



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Bruno de Castro Passon

**Sistematização do processo de desmilitarização de munição: um estudo de caso com a munição 105 mm AE M1**

Florianópolis  
2022

Bruno de Castro Passon

**Sistematização do processo de desmilitarização de munição: um estudo de caso com a munição 105 mm AE M1**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. André Ogliari, Dr. Eng.

Coorientador: Prof. Erick Braga Ferrão Galante, Ph.D.

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Passon, Bruno de Castro

Sistematização do processo de desmilitarização de munição:  
um estudo de caso com a munição 105 mm AE M1 / Bruno de  
Castro Passon ; orientador, André Ogliari, coorientador,  
Erick Braga Ferrão Galante, 2022.

217 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Desmilitarização de munição. 3.  
Impacto ambiental. 4. Ciclo de vida. 5. Avaliação do ciclo  
de vida. I. Ogliari, André. II. Galante, Erick Braga  
Ferrão. III. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Bruno de Castro Passon

**Sistematização do processo de desmilitarização de munição: um estudo de caso com a munição 105 mm AE M1**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. André Ogliari, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Assed Naked Haddad, Dr. Sc.  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Henrique Simas, Dr. Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

---

Paulo de Tarso Rocha de Mendonça, Ph.D.  
Coordenador do Programa

---

Prof. André Ogliari, Dr. Eng.  
Orientador

Florianópolis, 2022.

Aos meus pais, "*Sô Passoni e D. Maria*",  
por me ensinarem a andar.

## **AGRADECIMENTOS**

Inicialmente, agradeço a Deus, pela graça da vida.

À IMBEL, pela iniciativa, junto ao Exército Brasileiro, de fomento às áreas científicas e tecnológicas.

Ao Exército Brasileiro, pela missão desafiadora à mim confiada.

À UFSC, pelo acolhimento, seriedade e profissionalismo.

Aos Professores André Ogliari e Erick Braga Ferrão Galante, Orientador e Coorientador deste trabalho, respectivamente, pela confiança em mim depositada, pelos conhecimentos transmitidos e pelas oportunas correções de rumo realizadas.

À minha querida esposa, Lenise, pelo apoio incondicional.

Aos meus filhos, Diego e Daniel, minhas fontes perenes de inspiração.

*“É melhor lançar-se à luta em busca da vitória,  
mesmo expondo-se ao insucesso,  
que formar na fila com os pobres de espírito,  
que nem gozam muito e nem sofrem muito  
e vivem nessa penumbra cinzenta  
sem conhecer vitória nem derrota”  
(Franklin D. Roosevelt)*

## RESUMO

As Forças Armadas, em geral, utilizam em suas atividades rotineiras uma grande quantidade de munições, com a finalidade de adestramento da tropa e persuasão contra possíveis agentes invasores. Tal fato tem proporcionado a existência de elevados níveis de estoque de munição ao redor do mundo. O uso e o descarte final desse tipo de material têm se tornado uma preocupação cada vez maior às sociedades, face aos impactos ambientais provocados e, conseqüentemente, aos riscos potenciais à saúde humana. Diante de tal fato, para auxiliar na resolução dos problemas causados pelas munições ao final do seu ciclo de vida, este trabalho propõe uma sistematização do processo de desmilitarização de munição, com o intuito de auxiliar na elaboração do inventário do respectivo processo de desmilitarização e na realização da avaliação do ciclo de vida. Tal fato propicia uma análise antecipada à ação de descarte do produto e permite ao técnico, pesquisador ou gestor obter informações para auxiliar os processos decisórios, orientando sobre possíveis ações e direções a serem seguidas e que sejam ambientalmente mais responsáveis. Com esse propósito, o presente trabalho apresenta, inicialmente, através da revisão bibliográfica, os principais conceitos, classificações e características gerais das munições convencionais, as principais técnicas de desmilitarização disponíveis e os aspectos e princípios gerais sobre o processo de avaliação do ciclo de vida de produtos. Com base na revisão bibliográfica, é elaborada a Sistematização do Processo de Desmilitarização de Munição (SisProDMun), proposta inicialmente, apoiada nos princípios basilares dos processos de avaliação do ciclo de vida, estruturada em fases e detalhada numa sequência lógica de atividades. Adicionalmente, é realizado um estudo de caso com a munição 105 mm AE M1, produto amplamente utilizado pelo Exército Brasileiro e de fabricação nacional, com o intuito de aplicar a sistematização proposta e verificar a sua efetividade. Os resultados mostraram que a SisProDMun é uma sistemática que, efetivamente, auxilia na avaliação do ciclo de vida de munições convencionais, propiciando a quantificação dos impactos ambientais relacionados à fase de descarte do produto, de cenários distintos e com aplicação de técnicas de desmilitarização diferentes, mostrando-se, portanto, uma sistemática capaz de auxiliar os processos decisórios, fornecendo informações oportunas e orientando as decisões numa direção ambientalmente mais responsável.

**Palavras-chave:** Desmilitarização de munição. Impacto ambiental. Ciclo de vida. Avaliação do ciclo de vida.

## ABSTRACT

The Armed Forces, in general, use in their daily activities a large amount of ammunition, with the purpose of training the troop and persuasion against enemy agents. This fact has provided the existence of high amounts of ammunition stocks around the world. The use and final disposal of this type of material have become an increasing concern for societies, given the environmental impacts caused and, consequently, the potential risks to human health. In view of this fact, to assist in solving the problems caused by ammunition at the end of its life cycle, this work proposes a systematization of the ammunition demilitarization process, in order to assist in the elaboration of the inventory of the respective demilitarization process and in the carrying out the life cycle assessment. This fact provides an early analysis of the product disposal action and allows the technician, researcher or manager to obtain information to help decision-making processes, guiding on possible actions and directions to be followed and that are more environmentally responsible. For this purpose, the present work initially presents, through a bibliographic review, the main concepts, classifications and general characteristics of conventional ammunitions, the main demilitarization techniques available and the general aspects and principles about the product life cycle assessment process. Based on the literature review, the Systematization of the Ammunition Demilitarization Process (SisProDMun) is prepared, as initially proposed, based on the basic principles of the life cycle assessment processes, structured in phases and detailed in a logical sequence of activities. Additionally, a case study is carried out with the 105 mm HE M1 ammunition, a product widely used by the Brazilian Army and nationally made, in order to apply the proposed systematization and verify its effectiveness. The results showed that SisProDMun is a systematic approach that effectively helps in the assessment of the life cycle of conventional ammunition, providing the quantification of environmental impacts related to the disposal phase of the product, in different scenarios and with the application of different demilitarization techniques, proving to be, therefore, a systematic capable of assisting decision-making processes, providing timely information and guiding decisions in a more environmentally responsible direction.

**Keywords:** Ammunition demilitarization. Environmental impact. Life cycle. Life cycle assessment.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Peso total de material a ser desmilitarizado existente em depósito nos EUA, em setembro de 2017. . . . .	22
Figura 2 – Financiamento Total e de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) do programa de desmilitarização de munições convencionais nos EUA, de 2008-2018. . . . .	23
Figura 3 – Ilustração geral da gestão do ciclo de vida dos sistemas e materiais de emprego militar do Exército Brasileiro. . . . .	26
Figura 4 – Ilustração geral dos sistemas de armas obuseiro, morteiro e canhão. . . . .	28
Figura 5 – Ilustração geral de munições utilizadas nos sistemas de armas obuseiro, morteiro e canhão. . . . .	29
Figura 6 – Ilustração geral de munições de artilharia, morteiro e canhão e de seus principais componentes. . . . .	30
Figura 7 – Ilustração geral da munição de artilharia 105 mm AE M1. . . . .	32
Figura 8 – Munição de artilharia 105 mm AE M1, fabricada pela IMBEL. . . . .	33
Figura 9 – Fluxograma básico do processo de desmilitarização de munição. . . . .	38
Figura 10 – Ilustração do emprego da técnica de queima aberta. . . . .	42
Figura 11 – Sistema portátil para aplicação da técnica de destruição por queima aberta em pequena escala. . . . .	43
Figura 12 – Ilustração do emprego da técnica de detonação aberta. . . . .	44
Figura 13 – Etapas gerais no processo de desmilitarização de munição. . . . .	46
Figura 14 – Técnica de desmontagem mecânica. . . . .	47
Figura 15 – Seccionamento e preparação do projétil para remoção da carga explosiva. . . . .	48
Figura 16 – Diagrama geral de utilização da técnica de criofatura. . . . .	49
Figura 17 – Remoção de material energético por derretimento: técnica de auto-clave. . . . .	51
Figura 18 – Utilização da técnica de jato de água pressurizado para remoção de material energético. . . . .	52
Figura 19 – Câmara de destruição de munição por queima fechada. . . . .	53
Figura 20 – Sistema de destruição com emprego da técnica de detonação fechada. . . . .	54
Figura 21 – Forno estático para destruição de material energético. . . . .	55
Figura 22 – Ilustração geral do emprego da técnica de incineração em forno rotatório numa planta industrial de destruição de material energético em grande escala. . . . .	56
Figura 23 – Ilustração geral de forno incinerador com carro de alimentação móvel. . . . .	57
Figura 24 – Destinação do material ao final do ciclo de vida do produto. . . . .	58

Figura 25 – Comparação dos impactos ambientais, por <i>kg</i> de TNT equivalente, associados ao descarte de munição convencional por incineração (C) e pela reutilização do material energético em explosivos civis (V)	60
Figura 26 – Espiral do desenvolvimento.	63
Figura 27 – Representação das fases do ciclo de vida dos produtos.	63
Figura 28 – Consumo global de água, por tipo de setor.	64
Figura 29 – Produção mundial anual de alguns materiais necessários à sociedade industrializada.	64
Figura 30 – Representação esquemática do ciclo de vida dos produtos, mostrando como recursos materiais, energéticos e de terra são consumidos e como os impactos ambientais são causados pelas emissões e uso dos recursos.	66
Figura 31 – Limites dos sistemas na ACV, com os devidos fluxos de entrada e saída.	67
Figura 32 – Interação entre as fases do processo de avaliação do ciclo de vida.	67
Figura 33 – Representação dos sistemas primários e secundários.	69
Figura 34 – Modelo de ciclo de vida associado à uma munição genérica.	69
Figura 35 – Métodos de avaliação do impacto de ciclo de vida publicados desde o ano 2000, com as regiões de origem entre parênteses e as respectivas atualizações, representadas pelas linhas tracejadas.	70
Figura 36 – Representação esquemática de um conjunto de processos unitários em um sistema.	71
Figura 37 – Exemplo de fluxos dos processos unitários. Fabricação de alumínio líquido primário.	71
Figura 38 – Fluxograma exemplificativo dos processos de fabricação do alumínio líquido primário, baseado no EcoInvent 2.2.	72
Figura 39 – Procedimentos recomendados para análise do inventário.	73
Figura 40 – Elementos constituintes da avaliação dos impactos do ciclo de vida.	75
Figura 41 – Relacionamento dos elementos da fase de interpretação com as outras fases da ACV.	76
Figura 42 – Modelo conceitual da SisProDMun.	82
Figura 43 – Visão geral do modelo de ciclo de vida associado à desmilitarização da munição com aplicação da SisProDMun.	82
Figura 44 – Estrutura geral da SisProDMun.	85
Figura 45 – Detalhamento da Sistematização do Processo de Desmilitarização de Munição - SisProDMun.	88
Figura 46 – Mapa do processo de desmilitarização de munição.	89
Figura 47 – Trajeto para desmilitarização de munição - hipótese nº 01.	109
Figura 48 – Trajeto para desmilitarização de munição - hipótese nº 02.	109

Figura 49 – Visão geral da aplicação da SisProDMun: cenário hipotético nº 01. . . . .	124
Figura 50 – Dados do inventário inseridos no software OpenLCA. . . . .	125
Figura 51 – Visão geral da aplicação da SisProDMun: cenário hipotético nº 02. . . . .	137
Figura 52 – Dados do inventário inseridos no software OpenLCA. . . . .	138
Figura 53 – Impactos normalizados, por categoria e por cenário hipotético. . . . .	140
Figura 54 – Relação percentual entre os impactos dos cenários hipotéticos: valores normalizados e apresentados por categoria . . . . .	141
Figura 55 – Participação percentual entre os impactos, por cenário hipotético . . . . .	142
Figura 56 – Contribuição no impacto, por item e por categoria. . . . .	142
Figura 57 – Ilustração geral dos projetis e seus componentes. . . . .	169
Figura 58 – Ilustração geral de projétil 120 mm AE PA. . . . .	170
Figura 59 – Ilustração geral de uma munição com projétil AE AT. . . . .	171
Figura 60 – Ilustração geral da munição 105 mm Fumígena M416. . . . .	171
Figura 61 – Ilustração geral da munição de morteiro 60 mm Iluminativa M767. . . . .	171
Figura 62 – Ilustração geral de um projétil do tipo perfurante. . . . .	172
Figura 63 – Projétil antipessoal 90 mm M594 seccionado. . . . .	172
Figura 64 – Exemplo de munição 120 mm com projétil do tipo cânister. . . . .	173
Figura 65 – Ilustração do projétil 155 mm M864. . . . .	173
Figura 66 – Ilustração geral de iniciadores e detonadores. . . . .	175
Figura 67 – Configuração esquemática do arranjo dos componentes do <i>trem explosivo</i> . . . . .	176
Figura 68 – Ilustração geral simplificada da aplicação de um <i>trem explosivo</i> . . . . .	176
Figura 69 – Formatos típicos utilizados na fabricação de grãos propelentes. . . . .	180
Figura 70 – Efeitos da configuração geométrica do grão na curva de pressão e deslocamento do projétil no interior do tubo. . . . .	180
Figura 71 – Ilustração geral da espoleta PD M508. . . . .	182
Figura 72 – Ilustração geral da estopilha de percussão M82. . . . .	184
Figura 73 – Ilustração geral de uma estopilha elétrica. . . . .	185
Figura 74 – Imagem do estojo M14 seccionado. . . . .	186
Figura 75 – Ilustração do estojo espiralado fabricado em aço. . . . .	186
Figura 76 – Processo de fabricação tradicional do estojo de latão. . . . .	187
Figura 77 – Munição 120 mm AE F1 montada com estojo combustível. . . . .	187
Figura 78 – Disparo: condição inicial. . . . .	188
Figura 79 – Disparo: encadeamento dos fenômenos. . . . .	189
Figura 80 – Ilustração do impacto do projétil no alvo. . . . .	190
Figura 81 – Equipamento torno CNC Romi Centur 45. . . . .	216
Figura 82 – Equipamento serra de fita modelo Starrett S5050. . . . .	217

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade estimada de munições convencionais (em toneladas) a ser desmilitarizada, por país. . . . .	22
Tabela 2 – Objetivos Estratégicos do Exército (OEE) relacionados à proposta de estudo. . . . .	25
Tabela 3 – Classificações gerais de munições. . . . .	30
Tabela 4 – Dados técnicos gerais da munição 105 mm AE M1. . . . .	34
Tabela 5 – Processos gerias existentes na desmilitarização de munições convencionais. . . . .	39
Tabela 6 – Principais declarações e inclusões dos objetivos e do escopo de uma ACV. . . . .	68
Tabela 7 – Fator de avaliação de impacto para a categoria "potencial de aquecimento global". . . . .	74
Tabela 8 – Ferramentas computacionais de apoio à realização da ACV. . . . .	77
Tabela 9 – Exemplos de aplicação da ACV em nível governamental. . . . .	78
Tabela 10 – Relação das munições empregadas pelo EB que fazem parte do escopo da SisProDMun. . . . .	83
Tabela 11 – Apresentação das fases, atividades, entradas, ferramentas auxiliares e saídas da SisProDMun. . . . .	86
Tabela 12 – Matriz de atividades, entradas e saídas do processo de desmilitarização de munição. . . . .	95
Tabela 13 – Definição dos cenários hipotéticos. . . . .	107
Tabela 14 – Métodos e categorias de impacto utilizados. . . . .	108
Tabela 15 – Dados técnicos da munição 105 mm AE M1 fabricada pela IMBEL <sup>a</sup> . . . . .	110
Tabela 16 – Composição química dos produtos utilizados na DA. . . . .	115
Tabela 17 – Informações gerais do processo de destruição por DA. . . . .	116
Tabela 18 – Resultados obtidos do processo de destruição por DA. . . . .	117
Tabela 19 – Composição química dos produtos utilizados na QA. . . . .	119
Tabela 20 – Informações gerais do processo de destruição por QA. . . . .	119
Tabela 21 – Resultados obtidos do processo de destruição por QA. . . . .	119
Tabela 22 – Inventário preliminar do cenário hipotético nº 01. . . . .	121
Tabela 23 – Inventário final do processo de desmilitarização das munições do cenário hipotético nº 01. . . . .	123
Tabela 24 – Impactos, por categoria (cenário hipotético nº 01). . . . .	125
Tabela 25 – Inventário para incineração e tratamento do gás (por $kg\ TNT_{eq}$ ). . . . .	127
Tabela 26 – Calor de explosão e fator de conversão para $kg\ TNT_{eq}$ de alguns materiais energéticos. . . . .	132

Tabela 27 – Valor total de $kg\ TNT_{eq}$ existente nas 1.000 unidades da munição 105 mm AE M1. . . . .	133
Tabela 28 – Inventário das atividades dos blocos número 15, 17, 18, 20, 28 e 29. . . . .	133
Tabela 29 – Inventário preliminar do cenário hipotético nº 02. . . . .	135
Tabela 30 – Inventário final do processo de desmilitarização das munições do cenário hipotético nº 02. . . . .	136
Tabela 31 – Impactos, por categoria (cenário hipotético nº 02). . . . .	138
Tabela 32 – Impactos normalizados, por categoria. . . . .	139
Tabela 33 – Classificação geral dos projetis. . . . .	174
Tabela 34 – Materiais comumente utilizados na fabricação dos propelentes e as respectivas funções. . . . .	179
Tabela 35 – Classificação geral das espoletas. . . . .	181
Tabela 36 – Materiais usualmente utilizados na fabricação das espoletas. . . . .	183
Tabela 37 – Materiais usualmente utilizados na fabricação das estopilhas. . . . .	185
Tabela 38 – Matriz de técnicas de desmilitarização de munição. . . . .	193
Tabela 39 – Valores de "EF/EFF" recomendados no cálculo estimativo da geração de emissões para uso na AIA e ARS. . . . .	197
Tabela 40 – Propriedades gerais de explosivos comumente utilizados na fabricação de munição. . . . .	203
Tabela 41 – Lista dos principais termos utilizados na ACV e suas respectivas definições. . . . .	207
Tabela 42 – Categorias de impacto usualmente utilizadas na ACV. . . . .	208
Tabela 43 – Métodos de avaliação do impacto usualmente utilizados na ACV. . . . .	210
Tabela 44 – Relação entre os tipos de transporte, a energia consumida e a pegada de carbono impressa ao meio ambiente. . . . .	213
Tabela 45 – Relação dos valores de mix de energia e $kg\ CO_2/kwh$ por país. . . . .	214
Tabela 46 – Quantidade de $CO_2$ liberada na combustão. . . . .	215
Tabela 47 – Especificação técnica do equipamento. . . . .	216
Tabela 48 – Especificação técnica do equipamento. . . . .	217

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Acid	Acidificação
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AE	Alto Explosivo
AE AT	Alto Explosivo Anti Tanque
AE M1	Alto Explosiva Modelo M1
AE P	Alto Explosivo Plástico
AE PA	Alto Explosivo com Propulsão Adicional
AG	Aquecimento Global
BD	Base Dupla
BS	Base Simples
BT	Base Tripla
DA	Detonação Aberta
DAb	Depleção Abiótica
DBT	Dibutilftalato
DCO	Depleção da Camada de Ozônio
De	Diâmetro Externo
DEGN	Dinitrato de Dietilenoglicol
DET	Ftalato de Dietila
DF	Detonação Fechada
Di	Diâmetro Interno
DNT	Dinitrotolueno
DPA	Difenilamina
EB	Exército Brasileiro
EcoTox	Ecotoxicidade
EUA	Estados Unidos da América
Eut	Eutrofização
HF	Fluoreto de Hidrogênio
IC	Índice de Corte
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IDD	Indústria de Desmilitarização e Defesa
IMBEL	Indústria de Material Bélico do Brasil
MD	Ministério da Defesa
ME	Material Energético
MEM	Material de Emprego Militar
MP	Material Particulado
NC	Nitrocelulose
NEQ	Massa Explosiva Total

NG	Nitroglicerina
NMVOC	Compostos Orgânicos Voláteis Não-Metano
NOx	Óxidos Nitrosos
NQ	Nitroguanidina
OEE	Objetivos Estratégicos do Exército Brasileiro
OF	Oxidação Fotoquímica
OM	Organização Militar
OTAN	Organização do Tratado do Atlântico Norte
PAH	Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
PCDD/PCDF	Composto Policlorado de Dioxina e Furano
PEE	Plano Estratégico do Exército Brasileiro
POEMS	Sistema de Gestão Ambiental Orientado a Projetos
PRODE	Produto de Defesa
QA	Queima Aberta
QF	Queima Fechada
R3	Recuperação, Reciclagem e Reuso
RDX	Research Department eXplosive
SAD	Sistema de Apoio à Decisão
SisProDMun	Sistematização do Processo de Desmilitarização de Munição
TC	Tempo de Corte
TH	Toxicidade Humana
TNT	Trinitrotolueno
UF	Unidade Funcional
UR	Umidade Relativa do Ar

## LISTA DE SÍMBOLOS

$kg\ TNT_{eq}$	Quilograma de TNT <i>equivalente</i>
$kg$	Quilograma
$m$	Metro
$^{\circ}C$	Grau Celsius
$MPa$	Mega Pascal ( $10^6$ Pa)
$MJ$	Mega Joules ( $10^6$ J)
$kg\ CO_2$	Quilograma de $CO_2$
$MJ/t.km$	Mega joule por tonelada por quilômetro
$kW$	Quilowatt ( $10^3$ W)
$h$	Hora
$t$	Tonelada
$km$	Quilômetro
$kg\ CO_{2-eq}$	Quilograma de $CO_{2-equivalente}$
$l$	Litro
$l/h$	Litro por hora
$kg\ SO_{2-eq}$	Quilograma de $SO_{2-equivalente}$
$kg\ PO_{4-eq}$	Quilograma de $PO_{4-equivalente}$
$kg\ 1,4\ DB_{eq}$	Quilograma de 1-4 $DB_{equivalente}$
$kg\ C_2H_{4-eq}$	Quilograma de $C_2H_{4-equivalente}$
$CTUh$	Unidade Tóxica Comparativa para Humanos
$kg\ MP_{(2,5)eq}$	Quilograma de MP equivalente menor que $2,5\ \mu m$
$unid/h$	Unidades por hora
$mm$	Milímetro ( $10^{-3}$ m)
$m^3/h$	Metro cúbico por hora
$m^2$	Metro quadrado
$cm^2$	Centímetro quadrado
$cm^2/min$	Centímetro quadrado por minuto
$min$	Minuto
$cal/g$	Caloria por grama
$MJ/kg$	Mega joule por quilograma
$kWh$	Quilowatt hora
$m^3/s$	Metro cúbico por segundo
$m^3$	Metro cúbico
$kg/m^3$	Quilograma por Metro cúbico
$mg/m^3$	Miligrama por Metro cúbico
$a_g$	Aceleração da gravidade
$\%$	Porcentagem

<i>g/cm<sup>3</sup></i>	Gramma por centímetro cúbico
<i>m/s</i>	Metro por segundo
<i>m/min</i>	Metro por minuto
<i>hp</i>	<i>Horse power</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
1.1	PROBLEMÁTICA	21
1.2	OBJETIVOS	24
1.3	JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO	24
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	27
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>28</b>
2.1	MUNIÇÕES E SEUS COMPONENTES	28
<b>2.1.1</b>	<b>Conceitos, definições e classificações gerais</b>	<b>28</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Munição 105 mm AE M1</b>	<b>31</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Considerações parciais sobre munições</b>	<b>34</b>
2.2	DESMILITARIZAÇÃO DE MUNIÇÃO	35
<b>2.2.1</b>	<b>Introdução geral</b>	<b>35</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Processos básicos de desmilitarização de munição</b>	<b>37</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Revisão geral sobre as técnicas de destruição tradicionais: queima aberta e detonação aberta</b>	<b>40</b>
2.2.3.1	Queima aberta	41
2.2.3.2	Detonação aberta	43
<b>2.2.4</b>	<b>Revisão geral sobre técnicas alternativas</b>	<b>45</b>
2.2.4.1	Preparação e pré-tratamento	46
2.2.4.1.1	<i>Desmontagem</i>	46
2.2.4.1.2	<i>Corte ou seccionamento</i>	47
2.2.4.1.3	<i>Criofratura</i>	48
2.2.4.2	Remoção de material energético	49
2.2.4.2.1	<i>Remoção por derretimento</i>	50
2.2.4.2.2	<i>Remoção por jato de água pressurizado</i>	51
2.2.4.2.3	<i>Remoção por usinagem</i>	52
2.2.4.3	Destruição	53
2.2.4.3.1	<i>Queima fechada</i>	53
2.2.4.3.2	<i>Detonação fechada</i>	54
2.2.4.3.3	<i>Incineração em forno estático</i>	54
2.2.4.3.4	<i>Incineração em forno rotatório</i>	55
2.2.4.3.5	<i>Incineração em forno com carro de alimentação móvel</i>	56
2.2.4.4	Recuperação, reciclagem e reutilização de recursos	57
2.2.4.4.1	<i>Recuperação de sucata</i>	58
2.2.4.4.2	<i>Recuperação como subproduto</i>	59
2.2.4.4.3	<i>Reuso de material</i>	60
2.2.4.4.4	<i>Recuperação de energia</i>	61

2.2.5	<b>Considerações parciais sobre desmilitarização de munições</b> . . .	61
2.3	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA . . . . .	62
2.3.1	<b>Introdução geral</b> . . . . .	62
2.3.2	<b>Definição dos objetivos e do escopo - 1ª fase da ACV</b> . . . . .	67
2.3.3	<b>Análise do inventário - 2ª fase da ACV</b> . . . . .	70
2.3.4	<b>Avaliação do impacto - 3ª fase da ACV</b> . . . . .	73
2.3.5	<b>Interpretação do resultado - 4ª fase da ACV</b> . . . . .	75
2.3.6	<b>Ferramentas de apoio à avaliação do ciclo de vida</b> . . . . .	76
2.3.7	<b>Aplicações gerais</b> . . . . .	77
2.3.8	<b>Considerações parciais sobre avaliação do ciclo de vida</b> . . . . .	79
3	<b>SISTEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE DESMILITARIZAÇÃO DE MUNIÇÃO - SisPRODMUN</b> . . . . .	81
3.1	ASPECTOS GERAIS . . . . .	81
3.2	DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS E DO ESCOPO . . . . .	83
3.3	APRESENTAÇÃO DA SisPRODMUN . . . . .	84
4	<b>ESTUDO DE CASO</b> . . . . .	107
4.1	CENÁRIO HIPOTÉTICO Nº 01 . . . . .	110
4.2	CENÁRIO HIPOTÉTICO Nº 02 . . . . .	125
4.3	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS SOBRE O ESTUDO DE CASO . . . . .	154
5	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> . . . . .	156
5.1	CONCLUSÕES . . . . .	156
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .	158
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	159
	<b>APÊNDICE A – PRINCIPAIS COMPONENTES DE MUNIÇÕES E FUNCIONAMENTO GERAL</b> . . . . .	168
A.1	PROJETIL . . . . .	168
A.2	EXPLOSIVOS . . . . .	174
A.3	PROPELENTE . . . . .	177
A.4	ESPOLETA . . . . .	181
<b>A.4.1</b>	<b>Descrição e funcionamento geral</b> . . . . .	<b>182</b>
A.5	ESTOPILHA . . . . .	184
A.6	ESTOJO . . . . .	185
A.7	FUNCIONAMENTO GERAL . . . . .	187
	<b>ANEXO A – CICLO DE VIDA DOS SISTEMAS E MATERIAIS DE EMPREGO MILITAR DO EB</b> . . . . .	<b>191</b>
	<b>ANEXO B – MATRIZ DE TÉCNICAS DE DESMILITARIZAÇÃO DE MUNIÇÃO</b> . . . . .	<b>193</b>
	<b>ANEXO C – VALORES DE "EF/EFF" RECOMENDADOS NO CÁLCULO ESTIMATIVO DA GERAÇÃO DE EMISSÕES</b> . . . . .	<b>197</b>

<b>ANEXO D – CÁLCULO DAS EMISSÕES PRODUZIDAS PELAS TÉCNICAS DE DESTRUIÇÃO QA E DA (FLUXOGRAMA)</b>	<b>198</b>
<b>ANEXO E – PROPRIEDADES GERAIS DOS EXPLOSIVOS . . . .</b>	<b>203</b>
<b>ANEXO F – PRINCIPAIS TERMOS TÉCNICOS USUALMENTE UTILIZADOS NA ACV . . . . .</b>	<b>207</b>
<b>ANEXO G – CATEGORIAS DE IMPACTO . . . . .</b>	<b>208</b>
<b>ANEXO H – MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO IMPACTO . . . . .</b>	<b>210</b>
<b>ANEXO I – TRANSPORTE: ENERGIA E PEGADA DE CARBONO</b>	<b>213</b>
<b>ANEXO J – MIX DE ENERGIA POR PAÍS . . . . .</b>	<b>214</b>
<b>ANEXO K – COMBUSTÃO: LIBERAÇÃO DE CO2 . . . . .</b>	<b>215</b>
<b>ANEXO L – EQUIPAMENTO: TORNO CNC (ADAPTADO) . . . . .</b>	<b>216</b>
<b>ANEXO M – EQUIPAMENTO: MÁQUINA DE SERRA DE FITA . . .</b>	<b>217</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo aborda-se as questões relacionadas à problemática existente sobre o final do ciclo de vida das munições, os objetivos geral e específicos do corrente trabalho, as justificativas que corroboram a importância para o desenvolvimento desta pesquisa e a contribuição esperada às áreas acadêmica e de defesa. Ao final, apresenta-se a estrutura do trabalho.

### 1.1 PROBLEMÁTICA

As Forças Armadas, em geral, utilizam em suas atividades rotineiras uma grande quantidade de munições, com a finalidade de adestramento da tropa e persuasão contra possíveis agentes invasores.

O uso e o descarte desse tipo de material têm se tornado uma preocupação cada vez maior às sociedades, face aos impactos ambientais provocados e, conseqüentemente, aos riscos potenciais à saúde humana. Dessa forma, a pressão pública tem direcionado os órgãos governamentais à implementação de uma legislação cada vez mais rígida.

Cumming e Johnson (2019) ressaltam que o impacto ambiental é apenas um fator do ciclo de vida das munições e seus componentes que precisa ser analisado. Para que esse fator possa ser compreendido e, então, tratado, outros fatores também precisam ser analisados: as características de cada material, os processos de fabricação envolvidos, o uso de cada tipo de produto, o gerenciamento do ciclo de vida e o descarte.

Para se ter uma ideia da ordem de grandeza do problema, apenas os Estados Unidos possuíam 430.987 toneladas de produtos em estoque destinados à desmilitarização, em setembro de 2017, sendo 402.834 toneladas relacionadas às munições convencionais, conforme ilustrado na Figura 1.

Outros países do mundo também apresentam o mesmo problema, como pode ser observado nos dados da Tabela 1. Para alguns países, a divulgação desse tipo de informação ainda é tratada de maneira reservada e com sigilo, como é o caso do Brasil, e, conseqüentemente, a obtenção desses dados fica prejudicada.

Estoques elevados de munições inservíveis<sup>1</sup>, destinadas à desmilitarização, de fato tornam-se um problema aos agentes públicos responsáveis por aqueles produtos. Por um lado, por tratar-se de material explosivo, requer constante acompanhamento e inspeção, pois a existência de algum tipo de decomposição pode ser suficiente para conduzir a um processo de iniciação espontânea, podendo causar danos materiais e pessoais. Por outro lado, pode ser um alvo em potencial para agentes terroristas.

<sup>1</sup> Imprestável; sem utilidade; que não possui valor ou préstimo; que não se consegue usar, devido às condições de conservação ou à obsolescência.

Figura 1 – Peso total de material a ser desmilitarizado existente em depósito nos EUA, em setembro de 2017.



Fonte: Modificada de NASEM (2019).

Tabela 1 – Quantidade estimada de munições convencionais (em toneladas) a ser desmilitarizada, por país.

<b>País</b>	<b>Quantidade estimada (em toneladas)</b>
Afganistão	100.000
Albânia	120.000
Bielorrússia	1.000.000
Bósnia	67.000
Bulgária	153.000
Iraque	400.000
Montenegro	11.200
Sérvia	200.000
Ucrânia	2.500.000
<b>TOTAL</b>	<b>4.551.200</b>

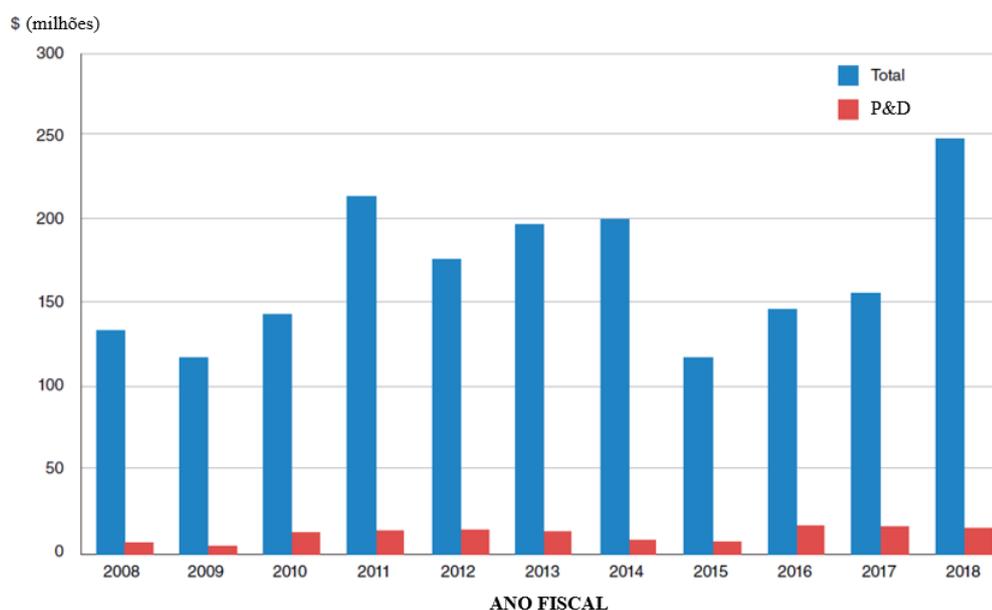
Fonte: Adaptado de Anders *et al.* (2008).

Nesse contexto, para tentar resolver os problemas causados com as munições ao final do ciclo de vida, os Estados Unidos criaram um programa de Estado para tratar especificamente sobre a problemática de desmilitarização de munições, investindo milhões de dólares em pesquisa, desenvolvimento, teste e avaliação de tecnologias, conforme ilustrado na Figura 2.

Percebe-se que o problema de desmilitarização de munição é uma questão de Estado, não sendo de simples solução e requer elevados investimentos, como mostra a Figura 2.

O *Exército Brasileiro (EB)*, como agente público, consumidor e usuário de munições e de seus componentes, encontra-se inserido no contexto geral do ciclo de vida desses materiais e precisa, portanto, envidar esforços para um tratamento adequado dos produtos que alcançaram o final do seu ciclo de vida ou que, por algum motivo, possam ser classificados como inservíveis, com o objetivo de diminuir os impactos

Figura 2 – Financiamento Total e de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) do programa de desmilitarização de munições convencionais nos EUA, de 2008-2018.



Fonte: Modificada de NASEM (2019).

ambientais e os potenciais riscos à saúde humana.

As munições são montadas com diversos materiais que podem oferecer algum tipo de risco ambiental e de toxicidade à saúde humana, caso não recebam o tratamento adequado ao final do ciclo de vida.

Em geral, os agentes contaminantes em potencial existentes nas munições são os materiais energéticos e os metálicos.

Tais materiais energéticos são compostos químicos ou misturas de elementos químicos e, normalmente, são divididos em três classes: explosivos, propelentes e pirotécnicos.

Em relação aos materiais energéticos, destacam-se os materiais relacionados à carga explosiva principal e à carga de propulsão: *Trinitrotolueno (TNT)*, composição B (TNT/RDX), octol (TNT/HMX), *Nitrocelulose (NC)*, *Nitroglicerina (NG)* e *Nitroguanidina (NQ)*.

Em relação aos elementos metálicos, destacam-se: chumbo, cobre, zinco e alumínio.

O Brasil, devido às dimensões continentais que apresenta, com uma área superficial aproximada de 8.510.345,5 km<sup>2</sup> (IBGE, 2021), necessita de uma atenção especial sobre a política de desmilitarização de munição, que autoriza, atualmente, o emprego regular de técnicas tradicionais de *Queima Aberta (QA)* e *Detonação Aberta (DA)* como forma de tratamento da munição ao final do ciclo de vida.

As Forças Armadas do Brasil (Exército, Marinha e Aeronáutica) possuem Organizações Militares distribuídas por todo o território nacional. A grande extensão

territorial do Brasil influencia diretamente a gestão do ciclo de vida das munições e, conseqüentemente, a avaliação do impacto ambiental, que depende diretamente da destinação e tratamento final do produto.

Assim, diante dos fatos expostos, ficam os questionamentos:

- O que fazer com as munições e seus componentes ao final do ciclo de vida?
- Quais são as técnicas de desmilitarização existentes e consideradas de emprego maduro que poderiam ser utilizadas ao final do ciclo de vida das munições, de uma maneira responsável e menos impactante ao meio ambiente?

## 1.2 OBJETIVOS

Diante dos problemas apresentados na Seção 1.1, tem-se por objetivo geral a proposição de sistematização do processo de desmilitarização de munição, com o intuito de auxiliar na elaboração do inventário (consumo de recursos e produção de emissões) do respectivo processo de desmilitarização para a realização da *Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)* relacionada à fase de descarte do produto, de maneira a obter informações que possam ser utilizadas em processos decisórios, orientando as ações e decisões numa direção ambientalmente mais responsável.

Com o intuito de alcançar o objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

1. Realizar uma revisão bibliográfica sobre: a) munições, apresentando os conceitos e classificações gerais, descrevendo a funcionalidade de cada componente e caracterizando os principais materiais utilizados; b) desmilitarização de munição, apresentando os conceitos principais, a finalidade, as técnicas disponíveis e comumente empregadas e o respectivo nível de maturidade em que se encontram; e c) avaliação do ciclo de vida, identificando e explicando as fases existentes, com o intuito de entender o método de quantificação do impacto ambiental;
2. Elaborar uma proposta de sistematização do processo de desmilitarização de munição, com enfoque na avaliação do ciclo de vida;
3. Realizar um estudo de caso, com enfoque na munição 105 mm AE M1 (munição calibre 105 mm – do tipo Alto Explosiva – modelo M1) e na avaliação do seu ciclo de vida, baseado numa abordagem multicenário, caracterizada pela utilização de técnicas de desmilitarização diferentes.

## 1.3 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO

Mundialmente, em virtude da evolução ocorrida na sociedade, a ação humana vem promovendo perturbações sérias no meio ambiente, através da contaminação

do solo, dos lençóis freáticos, dos rios, dos oceanos e do ar, provocadas, em geral, pelos rejeitos industriais lançados de forma indiscriminada no meio ambiente, pelo desmatamento, emissão de gases nocivos à atmosfera e pelo descarte inadequado de produtos ao final do ciclo de vida.

Conforme apresentado por Alverbro *et al.* (2009), existe um crescente entendimento sobre a necessidade de minimizar os impactos ambientais provocados por todos os setores e, portanto, o setor militar não pode ser exceção.

Complementando o entendimento anterior, a *Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN)* apresenta em relatório técnico (NATO, 2010) o entendimento comum de que as munições precisam ser desmontadas e os materiais explosivos destruídos, de maneira que não afetem o meio ambiente.

O EB, por sua vez, através do seu planejamento estratégico (EB, 2019), direciona os esforços dos investimentos da Força para o quadriênio 2020-2023, dando prosseguimento ao processo de transformação do EB rumo à era do conhecimento. Para tal, de maneira a se tornar efetivo em sua execução, o *Plano Estratégico do Exército Brasileiro (PEE)* desdobra os *Objetivos Estratégicos do Exército Brasileiro (OEE)* em estratégias, ações estratégicas e atividades.

Em consonância com a linha de pensamento apresentada por Alverbro *et al.* (2009), com a OTAN e com as leis ambientais nacionais, o planejamento estratégico do EB estabelece alguns objetivos, dentre vários, diretamente relacionados com a proposta de estudo deste trabalho e que podem ser identificados na Tabela 2.

Tabela 2 – Objetivos Estratégicos do Exército (OEE) relacionados à proposta de estudo.

OEE		ESTRATÉGIA		AÇÃO ESTRATÉGICA		ATIVIDADE	
NR	DESCRIÇÃO	NR	DESCRIÇÃO	NR	DESCRIÇÃO	NR	DESCRIÇÃO
3	Contribuir com o desenvolvimento sustentável e a paz social	3.2	Aperfeiçoamento da estrutura de apoio às operações de cooperação e coordenação com agências	3.2.4	Aperfeiçoar o controle ambiental nas atividades militares	3.2.4.1	Reestruturar o sistema de gestão ambiental do EB
9	Aperfeiçoar o sistema de ciência, tecnologia e inovação	9.2	Pesquisa, desenvolvimento e inovação de <i>Produto de Defesa (PRODE)</i>	9.2.5	Reformular os processos do modelo de gestão do ciclo de vida de PRODE	9.2.5.1	Propor o aperfeiçoamento do modelo de gestão do ciclo de vida de PRODE e sistemas complexos.

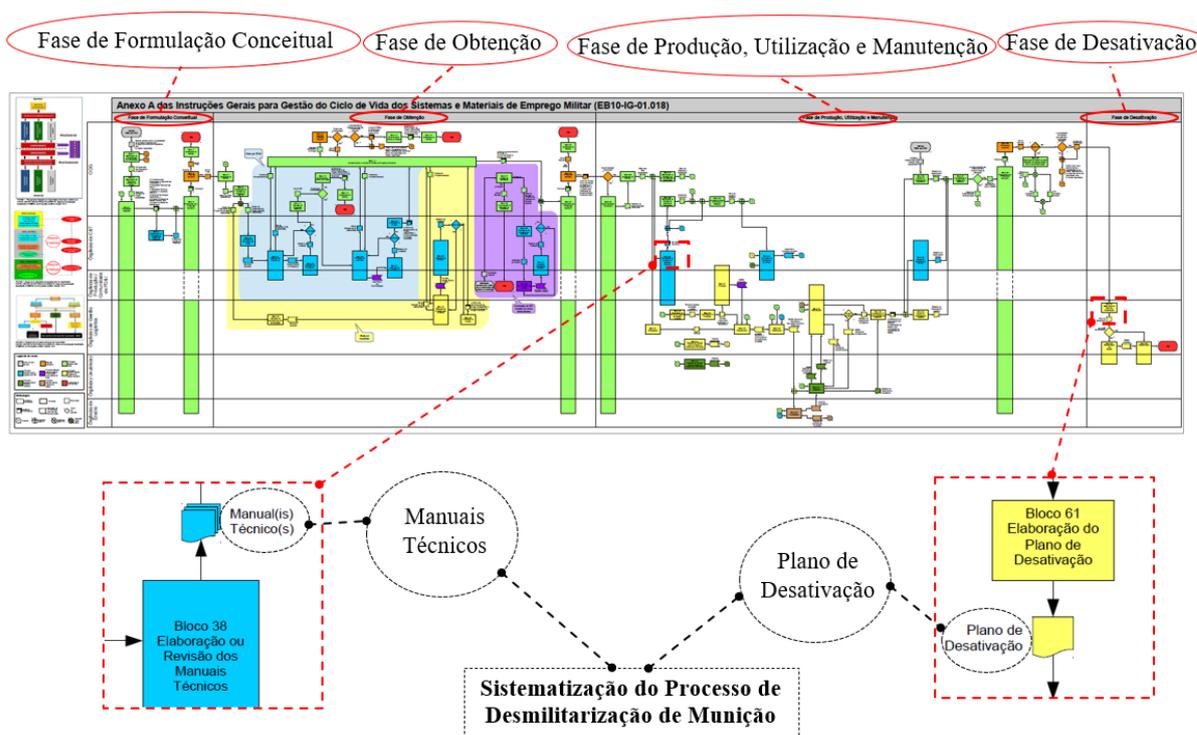
Fonte: EB (2019).

Percebe-se, portanto, a conscientização de diversas entidades e organizações institucionais, nacionais e internacionais, das quais o EB se enquadra, sobre a real necessidade de estudo, análise e desenvolvimento de uma sistematização de processos

relacionados à desmilitarização de munições obsoletas e/ou consideradas inservíveis, de maneira segura e menos impactante ao meio ambiente do que as técnicas tradicionais de QA e DA usualmente utilizadas.

Assim, nesse contexto, justifica-se a realização desse trabalho, pois espera-se que a sistematização do processo de desmilitarização de munição a ser desenvolvida seja uma sistemática de apoio à tomada de decisão, a ser utilizada por técnicos, pesquisadores e gestores para auxiliar na elaboração de Manuais Técnicos e/ou do Plano de Desativação, inseridos, respectivamente, nas fases de Produção, Utilização e Manutenção ou de Desativação do Ciclo de Vida dos Sistemas e Materiais de Emprego Militar do EB, conforme ilustrado na Figura 3<sup>2</sup>, e na realização de estudos e pesquisas que possam auxiliar nos processos decisórios de gestão de munições, orientando as ações e decisões numa direção ambientalmente mais responsável.

Figura 3 – Ilustração geral da gestão do ciclo de vida dos sistemas e materiais de emprego militar do Exército Brasileiro.



Fonte: Adaptado de EB (2016).

Como contribuição, espera-se que este trabalho seja uma “semente” que possa desenvolver, crescer e dar frutos, iniciando um processo de criação de um *Sistema de Apoio à Decisão (SAD)* dedicado à gestão e avaliação do ciclo de vida de munições no *Ministério da Defesa (MD)*, incluindo todas as munições utilizadas pelas Forças Armadas.

<sup>2</sup> Vide Anexo A para melhor visualização do fluxograma.

Por fim, espera-se, também, que este trabalho incentive outros estudiosos e pesquisadores a desenvolverem trabalhos correlatos.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se estruturado em 5 (cinco) capítulos: (1) Introdução; (2) Revisão Bibliográfica; (3) Sistematização do Processo de Desmilitarização de Munição - SisProDMun; (4) Estudo de caso e (5) Conclusões e recomendações.

No Capítulo 1, **Introdução**, são abordadas as questões relacionadas à problemática existente no final do ciclo de vida das munições, os objetivos geral e específicos do corrente trabalho, as justificativas que corroboram a importância para o desenvolvimento desta pesquisa e a estrutura do trabalho.

No Capítulo 2, **Revisão Bibliográfica**, é realizada uma revisão bibliográfica sobre munições e seus componentes, *desmilitarização* de munição e sobre o processo de avaliação do ciclo de vida, com o intuito de obter as informações delineadas no "*objetivo específico 1*" deste trabalho.

No Capítulo 3, **Sistematização do Processo de Desmilitarização de Munição - SisProDMun**, é apresentado o desenvolvimento da proposta de sistematização do processo de desmilitarização de munição, foco principal deste trabalho, com o intuito de alcançar o "*objetivo específico 2*".

No Capítulo 4, **Estudo de caso**, são apresentados os resultados relacionados ao estudo de caso realizado, oportunidade em que a sistemática desenvolvida é aplicada à munição 105 mm *Alto Explosiva Modelo M1 (AE M1)*, baseado numa abordagem de multicenários, onde o cenário hipotético nº 01 é caracterizado pela utilização de técnicas tradicionais de desmilitarização e o cenário hipotético nº 02 pela utilização de técnicas alternativas, com o intuito de alcançar o "*objetivo específico 3*".

No Capítulo 5, **Conclusões e recomendações**, são apresentadas as conclusões gerais e algumas recomendações para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre munições e seus componentes, *desmilitarização* de munição e sobre o processo de avaliação do ciclo de vida, com o intuito de obter as informações delineadas no "*objetivo específico 1*" deste trabalho.

### 2.1 MUNIÇÕES E SEUS COMPONENTES

Esta seção apresenta uma revisão bibliográfica sobre munições e seus componentes, com o objetivo de apresentar os conceitos, definições e classificações gerais desses produtos, os principais materiais utilizados na fabricação e o princípio de funcionamento geral dos mesmos, de maneira a fornecer um conhecimento básico dos respectivos produtos, permitir a contextualização adequada e necessária para orientar a elaboração da proposta de sistematização do processo de desmilitarização de munição, foco principal deste trabalho, e propiciar que o objetivo específico "*1.a*" seja alcançado.

#### 2.1.1 Conceitos, definições e classificações gerais

No campo de batalha, o apoio de fogo normalmente é realizado através de sistemas de armas conhecidos como obuseiros, morteiros e canhões, conforme ilustrado na Figura 4. Tais sistemas têm apresentado, com o passar do tempo, diversas evoluções tecnológicas, sempre no sentido de proporcionar maior capacidade de mobilidade à tropa, maior alcance das munições utilizadas e maior precisão no alvo, causando menores efeitos colaterais.

Figura 4 – Ilustração geral dos sistemas de armas obuseiro, morteiro e canhão.



a) Obuseiro 105 mm  
L118 Light Gun



b) Morteiro Pesado 120  
mm Raiado M2



c) Carro de combate Leopard  
com canhão 105 mm

Fonte: T&D (2021a) (Fig. 4-a), CTEEx (2021) (Fig. 4-b) e DefesaNet (2021) (Fig. 4-c).

Entende-se por munição o "*artefato completo, pronto para carregamento e disparo de uma arma, cujo efeito desejado pode ser: destruição, iluminação ou ocultação*".

*mento do alvo; efeito moral sobre pessoal; exercício; manejo; outros efeitos especiais".* (EB, 2001, p. 9)

As munições, em geral, são projetadas com características peculiares em função do armamento em que são utilizadas e da função a que se destinam. Assim, em relação aos sistemas de armas apresentados anteriormente, as munições podem ser divididas em: de artilharia, morteiro e de canhão. Exemplos dessas munições podem ser vistos nas imagens da Figura 5.

Figura 5 – Ilustração geral de munições utilizadas nos sistemas de armas obuseiro, morteiro e canhão.



a) Munição de artilharia 105 mm AE M1    b) Munição de morteiro 120 mm AE M530B1    c) Munição de canhão 105 mm AE P M393A3

Fonte: IMBEL (2021b) (Fig. 5-a), NEXTER (2018) (Fig. 5-b e 5-c).

Adicionalmente, conforme apresentado por Carlucci e Jacobson (2008), as munições também podem ser categorizadas de acordo com o método construtivo utilizado. Neste caso, subdividem-se em encartuchada ou desencartuchada, dependendo da existência ou não do estojo, respectivamente. As munições encartuchadas ainda são subdivididas em engastadas ou não-engastadas, dependendo se o estojo é fixo ao projétil ou não, respectivamente.

Outras classificações também podem ser atribuídas às munições, seja em relação ao tipo de produto utilizado no carregamento do projétil, quanto ao emprego da munição ou quanto ao calibre do projétil. A Tabela 3 apresenta, resumidamente, as classificações gerais utilizadas em munições.

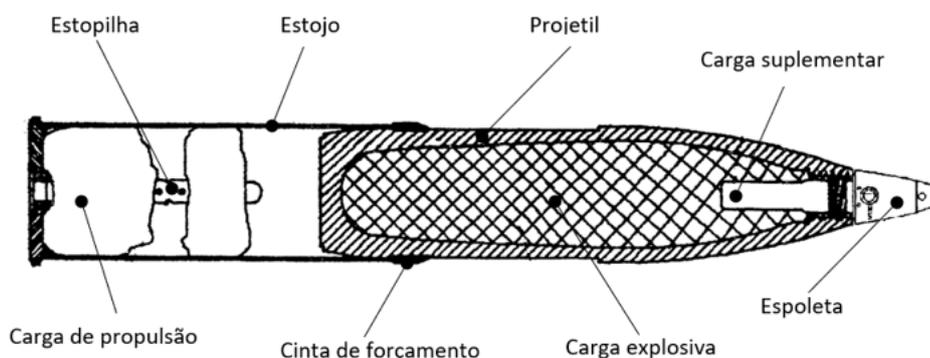
Tabela 3 – Classificações gerais de munições.

CLASSIFICAÇÃO DA MUNIÇÃO	
Quanto ao carregamento do projétil	explosiva química inerte
Quanto ao emprego	real de exercício salva <sup>1</sup> manejo <sup>2</sup>
Quanto ao método construtivo	encartuchada      engastada desengastada
	não-encartuchada
Quanto ao calibre do projétil	pequeno médio grande

Fonte: Adaptado de DoA (1969) e NAMMO (2021).

De maneira a permitir a visualização e facilitar o entendimento sobre as munições de artilharia, de morteiro e de canhão, a Figura 6 ilustra, representativamente, os principais componentes de cada tipo de munição.

Figura 6 – Ilustração geral de munições de artilharia, morteiro e canhão e de seus principais componentes.

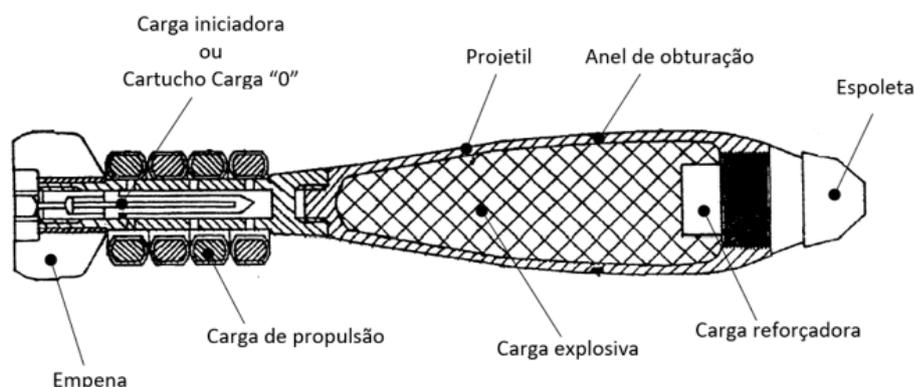


a) Munição de artilharia 105 mm

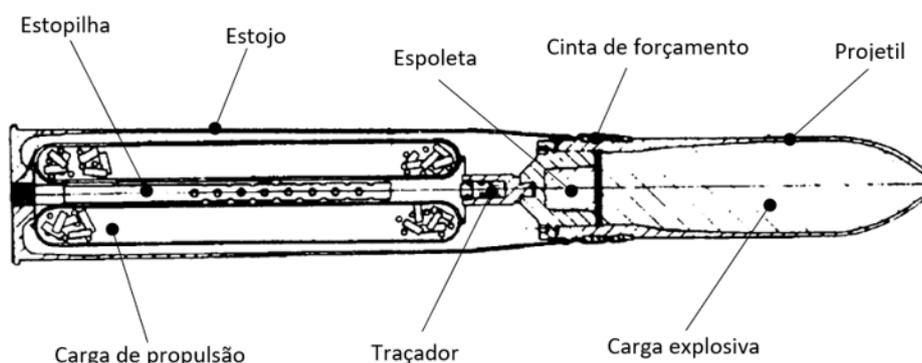
<sup>1</sup> Munição fabricada com a finalidade de simular o disparo, promovendo efeito sonoro e visual. Normalmente utilizada em saudações de autoridades ou atividades festivas. Não possui projétil. Fonte: (DOA, 1969).

<sup>2</sup> Munição fabricada com a finalidade de simular, fisicamente, uma munição de emprego real. Normalmente utilizada em atividades de instrução (ensino) ou em mostruários. Não possui material ativo. Fonte: (DOA, 1969).

Figura 6 – Ilustração geral de munições de artilharia, morteiro e canhão e de seus principais componentes. (continuação)



b) Munição de morteiro 81 mm



c) Munição de canhão 105 mm

Fonte: Modificado de DoD (1991).

Com o intuito de propiciar um entendimento mais aprofundado sobre as munições e complementar as informações apresentadas nesta seção, são apresentadas, no Apêndice A, algumas características e funcionalidades dos seus principais componentes.

### 2.1.2 Munição 105 mm AE M1

Esta subseção apresenta, de maneira geral, algumas características da munição 105 mm AE M1, que será utilizada, posteriormente, no estudo de caso do Capítulo 4.

Escolheu-se a munição 105 mm AE M1, por tratar-se de uma munição atualmente em uso pelo EB, por ser fabricada por empresas nacionais vinculadas ao MD, por não estar submetida às imposições relacionadas à patente e proteção de propriedade intelectual e por suas informações técnicas estarem amplamente divulgadas.

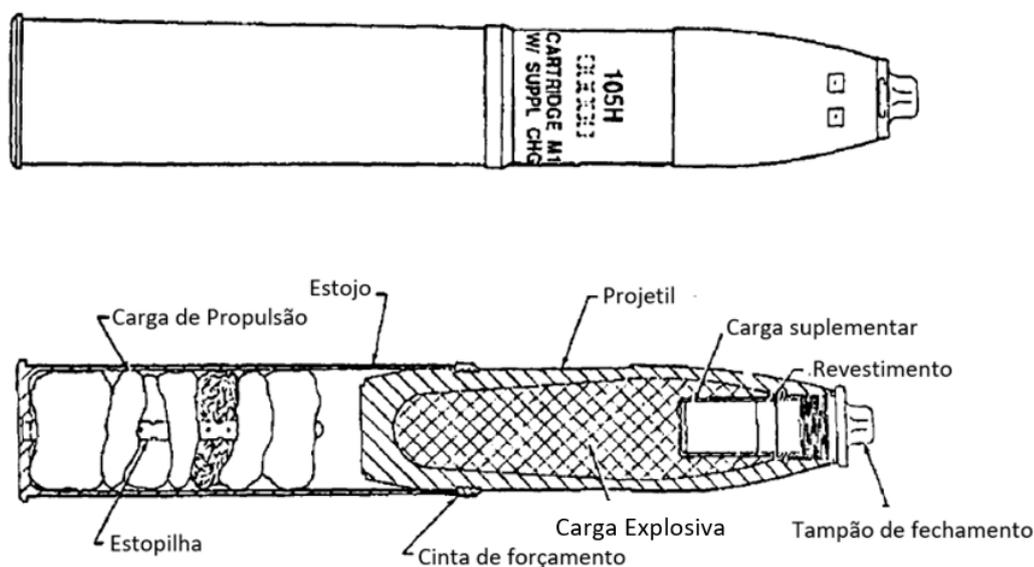
A munição 105 mm AE M1 é uma munição de artilharia<sup>3</sup>, podendo ser classificada com relação aos seguintes aspectos:

<sup>3</sup> Meio de apoio de fogo considerado para proporcionar ao comando, volume e potência de fogo, nos momentos e locais necessários à manobra. Fonte: MD (1998).

- Carregamento do projétil: explosiva;
- Emprego: real;
- Método construtivo: encartuchada e desengastada; e
- Calibre do projétil: de grande calibre.

A Figura 7 ilustra, de maneira geral, a munição 105 mm AE M1.

Figura 7 – Ilustração geral da munição de artilharia 105 mm AE M1.



Fonte: DoA (1994).

