeção}$ no qual ocorre a ejeção igual à $X_{Carregamento}$ e uma altura H_{Ejetor} de $7.2mm$. A altura de atuação do êmbolo, assim como da mola recuperadora, em relação à base do ferrolho pode também ser vista na imagem.

Ainda na Figura 75 é possível verificar que o tamanho da rampa de carregamento é muito pequeno e de difícil acesso para medição. Dessa forma, foi utilizado seu comprimento L_{Rampa} como $4.47mm$ e seu ângulo γ como 7° . Por fim, com esses valores foi calculado X_{Rampa} como $21mm$ para finalizar os parâmetros relacionados com a rampa.

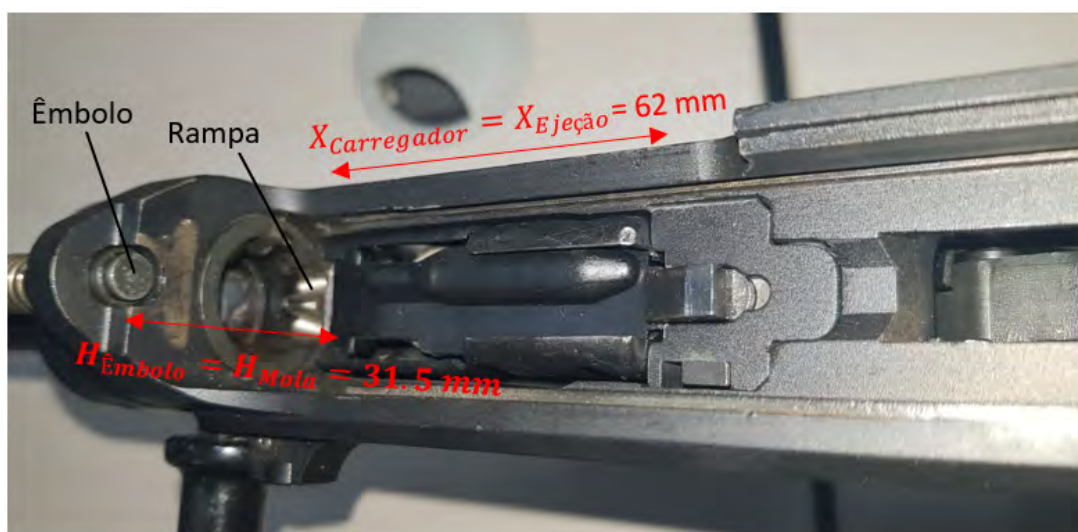


Figura 75 – Atuação êmbolo e distância para apresentação (Autoria Própria)

As constantes de rigidez das molas do êmbolo $K_{\hat{E}mbolo}$ e do ferrolho $K_{Ferrolho}$ foram obtidas de forma semelhante. Foi acoplado na ponta da mola uma massa conhecida e medido qual foi a deflexão que a mola sofreu com esse acoplamento. Com isso foi calculado a constante de rigidez utilizando a equação da mola. Foram realizadas três medições com massas diferentes para cada mola garantindo assim uma melhor precisão, tendo em vista que a mola recuperadora irá influenciar muito os resultados do trabalho.

As constantes de rigidez das molas do carregador $K_{Carregador}$ e do extrator $K_{Extrator}$ não foram obtidas dessa forma pois o carregador não foi desmontado e a mola do extrator é muito pequena. Como essas molas atuam somente em fases específicas e curtas, as mesmas não irão influenciar de forma significativa nos resultados finais. As deformações iniciais das molas $\delta_{\hat{E}mbolo}$, $\delta_{Ferrolho}$ e $\delta_{Extrator}$ foram medidas subtraindo dos seus comprimentos livres o espaço disponível para elas dentro da armação. A Tabela 9 indica os valores de deformações iniciais e constantes de rigidez de cada mola.

Tabela 9 – Parâmetros das molas (Autoria Própria)

Mola	Êmbolo	Ferrolho	Carregador	Extrator
Rigidez (N/m)	260	600	300	100
Deformação inicial (mm)	74.5	50	50	2

Foram considerados dois materiais distintos em todo o trabalho, latão e aço. A munição como um todo foi considerada de latão, e os demais componentes como ferrolho, armação, cano e impulsor foram considerados de aço. O tipo de material é importante para obtenção de parâmetros como módulos de elasticidade, coeficientes de atrito, coeficientes de poisson e constantes de rigidez equivalente. Devido à isso, não será necessário informações mais específicas sobre a liga ou o tipo de aço e latão utilizado.

A Tabela 10 indica algumas propriedades relativa aos dois materiais utilizados.

Tabela 10 – Propriedades Latão e Aço (MACHADO, 2020)

	Latão	Aço
Módulo de Elasticidade (GPa)	97	207
Coefficiente de Poisson	0.33	0.28

A Tabela 11 indica os coeficientes de atrito cinético μ_{CG-A} , μ_{E-A} , μ_{E-C} , μ_{E-E} , μ_{E-F} , μ_{IF-F} , $\mu_{(IF+F)-A}$, μ_{M-A} , μ_{M-C} , μ_{M-F} e μ_{M-R} entre as superfícies já citadas ao longo do trabalho. Vale ressaltar que devido à utilização de apenas dois materiais, diversos coeficientes de atritos serão iguais, diferenciando apenas se a superfície estiver lubrificada ou não.

Tabela 11 – Coeficientes de atrito cinemático (MACHADO, 2020)

Superfície de contato	Cilindro de Gases / Armação	Êmbolo / Armação	Estojo / Câmara	Estojo / Ejetor	Estojo / Ferrolho	Impulsor / Ferrolho
Coefficiente de atrito cinético	0.42	0.08	0.11	0.44	0.44	0.08
Superfície de contato	Conjunto / Armação	Munição / Carregador	Munição / Câmara	Munição / Ferrolho	Munição / Rampa	
Coefficiente de atrito cinético	0.08	0.44	0.11	0.44	0.11	

A Tabela 12 indica as constantes de rigidez equivalente $k_{Armação}$, $k_{Câmara}$, k_{Ejetor} , $k_{Ferrolho}$ e k_{Rampa} de cada material. A obtenção dessas constantes não é trivial pois depende da geometria de contato, o que nesse problema não é bem definida. Para se obter uma ordem de grandeza correta dos valores foi utilizado Costa, Araujo e Reis (2018) que considerou também em seu trabalho dois materiais, um metal duro e outro mais macio. O coeficiente de rigidez que prevalece no contato entre dois materiais distintos é o do mais macio pois este que irá se deformar.

Tabela 12 – Rigidez equivalente (COSTA; ARAUJO; REIS, 2018)

Força de Contato	Armação / Ferrolho	Câmara / Munição	Ejetor / Estojo	Ferrolho / Estojo	Rampa / Munição
Constante de Rigidez (GN/m)	17.645	8.82	8.82	8.82	8.82

Na Figura 76 é possível observar o armamento desmontado em 1º escalão, assim como o valor de $\delta_{Destrancamento}$ necessário para que ocorra o destrancamento e o recuo

máximo que o ferrolho pode desenvolver dentro da armação. Os parâmetros restantes l_M e h_M podem ser obtidos da Figura 20 e valem $1.14mm$ e $0.585mm$ respectivamente. Já $\delta_{Apresentação}$ foi medido no próprio carregador e vale $8mm$.