Em geral, o corpo do projétil utilizado na munição é fabricado em liga de aço carbono, forjado, e apresenta em sua parte anterior um perfil ogival. Em sua base é soldada uma chapa metálica como meio adicional de proteção contra a ação dos gases quentes oriundos da queima da carga de propulsão durante o disparo. O seu interior é preenchido com um carregamento *Alto Explosivo (AE)*, TNT ou Composto B<sup>4</sup>, que, aliado ao confinamento, proporciona elevado poder de arrebentamento e fragmentação.

Na parte posterior do corpo do projétil é montada a cinta de forçamento, normalmente fabricada em cobre ou latão, que tem a finalidade de obturar<sup>5</sup> os gases produzidos pela queima da carga propelente, aumentando a eficiência de propulsão do projétil, e, ao mesmo tempo em que o projétil é forçado a transladar no interior do tubo por causa do aumento da pressão, impor o movimento de rotação ao projétil, garantindo-lhe estabilidade rotacional durante o voo.

<sup>4</sup> AE formado por TNT (60%) e *Research Department eXplosive (RDX)* (40%), acrescentado em 1% de cera. Fonte: USAMC (1971).

<sup>5</sup> Vedar.

No carregamento explosivo é fresada uma cavidade para acomodar a carga suplementar, responsável por iniciar<sup>6</sup> a carga explosiva. Tal cavidade recebe um revestimento (copo de proteção) para conter o material explosivo e evitar que ele se desagregue durante o transporte ou manuseio da munição.

O projétil pode ser fornecido com ou sem espoleta, dependendo do contrato de fornecimento realizado entre o cliente e o fabricante.

O tampão de fechamento tem a finalidade de fechar a extremidade da ogiva do projétil, evitando a entrada de material estranho no interior da cavidade do explosivo, a perda ou danos da carga suplementar e danos à rosca destinada à montagem da espoleta.

O estojo, normalmente fabricado em latão, é montado com uma estopilha em sua base e acondiciona 7 (sete) cargas de propulsão. Além do acondicionamento das cargas, tem a finalidade de impedir a fuga dos gases pela culatra<sup>7</sup> do armamento no momento do disparo.

A estopilha é, em geral, fabricada em latão e é montada com uma cápsula de percussão<sup>8</sup> e pólvora negra. Tem a finalidade de promover a iniciação da carga de projeção após a percussão de sua cápsula.

A Figura 8 ilustra a munição 105 mm AE M1 fabricada pela *Indústria de Material Bélico do Brasil (IMBEL)*, empresa pública vinculada ao Ministério da Defesa por intermédio do Comando do Exército, que será utilizada como objeto de análise no estudo de caso do Capítulo 4. É possível identificar na respectiva figura o projétil 105 mm seccionado, carregado com AE e montado com a espoleta de ogiva e percussão, o estojo seccionado e as cargas de projeção em seu interior.

Figura 8 – Munição de artilharia 105 mm AE M1, fabricada pela IMBEL.



Fonte: Adaptado de IMBEL (2021b).

<sup>6</sup> Promover a detonação.

<sup>7</sup> Componente do armamento localizado na parte posterior do tubo e responsável pelo seu fechamento.

<sup>8</sup> Iniciada por impacto mecânico.

A Tabela 4 apresenta um resumo geral de alguns dados técnicos da munição 105 mm AE M1, que podem apresentar alguma variação, dependendo do fabricante.

Tabela 4 – Dados técnicos gerais da munição 105 mm AE M1.

ITEM	DESCRIÇÃO
Peso (kg)	18,1
Comprimento (m)	0,72 (máx.) (com tampão de fechamento)
Material do corpo do projétil	Aço carbono (forjado)
Carregamento explosivo (kg)	2,1 (TNT) ou 2,2 (Composto B)
Utilizado nos seguintes canhões (armamentos)	M49 (M52, M52A1) M2A1, M2A2 (M101, M101A1) M103 (M108) M137 (M102)
Modelo do estojo	M14 (latão)
Peso do estojo (kg)	2,7
Modelo da estopilha	M28A2
Modelo da cápsula de percussão	M61
Peso da pólvora negra na estopilha (kg)	0,02
Peso da carga de propulsão (kg)	0,24 - Carga 1 ( <i>Base Simples (BS)</i> ) <sup>9</sup> 0,04 - Carga 2 (BS) 0,07 - Carga 3 (BS) 0,10 - Carga 4 (BS) 0,16 - Carga 5 (BS) 0,25 - Carga 6 (BS) 0,40 - Carga 7 (BS)

Fonte: DoA (1994).

### 2.1.3 Considerações parciais sobre munições

Como visto nesta seção, as munições são produtos com características bem peculiares, compostas por materiais energéticos que requerem cuidados específicos de manuseio, armazenamento e utilização.

A revisão bibliográfica sobre munições e seus componentes, apresentada nesta seção e complementada pelas informações do Apêndice A, propiciou a obtenção de informações sobre diversos conceitos, classificações, princípios de funcionamento, características e propriedades de produtos comumente utilizados na fabricação de munições, conforme delineado no objetivo específico "1.a)".

Ressalta-se que as informações apresentadas nesta seção, complementadas pelo Apêndice A, são fundamentais para a evolução do trabalho e servirão de base para a revisão bibliográfica sobre a *desmilitarização* de munições, realizada na Seção 2.2, oportunidade em que serão apresentados diversos conceitos e as principais técnicas utilizadas no tratamento das munições e seus componentes ao final do ciclo de vida.

<sup>9</sup> Tipo de propelente que possui como ingrediente principal a NC. Fonte: DoA (1969).

## 2.2 DESMILITARIZAÇÃO DE MUNIÇÃO

Esta seção apresenta uma revisão bibliográfica sobre *desmilitarização* de munição, com o objetivo de apresentar os principais conceitos existentes, a finalidade, as técnicas disponíveis e empregadas e o respectivo nível de maturidade em que se encontram, permitindo uma contextualização adequada e necessária para orientar a elaboração da proposta de sistematização do processo de desmilitarização de munição, foco principal deste trabalho, e propiciar que o objetivo específico "1.b)" seja alcançado.

### 2.2.1 Introdução geral

Entende-se por *desmilitarização* de munição como "a desmontagem da munição para separação dos componentes, recuperação dos itens comercialmente viáveis e o tratamento dos materiais perigosos, de maneira que eles possam ser descartados de maneira segura e adequada".(CUMMING; JOHNSON, 2019, p. 13, tradução nossa)

Ferreira *et al.* (2013, p. 1, tradução nossa) apresenta a desmilitarização como "um processo complexo que usualmente envolve o descarregamento e a destruição de materiais energéticos e a reciclagem dos componentes restantes".

Percebe-se, portanto, que a *desmilitarização* de munição é uma importante ferramenta para tentar resolver ou amenizar os problemas de acúmulos de munições obsoletas e/ou inservíveis em estoques, conforme apresentado no Capítulo 1, de maneira segura e ambientalmente responsável.

Historicamente, as técnicas de destruição conhecidas como QA e DA, que serão abordadas mais detalhadamente na Seção 2.2.2, têm sido adotadas como padrão por diversos países do mundo nas ocasiões de descarte de munições obsoletas ou inservíveis, face à sua simplicidade e ao baixo custo de execução, quando comparada às demais técnicas. Porém, tanto a QA quanto a DA têm sofrido fortes críticas da sociedade em geral e de agentes públicos por causa dos potenciais impactos ambientais e danos à saúde humana.

Um exemplo dessa crítica e preocupação foi apresentada pelo Congresso dos Estados Unidos da América (EUA) em seu Relatório 106-754, de 17/07/2000:

*Os conferencistas estão cientes da preocupação pública sobre os possíveis riscos à saúde da população associados à queima aberta e detonação aberta de munições e equipamentos existentes em depósitos do Exército em várias localidades dos EUA. Acredita-se que a maioria dos riscos estejam associados aos gases, partículas e outros contaminantes transportados pelo ar, oriundos dos locais da queima e detonação. (NASEM, 2019, p. 8, tradução nossa)*

Porém, são muitos os questionamentos a serem respondidos para a adoção de um caminho a ser seguido na tentativa de amenizar ou eliminar os problemas relacionados à desmilitarização de munições.

Por tratar-se de um problema cujo foco principal é um produto da área de defesa (*a munição*), de elevada complexidade e que requer vultuosos investimentos financeiros para ser resolvido, normalmente, os países tratam desse problema como um assunto de Estado.

Algumas questões importantes apresentadas por OSCE (2008, p. 145-147, tradução nossa) devem ser consideradas no caso de elaboração de um plano de projeto relacionado à desmilitarização de munições, dentre elas:

- *É seguro movimentar a munição a ser desmilitarizada?*
- *Quais são as implicações no custo relacionado ao transporte do produto?*
- *Quantas munições, por tipo, serão desmilitarizadas?*
- *As informações técnicas do produto a ser desmilitarizado estão disponíveis?*
- *Quais serão as fontes dos recursos e como eles serão distribuídos? Estarão disponíveis tempestivamente?*
- *Quais são os prazos existentes?*
- *Existem informações de projeto confidenciais nos produtos a serem desmilitarizados?*
- *Existem restrições ambientais?*
- *Existem restrições quanto à reutilização do material desmilitarizado?*

Adicionalmente, é importante salientar que:

*A desmilitarização de munição é uma atividade potencialmente perigosa... Até mesmo sob regimes mais rigorosos e com avaliações de segurança de elevado nível, incidentes ainda ocorrem. Faz-se necessária uma consideração cuidadosa ao balancear os benefícios ambientais percebidos e os riscos associados a alguns processos de desmilitarização. (CUMMING; JOHNSON, 2019, p. 16, tradução nossa)*

Ressalta-se que muitas técnicas e procedimentos utilizados no passado para a destinação final de munições inservíveis foram proibidas. Acordos, tratados e protocolos internacionais foram e vêm sendo elaborados com a finalidade de tentar solucionar ou amenizar os problemas relacionados a esse assunto.

Como exemplo, destaca-se a técnica de *fundeamento* de munição no oceano. Tal prática tornou-se proibida, internacionalmente, através da *Convenção sobre Prevenção da Poluição Marinha por Alijamento de Resíduos e Outras Matérias*, conhecida como Convenção de Londres, de 1972. O Brasil, signatário dessa Convenção, também passou a proibir esse tipo de prática, através da promulgação do Decreto nº 87.566, de 16 de setembro de 1982.

Outra prática bastante prejudicial ao meio ambiente e comumente utilizada no passado por muitos países, era o despejo das munições inservíveis em aterros sanitários. Com o passar do tempo, os produtos químicos existentes nas munições se infiltravam no solo e contaminavam os lençóis freáticos.

Vários componentes das munições podem ser considerados agentes prejudiciais ao meio ambiente. Dentre os relacionados em OSCE (2008), pode-se citar:

- Da categoria dos metais pesados: o chumbo, cobre, zinco e o antimônio;
- Da categoria dos explosivos: TNT, NG, RDX, *Dinitrotolueno (DNT)* e *Difenilamina (DPA)*.

Portanto, com o intuito de alcançar os objetivos delineados no início desta Seção, serão apresentados, a seguir, alguns processos básicos relacionados à *desmilitarização* de munição, uma revisão sumária sobre as técnicas existentes e aplicadas nos diversos processos e o nível de maturidade quanto ao emprego das respectivas técnicas.

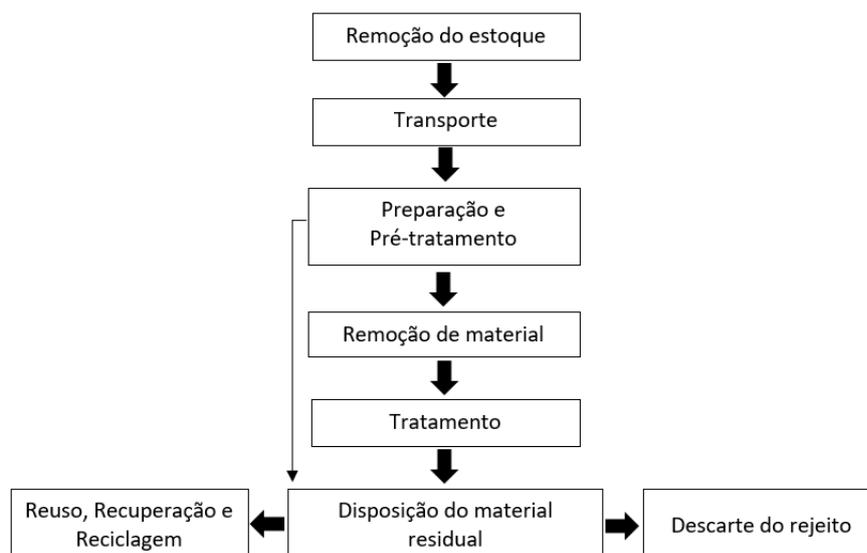
### 2.2.2 Processos básicos de desmilitarização de munição

Como visto anteriormente, o processo de *desmilitarização* de munição, em sua essência, consiste em desmontar os vários componentes existentes na munição, facilitando a separação dos materiais e a destinação final. Alguns materiais podem ser reaproveitados em outros subprodutos, apresentando significativo valor comercial. Outros, porém, de elevado risco, precisam ser tratados adequadamente para posterior descarte como resíduo.

Conforme apresentado por Cumming e Johnson (2019) e ilustrado na Figura 9, é possível estabelecer um fluxograma básico do processo de *desmilitarização* de munição.

Em geral, a desmilitarização se inicia com a *retirada* da munição *do depósito*. Neste ponto, de acordo com o ME (1970), ressalta-se a importância de que as munições devam ser armazenadas em depósitos adequados, dotados de meios apropriados para recebê-las e mantê-las armazenadas em condições satisfatórias de conservação e segurança, para, oportunamente, poder distribuí-las, segundo as necessidades dos órgãos solicitantes.

Figura 9 – Fluxograma básico do processo de desmilitarização de munição.



Fonte: Adaptado de Cumming e Johnson (2019).

Assim, em sequência, realiza-se uma inspeção visual prévia do produto e a preparação adequada para o transporte. Caso sejam verificados indícios de deterioração em algum produto durante a inspeção visual e seja constatado que trata-se de um material não seguro, deve-se, segundo apresentado no ME (1970, p. 59), *"providenciar a destruição do respectivo produto, sem levar em consideração a parte econômica, pois em casos de acidentes, maiores serão os prejuízos materiais, pessoais e morais"*.

Após a devida preparação, é realizado o *transporte* do material. Vários modais podem ser utilizados: rodoviário, ferroviário, aeroviário ou hidroviário. Cada um dos modais apresentados possui características particulares. O material a ser transportado deve atender as normas vigentes relacionadas a cada tipo de transporte e de cada região.

Importante atenção deve ser dada à etapa logística do processo de *desmilitarização* de munição. De acordo com Cumming e Johnson (2019, p. 15, tradução nossa), *"na Europa, custos relacionados ao transporte correspondem de 20% a 30% do custo total do contrato"*.

Finalizada a etapa de transporte, inicia-se o processo de preparação e pré-tratamento do material. Neste momento, os materiais de embalagem, normalmente fabricados em aço, plástico ou madeira, são separados da munição e destinados à área de reciclagem ou descarte de material sólido comum. Nesta etapa, também encontram-se inseridas as operações de desmontagem de componentes da munição. Posteriormente, os materiais são identificados e separados por tipo. Atenção especial é dada aos materiais que oferecem algum tipo de risco.

Em sequência, inicia-se a etapa de *remoção* de material explosivo do interior do corpo do projétil. Algumas técnicas empregadas podem exigir a *redução* prévia de

tamanho do produto antes do descarregamento do material explosivo. Tal fato tem o benefício de diminuir o risco potencial de uma detonação da massa explosiva completa para um risco em menor escala, relacionado à detonação de uma massa explosiva em menor quantidade. Ao final dessa etapa, os materiais que oferecem algum tipo de risco são separados para posterior tratamento.

Na etapa de *tratamento* são utilizados processos com o objetivo de neutralizar ou diminuir os riscos potenciais dos resíduos produzidos na etapa anterior, de maneira a garantir um transporte ou armazenamento mais seguro ou o descarte de forma mais responsável.

Os subprodutos resultantes da etapa de tratamento são dispostos e separados por tipo na etapa de *disposição do material residual*, para serem, posteriormente, descartados como rejeito ou reutilizados, recuperados ou reciclados.

Por um lado, os materiais separados para serem descartados como rejeito talvez possam ser destinadas aos aterros sanitários, como é o caso das substâncias inertes, por exemplo. Caso o rejeito ainda ofereça algum tipo de risco à saúde humana ou ao meio ambiente, alguns processos complementares específicos ainda podem ser necessários. Nestes casos, recomenda-se consulta às normas locais para adoção de procedimentos adequados.

Por outro lado, tem-se a etapa de reuso, recuperação e reciclagem do material. O objetivo, neste caso, é realizar ações de maneira a obter o maior benefício possível, de ordem econômica e preservação ambiental, dos materiais resultantes das etapas anteriores.

A Tabela 5 apresenta um resumo dos processos gerais existentes na desmilitarização de munição.

Tabela 5 – Processos gerais existentes na desmilitarização de munições convencionais.

<b>Processo</b>	<b>Descrição</b>
Remoção do material do estoque	Preparação adequada e remoção do material do estoque para a realização do transporte.
Transporte	Deslocamento do material do estoque até a área de preparação ou pré-tratamento.
Preparação e pré-tratamento	Processo através do qual são empregadas técnicas de desmontagem, manual e/ou robotizada, e redução de tamanho do material.
Remoção de <i>Material Energético (ME)</i>	Processo através do qual é realizada a extração do material energético do interior do corpo do projétil.
Continua...	

Tabela 5 – Processos gerias existentes na desmilitarização de munições convencionais.  
(Continuação)

<b>Processo</b>	<b>Descrição</b>
Tratamento ou destruição	Processo através do qual são utilizadas técnicas para destruição do material energético.
Disposição do material residual	Disposição e separação do material residual.
<i>Recuperação, Reciclagem e Reuso (R3)</i>	Processo através do qual são utilizadas técnicas para a recuperação, reciclagem e reuso de materiais existentes na munição.
Descarte	Destinação de materiais inertes ao aterro sanitário, se for o caso.

Fonte: Extraído de NASEM (2019).

Conforme apresentado por MSIAC (2006), vários tipos de técnicas podem ser empregadas nos processos de *desmilitarização* de munição. A tabela do Anexo B apresenta, resumidamente, uma lista das principais técnicas utilizadas, uma descrição sumária sobre as mesmas, o nível de maturidade relacionado ao emprego da respectiva técnica, a etapa do processo em que são utilizadas e algumas observações gerais.

### **2.2.3 Revisão geral sobre as técnicas de destruição tradicionais: queima aberta e detonação aberta**

As técnicas de destruição empregadas na *desmilitarização* de munição conhecidas como QA e DA são consideradas relativamente mais simples e baratas quando comparadas com outras técnicas existentes. Entretanto, as críticas de órgãos reguladores e da sociedade em geral vêm aumentando, devido aos potenciais riscos de danos ao meio ambiente e à saúde humana.

Como dito anteriormente, ambas as técnicas liberam energia em forma de calor, luminosidade e, no caso de DA, ondas de choque. Adicionalmente, resíduos são emitidos à atmosfera, em forma de fumaça, e à região adjacente, em forma de fragmentos. Existe risco de incêndio da vegetação circunvizinha, contaminação do solo e dos lençóis freáticos.

Apesar das críticas existentes e de serem consideradas técnicas ultrapassadas por alguns autores, há estudiosos do assunto que recomendam, se cuidadosamente planejado e executado, o emprego da QA ou DA para destruição de materiais energéticos ou de componentes de munição que possuem algum tipo de material energético que não podem, por algum motivo específico, ser reciclados ou que ofereçam elevado risco de manuseio e transporte.

Normalmente, os órgãos locais ou instituições responsáveis pela elaboração da política de *desmilitarização* de munições estabelecem algumas restrições sobre as técnicas utilizadas. No caso de QA e DA, pode-se citar:

- Limite de peso de carga explosiva por queima ou detonação;
- Distância de segurança em relação às áreas vizinhas;
- Limite no número de queima ou detonação por dia; e
- Condições meteorológicas (velocidade do vento, *Umidade Relativa do Ar (UR)*, direção do vento, etc).

Segundo apresentado em SEESAC (2004, p. 4 e 8, tradução nossa), pode-se dizer sobre as técnicas de QA e DA:

- *Ambos as técnicas, emitem, predominantemente, os mesmos produtos;*
- *Os produtos de emissão provenientes da destruição por QA ou DA da maioria dos materiais energéticos são adequadamente representados pelas seguintes substâncias: CO<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, etano, propano, i-butano, n-butano, acetileno, etileno, propeno, benzeno, tolueno, Material Particulado (MP) e metais;*
- *98% do carbono caracterizado no material energético é convertido em CO<sub>2</sub> e CO; e*
- *Geralmente, pelo menos 97% do nitrogênio existente no material energético é convertido em N<sub>2</sub> e o restante em NO e NO<sub>2</sub>.*

### 2.2.3.1 Queima aberta

Conforme apresentado em NASEM (2019, p. 32, tradução nossa), a QA pode ser definida como *"um processo de combustão realizado em ambiente aberto, no qual munições em excesso, inservíveis ou obsoletas são destruídas para eliminar o risco de explosão existente"*.

Essa técnica de destruição é, normalmente, utilizada em materiais energéticos do tipo baixo explosivo, como é o caso dos grãos e das pólvoras propelentes, ou em alguns resíduos de materiais energéticos que não detonam ao receber uma energia de ativação. Depois de serem preparados, os materiais são iniciados remotamente.

A Figura 10 ilustra a técnica de QA realizada em pólvoras e resíduos energéticos e em grãos propelentes de foguete. Neste último caso, a técnica de queima aberta empregada é conhecida como *"disparo estático" (static fire)*, caracterizada pela utilização de um dispositivo apropriado onde é inserido o motor de mísseis ou foguetes, para iniciação remota.

Em geral, as seguintes atividades são realizadas antes da execução da QA:

Figura 10 – Ilustração do emprego da técnica de queima aberta.



a) Queima aberta de pólvora e resíduos energéticos



b) Queima aberta de grão propelente de foguete

Fonte: NASEM (2019).

- Inspeção prévia do local de destruição, com o intuito de verificar a necessidade de eventuais ações preparatórias (condição da estrada de acesso, poda da vegetação adjacente, etc);
- Separação do material no estoque;
- Desmontagem do material, se for o caso;
- Transporte do material até a área de destruição;
- Preparação do material a ser destruído no local de destruição;
- Preparação dos meios de acionamento e iniciação da queima.

Após a destruição dos materiais por QA, normalmente realizam-se as seguintes atividades:

- Aguarda-se o tempo previsto para resfriamento da área;
- Realiza-se inspeção da área utilizada. Caso sejam observados materiais não queimados, os mesmos devem ser recolhidos e preparados para a próxima queima;
- Os resíduos são recolhidos e preparados para posterior tratamento ou descarte; e
- Preenchimento e atualização da documentação final.

Em geral, a técnica de destruição por QA é de baixa produtividade e sem nenhum tipo de controle das emissões liberadas à atmosfera e, também, dos resíduos sólidos produzidos.

Durante os exercícios de adestramento dos integrantes das Forças Armadas, são frequentes as atividades de tiro. No caso das atividades com obuseiros e morteiros, é comum a existência de sobra de elementos da carga de propulsão, tendo em vista que nem todos os disparos são realizados na carga máxima.

Em geral, tais sobras são recolhidas à *Organização Militar (OM)* detentora do material para posterior destruição ou são destruídas diretamente na área de exercício de tiro, normalmente, sobre a superfície do solo.

Ressalta-se que, com o passar do tempo, a área de realização do exercício de tiro pode tornar-se saturada com os elementos contaminantes resultantes da destruição da carga de propulsão. Como consequência, podem ser necessários elevados investimentos para descontaminação da área ou, em casos extremos, pode haver a interdição do local de exercício de tiro.

Conforme ilustrado na Figura 11, soluções simples podem ser adotadas para evitar a contaminação do solo e lençol freático das áreas de exercício da tropa, como a utilização de um sistema portátil destinado à queima de elementos da carga de propulsão. O sistema pode ser dimensionado de maneira a facilitar o seu transporte e manuseio. Percebe-se, também, a existência de uma janela de acesso, que tem a finalidade de permitir a retirada dos resíduos provenientes da queima para posterior armazenamento ou tratamento.

Figura 11 – Sistema portátil para aplicação da técnica de destruição por queima aberta em pequena escala.



a) Processo de queima aberta em execução



b) Sistema portátil com janela de acesso para limpeza e coleta do resíduo

Fonte: Walsh *et al.* (2012).

### 2.2.3.2 Detonação aberta

Conforme apresentado por NASEM (2019, p. 35, tradução nossa), *detonação aberta* pode ser definida como "uma técnica de destruição a céu aberto, utilizada para tratamento de munições em excesso, inservíveis ou obsoletas, onde uma carga explosiva de sacrifício inicia a detonação da munição a ser tratada".

Essa técnica de destruição é destinada, normalmente, às munições carregadas com materiais energéticos do tipo Alto Explosivo. Depois de serem preparados, os materiais destinados à destruição são iniciados remotamente. As imagens da Figura 12 ilustram a preparação do material a ser destruído e o fenômeno de detonação propriamente dito.

Figura 12 – Ilustração do emprego da técnica de detonação aberta.



a) Preparação do material



b) Detonação propriamente dita

Fonte: Tomić *et al.* (2018).

Cumming e Johnson (2019) relata que a *detonação aberta* envolve a ocorrência de vários fenômenos, como a detonação propriamente dita, a formação da *bola de fogo* ou *cogumelo*, a dispersão e mistura dos gases oriundos da detonação com o ar atmosférico, a suspensão de uma grande quantidade de poeira oriunda do arrancamento das partículas do solo e a dispersão da poeira em suspensão.

O fenômeno de detonação caracteriza-se pela ocorrência de uma reação extremamente violenta e rápida, com duração na ordem de microsegundos, capaz de produzir temperaturas variando de 700 a 5.600° C.

A formação da *bola de fogo* é um fenômeno um pouco mais duradouro que a detonação, e pode durar alguns segundos. Durante a sua ocorrência, podem ser atingidas temperaturas na faixa de 700 a 1.700° C. Percebe-se durante a ocorrência desse fenômeno que os fragmentos oriundos dos corpos dos projetis são arremessados a uma grande distância e em grandes velocidades. A mistura dos gases da detonação com o ar atmosférico ocorre quase que concomitantemente com a *bola de fogo*.

Os demais fenômenos, de suspensão e dispersão dos gases e da poeira, já são mais duradouros e podem ser vistos por vários minutos após a detonação, dependendo das condições meteorológicas (velocidade do vento, ocorrência de chuvas, etc).

É importante ressaltar que:

*Qualquer prática que possa alterar ou suprimir a pós-combustão (como a colocação de terra acima da pilha de produtos a ser detonada, com o*

*intuito de amenizar a onda de choque e o ruído) pode contribuir para a ocorrência de uma combustão incompleta (ou seja, produtos intermediários podem não ser transformados completamente em produtos na forma final, mais estáveis) e aumentar o risco à saúde humana e ao meio ambiente. (CUMMING; JOHNSON, 2019, p. 34, tradução nossa).*

Normalmente, a atividade de DA é realizada em uma área bem isolada e, por consequência, distante dos recursos disponíveis nas cidades, como hospitais e postos de saúde. Portanto, é usual que algumas instituições, órgãos ou empresas adotem como procedimento de segurança a presença de uma equipe médica durante a realização da atividade, com o objetivo de prestar os primeiros socorros rapidamente, caso seja necessário.

As mesmas atividades realizadas anterior e posteriormente à execução da técnica de destruição de QA também são empregadas na DA.

Percebe-se que a técnica de destruição por DA também é de baixa produtividade e não apresenta nenhum tipo de controle das emissões liberadas à atmosfera e dos resíduos sólidos produzidos.

#### **2.2.4 Revisão geral sobre técnicas alternativas**

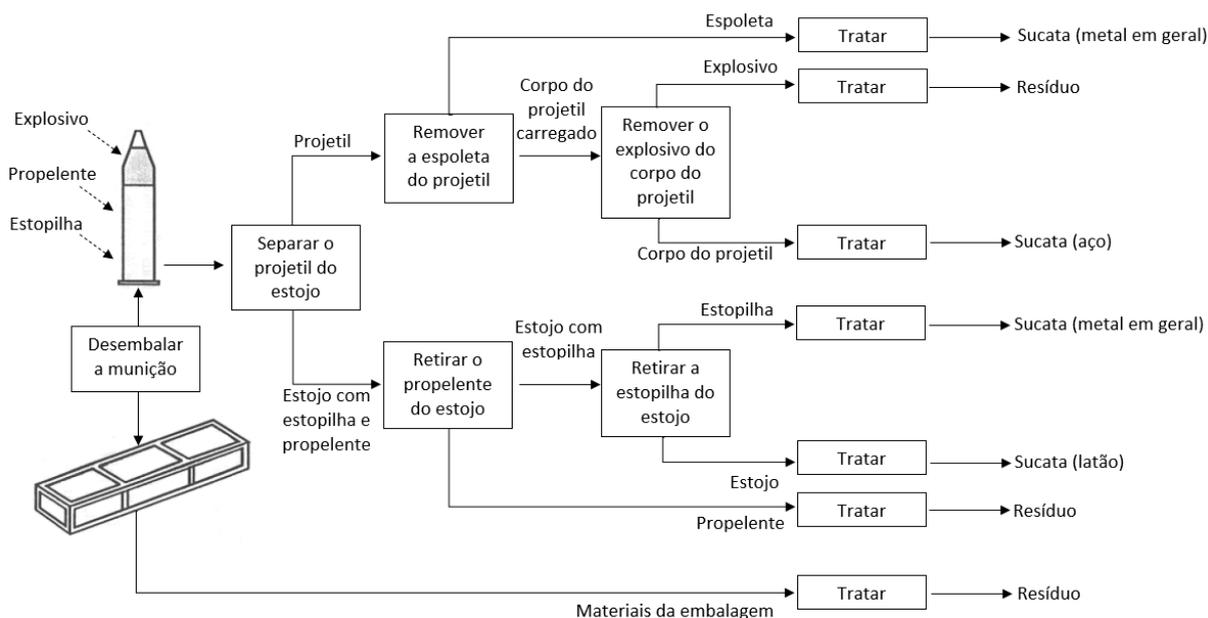
Nesta subseção são apresentados algumas técnicas alternativas empregadas para a desmilitarização de munição, em substituição às técnicas de QA e DA, apresentadas anteriormente.

Assim, considerando o fluxograma da Figura 9 e empregando algumas das técnicas apresentadas no Anexo B, as técnicas podem ser agrupadas, de acordo com a sua finalidade no processo de desmilitarização, em:

- Preparação e pré-tratamento;
- Remoção de material energético;
- Destruição; e
- Recuperação, reciclagem e reutilização de recursos.

A Figura 13 ilustra, de maneira geral, algumas etapas que podem existir no processo de desmilitarização de uma munição encartuchada, por exemplo. Em cada uma dessas etapas, faz-se necessária a seleção e emprego de técnica específica de desmilitarização, conforme relacionado no Anexo B.

Figura 13 – Etapas gerais no processo de desmilitarização de munição.



Fonte: Modificado de DRDC (2010).

#### 2.2.4.1 Preparação e pré-tratamento

Enquadram-se nos processos de preparação e pré-tratamento as atividades relacionadas à separação prévia de material, desmontagem de partes da munição e qualquer outro tipo de intervenção realizada no produto de maneira a viabilizar as ações da fase seguinte, de remoção do material energético.

Nesses processos podem ser utilizadas diversas técnicas de desmilitarização, conforme apresentado no Anexo B, das quais serão abordadas: desmontagem manual, desmontagem mecânica, corte por serra, corte por jato de água e criofatura.

##### 2.2.4.1.1 Desmontagem

A técnica de desmontagem, em geral, tem o objetivo de separar os subconjuntos ou componentes da munição de maneira a proporcionar a exposição dos materiais energéticos.

A desmontagem pode ser do tipo manual ou mecânica.

A *desmontagem manual* é caracterizada pelo emprego do esforço corporal dos operadores que, manualmente, utilizando-se de ferramentas simples e portáteis, proporcionam a desmontagem da munição e de seus meios de embalagem até um determinado nível. Como exemplo de ações em que observa-se a aplicação dessa técnica, pode-se citar a retirada da munição da embalagem e a separação do projétil, estojo e carga de propulsão nas munições encartuchadas e desengastadas.

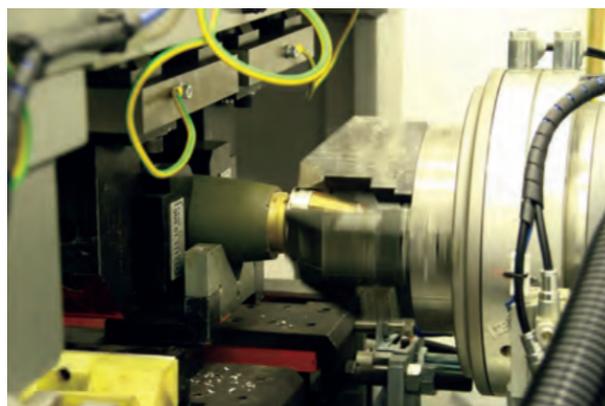
A *desmontagem mecânica* é caracterizada pelo emprego de máquinas e dispositivos mecânicos para auxiliar a desmontagem da munição e seus componentes. Normalmente, de maneira a diminuir os riscos e evitar acidentes, implementa-se um sistema de controle remoto dos equipamentos.

Como exemplo de aplicação dessa técnica, ilustra-se na Figura 14-a) a separação entre estojo e projétil, utilizado em munições encartuchadas e engastadas, e na Figura 14-b) a remoção da espoleta do corpo do projétil.

Figura 14 – Técnica de desmontagem mecânica.



a) Separação do estojo e projétil



b) Remoção da espoleta de ogiva

Fonte: JAKUSZ (2021a) (Fig. 14-a); Gobinet (2013) (Fig. 14-b).

#### 2.2.4.1.2 Corte ou seccionamento

A técnica de corte ou seccionamento caracteriza-se por cortar ou seccionar um componente da munição, com o objetivo de facilitar a remoção do material energético existente em seu interior.

Essa técnica é, normalmente, utilizada para cortar ou seccionar o corpo do projétil carregado com explosivo. Assim, o corpo do projétil é seccionado em várias partes menores, facilitando a retirada do material explosivo em cada seção particionada e, por consequência, diminuindo o potencial de uma eventual explosão do material energético, que foi reduzido de tamanho.

Destacam-se, neste caso, o emprego da técnica de corte por serra ou por jato de água pressurizado.

A técnica de corte por serra caracteriza-se pela utilização de uma máquina automatizada, normalmente controlada remotamente, dotada de uma serra que é responsável pelo seccionamento do corpo do projétil carregado. Durante a aplicação dessa técnica, o corpo do projétil pode receber um jato constante de água ou permanecer submerso em água, com o objetivo de manter o produto resfriado e evitar a ocorrência de centelhamento.

A técnica de corte por jato de água é semelhante à de corte por serra. Diferencia-se pelo fato de utilizar um jato de água pressurizado, juntamente com algum material abrasivo, em substituição à serra. Conforme apresentado em DRDC (2010, p. 9, tradução nossa), *"trata-se de uma poderosa alternativa à tradicional técnica de corte de metal. É uma técnica relativamente segura, uma vez que a água resfria o metal e suprime a possibilidade de ignição do material explosivo."*

A Figura 15 ilustra, de maneira geral, a aplicação das técnicas de seccionamento por serra e por jato de água pressurizada.

Figura 15 – Seccionamento e preparação do projétil para remoção da carga explosiva.



a) Seccionamento por serra



b) Seccionamento por jato de água

Fonte: (CUMMING; JOHNSON, 2019).

### 2.2.4.1.3 Criofratura

A técnica de criofratura caracteriza-se pela utilização de temperaturas muito baixas para fragilizar o material e facilitar a sua quebra ou rompimento. Essa técnica, quando aplicada aos processos de desmilitarização de munição, tem o objetivo de facilitar a exposição e a separação do material energético dos demais materiais.

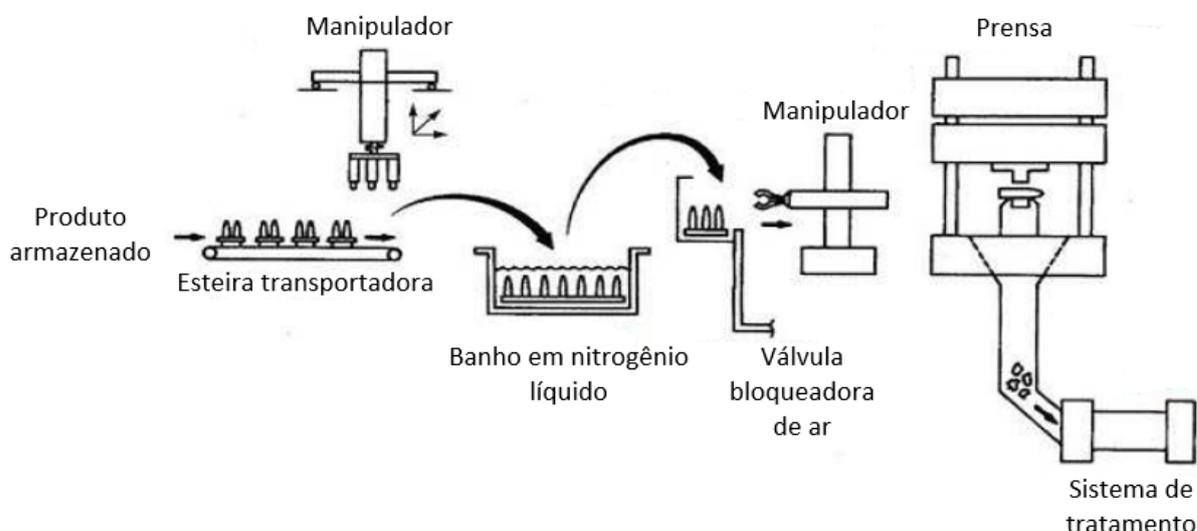
Normalmente, submerge-se a munição ou seu componente num banho de nitrogênio líquido, à aproximadamente  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , resfriando o produto e tornando-o frágil. Então, após a submersão, o produto é levado a uma prensa hidráulica onde é prensado. Por apresentarem um estado físico de elevada fragilidade, ambos os componentes, o metal e o material energético, são quebrados em vários pequenos pedaços, para posterior tratamento. O manuseio do produto entre cada uma das etapas é realizado, normalmente, com auxílio de manipuladores automatizados.

A Figura 16 ilustra, de maneira geral, a aplicação da técnica de criofratura.

Em geral, trata-se de uma técnica simples e versátil. Algumas características bastante atrativas são apresentadas em DRDC (2010):

- Pode ser utilizada no processo de desmilitarização de vários tipos de munição;

Figura 16 – Diagrama geral de utilização da técnica de criofratura.



Fonte: Modificado de DRDC (2010).

- Inutiliza e descaracteriza completamente o produto;
- Grande flexibilidade;
- Não sofre influência do projeto da munição;
- Facilidade de aplicação; e
- Proporciona pouca contaminação de área.

O produto final pode ser tratado de várias maneiras: as partes metálicas podem ser separadas por separadores magnéticos; os materiais energéticos podem ser recolhidos por fusão; e/ou pode ser destinado aos incineradores para destruição.

Ressalta-se que o processo para aplicação dessa técnica não promove contaminação da água, o que pode contribuir para diminuição dos custos relacionados ao tratamento final. Porém, por outro lado, os custos relacionados às operações que envolvam a utilização de grande volume de nitrogênio líquido podem ser bastante elevados.

#### 2.2.4.2 Remoção de material energético

Em geral, as munições convencionais utilizam o TNT ou o Composto B como explosivo principal. Durante o processo de fabricação e montagem desses tipos de munições, o explosivo é derretido para, então, ser inserido, por ação da gravidade, no interior do corpo do projétil.

Assim, muitas técnicas de remoção do explosivo do interior do corpo do projétil foram desenvolvidas pensando-se no processo inverso ao de carregamento, baseando-se no derretimento do material energético.

O Anexo B apresenta algumas técnicas para remoção do material energético do interior do corpo do projétil, dentre as quais serão abordadas as mais comumente utilizadas: remoção por derretimento, jato de água pressurizado e por usinagem.

#### 2.2.4.2.1 Remoção por derretimento

A técnica de remoção do material energético por derretimento caracteriza-se, de uma maneira geral, por aquecer o produto a uma temperatura superior à de fusão do explosivo e, ao mesmo tempo, inferior à de detonação.

Conforme apresentado no Anexo E, o TNT funde-se à temperatura de 81°C e o Composto B entre 78 e 80°C. Observa-se, também, que a temperatura de detonação do TNT inicia-se em 465°C e do Composto B em 255°C.

O Anexo B apresenta algumas técnicas de remoção de explosivos por derretimento, das quais destacam-se as técnicas mais usuais: a de "*banho maria*", à vapor e em autoclave.

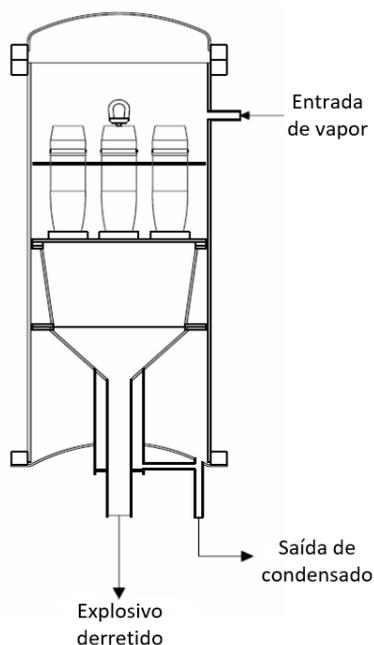
Na técnica de remoção por derretimento conhecida como *banho maria*, o projétil carregado com explosivo, e sem a espoleta, é inserido num recipiente com água e posicionado de maneira que a abertura da ogiva fique voltada para baixo. Uma fonte de calor externa aquece a água a uma temperatura suficiente para derreter o explosivo. Após o derretimento, o explosivo escorre naturalmente para fora do corpo do projétil, sendo coletado para posterior tratamento.

Sabe-se que a água, sob condições normais de pressão, evapora-se à temperatura de 100°C, inferior à temperatura de detonação do TNT e Composto B. Portanto, trata-se de uma técnica de derretimento de material energético que oferece uma segurança natural contra eventuais riscos de explosão, sendo largamente utilizada em processos de carregamento e descarregamento de munições montadas com TNT ou Composto B.

Conforme descrito em TR-Ltd (2004), a técnica de remoção de explosivo por derretimento conhecida como *autoclave* caracteriza-se pela aplicação de vapor na superfície externa do corpo do projétil. Normalmente, o autoclave é construído utilizando-se de uma câmara termicamente isolada, contendo uma entrada de vapor, um dreno para retirar a água condensada e um funil aquecido para escoar o material energético derretido. Ressalta-se a importância de controle sobre a taxa de fornecimento de vapor, a temperatura e a pressão interna da câmara, de maneira a eliminar possíveis riscos de detonação da carga explosiva. A Figura 17 ilustra, de maneira geral, a técnica conhecida como *autoclave*.

Em relação à técnica de remoção de material energético por vapor, ela pode ser associada à técnica de autoclave, por exemplo, para melhorar a performance do sistema como um todo. Conforme apresentado em EPA (2019, p. 18, tradução nossa), "*para munições muito grandes, o processo que utiliza a técnica de autoclave pode ser*

Figura 17 – Remoção de material energético por derretimento: técnica de autoclave.



Fonte: Modificado de MSIAC (2006).

*muito lento, então um jato de vapor pode ser direcionado para dentro da munição para aumentar a velocidade de remoção do material explosivo e evitar grande desperdício de água".*

#### 2.2.4.2.2 Remoção por jato de água pressurizado

A técnica de remoção de material energético por jato de água, caracteriza-se por utilizar um jato de água pressurizado, normalmente entre 380 e 410 MPa, conforme apresentado por EPA (2019). Diferentemente da técnica de corte por água, não é utilizado nenhum tipo de material abrasivo. A Figura 18 ilustra a aplicação da técnica em questão.

Conforme relatado em DRDC (2010), a técnica em análise apresenta algumas características bem interessantes quando comparada às técnicas de remoção por derretimento, como por exemplo:

- Menor tempo para remoção do material explosivo do interior do corpo do projétil;
- Menor gasto de energia;
- Pode ser empregada para remoção de grande variedade de material explosivo;
- Remoção mais completa do material explosivo;
- Menor liberação de vapor de TNT, portanto, menor risco à saúde dos operadores.

Figura 18 – Utilização da técnica de jato de água pressurizado para remoção de material energético.



Fonte: OSCE (2008).

Por outro lado, pode-se relacionar algumas desvantagens, como por exemplo: contaminação da água e risco de detonação de tubulações, devido ao acúmulo de material explosivo.

#### 2.2.4.2.3 Remoção por usinagem

A técnica de remoção de material energético por usinagem caracteriza-se pelo emprego de máquinas e ferramentas tradicionalmente utilizadas nos processos convencionais de usinagem. Dentre os processos de usinagem existentes, comumente utiliza-se o fresamento.

Durante a aplicação dessa técnica, ressalta-se a importância sobre a utilização de uma fresa fabricada em material não faiscante, como o latão por exemplo, com o intuito de diminuir os riscos de iniciação do material energético. Adicionalmente, as variáveis de corte, relacionadas à velocidade e avanço da ferramenta, devem ser cuidadosamente estipuladas, de maneira a evitar um superaquecimento do material.

Conforme apresentado por Cumming e Johnson (2019, p. 24, tradução nossa), a técnica em questão *"remove, aproximadamente, 95% do explosivo existente no interior do corpo do projétil"*. Uma camada do material energético permanece, portanto, no interior do produto, devido ao seu formato interno curvilíneo. Assim, faz-se necessária a utilização de uma técnica adicional para remover o explosivo restante.

A utilização de água, como fluido refrigerante, pode ser admitida. Neste caso, porém, faz-se necessária a adoção de procedimentos adicionais para tratamento da água utilizada.

### 2.2.4.3 Destruição

Os processos de destruição de munição ou de seus componentes caracterizam-se pela utilização de técnicas que, segundo MSIAC (2006, p. 27, tradução nossa), *"têm a finalidade de destruir o material energético ou convertê-lo em um produto menos tóxico"*.

O Anexo B apresenta algumas técnicas para destruição do material energético, dentre as quais serão abordadas as mais comumente utilizadas: *Queima Fechada (QF)*, *Detonação Fechada (DF)*, incineração em forno estático, incineração em forno rotatório e incineração em forno com carro de alimentação móvel.

#### 2.2.4.3.1 Queima fechada

De acordo com o EPA (2019, p. 24, tradução nossa), a técnica de destruição de QF caracteriza-se pela:

*... utilização de uma câmara de tratamento térmico, controlada remotamente, para destruir o material energético em seu interior... a câmara é vedada... e os produtos da combustão são contidos em seu interior... os gases são forçados a passar por um sistema de controle de poluição antes de serem liberados à atmosfera. A câmara é purgada com ar fresco antes do novo ciclo de destruição.*

A Figura 19 apresenta uma câmara de destruição projetada para aplicação da técnica de QF.

Figura 19 – Câmara de destruição de munição por queima fechada.



Fonte: EPA (2019).

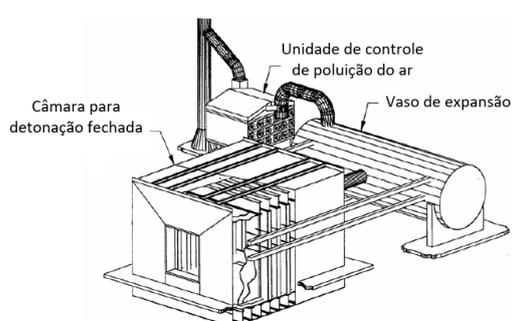
A técnica de QF é bastante utilizada para destruição de grãos propelentes, principalmente de foguetes.

### 2.2.4.3.2 Detonação fechada

A técnica de destruição de DF é uma alternativa à técnica de DA. De acordo com MSIAC (2006, p. 48, tradução nossa), caracteriza-se por "detonar, com auxílio de uma carga de sacrifício, o material no interior de uma câmara apropriada, construída para suportar os efeitos de pressão, fragmentação e barulho e conectada a um sistema de tratamento de emissões".

A Figura 20-a) apresenta, de forma ilustrativa, um sistema que utiliza a técnica de destruição por DF. A Figura 20-b) apresenta a câmara de destruição Andromeda, que também baseia-se no emprego da técnica de DF, fabricada pela empresa Jakusz.

Figura 20 – Sistema de destruição com emprego da técnica de detonação fechada.



a) Representação ilustrativa



b) Câmara de destruição Andromeda

Fonte: Modificado de MSIAC (2006) (Fig. 20-a); JAKUSZ (2021b) (Fig. 20-b).

### 2.2.4.3.3 Incineração em forno estático

De acordo com o MSIAC (2006, p. 53, tradução nossa), a técnica de destruição por incineração em forno estático caracteriza-se pela "utilização de câmaras vedadas, com capacidade de aquecimento para induzir a deflagração ou detonação do material em seu interior". É utilizado, normalmente, com o objetivo de aquecer o explosivo residual oriundo de outras fases do processo de desmilitarização, promovendo a sua decomposição.

A Figura 21 apresenta o forno estático fabricado pela Dynasafe AB, com capacidade de até 10 kg de *Massa Explosiva Total (NEQ)*. O respectivo equipamento utiliza um sistema de aquecimento indireto para evitar o aumento de gases emitidos.

Figura 21 – Forno estático para destruição de material energético.



Fonte: MSIAC (2006).

#### 2.2.4.3.4 Incineração em forno rotatório

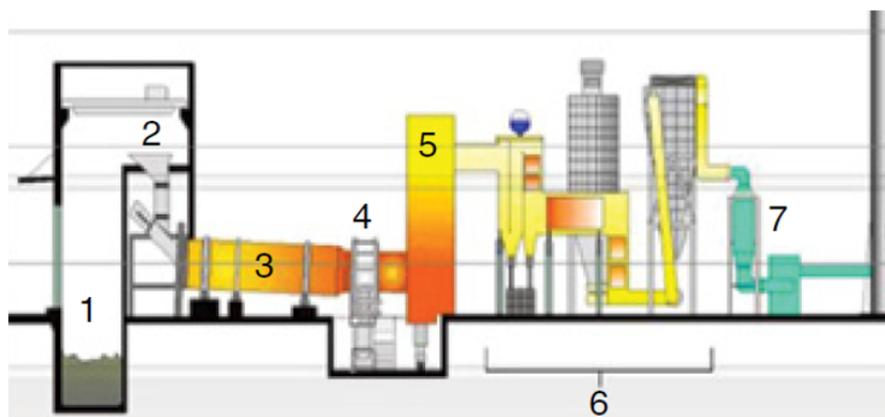
De acordo com o NASEM (2019, p. 57, tradução nossa), a técnica de incineração em forno rotatório caracteriza-se pela:

*... existência de uma câmara tubular ôca, com um raiamento interno que atua como um transportador helicoidal, onde o material a ser destruído é alimentado em uma extremidade e, à medida em que a câmara gira, o resíduo é extraído na outra. O material se desloca num ambiente aquecido, provocado por uma fonte externa à câmara ou por um queimador interno. O tempo de tratamento do material é estabelecido pela taxa de rotação da câmara.*

Em geral, a temperatura média no interior do forno rotatório é estabelecida entre 316 e 820 °C, o tempo médio de permanência do material dentro da câmara é de 30 minutos e o aquecimento pode ser obtido pela queima de óleo combustível, gás natural ou propano, conforme apresentado por MSIAC (2006).

A Figura 22 ilustra, de uma maneira representativa, a aplicação da técnica de destruição em forno rotatório num sistema industrial de destruição em grande escala.

Figura 22 – Ilustração geral do emprego da técnica de incineração em forno rotatório numa planta industrial de destruição de material energético em grande escala.



Legenda:

- |                                  |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|
| 1. Armazenagem de resíduo sólido | 5. Câmara de combustão posterior |
| 2. Alimentador                   | 6. Removedor de poeira           |
| 3. Forno rotativo                | 7. Filtro de abatimento de NOx   |
| 4. Removedor de cinzas           |                                  |

Fonte: Modificado de Cumming e Johnson (2019).

#### 2.2.4.3.5 Incineração em forno com carro de alimentação móvel

Em linhas gerais, essa técnica de destruição de material energético caracteriza-se pela utilização de um forno incinerador, revestido interiormente com material refratário, com porta de acesso para alimentação do material a ser descontaminado, que ocorre, normalmente, com a utilização de um carro móvel que se desloca sobre trilhos ou esteiras. Para atender as demandas ambientais, uma unidade de tratamento e controle de poluição é, normalmente, utilizada como um sistema anexo.

Conforme destacado por EPA (2019, p. 30, tradução nossa), *"trata-se de uma técnica destinada à remoção de material energético residual e não como uma técnica de desmilitarização primária"*.

Portanto, destaca-se como uma técnica a ser utilizada em corpos de projetis que passaram, previamente, por algum processo de desmilitarização que utilizaram as técnicas de remoção de explosivos apresentadas anteriormente, como a de jato de água pressurizado ou a de derretimento, por exemplo. Com a aplicação dessa técnica, as partes metálicas da munição são descontaminadas em relação aos materiais energéticos, ficando em condições de segurança para serem destinadas a outras unidades de produção para fins de reciclagem.

A Figura 23 apresenta um forno incinerador com carro de alimentação móvel destinado à aplicação da técnica de destruição em questão.

Figura 23 – Ilustração geral de forno incinerador com carro de alimentação móvel.



Fonte: MSIAC (2006).

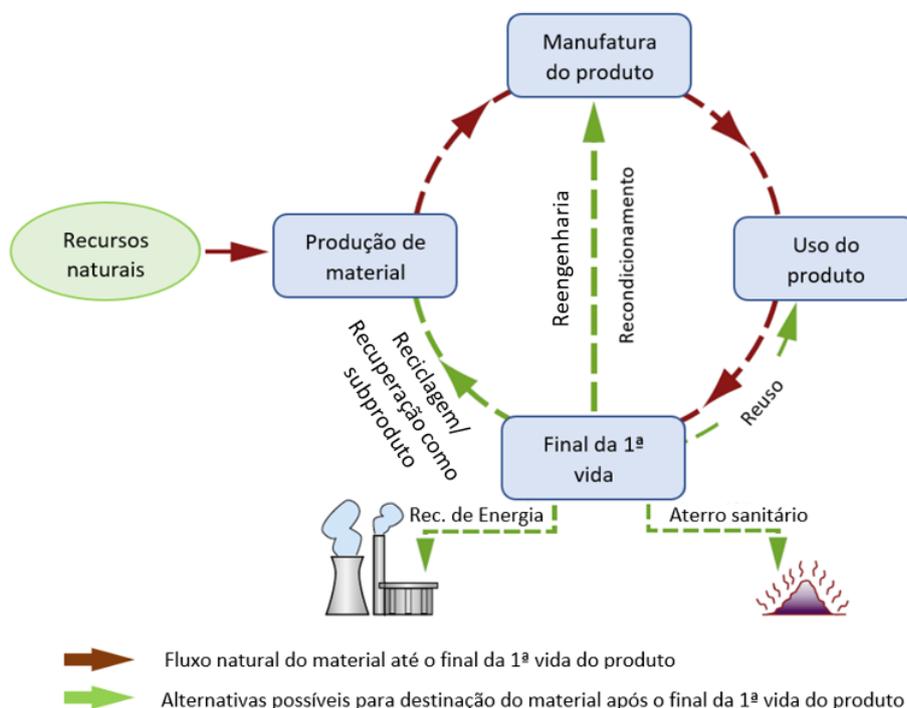
#### 2.2.4.4 Recuperação, reciclagem e reutilização de recursos

De uma maneira ilustrativa, Ashby (2021) apresenta, através do Figura 24, as possibilidades de reaproveitamento dos materiais existentes num produto quando este alcança o final do seu ciclo de vida ou, como entendido por Ashby (2021), final da primeira vida, que são: aterro sanitário, recuperação de energia, reciclagem, acondicionamento e/ou reuso.

Contextualizando o processo de desmilitarização de munições com o ciclo de vida apresentado na Figura 24, percebe-se que o respectivo processo encontra-se inserido na etapa relacionada ao final da primeira vida da munição. Portanto, ainda existem caminhos disponíveis a serem percorridos por alguns materiais existentes nas munições.

Assim, serão abordadas algumas técnicas de recuperação, reciclagem e reutilização de recursos mais comumente empregadas nos processos de desmilitarização de munições convencionais e que encontram-se relacionadas no Anexo B, das quais destacam-se: a recuperação de sucata, a recuperação como subproduto, a reutilização do material e a recuperação de energia.

Figura 24 – Destinação do material ao final do ciclo de vida do produto.



Fonte: Modificado de Ashby (2021).

#### 2.2.4.4.1 Recuperação de sucata

A recuperação da sucata produzida durante o processo de desmilitarização de munição é a técnica mais simples e comumente utilizada. Caracteriza-se pela reciclagem do material metálico existente na munição, inserindo-o, novamente, na fase do ciclo de vida conhecida como *produção de material*, conforme apresentado na Figura 24.

Como exemplo de itens da munição que podem ser tratados como sucata, pode-se citar o corpo do projétil, o estojo, o corpo da estopilha e alguns componentes da espoleta. Em geral, são componentes fabricados com liga de aço, alumínio ou latão.

Para que os materiais metálicos possam ser vendidos para outras empresas, com a finalidade de transformá-los novamente em matéria-prima, faz-se necessária, primeiramente, a sua descontaminação, ou seja, precisa-se assegurar a inexistência de materiais energéticos em sua superfície.

Para tal, submete-se a sucata a uma das técnicas de destruição apresentadas anteriormente, de maneira que o material seja aquecido a uma temperatura de, pelo menos, 400°C, conforme apresentado por MSIAC (2006, p. 74).

Porém, de acordo com o EB (2001, p. 16), as armas, munições, acessórios e equipamentos são classificados, quanto ao uso, em: *de uso restrito*<sup>10</sup> e *de uso*

<sup>10</sup> Designação dada aos Produtos Controlados pelo Exército que só podem ser utilizados pelas Forças Armadas ou, autorizadas pelo Exército, algumas Instituições de Segurança, pessoas jurídicas e

permitido<sup>11</sup>.

Portanto, antes de serem repassadas às empresas para reciclagem, as sucatas devem ser devidamente *descaracterizadas*, ou seja, devem sofrer algum tipo de ação mecânica que proporcione a modificação do formato e garanta a perda funcionalidade original. Como exemplo, pode-se citar o emprego de prensas hidráulicas ou de serras, para esmagamento ou seccionamento do material, respectivamente.

#### 2.2.4.4.2 Recuperação como subproduto

De acordo com Ashby (2021, p. 68, tradução nossa), "*resíduo é resíduo somente se nada pode ser feito para torná-lo em algo com utilidade*". Assim, seguindo essa linha de pensamento, talvez um produto não possa ser reciclado para ser utilizado de acordo com o seu propósito original, mas talvez possa ser recuperado para utilização em outro subproduto, de menor valor agregado ou de qualidade inferior.