Figura 76 – Desmontagem em 1º Escalão e recuo máximo (Autoria Própria)

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e comentados os resultados obtidos no trabalho. A Seção 6.1 irá dissertar sobre os resultados referentes ao conjunto impulsor do ferrolho e ferrolho. Já a Seção 6.2 apresentará os resultados referentes ao estojo que será ejetado. Por fim, a Seção 6.3 irá discorrer sobre os resultados referentes à munição que será carregada.

6.1 Ferrolho

Pode-se observar na Figura 77 a posição no eixo X do impulsor do ferrolho na fase de destrancamento, a posição no eixo Y foi considerada constante. De forma semelhante, nessa fase não foi considerada a possível rotação que o impulsor pode ter devido aos torque envolvidos. Note que o movimento só se inicia a partir do instante que o projétil ultrapassa o evento de admissão $t = 0.69$ ms. Nesse instante a pressão que atua no evento é relativamente alta $P_{Evento} = 120$ MPa e gera impulso suficiente para que a etapa se conclua. Essa pressão decai muito rapidamente e em $t = 1.2$ ms está na ordem de 5 MPa. Conseqüentemente, a aceleração passa a depender principalmente da mola do êmbolo que para pequenos deslocamentos também não possui grande influencia. Por conta disso, a posição passa a crescer de forma quase linear no final do destrancamento. A etapa se encerra no instante $t = 2.6$ ms, quando o deslocamento do impulsor é igual a 10 mm, o que equivale à $\delta_{Destrancamento}$

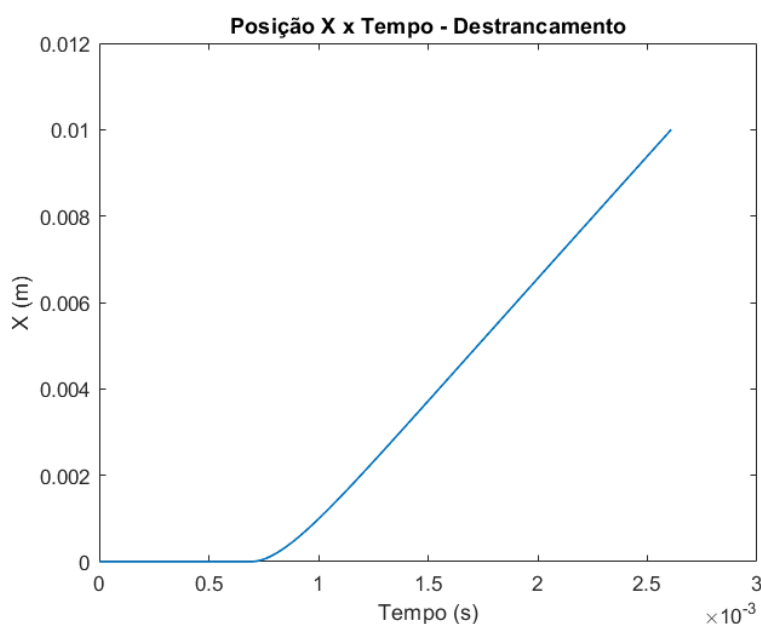


Figura 77 – Posição do impulsor durante destrancamento (Autoria Própria)

A Figura 78 representa a velocidade do impulsor no eixo X na fase de destrancamento, a velocidade no eixo Y foi considerada nula para que sua posição em Y não se altere. As características do gráfico vão de acordo com as comentadas no parágrafo anterior, tendo como principais aspectos o tempo necessário para que o projétil ultrapasse o evento de admissão, o alto e rápido decaimento da pressão que atua no evento e a baixa influência da mola do êmbolo para pequenos deslocamentos. Como consequência desses aspectos tem-se: velocidade inicial nula, crescimento significativo da velocidade que não dura nem 1 ms e velocidade quase constante no final da etapa.

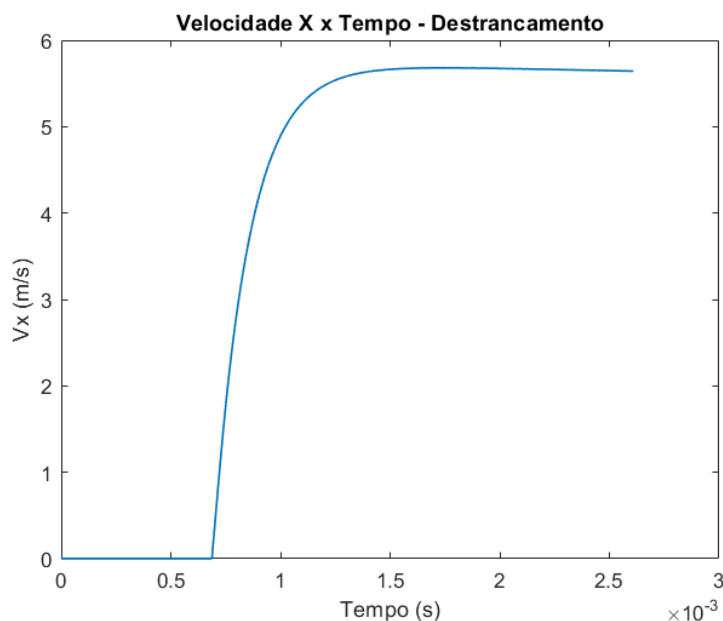


Figura 78 – Velocidade do impulsor durante destrancamento (Autoria Própria)

A Figura 79 indica a posição do conjunto impulsor e ferrolho no eixo X, a posição no eixo Y foi considerada constante y_{0F} igual a 10.8 mm. Até $t = 2.6$ ms, o ferrolho se mantém imóvel pois o mesmo se encontra trancado com a posição do seu centro de massa em 34 mm, equivalente a $L_{1(IF+F)}$. Após o destrancamento o ferrolho inicia seu movimento e uma característica notável do gráfico é a semelhança com um sistema massa mola, o que já era esperado devido à atuação da mola recuperadora. Em $t = 0.0343$ s o ferrolho finaliza seu recuo e conseqüentemente inicia seu avanço que dura 0.0344 s, tempo ligeiramente maior que o de recuo como esperado devido as perdas existentes no sistema. A posição máxima que o conjunto chega é de 0.1339 m e o tempo até o conjunto retornar à sua posição original é de 0.0687 s. Como resultados tem-se um recuo e uma cadência de tiro de aproximadamente 100 mm e 870 tiros por minuto, valores esperados de acordo com a Figura 76 e Tabela 2.

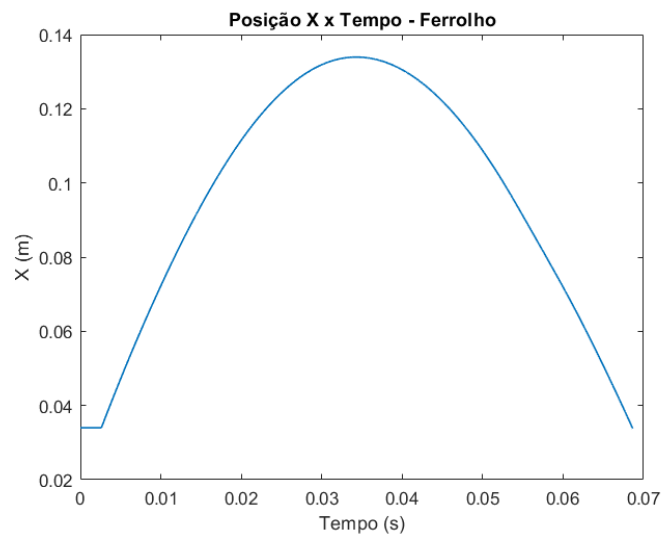


Figura 79 – Posição conjunto impulsor e ferrolho (Autoria Própria)

A Figura 80 representa a velocidade do conjunto impulsor e ferrolho no eixo X, a velocidade no eixo Y foi considerada nula para que sua posição em Y seja constante. De forma análoga à posição no eixo X, a velocidade inicial é nula, tendo um crescimento abrupto devido ação dos gases e chegando até um valor de 5,64 m/s. A compressão da mola recuperadora faz com que a velocidade comece a decair e em $t = 0,0343$ s ocorre a troca de seu sentido indicando a inversão de movimento. Entre 0,0537 e 0,0592 s ocorre uma variação no gráfico devido ao processo de carregamento que será comentado com mais detalhes posteriormente. No instante $t = 0,0686$ s a velocidade é mínima de $-4,77$ m/s e o conjunto se choca com a armação, ocorrendo assim o amortecimento até que sua velocidade volte a ser nula. Como o sistema não é conservativo, já era esperado a velocidade máxima de avanço ser inferior que a de recuo.

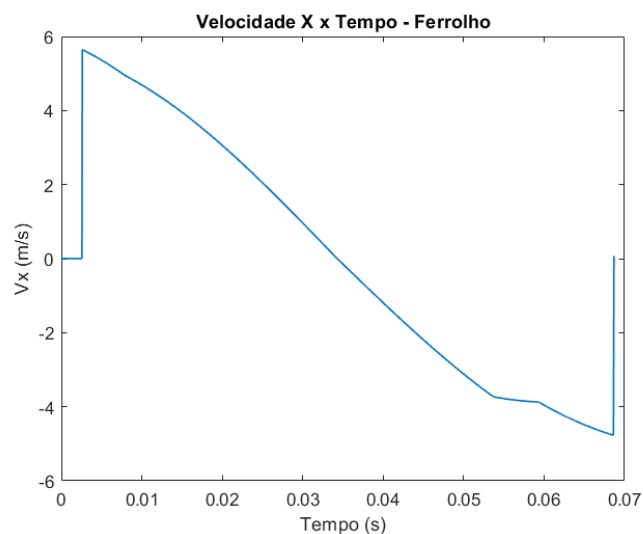


Figura 80 – Velocidade conjunto impulsor e ferrolho (Autoria Própria)

A rotação do conjunto ferrolho e impulsor pode ser visualizada na Figura 81. Durante a fase de destrancamento, até $t = 2.6$ ms, o conjunto não possui nenhuma rotação. Após o destrancamento se observa uma alta vibração do conjunto que pode ser justificado pelos altos valores das forças de contato envolvidas. Porém, a ordem de grandeza dessa rotação é de 10^{-5} rad, sendo assim aceitável tendo em vista que o conjunto tem sua rotação limitada pela própria armação. Observe que em $t = 7.9$ ms ocorre uma variação no gráfico que indica o desacoplamento do êmbolo. Outra variação no gráfico ocorre na inversão de movimento pois a força de atrito que influencia diretamente no torque também troca de sentido. Por fim, as demais variações ocorrem devido ao carregamento, entre 0.0537 e 0.0592 s e em $t = 0.063$ s, indicando que ocorre a perda de contato entre a munição e o ferrolho durante o carregamento. Isso pode ser justificado pelo fato da força de contato entre a munição e o ferrolho tender a frear o avanço do ferrolho e acelerar a munição.

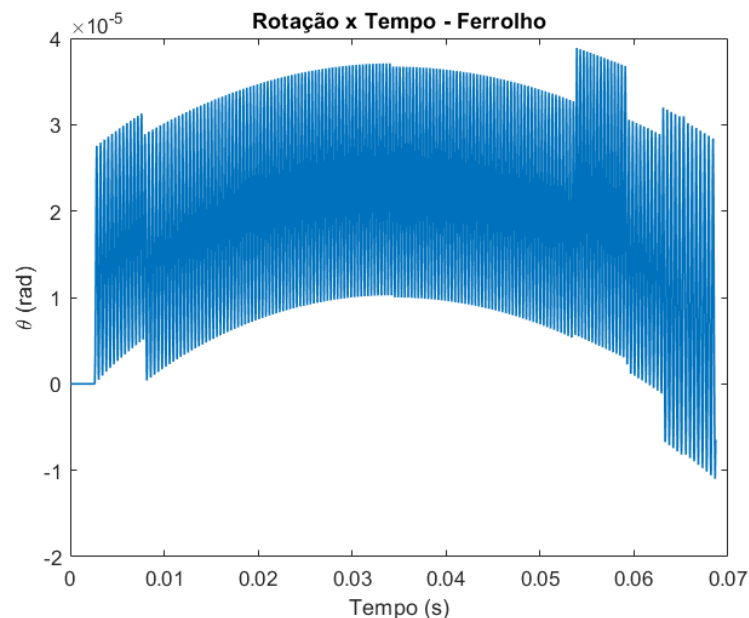


Figura 81 – Rotação do conjunto impulsor e ferrolho (Autoria Própria)

Já a Figura 82 retrata a velocidade angular do conjunto impulsor e ferrolho. Neste gráfico pode-se observar as mesmas características comentadas no parágrafo anterior como os efeitos do desacoplamento do êmbolo e do carregamento. Os valores máximo e mínimo da velocidade angular são 0.291 e -0.292 rad/s respectivamente e é possível notar que o gráfico é praticamente simétrico em relação ao eixo do tempo.

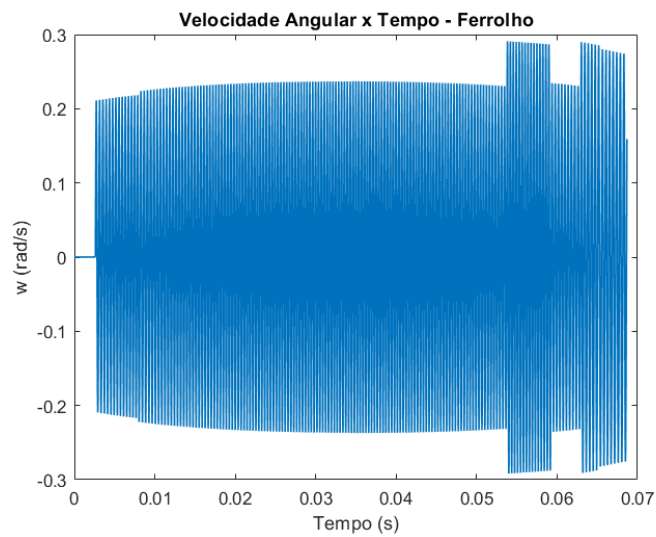


Figura 82 – Velocidade angular do conjunto impulsor e ferrolho (Autoria Própria)

6.2 Estojo

Na Figura 83 pode-se verificar a posição no eixo X do estojo. Inicialmente a posição não se altera devido ao trancamento do ferrolho e tem seu valor constante de -21.2 mm, equivalente a L_{2E} . Após o destrancamento a posição do estojo e a do conjunto crescem igualmente pois os mesmos estão acoplados com uma defasagem de 55.2 mm, equivalente a $L_{2E} + L_{1(IF+F)}$. Em $t = 0.0155$ s ocorre a ejeção, praticamente de forma instantânea. Em seguida, como o estojo não sofre atuação de nenhuma força em X, sua posição passa a decrescer linearmente até o fim da simulação em $t = 0.1155$ s para posição de -0.331 m. Isso indica que o estojo irá tender a se deslocar para frente do armamento após a ejeção.