Portanto, inserida nesse contexto, encontra-se a técnica de recuperação do material energético para reutilização na fabricação de explosivos comerciais, que pode mostrar-se uma alternativa interessante em relação às técnicas de destruição que, segundo Ferreira *et al.* (2019), utilizam uma grande quantidade de eletricidade e de gás propano e, também, geram emissões que precisam ser tratadas.

A Figura 25 apresenta, graficamente, uma comparação dos impactos ambientais associados ao descarte de munição convencional por incineração e pela reutilização do material energético em explosivos civis, como um subproduto. Em relação aos impactos ambientais analisados (Energia Primária, *Depleção Abiótica (DAb)*, *Acidificação (Acid)*, *Eutrofização (Eut)*, *Aquecimento Global (AG)*, *Depleção da Camada de Ozônio (DCO)*, *Oxidação Fotoquímica (OF)*, *Toxicidade Humana (TH)* (câncer ou não-câncer) e *Ecotoxicidade (EcoTox)*), percebe-se, nitidamente, a grande vantagem de aplicação da técnica de reutilização de material.

Nesse cenário, porém, o governo tem papel fundamental, conforme apresentado por NATO (2004, p. 358, tradução nossa):

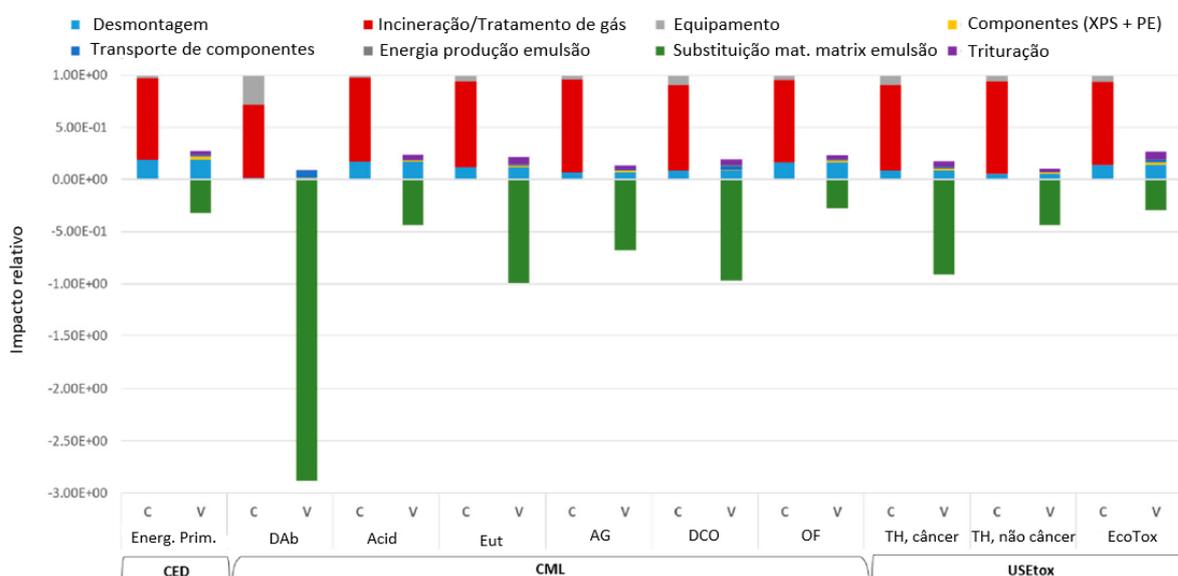
*"...um maior rigor na aplicação das leis ambientais, no que diz respeito à disposição de resíduos de materiais perigosos e energéticos, revitalizou os esforços de muitos fabricantes de explosivos comerciais nos EUA para inserirem os explosivos militares na composição de seus explosivos comerciais".*

---

peças físicas habilitadas. Fonte: (EB, 2001, p. 10).

<sup>11</sup> Designação dada aos Produtos Controlados pelo Exército, cuja utilização é permitida a pessoas físicas em geral, bem como a pessoas jurídicas, de acordo com a legislação normativa do Exército. Fonte: (EB, 2001, p. 10).

Figura 25 – Comparação dos impactos ambientais, por kg de TNT equivalente, associados ao descarte de munição convencional por incineração (C) e pela reutilização do material energético em explosivos civis (V)



Fonte: Modificado de Ferreira *et al.* (2019).

Tanto o TNT quanto o RDX e as pólvoras BS e *Base Dupla (BD)* encontram boa aceitação para serem recuperados e reutilizados no mercado de explosivos comerciais, que é menos rigoroso que o mercado de explosivos militares.

Conforme apresentado em MSIAC (2006, p. 78), as principais aplicações têm sido na fabricação de explosivos utilizados na mineração, construção e de produtos com cargas direcionadas para cortes de materiais submersos.

#### 2.2.4.4.3 Reuso de material

Conforme apresentado por Ashby (2021, p. 69, tradução nossa), "*o reuso ou reutilização do material caracteriza-se pela reinserção do produto no setor de consumo... para ser utilizado de acordo com o seu propósito original ou para outro qualquer*", conforme ilustrado na Figura 24.

A revenda pode ser considerada como uma técnica de reutilização do produto. É empregada, normalmente, às munições que tornaram-se inservíveis por sua obsolescência, mas ainda apresentam boas condições de preservação e de utilização.

Países desenvolvidos destinam, usualmente, volumosas quantidades de recursos financeiros à pesquisa e desenvolvimento de novos materiais bélicos, com o intuito de fomentar a sua indústria de defesa e fortalecer a sua soberania nacional.

Quando novos armamentos são desenvolvidos por um país, é comum que eles sejam adotados como *Material de Emprego Militar (MEM)*<sup>12</sup> principal, podendo, por-

<sup>12</sup> Material de emprego bélico, de uso privativo das Forças Armadas. Fonte: EB (2001).

tanto, ocorrer a desativação do armamento antigo. Conseqüentemente, as munições que eram empregadas no armamento antigo e que não podem ser utilizadas no novo equipamento tornam-se obsoletas.

Quando isso ocorre, é comum os países desenvolvidos revenderem, a preços muito abaixo de mercado, os armamentos antigos, juntamente com as respectivas munições, a países subdesenvolvidos considerados *amigos*. Tal fato, além de fomentar os laços diplomáticos, evita gastos com o armazenamento e fiscalização dos produtos antigos e, também, com a desmilitarização dos mesmos.

#### 2.2.4.4.4 *Recuperação de energia*

A técnica de recuperação de energia caracteriza-se pela combustão controlada de materiais energéticos existentes na munição, de maneira a aproveitar o calor liberado para aquecer a caldeira, por exemplo, ou para transformar a energia térmica produzida em eletricidade.

De acordo com Ashby (2021, p. 67, tradução nossa), "*a eficiência da energia térmica recuperada do processo de combustão pode ser de até 50%, na melhor das hipóteses. Se o calor recuperado é utilizado para gerar eletricidade, a eficiência cai para 15%*".

Adicionalmente, emissões de carbono são produzidas pelo processo de combustão. Conseqüentemente, para não contribuir com o aumento dos impactos ambientais, faz-se necessária a utilização de um sistema de controle e abatimento de poluição, o que exigirá maiores investimentos financeiros.

Portanto, ressalta-se a necessidade de realização de um estudo minucioso, em relação aos aspectos econômicos e ambientais, sobre a viabilidade de implementação de sistemas para a recuperação de energia nos processos de desmilitarização de munição.

### 2.2.5 **Considerações parciais sobre desmilitarização de munições**

Como visto na Seção 2.1, as munições são compostas por materiais energéticos e requerem cuidados específicos no manuseio, armazenamento, utilização e, especialmente, no tratamento e destinação final.

A revisão bibliográfica sobre *desmilitarização* de munições, apresentada nesta seção, propiciou a obtenção de informações sobre os principais conceitos relacionados à desmilitarização, a sua finalidade, as técnicas disponíveis e empregadas e o respectivo nível de maturidade em que se encontram, conforme delineado no objetivo específico "1.b)".

As informações apresentadas nesta seção, juntamente com as apresentadas na Seção 2.1, são fundamentais para a evolução do trabalho e servirão de base para

a revisão bibliográfica sobre a avaliação do ciclo de vida, realizada na Seção 2.3, oportunidade em que serão identificadas e explicadas as fases existentes no processo de avaliação do ciclo de vida, com o intuito de entender o método de quantificação do impacto ambiental.

## 2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Esta seção apresenta uma revisão bibliográfica sobre *avaliação do ciclo de vida*, com o objetivo de identificar e explicar as fases existentes no processo de avaliação do ciclo de vida e entender o método de quantificação do impacto ambiental, permitindo uma contextualização adequada e necessária para a elaboração da proposta de sistematização do processo de desmilitarização de munição, foco principal deste trabalho, e propiciar que o objetivo específico "1.c)" seja alcançado.

### 2.3.1 Introdução geral

Inicialmente, antes de abordar diretamente o assunto de ACV, faz-se necessário o entendimento sobre o que é o *ciclo de vida*.

A ABNT (2015, p. 5) apresenta uma definição bastante clara e concisa sobre ciclo de vida:

*Estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto (ou serviço), desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração, a partir de recursos naturais até a disposição final... os estágios do ciclo de vida incluem a aquisição da matéria-prima, projeto, produção, transporte/entrega, uso, tratamento pós uso e disposição final.*

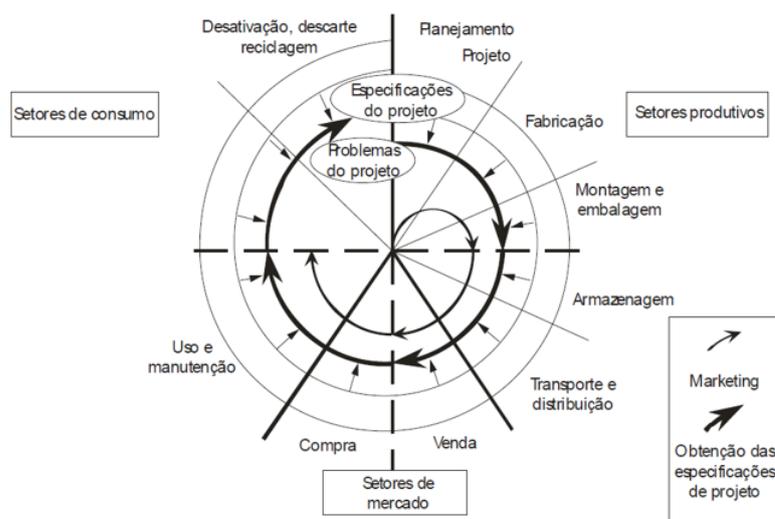
Back *et al.* (2008), inserido no modelo de desenvolvimento integrado de produtos, ilustra o ciclo de vida numa espiral do desenvolvimento, onde é possível identificar oito fases, iniciando no planejamento do projeto e finalizando na desativação, descarte e reciclagem do produto, conforme ilustrado na Figura 26.

Cumming e Johnson (2019) apresentam o modelo de ciclo de vida de produtos conhecido como "do berço ao túmulo", de maneira simplificada e bem coerente ao modelo apresentado pela ABNT (2015), onde podem ser identificadas as fases desde a extração da matéria-prima até o descarte final, passando pela produção, uso, tratamento no fim de vida e reciclagem, conforme ilustrado na Figura 27.

Adicionalmente ao entendimento sobre ciclo de vida, no estudo da ACV faz-se necessária a compreensão sobre o termo *impacto ambiental*.

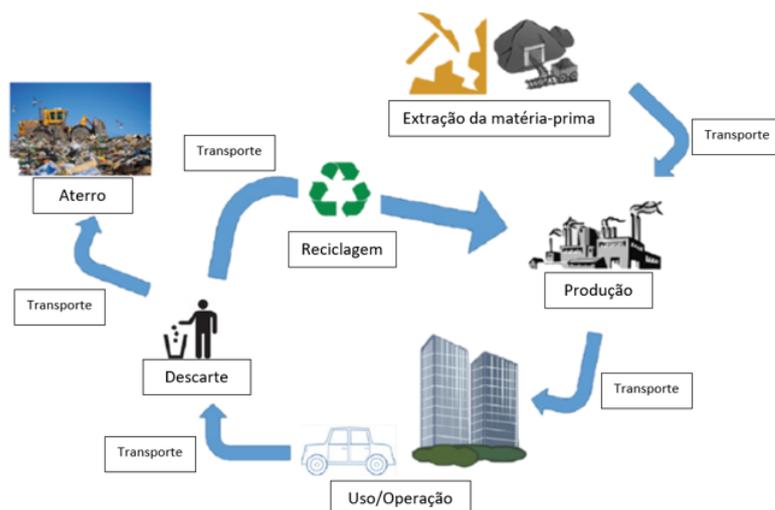
Conforme apresentado pela ABNT (2015, p. 3), define-se impacto ambiental como a "*modificação no meio ambiente, tanto adversa como benéfica, total ou parcialmente resultante dos aspectos ambientais de uma organização*".

Figura 26 – Espiral do desenvolvimento.



Fonte: Back *et al.* (2008).

Figura 27 – Representação das fases do ciclo de vida dos produtos.



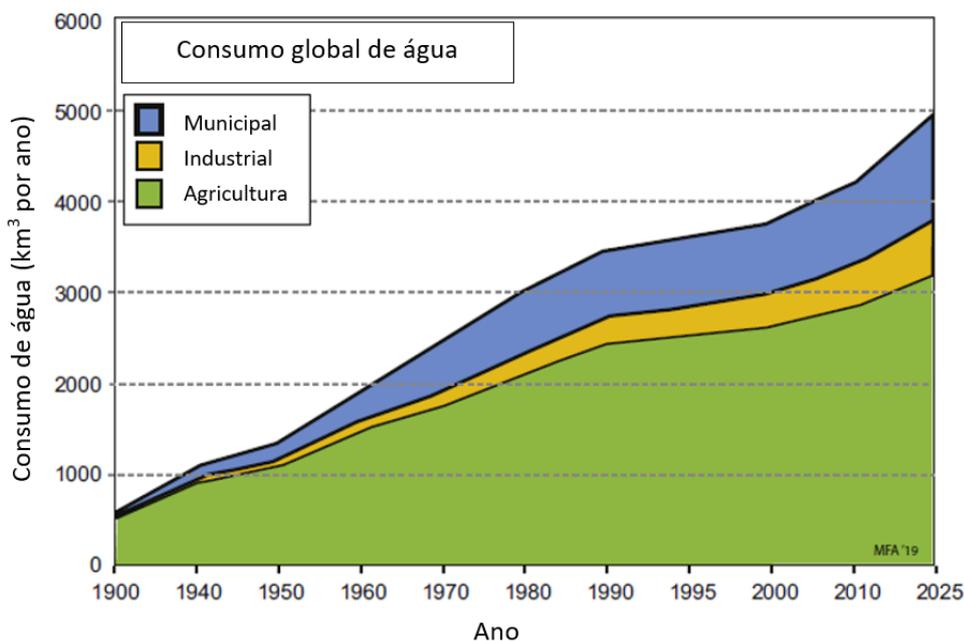
Fonte: Modificada de Cumming e Johnson (2019).

De uma forma ou de outra, toda atividade humana causa um impacto no meio ambiente, o qual tem capacidade para absorvê-lo até um determinado nível e sem que seja causado danos permanentes.

Em geral, os impactos são causados pela extração da matéria-prima da natureza, pelos processos de manufatura, responsáveis pela transformação da matéria-prima em produto acabado, pelo uso e descarte dos produtos.

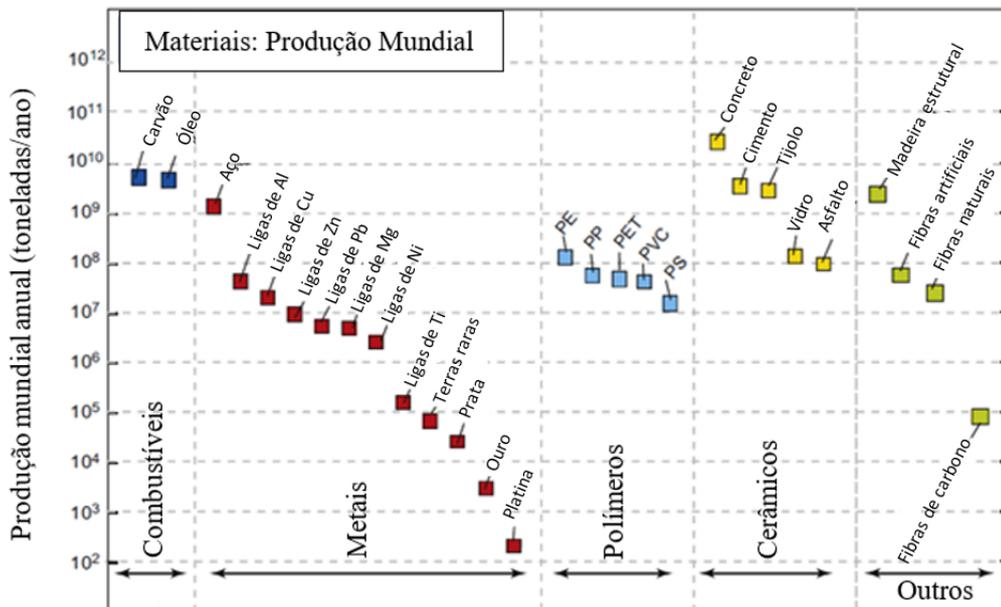
Assim, para se ter uma ideia sobre o que representam as ações e interferências humanas sobre o meio ambiente, as Figuras 28 e 29 demonstram, respectivamente, o consumo global de água e a quantidade anual de produção de alguns materiais utilizados pela sociedade.

Figura 28 – Consumo global de água, por tipo de setor.



Fonte: Adaptado de Ashby (2021).

Figura 29 – Produção mundial anual de alguns materiais necessários à sociedade industrializada.



Fonte: Adaptado de Ashby (2021).

Globalmente falando, são consumidos, aproximadamente, 20 bilhões de toneladas de materiais por ano, uma média de 2,7 toneladas por pessoa. (ASHBY, 2021, p. 25, tradução nossa)

A gravidade da interferência humana no meio ambiente é acentuada pelo fato dos materiais serem fabricados, comumente, com matérias-primas não renováveis e,

também, pelo uso e descarte inadequados dos respectivos materiais.

Assim, feita a abordagem inicial sobre ciclo de vida e impacto ambiental, permite-se a abordagem e o entendimento sobre ACV.

Segundo a JRC-IES (2010, p. IV, tradução nossa), a ACV *é um método que tem a finalidade de quantificar as emissões e os recursos consumidos, os impactos relacionados ao meio-ambiente, à saúde e às questões relacionadas ao esgotamento dos recursos, associados a quaisquer produtos ou serviços.*

Conforme ressaltado por Ashby (2021), energia e materiais são consumidos em todas as fases do ciclo de vida, o que promove penalidades ambientais associadas à emissão de  $CO_2$ , óxidos sulfurados ( $SO_x$ ), óxidos nitrosos ( $NO_x$ ) e outras emissões em forma de gases, líquidos, rejeitos sólidos e calor.

Shaked *et al.* (2016, p. XV, tradução nossa) faz um alerta sobre a importância da análise ambiental na tomada de decisões:

*"...faz-se necessária a quantificação de aspectos relacionados à sustentabilidade ambiental de maneira a dar suporte a um debate mais qualificado sobre possíveis escolhas mais sustentáveis existentes como soluções alternativas. A ACV é a ferramenta central para essa finalidade".*

Seguindo a mesma linha de pensamento anterior apresentada por Shaked *et al.* (2016), Ferreira *et al.* (2017, p. 3, tradução nossa) deixa claro o entendimento de que *a ACV é uma ferramenta analítica que provê informações para apoiar o processo decisório e não para substituí-lo.*

A Figura 30 apresenta uma representação esquemática do ciclo de vida dos produtos, ilustrando, simplificada, como os recursos são consumidos e como os impactos ambientais são causados.

É importante salientar que o foco da ACV é o aspecto ambiental. Sendo assim, os impactos econômicos e sociais não são, normalmente, contemplados.

No estudo completo sobre ACV, todos os estágios do ciclo de vida são levados em consideração, ou seja, analisa-se desde o nascimento do produto, caracterizado pela extração do recurso natural, até a sua morte ou descarte (*cradle-to-grave*). Neste caso, os limites do sistema são representados pelo *"limite do sistema B"* da Figura 31.

Porém, devida a complexidade do assunto, a ABNT (2014a, p. 21) apresenta um entendimento de que não existe uma solução única que defina a melhor forma de aplicação da ACV. Adicionalmente, ressalta que a técnica de ACV pode ser aplicada em estudos do tipo do *"berço-a-portão"* (*cradle-to-gate*)<sup>13</sup>, *"portão-a-portão"* (*gate-to-gate*)<sup>14</sup>,

<sup>13</sup> Expressão utilizada na ACV para delimitar o escopo da avaliação desde a extração da matéria-prima até a fabricação, deixando de fora a análise relacionada aos estágios de uso e de destinação final. Fonte: (CLARISA *et al.*, 2020).

<sup>14</sup> Expressão utilizada na ACV para delimitar o escopo da avaliação apenas à uma etapa específica do ciclo de vida. Fonte: (ASHBY, 2021).

Figura 30 – Representação esquemática do ciclo de vida dos produtos, mostrando como recursos materiais, energéticos e de terra são consumidos e como os impactos ambientais são causados pelas emissões e uso dos recursos.



Fonte: Modificado de Wolf *et al.* (2012).

ilustrado pelo "limite do sistema A" da Figura 31, ou em outras partes específicas do ciclo de vida, de acordo com o interesse do usuário.

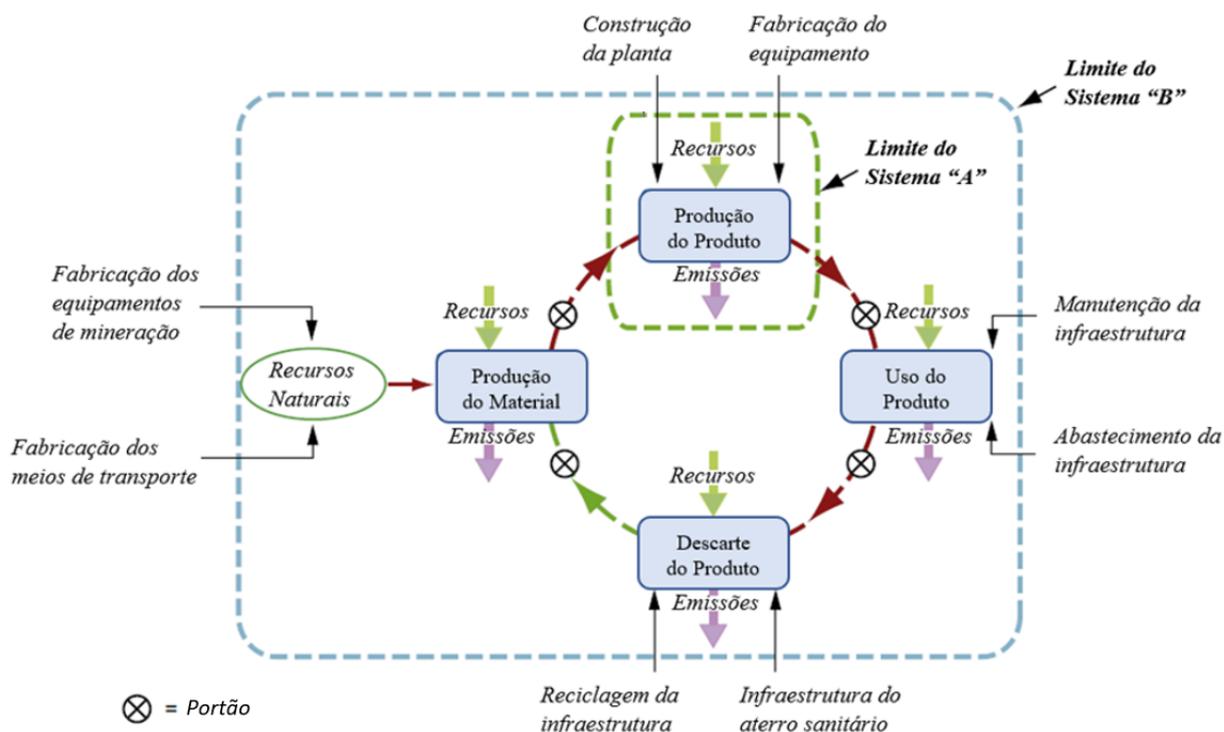
A avaliação do ciclo de vida de um produto ou serviço é dividida em 4 (quatro) fases:

- Definição dos objetivos e do escopo;
- Análise do inventário;
- Avaliação do impacto; e
- Interpretação do resultado.

A Figura 32 ilustra, de maneira representativa, as fases existentes no processo de avaliação do ciclo de vida e como elas se interagem. As respectivas fases da ACV serão detalhadas nas Subseções a seguir.

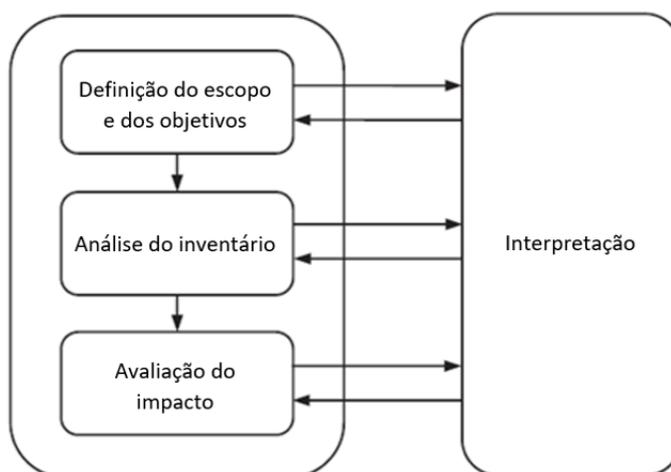
Adicionalmente, ressalta-se que, ao longo desta seção, serão utilizados alguns termos técnicos relacionados à ACV, os quais encontram-se listados, juntamente com a respectiva descrição, no Anexo F, com o intuito de facilitar o entendimento sobre o assunto.

Figura 31 – Limites dos sistemas na ACV, com os devidos fluxos de entrada e saída.



Fonte: Adaptado de Ashby (2021).

Figura 32 – Interação entre as fases do processo de avaliação do ciclo de vida.



Fonte: Adaptado de Shaked *et al.* (2016).

### 2.3.2 Definição dos objetivos e do escopo - 1ª fase da ACV

A *definição dos objetivos e do escopo* é a primeira fase da ACV. Primeiramente, deve-se descrever os objetivos pretendidos, ou seja, deve-se deixar claro os verdadeiros propósitos da ACV, onde serão utilizados os resultados alcançados e quem são as partes interessadas. Posteriormente, a função do sistema considerado é analisada para, então, definir a *Unidade Funcional (UF)* a ser utilizada.

A Tabela 6 apresenta, de maneira sumária, as principais declarações que devem fazer parte dos objetivos e os principais itens a serem incluídos no escopo de uma ACV, segundo a ABNT (2014a, p. 12).

Tabela 6 – Principais declarações e inclusões dos objetivos e do escopo de uma ACV.

Objetivos a serem declarados	Principais itens do escopo
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aplicação pretendida;</li> <li>- Razões para a realização do estudo;</li> <li>- Público-alvo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema de produto a ser estudado;</li> <li>- As funções do sistema de produto;</li> <li>- A UF;</li> <li>- A fronteira do sistema;</li> <li>- Procedimentos de alocação;</li> <li>- Categorias de impactos selecionadas e a metodologia para avaliação do impacto;</li> <li>- Pressupostos;</li> <li>- Limitações; e</li> <li>- Requisitos iniciais.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de ABNT (2014a).

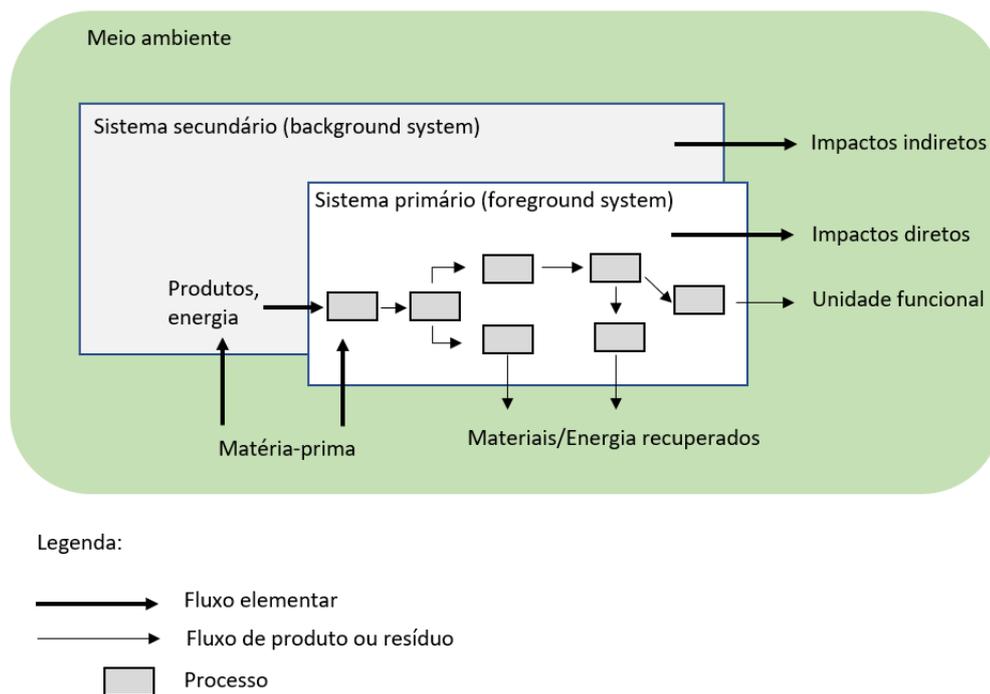
Na ACV, a fronteira do sistema deve ser definida de maneira que todos os processos relacionados ao estudo possam ser incorporados. Porém, normalmente, conforme destacado por Cumming e Johnson (2019, p. 176, tradução nossa), *na prática, isso não é factível, em razão da falta de tempo, de dados e de recursos. Portanto, algumas assunções são necessárias sobre quais processos serão incluídos na análise e o nível de detalhamento da análise*. Destaca-se que tal procedimento deve ser realizado com total transparência e as devidas justificativas.

Ao definir as fronteiras do sistema, é importante identificar os sistemas primário (*foreground system*) e secundário (*background system*). O sistema primário caracteriza-se pelos processos que tratam diretamente do item em estudo. O sistema secundário caracteriza-se por compreender os processos de fornecimento de energia, recursos e materiais para o sistema primário. Adicionalmente, enquanto o sistema primário é descrito por informações mais precisas dos processos, o sistema secundário é, normalmente, descrito por valores que representam uma médias dos diversos processos e tecnologias. A Figura 33 ilustra, esquematicamente, os sistemas primários e secundários.

Conforme destacado por Cumming e Johnson (2019, p. 177, tradução nossa), os materiais reciclados e a energia recuperada são creditados como entrada negativa no sistema primário. Portanto, o impacto ambiental total é calculado somando-se os impactos diretos e indiretos e subtraindo-se aqueles que foram evitados através da recuperação e da reciclagem.

Um exemplo macro de modelo de representação do ciclo de vida associado à uma munição genérica foi apresentado por Ferreira *et al.* (2017) e encontra-se ilustrado na Figura 34. No modelo em questão, percebe-se, claramente, a delimitação das

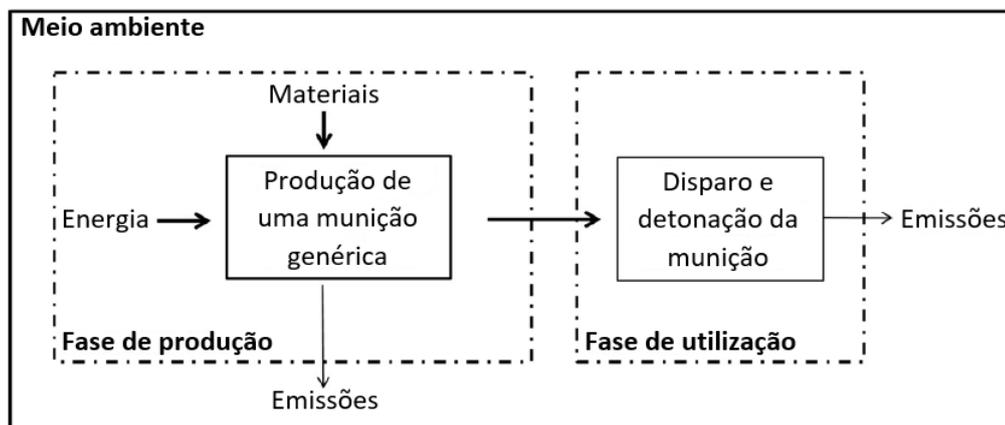
Figura 33 – Representação dos sistemas primários e secundários.



Fonte: Modificado de Cumming e Johnson (2019).

fronteiras do estudo relacionada às fases de produção e utilização.

Figura 34 – Modelo de ciclo de vida associado à uma munição genérica.

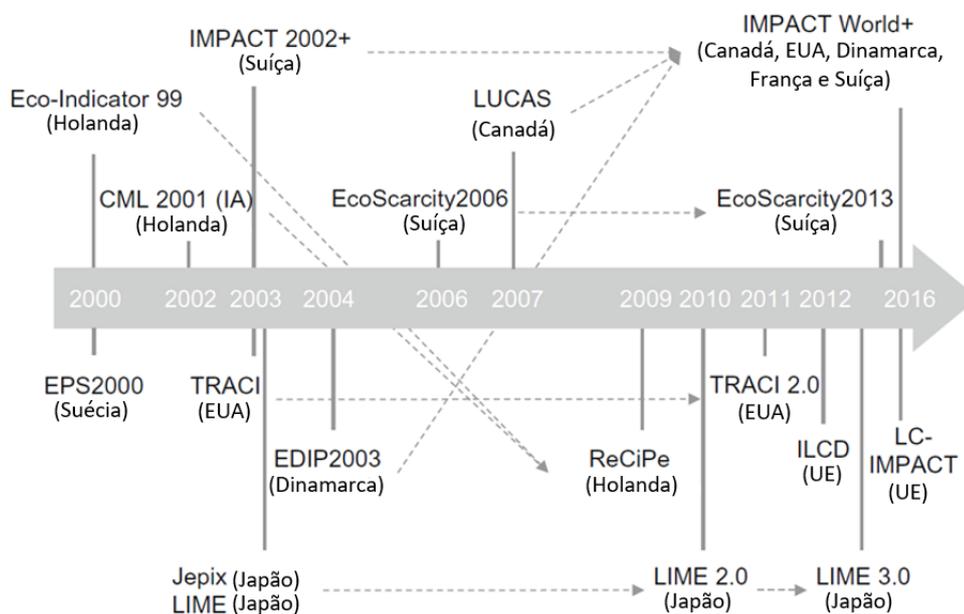


Fonte: Modificado de Ferreira *et al.* (2017).

Segundo Michael *et al.* (2018, p. 173, tradução nossa), a ACV apresenta uma série de indicadores de categorias, baseados em modelos específicos de caracterização, que são combinados com métodos predefinidos. A Figura 35 ilustra os principais métodos de avaliação publicados desde o ano 2000, com as respectivas regiões de origem e atualizações.

Os Anexos G e H apresentam, respectivamente, algumas categorias de impacto e metodologias usualmente utilizadas na ACV.

Figura 35 – Métodos de avaliação do impacto de ciclo de vida publicados desde o ano 2000, com as regiões de origem entre parênteses e as respectivas atualizações, representadas pelas linhas tracejadas.



Fonte: Modificado de Michael *et al.* (2018).

### 2.3.3 Análise do inventário - 2ª fase da ACV

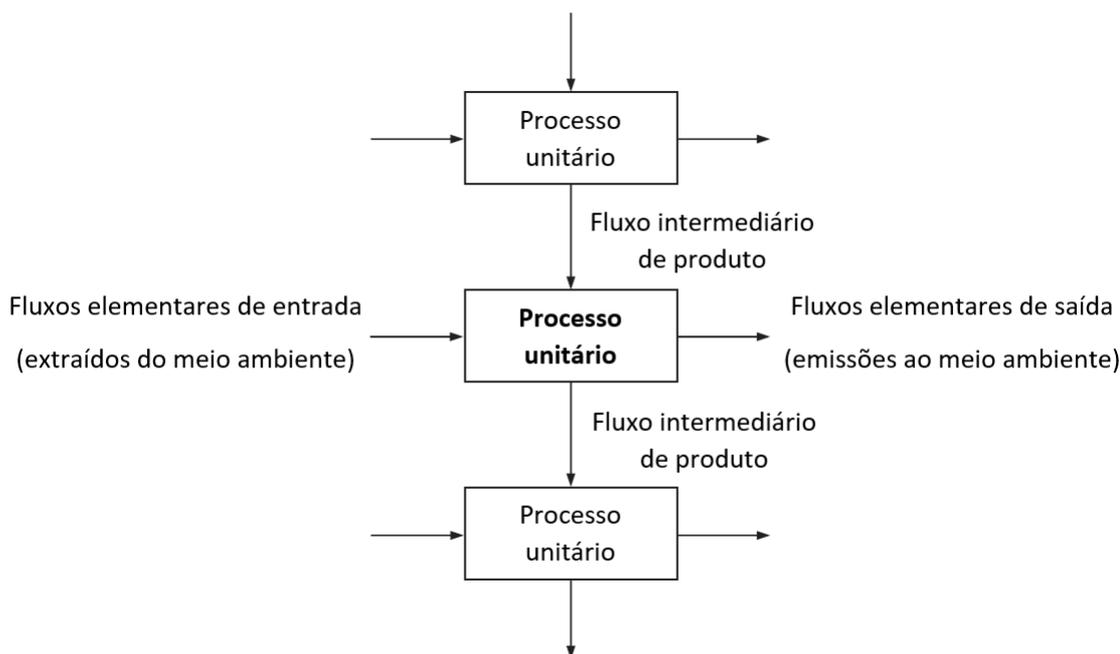
Após a definição dos objetivos e do escopo, inicia-se a 2ª fase da ACV, conhecida como *Análise do Inventário*. Nesta fase, conforme apresentado por Michael *et al.* (2018, p. 62, tradução nossa), *são coletadas as informações sobre o fluxo físico em termos de entrada de recursos, materiais, semi-produtos e produtos e de saída de emissões, resíduos e produtos do sistema de produto.*

Em linhas gerais, o sistema analisado é modelado interligando-se os diferentes módulos de processo. Shaked *et al.* (2016, p. 34, tradução nossa) explica que:

*Os processos e elementos requeridos para preencher a função do sistema são identificados e são expressos como uma série de processos unitários, os menores elementos da análise, com as entradas e saídas devidamente quantificadas. Os processos unitários são ligados entre si através dos fluxos intermediários, expressando a quantidade necessária de cada processo unitário para o processo unitário seguinte... ressalta-se, ainda, que os processos unitários são ligados ao meio ambiente por fluxos elementares, com fluxos elementares de entradas correspondendo ao uso de recursos naturais, como matéria prima extraída, energia e uso da terra. Fluxos elementares de saída do processo unitário correspondem às emissões para o ar, água e solo, conforme ilustrado pela Figura 36.*

As ferramentas de gestão usualmente utilizadas para auxiliar na modelagem

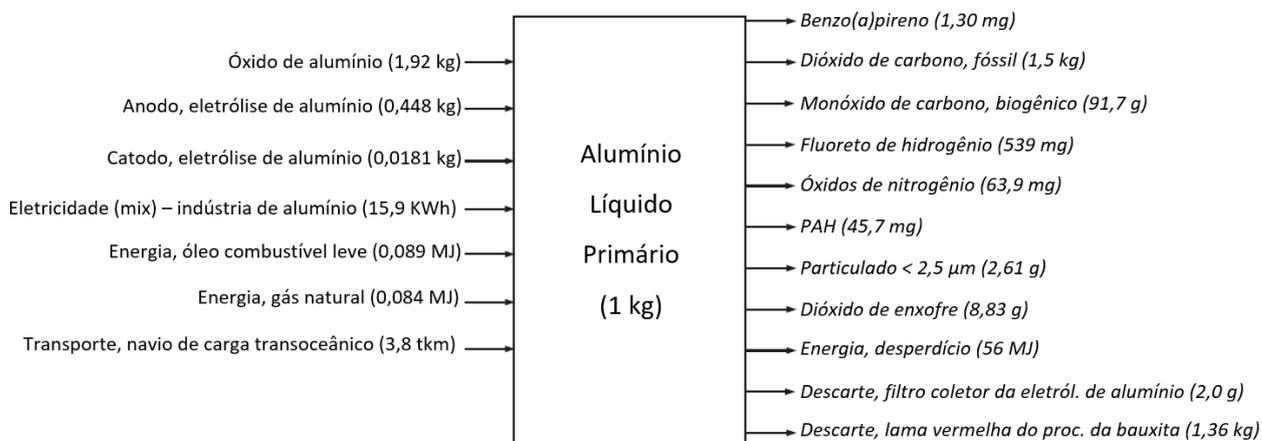
Figura 36 – Representação esquemática de um conjunto de processos unitários em um sistema.



Fonte: Modificado de Shaked *et al.* (2016).

do sistema são o *fluxograma* ou *árvore de processos*, pois facilitam a obtenção de uma visualização clara dos processos e os seus relacionamentos. As Figuras 37 e 38 exemplificam, respectivamente, os fluxos elementares e intermediários dos processos relacionados à planta de fabricação do alumínio líquido primário e o correspondente fluxograma dos processos de fabricação.

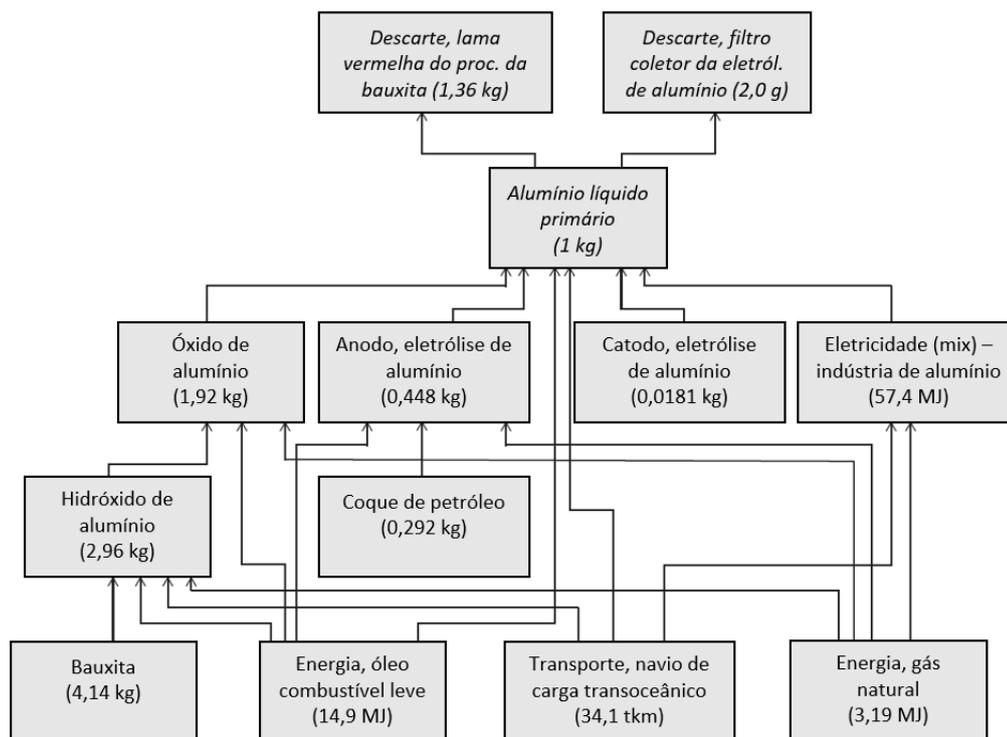
Figura 37 – Exemplo de fluxos dos processos unitários. Fabricação de alumínio líquido primário.



Fonte: Modificado de Shaked *et al.* (2016).

A ABNT (2014b) sugere a realização de alguns procedimentos com o intuito de facilitar e guiar a realização da análise do inventário, os quais encontram-se ilustrados

Figura 38 – Fluxograma exemplificativo dos processos de fabricação do alumínio líquido primário, baseado no EcoInvent 2.2.

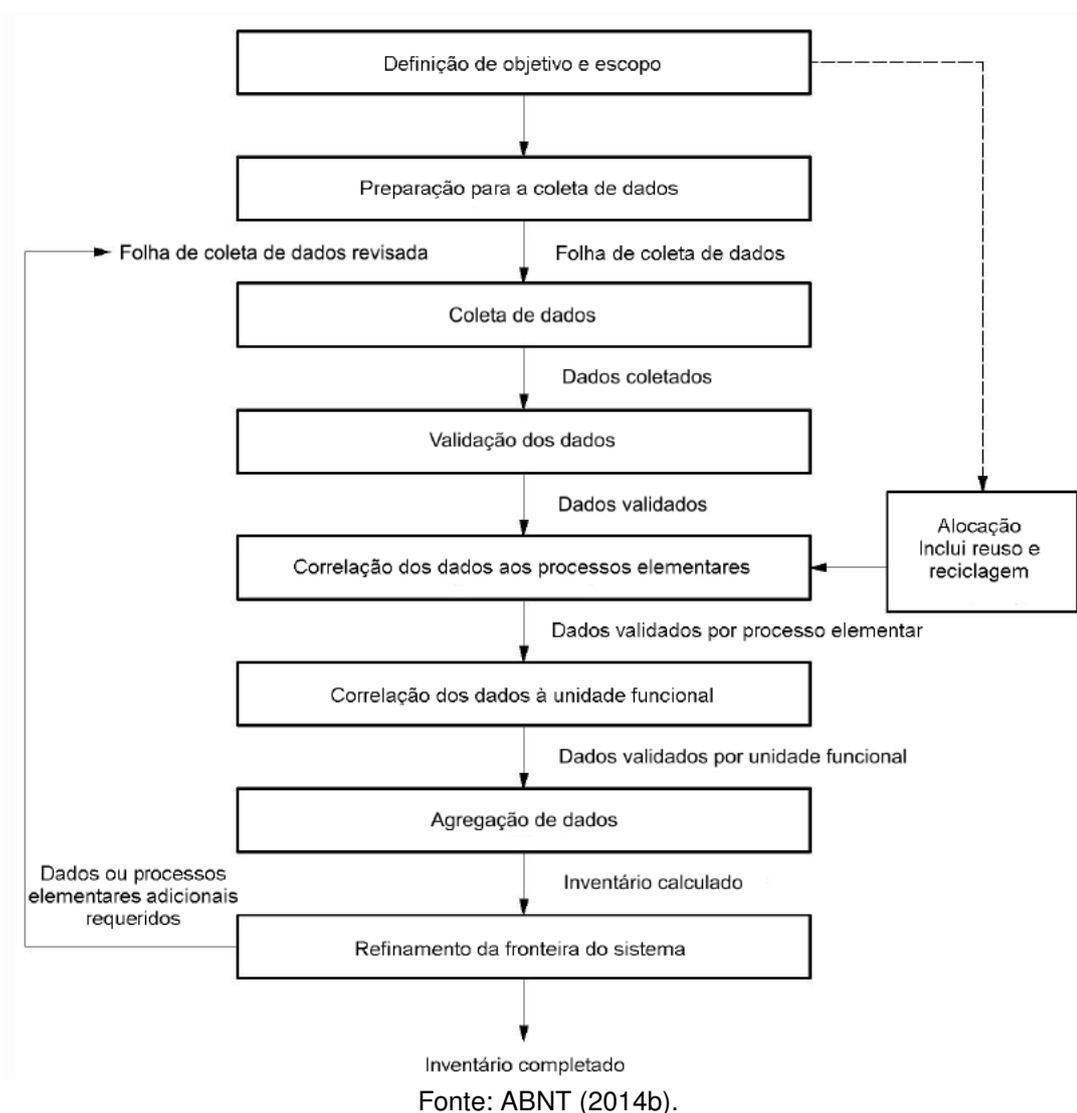


Fonte: Modificado de Shaked *et al.* (2016).

no esquema da Figura 39.

De uma maneira geral, ao final da 2ª fase da ACV tem-se, em mãos, uma lista contendo todos os consumos realizados (entradas) e as emissões produzidas (saídas) pelo sistema de produto analisado.

Figura 39 – Procedimentos recomendados para análise do inventário.



### 2.3.4 Avaliação do impacto - 3ª fase da ACV

A 3ª fase da ACV, conhecida como *Avaliação do Impacto*, tem como objetivo estudar a significância dos impactos ambientais potenciais provocados pelos itens listados na fase anterior, ou seja, *é responsável por traduzir os itens inventariados na 2ª fase em termos de impactos ambientais, através de conhecimentos e modelos científicos*, conforme apresentado por Michael *et al.* (2018, p. 62, tradução nossa).

De acordo com a ABNT (2014a, p. 16), a fase de avaliação do impacto consiste de vários elementos, sendo alguns mandatórios e outros opcionais.

*A seleção das categorias de impacto, os indicadores de categoria e os modelos de caracterização* constituem o primeiro elemento mandatório e devem estar de acordo com o objetivo e escopo da ACV.

*A classificação*, segundo elemento mandatório, correlaciona os resultados do inventário do ciclo de vida às categorias de impactos selecionadas.

O terceiro e último elemento mandatório é a *caracterização*, ou seja, o cálculo dos resultados dos indicadores de categoria.

Destaca-se que cada tipo de emissão tem a sua particularidade, provocando um nível de malefício ao meio ambiente, ou seja, algumas emissões são mais prejudiciais ao meio ambiente que outras.

Exemplificando, a Tabela 7 apresenta os valores dos fatores de avaliação de impacto para os gases  $CO_2$  (dióxido de carbono),  $CO$  (monóxido de carbono),  $CH_4$  (Metano) e  $N_2O$  (Óxido Nitroso), em relação à categoria “potencial de aquecimento global”.

Tabela 7 – Fator de avaliação de impacto para a categoria "potencial de aquecimento global".

<b>GÁS</b>	<b>FATOR DE AVALIAÇÃO DO IMPACTO</b> (Categoria de impacto: Potencial de aquecimento global)
$CO_2$	1
$CO$	1,6
$CH_4$	21
$N_2O$	256

Fonte: Ashby (2021).

Assim, para calcular o impacto ambiental, multiplica-se a quantidade de cada item inventariado por um fator de avaliação do impacto, estabelecido de acordo com o grau de malefício que aquele item do inventário prejudica o meio ambiente.

Iniciando os elementos opcionais, tem-se a *normalização*, considerada o quarto elemento. De acordo com a ABNT (2014b), é utilizado para calcular a magnitude dos resultados dos indicadores de categoria com relação a informações de referência.

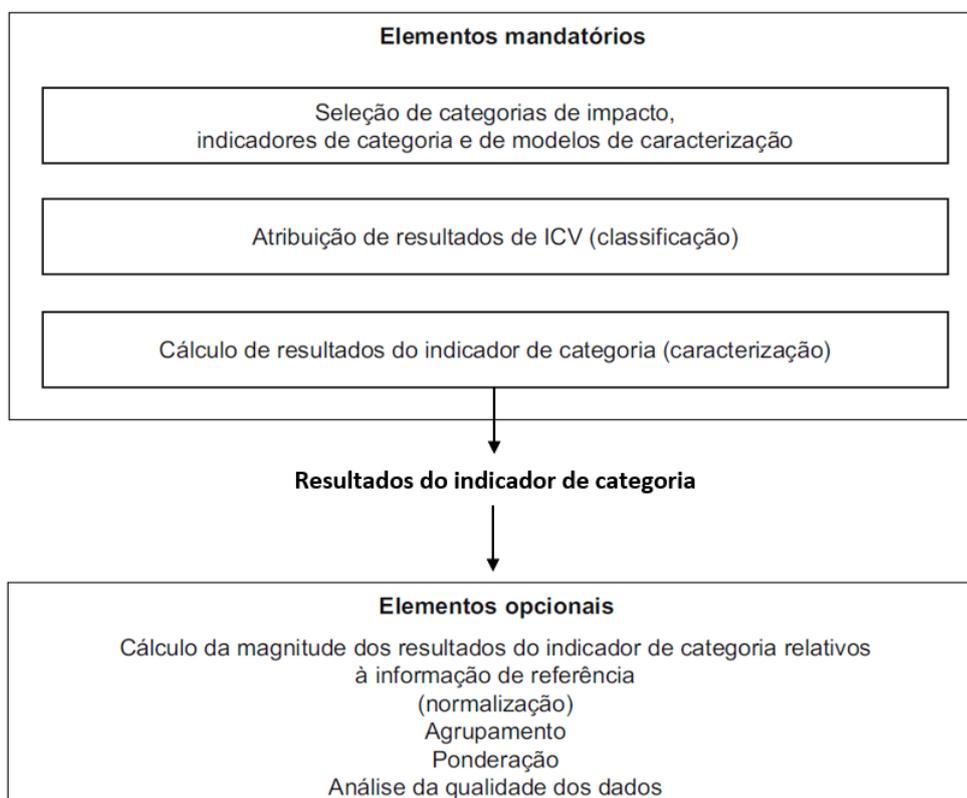
Em seguida, tem-se o *agrupamento*, quinto elemento. Pode ser entendido como a agregação e hierarquização das categorias de impacto.

A *ponderação*, sexto elemento, é caracterizada pela conversão e possível agregação dos resultados dos indicadores entre as diferentes categorias de impactos utilizando fatores numéricos baseados em escolha de valores.

Por último, o sétimo elemento, a *análise da qualidade dos dados*, caracterizado pela aplicação de técnicas adicionais para melhor compreensão da significância, incerteza e sensibilidade dos resultados da avaliação dos impactos.

A Figura 40 ilustra, de forma simplificada, os elementos constituintes da 3ª fase da ACV.

Figura 40 – Elementos constituintes da avaliação dos impactos do ciclo de vida.



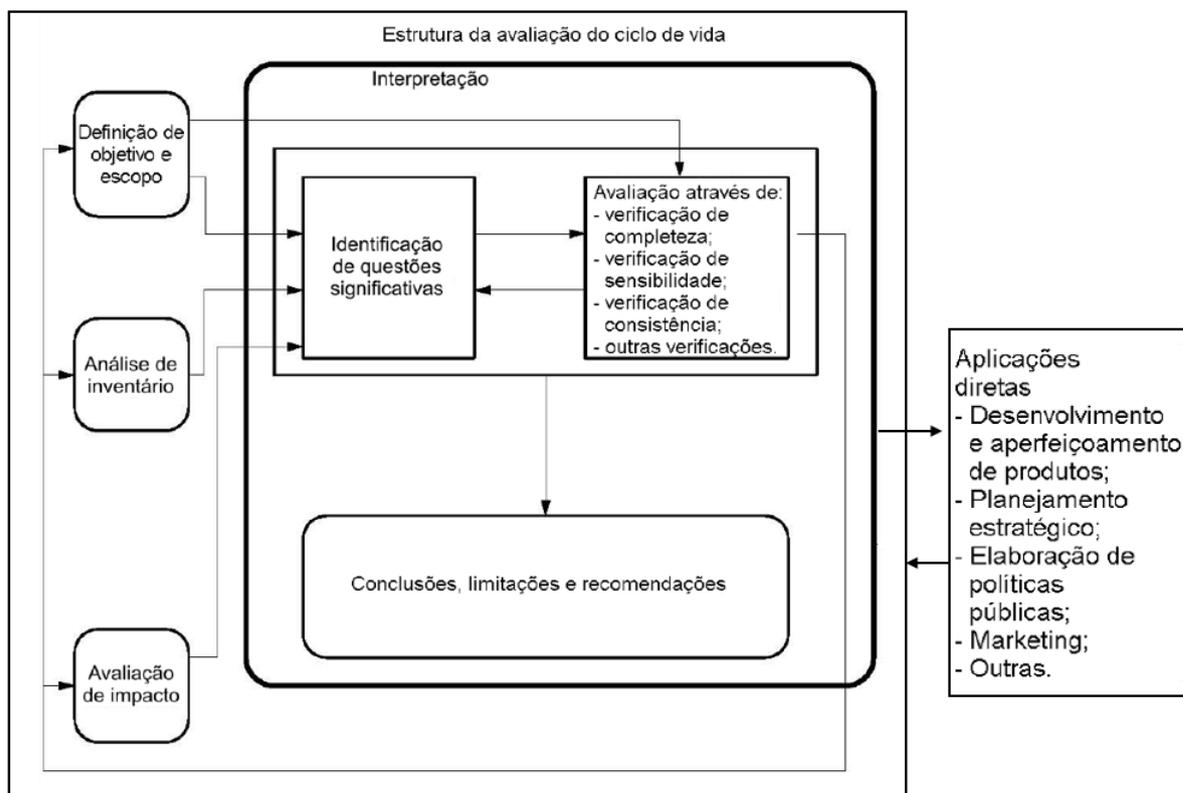
Fonte: ABNT (2016).

### 2.3.5 Interpretação do resultado - 4ª fase da ACV

Terminada a avaliação dos impactos ambientais, inicia-se a fase de *interpretação dos resultados*, última fase da ACV. Nessa fase os resultados são interpretados com a finalidade de responder os questionamentos apresentados na definição dos objetivos.

Segundo a ABNT (2014b, p. 23), a fase de interpretação dos resultados inclui a identificação das questões significativas com base nos resultados das fases de inventário e de avaliação dos impactos, uma avaliação do estudo, considerando verificações de completeza, sensibilidade e consistência e, por último, conclusões, limitações e recomendações. A Figura 41 ilustra, esquematicamente, as ações da fase final da ACV e o relacionamento dos elementos desta última fase com as outras fases.

Figura 41 – Relacionamento dos elementos da fase de interpretação com as outras fases da ACV.



Fonte: ABNT (2014b).

### 2.3.6 Ferramentas de apoio à avaliação do ciclo de vida

A ACV é uma ferramenta que pode auxiliar no desenvolvimento de melhorias de produtos e dar suporte a ações e escolhas estratégicas.

Porém, a realização da ACV é uma tarefa complexa e dispendiosa. Conforme apresentado por Ashby (2021, p. 60, tradução nossa), *o tempo estimado para a realização de uma triagem para a realização da ACV é de, aproximadamente, 8 (oito) dias. No caso de uma análise completa, o tempo estimado passa para 22 (vinte e dois) dias.*

Assim, nesse contexto, foram desenvolvidos diversos softwares para ajudar na realização da ACV. Cada software possui as suas características e finalidades próprias. Alguns são gratuitos e outros só podem ser utilizados mediante a aquisição de uma licença. A Tabela 8 apresenta, de uma maneira geral, alguns softwares disponíveis no mercado para auxiliar na realização da ACV.

Tabela 8 – Ferramentas computacionais de apoio à realização da ACV.