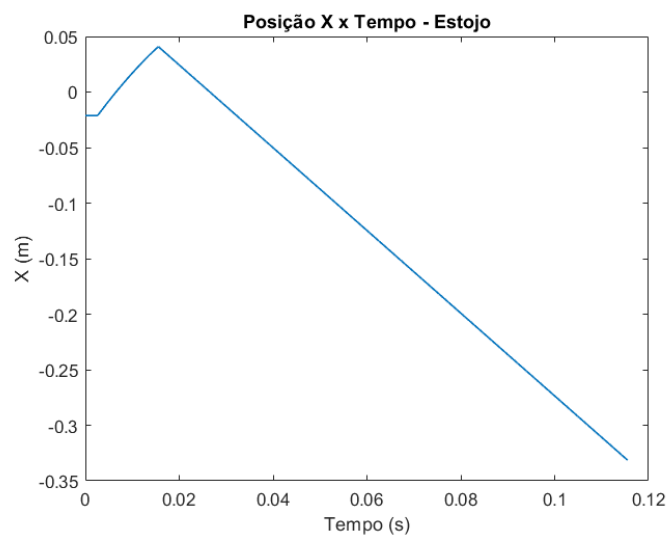


Figura 83 – Posição X do estojo (Autoria Própria)

Já a Figura 84 representa a velocidade no eixo X do estojo. Pode-se observar que até o instante da ejeção as velocidades em X do estojo e do conjunto, Figura 80, são iguais devido ao acoplamento. Como a força de contato com o ejetor é negativa, após a ejeção o estojo possui uma velocidade de -3.72 m/s que se mantém constante devido à inexistência de forças atuantes na direção X. Para fins de conhecimento, a duração da ejeção calculada no trabalho de 0.035 ms, tempo relativamente pequeno. Isso pode ser justificado pelo fato do estojo e ejetor perderem o contato muito rapidamente devido a ordem de grandeza das forças de contato atuantes no processo.

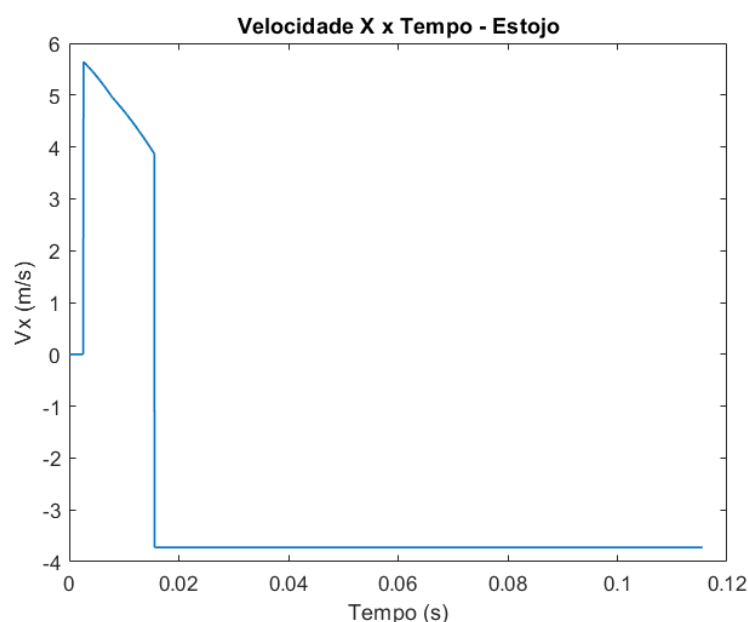


Figura 84 – Velocidade X do estojo (Autoria Própria)

Pode-se observar na Figura 85 a posição no eixo Y do estojo. Até o primeiro contato com o ejetor essa posição é nula pela própria definição da origem do problema. Após a ejeção o estojo fica apenas sujeito à força gravitacional e o restante da simulação passa a ser um lançamento oblíquo. Isso justifica o perfil parabólico da curva, tendo um valor máximo da posição de 0.0323 m em um instante $t = 0.0968$ s. Vale ressaltar que para análise completa do processo de ejeção seria necessário analisar outros graus de liberdade que não foram considerados no presente trabalho, como a posição no eixo Z e a rotação ao longo do eixo Y do estojo.

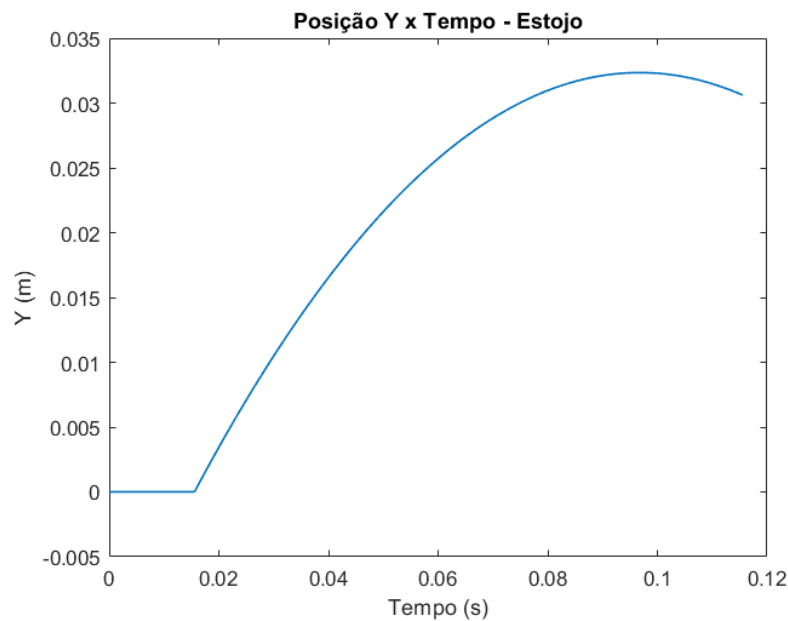


Figura 85 – Posição Y do estojo (Autoria Própria)

A Figura 86 indica a velocidade no eixo Y do estojo. Pode-se observar que até o primeiro contato com o ejetor a velocidade é nula pois o estojo tem deslocamento apenas no eixo X. Após a ejeção ocorre um aumento significativo até 0,8045 m/s que começa a decair linearmente como esperado do lançamento oblíquo. Neste gráfico se nota um comportamento não muito intuitivo da velocidade negativa no início da ejeção. Isso é justificado pelo fato de existirem atritos no processo e no primeiro instante de contato com o ejetor a força de contato é nula e o estojo só está sujeito a força gravitacional. A duração dessa velocidade negativa é tão pouca que na Figura 85 o deslocamento negativo fica imperceptível.

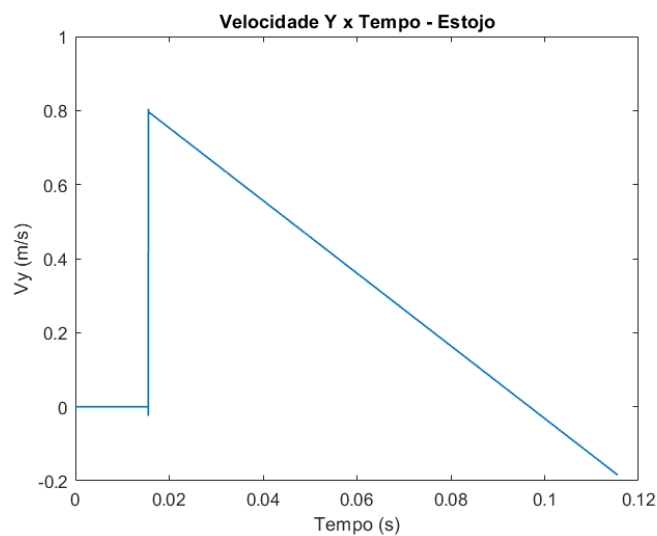


Figura 86 – Velocidade Y do estojo (Autoria Própria)

As Figuras 87 e 88 retratam a rotação e velocidade angular do estojo. Novamente se observa as mesmas características iniciais nulas até a ejeção. Como a ejeção é quase instantânea, o gráfico da rotação demonstra um decaimento linear semelhante ao da Figura 83 pois a força gravitacional não gera aceleração angular. Pelo mesmo motivo se observa que a velocidade angular após a ejeção fica constante igual a -39.47 rad/s. A rotação final da simulação é de -3.94 rad ou -226° e a velocidade angular demonstra o mesmo comportamento não intuitivo da Figura 86 que é justificado pelos atritos atuantes. Isso inclusive gera uma velocidade angular mínima de -51.6 rad/s.