Produto	Descrição	Provedor
SimaPro	Utilizado para coletar, analisar e monitorar a performance ambiental de produtos e serviços. Segue as recomendações das normas ISO série 14040. É um produto comercial. Existe uma versão <i>demo</i> disponível no site do provedor.	PRé Consultants ( <a href="http://www.pre.nl">http://www.pre.nl</a> )
TEAM 5 (Ecobilan)	Permite ao usuário construir e usar um grande banco de dados e modelar sistemas associados com produtos e processos, segundo as normas da série ISO 14040.	PricewaterhouseCoopers ( <a href="http://ecobilan.pwc.fr/en/team/team-demo.html">http://ecobilan.pwc.fr/en/team/team-demo.html</a> )
GaBi Envision 3.0	É uma ferramenta para avaliação de produto, seguindo as recomendações da legislação europeia. Facilita a análise de critérios financeiro, ambientais, sociais e técnicos. Existe uma versão <i>demo</i> disponível.	PE International ( <a href="http://www.gabi-software.com/uk-ireland/software/">http://www.gabi-software.com/uk-ireland/software/</a> )
GREET	Trata-se de uma planilha gratuita, elaborada no Microsoft Excel. Apresenta 2 versões: uma para análise do ciclo de combustível e outra para análise do ciclo de veículos. Lida com emissões e não com impactos e combinações ponderadas. Para um determinado sistema de veículo e combustível, calcula o consumo de energia, emissões de gases do efeito estufa em $CO_2$ – <i>equivalente</i> ( $CO_2$ , $CH_4$ , $N_2O$ ) e 6 critérios poluente: compostos voláteis orgânicos, $CO$ , $NO_x$ , materiais particulados com tamanho menor que $10 \mu m$ e $2,5 \mu m$ e $SO_x$ .	US Department of Transport ( <a href="http://www.transportation.anl.gov/">http://www.transportation.anl.gov/</a> )
MIPS	Permite análise em nível <i>micro</i> (com foco em um produto ou serviço específico) ou <i>macro</i> (foco numa economia nacional).	Wuppertal Institute ( <a href="http://www.wupperinst.org/">http://www.wupperinst.org/</a> )
CES EduPack 2019	Especializado em gerenciamento de informações de materiais. Possui módulo para realização de análise do tipo " <i>eco-audit</i> ".	Granta Design, Cambridge, UK ( <a href="http://www.grantadesign.com/education">www.grantadesign.com/education</a> )
LCA Calculator	Ferramenta rápida e intuitiva aos projetistas e engenheiros, facilitando o entendimento e a análise e permitindo a comparação de impactos ambientais de produtos e decisões particulares de projeto.	IDC, London, UK ( <a href="http://www.lcacalculator.com/">http://www.lcacalculator.com/</a> )
OpenLCA	Software de fonte aberta, gratuito e que pode ser utilizado para diversas aplicações, como: avaliação do ciclo de vida, custo do ciclo de vida, avaliação social do ciclo de vida, pegadas de água e de carbono, etc.	GreenDelta ( <a href="http://www.openlca.org/">http://www.openlca.org/</a> )

Fonte: Adaptado de Ashby (2021).

### 2.3.7 Aplicações gerais

As últimas décadas têm sido palco de numerosos estudos relacionados à preservação do meio ambiente e à sustentabilidade. Nesse contexto, a ACV tem sido uma ferramenta bastante utilizada para obtenção de dados, com intuito de apoiar as ações

decisórias.

Conforme ressaltado por Michael *et al.* (2018, p. 32, tradução nossa), *muitos esforços têm sido realizados para facilitar a aplicação da ACV e o pensamento sobre o ciclo de vida na sociedade em geral, envolvendo ações de níveis governamentais, passando pela indústria e alcançando o nível da população e consumidores.*

Sobre uma perspectiva de nível governamental, são apresentados, na Tabela 9, alguns exemplos de aplicações importantes da ACV.

Tabela 9 – Exemplos de aplicação da ACV em nível governamental.

Tópico	Ano de iniciação e/ou escopo geográfico
<b>ACV como ferramenta de conhecimento para formação de políticas</b>	
Plano de Ação em Tecnologias Ambientais (ETAP)	2004 (UE)
Políticas Integradas de Produto (IPP)	2003 (UE)
Diretivas em "eco-design" de energia usando produtos (EuP)	2005 (UE)
Estratégia para uso sustentável de recursos naturais	2005
Plano de Produção e de Consumo Sustentável (SCP)	2007 (UE)
Biocombustíveis	Alemanha
Aplicação de pesticidas	Costa Rica
<b>Apoio à implementação de instrumentos baseados em informações: ACV e políticas de implementação</b>	
Eco-rotulagem	Vários países
Declaração Ambiental de Produtos (EPD)	Vários países
Diretiva Estratégica de Avaliação Ambiental	2004
Procuração pública	EUA e Japão
Diretiva de construção de produtos	1989 (UE)
Portarias sobre a prevenção e recuperação de resíduos de embalagens	Alemanha
Gestão de resíduos	França, México e Japão
<b>ACV como ferramenta para avaliação de políticas</b>	
Estratégia temática de prevenção e reciclagem de resíduos e Diretiva de estrutura de resíduos	2005 (UE)
Diretiva de óleo residual	2000 (UE)

Fonte: Michael *et al.* (2018).

Outros estudos importantes também podem ser citados sobre a aplicação da ACV, relacionados, porém, a uma perspectiva industrial e de produção. Alguns deles estão relacionados diretamente à análise do ciclo de vida de *munições*, e seus respectivos processos de desmilitarização, objeto central deste trabalho.

O trabalho realizado por Hågvall *et al.* (2004), apresentou o resultado da ACV de uma munição de calibre 40 mm. Foram considerados 2 (dois) cenários diferentes na análise: o primeiro simulando a situação de guerra, onde todas as munições são utilizadas; o segundo, simulando a situação de paz, onde 95% das munições são armazenadas e, posteriormente, desmilitarizadas, reciclando-se alguns materiais e apenas 5% são utilizadas para treinamento.

Alverbro *et al.* (2009) apresenta um trabalho de avaliação comparativa entre duas técnicas de desmilitarização: DA e incineração em forno estático. Porém, observa-se algumas limitações no estudo: não leva em consideração a manufatura e transporte do equipamento de incineração e, também, considera os valores de emissões baseados nos limites máximos existentes nas regulamentações e não nos valores reais.

Ferreira *et al.* (2013) apresenta um trabalho que complementa os estudos realizados por Alverbro *et al.* (2009). Ele apresenta um modelo de ciclo de vida que aborda o processo de desmilitarização, desde a desmontagem da munição, o descarregamento da carga explosiva, a incineração do material energético em forno estático e o subsequente tratamento dos gases de combustão. Os dados de inventário utilizados foram obtidos com a *Indústria de Desmilitarização e Defesa (IDD)*, empresa responsável pela desmilitarização de produtos de defesa de Portugal. No modelo elaborado, incluiu-se, também, a fabricação e o transporte do equipamento de incineração. Porém, algumas limitações podem ser observadas: o modelo de ciclo de vida elaborado foca no final do ciclo de vida do produto, omitindo as fases anteriores de fabricação da matéria-prima, fabricação da munição e utilização.

Um exemplo da utilização da ACV como uma ferramenta para auxiliar no desenvolvimento de novos produtos, ambientalmente mais responsáveis, é o trabalho apresentado por Ferreira *et al.* (2016), onde modelos diferentes de munição calibre 9 mm são avaliados, substituindo-se o chumbo da carga iniciadora por outro tipo de elemento, e os potenciais benefícios ambientais analisados.

O trabalho realizado por Galante *et al.* (2017), tem por finalidade ilustrar alguns aspectos-chave sobre os procedimentos necessários para orientar a implementação do *Sistema de Gestão Ambiental Orientado a Projetos (POEMS)*, sistema britânico baseado nas normas ISO 14001 e ISO 14040, criado para facilitar a aplicação de sistemas de gestão ambiental para atividades e equipamentos do Ministério da Defesa durante o seu ciclo de vida. O trabalho em questão apresentou um estudo de caso com uma munição de artilharia calibre 105 mm.

Por fim, pode-se citar outro trabalho realizado por Ferreira *et al.* (2019) no qual utiliza-se a ACV como uma ferramenta para auxiliar na quantificação de benefícios ambientais provenientes da utilização de princípios básicos existentes na economia circular, focado na reutilização de materiais energéticos da munição como subprodutos em explosivos civis.

### **2.3.8 Considerações parciais sobre avaliação do ciclo de vida**

A revisão bibliográfica sobre *avaliação do ciclo de vida*, apresentada nesta seção, propiciou a identificação e a explicação das fases existentes na ACV de um produto, permitindo o entendimento do método de quantificação do impacto ambiental, conforme delineado no objetivo específico "1.c)".

As informações apresentadas nesta seção, juntamente com as apresentadas nas Seções 2.1 e 2.2, são fundamentais para a evolução do trabalho e servirão de base para a elaboração da proposta de sistematização do processo de desmilitarização de munição, com enfoque na avaliação do ciclo de vida, conforme delineado no objetivo específico "2".

### 3 SISTEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE DESMILITARIZAÇÃO DE MUNIÇÃO - SisProDMun

Este capítulo apresenta uma proposta de *Sistematização do Processo de Desmilitarização de Munição (SisProDMun)* destinada às munições convencionais<sup>1</sup> e de grande calibre<sup>2</sup> empregadas pelo EB, por ocasião do final do ciclo de vida, com base na revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2, considerando a utilização de técnicas de desmilitarização disponíveis e de emprego maduro, de maneira a auxiliar os processos decisórios em busca de ações e decisões ambientalmente mais responsáveis.

#### 3.1 ASPECTOS GERAIS

As munições são, em geral, produtos revestidos de intrínsecas peculiaridades quanto ao uso, comercialização e produção. À medida que a capacidade de destruição desses produtos aumenta maiores são as restrições impostas. Tal fato contribui para a existência de um nicho de mercado bastante restrito, dominado por grandes empresas, normalmente subordinadas ou vinculadas ao Estado, onde as informações são tratadas, normalmente, sob um *rótulo* de confidencialidade.

Conseqüentemente, muitas das informações técnicas relacionadas à fabricação, utilização e desmilitarização de munições são difíceis de ser obtidas, pois ficam restritas aos governos e fabricantes.

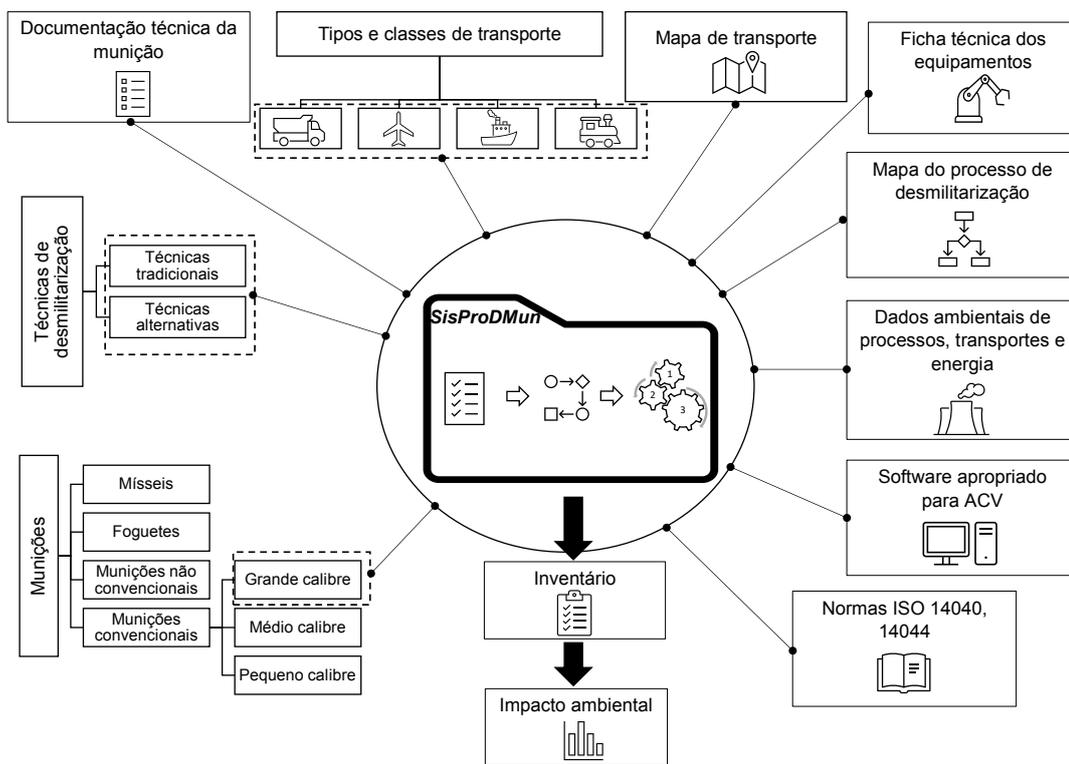
Com as demandas da sociedade em geral em prol da preservação do meio ambiente e de uma convivência mais sustentável, a avaliação do ciclo de vida de materiais, inclusive os militares, vem ganhando destaque nos órgãos e entidades públicos e, conseqüentemente, na sociedade acadêmica.

Nesse contexto, a SisProDMun foi concebida de maneira a auxiliar na elaboração do inventário (entradas e saídas) do processo de desmilitarização de munição, para a realização da ACV, levando-se em consideração os processos de desmilitarização utilizados, as características da munição, os tipos e classes de transporte utilizados no transporte de material, os dados ambientais relacionados aos processos, transportes e energia, os princípios basilares de normas técnicas relacionadas à avaliação do ciclo de vida de produtos (ABNT, 2014a, 2014b) e outras informações necessárias, conforme modelo conceitual ilustrado na Figura 42.

<sup>1</sup> Munições tradicionais; carregadas com material alto-explosivo ou inerte; que não são dotadas de incrementos tecnológicos; cujo riscos principais são de explosão, fragmentação e incêndio. Excluem-se dessa categoria as munições que carregam agentes químicos, biológicos ou incendiários, os mísseis, foguetes e as munições nucleares.

<sup>2</sup> Classificação relacionada ao diâmetro do projétil. Neste caso, normalmente maior ou igual a 60 mm. Fonte: NAMMO (2021).

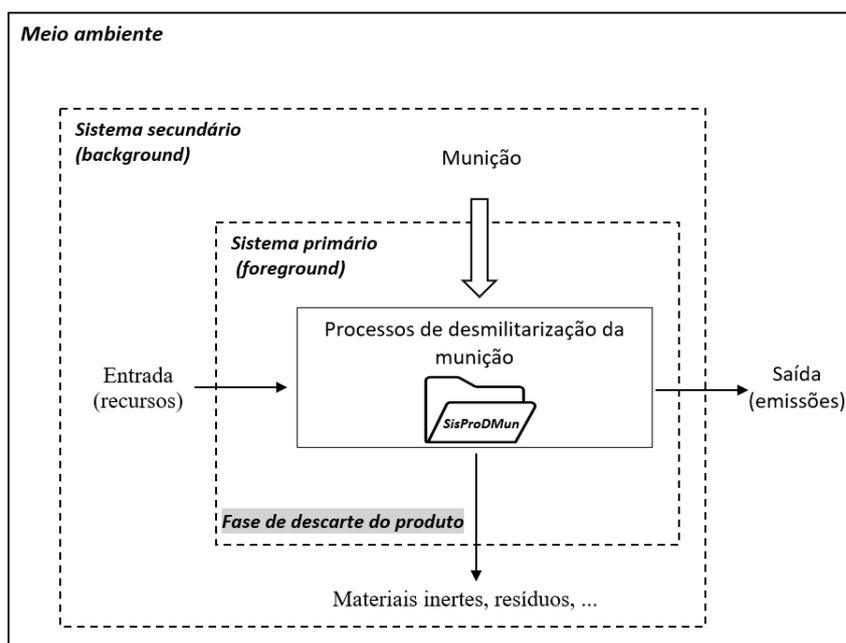
Figura 42 – Modelo conceitual da SisProDMun.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Adicionalmente, ilustrou-se na Figura 43 a visão geral do modelo de ciclo de vida associado à desmilitarização da munição com a aplicação da SisProDMun.

Figura 43 – Visão geral do modelo de ciclo de vida associado à desmilitarização da munição com aplicação da SisProDMun.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao utilizar a SisProDMun, o usuário poderá escolher o cenário de desmilitarização da munição com aplicação das técnicas tradicionais de destruição conhecidas como QA e DA, conforme abordado na Seção 2.2.3, ou poderá escolher outro cenário que faça uso de técnicas alternativas de desmilitarização, conforme abordado na Seção 2.2.4.

### 3.2 DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS E DO ESCOPO

O objetivo de sistematizar o processo de desmilitarização de munição é o de auxiliar na elaboração do inventário (consumo de recursos e produção de emissões) do respectivo processo de desmilitarização para a realização da ACV relacionada à fase de descarte do produto, com o intuito de obter informações que possam ser utilizadas em processos decisórios, orientando as ações e decisões em direções ambientalmente mais responsáveis.

Dessa maneira, técnicos e gestores dos diversos escalões do EB, podem utilizar a *SisProDMun* como ferramenta auxiliar na elaboração de manuais técnicos e/ou do plano de desativação, inseridos, respectivamente, nas fases de produção, utilização e manutenção ou de desativação do ciclo de vida de sistemas e de materiais de emprego militar do EB, conforme preconizado em EB (2016) e ilustrado na Figura 3. Adicionalmente, membros da sociedade acadêmica podem utilizar a *SisProDMun* para auxiliá-los no desenvolvimento de estudos e pesquisas na área de sustentabilidade e preservação do meio ambiente.

Para a elaboração da sistematização proposta, serão consideradas as munições convencionais, de grande calibre, alto-explosiva e que são, atualmente, empregadas pelo EB. A Tabela 10 apresenta as munições que fazem parte do escopo do respectivo trabalho.

Tabela 10 – Relação das munições empregadas pelo EB que fazem parte do escopo da SisProDMun.

Nr	Munição (nomenclatura)	Ilustração	OBS
1	90 mm Alto Explosiva - Traçante (90 mm AE-T)		Munição de canhão
2	60 mm Alto Explosiva - Modelo M4 (60 mm AE-M4)		Munição de morteiro
3	81 mm Alto Explosiva - Modelo M5 (81 mm AE-M5)		Munição de morteiro
4	120 mm Alto Explosiva - Convencional - Modelo B1 (120 mm AE-Conv-B1)		Munição de morteiro
Continua...			

Tabela 10 – Relação das munições empregadas pelo EB que fazem parte do escopo do trabalho. (Continuação)

Nr	Munição (nomenclatura)	Ilustração	OBS
5	105 mm Alto Explosiva - Modelo M1 (105 mm AE-M1)		Munição de obuseiro (artilharia)
6	155 mm Alto Explosiva - Modelo M107 (155 mm AE-M107)		Munição de obuseiro (artilharia)

Fonte: Elaborado pelo autor.

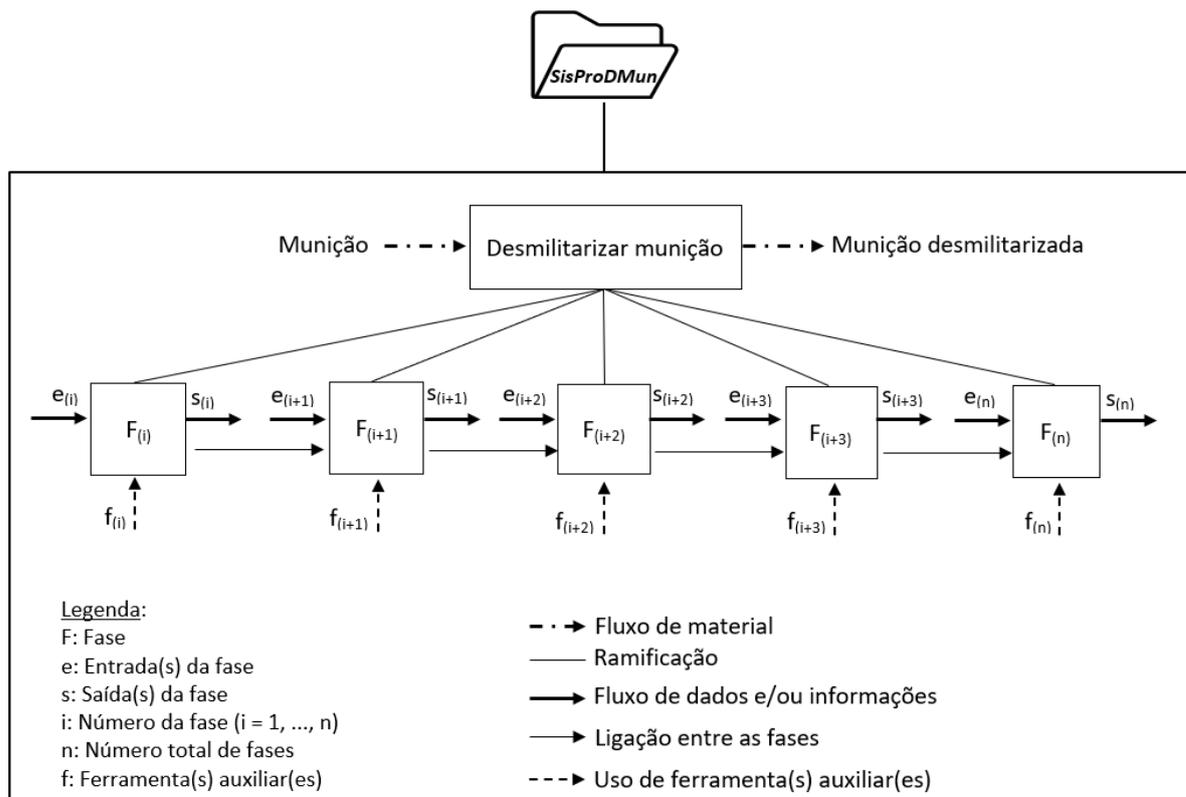
A proposta de sistematização do processo de desmilitarização de munição encontra-se inserida na fase de descarte do produto, ou seja, na fase final do ciclo de vida das munições.

Não faz parte do escopo da sistemática a análise relacionada ao tratamento e/ou destinação final dos resíduos e materiais inertes resultantes do processo de desmilitarização, ou seja, se os mesmos serão reciclados, recuperados, transformados em subprodutos ou se serão destinados ao aterro sanitário.

### 3.3 APRESENTAÇÃO DA SISPRODMUN

A sistematização do processo de desmilitarização de munição é estruturado em fases, conforme ilustrado, de uma maneira geral, na Figura 44. O detalhamento das atividades de cada fase, suas entradas, saídas e ferramentas de auxílio é apresentado na Tabela 11 e ilustrado na Figura 45.

Figura 44 – Estrutura geral da SisProDMun.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Baseado nas informações obtidas no Capítulo 2, foram desenvolvidos o mapeamento do processo de desmilitarização de munição, que pode ser encontrado na Figura 46, e a matriz de atividades, entradas e saídas do processo de desmilitarização de munição, que pode ser encontrada na Tabela 12, ferramentas a serem utilizadas na SisProDMun.

Tabela 11 – Apresentação das fases, atividades, entradas, ferramentas auxiliares e saídas da SisProDMun.

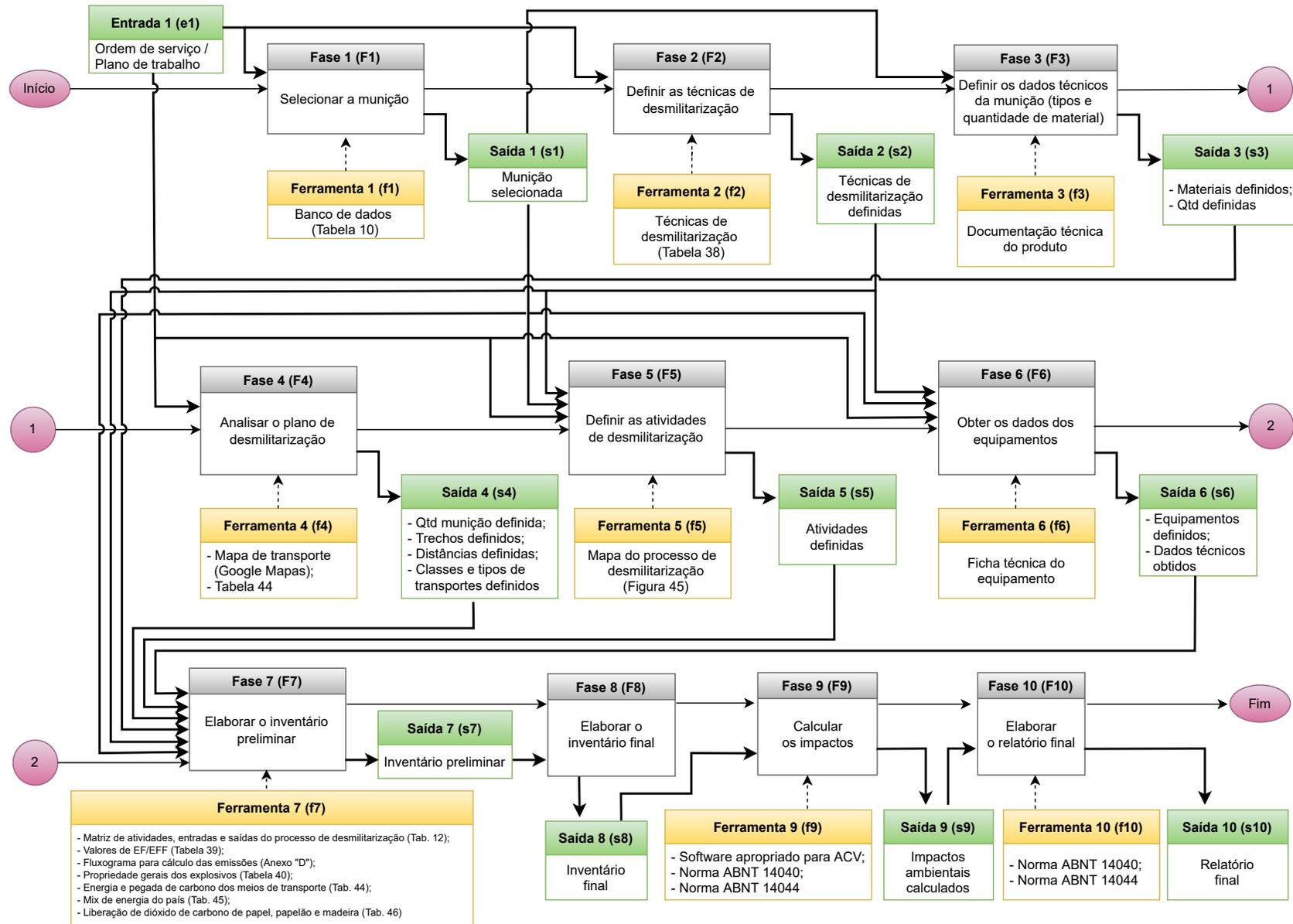
Nr	Fase (F)	Atividade	Entrada (e)	Ferramenta (f)	Saída (s)
1	Selecionar a munição	Selecionar o tipo de munição a ser desmilitarizada	Ordem de serviço/Plano de trabalho	Banco de dados (Tabela 10)	Munição selecionada
2	Definir as técnicas de desmilitarização	Definir as técnicas de desmilitarização a serem utilizadas: técnicas tradicionais de QA/DA ou outra(s) técnica(s) alternativa(s)	Ordem de serviço/Plano de trabalho	Matriz de técnicas de desmilitarização (Tabela 38)	Técnicas de desmilitarização definidas
3	Definir os dados técnicos da munição	Definir os tipos de materiais utilizados na munição; definir a quantidade de cada material utilizado na munição	s <sub>1</sub>	Documentação técnica do produto	Materiais definidos e quantidades definidas
4	Obter as informações sobre o plano de desmilitarização	Definir: quantidade de munição a ser desmilitarizada; os trechos a serem percorridos no transporte ; a distância de cada trecho; as classes e os tipos de transporte utilizados	Ordem de serviço/Plano de trabalho	Mapa de transporte (Google Maps); Energia e pegada de carbono do transporte (Tabela 44)	Quantidade de munição definida; trechos a serem percorridos definidos; distância de cada trecho definida; classes e tipos de transporte definidos
5	Definir as atividades de desmilitarização	Definir quais atividades serão utilizadas durante o processo de desmilitarização	Ordem de serviço/Plano de trabalho; s <sub>1</sub> e s <sub>2</sub>	Mapa do processo de desmilitarização (Figura 46)	Atividades definidas
6	Definir os dados equipamentos	Definir quais equipamentos serão utilizados; definir as características técnicas de funcionamento de cada equipamento (potência, tempo de utilização para cada atividade, produtividade, vazão, etc)	Ordem de serviço/Plano de trabalho; s <sub>1</sub> e s <sub>2</sub>	Ficha técnica do equipamento	Equipamentos definidos; dados técnicos dos equipamentos definidos
Continua...					

Tabela 11 – Apresentação das fases, atividades, entradas, ferramentas auxiliares e saídas da SisProDMun. (Continuação)

Nr	Fase (F)	Atividade	Entrada (e)	Ferramenta (f)	Saída (s)
7	Elaborar o inventário preliminar	Calcular os recursos consumidos e as emissões produzidas em cada uma das atividades definidas na F <sub>5</sub> ; elaborar o inventário preliminar, contendo o resumo dos recursos consumidos e emissões produzidas por atividade	s <sub>1</sub> , s <sub>2</sub> , s <sub>3</sub> , s <sub>4</sub> , s <sub>5</sub> e s <sub>6</sub>	Matriz de atividades, recursos e emissões (Tab. 12); valores de EF/EFF (Tab. 39); fluxograma para cálculo das emissões (Anexo D), as propriedades gerais dos explosivos (Tab. 40), energia e pegada de carbono dos meios de transporte (Tab. 44), mix de energia do país (Tab. 45) e liberação de CO <sub>2</sub> de alguns materiais (Tab. 46)	Inventário preliminar
8	Elaborar o inventário final	Elaborar o inventário final, separando por tipo cada um dos recursos consumidos e emissões produzidas	s <sub>7</sub>	-	Inventário final
9	Calcular os impactos	Calcular os impactos ambientais relacionados aos dados existentes no inventário final	s <sub>8</sub>	Software apropriado para ACV; (ABNT, 2014a) e (ABNT, 2014b)	Impactos calculados
10	Elaborar o relatório final	Elaborar o relatório final contendo o resumo dos dados obtidos, os cálculos realizados e a interpretação dos impactos obtidos, apresentando as conclusões, recomendações e limitações	s <sub>9</sub>	(ABNT, 2014a) e (ABNT, 2014b)	Relatório final

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 45 – Detalhamento da Sistematização do Processo de Desmilitarização de Munição - SisProDMun.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 46 – Mapa do processo de desmilitarização de munição.

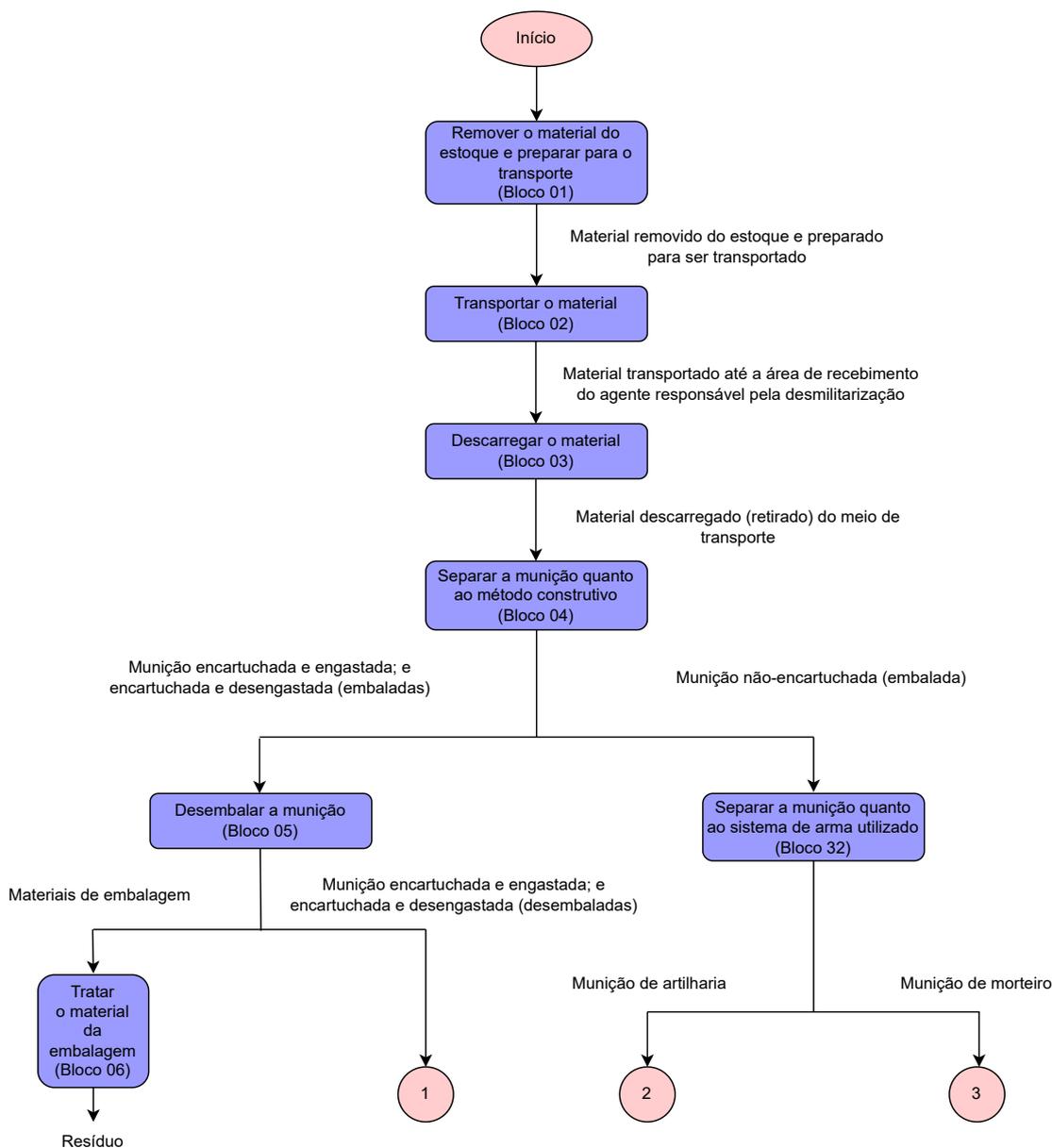


Figura 46 – Mapa do processo de desmilitarização de munição. (continuação)

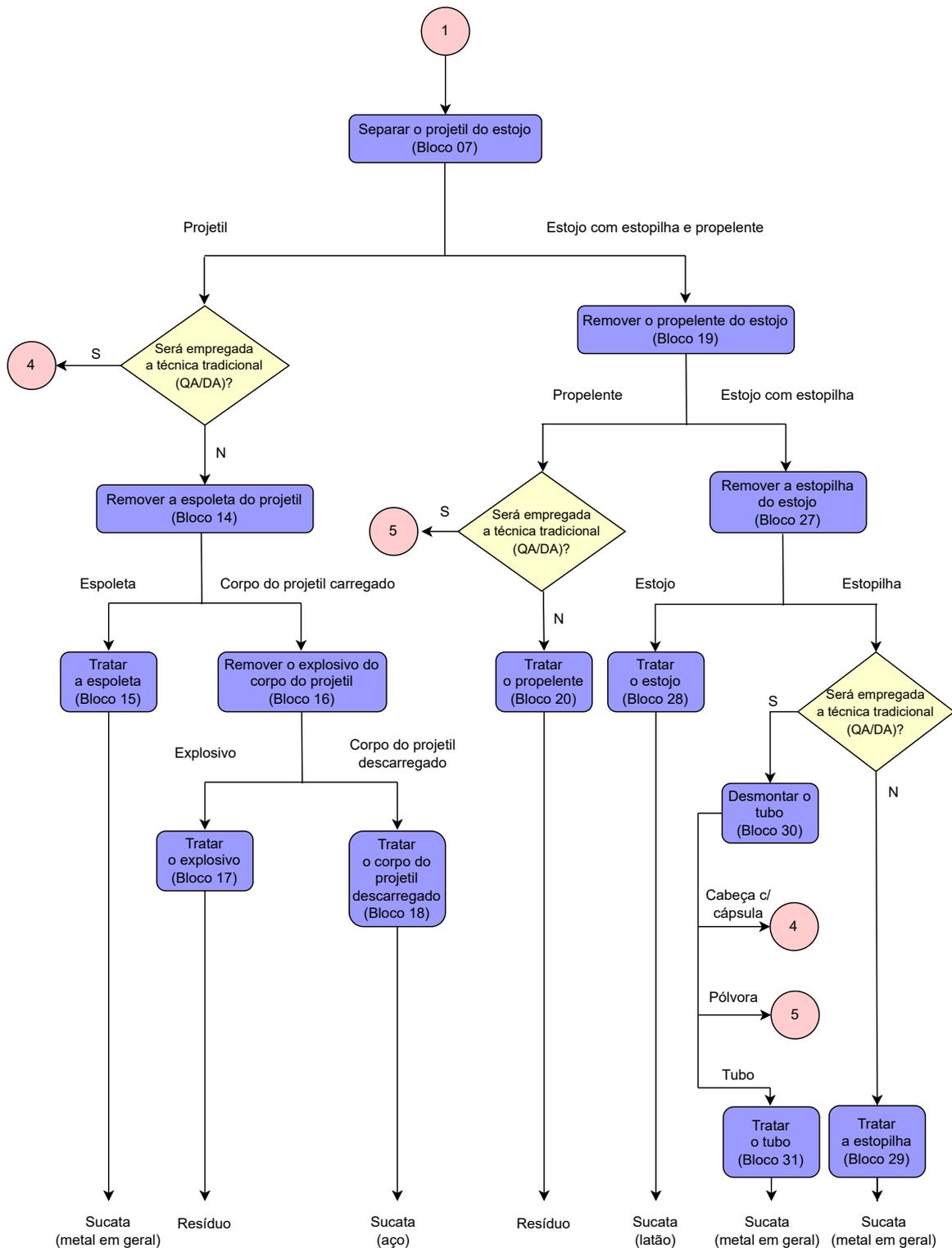


Figura 46 – Mapa do processo de desmilitarização de munição. (continuação)

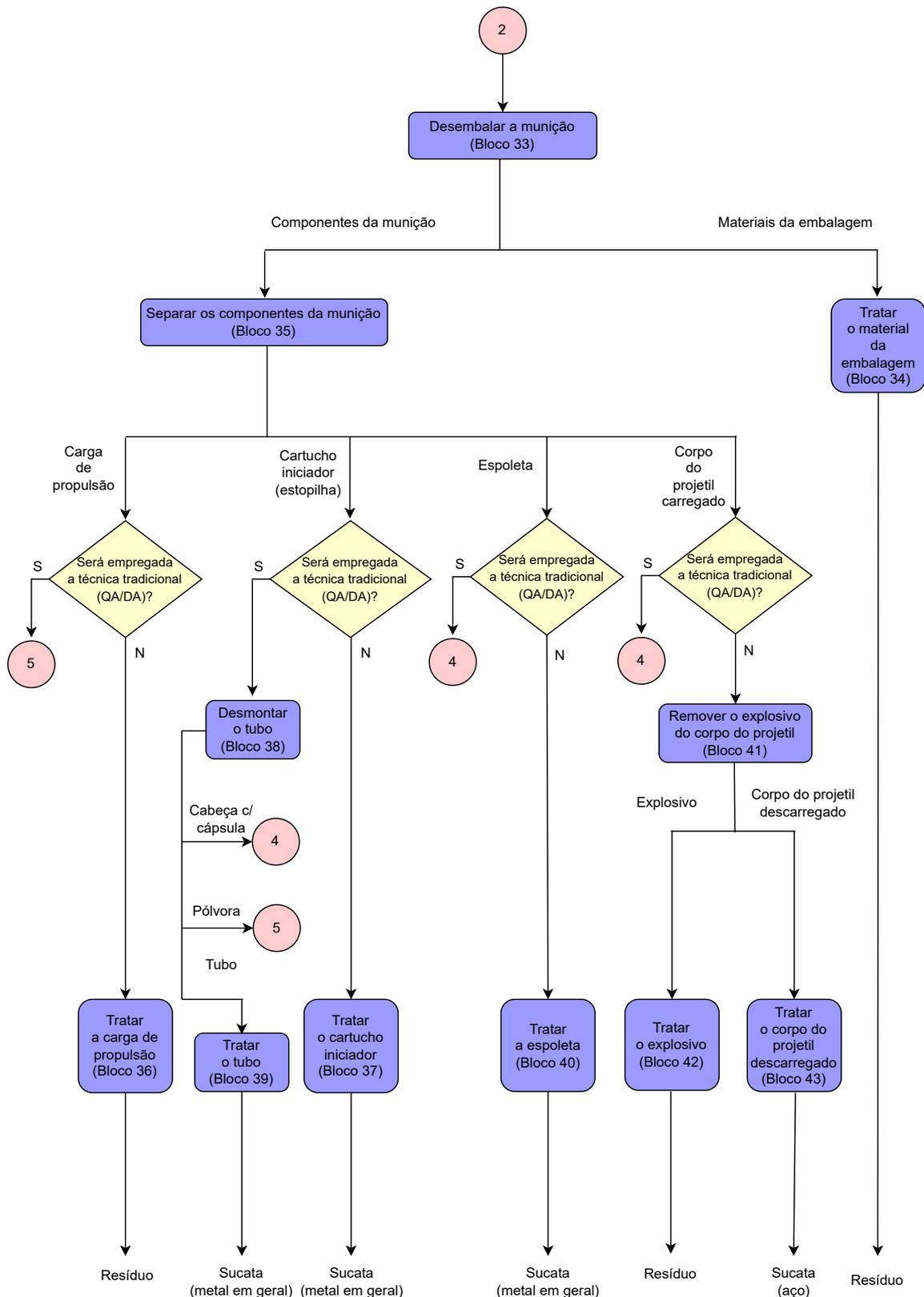


Figura 46 – Mapa do processo de desmilitarização de munição. (continuação)

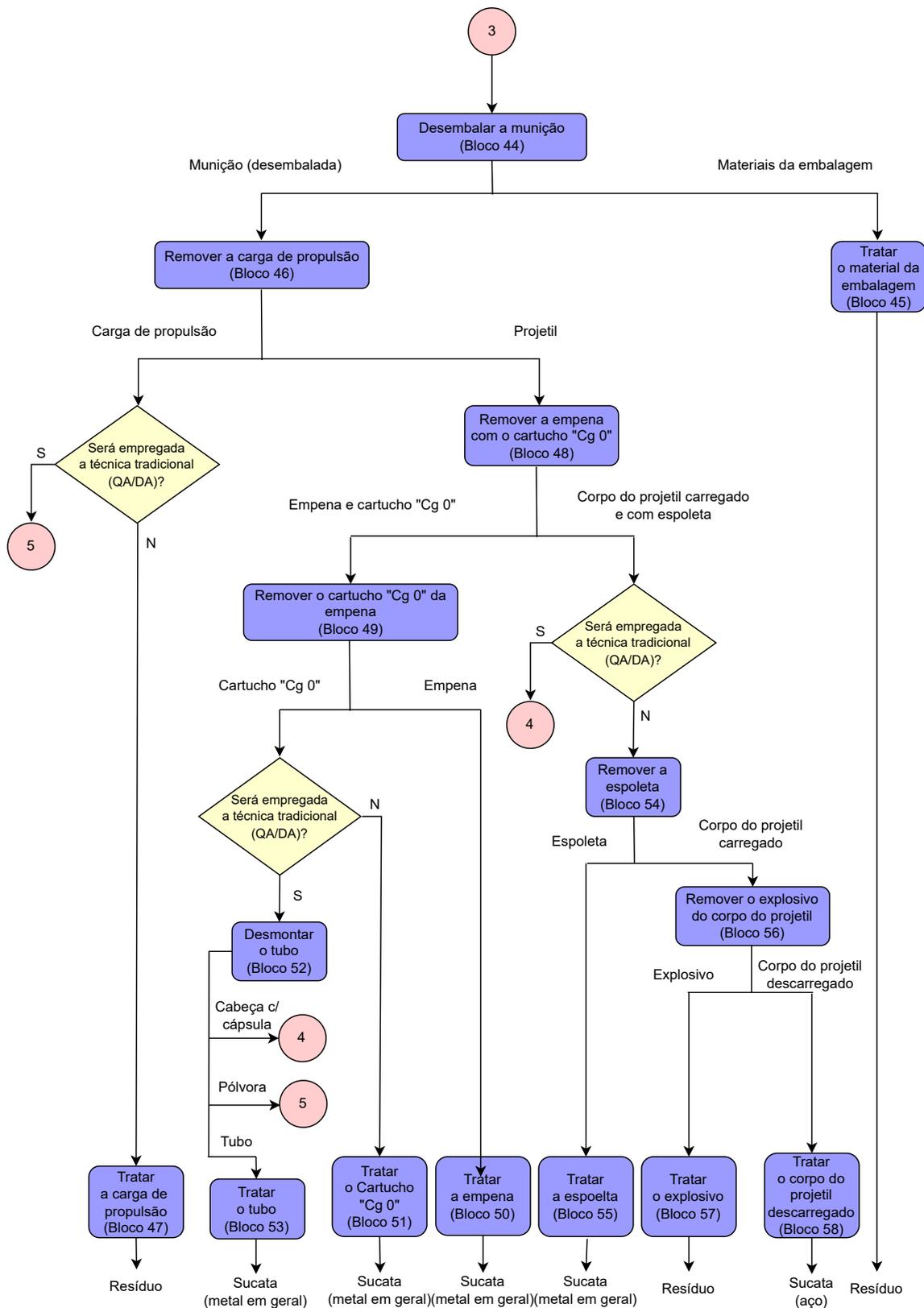


Figura 46 – Mapa do processo de desmilitarização de munição. (continuação)

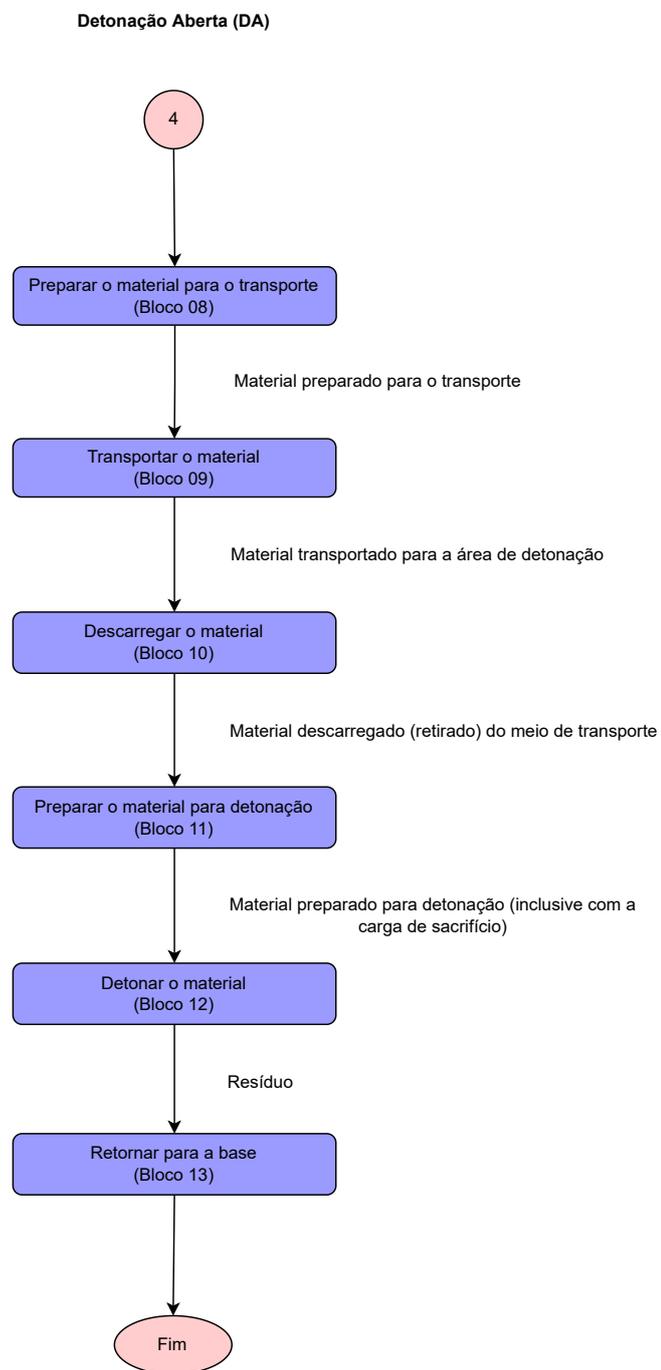
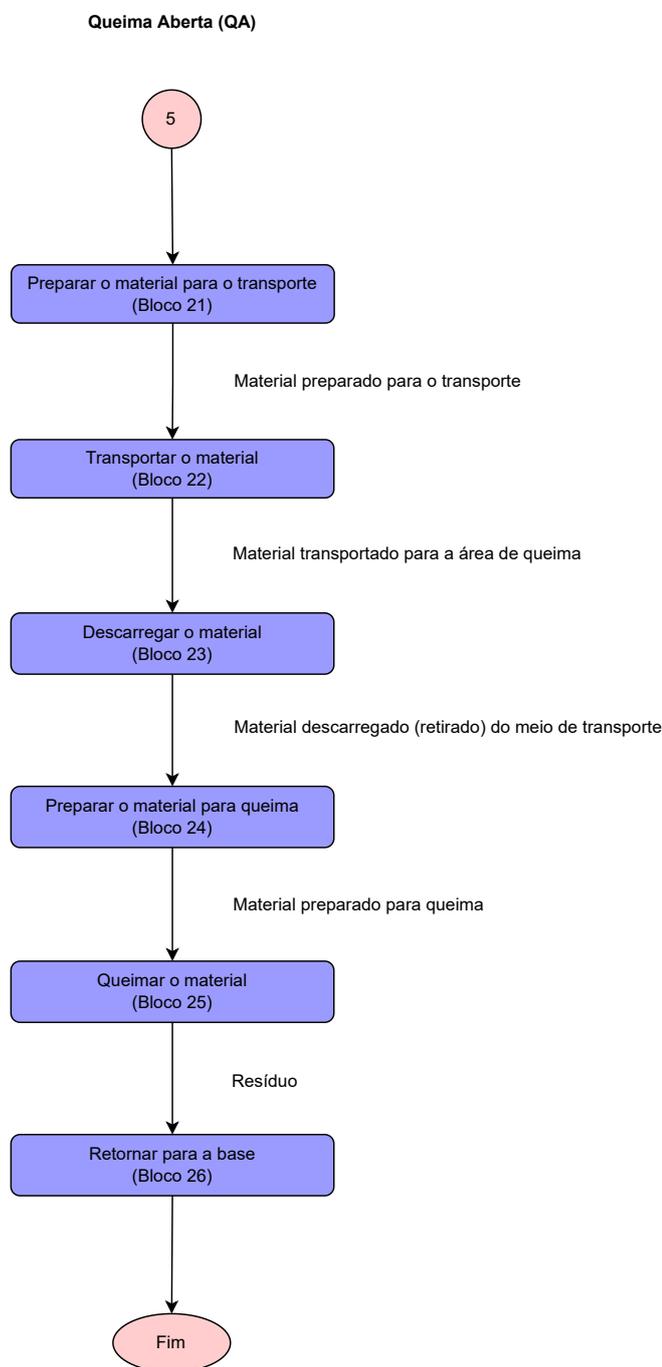


Figura 46 – Mapa do processo de desmilitarização de munição. (continuação)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 – Matriz de atividades, entradas e saídas do processo de desmilitarização de munição.

Nr Bloco	Atividade	Descrição	Entrada (recursos)	Saída (emissões)	OBS
1	Remover o material do estoque e preparar para o transporte	Remover o material do estoque e prepará-lo para ser transportado no tipo de transporte escolhido	Energia <sub>(1)</sub>	-Emissão <sub>(1)</sub> -Material removido do estoque e preparado para ser transportado	-Energia <sub>(1)</sub> = Energia <sub>(transporte)</sub> -Emissão <sub>(1)</sub> = Emissão <sub>(transporte)</sub>
2	Transportar o material	Transportar o material desde a área de estoque até a área de recebimento do agente responsável pela desmilitarização	-Energia <sub>(2)</sub> -Material removido do estoque e preparado para ser transportado	-Emissão <sub>(2)</sub> -Material transportado até a área de recebimento do agente responsável pela desmilitarização	-Energia <sub>(2)</sub> = Energia <sub>(transporte)</sub> -Emissão <sub>(2)</sub> = Emissão <sub>(transporte)</sub>
3	Descarregar o material	Descarregar (retirar) o material do meio de transporte utilizado	-Energia <sub>(3)</sub> -Material transportado até a área de recebimento do agente responsável pela desmilitarização	-Emissão <sub>(3)</sub> -Material descarregado (retirado) do meio de transporte	-Energia <sub>(3)</sub> = Energia <sub>(transporte)</sub> -Emissão <sub>(3)</sub> = Emissão <sub>(transporte)</sub>
4	Separar a munição quanto ao método construtivo	Separar, manualmente, as munições existentes, de acordo com o método construtivo (encartuchada e engastada; encartuchada e desengastada; e não-encartuchada)	Material descarregado (retirado) do meio de transporte	Munição separada quanto ao método construtivo	(1)
5	Desembalar a munição	Retirar a munição de seus respectivos meios de embalagem	Munição encartuchada e engastada; e encartuchada e desengastada (embaladas)	-Materiais de embalagem -Munição encartuchada e engastada; e encartuchada e desengastada (desembaladas)	(1)
Continua...					

Tabela 12 – Matriz de atividades, entradas e saídas do processo de desmilitarização de munição. (Continuação)

Nr Bloco	Atividade	Descrição	Entrada (recursos)	Saída (emissões)	OBS
6	Tratar o material da embalagem	Tratar os meios de embalagem, ou seja, dar uma destinação final (incinerar, reciclar, reutilizar, etc.)	-Energia <sub>(6)</sub> -Materiais de embalagem	-Emissão <sub>(6)</sub> -Resíduo	-Energia <sub>(6)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(6)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub> + Emissão <sub>(queima)</sub>
7	Separar o projétil do estojo	Separar o projétil do estojo. No caso de munições encartuchadas e desengastadas, separar manualmente. No caso de munições encartuchadas e engastadas, utilizar equipamento apropriado	-Energia <sub>(7)</sub> -Munição encartuchada e engastada; e encartuchada e desengastada (desembaladas)	-Emissão <sub>(7)</sub>  -Projétil  -Estojo com estopilha e propelente	-Energia <sub>(7)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub>  -Emissão <sub>(7)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
8	Preparar o material para o transporte	Preparar o material a ser detonado para o transporte	-Energia <sub>(8)</sub> -Projétil	-Emissão <sub>(8)</sub> -Material preparado para o transporte	-Energia <sub>(8)</sub> = Energia <sub>(transporte)</sub> -Emissão <sub>(8)</sub> = Emissão <sub>(transporte)</sub>
9	Transportar o material	Transportar o material até a área de detonação	-Energia <sub>(9)</sub> -Material preparado para o transporte	-Emissão <sub>(9)</sub> -Material transportado para a área de detonação	-Energia <sub>(9)</sub> = Energia <sub>(transporte)</sub> -Emissão <sub>(9)</sub> = Emissão <sub>(transporte)</sub>
10	Descarregar o material	Descarregar (retirar) o material dos meios de transportes utilizados	-Energia <sub>(10)</sub> -Material transportado para a área de detonação	-Emissão <sub>(10)</sub> -Material descarregado (retirado) do meio de transporte	-Energia <sub>(10)</sub> = Energia <sub>(transporte)</sub> -Emissão <sub>(10)</sub> = Emissão <sub>(transporte)</sub>
11	Preparar o material para detonação	Preparar o terreno e o material a ser destruído, inclusive com a adição da carga de sacrifício para início da detonação	-Energia <sub>(11)</sub> -Material descarregado (retirado) do meio de transporte	-Emissão <sub>(11)</sub> -Material preparado para detonação (inclusive com a carga de sacrifício)	-Energia <sub>(11)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(11)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
Continua...					

Tabela 12 – Matriz de atividades, entradas e saídas do processo de desmilitarização de munição. (Continuação)

Nr Bloco	Atividade	Descrição	Entrada (recursos)	Saída (emissões)	OBS
12	Detonar o material	Detonar em local aberto o material a ser destruído	Material preparado para detonação (inclusive com a carga de sacrifício)	-Emissão <sub>(12)</sub>  -Resíduo	-(1)  -Emissão <sub>(12)</sub> : vide Anexos C e D
13	Retornar para a base	Retornar com os materiais de apoio e com a equipe técnica para a base (empresa)	-Energia <sub>(13)</sub>	-Emissão <sub>(13)</sub>	-Energia <sub>(13)</sub> = Energia <sub>(transporte)</sub> -Emissão <sub>(13)</sub> = Emissão <sub>(transporte)</sub>
14	Remover a espoleta do projétil	Remover a espoleta do corpo do projétil	-Energia <sub>(14)</sub> -Projétil	-Emissão <sub>(14)</sub> -Espoleta -Corpo do projétil carregado	-Energia <sub>(14)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(14)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
15	Tratar a espoleta	Submeter o componente a um tipo de tratamento capaz de destruir os materiais energéticos, transformando o componente num produto inerte	-Energia <sub>(15)</sub>  -Espoleta	-Emissão <sub>(15)</sub>  -Sucata (metal em geral)	-Energia <sub>(15)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub>  -Emissão <sub>(15)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
16	Remover o explosivo do corpo do projétil	Remover o material explosivo do interior do corpo do projétil	-Energia <sub>(16)</sub>  -Água <sub>(16)</sub>  -Corpo do projétil carregado	-Emissão <sub>(16)</sub>  -Explosivo  -Corpo do projétil descarregado	-Energia <sub>(16)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub>  -Emissão <sub>(16)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
Continua...					

Tabela 12 – Matriz de atividades, entradas e saídas do processo de desmilitarização de munição. (Continuação)

Nr Bloco	Atividade	Descrição	Entrada (recursos)	Saída (emissões)	OBS
17	Tratar o explosivo	Tratar o material explosivo, ou seja, submeter o material a um tipo de procedimento capaz de destruí-lo	-Energia <sub>(17)</sub> -Explosivo	-Emissão <sub>(17)</sub> -Resíduo	-Energia <sub>(17)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(17)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
18	Tratar o corpo do projétil descarregado	Tratar o material do corpo do projétil, ou seja, destruir quaisquer resquícios de material energético, tornando-o um material inerte	-Energia <sub>(18)</sub> -Corpo do projétil descarregado	-Emissão <sub>(18)</sub> -Sucata (aço)	-Energia <sub>(18)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(18)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
19	Remover o propelente do estojo	Retirar, manualmente, a carga propelente do interior do estojo	-Estojo com estopilha e propelente	-Propelente -Estojo com estopilha	(1)
20	Tratar o propelente	Tratar o material propelente, ou seja, submeter o material a um tipo de procedimento capaz de destruí-lo	-Energia <sub>(20)</sub> -Propelente	-Emissão <sub>(20)</sub> -Resíduo	-Energia <sub>(20)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(20)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
21	Preparar o material para o transporte	Preparar o material que será queimado para o transporte	-Energia <sub>(21)</sub> -Propelente	-Emissão <sub>(21)</sub> -Material preparado para o transporte	-Energia <sub>(21)</sub> = Energia <sub>(transporte)</sub> -Emissão <sub>(21)</sub> = Emissão <sub>(transporte)</sub>
22	Transportar o material	Transportar o material até a área de queima	-Energia <sub>(22)</sub> -Material preparado para o transporte	-Emissão <sub>(22)</sub> -Material transportado até a área de queima	-Energia <sub>(22)</sub> = Energia <sub>(transporte)</sub> -Emissão <sub>(22)</sub> = Emissão <sub>(transporte)</sub>
Continua...					