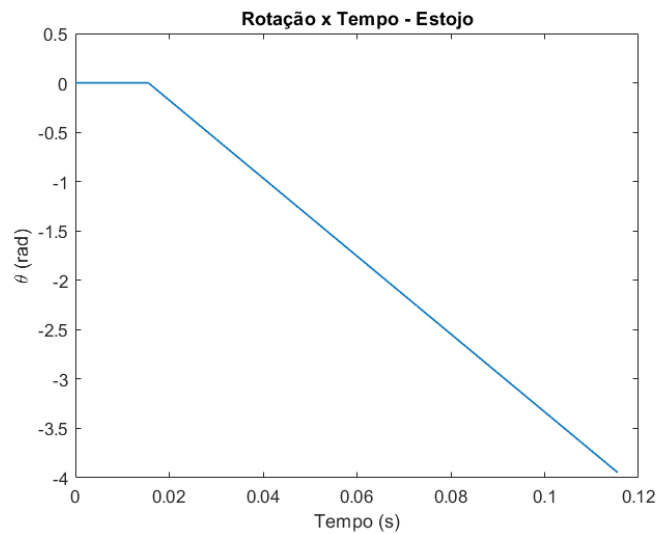


Figura 87 – Rotação do estojo (Autoria Própria)

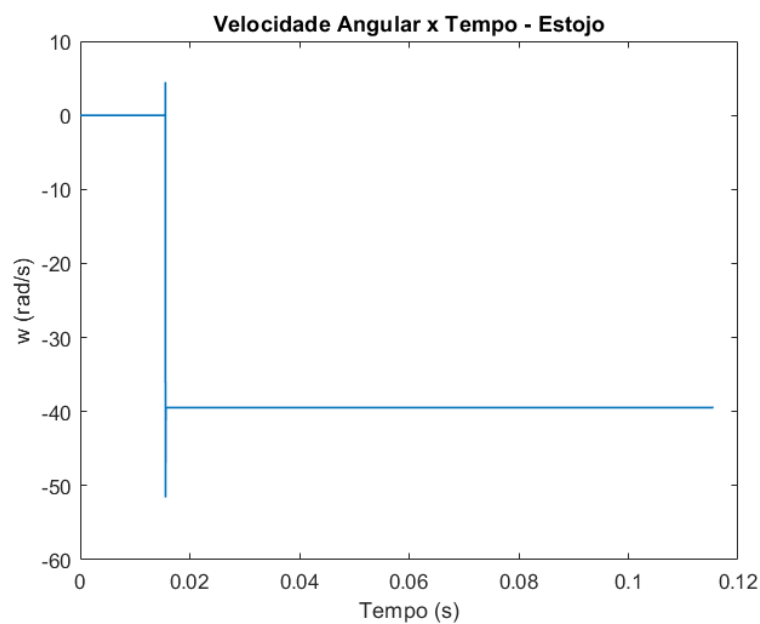


Figura 88 – Velocidade angular do estojo (Autoria Própria)

6.3 Munição

A Figura 89 representa a posição no eixo X da munição. Sua posição permanece inalterada quase durante todo o ciclo com valor de 34.2 mm, equivalente a x_{0M} , pois durante a apresentação tem-se variação apenas na posição no eixo Y. No instante $t = 0.0537$ s se inicia o carregamento e a posição decresce de forma semelhante ao final do perfil senoidal da Figura 79 com uma defasagem negativa de $L_{2M} + L_{1(IF+F)}$. No fim da simulação a posição da munição é de -0.0278 m, o que já era esperado pois equivale à $-L_{2M}$, indicando assim que a munição foi carregada corretamente.

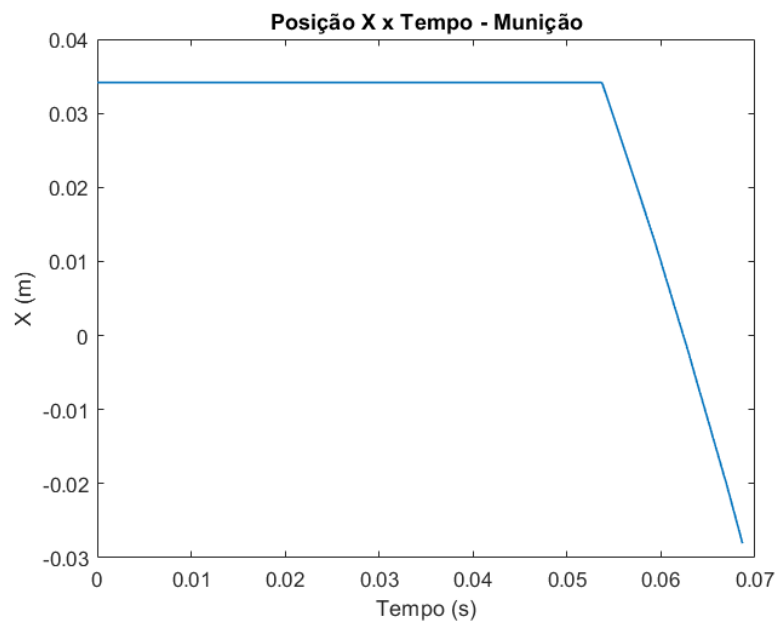


Figura 89 – Posição X da munição (Autoria Própria)

Já na Figura 90 pode-se observar o comportamento da velocidade no eixo X da munição. Até o instante do carregamento a velocidade se mantém constante e nula. O perfil dessa curva não é intuitivo principalmente pelo fato de a todo momento estarem surgindo e deixando de atuar forças de contato com o ferrolho e com a rampa de carregamento. Além disso, como a munição foi modelada como um corpo livre, nada a impede de perder o contato com o próprio ferrolho em diversos pontos ao longo do carregamento. Isso pode ser observado graficamente pelos diferentes degraus existentes na velocidade. O primeiro degrau no instante $t = 0.0537$ s indica o início do carregamento, o segundo em 0.0592 s indica o começo da subida da munição na rampa. O último degrau em 0.0668 s representa o acoplamento da munição e do ferrolho simulando a 1ª fase da extração. Como consequência, a velocidade mínima da munição é igual ao do conjunto ferrolho e impulsor de -4.77 m/s.