Tabela 12 – Matriz de atividades, entradas e saídas do processo de desmilitarização de munição. (Continuação)

Nr Bloco	Atividade	Descrição	Entrada (recursos)	Saída (emissões)	OBS
23	Descarregar o material	Descarregar o material dos meios de transporte utilizados	-Energia <sub>(23)</sub> -Material transportado até a área de queima	-Emissão <sub>(23)</sub> -Material descarregado (retirado) do meio de transporte	-Energia <sub>(23)</sub> = Energia <sub>(transporte)</sub> -Emissão <sub>(23)</sub> = Emissão <sub>(transporte)</sub>
24	Preparar o material para a queima	Preparar o terreno e o material a ser destruído	-Material descarregado (retirado) do meio de transporte	-Material preparado para a queima	(1)
25	Queimar o material	Queimar, em local aberto, o material a ser destruído	-Material preparado para a queima	-Emissão <sub>(25)</sub> -Resíduo	-(1) -Emissão <sub>(25)</sub> : vide Anexos C e D
26	Retornar para a base	Retornar com os materiais de apoio e com a equipe técnica para a base (empresa)	-Energia <sub>(26)</sub>	-Emissão <sub>(26)</sub>	-Energia <sub>(26)</sub> = Energia <sub>(transporte)</sub> -Emissão <sub>(26)</sub> = Emissão <sub>(transporte)</sub>
27	Remover a estopilha do estojo	Remover a estopilha do estojo	-Energia <sub>(27)</sub> -Estojo com estopilha	-Emissão <sub>(27)</sub> -Estojo -Estopilha	-Energia <sub>(27)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(27)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
28	Tratar o estojo	Tratar o estojo, ou seja, destruir quaisquer resquícios de material energético, tornando-o um material inerte	-Energia <sub>(28)</sub> -Estojo	-Emissão <sub>(28)</sub> -Sucata (latão)	-Energia <sub>(28)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(28)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>

Continua...

Tabela 12 – Matriz de atividades, entradas e saídas do processo de desmilitarização de munição. (Continuação)

Nr Bloco	Atividade	Descrição	Entrada (recursos)	Saída (emissões)	OBS
29	Tratar a estopilha	Tratar a estopilha, ou seja, destruir quaisquer resquícios de material energético, tornando-a um material inerte	-Energia <sub>(29)</sub> -Estopilha	-Emissão <sub>(29)</sub> -Sucata (metal em geral)	-Energia <sub>(29)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(29)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
30	Desmontar o tubo	Desmontar o tubo (flauta) do corpo principal (cabeça) da estopilha	-Energia <sub>(30)</sub> -Estopilha	-Emissão <sub>(30)</sub> -Cabeça (corpo) com cápsula -Pólvora -Tubo (flauta)	-Energia <sub>(30)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(30)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
31	Tratar o tubo da estopilha	Tratar o material do tubo (flauta), ou seja, destruir quaisquer resquícios de material energético, tornando-o um material inerte	-Energia <sub>(31)</sub> -Tubo (flauta)	-Emissão <sub>(31)</sub> -Sucata (metal em geral)	-Energia <sub>(31)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(31)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
32	Separar a munição quanto ao sistema de arma utilizado	Separar a munição quanto ao sistema de arma utilizado, ou seja, separar as munições de artilharia das munições de morteiro	-Munição não-encartuchada (embalada)	-Munição de artilharia  -Munição de morteiro	(1)
33	Desembalar a munição	Retirar a munição de seus respectivos meios de embalagem	Munição de artilharia	-Materiais da embalagem -Componentes da munição	(1)
Continua...					

Tabela 12 – Matriz de atividades, entradas e saídas do processo de desmilitarização de munição. (Continuação)

Nr Bloco	Atividade	Descrição	Entrada (recursos)	Saída (emissões)	OBS
34	Tratar o material da embalagem	Tratar os meios de embalagem, ou seja, dar uma destinação final (incinerar, reciclar, reutilizar, etc.)	-Energia <sub>(34)</sub> -Materiais de embalagem	-Emissão <sub>(34)</sub> -Resíduo	-Energia <sub>(34)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(34)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub> + Emissão <sub>(queima)</sub>
35	Separar os componentes da munição	Separar os componentes (itens) da munição	-Componentes da munição	-Carga de propulsão -Cartucho iniciador (estopilha) -Espoleta -Corpo do projétil carregado	(1)
36	Tratar a carga de propulsão	Tratar a carga de propulsão, ou seja, submeter o material a um tipo de procedimento capaz de destruí-lo	-Energia <sub>(36)</sub> -Carga de propulsão	-Emissão <sub>(36)</sub> -Resíduo	-Energia <sub>(36)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(36)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
37	Tratar o cartucho iniciador	Tratar o cartucho iniciador (estopilha), ou seja, destruir quaisquer resquícios de material energético, tornando-a um material inerte	-Energia <sub>(37)</sub> -Cartucho iniciador (estopilha)	-Emissão <sub>(37)</sub> -Sucata (metal em geral)	-Energia <sub>(37)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(37)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
38	Desmontar o tubo	Desmontar o tubo (flauta) do corpo principal (cabeça) do cartucho iniciador (estopilha)	-Energia <sub>(38)</sub> -Cartucho iniciador (estopilha)	-Emissão <sub>(38)</sub> -Cabeça (corpo) com cápsula -Pólvora -Tubo (flauta)	-Energia <sub>(38)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(38)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
Continua...					

Tabela 12 – Matriz de atividades, entradas e saídas do processo de desmilitarização de munição. (Continuação)

Nr Bloco	Atividade	Descrição	Entrada (recursos)	Saída (emissões)	OBS
39	Tratar o tubo do cartucho iniciador	Tratar o material do tubo (flauta), ou seja, destruir quaisquer resquícios de material energético, tornando-o um material inerte	-Energia <sub>(39)</sub> -Tubo (flauta)	-Emissão <sub>(39)</sub> -Sucata (metal em geral)	-Energia <sub>(39)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(39)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
40	Tratar a espoleta	Submeter o componente a um tipo de tratamento capaz de destruir os materiais energéticos, transformando o componente num produto inerte	-Energia <sub>(40)</sub> -Espoleta	-Emissão <sub>(40)</sub> -Sucata (metal em geral)	-Energia <sub>(40)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(40)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
41	Remover o explosivo do corpo do projétil	Remover o material explosivo do interior do corpo do projétil	-Energia <sub>(41)</sub> -Água <sub>(41)</sub> -Corpo do projétil carregado	-Emissão <sub>(41)</sub> -Explosivo -Corpo do projétil descarregado	-Energia <sub>(41)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(41)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
42	Tratar o explosivo	Tratar o material explosivo, ou seja, submeter o material a um tipo de procedimento capaz de destruí-lo	-Energia <sub>(42)</sub> -Explosivo	-Emissão <sub>(42)</sub> -Resíduo	-Energia <sub>(42)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(42)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
43	Tratar o corpo do projétil descarregado	Tratar o material do corpo do projétil, ou seja, destruir quaisquer resquícios de material energético, tornando-o um material inerte	-Energia <sub>(43)</sub> -Corpo do projétil descarregado	-Emissão <sub>(43)</sub> -Sucata (aço)	-Energia <sub>(43)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(43)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
Continua...					

Tabela 12 – Matriz de atividades, entradas e saídas do processo de desmilitarização de munição. (Continuação)

Nr Bloco	Atividade	Descrição	Entrada (recursos)	Saída (emissões)	OBS
44	Desembalar a munição	Retirar a munição de seus respectivos meios de embalagem	Munição de morteiro	-Materiais da embalagem -Munição desembalada	(1)
45	Tratar o material da embalagem	Tratar os meios de embalagem, ou seja, dar uma destinação final (incinerar, reciclar, reutilizar, etc.)	-Energia <sub>(45)</sub> -Materiais da embalagem	-Emissão <sub>(45)</sub> -Resíduo	-Energia <sub>(45)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(45)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub> + Emissão <sub>(queima)</sub>
46	Remover a carga de propulsão	Remover, manualmente, a carga de propulsão (incrementos) da munição	-Munição desembalada	-Carga de propulsão -Projétil	(1)
47	Tratar a carga de propulsão	Tratar a carga de propulsão, ou seja, submeter o material a um tipo de procedimento capaz de destruí-lo	-Energia <sub>(47)</sub> -Carga de propulsão	-Emissão <sub>(47)</sub> -Resíduo	-Energia <sub>(47)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(47)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
48	Remover a empena com o cartucho Cg 0	Remover a empena, juntamente com o cartucho Cg 0, do corpo do projétil	-Energia <sub>(48)</sub> -Projétil	-Emissão <sub>(48)</sub> -Empena e cartucho Cg 0 -Corpo do projétil carregado e com espoleta	-Energia <sub>(48)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(48)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
49	Remover o cartucho Cg 0 da empena	Remover o cartucho Cg 0 do corpo da empena	-Energia <sub>(49)</sub> -Empena e cartucho Cg 0	-Emissão <sub>(49)</sub> -Cartucho Cg 0 -Empena	-Energia <sub>(49)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(49)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
Continua...					

Tabela 12 – Matriz de atividades, entradas e saídas do processo de desmilitarização de munição. (Continuação)

Nr Bloco	Atividade	Descrição	Entrada (recursos)	Saída (emissões)	OBS
50	Tratar a empena	Tratar o material da empena para descaracterizá-lo	-Energia <sub>(50)</sub> -Empena	-Emissão <sub>(50)</sub> -Sucata (metal em geral)	-Energia <sub>(50)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(50)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
51	Tratar o cartucho <i>Cg 0</i>	Tratar o cartucho <i>Cg 0</i> , ou seja, destruir quaisquer resquícios de material energético, tornando-o um material inerte	-Energia <sub>(51)</sub> -Cartucho <i>Cg 0</i>	-Emissão <sub>(51)</sub> -Sucata (metal em geral)	-Energia <sub>(51)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(51)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
52	Desmontar o tubo	Desmontar o tubo (flauta) do corpo principal (cabeça) do cartucho <i>Cg 0</i>	-Energia <sub>(52)</sub> -Cartucho <i>Cg 0</i>	-Emissão <sub>(52)</sub> -Cabeça (corpo) com cápsula -Pólvora -Tubo (flauta)	-Energia <sub>(52)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(52)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
53	Tratar o tubo	Tratar o material do tubo (flauta), ou seja, destruir quaisquer resquícios de material energético, tornando-o um material inerte	-Energia <sub>(53)</sub> -Tubo (flauta)	-Emissão <sub>(53)</sub> -Sucata (metal em geral)	-Energia <sub>(53)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(53)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
54	Remover a espoleta do projétil	Remover a espoleta do corpo do projétil carregado	-Energia <sub>(54)</sub> -Corpo do projétil carregado e com espoleta	-Emissão <sub>(54)</sub> -Espoleta -Corpo do projétil carregado	-Energia <sub>(54)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(54)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
Continua...					

Tabela 12 – Matriz de atividades, entradas e saídas do processo de desmilitarização de munição. (Continuação)

Nr Bloco	Atividade	Descrição	Entrada (recursos)	Saída (emissões)	OBS
55	Tratar a espoleta	Submeter o componente a um tipo de tratamento capaz de destruir os materiais energéticos, transformando o componente num produto inerte	-Energia <sub>(55)</sub> -Espoleta	-Emissão <sub>(55)</sub> -Sucata (metal em geral)	-Energia <sub>(55)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(55)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
56	Remover o explosivo do corpo do projétil	Remover o material explosivo do interior do corpo do projétil	-Energia <sub>(56)</sub> -Água <sub>(56)</sub> -Corpo do projétil carregado	-Emissão <sub>(56)</sub> -Explosivo -Corpo do projétil descarregado	-Energia <sub>(56)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(56)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
57	Tratar o explosivo	Tratar o material explosivo, ou seja, submeter o material a um tipo de procedimento capaz de destruí-lo	-Energia <sub>(57)</sub> -Explosivo	-Emissão <sub>(57)</sub> -Resíduo	-Energia <sub>(57)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(57)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>
58	Tratar o corpo do projétil descarregado	Tratar o material do corpo do projétil, ou seja, destruir quaisquer resquícios de material energético, tornando-o um material inerte	-Energia <sub>(58)</sub> -Corpo do projétil descarregado	-Emissão <sub>(58)</sub> -Sucata (aço)	-Energia <sub>(58)</sub> = Energia <sub>(equip.)</sub> -Emissão <sub>(58)</sub> = Emissão <sub>(equip.)</sub>

(1) Atividade manual: Energia<sub>(i)</sub> = Emissão<sub>(i)</sub> = 0;

Energia<sub>(i)</sub>: energia utilizada para realizar a atividade do bloco "i", em [MJ];

Emissão<sub>(i)</sub>: emissão produzida pelo uso da Energia<sub>(i)</sub>, em [kg CO<sub>2</sub>];

Energia<sub>(transporte)</sub>: energia relacionada ao transporte do material, em [MJ];

Energia<sub>(tipo-transporte)</sub>: energia relacionada ao tipo de transporte utilizado para transportar uma determinada quantidade de material numa determinada distância, em [MJ/t.km]. Vide

Tabela 44;

Energia<sub>(equip.)</sub>: energia utilizada pelo equipamento, em [MJ];

Pot<sub>(equip.)</sub>: potência do equipamento, em [kW];

Tempo<sub>(utiliz.)</sub>: tempo de utilização do equipamento, em [h];

Qtd<sub>(mat)</sub>: quantidade de material transportado, em [t];

Distância<sub>(trecho)</sub>: distância percorrida num determinado trecho do percurso, em [km];

Emissão<sub>(transporte)</sub>: emissão relacionada ao transporte do material, em [kg CO<sub>2</sub>-eq];

Emissão<sub>(equip.)</sub>: emissão relacionada ao uso do equipamento, em [kg CO<sub>2</sub>];

Emissão<sub>(queima)</sub>: emissão relacionada à queima do material, em [kg CO<sub>2</sub>];

Água<sub>(i)</sub>: quantidade de água utilizada para realizar a atividade do bloco "i", em [l];

Água<sub>(equip.)</sub>: quantidade de água utilizada pelo equipamento, em [l];

Vazão<sub>(equip.)</sub>: vazão de água do equipamento, em [l/h]

Pegada-Carbono: valores em [kgCO<sub>2</sub>eq/t.km]. Vide Tabela 44;

Energia<sub>(transporte)</sub> = Energia<sub>(tipo-transporte)</sub> . Qtd<sub>(mat)</sub> . Distância<sub>(trecho)</sub>;

Emissão<sub>(transporte)</sub> = Qtd<sub>(mat)</sub> . Distância<sub>(trecho)</sub> . "Pegada-Carbono";

Energia<sub>(equip.)</sub> = Pot<sub>(equip.)</sub> . Tempo<sub>(utiliz.)</sub> . 3,6;

Emissão<sub>(equip.)</sub> = Pot<sub>(equip.)</sub> . Tempo<sub>(utiliz.)</sub> . Valor<sub>kgCO<sub>2</sub>/kWh</sub>. Vide Tabela 45 para obtenção do Valor<sub>kgCO<sub>2</sub>/kWh</sub>;

Emissão<sub>(queima)</sub> = Qtd<sub>(mat)</sub> . (CO<sub>2</sub> de combustão). Vide Tabela 46 para valores de (CO<sub>2</sub> de combustão);

Água<sub>(equip.)</sub> = Vazão<sub>(equip.)</sub> . Tempo<sub>(utiliz.)</sub>

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4 ESTUDO DE CASO

Tendo sido elaborada a SisProDMun, será realizado um estudo de caso com a munição 105 mm AE M1, apresentada anteriormente na Seção 2.1.2, para aplicação da sistemática desenvolvida, oportunidade em que serão analisados cenários hipotéticos distintos, baseados em processos de desmilitarização diferentes, com o intuito de obter o inventário dos respectivos processos de desmilitarização para, posteriormente, realizar a avaliação do ciclo de vida relacionada à fase de descarte do material, de maneira a verificar qual processo é ambientalmente mais responsável.

Os cenários, hipoteticamente baseados em uma Ordem de Serviço/Plano de Trabalho, encontram-se definidos na Tabela 13.

Tabela 13 – Definição dos cenários hipotéticos.

Cenário Nr	Descrição geral	Transporte		OBS
		Tipo	Distância (km)	
1	A munição a ser desmilitarizada encontra-se armazenada no 7º Depósito de Suprimento (7º DSup), localizado em Recife. Serão utilizadas as técnicas tradicionais de desmilitarização conhecidas como QA e DA e, também, técnicas de desmontagem manual. Os materiais inertes metálicos resultantes da desmilitarização serão descontaminados por lavagem com água. As atividades de queima e detonação das munições serão realizadas nas áreas do Campo de Instrução Marechal Newton Cavalcanti (CIMNC). O transporte do material será realizado por caminhões de 14 toneladas (diesel) e ocorrerá por rodovias. Haverá apoio de equipe médica. Tipo de munição: 105 mm AE M1. Qtd: 1.000 unidades.	Caminhão 14 toneladas (diesel); Veículo SUV (ambulância, gasolina)	45,9 (trecho); 91,8 (total)	Vide Fig. 47
2	A munição a ser desmilitarizada encontra-se armazenada no 7º Depósito de Suprimento (7º DSup), localizado em Recife. O material será transportado para a fábrica da IMBEL, unidade de produção de Juiz de Fora-MG. O transporte abrangerá duas classes: rodoviário e marítimo. O transporte por rodovias ocorrerá em caminhões de 14 toneladas (diesel). O transporte marítimo ocorrerá em navio para navegação costeira (diesel). Durante a desmilitarização, serão utilizadas técnicas alternativas para desmontagem da munição, com desmontagem manual e mecânica, remoção do material explosivo do interior do corpo do projétil (corte por serra) e destruição do material energético (destruição em forno incinerador estático, com tratamento de gás). Tipo de munição: 105 mm AE M1. Qtd: 1.000 unidades.	Caminhão 14 toneladas (diesel)	199,6 (total)	Vide Fig. 48-a e 48-c)
		Navio de navegação costeira	2060,8	Vide Fig. 48-b)

Para calcular os impactos provocados, serão utilizados, em ambos os cenários hipotéticos, 3 (três) métodos complementares de avaliação, CML, USETox e TRACI, e as categorias de impacto apresentadas na Tabela 14.

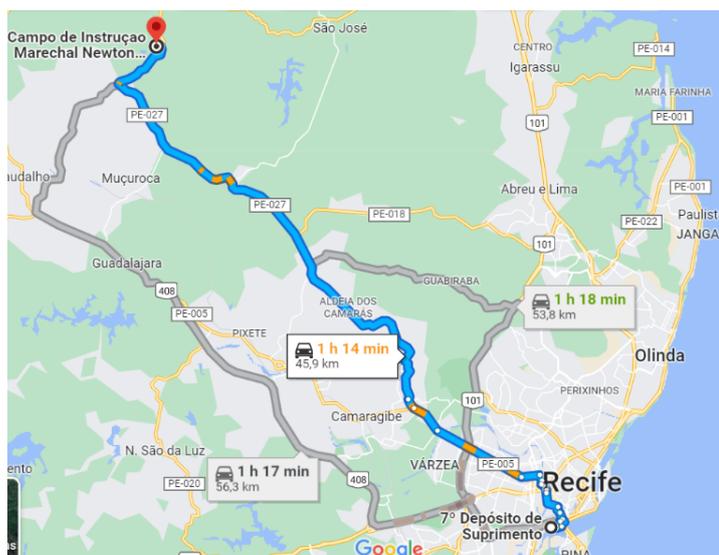
Tabela 14 – Métodos e categorias de impacto utilizados.

<b>Método</b>	<b>Categoria de impacto</b>	<b>Descrição</b>
CML	Potencial de acidificação	Redução do PH devido aos efeitos acidificantes das emissões antrópicas
	Mudança climática (GWP100)	Alteração da temperatura global causada pelos gases do efeito estufa
	Depleção de recursos abióticos (comb. fósseis)	Diminuição da disponibilidade de recursos abióticos como resultado de seu uso insustentável
	Eutrofização	Acumulação excessiva de nutrientes em sistemas aquáticos
	Toxicidade da água	Efeitos tóxicos de substâncias químicas no ecossistema (qualidade da água)
	Toxicidade marinha	Efeitos tóxicos de substâncias químicas no ecossistema (extinção de espécies marinhas)
	Oxidação fotoquímica	Poluição atmosférica causada devido aos efeitos da luz solar, calor, <i>Compostos Orgânicos Voláteis Não-Metano (NMVOC)</i> e <i>Óxidos Nitrosos (NOx)</i>
	Toxicidade terrestre	Efeitos tóxicos de substâncias químicas no ecossistema (extinção de espécies terrestres)
USETox	Toxicidade humana (cancerígena)	Efeitos tóxicos (cancerígenos) nos humanos
	Toxicidade humana (não cancerígena)	Efeitos tóxicos (não cancerígenos) nos humanos
TRACI	Efeitos respiratórios	Efeitos respiratórios causados por materiais particulados no ar

Fonte: Extraído de GreenDelta (2022).

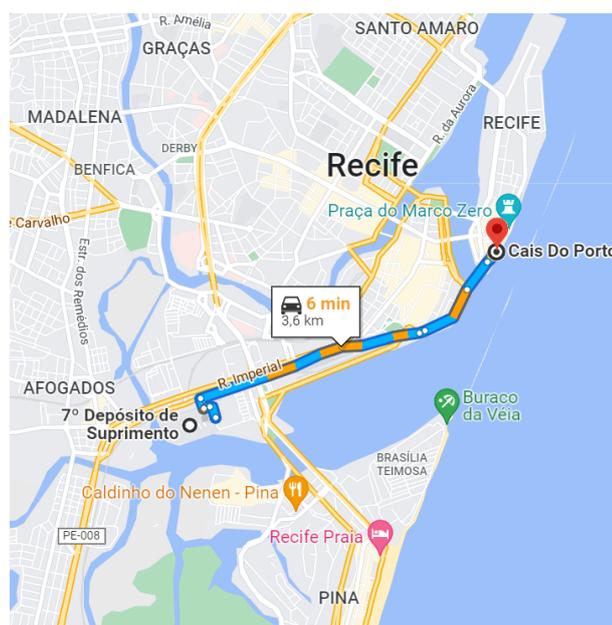
A Unidade Funcional adotada, em ambos os cenários, é "1.000 (um mil) unidades da munição 105 mm AE M1".

Figura 47 – Trajeto para desmilitarização de munição - hipótese nº 01.



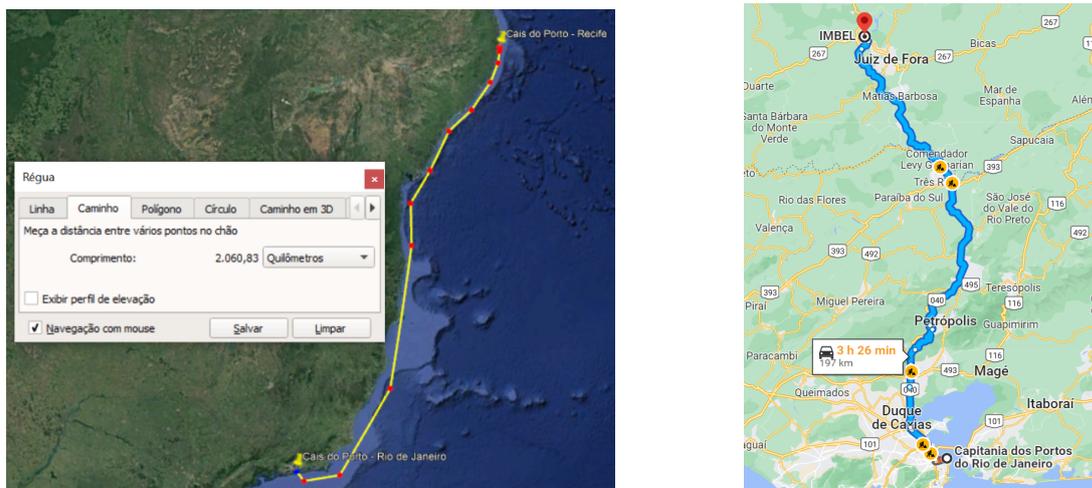
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 48 – Trajeto para desmilitarização de munição - hipótese nº 02.



a) Trecho rodoviário nº 01

Figura 48 – Trajeto para desmilitarização de munição - hipótese nº 02. (continuação)



b) Trecho marítimo

c) Trecho rodoviário nº 02

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.1 CENÁRIO HIPOTÉTICO Nº 01

De maneira a desenvolver a análise para o cenário hipotético nº 01, foi utilizada a SisProDMun, cuja estrutura geral encontra-se ilustrada na Figura 44. Para tal, foram desdobradas as fases da Tabela 11, considerando o modelo de ciclo de vida ilustrado na Figura 43 e apresentando a síntese dos resultados obtidos no estudo.

##### Fase nº 01

Munição a ser desmilitarizada: 105 mm AE M1.

##### Fase nº 02

Técnicas de desmilitarização a serem utilizadas: desmontagem manual, QA e DA.

##### Fase nº 03

Tabela 15 – Dados técnicos da munição 105 mm AE M1 fabricada pela IMBEL<sup>a</sup>.

Componente	Material	Qtd (kg)	Resumo	
			Material	Qtd (kg)
Projétil (com espoleta)	Aço	11,748	Aço	11,748
	Alumínio	0,247	Alumínio	0,247005
	Latão	0,265	Latão	3,107
	TNT	2,100	TNT	2,100
	RDX	0,023	RDX	0,023
	Composição A4	0,00026	Composição A4	0,00026
	Azida de chumbo	0,00039	Azida de chumbo	0,00039
Continua...				

Tabela 15 – Dados técnicos da munição 105 mm AE M1 fabricada pela IMBEL. (Continuação)

Componente	Material	Qtd (kg)	Resumo	
			Material	Qtd (kg)
	Tinta	0,044	Tinta	0,044
Estojo	Latão	2,7000	Pólvora de base simples	1,213
Carga de projeção	Pólvora de base simples	1,213	Estifinato de chumbo	0,000024
Estopilha <sup>b</sup>	Latão	0,142	Tetraceno	0,000003
	Estifinato de chumbo	0,000024	Nitrato de bário	0,000021
	Tetraceno	0,000003	Sulfeto de antimônio	0,000010
	Nitrato de bário	0,000021	PETN	0,000003
	Sulfeto de antimônio	0,000010	Pólvora negra	0,0175
	PETN	0,000003		
	Alumínio	0,000005		
	Pólvora negra	0,0175	<b>Peso total</b>	<b>18,5</b>
<b>Embalagem</b>				
Cunhete de madeira: 11,0 kg				
Porta tiro de papelão: 2,1 kg				
Componentes em geral (dobradiças, fecho,...) fabricados em aço: 0,3 kg				
Peso total do cunhete com 2 porta tiros e com 2 munições: 52,5 kg				
Volume: 0,056 m <sup>3</sup>				

<sup>a</sup> Informações gerais existentes em IMBEL (2021a) e IMBEL (2022). Foram considerados os itens de maior relevância e representatividade.

<sup>b</sup> Foi utilizada a composição química da mistura de iniciação FA956. Fonte: DoA (1984).

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### Fase nº 04

Quantidade total de munição a ser desmilitarizada: 1.000 (um mil) unidades.

A distância do trajeto a ser percorrido pode ser obtida na Figura 47, que é de 45,9 km a ida e 45,9 km o retorno, utilizando-se o caminhão de 14 toneladas (diesel) para transporte de material e veículo SUV (gasolina), como viatura ambulância.

#### Fase nº 05

Consultando o mapa do processo de desmilitarização de munição, apresentado na Figura 46, verifica-se a necessidade de realização dos seguintes blocos de atividades:

- 01 - 02 - 03 - 04 - 05 - 06
- 07 - 08 - 09 - 10 - 11 - 12 - 13
- 19 - 21 - 22 - 23 - 24 - 25 - 26
- 27 - 28
- 30 - 31

**Fase nº 06**

As técnicas de desmilitarização selecionadas (desmontagem manual, QA e DA) utilizam apenas ferramentas e equipamentos manuais, que não consomem energia elétrica e nem produzem emissões.

**Fase nº 07**

De acordo com os blocos de atividades selecionados na F<sub>5</sub> e com base na matriz de atividades, entradas e saídas do processo de desmilitarização de munição, conforme apresentado na Tabela 12, calcula-se os recursos consumidos e as emissões produzidas em cada um das atividades.

Bloco 01

Energia<sub>(1)</sub> = Emissão<sub>(1)</sub> = 0. (OBS: trabalho manual.)

Bloco 02

Energia<sub>(2)</sub> = Energia<sub>transporte</sub> = Energia<sub>(tipo-transporte)</sub> · Qtd<sub>(mat)</sub> · Distância<sub>(trecho)</sub>

Energia<sub>(2)</sub> = (1,5) · (500 · 0,0525) · (0,5)

(OBS: considerou-se que o deslocamento interno no 7º DSup é de 0,5 km.)

**Energia<sub>(2)</sub> = 19,69 MJ**

Emissão<sub>(2)</sub> = Emissão<sub>(transporte)</sub> = Qtd<sub>(mat)</sub> · Distância<sub>(trecho)</sub> · (Pegada-Carbono)

Emissão<sub>(2)</sub> = (500 · 0,0525) · (0,5) · (0,12)

**Emissão<sub>(2)</sub> = 1,58 kg CO<sub>2</sub>-eq**

Bloco 03

Energia<sub>(3)</sub> = Emissão<sub>(3)</sub> = 0. (OBS: trabalho manual.)

Bloco 04

Energia<sub>(4)</sub> = Emissão<sub>(4)</sub> = 0. (OBS: trabalho manual.)

Bloco 05

Energia<sub>(5)</sub> = Emissão<sub>(5)</sub> = 0. (OBS: trabalho manual.)

Bloco 06

O material de embalagem será queimado no mesmo local em que ocorrerão as atividades de DA e QA. Um ignitor será utilizado apenas para iniciar a combustão do material. Considerar-se-á que a queima dos próprios materiais de embalagem será responsável pela continuidade da combustão até a queima total do material. Será considerado que o cunhete é fabricado em madeira macia e o porta tiro em papelão. Após a queima serão coletados os resíduos (cinzas e sucata).

Energia<sub>(6)</sub> = 0. (OBS: trabalho manual.)

Emissão<sub>(6)</sub> = Emissão<sub>(equip.)</sub> + Emissão<sub>(queima)</sub>

Emissão<sub>(6)</sub> = 0 + (Emissão<sub>(queima-cunhete)</sub> + Emissão<sub>(queima-porta-tiro)</sub>)

Emissão<sub>(6)</sub> = Qtd<sub>(mat-cunhete)</sub> · (CO<sub>2</sub> Combustão) + Qtd<sub>(mat-porta-tiro)</sub> · (CO<sub>2</sub> Combustão)

Emissão<sub>(6)</sub> = (500 · 11) · (1,8) + (1000 · 2,1) · (1,5)

**Emissão<sub>(6)</sub> = 13.050 kgCO<sub>2</sub>**

Resíduo<sub>cinzas(6)</sub> = (Teor de Cinzas<sub>(madeira)</sub> · Qtd<sub>(madeira)</sub>) + (Teor de Cinzas<sub>(papelao)</sub> · Qtd<sub>(papelao)</sub>)

Resíduo<sub>cinzas(6)</sub> = (0,0126)<sup>1</sup> · (500 · 11) + (0,005)<sup>2</sup> · (1000 · 2,1)

**Resíduo<sub>cinzas(6)</sub> = 79,8 kg de cinzas**

Sucata<sub>(6)</sub> = (Peso dos componentes metálicos do cunhete) · Qtd<sub>cunhete</sub>

Sucata<sub>(6)</sub> = (0,3) · (500)

**Sucata<sub>(6)</sub> = 150 kg de aço**

#### Bloco 07

Energia<sub>(7)</sub> = Emissão<sub>(7)</sub> = 0. (OBS: trabalho manual.)

#### Bloco 08

Energia<sub>(8)</sub> = Emissão<sub>(8)</sub> = 0. (OBS: trabalho manual.)

#### Bloco 09

Energia<sub>(9)</sub> = Energia<sub>(transporte)</sub>

Energia<sub>(9)</sub> = Energia<sub>(transporte-caminhao-14ton)</sub> + Energia<sub>(transporte-SUV-ambulancia)</sub>

Energia<sub>(9)</sub> = (Energia<sub>(tipo-transporte)</sub> · Qtd<sub>(mat)</sub> · Distância<sub>(trecho)</sub>)<sub>caminhao</sub> + ...

... + (Energia<sub>(tipo-transporte)</sub> · Qtd<sub>(mat)</sub> · Distância<sub>(trecho)</sub>)<sub>ambulancia</sub>

Energia<sub>(9)</sub> = (1,5) · (500 · 0,0497) · (45,9) + (3,4) · (0,200) · (45,9)

(OBS: descontado o peso do estojo e do tubo da estopilha; considerado que os materiais da ambulância pesam 200 kg.)

**Energia<sub>(9)</sub> = 1.742,13 MJ**

Emissão<sub>(9)</sub> = Emissão<sub>(transporte)</sub>

<sup>1</sup> Fonte: Moraes *et al.* (2005).

<sup>2</sup> Fonte: <https://weidmann-csm.com/service/absorbent-kraft-paper/>. Acesso em 02/03/2022.

$$\text{Emissão}_{(9)} = \text{Emissão}_{(\text{transporte-caminhao-14ton})} + \text{Emissão}_{(\text{transporte-SUV-ambulancia})}$$

$$\text{Emissão}_{(9)} = (\text{Qty}_{(\text{mat})} \cdot \text{Distância}_{(\text{trecho})} \cdot (\text{Pegada-Carbono}))_{\text{caminhao}} + \dots$$

$$\dots + (\text{Qty}_{(\text{mat})} \cdot \text{Distância}_{(\text{trecho})} \cdot (\text{Pegada-Carbono}))_{\text{ambulancia}}$$

$$\text{Emissão}_{(9)} = (500 \cdot 0,0497) \cdot (45,9) \cdot (0,12) + (0,200) \cdot (45,9) \cdot (0,24)$$

$$\text{Emissão}_{(9)} = \mathbf{139,1 \text{ kg } CO_{2-eg}}$$

#### Bloco 10

$$\text{Energia}_{(10)} = \text{Emissão}_{(10)} = 0. \text{ (OBS: trabalho manual.)}$$

#### Bloco 11

$$\text{Energia}_{(11)} = \text{Emissão}_{(11)} = 0. \text{ (OBS: trabalho manual.)}$$

#### Bloco 12

Devido à grande quantidade de material a ser destruído, dividiu-se a atividade de detonação em 10 (dez) detonações, realizadas paralelamente. Cada detonação utilizou, como carga de iniciação e sacrifício, 1 kg de TNT e 2 (duas) espoletas nº 8.

Os dados sobre a munição 105 mm AE M1 foram extraídos da Tabela 15.

Seguindo o fluxograma do Anexo D, foram elaboradas as Tabelas 16, 17 e 18, da composição química dos produtos utilizados no processo de destruição por DA, de informações gerais e dos resultados obtidos, respectivamente.

Tabela 16 – Composição química dos produtos utilizados na DA.

Produto	Composição química (%)																Fonte
	C	Mn	P	S	Fe	Al	Si	Cu	Mg	Cr	Zn	Ti	Pb	N	Ba	Outros	
Aço SAE 1055 (corpo projétil)	0,55	0,75	0,04	0,05	*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<i>a</i>
Alumínio 6262 (espoleta)	-	0,15	-	-	0,7	*	0,6	0,275	0,1	0,09	0,25	0,15	-	-	-	-	<i>b</i>
Latão 90/10 (cinta forçamento)	-	-	-	-	0,05	-	-	90	-	-	*	-	0,05	-	-	-	<i>c</i>
TNT	37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18,5	-	*	<i>d</i>
RDX	16,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37,8	-	*	<i>d</i>
Comp. A4	15,81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36,67	-	*	<i>d</i>
Azida de chumbo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	71,2	28,8	-	-	<i>d</i>
Estifinato de chumbo	15,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	44,2	9	-	*	<i>d</i>
Tetraceno	12,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	74,4	-	*	<i>d</i>
Nitrato de bário														10,72	52,49	*	<i>e</i>
PETN	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,7	-	*	<i>d</i>

\* Restante;

<sup>a</sup> Arcelor (2019);<sup>b</sup> ABAL (2008);<sup>c</sup> Coppermetal (2022);<sup>d</sup> Anexo E;<sup>e</sup> Fórmula molecular:  $Ba(NO_3)_2$ .

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 17 – Informações gerais do processo de destruição por DA.

<b>Processo de destruição por DA</b>		
Qtd de munição a ser destruída (unid.)	1000	
Carga de sacrifício utilizada	TNT	
Qtd de carga de sacrifício (kg)	10	
Iniciador utilizado	Espoleta Nr 8	
Qtd de iniciador utilizado (unid.)	20	
Composição química do iniciador:		
Azida de chumbo (kg)	0,00025	
PETN (kg)	0,00055	
<b>Material energético - por munição (kg):</b>		<b>Qtd Total</b>
RDX	0,023	23,000
TNT	2,1	2.110 <sup>a</sup>
Composto A4	0,00026	0,260
Azida de chumbo	0,00039	0,395 <sup>a</sup>
Estifinato de chumbo	0,000024	0,024
Tetraceno	0,000003	0,003
Nitrato de bário	0,000021	0,021
Sulfeto de antimônio	0,000010	0,010
PETN	0,000003	0,014 <sup>a</sup>
<b>Quantidade de metal nas peças - por munição (kg)</b>		<b>Qtd Total</b>
Ferro (Fe)	11,5865	11.586,5
Manganês (Mn)	0,088481	88,481
Alumínio (Al)	0,241282	241,282
Zinco (Zn)	0,026853	26,853
Chumbo (Pb)	0,0001325	0,1325
Magnésio (Mg)	0,000247	0,247
Cromo (Cr)	0,0002223	0,222
Titânio (Ti)	0,0003705	0,371
Cobre (Cu)	0,239179	239,179
<b>Quantidade de metal nas tintas - por munição<sup>b</sup> (kg)</b>		<b>Qtd Total</b>
Zinco (Zn)	0,04341	43,410
Cádmio (Cd)	0,0004341	0,434
Cromo (Cr)	0,000217	0,217
<b>Quantidade de metal nos energéticos - por munição (kg)</b>		<b>Qtd Total</b>
Chumbo (Pb)	0,000289	0,292 <sup>b</sup>
Bário (Ba)	0,0000109	0,011

<sup>a</sup> Adicionada a quantidade existente na carga de sacrifício/iniciador.

<sup>b</sup> Considerado, proporcionalmente ao peso, os elementos apresentados em SEESAC (2004).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 18 – Resultados obtidos do processo de destruição por DA.

<b>Processo de destruição por DA</b>	
<b>RESULTADO (valores em kg)</b>	
NEQ	2.133,73
TC	784,50
TN	399,26
<b>Emissões à atmosfera</b>	
$E_{MP(2,5)}$	19.843,71
$E_{SO_2}$	1,067
$E_{M_{Fe}(pc)}$	127,452
$E_{M_{Mn}(pc)}$	0,973
$E_{M_{Pb}(pc)}$	0,0015
$E_{M_{Al}(pc)}$	2,654
$E_{M_{Zn}(pc)}$	0,295
$E_{M_{Mg}(pc)}$	0,0027
$E_{M_{Cr}(pc)}$	0,0024
$E_{M_{Ti}(pc)}$	0,0041
$E_{M_{Cu}(pc)}$	2,631
$E_{M_{Zn}(tinta)}$	4,341
$E_{M_{Cd}(tinta)}$	0,043
$E_{M_{Cr}(tinta)}$	0,022
$E_{M_{Pb}(ME)}$	0,032
$E_{M_{Ba}(ME)}$	0,0012
$E_{ME(RDX)}$	0,0064
$E_{ME(TNT)}$	0,5908
$E_{ME(Comp.A4)}$	0,00007
$E_{ME(Azida-Chumbo)}$	0,00011
$E_{ME(Estifinato-Chumbo)}$	0,00001
$E_{ME(Tetraceno)}$	0,000001
$E_{ME(Nitrato-Bario)}$	0,00001
$E_{ME(Sulfeto-Antimonio)}$	0,000003
$E_{ME(PETN)}$	0,000004
$E_{CO}$	58,053
$E_{NO_2}$	19,165
$E_{C_6H_6}$	0,243
$E_{C_2H_6}$	11,767
$E_{C_2H_4}$	1,098
$E_{CH_4}$	1,804
$E_{C_{10}H_8}$	0,016

Fonte: Elaborado pelo autor.

### Bloco 13

$$Energia_{(13)} = Energia_{(transporte)}$$

$$Energia_{(13)} = Energia_{(transporte-caminhao-14ton)} + Energia_{(transporte-SUV-ambulancia)}$$

$$Energia_{(13)} = (Energia_{(tipo-transporte)} \cdot Qtd_{(mat)} \cdot Distância_{(trecho)})_{caminhao} + \dots$$

$$\dots + (\text{Energia}_{(\text{tipo-transporte})} \cdot \text{Qtd}_{(\text{mat})} \cdot \text{Distância}_{(\text{trecho})})_{\text{ambulancia}}$$

$$\text{Energia}_{(13)} = (1,5) \cdot (0,0798 + 0,150) \cdot (45,9) + (3,4) \cdot (0,200) \cdot (45,9)$$

(OBS: considerado o peso de transporte dos resíduos e sucatas provenientes da queima das embalagens; considerado que os materiais da ambulância pesam 200 kg.)

$$\text{Energia}_{(13)} = 47 \text{ MJ}$$

$$\text{Emissão}_{(13)} = \text{Emissão}_{(\text{transporte})}$$

$$\text{Emissão}_{(13)} = \text{Emissão}_{(\text{transporte-caminhao-14ton})} + \text{Emissão}_{(\text{transporte-SUV-ambulancia})}$$

$$\text{Emissão}_{(13)} = (\text{Qtd}_{(\text{mat})} \cdot \text{Distância}_{(\text{trecho})} \cdot (\text{Pegada-Carbono}))_{\text{caminhao}} + \dots$$

$$\dots + (\text{Qtd}_{(\text{mat})} \cdot \text{Distância}_{(\text{trecho})} \cdot (\text{Pegada-Carbono}))_{\text{ambulancia}}$$

$$\text{Emissão}_{(13)} = (0,0798 + 0,150) \cdot (45,9) \cdot (0,12) + (0,200) \cdot (45,9) \cdot (0,24)$$

$$\text{Emissão}_{(13)} = 3,47 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$$

#### Bloco 19

$$\text{Energia}_{(19)} = \text{Emissão}_{(19)} = 0. \text{ (OBS: trabalho manual.)}$$

#### Bloco 21

$$\text{Energia}_{(21)} = \text{Emissão}_{(21)} = 0. \text{ (OBS: trabalho manual.)}$$

#### Bloco 22

O material a ser destruído pelo processo de queima foi transportado junto com o material a ser destruído pelo processo de detonação. Portanto os valores de *energia* e *emissão* da atividade nº 22 já foram computados no bloco da atividade nº 09.

#### Bloco 23

$$\text{Energia}_{(23)} = \text{Emissão}_{(23)} = 0. \text{ (OBS: trabalho manual.)}$$

#### Bloco 24

$$\text{Energia}_{(24)} = \text{Emissão}_{(24)} = 0. \text{ (OBS: trabalho manual.)}$$

#### Bloco 25

O material a ser queimado (pólvora de base simples, pólvora negra) foi destruído em uma única atividade de queima.

Os dados sobre a munição 105 mm AE M1 foram extraídos da Tabela 15.

Seguindo o fluxograma do Anexo D, foram elaboradas as Tabelas 19, 20 e 21, da composição química dos produtos utilizados no processo de destruição por QA, de

informações gerais e dos resultados obtidos, respectivamente.

Tabela 19 – Composição química dos produtos utilizados na QA.

Produto	Composição química (%)											Fonte
	C	N	K	S	Nitrato de potássio	Carvão	NC	Dinitrotolueno	Dibutilftalato	Difenilamina	Outros	
Pólvora de base simples	-	-	-	-	-	-	85	10	5	1 <sup>a</sup>	-	b, c
NC	25,29	13,45	-	-	-	-	-	-	-	-	*	d
Dinitrotolueno	46,3	15,4	-	-	-	-	-	-	-	-	*	b
Dibutilftalato	69,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*	e
Difenilamina	85,2	8,28	-	-	-	-	-	-	-	-	*	f
Pólvora negra	-	-	-	10,4	74	15,6	-	-	-	-	-	d
Nitrato de potássio	-	13,86	38,61	-	-	-	-	-	-	-	*	g
Carvão	77,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*	h

\* Restante;

<sup>a</sup> Quantidade adicional.

<sup>b</sup> DoA (1984).

<sup>c</sup> Valor de referência para a pólvora modelo M1.

<sup>d</sup> Vide Anexo E.

<sup>e</sup> Fórmula molecular:  $C_{16}H_{22}O_4$ .

<sup>f</sup> Fórmula molecular:  $C_{12}H_{11}N$ .

<sup>g</sup> Fórmula molecular:  $KNO_3$ .

<sup>h</sup> Ubirajara *et al.* (2013).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 20 – Informações gerais do processo de destruição por QA.

Processo de destruição por QA		
<b>Material energético - por munição (kg):</b>		<b>Qtd Total</b>
Pólvora de base simples	1,213	1.213
Pólvora negra	0,0175	17,5
<b>Quantidade de metal nos energéticos - por munição (kg)</b>		<b>Qtd Total</b>
Potássio (K)	0,005	5,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 21 – Resultados obtidos do processo de destruição por QA.

Processo de destruição por QA	
RESULTADO (valores em kg)	
NEQ	1.230,5
TC	371,25
TN	160,16
Emissões à atmosfera	
Continua...	

Tabela 21 – Resultados obtidos do processo de destruição por QA. (Continuação)

$E_{MP(2,5)}$	13,54
$E_{SO_2}$	1,477
$E_{M_{K(ME)}}$	1,55
$E_{ME(PN)}$	0,00002
$E_{ME(Polv.-BS)}$	0,0017
$E_{CO}$	2,747
$E_{NO_2}$	9,930
$E_{C_6H_6}$	0,023
$E_{C_2H_6}$	0,007
$E_{C_2H_4}$	0,141
$E_{CH_4}$	0,204
$E_{C_{10}H_8}$	0,001

Fonte: Elaborado pelo autor.

### Bloco 26

Os valores de *energia* e *emissão* da atividade nº 26 já foram computados no bloco da atividade nº 13.

### Bloco 27

Energia<sub>(27)</sub> = Emissão<sub>(27)</sub> = 0. (OBS: trabalho manual.)

### Bloco 28

Energia<sub>(28)</sub> = Emissão<sub>(28)</sub> = 0. (OBS: trabalho manual.)

Água<sub>(28)</sub> = (1000) . (1) (OBS: Considerou-se o consumo de 1 l de água por item.)

**Água<sub>(28)</sub> = 1.000 l**

Sucata<sub>(28)</sub> = (Peso do estojó) . Qtd<sub>estojó</sub>

Sucata<sub>(28)</sub> = (2,7) . (1000)

**Sucata<sub>(28)</sub> = 2.700 kg de latão**

### Bloco 30

Energia<sub>(30)</sub> = Emissão<sub>(30)</sub> = 0. (OBS: trabalho manual.)

### Bloco 31

Energia<sub>(31)</sub> = Emissão<sub>(31)</sub> = 0. (OBS: trabalho manual.)

Água<sub>(31)</sub> = (1000) . (0,5)

**Água<sub>(31)</sub> = 500 l** (OBS: Considerou-se o consumo de 0,5 l de água por item.)

$$\text{Sucata}_{(31)} = (\text{Peso da flauta da estopilha}) \cdot \text{Qty}_{\text{flauta-estopilha}}$$

$$\text{Sucata}_{(31)} = (0,1) \cdot (1000)$$

$$\text{Sucata}_{(31)} = 100 \text{ kg de latão}$$

Tendo sido realizado o levantamento do consumo de recursos e de emissões geradas ao meio ambiente para cada atividade selecionada, elaborou-se o inventário preliminar, contendo o resumo dos dados obtidos, conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 – Inventário preliminar do cenário hipotético nº 01.

Bloco Atv	Entrada(s)	Saída(s)
01	-	-
02	Energia <sub>(2)</sub> = 19,69 MJ	Emissão <sub>(2)</sub> = 1,58 kg CO <sub>2-eq</sub>
03	-	-
04	-	-
05	-	-
06	-	Emissão <sub>(6)</sub> = 13.050 kgCO <sub>2</sub> Resíduo <sub>cinzas(6)</sub> = 79,8 kg de cinzas Sucata <sub>(6)</sub> = 150 kg de aço
07	-	-
08	-	-
09	Energia <sub>(9)</sub> = 1.742,13 MJ	Emissão <sub>(9)</sub> = 139,1 kg CO <sub>2-eq</sub>
10	-	-
11	-	-
12	-	$E_{MP(2,5)}$ : 19.843,70 kg $E_{SO_2}$ : 1,067 kg $E_{MFe(pc)}$ : 127,452 kg $E_{MMn(pc)}$ : 0,973 kg $E_{MPb(pc)}$ : 0,0015 kg $E_{MAl(pc)}$ : 2,654 kg $E_{MZn(pc)}$ : 0,295 kg $E_{Mg(pc)}$ : 0,0027 kg $E_{Mcr(pc)}$ : 0,0024 kg $E_{MTi(pc)}$ : 0,0041 kg $E_{MCu(pc)}$ : 2,631 kg $E_{MZn(tinta)}$ : 4,341 kg $E_{Mcd(tinta)}$ : 0,043 kg $E_{Mcr(tinta)}$ : 0,022 kg $E_{MPb(ME)}$ : 0,032 kg $E_{MBa(ME)}$ : 0,0012 kg $E_{ME(RDX)}$ : 0,0064 kg $E_{ME(TNT)}$ : 0,5908 kg $E_{ME(Comp.A4)}$ : 0,00007 kg
Continua...		

Tabela 22 – Inventário preliminar do cenário hipotético nº 01. (Continuação)

Bloco Atv	Entrada(s)	Saída(s)
		$E_{ME(Azida-Chumbo)}$ : 0,00011 kg $E_{ME(Estifinato-Chumbo)}$ : 0,00001 kg $E_{ME(Tetraceno)}$ : 0,000001 kg $E_{ME(Nitrato-Bario)}$ : 0,00001 kg $E_{ME(Sulfeto-Antimonio)}$ : 0,000003 kg $E_{ME(PETN)}$ : 0,000004 kg $E_{CO}$ : 58,053 kg $E_{NO_2}$ : 19,165 kg $E_{C_6H_6}$ : 0,243 kg $E_{C_2H_6}$ : 11,767 kg $E_{C_2H_4}$ : 1,098 kg $E_{CH_4}$ : 1,804 kg $E_{C_{10}H_8}$ : 0,016 kg
13	Energia <sub>(13)</sub> = 47 MJ	Emissão <sub>(13)</sub> = 3,47 kg CO <sub>2-eq</sub>
19	-	-
21	-	-
22	-	-
23	-	-
24	-	-
25		$E_{MP(2,5)}$ : 13,53 kg $E_{SO_2}$ : 1,477 kg $E_{M_{K(ME)}}$ : 1,55 kg $E_{ME(PN)}$ : 0,00002 kg $E_{ME(Polv.-BS)}$ : 0,0017 kg $E_{CO}$ : 2,747 kg $E_{NO_2}$ : 9,930 kg $E_{C_6H_6}$ : 0,023 kg $E_{C_2H_6}$ : 0,007 kg $E_{C_2H_4}$ : 0,141 kg $E_{CH_4}$ : 0,204 kg $E_{C_{10}H_8}$ : 0,001 kg
26	-	-
27	-	-
28	Água <sub>(28)</sub> = 1.000 l	Sucata <sub>(28)</sub> = 2.700 kg de latão Água <sub>(28)</sub> = 1.000 l de água contaminada
30	-	-
31	Água <sub>(31)</sub> = 500 l	Sucata <sub>(31)</sub> = 100 kg de latão Água <sub>(31)</sub> = 500 l de água contaminada

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Fase nº 08**

Baseado no inventário preliminar elaborado na F<sub>7</sub>, elabora-se o inventário final, separando, por tipo, cada um dos recursos consumidos e emissões produzidas.

Tabela 23 – Inventário final do processo de desmilitarização das munições do cenário hipotético nº 01.

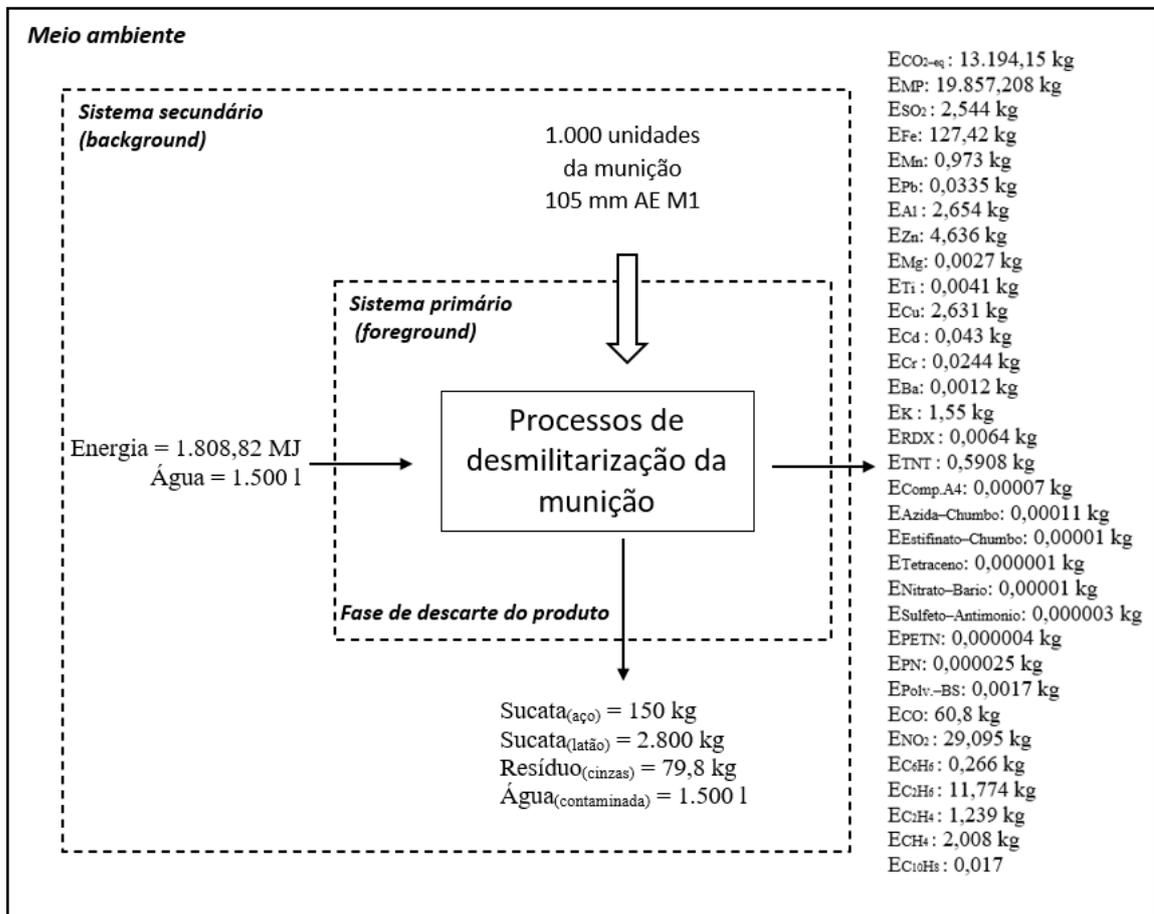
Entrada(s)	Saída(s)
Energia = 1.808,82 MJ Água = 1.500 l	<b>Emissões ao meio ambiente</b>
	$E_{CO_2-eq}$ : 13.194,15 kg $E_{MP(2,5)}$ : 19.857,21 kg $E_{SO_2}$ : 2,544 kg $E_{Fe}$ : 127,42 kg $E_{Mn}$ : 0,973 kg $E_{Pb}$ : 0,0335 kg $E_{Al}$ : 2,654 kg $E_{Zn}$ : 4,636 kg $E_{Mg}$ : 0,0027 kg $E_{Ti}$ : 0,0041 kg $E_{Cu}$ : 2,631 kg $E_{Cd}$ : 0,043 kg $E_{Cr}$ : 0,0244 kg $E_{Ba}$ : 0,0012 kg $E_K$ : 1,55 kg $E_{RDX}$ : 0,0064 kg $E_{TNT}$ : 0,5908 kg $E_{Comp.A4}$ : 0,00007 kg $E_{Azida-Chumbo}$ : 0,00011 kg $E_{Estifinato-Chumbo}$ : 0,00001 kg $E_{Tetraceno}$ : 0,000001 kg $E_{Nitrato-Bario}$ : 0,00001 kg $E_{Sulfeto-Antimonio}$ : 0,000003 kg $E_{PETN}$ : 0,000004 kg $E_{PN}$ : 0,000025 kg $E_{Polv.-BS}$ : 0,0017 kg $E_{CO}$ : 60,8 kg $E_{NO_2}$ : 29,095 kg $E_{C_6H_6}$ : 0,266 kg $E_{C_2H_6}$ : 11,774 kg $E_{C_2H_4}$ : 1,239 kg $E_{CH_4}$ : 2,008 kg $E_{C_{10}H_8}$ : 0,017
	<b>Materiais inertes, resíduos</b>
	Resíduo <sub>(cinzas)</sub> = 79,8 kg Sucata <sub>(Aco)</sub> = 150 kg Sucata <sub>(Latao)</sub> = 2.800 kg Água <sub>(Contaminada)</sub> = 1.500 l

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o inventário apresentado na Tabela 23, obtido com a aplicação da SisProD-Mun, é possível ilustrar as entradas e saídas no modelo de ciclo de vida construído,

baseado no cenário hipotético nº 01, o que encontra-se feito na Figura 49.

Figura 49 – Visão geral da aplicação da SisProDMun: cenário hipotético nº 01.



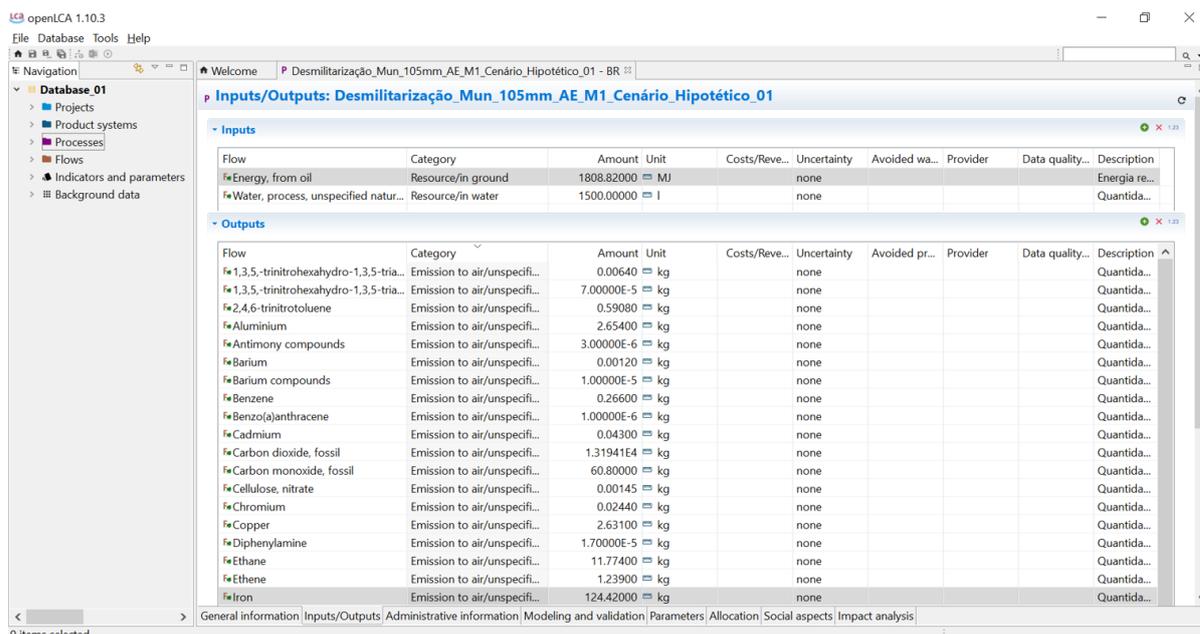
Fonte: Elaborado pelo autor.

### Fase nº 09

Baseado nos dados de inventário fornecidos pela F<sub>8</sub>, calcula-se os impactos. Neste trabalho, utilizou-se o software OpenLCA (versão 1.10.3), conforme ilustrado na Figura 50.

Após a seleção dos métodos complementares CML, USETox e TRACI, os dados foram processados e o resultado dos impactos emitido, conforme apresentado na Tabela 24.

Figura 50 – Dados do inventário inseridos no software OpenLCA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 24 – Impactos, por categoria (cenário hipotético nº 01).

Método	Categoria de impacto	Valor do impacto	Unidade
CML	Potencial de acidificação	14,5	kg SO <sub>2</sub> -eq
	Mudança climática (GWP100)	13.359,9	kg CO <sub>2</sub> -eq
	Depleção de recursos abióticos (comb. fósseis)	1.718,4	MJ
	Eutrofização	3,8	kg PO <sub>4</sub> -eq
	Toxicidade da água	678,2	kg 1,4 DB <sub>eq</sub>
	Toxicidade marinha	2.711.231	kg 1,4 DB <sub>eq</sub>
	Oxidação fotoquímica	5,2	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq
	Toxicidade terrestre	151,8	kg 1,4 DB <sub>eq</sub>
USETox	Toxicidade humana (cancerígena)	4,7.E-7	CTUh
	Toxicidade humana (não cancerígena)	2,7.E-5	CTUh
TRACI	Efeitos respiratórios	19.857,4	kg MP <sub>(2,5)</sub> eq

Fonte: Elaborado pelo autor.

As tarefas da F<sub>10</sub> do cenário hipotético nº 01, que tratam da interpretação dos resultados, com emissão das conclusões, recomendações e limitações, serão realizadas juntamente com as tarefas da F<sub>10</sub> do cenário hipotético nº 02, de maneira a propiciar adequada comparação entre às técnicas de desmilitarização utilizadas.

#### 4.2 CENÁRIO HIPOTÉTICO Nº 02

De maneira a desenvolver a análise para o cenário hipotético nº 02, foi utilizada a SisProDMun, cuja estrutura geral encontra-se ilustrada na Figura 44. Para tal, foram desdobradas as fases da Tabela 11, considerando o modelo de ciclo de vida ilustrado

na Figura 43 e apresentando a síntese dos resultados obtidos no estudo.

### **Fase nº 01**

Munição a ser desmilitarizada: 105 mm AE M1.

### **Fase nº 02**

Técnicas de desmilitarização a serem utilizadas: desmontagem manual e mecânica, remoção do material explosivo do interior do corpo do projétil por corte por serra e destruição do material energético em forno incinerador estático (static kiln), com sistema de tratamento de gás.

### **Fase nº 03**

Os dados técnicos da munição são os mesmos utilizados para o cenário hipotético nº 01 e podem ser obtidos na Tabela 15.

### **Fase nº 04**

Quantidade total a ser desmilitarizada: 1.000 (um mil) unidades.

A distância dos trajetos a serem percorridos pode ser obtida na Figura 48, sendo 199,6 km por trajeto rodoviário, utilizando-se o caminhão 14 toneladas (diesel), e 2.060,8 km por trajeto marítimo, utilizando-se o navio para navegação costeira (diesel).

### **Fase nº 05**

Consultando o mapa do processo de desmilitarização de munição, apresentado na Figura 46, verifica-se a necessidade de realização dos seguintes blocos de atividades:

- 01 - 02 - 03 - 04 - 05 - 06 - 07
- 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 19
- 20
- 27 - 28
- 29

### **Fase nº 06**

Em relação ao equipamento destinado à execução da atividade de desmontagem da espoleta do corpo do projétil, será adotado, como referência, o equipamento

do Anexo L, previamente adaptado para executar a respectiva tarefa. A Figura 14-b) ilustra a execução da desmontagem da espoleta do corpo do projétil.

Em relação ao equipamento destinado ao seccionamento do corpo do projétil para execução da atividade de remoção do material explosivo do seu interior, será adotado, como referência, o equipamento do Anexo M. A Figura 15-a) ilustra a execução do seccionamento do corpo do projétil.

Em relação ao equipamento incinerador estático, com sistema de tratamento de gás, destinado à destruição do material energético, será adotado, como referência, o equipamento apresentado em Ferreira *et al.* (2013). Trata-se de um equipamento com taxa de processamento de 20 kg de "TNT equivalente" por hora, com temperatura de funcionamento na faixa de 400 °C a 600 °C. O inventário relacionado ao uso desse equipamento pode ser visto na Tabela 25.

Tabela 25 – Inventário para incineração e tratamento do gás (por kg TNT<sub>eq</sub>).

Tipo de fluxo	Item	Quantidade	Unidade
Entrada	Energia		
	Energia <sub>(eletrica)</sub>	7,860	kWh
	Propano	1,320	kg
	Material		
	Água	15,31	kg
	Uréia	0,280	kg
	Ácido clorídrico	0,078	kg
	Hidróxido de sódio	0,060	kg
	Peróxido de hidrogênio	0,004	kg
	Zeólito	0,050	kg
Saída	Material		
	Lama	0,008	kg
	Cinzas	0,032	kg
	Escória	0,040	kg
	Emissão para o ar <sup>a</sup>		
	2, 3, 7, 8TCDD* <sup>b</sup>	8,65E-13	kg
	1, 2, 3, 4, 7, 8HxCDD* <sup>c</sup>	1,73E-12	kg
	1, 2, 3, 7, 8, 9HxCDD* <sup>d</sup>	8,65E-13	kg
	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8HpCDD* <sup>e</sup>	8,65E-13	kg
	OCDD* <sup>f</sup>	8,65E-15	kg
	Furano	9,52E-12	kg
	HF	8,36E-05	kg
	HCl	8,36E-05	kg
	VOC	6,55E-04	kg
	CO	1,28E-03	kg
	H <sub>2</sub> S	2,81E-04	kg
	NO <sub>x</sub>	4,06E-03	kg
SO <sub>2</sub>	3,98E-04	kg	
Hg	1,71E-06	kg	
Continua...			

Tabela 25 – Inventário para incineração e tratamento do gás (por  $kg\ TNT_{eq}$ ). (Continuação)

Tipo de fluxo	Item	Quantidade	Unidade
	<i>Cd</i>	1,54E-06	kg
	<i>As</i>	3,33E-06	kg
	<i>Ni</i>	2,47E-06	kg
	<i>Pb</i>	2,05E-06	kg
	<i>Cu</i>	2,05E-06	kg
	<i>Cr</i>	2,05E-06	kg
	<i>CO<sub>2</sub></i>	6,24E+00	kg
	Material particulado <sup>g</sup>	4,20E-04	kg

<sup>a</sup> Dioxinas são representadas por \*;

<sup>b</sup> 2,3,7,8-Tetraclorodibenzo-p-dioxina;

<sup>c</sup> 1,2,3,4,7,8-Hexaclorodibenzo-p-dioxina;

<sup>d</sup> 1,2,3,7,8,9-Hexaclorodibenzo-p-dioxina;

<sup>e</sup> 1,2,3,4,6,7,8-Heptaclorodibenzo-p-dioxina.

<sup>f</sup> Octaclorodibenzo-p-dioxina.

<sup>g</sup> Foi considerado o tamanho aerodinâmico mais nocivo: menor que 2,5  $\mu m$ .

Fonte: Ferreira *et al.* (2013).

### Fase nº 07

De acordo com os blocos de atividades selecionados na  $F_5$  e com base na matriz de atividades, entradas e saídas do processo de desmilitarização de munição, conforme apresentado na Tabela 12, calcula-se os recursos consumidos e as emissões produzidas em cada um das atividades.

#### Bloco 01

$$\text{Energia}_{(1)} = \text{Emissão}_{(1)} = 0 \text{ (OBS: trabalho manual.)}$$

#### Bloco 02

$$\text{Energia}_{(2)} = \text{Energia}_{\text{transporte}}$$

$$\text{Energia}_{(2)} = \text{Energia}_{(\text{transporte-caminhao-14ton})} + \text{Energia}_{(\text{transporte-navio})}$$

$$\text{Energia}_{(2)} = (\text{Energia}_{(\text{tipo-transporte})} \cdot \text{Qtd}_{(\text{mat})} \cdot \text{Distância}_{(\text{trecho})})_{(\text{caminhao})} + \dots$$

$$\dots + (\text{Energia}_{(\text{tipo-transporte})} \cdot \text{Qtd}_{(\text{mat})} \cdot \text{Distância}_{(\text{trecho})})_{(\text{navio})}$$

$$\text{Energia}_{(2)} = (1,5) \cdot (500 \cdot 0,0525) \cdot (199,6) + (0,27) \cdot (500 \cdot 0,0525) \cdot (2060,8)$$

$$\text{Energia}_{(2)} = \mathbf{22.465,2\ MJ}$$

$$\text{Emissão}_{(2)} = \text{Emissão}_{(\text{transporte})}$$

$$\text{Emissão}_{(2)} = \text{Emissão}_{(\text{transporte-caminhao-14ton})} + \text{Emissão}_{(\text{transporte-navio})}$$

$$\text{Emissão}_{(2)} = (\text{Qtd}_{(\text{mat})} \cdot \text{Distância}_{(\text{trecho})} \cdot (\text{Pegada-Carbono}))_{(\text{caminhao-14ton})} +$$

$$+ (\text{Qtd}_{(\text{mat})} \cdot \text{Distância}_{(\text{trecho})} \cdot (\text{Pegada-Carbono}))_{(\text{navio})}$$

$$\text{Emissão}_{(2)} = (500 \cdot 0,0525) \cdot (199,6) \cdot (0,12) + (500 \cdot 0,0525) \cdot (2060,8) \cdot (0,021)$$

$$\text{Emissão}_{(2)} = \mathbf{1.764,76\ kg\ CO_{2-eq}}$$

Bloco 03

Energia<sub>(3)</sub> = Emissão<sub>(3)</sub> = 0 (OBS: trabalho manual.)

Bloco 04

Energia<sub>(4)</sub> = Emissão<sub>(4)</sub> = 0 (OBS: trabalho manual.)

Bloco 05

Energia<sub>(5)</sub> = Emissão<sub>(5)</sub> = 0 (OBS: trabalho manual.)

Bloco 06

O material de embalagem será queimado em local apropriado. Não haverá fonte externa de energia. Um ignitor será utilizado apenas para iniciar a combustão do material. Portanto, considerar-se-á que a queima dos próprios materiais de embalagem será responsável pela continuidade da combustão até a queima total do material. Será considerado que o cunhete é fabricado em madeira macia e o porta tiro em papelão. Após a queima serão coletados os resíduos (cinzas e sucata).

Energia<sub>(6)</sub> = 0. (OBS: trabalho manual.)

Emissão<sub>(6)</sub> = Emissão<sub>(equip.)</sub> + Emissão<sub>(queima)</sub>

Emissão<sub>(6)</sub> = 0 + (Emissão<sub>(queima-cunhete)</sub>) + Emissão<sub>(queima-porta-tiro)</sub>

Emissão<sub>(6)</sub> = Qtd<sub>(mat-cunhete)</sub> · (CO<sub>2</sub> Combustão) + Qtd<sub>(mat-porta-tiro)</sub> · (CO<sub>2</sub> Combustão)

Emissão<sub>(6)</sub> = (500 · 11) · (1,8) + (1000 · 2,1) · (1,5)

**Emissão<sub>(6)</sub> = 13.050 kgCO<sub>2</sub>**

Resíduo<sub>cinzas(6)</sub> = (Teor de Cinzas<sub>(madeira)</sub> · Qtd<sub>(madeira)</sub>) + (Teor de Cinzas<sub>(papelao)</sub> · Qtd<sub>(papelao)</sub>)

Resíduo<sub>cinzas(6)</sub> = (0,0126)<sup>3</sup> · (500 · 11) + (0,005)<sup>4</sup> · (1000 · 2,1)

**Resíduo<sub>cinzas(6)</sub> = 79,8 kg de cinzas**

Sucata<sub>(6)</sub> = (Peso dos componentes metálicos do cunhete) · Qtd<sub>cunhete</sub>

Sucata<sub>(6)</sub> = (0,3) · (500)

**Sucata<sub>(6)</sub> = 150 kg de aço**

Bloco 07

Energia<sub>(7)</sub> = Emissão<sub>(7)</sub> = 0 (OBS: trabalho manual.)

<sup>3</sup> Fonte: Moraes *et al.* (2005).

<sup>4</sup> Fonte: <https://weidmann-csm.com/service/absorbent-kraft-paper/>. Acesso em 02/03/2022.

Bloco 14

De acordo com o Anexo L, a potência do equipamento é 33,6 kW e a taxa de desmontagem da espoleta do corpo do projétil é de 6 *unid/h*. Sabe-se que 1.000 munições 105 mm AE M1 serão desmilitarizadas. Portanto, são necessárias 166,67 horas de trabalho.

$$\text{Energia}_{(14)} = \text{Energia}_{(\text{equip.})}$$

$$\text{Energia}_{(14)} = \text{Pot}_{(\text{equip.})} \cdot \text{Tempo}_{(\text{utiliz.})} \cdot 3,6$$

$$\text{Energia}_{(14)} = (33,6) \cdot (166,67) \cdot (3,6)$$

$$\text{Energia}_{(14)} = \mathbf{20.160,4 \text{ MJ}}$$

$$\text{Emissão}_{(14)} = \text{Emissão}_{(\text{equip.})}$$

$$\text{Emissão}_{(14)} = \text{Pot}_{(\text{equip.})} \cdot \text{Tempo}_{(\text{utiliz.})} \cdot \text{Valor}_{\text{kgCO}_2/\text{kwh}}$$

$$\text{Emissão}_{(14)} = (33,6) \cdot (166,67) \cdot (0,08)$$

$$\text{Emissão}_{(14)} = \mathbf{448 \text{ kgCO}_2}$$

Bloco 15

A energia e a emissão relacionadas às atividades de destruição (tratamento) dos materiais energéticos previstas nos blocos de atividades número 15, 17, 18, 20, 28 e 29 serão calculadas no bloco de atividade número 29.

Bloco 16

De acordo com o Anexo M, a potência do equipamento é de 6,5 kW. Como o equipamento permite o corte de peças com diâmetro de até 510 *mm*, considerar-se-á o corte de 4 (quatro) corpos do projétil simultaneamente, utilizando uma vazão de 0,5 *m<sup>3</sup>/h* (500 *l/h*).

Parâmetros estimados do corpo do projétil da munição 105 mm AE M1:

- *Diâmetro Externo (De) = 105 mm;*
- *Diâmetro Interno (Di) = 101 mm.*

Assim, a área a ser seccionada pode ser calculada por:

$$\text{Área}_{(\text{seccionada})} = 0,7854 \cdot (\text{De}^2 - \text{Di}^2) \cdot (\text{Qtd de corpos de projétil})$$

$$\text{Área}_{(\text{seccionada})} = 0,7854 \cdot (0,105^2 - 0,101^2) \cdot (4)$$

$$\text{Área}_{(\text{seccionada})} = 0,002589 \text{ m}^2 = 25,89 \text{ cm}^2$$

Conforme apresentado em Starrett (2022, p. 50):

$$\text{Tempo de Corte (TC)} = \text{Área}_{(\text{seccionada})} \div \text{Índice de Corte (IC)}$$

De acordo com Starrett (2022, p. 48), o IC para o aço carbono SAE 1055 é de 55 *cm<sup>2</sup>/min*. Então:

$$\text{TC} = 25,89 \div 55$$

$$TC = 0,47 \text{ min}$$

Porém, o corpo do projétil possui material energético em seu interior (TNT). Conforme apresentado em GoldenWest (2006), o tempo médio utilizado para seccionar uma munição de grande calibre carregada com TNT é de 3 minutos, porém, pode variar de acordo com o diâmetro da munição.

Tendo em vista que o tempo recomendado para o corte da munição é maior que o tempo encontrado para o corte do metal, será considerado o tempo mais conservador.

Ainda, como 4 unidades de corpos de projétil carregados com explosivo serão seccionados simultaneamente e, também, de maneira a evitar o aquecimento dos materiais durante o corte, será adotado um tempo proporcional à quantidade de corpos serrados simultaneamente, ou seja, adotar-se-á o tempo de 12 minutos para realizar a atividade de seccionamento de 4 unidades de corpos de projétil da munição 105 mm AE M1.

Sabe-se que 1.000 munições 105 mm AE M1 serão desmilitarizadas. Portanto, são necessários 3.000 *min* ou 50 *h* de trabalho.

Então:

$$\text{Energia}_{(16)} = \text{Energia}_{(\text{equip.})}$$

$$\text{Energia}_{(16)} = \text{Pot}_{(\text{equip.})} \cdot \text{Tempo}_{(\text{utiliz.})} \cdot (3,6)$$

$$\text{Energia}_{(16)} = (6,5) \cdot (50) \cdot (3,6)$$

$$\text{Energia}_{(16)} = \mathbf{1.170 \text{ MJ}}$$

$$\text{Emissão}_{(16)} = \text{Emissão}_{(\text{equip.})}$$

$$\text{Emissão}_{(16)} = \text{Pot}_{(\text{equip.})} \cdot \text{Tempo}_{(\text{utiliz.})} \cdot \text{Valor}_{\text{kgCO}_2/\text{kwh}}$$

$$\text{Emissão}_{(16)} = (6,5) \cdot (50) \cdot (0,08)$$

$$\text{Emissão}_{(16)} = \mathbf{26 \text{ kg CO}_2}$$

$$\text{Água}_{(16)} = \text{Vazão} \cdot \text{Tempo}_{(\text{utiliz.})}$$

$$\text{Água}_{(16)} = (500) \cdot (50)$$

$$\text{Água}_{(16)} = \mathbf{25.000 \text{ l}}$$

#### Bloco 17

Idem à descrição do bloco de atividade número 15.

#### Bloco 18

Idem à descrição do bloco de atividade número 15.

#### Bloco 19

Energia<sub>(19)</sub> = Emissão<sub>(19)</sub> = 0 (OBS: trabalho manual.)

#### Bloco 20

Idem à descrição do bloco de atividade número 15.

#### Bloco 27

Energia<sub>(27)</sub> = Emissão<sub>(27)</sub> = 0 (OBS: trabalho manual.)

#### Bloco 28

Idem à descrição do bloco de atividade número 15.

#### Bloco 29

Centralizou-se o cálculo das atividades número 15, 17, 18, 20 e 28 aqui na atividade 29 pelo motivo de todas elas serem realizadas no mesmo equipamento, o forno incinerador estático com tratamento de gás.

De acordo com a tabela 15, cada munição possui 15,1 kg de metal e 3,35 kg de material energético. Portanto, a desmilitarização de 1.000 unidades da munição 105 mm AE M1 resultaria num total de 15.100 kg de metal e 3.350 kg de material energético. (OBS: foram desconsideradas quaisquer perdas de materiais durante o processo de seccionamento do corpo do projétil.)

Trata-se de um equipamento com taxa de processamento de 20 kg de "TNT equivalente" por hora. Porém, dentre os 3.350 kg de material energético, existem vários tipos diferentes de material energético. Portanto, faz-se necessária a transformação da quantidade de cada um deles para a unidade funcional kg TNT<sub>eq</sub>, adotada por Ferreira *et al.* (2013). Para tal, considerar-se-á a propriedade "Calor de Explosão" e o "Fator de Conversão" de cada um dos materiais energéticos, conforme apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 – Calor de explosão e fator de conversão para kg TNT<sub>eq</sub> de alguns materiais energéticos.

Material energético	Calor de explosão		Fator de conversão para "kg TNT <sub>eq</sub> " [kg TNT <sub>eq</sub> /kg]
	[cal/g]	[MJ/kg]	
TNT	1.080 <sup>a</sup>	4,52	1
RDX	1.280 <sup>a</sup>	5,37	1,19
Composição A4	1.280 <sup>a</sup>	5,66	1,19
Azida de chumbo	367 <sup>a</sup>	1,54	0,34
Pólvora de base simples	700 <sup>b</sup>	2,93	0,65
Pólvora negra	684 <sup>a</sup>	2,87	0,63
Estifinato de chumbo	457 <sup>a</sup>	1,91	0,42
Tetraceno	658 <sup>a</sup>	2,76	0,61
Continua...			

Tabela 26 – Calor de explosão e fator de conversão para  $kg\ TNT_{eq}$  de alguns materiais energéticos. (Continuação)

Material energético	Calor de explosão		Fator de conversão para " $kg\ TNT_{eq}$ "
	[cal/g]	[MJ/kg]	[ $kg\ TNT_{eq}/kg$ ]
PETN	1.385 <sup>a</sup>	5,80	1,28

<sup>a</sup> Fonte: USAMC (1971);

<sup>b</sup> Fonte: DoA (1984).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Sabe-se que:

$$kg\ TNT_{eq(energetico-i)} = Qtd_{(energetico-i)} \cdot Fator\ de\ conversao_{(energetico-i)} \quad (1)$$

Portanto, considerando os dados apresentados nas Tabelas 15 e 26 e a Equação 1, é possível calcular o valor de  $kg\ TNT_{eq}/kg$  correspondente à quantidade total de material energético existente nas 1.000 unidades da munição 105 mm AE M1. Tal fato encontra-se apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 – Valor total de  $kg\ TNT_{eq}$  existente nas 1.000 unidades da munição 105 mm AE M1.

Material energético	Qtd [kg]	$kg\ TNT_{eq}$
TNT	2.100	2.100
RDX	23	27,37
Composição A4	0,26	0,31
Azida de chumbo	0,39	0,13
Pólvora BS	1.213	788,45
Pólvora negra	17,5	11,03
Estifinato de chumbo	0,024	0,01
Tetraceno	0,003	0,002
PETN	0,003	0,004
<b>Total</b>		<b>2.927,3</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, baseando-se na quantidade total de  $kg\ TNT_{eq}$  existente na Tabela 27, nas informações da Tabela 15 e nos dados do inventário da Tabela 25, calcula-se o inventário das atividades 15, 17, 18, 20, 28 e 29, conforme apresentado na Tabela 28.

Tabela 28 – Inventário das atividades dos blocos número 15, 17, 18, 20, 28 e 29.

Tipo de fluxo	Item	Quantidade	Unidade
Entrada	Energia		
	Energia <sub>(eletrica)</sub>	23.008,6	kWh
Continua...			

Tabela 28 – Inventário das atividades dos blocos número 15, 17, 18, 20, 28 e 29. (Continuação)

Tipo de fluxo	Item	Quantidade	Unidade
	Propano	3.864,0	kg
	Material		
	Água	44.817,0	kg
	Uréia	819,6	kg
	Ácido clorídrico	228,3	kg
	Hidróxido de sódio	175,6	kg
	Peróxido de hidrogênio	11,7	kg
	Zeólito	146,4	kg
Saída	Material		
	Lama	23,4	kg
	Cinzas	93,7	kg
	Escória	117,1	kg
	Sucata <sup>a</sup>		
	Aço	11.748	kg
	Alumínio	247	kg
	Latão	3.107	kg
	Emissão para o ar <sup>b</sup>		
	2, 3, 7, 8TCDD*	2,5E-09	kg
	1, 2, 3, 4, 7, 8HxCDD*	5,1E-09	kg
	1, 2, 3, 7, 8, 9HxCDD*	2,5E-09	kg
	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8HpCDD*	2,5E-09	kg
	OCDD*	2,5E-11	kg
	Furano	2,8E-08	kg
	HF	0,2	kg
	HCl	0,2	kg
	VOC	1,9	kg
	CO	3,7	kg
	H <sub>2</sub> S	0,8	kg
	NO <sub>x</sub>	11,9	kg
	SO <sub>2</sub>	1,2	kg
	Hg	0,0050	kg
	Cd	0,0045	kg
	As	0,0097	kg
	Ni	0,0072	kg
	Pb	0,0060	kg
Cu	0,0060	kg	
Cr	0,0060	kg	
CO <sub>2</sub>	18.266,4	kg	
Material particulado <sub>(2,5)</sub>	1,2	kg	

<sup>a</sup> Trata-se dos componentes metálicos da munição, inseridos no incinerador para propiciar adequada descontaminação do material. Juntamente com os 20 kg TNT<sub>eq</sub>, cada batelada de material a ser tratado recebeu, aproximadamente, 102,7 kg de material metálico. Considera-se que o equipamento possui capacidade para receber essa quantidade de material por batelada, assim como os esforços resultantes das detonações que porventura possam ocorrer;

<sup>b</sup> Dioxinas são representadas por \*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tendo sido realizado o levantamento do consumo de recursos e de emissões geradas ao meio ambiente para cada atividade selecionada, elaborou-se o inventário preliminar, contendo o resumo dos dados obtidos, conforme apresentado na Tabela 29.

Tabela 29 – Inventário preliminar do cenário hipotético nº 02.

Bloco Atv	Entrada(s)	Saída(s)
01	-	-
02	Energia <sub>(2)</sub> = 22.465,2 MJ	Emissão <sub>(2)</sub> = 1.764,76 kg CO <sub>2-eq</sub>
03	-	-
04	-	-
05	-	-
06	-	Emissão <sub>(6)</sub> = 13.050 kg CO <sub>2</sub> Resíduo <sub>cinzas(6)</sub> = 79,8 kg de cinzas Sucata <sub>(6)</sub> = 150 kg de aço
07	-	-
14	Energia <sub>(14)</sub> = 20.160,4 MJ	Emissão <sub>(14)</sub> = 448 kg CO <sub>2</sub>
16	Energia <sub>(16)</sub> = 1.170 MJ Água <sub>(16)</sub> = 25.000 l	Emissão <sub>(16)</sub> = 26 kg CO <sub>2</sub> Água <sub>(16)</sub> = 25.000 l (água contaminada)
19	-	-
27	-	-
15, 17, 18, 20, 28, 29	Energia <sub>(elétrica)</sub> = 23.008,6 kWh = 82.830,96 MJ Propano = 3.864,0 kg Água = 44.817,0 kg Uréia = 819,6 kg Ácido clorídrico = 228,3 kg Hidróxido de sódio = 175,6 kg Peróxido de hidrogênio = 11,7 kg Zeólito = 146,4 kg	Lama = 23 kg Cinzas = 93,7 kg Escória = 117,1 kg Sucata = 11.748 kg de aço Sucata = 247 kg de alumínio Sucata = 3.107 kg de latão 2, 3, 7, 8TCDD* = 2,5E-09 kg 1, 2, 3, 4, 7, 8HxCDD* = 5,1E-09kg 1, 2, 3, 7, 8, 9HxCDD* = 2,5E-09 kg 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8HpCDD* = 2,5E-09 kg OCDD* = 2,5E-11 kg Furano = 2,8E-08 kg HF = 0,2 kg HCl = 0,2 kg VOC = 1,9 kg CO = 3,7 kg H <sub>2</sub> S = 0,8 kg NO <sub>x</sub> = 11,9 kg SO <sub>2</sub> = 1,2 kg Hg = 0,0050 kg Cd = 0,0045 kg As = 0,0097 kg Ni = 0,0072 kg Pb = 0,0060 kg Cu = 0,0060 kg Cr = 0,0060 kg CO <sub>2</sub> = 18.266,4 kg
Continua...		

Tabela 29 – Inventário preliminar do cenário hipotético nº 02. (Continuação)

Bloco Atv	Entrada(s)	Saída(s)
		Material particulado <sub>(2,5)</sub> = 1,2 kg

\* Dioxinas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Fase nº 08**

Baseado no inventário preliminar elaborado na F<sub>7</sub>, elabora-se o inventário final, separando por tipo, cada um dos recursos consumidos e emissões produzidas.

Tabela 30 – Inventário final do processo de desmilitarização das munições do cenário hipotético nº 02.

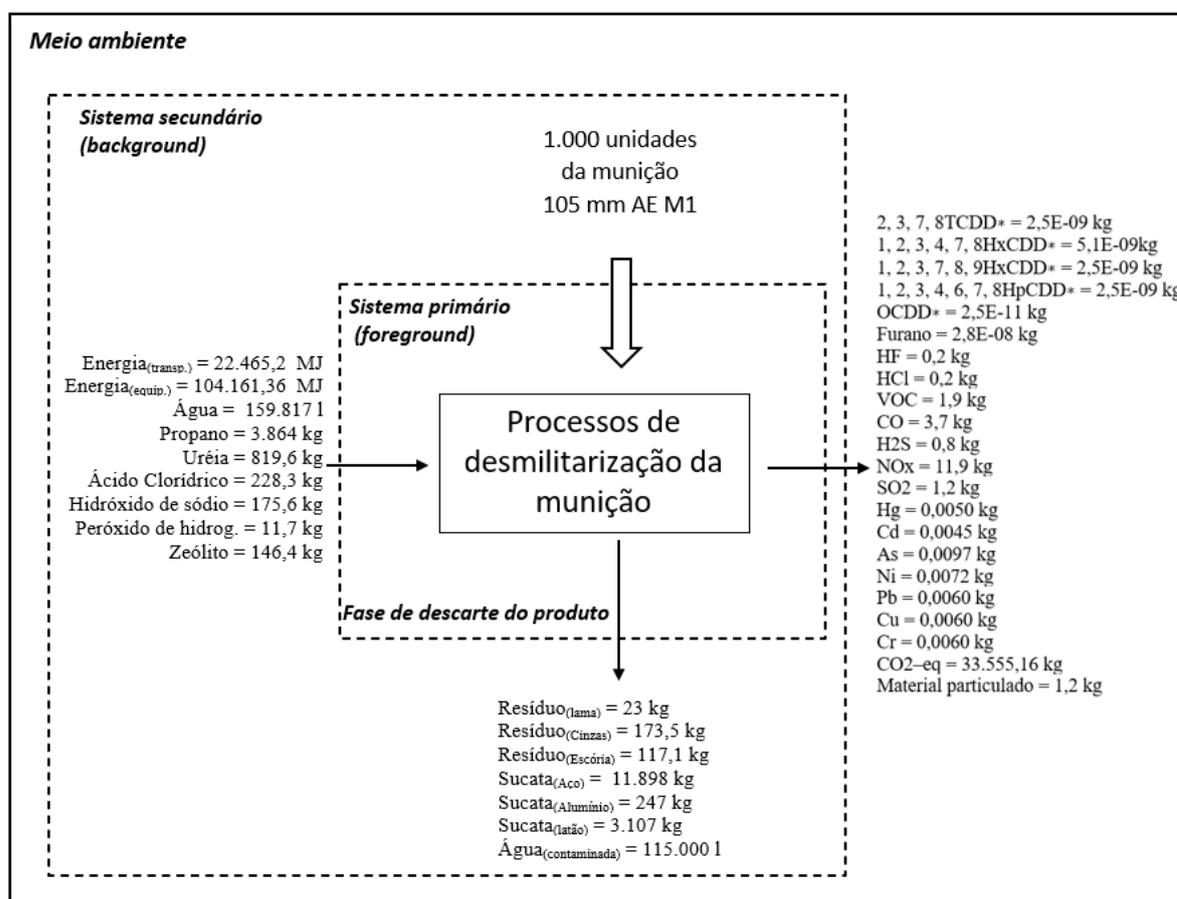
Entrada(s)	Saída(s)
	<b>Emissões ao meio ambiente</b>
Energia <sub>(transporte)</sub> = 22.465,2 MJ	2, 3, 7, 8TCDD* = 2,5E-09 kg
Energia <sub>(equipamento)</sub> = 104.161,36 MJ	1, 2, 3, 4, 7, 8HxCDD* = 5,1E-09kg
Água = 69.817 kg	1, 2, 3, 7, 8, 9HxCDD* = 2,5E-09 kg
Propano = 3.864 kg	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8HpCDD* = 2,5E-09 kg
Uréia = 819,6 kg	OCDD* = 2,5E-11 kg
Ácido clorídrico = 228,3 kg	Furano = 2,8E-08 kg
Hidróxido de sódio = 175,6 kg	HF = 0,2 kg
Peróxido de hidrogênio = 11,7 kg	HCl = 0,2 kg
Zeólito = 146,4 kg	VOC = 1,9 kg
	CO = 3,7 kg
	H <sub>2</sub> S = 0,8 kg
	NO <sub>x</sub> = 11,9 kg
	SO <sub>2</sub> = 1,2 kg
	Hg = 0,0050 kg
	Cd = 0,0045 kg
	As = 0,0097 kg
	Ni = 0,0072 kg
	Pb = 0,0060 kg
	Cu = 0,0060 kg
	Cr = 0,0060 kg
	CO <sub>2-eq</sub> = 33.555,16 kg
	Material particulado <sub>(2,5)</sub> = 1,2 kg
	<b>Materiais inertes, resíduos, ...</b>
	Resíduo <sub>(Lama)</sub> = 23 kg
	Resíduo <sub>(Cinzas)</sub> = 173,5 kg
	Resíduo <sub>(Escória)</sub> = 117,1 kg
	Sucata <sub>(Aco)</sub> = 11.898 kg
	Sucata <sub>(Aluminio)</sub> = 247 kg
	Sucata <sub>(Latao)</sub> = 3.107 kg
	Água <sub>(Contaminada)</sub> = 25.000 l

\* Dioxinas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o inventário apresentado na Tabela 30, obtido com a aplicação da SisProDMun, é possível ilustrar as entradas e saídas no modelo de ciclo de vida construído, baseado no cenário hipotético nº 02, o que encontra-se feito na Figura 51.

Figura 51 – Visão geral da aplicação da SisProDMun: cenário hipotético nº 02.



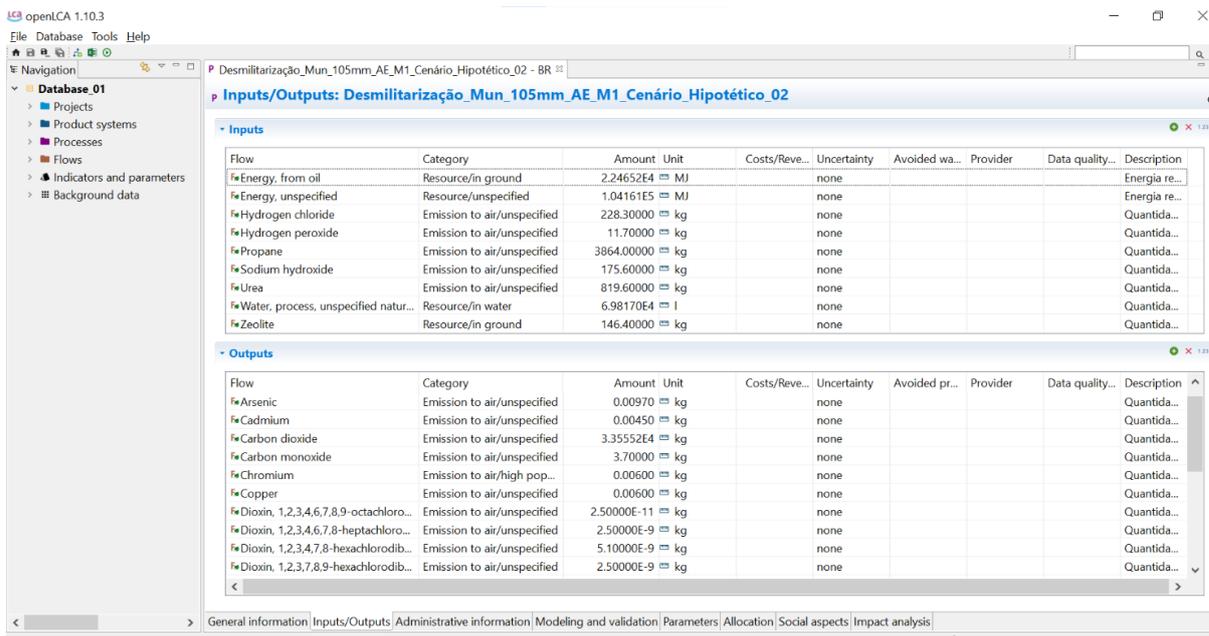
Fonte: Elaborado pelo autor.

### Fase nº 09

Baseado nos dados do inventário fornecidos pela F<sub>8</sub>, calcula-se os impactos. Para tal, utilizou-se o software OpenLCA (versão 1.10.3), conforme ilustrado na Figura 52.

Após a seleção dos métodos complementares CML, USETox e TRACI, os dados foram processados e o resultado dos impactos emitido, conforme apresentado na Tabela 31.

Figura 52 – Dados do inventário inseridos no software OpenLCA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 31 – Impactos, por categoria (cenário hipotético nº 02).

Método	Categoria de impacto	Valor do impacto	Unidade
CML	Potencial de acidificação	7,39	kg SO <sub>2</sub> -eq
	Mudança climática (GWP100)	33.562,2	kg CO <sub>2</sub> -eq
	Depleção de recursos abióticos (comb. fósseis)	21.341,9	MJ
	Eutrofização	1,6	kg PO <sub>4</sub> -eq
	Toxicidade da água	10,2	kg 1,4 DB <sub>eq</sub>
	Toxicidade marinha	8.194.938,3	kg 1,4 DB <sub>eq</sub>
	Oxidação fotoquímica	680,2	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq
	Toxicidade terrestre	176,7	kg 1,4 DB <sub>eq</sub>
USETox	Toxicidade humana (cancerígena)	7,25E-08	CTUh
	Toxicidade humana (não cancerígena)	1E-13	CTUh
TRACI	Efeitos respiratórios	1,36	kg MP <sub>(2,5)eq</sub>

Fonte: Elaborado pelo autor.

### Fase nº 10 - Cenários Hipotéticos nº 01 e 02

Até o presente momento da avaliação do ciclo de vida em análise, transformou-se os dados do inventário, para ambos os cenários hipotéticos, em indicadores ambientais, subdivididos em categorias de impactos, como pode ser observado nas Tabelas 24 e 31.

Porém, percebe-se a existência de uma grande dificuldade em interpretar e compreender o que os valores obtidos em cada categoria de impacto representam em termos de malefícios reais ao meio ambiente.

Portanto, com o intuito de facilitar a interpretação e o entendimento dos valores

dos impactos ambientais obtidos, faz-se necessário realizar o procedimento conhecido como *normalização*, para converter os valores absolutos em valores relativos.

De acordo com ABNT (2014b, p. 21), a *normalização é o cálculo da magnitude dos resultados dos indicadores de categoria com relação a alguma informação de referência, cujo objetivo é entender melhor a magnitude relativa para cada resultado de indicador do sistema de produto em estudo.*

Percebe-se, portanto, que a normalização, apesar de ser uma etapa opcional no processo de avaliação do ciclo de vida, conforme demonstrado na Figura 40, é uma etapa de grande importância, que auxilia na interpretação dos dados e, conseqüentemente, contribui para o processo decisório.

Neste trabalho, os valores de referência adotados para a normalização foram os de emissão e extração de recursos em nível global, relativos aos anos 2.000, para as categorias de impacto do método CML, e 2.010, para as categorias de impacto do método USETox, extraídos do banco de dados do software OpenLCA e de Sala *et al.* (2017), respectivamente. Para a normalização da categoria de impacto do método TRACI, foram adotados valores de referência local, existentes no banco de dados do software OpenLCA, baseados na emissão e extração de recursos ocorridos nos Estados Unidos no ano de 2008.

A Tabela 32 apresenta os valores dos impactos, normalizados, resultantes do processo de desmilitarização de munição dos cenários hipotéticos 01 e 02. A Figura 53, ilustra os valores apresentados na respectiva tabela, apresentando os impactos por categoria.

Tabela 32 – Impactos normalizados, por categoria.

<b>Método</b>	<b>Categoria de impacto</b>	<b>Cenário Nº 01</b>	<b>Cenário Nº 02</b>
CML	Acidificação	6,09E-11	3,10E-11
	Mudança climática	3,19E-10	8,02E-10
	Depleção de recursos abióticos (comb. fósseis)	4,52E-12	5,62E-11
	Eutrofização	2,39E-11	9,77E-12
	Toxicidade da água	2,87E-10	4,31E-12
	Toxicidade marinha	1,40E-08	4,23E-08
	Oxidação fotoquímica	1,42E-10	1,85E-08
	Toxicidade terrestre	1,39E-10	1,62E-10
USETox	Toxicidade humana (cancerígena)	1,79E-12	2,73E-13
	Toxicidade humana (não cancerígena)	8,32E-12	3,08E-20
TRACI	Efeitos respiratórios	2,68E-06	1,84E-10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 53 – Impactos normalizados, por categoria e por cenário hipotético.

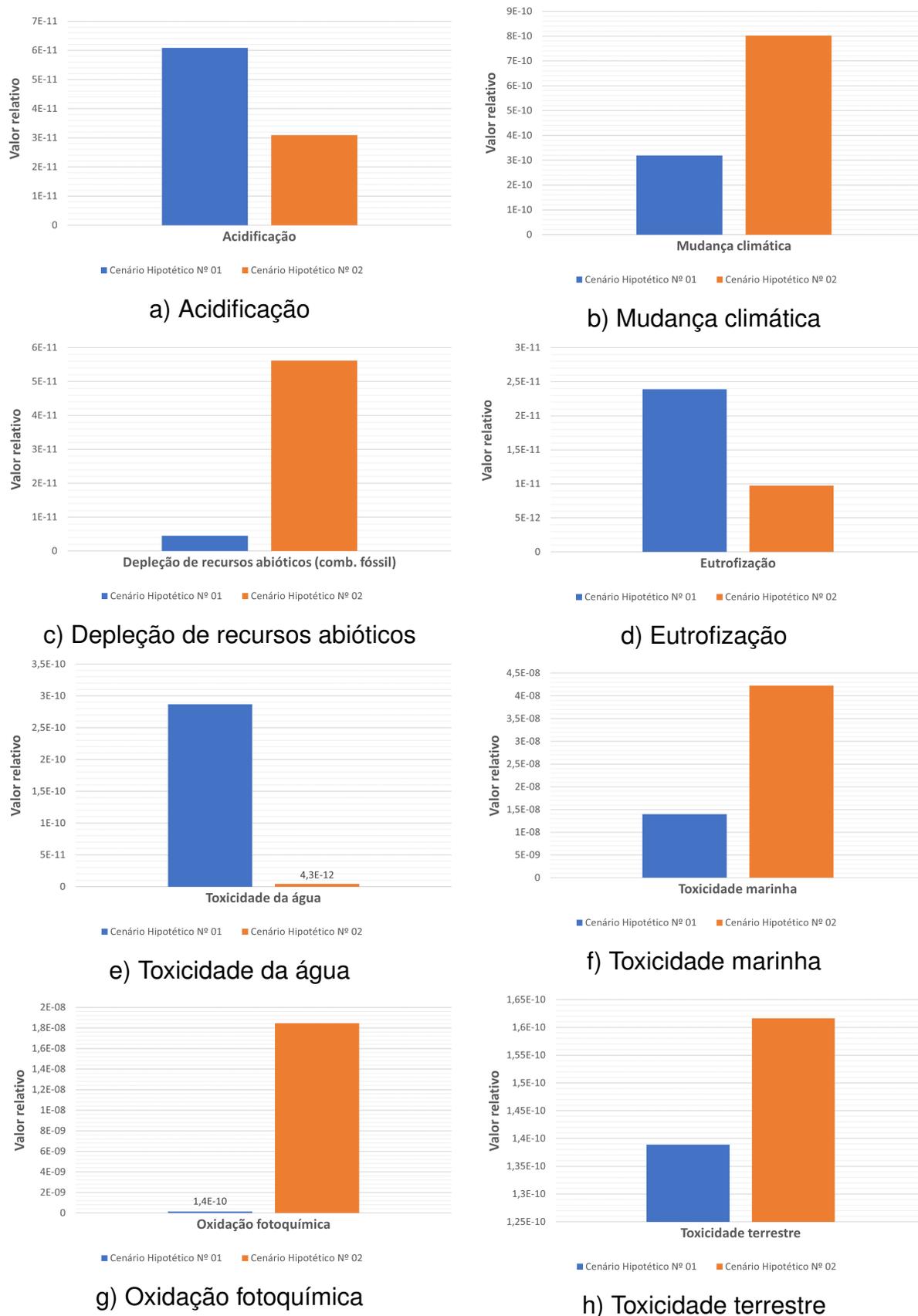
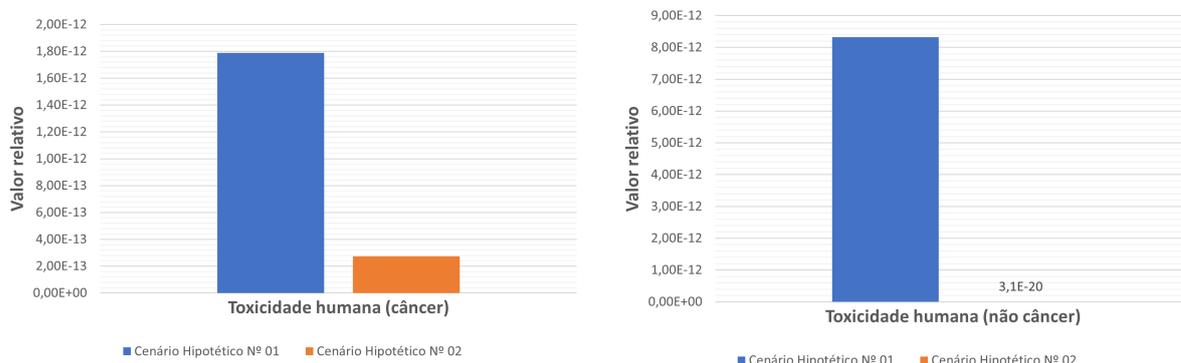
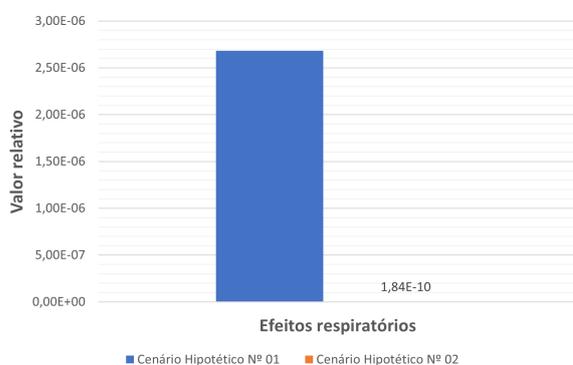


Figura 53 – Impactos normalizados, por categoria e por cenário hipotético. (continuação)



i) Toxicidade humana (câncer)



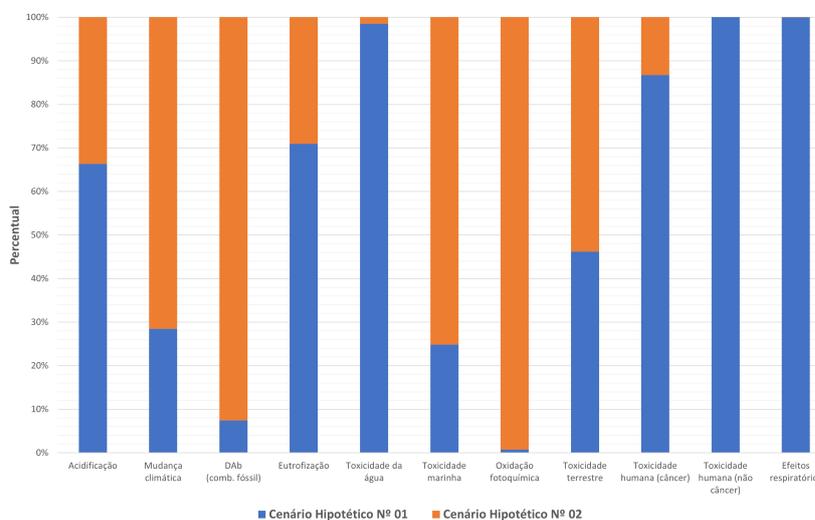
j) Toxicidade humana (não câncer)

k) Efeitos respiratórios

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 54 apresenta a relação percentual entre os impactos dos cenários hipotéticos, considerando os valores normalizados e apresentados por categoria.

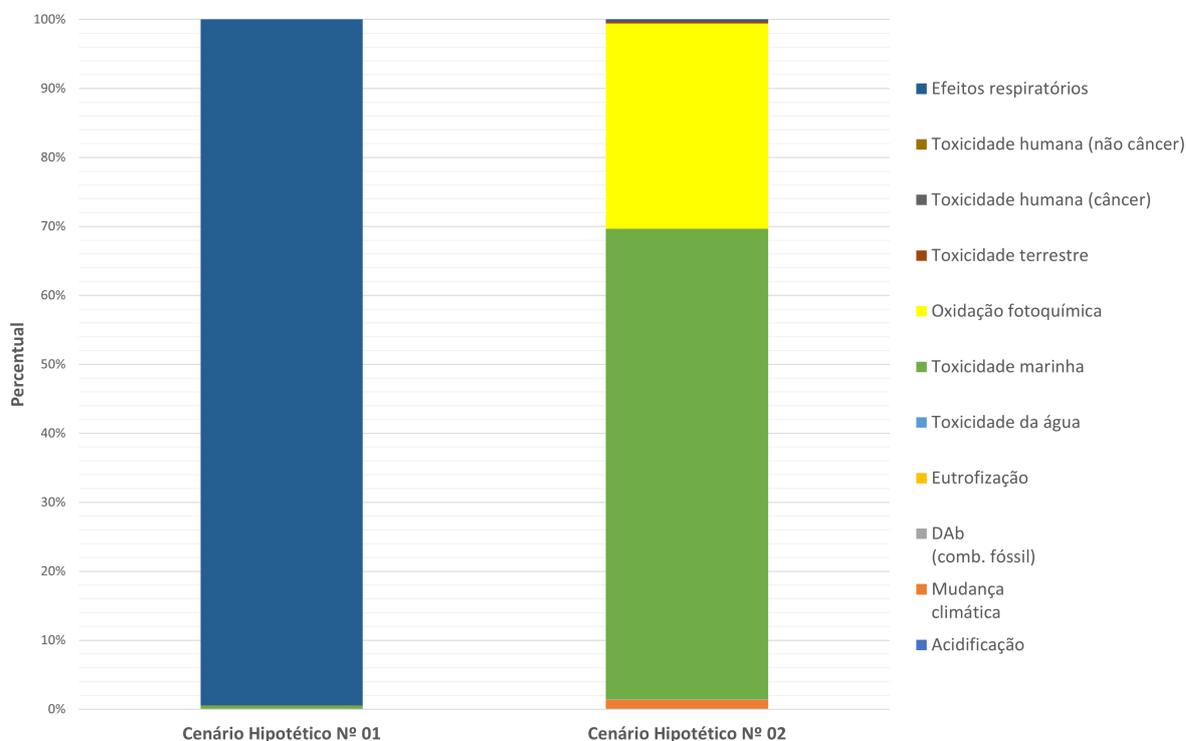
Figura 54 – Relação percentual entre os impactos dos cenários hipotéticos: valores normalizados e apresentados por categoria



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 55 apresenta a participação percentual entre os impactos, por cenário hipotético.

Figura 55 – Participação percentual entre os impactos, por cenário hipotético



Fonte: Elaborado pelo autor.

De maneira a possibilitar uma análise mais detalhada sobre os impactos causados pelo processo de desmilitarização de cada cenário hipotético e entender a contribuição de cada item sobre as categorias de impacto, apresentou-se a Figura 56.

Figura 56 – Contribuição no impacto, por item e por categoria.

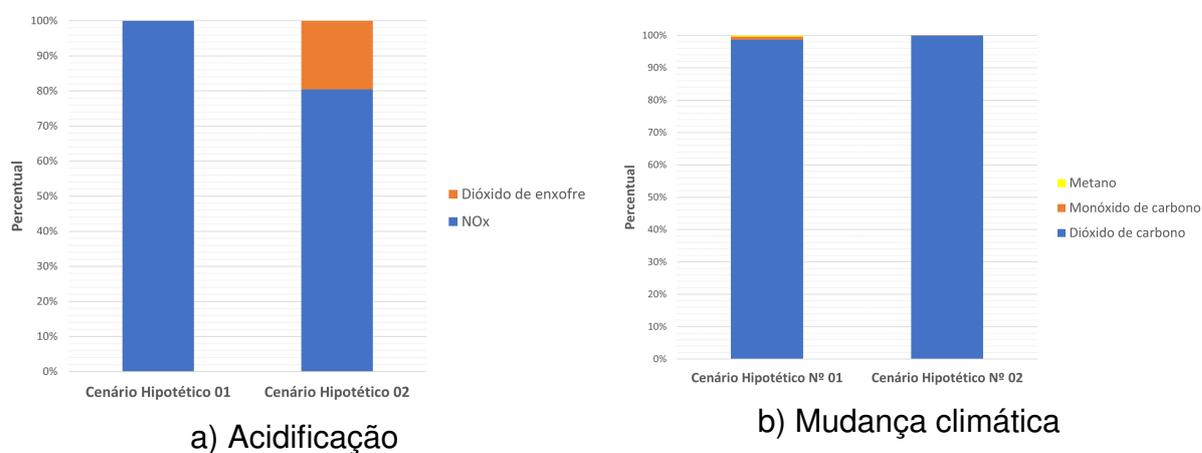
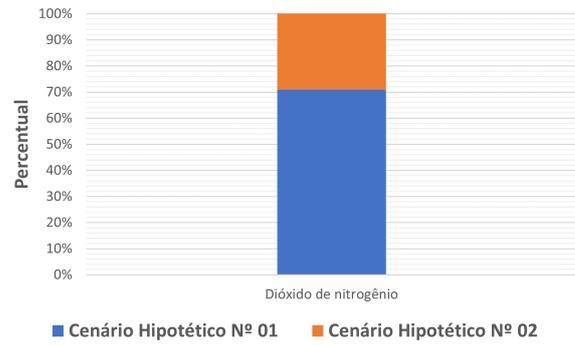
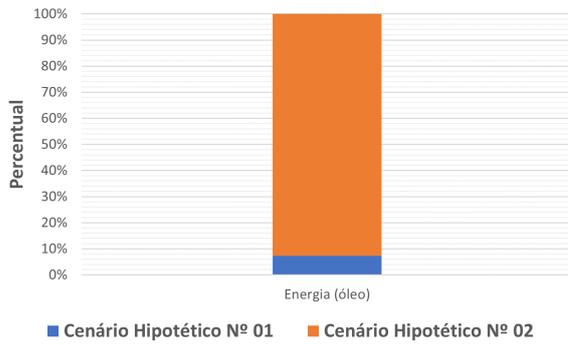
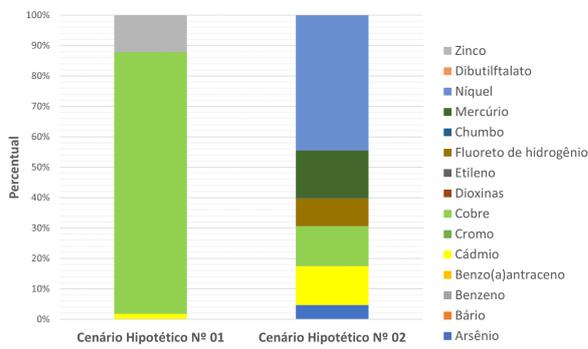


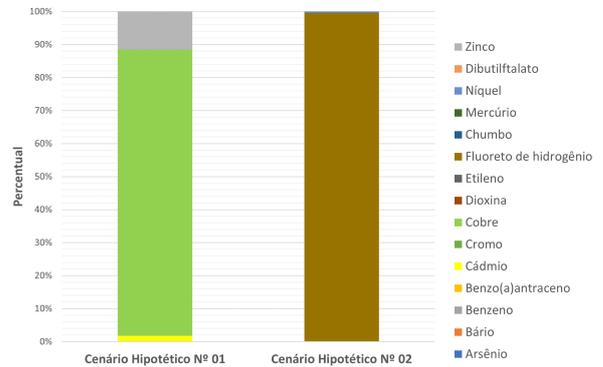
Figura 56 – Contribuição no impacto, por item e por categoria. (continuação)



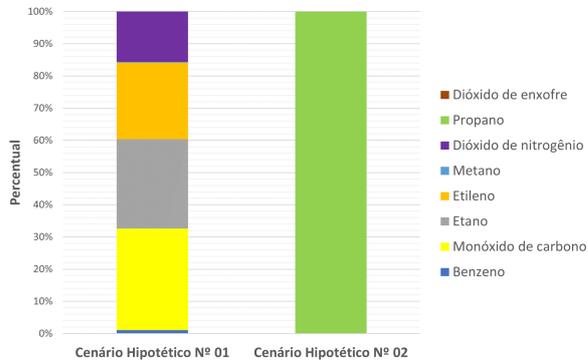
c) Depleção de recursos abióticos



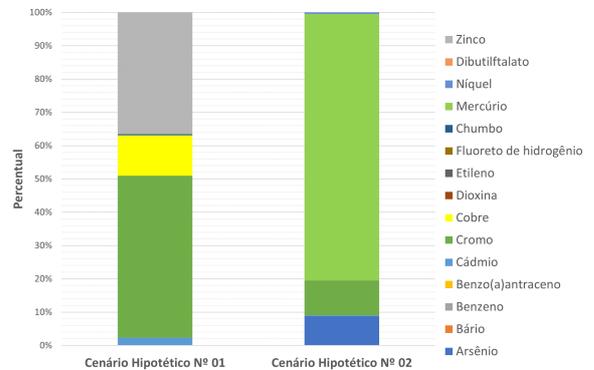
d) Eutrofização



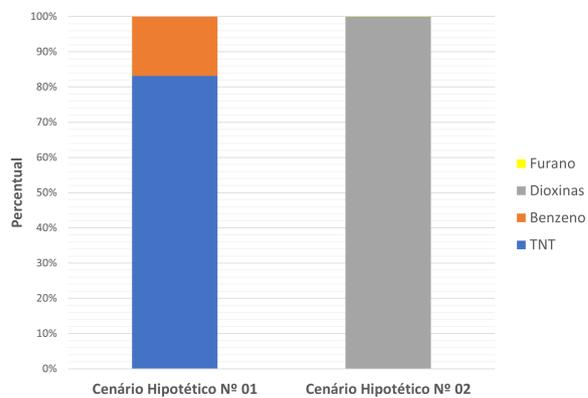
e) Toxicidade da água



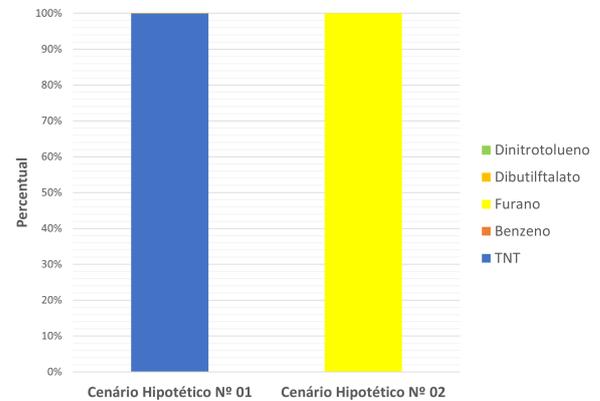
f) Toxicidade marinha



g) Oxidação fotoquímica



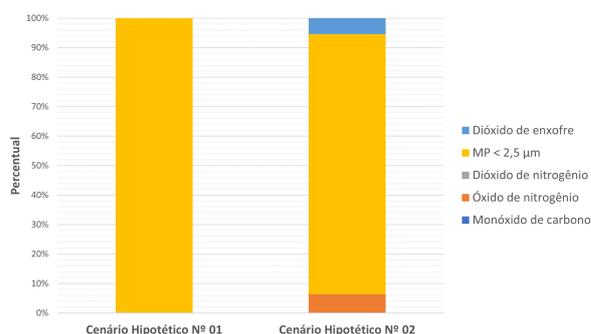
h) Toxicidade terrestre



i) Toxicidade humana (câncer)

j) Toxicidade humana (não câncer)

Figura 56 – Contribuição no impacto, por item e por categoria. (continuação)



## k) Efeitos respiratórios

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dando continuidade à análise e interpretação dos dados apresentados, pode-se inferir que:

1. De acordo com os dados apresentados na Tabela 32 e ilustrados na Figura 53:
  - a) Em relação à categoria *acidificação*, os impactos provocados pelos processos de desmilitarização dos cenários hipotéticos nº 01 e 02 correspondem, respectivamente, a  $6,09E-11$  e  $3,10E-11$  do impacto global. Percebe-se, portanto, que o impacto do cenário nº 01 é, aproximadamente, **96% maior** que o do cenário nº 02.
  - b) Em relação à categoria *mudança climática*, os impactos provocados pelos processos de desmilitarização dos cenários hipotéticos nº 01 e 02 correspondem, respectivamente, a  $3,19E-10$  e  $8,02E-10$  do impacto global. Percebe-se, portanto, que o impacto do cenário nº 02 é, aproximadamente, **2,5 vezes maior** que o do cenário nº 01.
  - c) Em relação à categoria *depleção de recursos abióticos (combustível fóssil)*, os impactos provocados pelos processos de desmilitarização dos cenários hipotéticos nº 01 e 02 correspondem, respectivamente, a  $4,52E-12$  e  $5,62E-11$  do impacto global. Percebe-se, portanto, que o impacto do cenário nº 02 é, aproximadamente, **12,4 vezes maior** que o do cenário nº 01.
  - d) Em relação à categoria *eutrofização*, os impactos provocados pelos processos de desmilitarização dos cenários hipotéticos nº 01 e 02 correspondem, respectivamente, a  $2,39E-11$  e  $9,77E-12$  do impacto global. Percebe-se, portanto, que o impacto do cenário nº 01 é, aproximadamente, **2,4 vezes maior** que o do cenário nº 02.
  - e) Em relação à categoria *toxicidade da água*, os impactos provocados pelos processos de desmilitarização dos cenários hipotéticos nº 01 e 02 correspondem, respectivamente, a  $2,87E-10$  e  $4,31E-12$  do impacto global. Percebe-

se, portanto, que o impacto do cenário nº 01 é, aproximadamente, **65 vezes maior** que o do cenário nº 02.