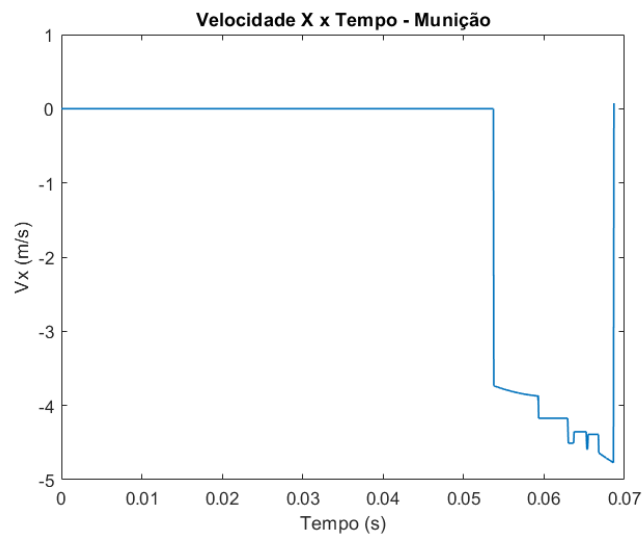


Figura 90 – Velocidade X da munição (Autoria Própria)

A Figura 91 indica a posição no eixo Y da munição. Inicialmente a posição é constante e igual a -0.0102 m, equivalente a y_{0M} , pois o ferrolho se encontra sobre a munição. No instante $t = 0.0155$ s ocorre a apresentação que se encerra em $t = 0.0188$ s e a posição vai para -0.0022 m, equivalente a $y_{0M} + \delta_{Apresentação}$, devido à distensão da mola do carregador. No início do carregamento não se tem variação da posição pois a munição ainda não chegou na rampa. Dessa forma, em 0.0592 s a munição começa a subir a rampa até que em 0.0637 s a mesma se choca com a câmara e começa o alinhamento. Nesse mesmo instante tem-se o valor máximo da posição de 0.784 mm. As variações da posição no eixo Y tem valores absolutos relativamente pequenos pelo fato da rampa ser bem curta.

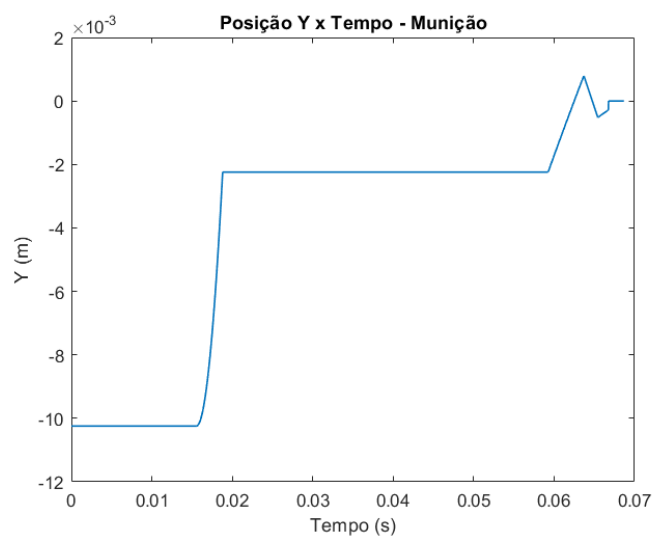


Figura 91 – Posição Y da munição (Autoria Própria)

A Figura 92 retrata a velocidade no eixo Y da munição. De forma semelhante à Figura 90, inicialmente a velocidade é nula pois o ferrolho se encontra sobre a munição. O crescimento da velocidade representa a apresentação da munição e sua queda brusca indica que a aba do carregador passou a atuar e impedir que a munição continue subindo. Durante a apresentação a velocidade chega a um valor máximo de 4.788 m/s. Em seguida, representado graficamente pelo primeiro degrau, ocorre o contato com a rampa de carregamento, e representado pelo segundo degrau, o contato com a câmara até o completo alinhamento e acoplamento com o conjunto ferrolho e impulsor.

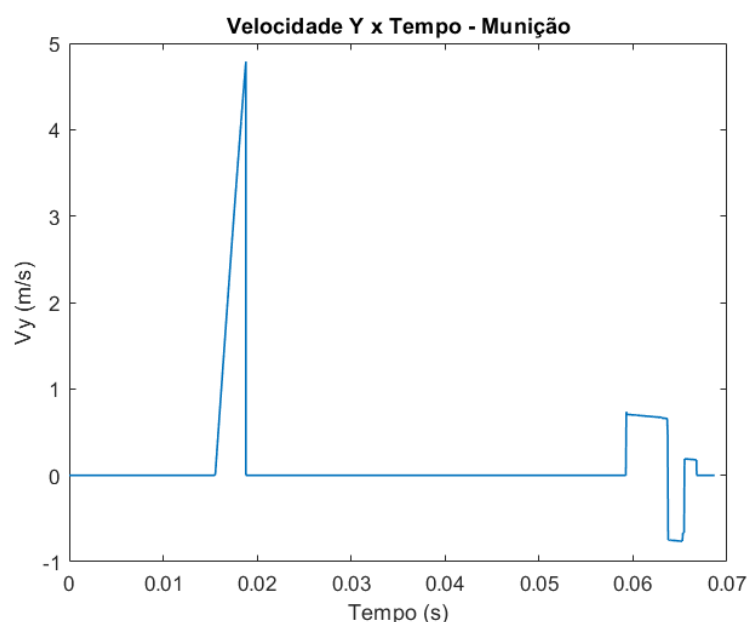


Figura 92 – Velocidade Y da munição (Autoria Própria)

As Figuras 93 e 94 representam a rotação e a velocidade angular da munição. Ambos os gráficos inicialmente são nulos pois a munição não possui grau de liberdade para rotacionar até a fase de carregamento, mais especificamente na subida na rampa. Se observa nos gráficos que no instante do choque com a rampa se desenvolve uma velocidade angular negativa e conseqüentemente o ângulo começa a decair até um valor -6.35° ou -0.1108 rad em $t = 0.0637$ s, instante no qual a munição se choca com a câmara. Então se inicia o alinhamento com a câmara que pode ser observado pelo alto valor da velocidade angular de 66.58 rad/s que decai novamente para zero após o acoplamento com o ferrolho. Os degraus existentes no gráfico da velocidade angular são justificados pela atuação das forças de contato que ocorrem de forma quase instantânea.

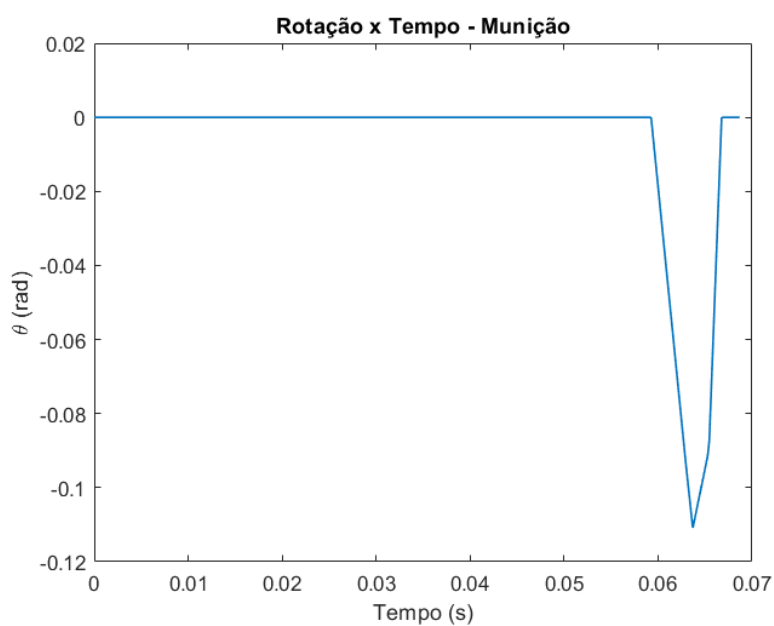


Figura 93 – Rotação da munição (Autoria Própria)