- f) Em relação à categoria *toxicidade marinha*, os impactos provocados pelos processos de desmilitarização dos cenários hipotéticos nº 01 e 02 correspondem, respectivamente, a  $1,40E-08$  e  $4,23E-08$  do impacto global. Percebe-se, portanto, que o impacto do cenário nº 02 é, aproximadamente, **3 vezes maior** que o do cenário nº 01.
- g) Em relação à categoria *oxidação fotoquímica*, os impactos provocados pelos processos de desmilitarização dos cenários hipotéticos nº 01 e 02 correspondem, respectivamente, a  $1,42E-10$  e  $1,85E-08$  do impacto global. Percebe-se, portanto, que o impacto do cenário nº 02 é, aproximadamente, **130 vezes maior** que o do cenário nº 01.
- h) Em relação à categoria *toxicidade terrestre*, os impactos provocados pelos processos de desmilitarização dos cenários hipotéticos nº 01 e 02 correspondem, respectivamente, a  $1,39E-10$  e  $1,62E-10$  do impacto global. Percebe-se, portanto, que o impacto do cenário nº 02 é, aproximadamente, **16,5% maior** que o do cenário nº 01.
- i) Em relação à categoria *toxicidade humana (cancerígena)*, os impactos provocados pelos processos de desmilitarização dos cenários hipotéticos nº 01 e 02 correspondem, respectivamente, a  $1,79E-12$  e  $2,73E-13$  do impacto global. Percebe-se, portanto, que o impacto do cenário nº 01 é, aproximadamente, **6,5 vezes maior** que o do cenário nº 02.
- j) Em relação à categoria *toxicidade humana (não cancerígena)*, os impactos provocados pelos processos de desmilitarização dos cenários hipotéticos nº 01 e 02 correspondem, respectivamente, a  $8,32E-12$  e  $3,08E-20$  do impacto global. Percebe-se, portanto, que o impacto do cenário nº 01 é, aproximadamente, **270.129.870 vezes maior** que o do cenário nº 02.
- k) Em relação à categoria *efeitos respiratórios*, os impactos provocados pelos processos de desmilitarização dos cenários hipotéticos nº 01 e 02 correspondem, respectivamente, a  $2,68E-06$  e  $1,84E-10$  do impacto local. Percebe-se, portanto, que o impacto do cenário nº 01 é, aproximadamente, **14.565 vezes maior** que o do cenário nº 02.

2. De acordo com os dados ilustrados na Figura 54 e tendo como referência o valor do somatório dos impactos normalizados de cada categoria:

- a) Em relação à categoria *acidificação*, o impacto provocado pelo processo de desmilitarização do cenário hipotético nº 01 corresponde, aproximada-

- mente, a 66% do total. Por outro lado, o impacto do cenário nº 02 representa, aproximadamente, 34% do total.
- b) Em relação à categoria *mudança climática*, o impacto provocado pelo processo de desmilitarização do cenário hipotético nº 01 corresponde, aproximadamente, a 28% do total. Por outro lado, o impacto do cenário nº 02 representa, aproximadamente, 72% do total.
  - c) Em relação à categoria *depleção de recursos abióticos (combustível fóssil)*, o impacto provocado pelo processo de desmilitarização do cenário hipotético nº 01 corresponde, aproximadamente, a 7% do total. Por outro lado, o impacto do cenário nº 02 representa, aproximadamente, 93% do total.
  - d) Em relação à categoria *eutrofização*, o impacto provocado pelo processo de desmilitarização do cenário hipotético nº 01 corresponde, aproximadamente, a 71% do total. Por outro lado, o impacto do cenário nº 02 representa, aproximadamente, 29% do total.
  - e) Em relação à categoria *toxicidade da água*, o impacto provocado pelo processo de desmilitarização do cenário hipotético nº 01 corresponde, aproximadamente, a 98% do total. Por outro lado, o impacto do cenário nº 02 representa, aproximadamente, 2% do total.
  - f) Em relação à categoria *toxicidade marinha*, o impacto provocado pelo processo de desmilitarização do cenário hipotético nº 01 corresponde, aproximadamente, a 25% do total. Por outro lado, o impacto do cenário nº 02 representa, aproximadamente, 75% do total.
  - g) Em relação à categoria *oxidação fotoquímica*, o impacto provocado pelo processo de desmilitarização do cenário hipotético nº 01 corresponde, aproximadamente, a 0,7% do total. Por outro lado, o impacto do cenário nº 02 representa, aproximadamente, 99,3% do total.
  - h) Em relação à categoria *toxicidade terrestre*, o impacto provocado pelo processo de desmilitarização do cenário hipotético nº 01 corresponde, aproximadamente, a 46% do total. Por outro lado, o impacto do cenário nº 02 representa, aproximadamente, 54% do total.
  - i) Em relação à categoria *toxicidade humana (cancerígena)*, o impacto provocado pelo processo de desmilitarização do cenário hipotético nº 01 corresponde, aproximadamente, a 86% do total. Por outro lado, o impacto do cenário nº 02 representa, aproximadamente, 14% do total.
  - j) Em relação às categorias *toxicidade humana (não cancerígena)* e *efeitos respiratórios*, o impacto provocado pelo processo de desmilitarização do cenário hipotético nº 01 corresponde, aproximadamente, a 100% do total. Nesses casos, o impacto do cenário nº 02 é, praticamente, desprezível.

3. De acordo com os dados ilustrados na Figura 55:

- a) Em relação ao cenário hipotético nº 01, o impacto relacionado à categoria *efeitos respiratórios* é o mais representativo, apresentando, aproximadamente, 99% do impacto total. As demais categorias de impacto dividem o percentual restante.
- b) Em relação ao cenário hipotético nº 02, as categorias *toxicidade marinha* e *oxidação fotoquímica* são as mais representativas, apresentando, respectivamente, 68% e 29% do impacto total. A categoria *mudança climática* representa, aproximadamente, 2% do total. O percentual restante encontra-se dividido pelas demais categorias.

4. De acordo com os dados ilustrados na Figura 56:

- a) Em relação à categoria *acidificação*, verifica-se que apenas as emissões de dióxido de enxofre e de óxidos nitrosos contribuem para esse tipo de impacto. Em relação ao cenário hipotético nº 01, apenas os óxidos nitrosos contribuem para a ocorrência do impacto. Em relação ao cenário hipotético nº 02, os óxidos nitrosos contribuem para, aproximadamente, 80% do impacto e dióxido de enxofre em apenas 20%.
- b) Em relação à categoria *mudança climática*, verifica-se que a emissão de metano, monóxido de carbono e dióxido de carbono contribuem para a ocorrência desse impacto. Porém, o dióxido de carbono é o principal agente responsável pela ocorrência do impacto, em ambos os cenários.
- c) Em relação à categoria *depleção de recursos abióticos (combustível fóssil)*, verifica-se que a extração e o consumo do óleo para geração de energia é o responsável pela ocorrência do impacto. O cenário hipotético nº 01 contribui, aproximadamente, com 7% do impacto total. Por outro lado, o cenário hipotético nº 02 contribui, aproximadamente, com 93% do impacto.
- d) Em relação à categoria *eutrofização*, verifica-se que a emissão de dióxido de nitrogênio é o responsável para ocorrência desse tipo de impacto. O cenário hipotético nº 01 contribui, aproximadamente, com 71% do impacto total. Por outro lado, o cenário hipotético nº 02 contribui, aproximadamente, com 29% do impacto.
- e) Em relação à categoria *toxicidade da água*, verifica-se que a emissão de metais, dibutilftalato, fluoreto de hidrogênio, etileno, dioxinas, benzo(a)antraceno e benzeno contribui para a ocorrência desse tipo de impacto. Para o cenário hipotético nº 01, o cobre e o zinco são os principais agentes responsáveis pelo impacto, com uma participação de, aproximadamente, 86% e 12%, respectivamente. Para o cenário hipotético nº 02, o níquel é o principal agente,

com uma participação de, aproximadamente, 44% do total. Porém, o mercúrio, fluoreto de hidrogênio, cobre, cádmio e o arsênio, também possuem contribuições representativas, com, aproximadamente, 15%, 9%, 13%, 12% e 4% do impacto total, respectivamente.

- f) Em relação à categoria *toxicidade marinha*, verifica-se que a emissão de metais, dibutilftalato, fluoreto de hidrogênio, etileno, dioxinas, benzo(a)antraceno e benzeno contribui para a ocorrência desse tipo de impacto. Para o cenário hipotético nº 01, o cobre e o zinco são os principais agentes responsáveis pelo impacto, com uma participação total de, aproximadamente, 98%. Para o cenário hipotético nº 02, o fluoreto de hidrogênio é o grande responsável pelo impacto, com uma participação, aproximada, de 99% do impacto.
- g) Em relação à categoria *oxidação fotoquímica*, verifica-se os agentes dióxido de enxofre, propano, dióxido de nitrogênio, metano, etileno, etano, monóxido de carbono e benzeno são os responsáveis pela ocorrência desse tipo de impacto. Para o cenário hipotético nº 01, o monóxido de carbono, etano, etileno e dióxido de nitrogênio são os grandes responsáveis pelo impacto, com uma participação, aproximada, de 31%, 27%, 25% e 15%, respectivamente. Para o cenário hipotético nº 02, o grande responsável pelo impacto é o propano, com contribuição de quase 100% do impacto total.
- h) Em relação à categoria *toxicidade terrestre*, verifica-se que a emissão de metais, dibutilftalato, fluoreto de hidrogênio, etileno, dioxinas, benzo(a)antraceno e benzeno contribui para a ocorrência desse tipo de impacto. Para o cenário hipotético nº 01, o cromo, zinco e o cobre são os agentes principais responsáveis pelo o impacto, com uma contribuição, aproximada, de 48%, 37% e 12%, respectivamente. Para o cenário hipotético nº 02, o mercúrio, cromo e o arsênio são os grandes responsáveis pelo impacto, com uma contribuição, aproximada, de 80%, 10% e 9%, respectivamente.
- i) Em relação à categoria *toxicidade humana (cancerígena)*, verifica-se que os agentes furano, dioxinas, benzeno e o TNT são os principais responsáveis pela ocorrência do impacto. Para o cenário hipotético nº 01, o TNT e o benzeno são os principais agentes, com uma contribuição, aproximada, de 83% e 17%, respectivamente. Para o cenário hipotético nº 02, as dioxinas são os agentes responsáveis, com contribuição de quase 100% do impacto total.
- j) Em relação à categoria *toxicidade humana (não cancerígena)*, verifica-se que os agentes dinitrotolueno, dibutilftalato, furano, benzeno e o TNT são os principais responsáveis pela ocorrência do impacto. O TNT e o furano são os agentes que contribuem com quase 100% para a ocorrência do impacto

no cenário hipotético nº 01 e 02, respectivamente.

- k) Em relação à categoria *efeitos respiratórios*, verifica-se que os agentes dióxido de enxofre, MP, dióxido de nitrogênio, óxido de nitrogênio e o monóxido de carbono são os principais responsáveis pela ocorrência do impacto. O MP contribui com quase 100% para a ocorrência do impacto no cenário hipotético nº 01. Para o cenário nº 02, os agentes MP, óxido de nitrogênio e dióxido de enxofre são os mais representativos, contribuindo, aproximadamente, com 88%, 6% e 5% do impacto, respectivamente.

Conforme visto anteriormente na Seção 2.2, o uso de técnicas tradicionais de desmilitarização conhecidas como QA e DA despejam no meio ambiente os produtos resultantes da queima e da detonação das munições, sem qualquer medida prévia de tratamento. Poder-se-ia presumir, antecipadamente, que os impactos causados por esses tipos de técnicas de desmilitarização seriam predominantemente maiores do que os impactos provenientes do uso de técnicas alternativas. Porém, conforme os dados apresentados na Tabela 32 e ilustrados na Figura 53, verifica-se que isso não é uma verdade absoluta. O cenário hipotético nº 01, que utiliza as técnicas tradicionais de desmilitarização (QA e DA), apresentou maior impacto ambiental em 6 (seis) categorias (acidificação, eutrofização, toxicidade da água, toxicidade humana (câncer), toxicidade humana (não câncer) e efeitos respiratórios) e o cenário hipotético nº 02, que utiliza técnicas alternativas, nas outras 5 (cinco) (mudança climática, depleção de recursos abióticos (combustível fóssil), toxicidade marinha, oxidação fotoquímica e toxicidade terrestre).

Portanto, tendo como referência os dados obtidos e a análise e interpretação realizados, apresentam-se as seguintes conclusões e recomendações:

1. As condições de contorno existentes no cenário de análise influenciam sobremaneira os resultados finais relacionados aos impactos ambientais:
  - a) A grande diferença existente nas distâncias dos trechos utilizados para transporte de material do trajeto do cenário nº 02, em relação ao cenário nº 01, proporcionou um maior consumo de combustível de origem fóssil (diesel e gasolina) não renovável e, conseqüentemente, maior emissão de gases do efeito estufa, que causam poluição atmosférica e alteração na temperatura global, conforme pode ser observado nos blocos de atividades 09 e 02 das Tabelas 22 e 29, respectivamente. Portanto, como conseqüência, as categorias de impacto *mudança climática e depleção de recursos abióticos (combustível fóssil)* do cenário nº 02 foram diretamente afetadas.
  - b) Com o intuito de diminuir os impactos relacionados às categorias *mudança climática e depleção de recursos abióticos (combustível fóssil)*, recomenda-se que as distâncias dos trechos a serem percorridos para transporte de

material não sejam muito longas. Sugere-se, portanto, para países com grandes dimensões territorial, como o Brasil, a realização de investimentos para a construção de unidades fabris destinadas à desmilitarização de munição, com aplicação de técnicas alternativas, em todas as regiões do país (central, norte, sul, leste e oeste).

2. A emissão direta ou indireta à água de nitrogênio e/ou fósforo contribuem para o aumento da eutrofização. Portanto, os itens da munição que possuem esses elementos em sua formulação, como é o caso do TNT, RDX, Composto A4, Azida de Chumbo, Estifinato de Chumbo, Tetraceno, Nitrato de Bário, PETN, Nitrocelulose, Dinitrotolueno, Difenilamina e Nitrato de Potássio, conforme pode ser observado nas Tabelas 16 e 19, podem contribuir para o aumento do impacto da categoria *eutrofização*. Conclui-se, portanto, que esse é o motivo para que o impacto do cenário nº 01 seja 2,4 vezes maior do que o do cenário nº 02, como pode ser observado na Figura 53-d).
  - a) Como recomendação para a diminuição dos impactos relacionados à categoria *eutrofização*, sugere-se a utilização de técnicas alternativas que impeçam ou diminuam a emissão ao meio aquático, direta e indiretamente, de itens da munição que contenham nitrogênio e/ou fósforo.
3. A emissão direta ou indireta de metais à água pode provocar danos à qualidade desse recurso natural. Sabe-se que não existe o emprego de nenhum tipo de medida de contenção e controle de emissão na aplicação da técnica de desmilitarização tradicional de DA, utilizada no cenário hipotético nº 01. Tal fato explica o resultado apresentado nas Figuras 53-e) e 56-e), em que o impacto relacionado à *toxicidade da água* do cenário hipotético nº 01 é 65 vezes maior que a do cenário nº 02, tendo os elementos cobre e zinco, existentes na cinta de forçamento do projétil, como os grandes responsáveis pela magnitude do impacto.
  - a) Portanto, como recomendação, sugere-se o uso preferencial de técnicas de desmilitarização alternativas, com sistema de controle e contenção das emissões, em detrimento do emprego da técnica de DA, com o intuito de diminuir os impactos relacionados à *toxicidade da água*.
4. Em relação à categoria de impacto *toxicidade marinha*, verifica-se, na Figura 56-f), que o cobre e o zinco continuam sendo os grandes responsáveis pelo impacto causado pelo cenário hipotético nº 01. Porém, para esta categoria impacto, o cenário hipotético nº 02 foi, aproximadamente, 3 vezes mais impactante ao meio ambiente que o cenário nº 01, sendo o *Fluoreto de Hidrogênio (HF)* o agente responsável por esse resultado.

O sistema de tratamento de gás utilizado no cenário nº 02 é bastante complexo. Conforme apresentado por Ferreira *et al.* (2013, tradução nossa):

*O tratamento de gás ocorre em 4 fases: pós-combustão, redução catalítica seletiva, purificação do gás e absorção... o processo de absorção do gás ocorre em 3 etapas: um purificador de ácido para precipitação dos metais pesados, um purificador alcalino para neutralização do pH e um spray precipitador para filtrar os gases SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, HCl, HF e partículas finas.*

Percebe-se, porém, como pode ser observado na Tabela 25, que o sistema de tratamento do gás não consegue eliminar em 100% a emissão de HF.

A emissão de gases típica de um incinerador encontra-se na faixa de 0,24 a 24 m<sup>3</sup>/s<sup>5</sup>. Adotando um valor médio de 12 m<sup>3</sup>/s, tem-se uma emissão de 43.200 m<sup>3</sup>/h.

Como visto anteriormente na F<sub>6</sub> do cenário hipotético nº 02, a taxa de processamento do incinerador é de 20 kg TNT<sub>eq</sub> por hora. Considerando linear a produtividade, tem-se um processamento de 10 kg TNT<sub>eq</sub> em cada 30 minutos. Portanto, de acordo com a Tabela 25, tem-se uma emissão de 8,36E-04 kg de HF a cada 30 minutos.

De acordo com as normas de emissão de gases poluentes prevista pelo Central Pollution Control Board, admite-se uma emissão de HF de até 4 mg/m<sup>3</sup> a cada 30 minutos<sup>6</sup>.

Assim, com um fluxo de gás de 43.200 m<sup>3</sup>/h (21.600 m<sup>3</sup> em 30 minutos) e uma emissão de HF de 8,36E-04 kg a cada 30 minutos, obtém-se uma emissão de HF ao meio ambiente no valor de 3,87E-8 kg/m<sup>3</sup> ou 3,87E-2 mg/m<sup>3</sup>.

Percebe-se, portanto, que a emissão de HF apresentada pelo cenário hipotético nº 02 é cerca de 100 vezes menor que o valor limite estabelecido em normas internacionais.

- a) Como recomendação, sugere-se a utilização de tecnologias alternativas para a desmilitarização da munição, com o emprego de equipamentos certificados, de maneira que seja possível obter o controle das emissões realizadas e garantir que as mesmas encontram-se dentro dos padrões permitidos por lei.

<sup>5</sup> Air Pollution Control Technology Fact Sheet - EPA-452/F-03-022. Disponível em: <https://www.epa.gov/>. Data de acesso: 29/03/2022.

<sup>6</sup> Disponível em: <https://cpcb.nic.in/common-hw-incinerators-annexure/>. Data de acesso: 29/03/2022.

5. Os dados apresentados nas Figuras 53-i), 53-j), 56-i) e 56-j), mostram que os impactos das categorias *toxidade humana (cancerígena e não cancerígena)* causados pelo cenário nº 01 foram maiores que os provocados pelo cenário nº 02, ou seja, as emissões provocadas pelo uso de técnicas tradicionais de desmilitarização conhecidas como QA e DA continham maior quantidade de substâncias químicas potencialmente perigosas aos humanos através da inalação, ingestão e contato.

Em relação à categoria *toxidade humana (cancerígena)*, verifica-se que o impacto do cenário nº 01 foi 6,5 vezes maior que o do cenário nº 02. Porém, a notável diferença é identificada em relação à categoria *toxidade humana (não cancerígena)*, onde o impacto do cenário nº 01 foi 270.129.870 vezes maior que o do cenário nº 02.

- a) Conclui-se, portanto, que as técnicas de desmilitarização utilizadas no cenário hipotético nº 02 foram extremamente eficientes, em relação ao controle dos impactos da categoria *toxidade humana (cancerígena e não cancerígena)*, quando comparados com as técnicas utilizadas no cenário nº 01.
6. De acordo com GreenDelta (2022, p. 21, tradução nossa), *a camada de ozônio é protetiva quando encontra-se na estratosfera, mas é tóxica aos humanos quando encontra-se no nível do solo e em grandes concentrações*. Os impactos da categoria *oxidação fotoquímica* têm um grande potencial para contribuir com a formação de uma camada de ozônio fotoquímica no nível do solo e estão diretamente relacionados com a concentração de CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, amônia e NMVOC na atmosfera.

Conforme observado nas Figuras 53-g) e 56-g), o impacto relacionado à categoria *oxidação fotoquímica* do cenário hipotético nº 02 foi, aproximadamente, 130 vezes maior que o cenário nº 01 e o grande responsável pelo feito foi o propano.

De acordo com Ferreira *et al.* (2013, tradução nossa), *na fase de pós combustão do tratamento do gás, os gases resultantes do tratamento térmico dos materiais energéticos são queimados com a mistura ar-propano para garantir a combustão completa*.

- a) Conclui-se, portanto, que, com o intuito de proporcionar adequado tratamento aos materiais energéticos e evitar que os mesmos sejam despejados diretamente no meio ambiente, a categoria *oxidação fotoquímica* acaba sendo sacrificada em detrimento de outras categorias.
7. Os impactos relacionados à categoria *toxicidade terrestre* foram da mesma ordem de grandeza em ambos os cenários, apresentando uma diferença de apenas

16,5% entre eles. Para o cenário nº 02, que apresentou um impacto 16,5% maior que o cenário nº 01, o mercúrio foi o agente que mais contribuiu para a ocorrência do impacto, com uma participação de, aproximadamente, 80%.

Realizando uma análise similar à da categoria *toxicidade marinha*, verifica-se que a vazão do incinerador emite uma quantidade de mercúrio no valor de 0,0792E-02  $mg/m^3$  a cada 30 minutos. De acordo com Central Pollution Control Board, admite-se uma emissão de mercúrio de até 0,05  $mg/m^3$  a cada 30 minutos<sup>7</sup>.

Verifica-se, então, que a emissão de mercúrio apresentada pelo cenário hipotético nº 02 é bem menor que o valor limite estabelecido por normas internacionais.

8. Em relação aos impactos relacionados à categoria *efeitos respiratórios*, verifica-se, através da Figura 53-k), que a aplicação das técnicas alternativas utilizadas no cenário hipotético nº 02 são extremamente eficientes no que diz respeito à contenção e emissão de material particulado à atmosfera.
9. O emprego de técnicas alternativas de desmilitarização no cenário nº 02 proporcionou a obtenção de 15.252  $kg$  de metais (aço, latão e alumínio) como resíduo, como pode ser observado na Tabela 30, valor muito superior aos 2.950  $kg$  produzidos no cenário nº 01. Esses materiais apresentam elevado valor agregado e podem ser, posteriormente, reciclados, recuperados e/ou utilizados em subprodutos, contribuindo para a diminuição da necessidade de extração de matéria-prima e retardando o esgotamento das reservas naturais existentes.
10. De uma maneira geral:
  - a) Os impactos das categorias *mudança climática e depleção de recursos abióticos (combustível fóssil)* podem ser amenizados, diminuindo-se as distâncias a serem percorridas nos transportes do material, construindo centros de desmilitarização com emprego de técnicas alternativas em várias regiões do país, por exemplo.
  - b) As categorias de impacto *toxicidade marinha e oxidação fotoquímica* foram, de certa forma, sacrificadas em detrimento de outras categorias, como a de *toxicidade humana e efeitos respiratórios*, por exemplo, evitando-se que os materiais energéticos e os materiais particulados fossem despejados diretamente ao meio ambiente e que, por consequência, pudessem ser mais danosos ao meio ambiente e à saúde humana.
  - c) O uso de equipamentos para tratamento de materiais energéticos e gerenciamento e controle dos gases emitidos à atmosfera pode promover a redução do impacto de certas categorias. Porém, em virtude da utilização de certos

<sup>7</sup> Disponível em: <https://cpcb.nic.in/common-hw-incinerators-annexure/>. Data de acesso: 30/03/2022.

produtos químicos, podem, em contra partida, aumentar o impacto em outras categorias. Ressalta-se, então, a importância de utilização de equipamentos devidamente certificados por órgãos competentes.

- d) Os benefícios ambientais proporcionados pelo emprego das técnicas alternativas utilizadas no cenário nº 02 podem ser potencializados, caso sejam tomadas medidas para diminuição das distâncias a serem percorridas no transporte do material.
- e) O emprego de técnicas alternativas, como as utilizadas no cenário nº 02, proporcionam uma maior obtenção de materiais metálicos como resíduos, que podem ser reciclados, recuperados e utilizados em subprodutos, diminuindo a necessidade de extração de novas matérias-primas e retardando o esgotamento das reservas naturais existentes.
- f) A utilização de técnicas alternativas para desmilitarização de munições, utilizadas no cenário nº 02, apresenta-se como uma opção ambientalmente mais responsável, quando comparada com as técnicas de desmilitarização tradicionais QA e DA, utilizadas no cenário nº 01.

### 4.3 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS SOBRE O ESTUDO DE CASO

A realização do estudo de caso propiciou a aplicação da SisProDMun para a avaliação dos impactos ambientais provocados pela desmilitarização de 1.000 unidades da munição 105 mm AE M1, diante de 2 (dois) cenários hipotéticos diferentes: o cenário nº 01, caracterizado pelo emprego das técnicas tradicionais QA e DA, que não proporcionam nenhum tipo de controle e gerenciamento sobre as emissões realizadas ao meio ambiente; e o cenário nº 02, caracterizado pelo emprego de técnicas alternativas, com a utilização de forno incinerador estático para tratamento dos materiais energéticos, que permitem um maior gerenciamento e controle sobre as emissões.

Adicionalmente, ressalta-se que a ABNT (2014b) apresenta orientações generalizadas sobre a análise e obtenção do inventário e a ABNT (2016) apresenta alguns exemplos ilustrativos de ACV para tentar facilitar o entendimento sobre o assunto, face à sua complexidade. Porém, em se tratando de munição, produto bastante específico e repleto de confidencialidade industrial, fica evidente a complexidade existente para obter-se os dados do inventário, acentuando-se, ainda mais, a dificuldade para a realização da ACV. Portanto, destaca-se, positivamente, a SisProDMun, que conseguiu sintetizar em sua estrutura os objetivos da ABNT (2014b) e da ABNT (2016), mostrando-se capaz de guiar o usuário na elaboração do inventário do processo de desmilitarização de munição, facilitando a realização da ACV relacionada à fase de descarte do produto.

Tendo finalizado o estudo de caso, serão apresentadas, a seguir, as conclusões do trabalho e algumas recomendações para trabalhos futuros.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo tem por objetivo apresentar as conclusões gerais do trabalho realizado e, também, algumas recomendações para trabalhos futuros.

### 5.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo geral a elaboração de uma proposta de sistematização do processo de desmilitarização de munição, que pudesse auxiliar na elaboração do inventário (consumo de recursos e produção de emissões) do respectivo processo de desmilitarização para a realização da ACV relacionada à fase de descarte do produto, com o intuito de obter informações e auxiliar na resolução da problemática relacionada ao final do ciclo de vida de munições, respondendo os questionamentos expostos na Seção 1.1, de maneira a orientar as ações dos processos decisórios em direções ambientalmente mais responsáveis.

Com o intuito de facilitar a obtenção do objetivo geral, foram definidos os objetivos específicos apresentados na Seção 1.2, de maneira a guiar, ordenar e cadenciar as ações para a elaboração do trabalho.

Assim, inicialmente, de maneira a alcançar o objetivo específico nº 01-a), foi realizada uma revisão bibliográfica sobre munições, onde alguns conceitos e classificações gerais foram apresentados, juntamente com a descrição da funcionalidade dos principais componentes e a caracterização dos principais materiais utilizados no produto, conforme apresentado na Seção 2.1 e no Apêndice A.

Em seguida, para alcançar o objetivo específico nº 01-b), foi realizada uma revisão bibliográfica sobre desmilitarização de munição, oportunidade em que foram apresentados alguns conceitos relacionados ao assunto, a finalidade geral e as técnicas de emprego disponíveis, conforme apresentado na Seção 2.2.

Finalizando o Capítulo 2 e tendo o objetivo de alcançar o objetivo específico nº 01-c), realizou-se uma revisão bibliográfica sobre avaliação do ciclo de vida, ocasião em que foram identificadas e explicadas as fases existentes no processo de avaliação, com o intuito de propiciar o entendimento necessário à quantificação do impacto ambiental, conforme apresentado na Seção 2.3.

De posse das informações necessárias, obtidas com a revisão bibliográfica, e com o intuito de alcançar o objetivo específico nº 02, elaborou-se a proposta de sistematização do processo de desmilitarização de munição, nomeada SisProDMun, conforme apresentado no Capítulo 3.

Tendo em vista o objetivo específico nº 03, último a ser alcançado para cumprir o objetivo geral, realizou-se um estudo de caso com a munição 105 mm AE M1, utilizando a SisProDMun, baseado numa abordagem multicenário, em que o cenário hipotético nº 01 é caracterizado pelo emprego de técnicas tradicionais de desmilitarização (QA e DA)

e o cenário hipotético nº 02 pelo emprego de técnicas alternativas, com a utilização de forno incinerador estático para tratamento dos materiais energéticos, conforme apresentado no Capítulo 4.

A SisProDMun, foco principal do trabalho, mostrou-se, durante a realização do estudo de caso, de simples utilização e grande versatilidade.

Face a estrutura de construção da SisProDMun, em que a função principal é dividida em fases, conforme pode ser observado na Figura 44, propiciou-se a divisão das tarefas existentes em tarefas menores e mais simples e numa ordem sequencial e lógica, orientando e guiando os passos do usuário e tornando-a de simples execução.

Adicionalmente, observa-se, também, na Figura 44, que cada bloco de fase possui uma seta de entrada representando a utilização de ferramentas para auxiliar a execução das tarefas. Fica evidente, portanto, a facilidade de mudança das ferramentas utilizadas em cada fase por outras quaisquer, de acordo com o interesse do usuário. Exemplificando, pode-se citar a *matriz de atividades, entradas e saídas do processo de desmilitarização de munição*, apresentada na Tabela 12, considerada ferramenta da F<sub>7</sub>, conforme pode ser observado na Tabela 11. Tal matriz utiliza, nos blocos de atividade nº 12 e 25, a metodologia apresentada por SEESAC (2004) para calcular as emissões provocadas pelos métodos tradicionais de desmilitarização QA e DA. Caso o usuário prefira um método elaborado por outro autor, basta atualizar ou substituir a Tabela 12 por outra que possua o método de interesse. Tal fato não atrapalharia a execução da SisProDMun, o que demonstra, de fato, a versatilidade da sistemática.

O estudo de caso realizado, apresentado no Capítulo 4, propiciou que a SisProDMun fosse testada e, também, a comparação entre os impactos ambientais causados por 2 (dois) processos de desmilitarização de munição distintos, permitindo a realização de uma análise mais apurada das relações de causa e efeito de cada impacto, para cada cenário existente.

Nas diversas pesquisas realizadas durante a elaboração deste trabalho, verificou-se a existência de diversas obras relacionadas à desmilitarização e à quantificação dos impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida da munição, o que corrobora a importância do tema deste trabalho. Porém, não foi verificado em nenhuma delas a existência de uma sistemática que pudesse guiar e, conseqüentemente, auxiliar o usuário a obter o inventário do processo de desmilitarização para realizar a quantificação dos impactos ambientais relacionados à fase de descarte da munição. Portanto, a SisProDMun mostrou-se capaz de preencher essa lacuna, ou se somar a outras que porventura existam e não foram identificadas, auxiliando, principalmente, técnicos, pesquisadores e gestores que não são especialistas em munição, mas têm interesse, por um motivo qualquer, em avaliar os impactos ambientais causados pelos tratamentos aplicados a esse tipo de produto ao final do seu ciclo de vida.

A SisProDMun mostrou-se, portanto, uma sistemática capaz de auxiliar na ela-

boração do inventário do processo de desmilitarização de munições convencionais e de grande calibre para a realização da ACV, por ocasião do final do ciclo de vida. Através dela, é possível analisar, previamente, cenários hipotéticos distintos, com o emprego de técnicas de desmilitarização diferentes, de maneira a obter os impactos ambientais provocados por cada cenário. Tal fato propicia uma análise antecipada à ação de descarte do produto e permite ao técnico, pesquisador ou gestor obter informações para auxiliar em possíveis processos decisórios, orientando sobre possíveis ações e direções a serem seguidas e que sejam ambientalmente mais responsáveis.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista o trabalho realizado, seguem, a seguir, algumas recomendações, ou sugestões, para trabalhos futuros relacionados à área de pesquisa em questão:

1. Aplicação da SisProDMun em análises que avaliem os impactos ambientais causados na desmilitarização da munição 105 mm AE M1, com o emprego, porém, de técnicas alternativas de desmilitarização diferentes das que foram utilizadas neste trabalho.
2. Aplicação da SisProDMun em análises que avaliem os impactos ambientais causados na desmilitarização de diversos tipos de munição, diferentes, porém, do tipo que foi analisado neste trabalho, com emprego de diversas técnicas alternativas de desmilitarização.
3. Ampliação do escopo deste trabalho, desenvolvendo novos mapas do processo de desmilitarização e, conseqüentemente, novas matrizes de atividades, entradas e saídas do processo de desmilitarização para outros tipos de munição, convencionais ou não convencionais, mísseis e foguetes.
4. Implementação, na SisProDMun, de uma metodologia para valoração global dos cenários hipotéticos, baseada em critérios ambientais e econômicos, com o objetivo de pontuar e ranquear cada um dos cenários, contribuindo para o processo decisório de escolha do cenário mais adequado de desmilitarização.
5. Desenvolvimento de sistemas computacionais especialistas, capazes de armazenar, processar e calcular os impactos ambientais relacionados ao tratamento aplicado ao final da vida de vários tipos de munições, empregando diferentes técnicas de desmilitarização.

## REFERÊNCIAS

- ACERO, Aitor P.; RODRÍGUEZ, Cristina; CIROTH, Andreas. **GreenDelta - LCIA Methods - Impact Assessment Methods in Life Cycle Assessment and Their Impact Categories**. Disponível em: <https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2016/08/LCIA-METHODS-v.1.5.5.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2022.
- ALVERBRO, Karin; BJÖRKLUND, Anna; FINNVEDEN, Göran; HOCHSCHORNER, Elisabeth; HÄGVALL, J. A life cycle assessment of destruction of ammunition. **Journal of hazardous materials**, Elsevier, v. 170, n. 2-3, p. 1101–1109, 2009.
- ANDERS, Holger; ASHKENAZI, Michael; BEVAN, James; BIDDLE, Ian; DREYFUS, Pablo; KARP, Aaron; SCHROEDER, Matt; WILKINSON, Adrian. **Conventional ammunition in surplus: A reference guide**. Geneva, Switzerland: Small Arms Survey, 2008.
- ARCELOR MITTAL. **Guia do aço**. Brasil, 2019.
- ASHBY, Michael F. **Materials and the environment: eco-informed material choice**. 3ª ed. Oxford - United Kingdom: Elsevier, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10520**: Informação e documentação — Citações em documentos — Apresentação. Rio de Janeiro, ago. 2002a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14001**: Sistema de gestão ambiental — Requisitos com orientações para uso. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14040**: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Princípios e estruturas. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2014a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14044**: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14047**: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 a situações de avaliação de impacto. 1ª ed. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6023**: Informação e documentação — Referências — Apresentação. Rio de Janeiro, ago. 2002b.

BACK, Nelson; OGLIARI, André; DIAS, Acires; SILVA, JC da. **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem**. Barueri-SP: Manole, 2008.

BARBOSA, José Luiz Alves; SILVA, Lucas Melo da. **Instruções Gerais para Ensaios Balísticos com Munição de Armamento Pesado e seus Componentes**. Juiz de Fora-MG, 2016.

CARLUCCI, Donald E.; JACOBSON, Sidney S. **Ballistics: theory and design of guns and ammunition**. Boca Raton-FL: CRC Press, 2008.

CATÁLOGO de produtos - Aços e metais de alta qualidade. Disponível em: <https://www.coppermetal.com.br/catalogos/catalogo-completo.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2022.

CENTRO TECNOLÓGICO DO EXÉRCITO - CTEEx. Disponível em: <http://www.ctex.eb.mil.br/projetos-finalizados>. Acesso em: 21 ago. 2021.

CLARISA, Alejandrino; IRMA, Mercante; MARÍA, D. Bovea. Life cycle sustainability assessment: Lessons learned from case studies. **Journal of Environmental Impact Assessment Review**, Elsevier, v. 87, 2020.

COLBURN, Joseph W.; ROBBINS, Frederick W. **Combustible Cartridge Case Ballistic Characterization**. Aberdeen-Maryland, 1990.

CUMMING, Adam Stewart; JOHNSON, Mark S. **Energetic Materials and Munitions: Life Cycle Management, Environmental Impact, and Demilitarization**. Weinheim, Alemanha: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2019.

DEFENCE RESEARCH AND DEVELOPMENT CANADA - DRDC. **Literature review on demilitarization of munitions**. Quebec-Canada: DRDC, 2010.

DefesaNet. Disponível em:

<https://www.defesanet.com.br/laad2011/noticia/631/A-Promissora-KMW-/>.

Acesso em: 21 ago. 2021.

DEPARTMENT OF DEFENSE - DOD. **Manufacture of Projectiles, Projectile Components, and Cartridge Cases for Artillery, Tank Main Armament, and Mortars - MIL-HDBK-756**. USA, 1991.

DEPARTMENT OF ORDNANCE AND GUNNERY - DOG. **Naval Ordnance and Gunnery - Volume 1 - NAVPERS 10797**. Washington, 1955.

DEPARTMENT OF THE ARMY - DOA. **AMMUNITION, GENERAL - TM 9-1300-200**. Washington-DC, 1969.

DEPARTMENT OF THE ARMY - DOA. **Army Ammunition Data Sheets: Artillery Ammunition, Guns, Howitzers, Mortars, Recoilless Rifles, Grenade Launchers, and Artillery Fuzes - TM-43-0001-28**. Washington-DC, 1994.

DEPARTMENT OF THE ARMY - DOA. **ARTILLERY AMMUNITION - TM 9-1300-203**. Washington-DC, 1967.

DEPARTMENT OF THE ARMY - DOA. **Breech Mechanism Design - DARCOM-P-706-253**. Alexandria-VA, 1979.

DEPARTMENT OF THE ARMY - DOA. **Military Explosives - TM 9-1300-214**. Washington-DC, 1984.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Alternative Treatment Technologies to Open Burning and Open Detonation of Energetic Hazardous Waste**. Washington-DC, 2019.

EXÉRCITO BRASILEIRO - EB. **Plano Estratégico do Exército 2020-2023 - EB-10-P-01.007**. Brasília-DF, 2019.

EXÉRCITO BRASILEIRO - EB. **Instruções Gerais para a Gestão do Ciclo de Vida dos Sistemas e Materiais de Emprego Militar - EB10-IG-01.018**. 1ª ed. Brasília-DF, 2016.

EXÉRCITO BRASILEIRO - EB. **Regulamento para a fiscalização de produtos controlados - R-105**. 1ª ed. Brasília-DF, 2001.

FERREIRA, Carlos; RIBEIRO, José; ALMADA, Sara; FREIRE, Fausto. Environmental Assessment of Ammunition: the Importance of a Life-Cycle Approach. **Propellants, Explosives, Pyrotechnics**, v. 42, n. 1, p. 44–53, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/prop.201600158>.

FERREIRA, Carlos; RIBEIRO, José; ALMADA, Sara; ROTARIU, Traian; FREIRE, Fausto. Reducing impacts from ammunitions: A comparative life-cycle assessment of four types of 9mm ammunitions. **Science of The Total Environment**, v. 566-567, p. 34–40, 2016.

FERREIRA, Carlos; RIBEIRO, José; CLIFT, Roland; FREIRE, Fausto. A Circular Economy Approach to Military Munitions: Valorization of Energetic Materials from Ammunition Disposal through Incorporation in Civil Explosives. **Journal of Sustainability**, MDPI, v. 11, p. 255, 2019.

FERREIRA, Carlos; RIBEIRO, José; MENDES, Ricardo; FREIRE, Fausto. Life-cycle assessment of ammunition demilitarization in a static kiln. **Propellants, Explosives, Pyrotechnics**, Wiley Online Library, v. 38, n. 2, p. 296–302, 2013.

GALANTE, Erick; TEMPLE, Tracey; LADYMAN, Melissa; GILL, Philip P. The UK Ministry of Defence Project Orientated Environmental Management System (POEMS). **Propellants, Explosives, Pyrotechnics**, Wiley, v. 42, p. 36–43, 2017.

GLOBALSECURITY.ORG. Disponível em: [https://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/images/m864\\_usafas.jpg](https://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/images/m864_usafas.jpg). Acesso em: 28 ago. 2021.

GOBINET, Pierre. Industrial demilitarization of conventional ammunition. **Small Arms Survey**, v. 37, 2013.

GOLDEN WEST HUMANITARIAN FOUNDATION. Explosive Harvesting Project (EHP): Cambodia, 2006. Disponível em: <https://www.gichd.org/fileadmin/GICHD-resources/rec-documents/ExplosiveHarvestingFacilityNewsJun2006.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2022.

GUIA Técnico do Alumínio - Extrusão. 4ª ed. São Paulo, 2008.

HÄGVALL, Joakim; HOCHSCHORNER, Elisabeth; FINNVEDEN, Göran; OVERCASH, Michael; GRIFFING, Evan. **Life cycle assessment of a PFHE shell grenade**. Stockholm, 2004.

INDÚSTRIA DE MATERIAL BÉLICO DO BRASIL. **Estrutura - EOP IMB 1105**. [Comunicação pessoal], jan. 2022.

INDÚSTRIA DE MATERIAL BÉLICO DO BRASIL. **Estrutura - Tiro 105 AE MD1**. [Comunicação pessoal], out. 2021a.

INDÚSTRIA DE MATERIAL BÉLICO DO BRASIL - IMBEL. Disponível em: <https://www.imbel.gov.br/index.php/municoes>. Acesso em: 19 ago. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 12 ago. 2021.

JAKUSZ COMPANY. Disponível em: <https://en.jakusz.com/offer/munitions-disposal/munitions-dismantling-technologies.html>. Acesso em: 18 ago. 2021.

JAKUSZ COMPANY. Disponível em: <https://en.jakusz.com/offer/munitions-disposal/nunitions-destruction-technologies.html>. Acesso em: 25 out. 2021.

JOINT RESEARCH CENTRE — INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY (JRC-IES). **The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: General Guide for Life Cycle Assessment — Detailed Guidance**. 1<sup>a</sup> ed. Luxembourg, 2010.

MÁQUINAS de serra de fita. Disponível em: <http://www.starrett.com.br/catalogo-de-maquinas-de-serra-de-fita/>. Acesso em: 10 mar. 2022.

MICHAEL, Z. Hauschild; RALPH, K. Rosenbaum; STIG, Irving Olsen. **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**. Switzerland: Springer, 2018.

MINISTÉRIO DA DEFESA - MD. **Grupo de Artilharia de Campanha - C 6-20**. 4<sup>a</sup> ed. Brasília-DF, 1998.

MINISTÉRIO DO EXÉRCITO - ME. **Armazenamento, conservação, transporte e destruição de munições, explosivos e artifícios - T-9-1903**. 1ª ed. Brasília-DF, 1970.

MORAIS, Sérgio Antônio Lemos de; NASCIMENTO, Evandro Afonso do; MELO, Dárley Carrijo de. Análise da madeira de Pinus oocarpa parte I: estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, v. 29, p. 461–470, 2005.

MSM Group. Disponível em:

[https://www.zvsas.sk/downloads/14/msm\\_tech\\_list\\_155mmhe\\_m\\_107.pdf](https://www.zvsas.sk/downloads/14/msm_tech_list_155mmhe_m_107.pdf). Acesso em: 30 ago. 2021.

MSM Group. Disponível em:

<https://www.msm.sk/content/msm-leaflet-primer-m82-z.pdf>. Acesso em: 6 set. 2021.

MUNITIONS SAFETY INFORMATION ANALYSIS CENTER - MSIAC. **Review of Demilitarisation and Disposal Techniques for Munitions and Related Materials**. Bruxelles-Belgique: MSIAC, 2006.

NAMMO. **Ammunition Handbook**. 6ª ed. Norway, 2021.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING AND MEDICINE - NASEM. **Alternatives for the demilitarization of conventional munitions**. Washington, DC, 2019.

NEXTER. **Ammunition - Nexter Catalogue**. Versailles-France, 2018.

NORTH ATLANTIC TREATY ORGANISATION - NATO. **Defense Industries: Science and Technology Related to Security**: Impact of Conventional Munitions on Environment and Population. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004.

NORTH ATLANTIC TREATY ORGANISATION - NATO. **Environmental Impact of Munition and Propellant Disposal**. Neuilly-France, 2010.

ORGANIZATION FOR SECURITY AND CO-OPERATION IN EUROPE - OSCE. **Handbook of Best Practices on Conventional Ammunition**. Vienna-Austria: OSCE, 2008.

OYLER, Karl D.; MEHTA, Neha; CHENG, Gartung. **Overview of Explosive Initiators**. Picatinny Arsenal, New Jersey, 2015.

QUORA. Disponível em: <https://www.quora.com/How-did-Vietnam-War-Beehive-rounds-eject-the-flechettes>. Acesso em: 27 ago. 2021.

SALA, Serenella; CRENNNA, Eleonora; SECCHI, Michela; PANT, Rana. Global normalisation factors for the environmental footprint and life cycle assessment. **Publications Office of the European Union: Luxembourg**, 2017.

SHAKED, Shanna; CRETAAZ, Pierre; SAADE-SBEIH, Myriam; JOLLIET, Olivier; JOLLIET, Alexandre. **Environmental life cycle assessment**. Boca Raton - FL: CRC Press, 2016.

SOUTH EASTERN EUROPE CLEARINGHOUSE FOR THE CONTROL OF SMALL AMMUNITION AND LIGHT WEAPONS - SEESAC. **SALW ammunition destruction: Environmental releases from open burning (OB) and open detonation (OD) events**. Belgrado, 2004.

STEFANOPOULOS, P. K.; FILIPPAKIS, K.; SOUPIOU, O. T.; PAZARAKIOTIS, V. C. Wound Ballistics of firearm-related injuries - Part 1: Missile characteristics and mechanisms of soft tissue wounding. **International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery**, Elsevier, v. 43, p. 1445–1458, 2014.

TDA. Disponível em: <https://autodocbox.com/Convertible/68584818-Rocket-assisted-ammunition-technologies-for-120-mm-mortars.html>. Acesso em: 25 ago. 2021.

TECNOLOGIA & DEFESA - T&D. Disponível em: <https://tecnodefesa.com.br/recuperacao-de-obuseiros-de-105mm/>. Acesso em: 21 ago. 2021.

TECNOLOGIA & DEFESA - T&D. Disponível em: <https://tecnodefesa.com.br/municoes-105-mm-para-carros-de-combate-as-capacidades-do-leopard-1a5-br/>. Acesso em: 27 ago. 2021.

THREAT RESOLUTION LTD — TR-LTD. **Bosnia and Herzegovina Small Arms and Light Weapons Ammunition Demilitarization Feasibility Study**. Devon-United Kingdom, 2004.

TOMIĆ, Neda Tešan; SMILJANIĆ, Slavko; JOVIĆ, M; GLIGORIĆ, M; POVRENOVIĆ, Dragan; DOŠIĆ, A. Examining the Effects of the Destroying Ammunition, Mines and Explosive Devices on the Presence of Heavy Metals in Soil of Open Detonation Pit; Part 2: Determination of Heavy Metal Fractions. **Water, Air, & Soil Pollution**, Springer, v. 229, n. 9, p. 1–20, 2018.

TORNOS CNC - linha CENTUR. Disponível em: [https://www.romi.com/wp-content/uploads/2016/02/cat\\_romi\\_centur\\_leves\\_po\\_ap\\_092021\\_baixa.pdf](https://www.romi.com/wp-content/uploads/2016/02/cat_romi_centur_leves_po_ap_092021_baixa.pdf). Acesso em: 14 mar. 2022.

U. S. ARMY MATERIEL COMMAND - USAMC. **Ammunition Series, Fuzes - AMCP 706-210**. Washington-DC, 1969.

U. S. ARMY MATERIEL COMMAND - USAMC. **Ammunition Series, Section 1, Artillery Ammunition - General - AMCP 706-244**. Washington-DC, 1963.

U. S. ARMY MATERIEL COMMAND - USAMC. **Ammunition Series, Section 4, Design for Projection - AMCP 706-247**. Washington-DC, 1964.

U. S. ARMY MATERIEL COMMAND - USAMC. **Ballistics Series, Interior Ballistics of Gun - AMCP 706-150**. Washington-DC, 1965a.

U. S. ARMY MATERIEL COMMAND - USAMC. **Explosives Series - Explosive Trains - AMCP-706-179**. Washington-DC, 1965b.

U. S. ARMY MATERIEL COMMAND - USAMC. **Properties of explosives of military interest - AMCP 706-177**. Washington-DC, 1971.

U.S. ENVIRONMENTAL AND PROTECTION AGENCY - EPA. **Life Cycle Assessment: Principles and Practice**. Cincinnati-Ohio, 2006.

UBIRAJARA, V.; SÉRGIO, R.; MÁRIO, P.; JOSÉ, R.; ALCIO, A. **Engenharia dos explosivos: um enfoque dual**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2013.

WALSH, M.R.; THIBOUTOT, S.; WALSH, M.E.; AMPLEMAN, G. Controlled expedient disposal of excess gun propellant. **Journal of hazardous materials**, Elsevier, v. 219, p. 89–94, 2012.

---

WOLF, M.; PANT, R.; CHOMKHAMRSRI, K.; SALA, S.; PENNINGTON, D. **JRC Reference Report “The international reference life cycle data system (ILCD) handbook”**. Luxembourg: Publications of the European Union, 2012.

## APÊNDICE A – PRINCIPAIS COMPONENTES DE MUNIÇÕES E FUNCIONAMENTO GERAL

As munições são montadas com vários componentes, cada um com papel bem definido na estrutura de funcionamento do produto. A Figura 6, apresentada no início do trabalho, ilustra, de maneira geral, os principais componentes existentes nas munições.

De maneira a complementar as informações apresentadas na Seção 2.1, serão apresentadas, a seguir, algumas características e funcionalidades dos principais componentes utilizados em munições convencionais de grande calibre.

### A.1 PROJÉTIL

O termo projétil pode ser definido como um "objeto que é ejetado do armamento devido à ação da pressão do gás desenvolvida pela queima da carga de propulsão"(USAMC, 1963, p. 1-1, tradução nossa). Popularmente, esse termo é conhecido como "bala" de arma de fogo.

Em geral, entende-se por projétil o produto que se desloca no interior do tubo do armamento em consequência do aumento da pressão promovida pela queima da carga de propulsão, desenvolvido com parâmetros bem definidos e em conjunto com as características do armamento, de maneira que seja possível predizer sua performance de balística interna<sup>1</sup>, externa<sup>2</sup> e terminal<sup>3</sup>, após o disparo do armamento.

De uma maneira geral, a Figura 57 ilustra os principais componentes dos projéteis. No caso de munição de morteiro, algumas diferenças podem ser verificadas, conforme ilustrado na Figura 6, apresentada anteriormente.

A espoleta é o componente do projétil responsável pela iniciação da carga explosiva existente em seu interior. Além disso, ela carrega consigo os elementos necessários para garantir a segurança de manuseio, transporte e utilização do projétil. Devido à sua complexidade, esse componente será abordado mais detalhadamente no Apêndice A.4.

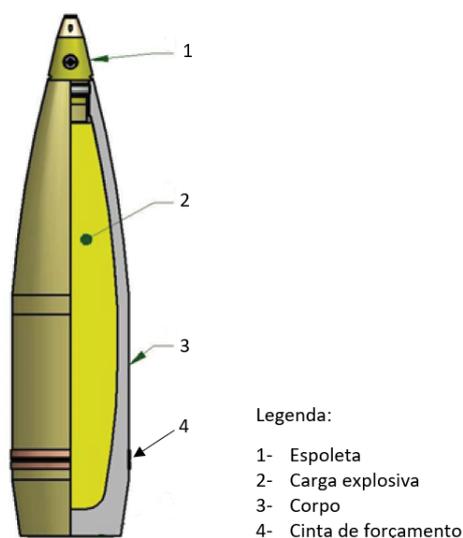
Nomalmente, o corpo do projétil é fabricado em liga de aço e, em geral, através dos processos de fabricação conhecidos como forjamento ou fundição. Além disso, diversos processos de usinagem são empregados até a obtenção da forma final. Em diversos casos, o tratamento térmico também é realizado. Tem a finalidade de aco-

<sup>1</sup> "Campo da balística que estuda os fenômenos resultantes da interação entre armamento, projétil e carga de propulsão até o momento de saída do projétil pela boca do tubo do armamento". Fonte: (CARLUCCI; JACOBSON, 2008, p. 4, tradução nossa)

<sup>2</sup> "Campo da balística que trata dos fenômenos existentes desde a saída do projétil pela boca do tubo do armamento até o momento que precede o impacto no alvo". Fonte: (CARLUCCI; JACOBSON, 2008, p. 4, tradução nossa)

<sup>3</sup> "Campo da balística que estuda os fenômenos que ocorrem quando o projétil atinge o alvo". Fonte: (CARLUCCI; JACOBSON, 2008, p. 4, tradução nossa)

Figura 57 – Ilustração geral dos projetis e seus componentes.



Fonte: Modificada de MSM-Group (2021a).

modar a carga explosiva e transportá-la até o alvo, além de permitir a montagem de outros componentes essenciais ao perfeito funcionamento do produto.

O carregamento explosivo é, normalmente, um alto explosivo com grande poder de detonação, capaz de fragmentar o corpo que o envolve e produzir uma grande onda de choque. Devido à complexidade desse componente, maiores detalhes serão apresentados no Apêndice A.2.

A cinta de forçamento é fabricada, normalmente, em cobre ou em latão. Tem a finalidade de obturar os gases à retaguarda do projétil e, também, de promover o movimento de rotação do projétil durante o seu deslocamento no interior do tubo do armamento. Alguns projetis são projetados para serem estabilizados por empenas durante o voo e não por rotação. Nestes casos, a cinta de forçamento é denominada de cinta ou anel de obturação e é, em geral, fabricada em material polimérico. Outras munições, principalmente as de morteiro, podem ser projetadas sem as cintas de forçamento e de obturação.

Conforme apresentado por Carlucci e Jacobson (2008, p. 111), os projetis podem ser classificados em 2 (duas) categorias diferentes: transportador de carga e energia cinética. A primeira, caracteriza-se por apresentar projetis capazes de carregar em seu interior algum tipo de produto relacionado à sua função terminal. A última, caracteriza-se por apresentar projetis com elevada velocidade inicial.

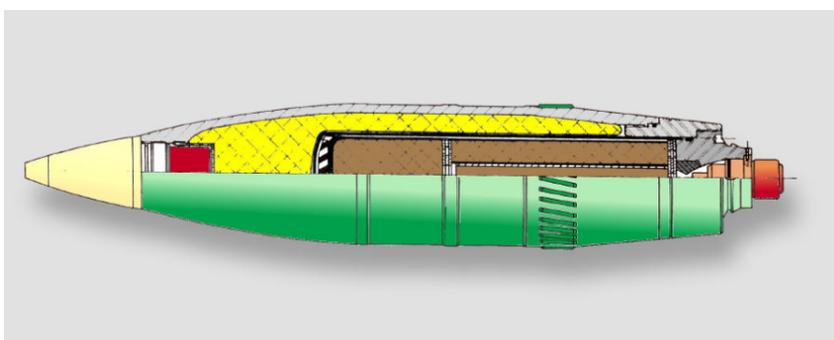
Em geral, dentro das categorias citadas anteriormente e de acordo com o DoA (1969), os projetis ainda podem ser classificados quanto ao tipo em:

- **AE**: este tipo de projétil carrega em seu interior uma certa quantidade de material alto explosivo, como o TNT e o Composto-B, por exemplo. Tem grande potencial

explosivo e de fragmentação. Conseqüentemente, é utilizado contra alvos do tipo pessoas ou construções. Normalmente, é montado com espoleta de ogiva, que pode ser iniciada por impacto ou por tempo. A Figura 6-a) ilustra uma munição com este tipo de projétil.