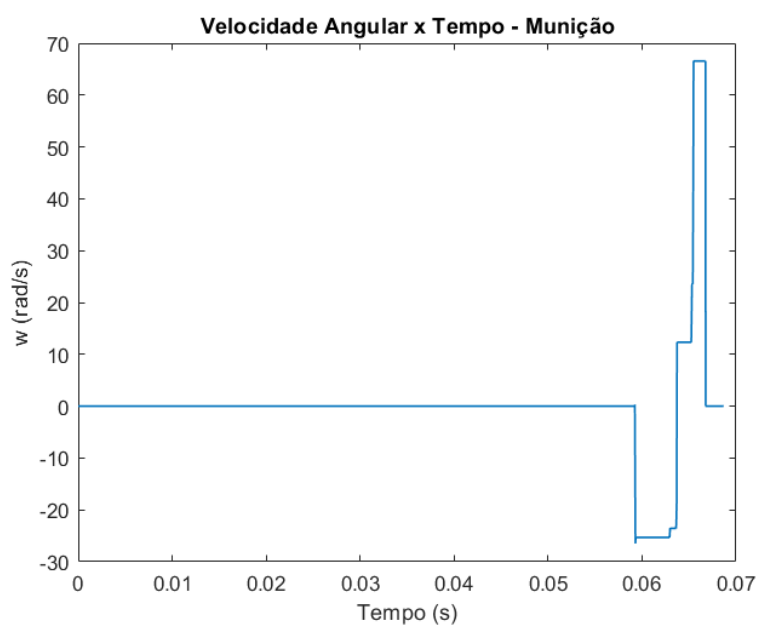


Figura 94 – Velocidade angular da munição (Autoria Própria)

7 CONCLUSÃO

A área de modelagem e simulação vem se mostrando um ferramental indispensável em diversos setores. Para o Exército Brasileiro, junto com a Engenharia, essa área traz diversos benefícios como a redução de riscos na tomada de decisões e previsão na ocorrência de falhas em armamentos e munições para o estudo de viabilidade de um determinado projeto. Dessa forma, o principal objetivo do trabalho é realizar a modelagem e simulação do recuo de uma armamento com trancamento com o intuito de analisar os gráficos cinemáticos dos corpos e verificar a existência de falha em alguma fase deste ciclo.

O armamento escolhido para a validação do trabalho foi o Fuzil de Assalto 5.56 IA2 e diferentemente da abordagem mais usual utilizando juntas ao longo do recuo, foi utilizado o conceito de impacto entre dois corpos e força de contato. De modo que os corpos se movam livremente e as forças de contato que surgem geram as restrições de movimento. A principal vantagem em utilizar esse método é o nível de detalhamento, e conseqüentemente aproximação da realidade, possível de ser alcançado. Porém, em contrapartida, tem-se um maior requerimento computacional.

Esse artifício tem inúmeras possibilidades de utilização, sendo inovador para este tipo de problema. Além disso, é possível um estudo ainda mais aperfeiçoado do assunto, englobando mais graus de liberdade e um detalhamento mais aprofundado de cada fase. O trabalho como um todo é bastante complexo, com um conteúdo amplo que varia desde balística até mecânica dos sólidos sendo necessário auxílio de diversos *softwares*.

O método utilizado para realizar a solução numérica foi o Euler principalmente pela sua simplicidade. O fluxograma do algoritmo desenvolvido foi dividido em sucessivas etapas de forma a simular as diversas fases que ocorrem durante a ciclagem do armamento. Os parâmetros de entrada possíveis de serem obtidos foram medidos no próprio armamento e os demais foram obtidos de referências externas pela dificuldade ou até mesmo impossibilidade de medição.

É possível verificar através dos resultados que o armamento não apresentou nenhuma falha para os parâmetros de entrada utilizados. As fases de destrancamento, ejeção, apresentação e carregamento foram realizadas de forma adequada e com resultados coerentes. O ferrolho sofreu uma vibração excessiva devido ao modelo de contato utilizado não considerar amortecimento, porém isso não afetou os resultados finais de forma significativa. Resultando assim em um recuo de 100 mm e uma cadência de tiro de 870 tiros por minuto, valores dentro dos limites da especificação do armamento. Com isso, a metodologia aplicada no presente trabalho é válida e bastante eficiente para esse tipo de simulação.

REFERÊNCIAS

- AMCP. *706-260:Automatic Weapons*. Washington, U.S.A, 1970. Engeneering Design Handbook - U.S Army Materiel Command.
- ANDRE, A. *5.56x45mm - Arma Bélica*. 2018. Disponível em: <<http://armabellica.com.br/556-x-45-mm/>>. Acesso em: 27 Abr. 2021.
- ARMAS, A. B. de. *Comparativo entre munições 5.56 NATO fabricadas pela CBC*. 2020. Disponível em: <<https://www.academiadearmas.com/comparativo-entre-municoes-556nato-fabricadas-pela-cbc/>>. Acesso em: 27 Abr. 2021.
- COSTA, T. A. da; ARAUJO, F. dos Santos Gama de; REIS, C. C. do P. D. *Simulação de tubo flexível de canhão e projétil durante o disparo*. 89 p. Graduação em Engenharia Mecânica — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018.
- FRED. Ergonomia - fluxo de produção. Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais. 2015.
- FREITAS. Nota de aula: Teoria do armamento e tiro. Escola de Formação e Aperfeiçoamento Penitenciário, Paraná. S.d.
- GRUZMAN, M. *Nota de Aula - Vibrações Cap 2, Obtenção das Equações de Movimento, Instituto Militar de Engenharia*. 2020.
- HENRIQUES. *Nota de Aula - Tecnologia do Armamento, Instituto Militar de Engenharia*. 2019.
- HIBBELER, R. C. *Resistência dos Materiais*. 7^a. ed. São Paulo: Pearson Education, 2010.
- IMBEL. *Manual do usuário do Fz Ass 5.56 IA2*. Brasília DF, 2017. Indústria de Material Bélico do Brasil.
- JUDICIARIO, P. Manual de armamento e manuseio seguro. *Tribunal de Justiça do Estado do Amazonas, Diretoria do Fórum Ministro Henoch Reis*, p. 32, 2012.
- JUNIOR Édio P. L. *Nota de Aula - Mecânica do Sólidos II, Instituto Militar de Engenharia*. 2019.
- LIMA, R. de S. *Projeto de um equipamento de disparo de cartuchos para teste de eficiência de munição*. 110 p. Graduação em Engenharia Mecânica — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.
- MACHADO, L. R. V. *Modelagem e simulação de armamento leve durante o disparo*. 67 p. Graduação em Engenharia Mecânica — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2020.
- MARCONDES, J. S. *Arma de Fogo: O que é? Definições e Conceitos. Origem e Classificação*. 2015. Blog Gestão de Segurança Privada. Disponível em: <<https://gestaodesegurancaprivada.com.br/arma-de-fogo-o-que-e-definicoes/#>>:

~:text=Arma%20de%20fogo%20%C3%A9%20um,dire%C3%A7%C3%A3o%20e%20estabilidade%20ao%20proj%C3%A9til.> Acesso em: 01 Abr. 2021.

MOSS, G. M.; LEEMING, D. W.; FARRAR, C. L. *Military Ballistics*. [S.l.]: Potomac Books Inc, 1996.

REZENDE, A. L. T. *Avaliação de esforços reativos em uma arma automática*. 70 p. Graduação em Engenharia Mecânica — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1996.

RODRIGUES, G. S.; WEBER, H. I. *Mitigação de esforços impulsivos utilizando metamateriais elásticos*. Doutorado em Engenharia Mecânica — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

ROSA, P. R. da S. *Curso de Física Básica*. Campo Grande: Departamento de Física - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2009.

SANTOS, I. F. *Dinâmica de Sistemas Mecânicos*. São Paulo: MAKRON Books, 2001.

SENASP. Calibre das armas. In: *INSIGHT*. [S.l.]: Ministério da Justiça, S.d. cap. 5, p. 15.

SENASP. Conceitos básicos sobre armas de fogo. In: *INSIGHT*. [S.l.]: Ministério da Justiça, S.d. cap. 1, p. 17.

SILVA, L. C. *Simulação de Processos*. 2019. Disponível em: <<https://www.agais.com/simula.htm>>. Acesso em: 01 Abr. 2021.

TACTICAL, S. *Pane Chaminé*. S.d. Disponível em: <<https://www.sntacticaltraining.com.br/artigo/pane-chamine>>. Acesso em: 01 Abr. 2021.

WIKIPEDIA. *Munição*. 2020. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Muni%C3%A7%C3%A3o>>. Acesso em: 22 Abr. 2021.

WIKIPEDIA. *SolidWorks*. 2020. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>>. Acesso em: 07 Maio 2021.

ANEXO A – DADOS *PRODAS* MUNIÇÃO M193 556

#556M193Cartridge.pr3 - 5.56 MM US M193 BALL BULLET
03/21/2016 09:34
IBal2000BaerFrankle Version 3.0.0

Igniter Characteristics

Weight 0.0185 gm
Impetus 0.4982 MJ/kg
Gamma 1.2000
Flame Temperature 3400.00 deg. K

Propellant Grain Characteristics

Propellant 1

Propellant Characteristics

Propellant 1
Time Delay (sec) 0.0000
Weight (gm) 1.8000
Impetus (MJ/kg) 1.0073
Gamma 1.2400
Covolume (m³/kg) 0.0011
Flame Temperature (degrees K) 2850.00
Density (gm/cm³) 1.6193
Burn Rate Exponent 0.7000
Initial Burn Rate (cm/sec/bar) 0.01891
Final Burn Rate (cm/sec/bar) 0.15379
Slope (cm/sec/bar/cm) 0.00000
Computed Prop. Deterent Level (%) 5.22048

Propellant Type

Ball

Grain/Ball Diam. (mm) 0.2870
Grain Length (mm), If 0.0, NA 0.0000
Perf Diam. (mm), If 0.0, NA 0.0000
Web (mm), If 0.0, NA 0.0000
No. of Perforations , If 0.0, NA 0

Projectile Characteristics

Weight 3.6396 gm
Band Density 8.7400 gm/cm³

Interior Ballistics Results As Functions Of Time

Time	Travel	Breech Pressure	Base Pressure	Velocity	Temp	Volume	Resist Pressure	Linear Accel	Spin	Mass Fraction Prop1
msec	mm	Mpa	Mpa	m/sec	deg k	cm ³	Mpa	G's	rad/sec	
0.020	0.003	16.4	16.4	1.	3285.	0.7132	6.6	6850.	19.36	0.001
0.060	0.101	35.8	35.8	5.	3051.	0.7088	12.3	16321.	177.22	0.009
0.090	0.333	58.3	58.3	11.	2971.	0.7064	25.7	22694.	378.57	0.017
0.110	0.593	78.2	78.2	15.	2939.	0.7057	40.8	26040.	545.76	0.025
0.130	0.960	102.7	102.7	22.	2915.	0.7060	43.8	41028.	767.62	0.035
0.150	1.487	132.1	132.1	32.	2895.	0.7079	43.8	61516.	1117.78	0.046
0.160	1.835	148.7	148.6	38.	2885.	0.7101	43.8	73030.	1348.77	0.053
0.170	2.255	166.4	166.3	46.	2874.	0.7133	43.8	85333.	1620.82	0.060
0.180	2.757	185.1	184.9	55.	2863.	0.7178	39.9	101095.	1938.05	0.068
0.190	3.359	204.6	204.3	66.	2849.	0.7240	28.7	122367.	2323.63	0.077
0.200	4.079	224.4	224.0	79.	2832.	0.7322	24.9	138774.	2772.59	0.087
0.210	4.934	244.2	243.6	93.	2812.	0.7430	20.7	155360.	3278.59	0.097
0.220	5.940	263.7	262.8	109.	2790.	0.7567	19.6	169454.	3837.04	0.108
0.230	7.111	282.3	281.0	126.	2765.	0.7737	18.4	183027.	4442.93	0.120
0.240	8.460	299.6	297.9	144.	2737.	0.7943	16.9	195774.	5093.89	0.132
0.250	9.999	315.3	312.9	164.	2707.	0.8189	15.3	207401.	5786.55	0.146
0.260	11.740	328.9	325.7	185.	2676.	0.8479	13.4	217657.	6516.57	0.159
0.270	13.692	340.2	336.1	206.	2642.	0.8814	12.0	225884.	7278.62	0.174
0.280	15.864	349.0	343.9	228.	2606.	0.9198	11.5	231644.	8063.90	0.189
0.290	18.260	355.4	349.1	251.	2570.	0.9633	11.0	235620.	8865.67	0.205
0.300	20.885	359.3	351.7	274.	2533.	1.0122	10.4	237866.	9677.90	0.220
0.330	30.145	358.1	346.4	343.	2423.	1.1915	8.4	235591.	12122.89	0.270
0.340	33.691	354.2	341.1	366.	2387.	1.2625	7.8	232243.	12925.19	0.287
0.350	37.463	349.1	334.5	388.	2352.	1.3390	7.8	227722.	13713.76	0.304
0.360	41.455	342.9	327.0	410.	2319.	1.4210	7.7	222530.	14485.71	0.321
0.370	45.664	335.9	318.7	431.	2287.	1.5086	7.6	216844.	15239.07	0.338
0.380	50.083	328.4	310.0	452.	2257.	1.6014	7.5	210818.	15972.42	0.355
0.400	59.529	312.3	291.7	492.	2200.	1.8028	7.3	198246.	17375.86	0.388
0.420	69.746	295.8	273.4	529.	2150.	2.0242	7.0	185601.	18693.02	0.421
0.440	80.684	279.5	255.6	564.	2105.	2.2645	6.8	173371.	19925.21	0.453
0.460	92.297	263.9	238.7	597.	2065.	2.5226	6.5	161829.	21076.22	0.484
0.480	104.540	249.1	223.1	627.	2029.	2.7976	6.3	151062.	22151.12	0.514
0.510	123.996	228.8	201.9	669.	1982.	3.2392	6.0	136467.	23632.60	0.557
0.540	144.649	210.7	183.2	707.	1942.	3.7132	5.7	123695.	24973.89	0.597
0.570	166.389	194.6	166.9	742.	1908.	4.2167	5.4	112553.	26192.64	0.635
0.610	196.898	175.9	148.2	783.	1869.	4.9297	5.0	99823.	27653.46	0.682
0.650	228.968	159.8	132.5	820.	1835.	5.6856	5.0	88844.	28951.95	0.725
0.700	270.992	142.6	116.1	860.	1799.	6.6841	5.0	77399.	30382.04	0.773
0.750	314.910	128.0	102.5	896.	1768.	7.7354	5.0	67925.	31633.16	0.815