- **Alto Explosivo com Propulsão Adicional (AE PA):** é similar ao projétil AE, porém é montado com um motor foguete em sua base, fornecendo-lhe propulsão adicional durante o voo, o que lhe permite alcançar uma maior distância. A Figura 58 ilustra esse tipo de projétil.

Figura 58 – Ilustração geral de projétil 120 mm AE PA.



Fonte: TDA (2021).

- **Alto Explosivo Plástico (AE P):** este projétil carrega em seu interior uma certa quantidade de alto explosivo do tipo plástico, como o Composto A3<sup>4</sup>. O corpo do projétil possui paredes relativamente finas, o que lhe oferece grande capacidade de deformação na ocasião do impacto. É utilizado contra pessoas, alvos blindados e construções. Normalmente, é montado com uma espoleta de base, iniciada por impacto. A Figura 6-c) ilustra uma munição com este tipo de projétil.
- **Alto Explosivo Anti Tanque (AE AT):** trata-se de um projétil AE, com a carga explosiva delimitada por um componente de material metálico e de formato específico, geralmente cônico ou semi-circunferencial, que lhe confira capacidade de perfuração do alvo. Usualmente, é conhecido como projétil *carga oca*. Normalmente, é montado com uma espoleta de base, iniciada na extremidade anterior do projétil no momento do impacto com o alvo. É utilizado para perfuração de alvos blindados. A Figura 59 ilustra uma munição 90 mm montada com este tipo de projétil.
- **Químico:** trata-se de um projétil com corpo semelhante ao projétil AE. Porém, carrega em seu interior um produto químico no lugar do alto-explosivo, como o fósforo branco ou um gás químico, por exemplo. É utilizado contra pessoas. A Figura 60 ilustra uma munição 105 mm que é montada com este tipo de projétil.

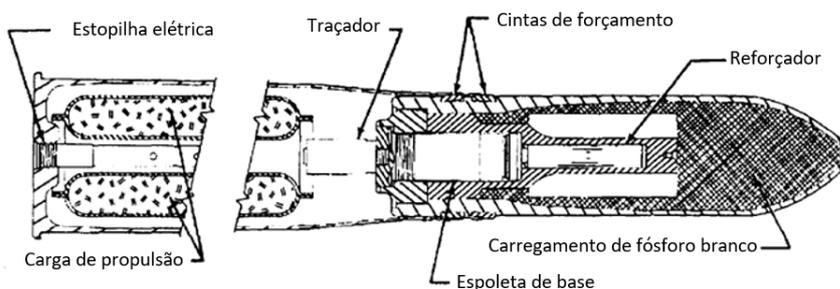
<sup>4</sup> Alto explosivo formado por 91% de RDX e 9% de cera. Fonte: USAMC (1971)

Figura 59 – Ilustração geral de uma munição com projétil AE AT.



Fonte: Barbosa e Silva (2016).

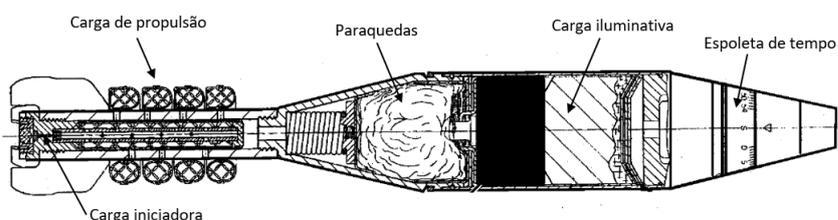
Figura 60 – Ilustração geral da munição 105 mm Fumígena M416.



Fonte: Modificado de DoA (1994).

- **Iluminativo:** este projétil carrega em seu interior uma carga que é ejetada durante o voo, a qual queima um produto químico que libera energia em forma de calor e luminosidade, com a finalidade de iluminar uma determinada área de visibilidade reduzida. O carregamento ejetado é dotado de paraquedas, que lhe permite desacelerar a sua queda e aumentar o tempo de fornecimento de luminosidade. A figura 61 ilustra uma munição de morteiro de 60 mm iluminativa.

Figura 61 – Ilustração geral da munição de morteiro 60 mm Iluminativa M767.



Fonte: Modificado de DoA (1994).

- **Perfurante:** trata-se de projétil com elevada velocidade inicial, que possui um núcleo fabricado com material muito duro e de elevada densidade. Ao atingir

o alvo, boa parte da energia cinética do projétil é dissipada em forma de calor, proporcionando-lhe grande poder de perfuração. É utilizado contra alvos blindados. A Figura 62 ilustra, de maneira geral, um projétil 105 mm do tipo perfurante.

Figura 62 – Ilustração geral de um projétil do tipo perfurante.



Fonte: Modificado de T&D (2021b).

- **Antipessoal:** este projétil contém em seu interior um carregamento de flechetes, feitos de aço e estabilizados com empenas<sup>5</sup>. Normalmente, é montado com uma espoleta de tempo. É utilizado contra pessoal. A Figura 63 apresenta uma imagem de um projétil seccionado do tipo antipessoal, oportunidade em que podem ser visualizados os flechetes carregados no seu interior.

Figura 63 – Projétil antipessoal 90 mm M594 seccionado.



Fonte: QUORA (2021).

- **Cânister:** trata-se de projétil fabricado em metal leve, que possui em seu interior um carregamento composto, normalmente, de esferas de aço. Quando o projétil

<sup>5</sup> Parte do projétil que tem a finalidade de proporcionar estabilidade ao mesmo durante o voo. Fonte: USAMC (1963, G-7, tradução nossa)

sai do tubo do armamento, o corpo do projétil se rompe, liberando toda a sua carga interior. Não possui carregamento explosivo e o alcance é bastante curto. É utilizado contra pessoas. A Figura 64 ilustra uma munição 120 mm montada com um projétil do tipo cânister.

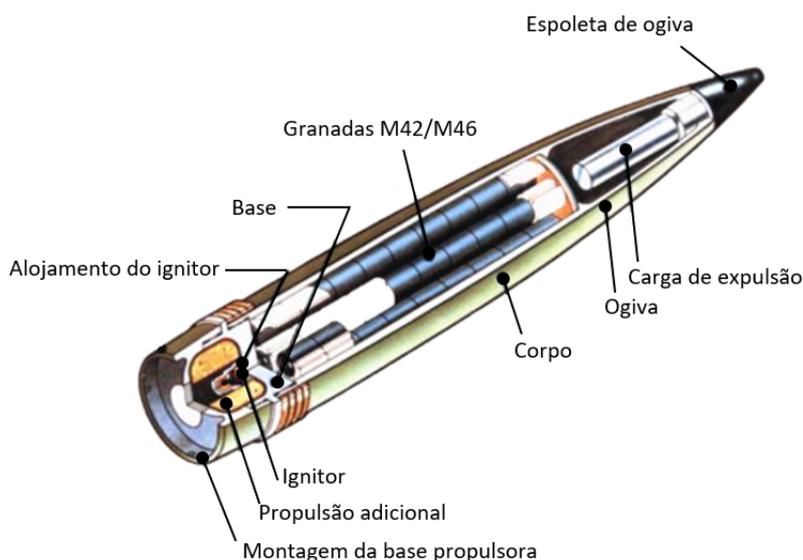
Figura 64 – Exemplo de munição 120 mm com projétil do tipo cânister.



Fonte: NAMMO (2021).

- **Duplo propósito:** este projétil reúne em si características que lhe conferem potencial para combinar duplo propósito de utilização, como a capacidade de perfuração e o efeito antipessoal, por exemplo. A Figura 65 ilustra um projétil 155 mm de duplo propósito.

Figura 65 – Ilustração do projétil 155 mm M864.



Fonte: Modificado de GlobalSecurity.org (2021).

A Tabela 33 apresenta, de maneira geral e resumida, as principais classificações dos projéteis.

Tabela 33 – Classificação geral dos projetis.

CLASSIFICAÇÃO DO PROJÉTIL		
Quanto à categoria	Transportador de carga	Energia cinética
Quanto ao tipo	AE AE PA AE P AE AT Químico Iluminativo Antipessoal Cânister Duplo efeito	Perfurante

Fonte: Adaptado de DoA (1969).

## A.2 EXPLOSIVOS

Atualmente, existe uma grande variedade de explosivos. Entretanto, tendo em vista os objetivos e a natureza deste trabalho, serão analisados apenas aqueles usualmente utilizados em munições.

Conforme apresentado na USAMC (1963), os explosivos são classificados em dois grupos básicos: baixo explosivos e alto explosivos.

Os baixo explosivos ou propelentes reagem através do processo conhecido como queima, numa taxa que depende de alguns fatores como a pressão, o formato, tamanho e composição do grão propelente. Devido à sua importância e complexidade, esse tipo de explosivo será analisado à parte, no Apêndice A.3.

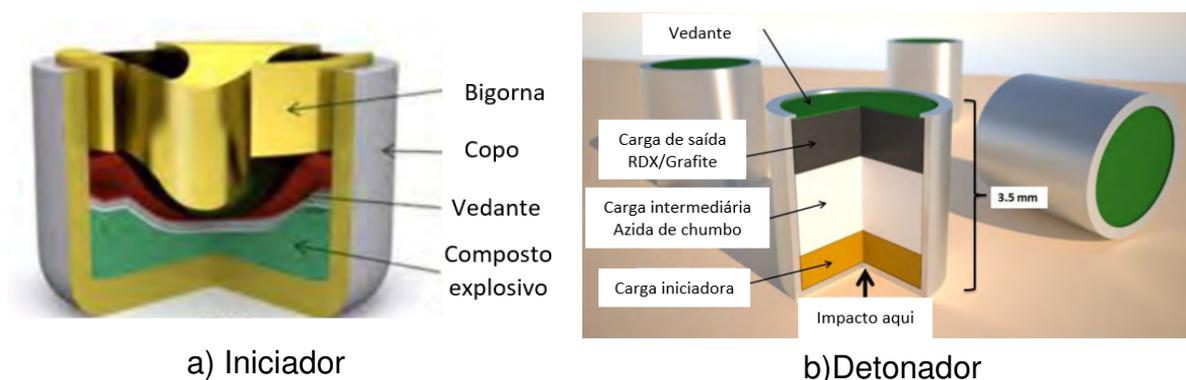
Diferentemente dos baixo explosivos, os alto explosivos possuem capacidade de detonação, fenômeno no qual "a taxa de reação é determinada pela velocidade da onda de choque, não pela taxa de transferência de calor". DoA (1984, p. 3-1, tradução nossa)

Tanto a queima quanto a detonação são reações exotérmicas e autosuficientes, ou seja, liberam grande quantidade de calor e têm a capacidade de se autoalimentar após a aplicação de uma fonte de energia de ativação.

Na área de fabricação de munições, devido às propriedades e particularidades de cada material, os explosivos são utilizados em conjunto, num arranjo denominado *trem explosivo*, onde os elementos são dispostos ordenadamente de maneira decrescente em relação à sensibilidade de iniciação e crescente em relação à potência, cujo objetivo é "transformar, através de eventos controlados, um impulso de pequena magnitude em outro com energia suficiente para iniciar a carga principal". (USAMC, 1965b, p. 1, tradução nossa)

As características de sensibilidade e potência caracterizam os alto explosivos em *primários* ou *secundários*.

Figura 66 – Ilustração geral de iniciadores e detonadores.



Fonte: Adaptado de Oyler *et al.* (2015).

Os *explosivos primários* são aqueles facilmente detonados por calor, impacto, faísca ou fricção. Normalmente, são utilizados para iniciar a detonação nos iniciadores, retardadores e detonadores. Os *explosivos secundários* são aqueles que apresentam menor sensibilidade e maior potência de detonação que os primários. Normalmente, são utilizados nos reforçadores e na carga principal.

"O *iniciador* é um componente explosivo relativamente pequeno e de elevada sensibilidade, utilizado como primeiro elemento num *trem explosivo*. Funciona como um transdutor de energia, convertendo energia mecânica ou elétrica em energia explosiva". (USAMC, 1965b, p. 62, tradução nossa)

Segundo Oyler *et al.* (2015, p. 1, tradução nossa), "os *detonadores* são projetados para produzir uma onda de choque e são tipicamente utilizados para iniciar um explosivo secundário menos sensível e mais potente".

Em diversos projetos de *trem explosivo*, faz-se necessária a inserção de um intervalo de tempo (*delay*) entre o recebimento do estímulo inicial, mecânico ou elétrico, e a resposta final. Nesses casos, são utilizados os componentes *retardadores*.

Dentre os explosivos primários, destacam-se a azida de chumbo, o estifinato de chumbo e o tetraceno. Em relação aos explosivos secundários, destacam-se o tetril e o RDX, nos reforçadores, e o TNT, Composto B e o Composto A-3<sup>6</sup>, na carga principal.

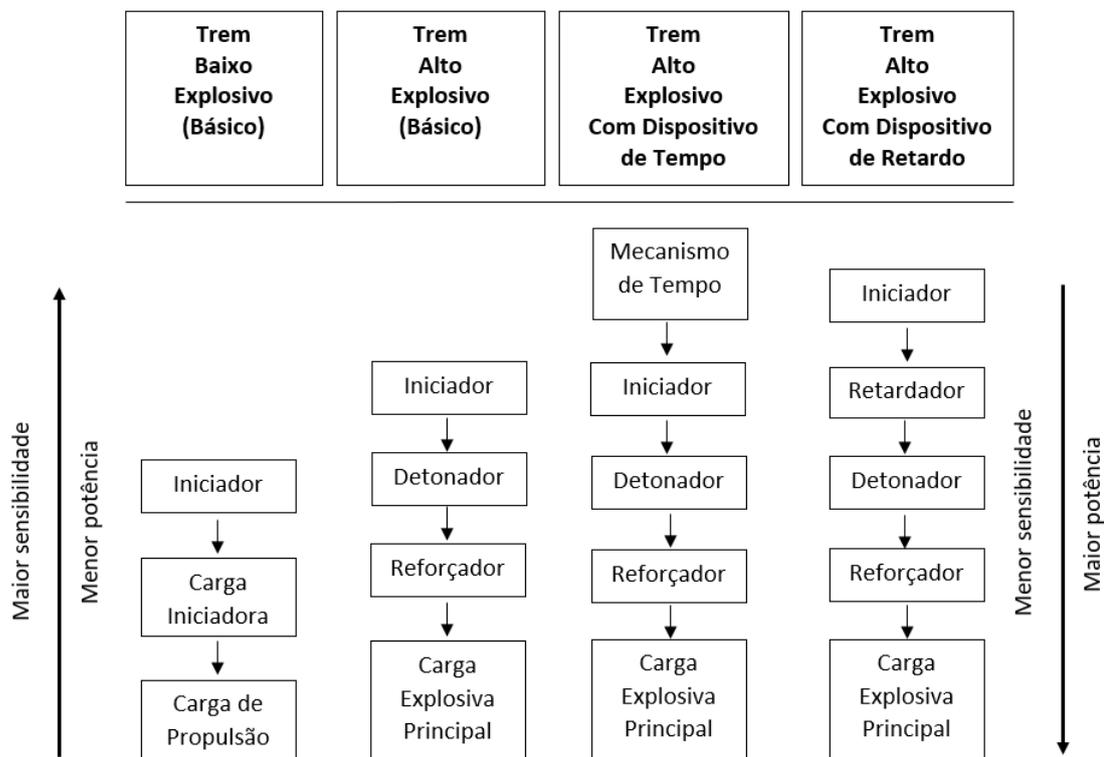
A Figura 66 ilustra, de maneira geral, a estrutura dos *iniciadores* e *detonadores*.

A Figura 67 apresenta, de maneira esquemática, os componentes gerais existentes no arranjo do *trem explosivo*. Já a Figura 68 ilustra, de maneira geral e simplificada, a aplicação de um *trem explosivo*, nas situações de desarmado e armado, utilizado em espoletas para iniciação da carga explosiva principal da munição.

Encontra-se no Anexo E, de maneira resumida, algumas propriedades dos explosivos mais comumente utilizados na fabricação de munição.

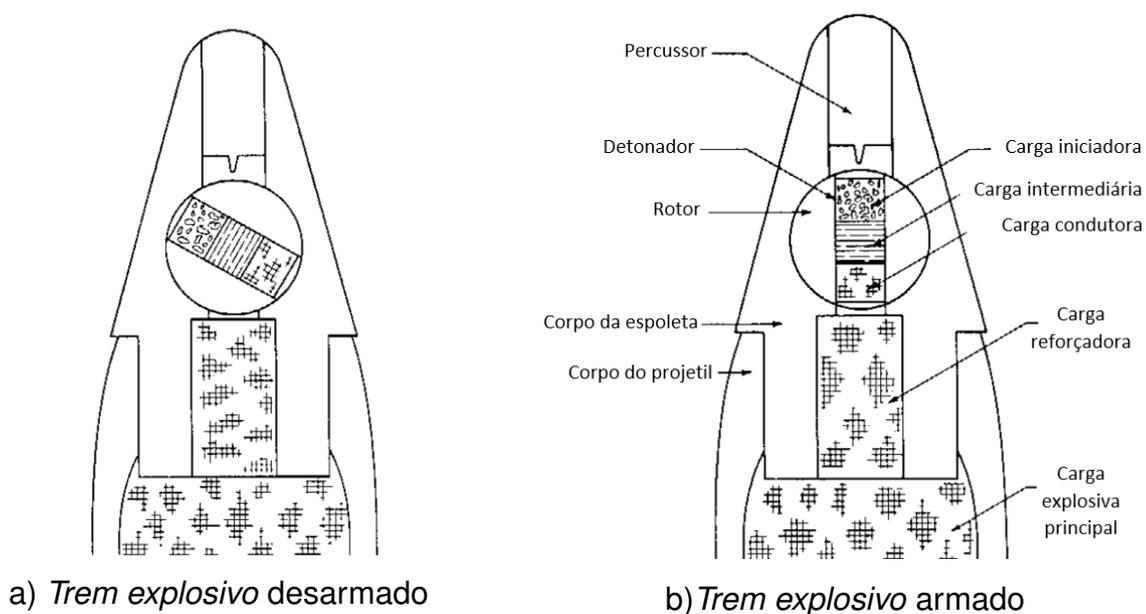
<sup>6</sup> Alto explosivo composto por 91% de RDX e 9% de cera. Fonte: (DOA, 1967).

Figura 67 – Configuração esquemática do arranjo dos componentes do *trem explosivo*.



Fonte: Modificado de DoA (1967).

Figura 68 – Ilustração geral simplificada da aplicação de um *trem explosivo*.



Fonte: Modificado de USAMC (1965b).

### A.3 PROPELENTE

Como visto anteriormente, o propelente é um baixo explosivo, cujo propósito é "ejetar o projétil do armamento numa velocidade pré-estabelecida."(USAMC, 1963, p. 1-6, tradução nossa)

De acordo com o DoA (1984), os propelentes podem ser divididos em 4 (quatro) classes:

- BS;
- BD;
- *Base Tripla (BT)*; e
- Compósitos ou *composites*.

Os propelentes da classe BS contém a NC como ingrediente principal. Podem conter, também, outros materiais aditivos e estabilizantes. Normalmente, são utilizados em munições de armamentos leves, de canhões e obuseiros.

A classe de propelentes BD contém os materiais NC e NG como os ingredientes principais. Similarmente aos propelentes de BS, também pode conter aditivos e estabilizantes em sua formulação. Em geral, são utilizados em munições de canhão, obuseiro, morteiro, foguetes e unidades de propulsão.

Os propelentes da classe BT contém como ingredientes principais a NC, NG e a NQ, sendo este último utilizado em maior quantidade que os demais. O ingrediente NQ é utilizado com a finalidade de produzir uma maior quantidade de gases resultantes da queima do propelente e em temperaturas mais baixas. Por um lado, uma maior quantidade de gases contribui para uma maior força de impulsão do projétil, o que resulta em maiores velocidades. Por outro lado, temperaturas mais baixas de queima resultam em um menor desgaste da alma do tubo do armamento. Também podem ser utilizados aditivos e estabilizantes na fabricação de propelentes da classe BT. Normalmente, são utilizados em munições de canhões que requerem elevada velocidade de partida do projétil.

Por último, os propelentes da classe compósitos, normalmente, "não utilizam NC e nem nitratos orgânicos. Geralmente, consistem de uma mistura física de combustível, aglutinante e oxidante inorgânico. São estruturas físicas heterogêneas."(DOA, 1984, p. 3-3, tradução nossa) Normalmente, são utilizados em foguetes ou em unidades de propulsão a jato.

Existem alguns materiais que podem ser adicionados à formulação do propelente com o intuito de modificar as propriedades iniciais da NC. Seguem, abaixo, a definição de algumas propriedades relacionadas aos propelentes, conforme apresentado na USAMC (1964):

- **Estabilidade:** é a capacidade do material não se decompor ou apresentar decomposição numa taxa muito pequena de maneira a apresentar funcionamento normal mesmo após longo período de armazenamento. A NC, ingrediente comum aos propelentes, é um material instável por natureza. É importante que os propelentes sejam materiais estáveis.
- **Higroscopicidade:** é a capacidade do material absorver umidade do ar. Ressalta-se que a higroscopicidade é uma propriedade indesejável aos propelentes, uma vez que o aumento da umidade na mistura pode acelerar o processo de decomposição do material e prejudicar as propriedades balísticas do propelente.
- **Calor de queima:** é a quantidade de calor liberada durante a queima do propelente. A baixa concentração de oxigênio numa mistura propelente pode prejudicar a queima do grão e, conseqüentemente, a eficiência balística. Porém, uma elevada concentração de oxigênio na mistura pode acentuar o calor liberado na queima do propelente podendo acentuar a erosão da alma do tubo e provocar intensa luminosidade na *boca* do tubo (*muzzle flash*), o que não é desejável. Portanto, ressalta-se a importância de um adequado equilíbrio no balanço de oxigênio na mistura propelente.
- **Controle na queima:** refere-se à taxa de queima do grão propelente. Essa propriedade pode ser ajustada quimicamente, através da adição de materiais inibidores à superfície do grão, ou fisicamente, através do formato geométrico do grão. Quanto maior a velocidade de queima do grão maior será a quantidade de gases produzidos num determinado intervalo de tempo e, conseqüentemente, maior será a pressão interna no tubo. Portanto, essa propriedade deve ser ajustada de maneira a obter-se a velocidade inicial de projeto do projétil e respeitando os limites de resistência estrutural do tubo.
- **Luminosidade e fumaça:** trata-se da intensidade de luminosidade e da quantidade de fumaça produzidos com a queima do propelente e que saem pela *boca* do tubo. É importante ressaltar que a luminosidade e a fumaça são produtos indesejáveis da queima do propelente, pois podem facilitar a identificação da posição do armamento, por parte das tropas inimigas, durante os disparos diurnos e/ou noturnos.
- **Condutividade elétrica:** é a capacidade do material em transportar cargas elétricas. Normalmente, aplica-se o grafite na superfície do grão propelente com a finalidade de aumentar a condutividade elétrica e diminuir os riscos causados pelo acúmulo de cargas estáticas durante o manuseio.
- **Resíduos:** trata-se dos materiais não queimados resultantes da queima do propelente e que permanecem no interior do tubo. O resíduo é um produto indesejável

e, portanto, a formulação do propelente deve ser realizada de maneira a evitá-lo ou reduzi-lo.

A Tabela 34 apresenta os materiais mais comumente utilizados na formulação dos propelentes e as respectivas funcionalidades.

Tabela 34 – Materiais comumente utilizados na fabricação dos propelentes e as respectivas funções.

MATERIAL	FUNÇÃO									
	Reduzir a higroscopicidade	Estabilizante	Plastificante	Inibidor	Reduzir a temperatura de queima	Reduzir a luminosidade	Reduzir a erosão da alma do tubo	Aumentar a condutividade elétrica	Controlar a taxa de queima	Fonte de oxigênio
NG	X		X							X
NQ						X	X			
DNT	X		X	X			X		X	
Metil centralita			X	X		X	X		X	
Etil centralita	X	X	X	X	X	X	X		X	
<i>Dinitrato de Dietilenoglicol (DEGN)</i>			X			X	X			
DPA		X								
<i>Dibutilftalato (DBT)</i>	X		X	X	X	X	X		X	
<i>Ftalato de Dietila (DET)</i>						X	X		X	
Trinitronaftaleno		X			X					
Óleo mineral		X	X		X		X			
Nitrato de bário						X				
Nitrato de potássio						X				
Perclorato de potássio						X			X	
Sulfato de potássio						X				
Grafite								X		
Criolita						X				

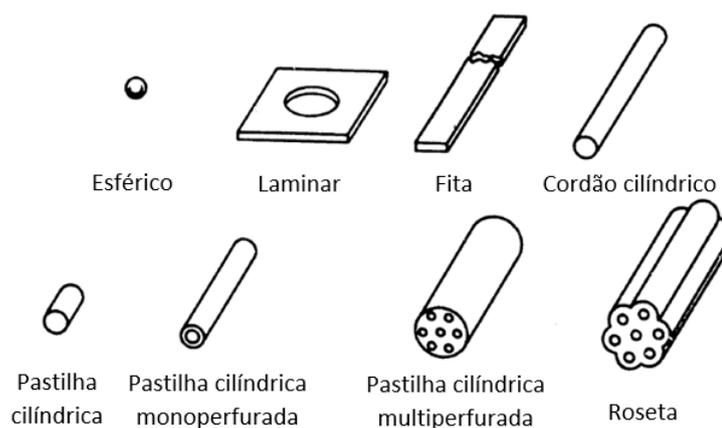
Fonte: Modificado de USAMC (1964).

Conforme dito por Carlucci e Jacobson (2008, p. 35, tradução nossa), "a queima do propelente sólido é um fenômeno de superfície". Portanto, fica evidente que a geometria do grão propelente é um dos parâmetros fundamentais na balística interna, pois a evolução de produção de gás está diretamente relacionada com a evolução da superfície total do grão em processo de queima.

Se, durante a queima, a área superficial do grão diminuir com o transcurso de um determinado tempo, o grão é considerado do tipo *regressivo*, ou seja, o volume de gás produzido durante a queima do grão diminui com o passar do tempo. Caso a área superficial permaneça constante, trata-se de um grão *neutro*, ou seja, o volume de produção de gás permanece constante durante o processo de queima do grão. E, por último, se a área superficial aumentar, o grão é *progressivo*, ou seja, o volume de gás produzido aumenta durante a queima do grão propelente.

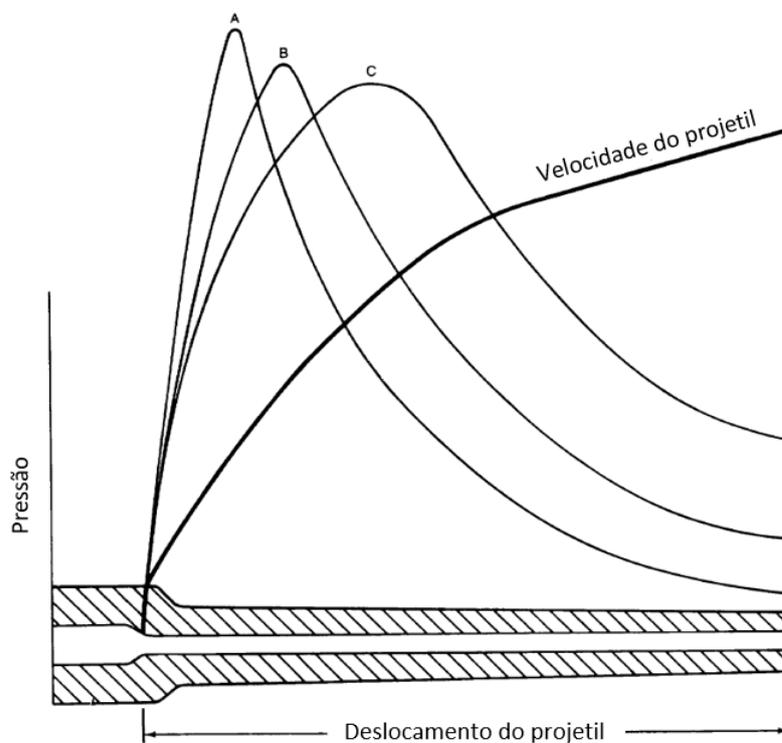
As Figura 69 e 70 ilustram, de maneira representativa, os formatos comumente utilizados na fabricação de grãos propelentes e os efeitos provocados pelas características geométricas do grão propelente na curva de pressão e deslocamento do projétil no interior do tubo, respectivamente.

Figura 69 – Formatos típicos utilizados na fabricação de grãos propelentes.



Fonte: Modificado de USAMC (1965a).

Figura 70 – Efeitos da configuração geométrica do grão na curva de pressão e deslocamento do projétil no interior do tubo.



Legenda:

A: Grão regressivo - B: Grão neutro - C: Grão progressivo

Fonte: Modificado de DoA (1984).

#### A.4 ESPOLETA

A espoleta é um componente da munição montado no projétil e que tem a função de "(a) prover a segurança da munição durante o manuseio, transporte, armazenamento e utilização; (b) armar ou alinhar o trem explosivo existente em seu interior durante o lançamento do projétil, habilitando-o à detonação."(USAMC, 1969, p. 1-1, tradução nossa)

Conforme apresentado no DoA (1969, p. 4-18), as espoletas podem ser classificadas de acordo com a posição em que é montada no corpo do projétil e em relação ao seu método de funcionamento. Em relação à sua posição, elas podem ser classificadas como de base (*base-detonating*), de ogiva (*point-detonating*) ou de iniciação na ogiva e detonação pela base (*point-initiating and base-detonating*). Em relação ao método de funcionamento, elas podem ser classificadas como de impacto, tempo, proximidade ou mista.

As espoletas de impacto ou percussão são aquelas que iniciam a detonação do trem explosivo após o impacto do projétil com o alvo.

As espoletas de tempo são aquelas dotadas de mecanismos que permitem a sua iniciação durante o voo do projétil, ou seja, transcorrido um determinado tempo após o disparo do projétil.

As espoletas de proximidade são dotadas de mecanismos transmissores e receptores de sinal. À medida que o projétil se aproxima do alvo, o tempo compreendido entre o envio e a recepção do sinal diminui. Quando este tempo se iguala a um tempo pré-determinado, um circuito elétrico é fechado e uma corrente elétrica é gerada, iniciando o trem explosivo da espoleta.

As espoletas mistas empregam um ou mais métodos de funcionamento apresentados anteriormente.

A Tabela 35 apresenta, resumidamente, as classificações gerais apresentadas pelas espoletas.

Tabela 35 – Classificação geral das espoletas.

<b>CLASSIFICAÇÃO DA ESPOLETA</b>	
<b>Quanto à posição</b>	Ogiva ( <i>point-detonating</i> ) Base ( <i>base-detonating</i> ) Iniciação pela ogiva e detonação pela base ( <i>point-initiating and base-detonating</i> )
<b>Quanto ao método de funcionamento</b>	Impacto ou percussão Tempo Proximidade Mista

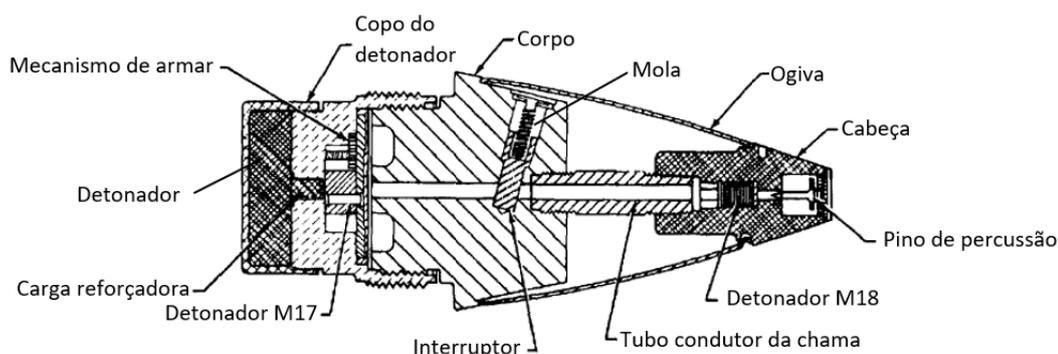
Fonte: DoA (1969).

#### A.4.1 Descrição e funcionamento geral

Atualmente, são inúmeras as variedades de espoletas existentes no mercado. Cada uma delas é projetada para atender as especificações de projeto das munições em que são utilizadas. Não é o objetivo deste trabalho demonstrar os detalhes de funcionamento de cada uma delas. A intenção é que fique claro o princípio básico de funcionamento, a função dos principais componentes e os materiais usualmente utilizados em sua fabricação.

Portanto, com a finalidade de ilustrar os componentes normalmente utilizados numa espoleta e explicar o princípio de funcionamento desse componente de munição, a Figura 71 apresenta uma ilustração geral da vista seccionada da espoleta PD M508, classificada como de ogiva e de percussão. Essa espoleta foi escolhida como exemplo por apresentar estrutura e funcionamento simplificados.

Figura 71 – Ilustração geral da espoleta PD M508.



Fonte: Modificado de DoA (1994).

Observando a Figura 71 percebe-se a existência de um pino percussor que fica retido em sua posição inicial até que a espoleta atinja o alvo, evitando que o detonador M18 seja iniciado prematuramente. O corpo da espoleta possui um interruptor, que bloqueia a passagem da chama pelo *tubo condutor da chama* até o detonador M17, sendo considerado como um primeiro estágio de segurança contra uma indesejada detonação. O detonador M17 encontra-se, inicialmente, desalinhado em relação ao *tubo condutor da chama*, confirmando que a espoleta encontra-se desarmada, sendo considerado um segundo estágio de segurança e contribuindo para aumentar o nível de segurança do sistema contra uma detonação indesejada. A ogiva tem a finalidade de oferecer proteção e bom perfil aerodinâmico à espoleta.

Quando ocorre o disparo da munição, o projétil inicia o seu movimento de translação e rotação no interior do tubo. Durante esse percusso, o projétil é submetido a elevada aceleração linear e angular. Devido à força resultante da aceleração linear (*setback force*), as peças da espoleta não conseguem se movimentar no interior do tubo. Ao sair do tubo do armamento, o projétil deixa de ser impulsionado pelos gases oriundos da queima da carga de propulsão e o movimento do projétil começa a ser

do tipo retardado. À partir desse momento, as peças da espoleta ficam livres para se movimentar.

Devido à aceleração angular do projétil, o interruptor comprime a sua mola, desobstruindo o *tubo condutor da chama*. Adicionalmente, o mecanismo de armar também inicia o seu movimento de rotação. Como ele é montado com um conjunto de engrenagens, demora um determinado tempo até ele alinhar o detonador M17 com o *tubo condutor da chama*. Quando esse alinhamento acontece, diz-se que a espoleta está armada, ou seja, encontra-se pronta para perfeito funcionamento.

Quando o projétil impacta o alvo, o pino percussor avança e percute o detonador M18, promovendo a sua detonação. A chama liberada pelo detonar M18 é conduzida através do *tubo condutor da chama* até atingir o detonador M17, que também é iniciado. Este, por sua vez, inicia a carga reforçadora que promove a detonação do detonador principal, que, por consequência, promove a detonação da carga explosiva do projétil.

A Tabela 36 apresenta, de forma geral, os principais materiais que são utilizados para fabricação dos componentes da espoleta.

Tabela 36 – Materiais usualmente utilizados na fabricação das espoletas.

COMPONENTE	MATERIAL
Ogiva	Aço, alumínio
Corpo da espoleta	Aço, alumínio
Copo do detonador	Alumínio
Interruptor	Aço, alumínio
Mecanismo de armar	Aço, latão
Corpo do mecanismo de armar	Aço, alumínio
Detonador (iniciador)	RDX, tetril, azida de chumbo, fulminato de mercúrio
Detonador (reforçador)	RDX, tetril
Detonador (principal)	RDX, tetril
Pino percussor	Aço

Fonte: DoA (1994) e USAMC (1971).

Algumas espoletas ainda podem apresentar outros componentes que não estão ilustrados na Figura 71, como as cápsulas retardadoras (*delay*), por exemplo. Essas cápsulas são inseridas no trem explosivo com a finalidade de atrasar ou retardar a iniciação do detonador principal da espoleta.

As espoletas destinadas às munições estabilizadas por empenas, que não possuem rotação ou possuem rotações muito baixas, necessitam de um sistema projetado para funcionar sem aceleração angular. Muitos deles utilizam molas como forma de armazenamento de energia, de maneira a promover a translação ou rotação das peças do mecanismo de armar e o consequente alinhamento do detonador ao *trem explosivo*. Em relação à segurança, normalmente são utilizados pinos que travam o movimento de peças do mecanismo de armar e não permitem o alinhamento do *trem explosivo*. Apenas por ação da aceleração de partida do projétil é que o pino se movimenta, destravando as peças do mecanismo de armar e deixando-as livres para se

movimentarem.

## A.5 ESTOPIILHA

Define-se a estopilha como "componente integrante do trem explosivo da carga de propulsão responsável por produzir a chama para iniciar a queima dos grãos propelentes". (DOA, 1969, p. 4-15, tradução nossa)

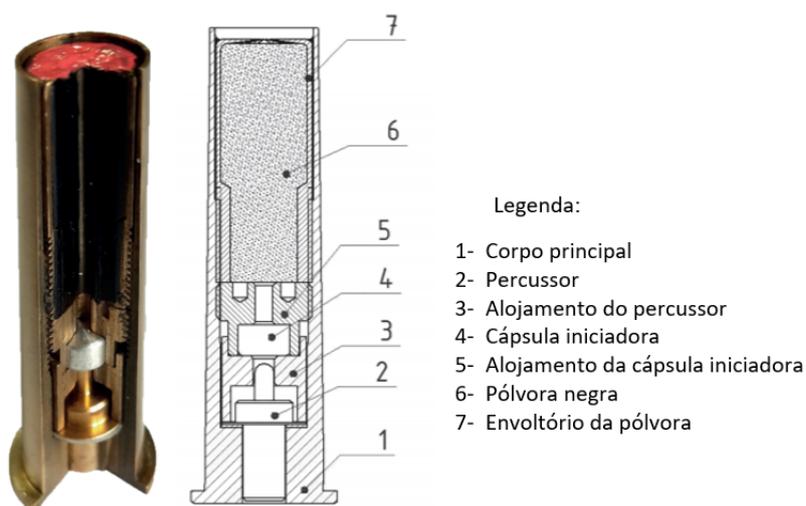
Em alguns casos, dependendo do tipo de munição ou sistema em que é utilizado, este componente também é conhecido como *carga iniciadora* ou *cartucho carga zero*.

De acordo com o princípio de iniciação, as estopilhas podem ser classificadas em:

- De percussão;
- Elétrica;
- Mista.

As Figuras 72 e 73 ilustram, respectivamente, a configuração geral das estopilhas de percussão e elétrica. As estopilhas do tipo mista podem ser iniciadas tanto por percussão quanto eletricamente.

Figura 72 – Ilustração geral da estopilha de percussão M82.

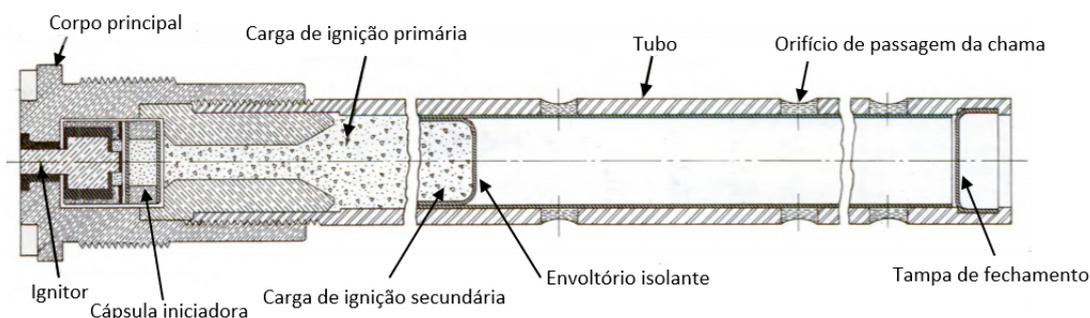


Fonte: Modificado de MSM-Group (2021b).

Nas munições encartuchadas, as estopilhas são montadas na base do estojo, como ilustrado na Figura 6-a). Nas munições desencartuchadas, elas podem ser montadas no tubo da empena, conforme ilustra na Figura 6-b), ou no mecanismo de disparo do armamento, como é o caso das munições de artilharia calibre 155 mm.

A Tabela 37 apresenta, de forma geral, os principais materiais que são utilizados para fabricação dos componentes da estopilha.

Figura 73 – Ilustração geral de uma estopilha elétrica.



Fonte: Modificado de DOG (1955).

Tabela 37 – Materiais usualmente utilizados na fabricação das estopilhas.

COMPONENTE	MATERIAL
Corpo principal	Aço, alumínio, latão
Tubo	Latão, alumínio, papelão
Carga de ignição (primária)	Pólvora negra, BS ou BD
Carga de ignição (secundária)	Pólvora negra, BS ou BD
Percussor/Ignitor	Aço, latão, alumínio
Cápsula iniciadora	RDX, tetril, azida de chumbo, fulminato de mercúrio

Fonte: DoA (1994) e USAMC (1971).

## A.6 ESTOJO

Define-se o estojo como um "recipiente onde é montada a estopilha, que contém a carga de propulsão e no qual o projétil pode ser afixado". (USAMC, 1963, p. G-4, tradução nossa)

Em geral, trata-se, o estojo, de um componente das munições encartuchadas, projetado de acordo com as características do armamento, com a finalidade de armazenar a carga de propulsão e os demais componentes da munição necessários à sua iniciação e, adicionalmente, garantir a obturação dos gases resultantes da queima da carga de propulsão, evitando que ele escape pela culatra<sup>7</sup> do armamento no momento do disparo.

A Figura 74 apresenta a imagem de um estojo seccionado, deixando visível os saquitéis das cargas de propulsão armazenados em seu interior.

Antigamente, os estojos eram fabricados em aço, através do processo de espiralamento de folhas de aço carbono. Um exemplo desse tipo estojo é ilustrado na Figura 75.

Nos dias atuais, na grande maioria dos casos, os estojos são fabricados em latão, através de consecutivos processos de conformação mecânica conhecidos como

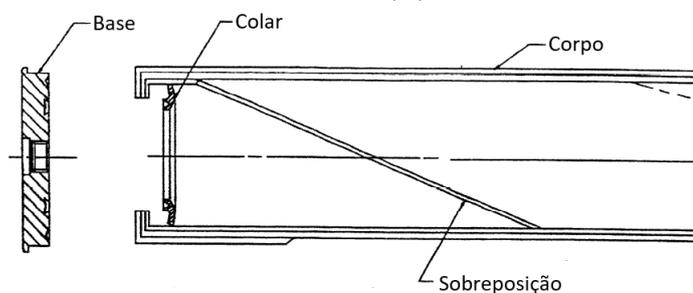
<sup>7</sup> Componente do armamento localizado na parte posterior do tubo e responsável pelo seu fechamento. Fonte: (DOA, 1979, p. 1-2, tradução nossa).

Figura 74 – Imagem do estojo M14 seccionado.



Fonte: Modificado de IMBEL (2021b).

Figura 75 – Ilustração do estojo espiralado fabricado em aço.

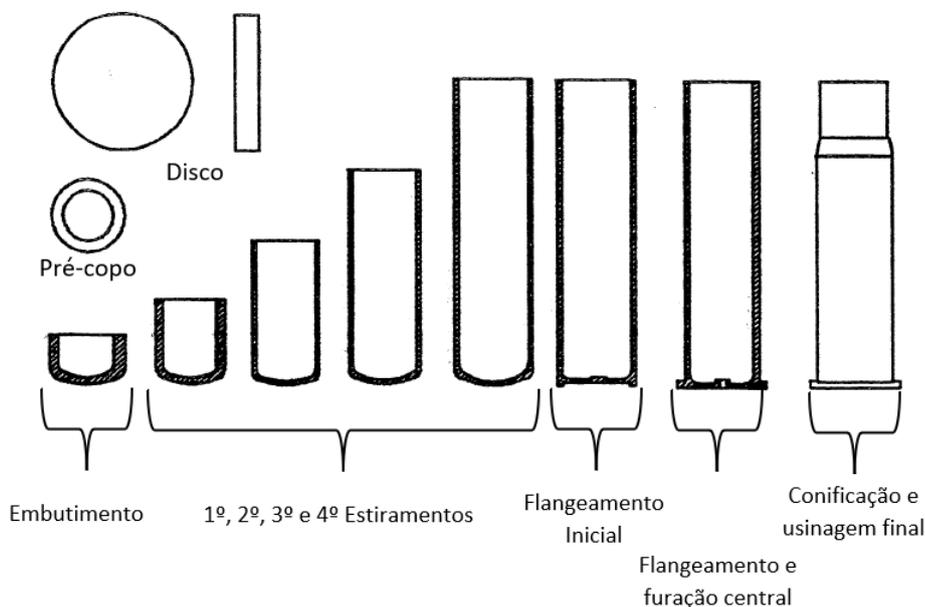


Fonte: Modificado de DoD (1991).

embutimento e estiramento, por exemplo. A Figura 76 ilustra a sequência geral das operações existentes num processo de fabricação tradicional desse tipo de estojo.

Existe, ainda, o estojo conhecido como *estojo combustível*. Trata-se de um produto mais moderno, fabricado em material combustível que é consumido durante sua utilização. De acordo com Colburn e Robbins (1990), este tipo de estojo é composto por fibras de nitrocelulose, fibras de *madeira kraft* e resina aglutinante. Tem-se como grande vantagem em relação aos estojos apresentados anteriormente o fato do usuário não precisar recolher, transportar, armazenar e nem se preocupar com o descarte final do material após a sua utilização. A Figura 77 apresenta a imagem de uma munição que utiliza o estojo combustível.

Figura 76 – Processo de fabricação tradicional do estojo de latão.



Fonte: Modificado de DoD (1991).

Figura 77 – Munição 120 mm AE F1 montada com estojo combustível.



Fonte: NEXTER (2018).

## A.7 FUNCIONAMENTO GERAL

Tendo sido apresentado os principais componentes existentes numa munição tradicional e as características e funcionalidades individuais de cada um deles, este apêndice abordará o funcionamento geral da munição como um todo, de maneira que seja possível entender o encadeamento dos fenômenos ocorridos desde o acionamento do gatilho no armamento até o impacto da munição no alvo.

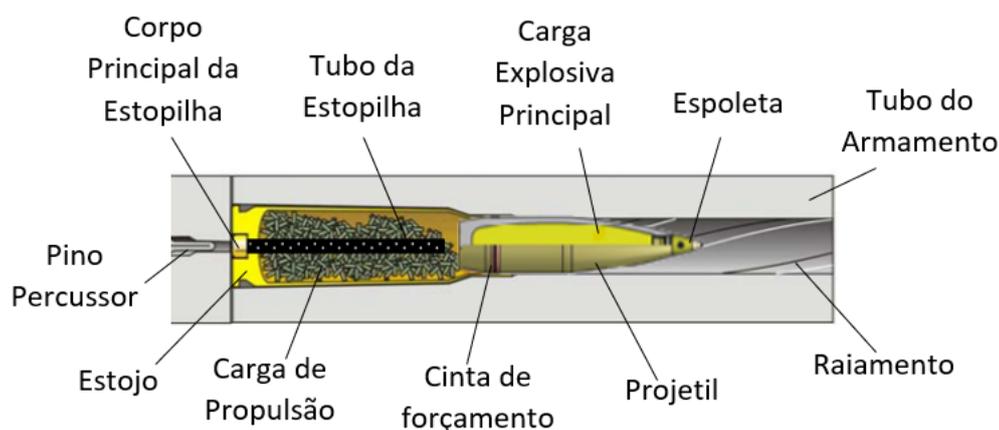
Para tal, serão feitas as seguintes considerações iniciais sobre a munição a ser utilizada como exemplo:

- Quanto ao carregamento do projétil, a munição é considerada do tipo explosiva;
- Quanto ao emprego, a munição é considerada do tipo real;

- Quanto ao método construtivo, a munição é considerada do tipo encartuchada e engastada;
- A munição encontra-se carregada no interior da câmara do armamento;
- O pino percussor do armamento encontra-se recolhido (*armado*);
- A cápsula iniciadora da estopilha é iniciada por impacto mecânico; e
- A espoleta utilizada é do tipo de ogiva e percussão e encontra-se desarmada (*com trem explosivo desalinhado*).

A Figura 78 ilustra, de maneira geral, a munição carregada no armamento e as condições iniciais para o disparo.

Figura 78 – Disparo: condição inicial.



Fonte: Adaptado de Stefanopoulos *et al.* (2014) e MSM-Group (2021a).

Com o acionamento do gatilho do armamento, o pino percussor é liberado de sua posição inicial e, normalmente, por ação da energia elástica armazenada por uma mola, ele avança e percute a cápsula iniciadora existente no corpo principal da estopilha, conforme pode ser observado na imagem superior da Figura 79.

Devido ao impacto, o composto explosivo existente no interior da cápsula iniciadora da estopilha é iniciado, ativando o *trem explosivo* da estopilha e iniciando os fenômenos relacionados à balística interna. Em sequência e dependendo do projeto, tem-se a iniciação das cargas de ignição primária e secundária. A chama produzida pela queima das cargas de ignição passam pelos orifícios do tubo da estopilha, iniciando a queima dos grãos da carga de propulsão.

A queima dos grãos da carga de propulsão libera gases à elevada temperatura, que proporcionam o aumento da pressão no interior do estojo. Conseqüentemente, o estojo se expande, vindo de encontro à parede interna da câmara do armamento, obturando e evitando a fuga dos gases pela culatra.

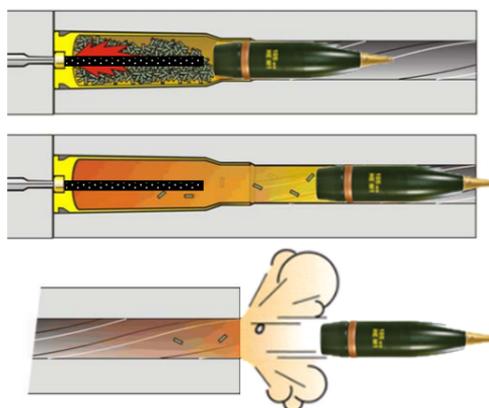
O fenômeno de queima da carga de propulsão ainda está em evolução. Portanto, gases continuam sendo produzidos e a pressão interna continua aumentando.

A partir de um determinado nível de pressão interna e não tendo por onde os gases escaparem, o projétil é forçado a deslocar-se longitudinalmente no interior do tubo, conforme ilustrado na imagem intermediária da Figura 79, momento em que a cinta de forçamento engrasa-se com o raiamento. Nesse instante, o projétil é forçado a movimentar-se angularmente. Portanto, o projétil inicia um percurso revestido com as características de um corpo em movimento acelerado, de translação e rotação.

À medida que o projétil se desloca no interior do tubo, o volume interno da câmara de combustão vai aumentando. A partir de um determinado deslocamento do projétil e em harmonia com a taxa de queima dos grãos e de produção de gases, a pressão interna atinge o seu valor máximo, caracterizando o momento de maior *estresse* mecânico em que o projétil e o armamento são submetidos. Desse momento em diante, a pressão inicia a sua tendência descendente.

Ao sair pela *boca* do tubo do armamento, conforme apresentado na imagem inferior da Figura 79, o projétil apresenta uma determinada velocidade específica de projeto, que varia de munição para munição. Nesse instante, finalizam-se os fenômenos relacionados à balística interna e inicia-se a balística externa.

Figura 79 – Disparo: encadeamento dos fenômenos.



Fonte: Adaptado de Stefanopoulos *et al.* (2014).

É importante salientar, que o deslocamento do projétil no interior do tubo ocorre num intervalo de tempo muito pequeno, às vezes, na ordem de milésimos de segundo. Adicionalmente, com o intuito de fornecer uma noção de ordem de grandeza de valor, alguns projetis podem ser submetidos, durante o seu deslocamento, a uma aceleração aproximada de  $20.000a_g$ , como é o caso do projétil da munição de canhão 105 mm AE P M393A3, apresentado na Figura 5.

Ao sair pela *boca* do tubo, o projétil deixa de ser impulsionado pelos gases oriundos da queima da carga de propulsão e, a partir desse instante e durante toda a trajetória da balística externa, o projétil passa a desenvolver um movimento retardado.

A partir do instante que o projétil deixa de ser um corpo em movimento acelerado, ele deixa de sofrer ação das forças provocadas pela elevada aceleração de partida (*setback forces*). Então, o mecanismo de armar existente na espoleta inicia o processo de alinhamento do *trem explosivo*, o que garante ao projétil uma distância de segurança aproximada de 40 a 80 m após a saída do tubo, dependendo do projeto da espoleta.

O instante em que o projétil atinge o alvo caracteriza o término da balística externa e o início dos fenômenos da balística terminal. Nesse instante, o pino percussor da espoleta percute um detonador, provocando a detonação do composto explosivo em seu interior, iniciando o *trem explosivo* da espoleta, conforme ilustrado na Figura 80-a). Como todos os componentes do *trem explosivo* da espoleta já encontram-se alinhados, todos são iniciados.

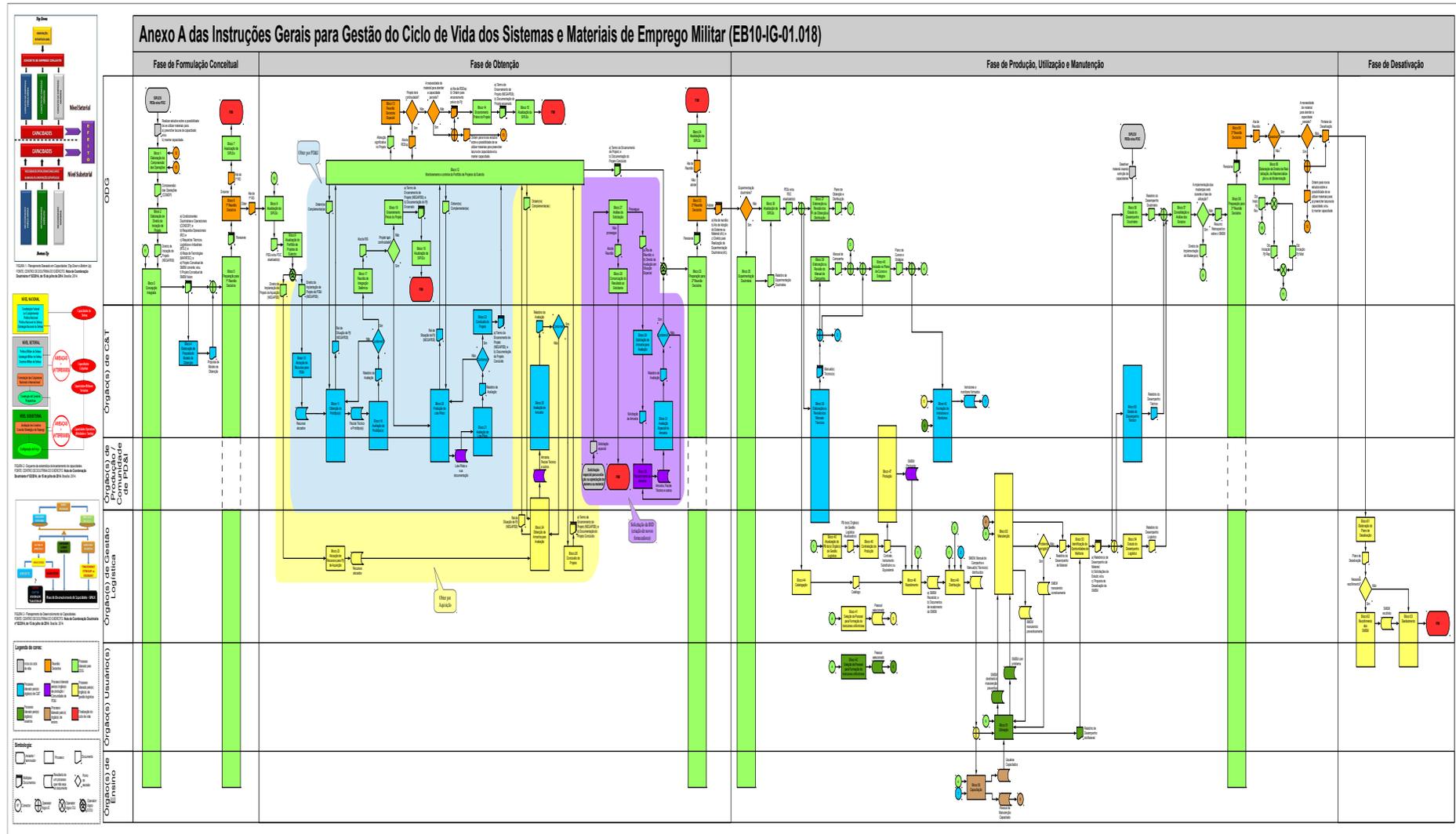
O detonador principal da espoleta, então, inicia a carga explosiva existente no interior do projétil, conforme ilustrado na Figura 80-b). A detonação da carga explosiva principal promove a ruptura do corpo do projétil, gerando enorme quantidade de estilhaços e uma grande onda de choque no ambiente adjacente, conforme ilustrado na Figura 80-c).

Figura 80 – Ilustração do impacto do projétil no alvo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## **ANEXO A – CICLO DE VIDA DOS SISTEMAS E MATERIAIS DE EMPREGO MILITAR DO EB**



Fonte: EB (2016).

## ANEXO B – MATRIZ DE TÉCNICAS DE DESMILITARIZAÇÃO DE MUNIÇÃO

Tabela 38 – Matriz de técnicas de desmilitarização de munição.

Finalidade	Técnica	Descrição	Emprego	Maturidade	Observações
Desmontagem e pré-tratamento	Desmontagem manual	Desmontagem por métodos manuais: puncionamento, trituração, desparafusamento, desenroscamento, corte, etc.	Todos os tipos de munição	Muito difundido	Bastante flexível; fácil adaptação para diferentes munições; baixo custo de configuração; pode apresentar problemas relacionados à segurança.
	Desmontagem robotizada	Desmontagem remota: puncionamento, trituração, desparafusamento, desenroscamento, corte, etc.	Todos os tipos de munição	Muito difundido	Reduz a exposição de pessoas às munições; menos flexível que a desmontagem manual.
	Corte por jato de água abrasivo	Seccionamento por jato de água abrasivo sob alta pressão.	Todos os tipos de munição	Em uso	Flexível e rápido; produz desperdício de água; útil em engenho falhado.
	Ultrassom	Pulsos ultrassônicos induzem cavitação num banho com sal para fragmentação do explosivo.	Explosivos carregados pelo método de fundição	Em pesquisa	Potencialmente barato e ambientalmente amigável.
	Criofratura	Submersão de munição em nitrogênio líquido para fragilização do material e posterior prensagem mecânica.	Itens detonáveis pequenos	Muito difundido	Bom método de preparação do material para incineração, com intuito de evitar eventos (detonação) de grande magnitude; é um processo adicional que talvez não seja necessário.
Remoção	Remoção mecânica por usinagem	Fresamento, sem líquido lubrificante/refrigerante, de material explosivo.	Todos os tipos de munição, exceto às de pequeno calibre	Em uso	Não há desperdício de água; remove, aproximadamente, 95% do material explosivo, então, faz-se necessário tratamento posterior do material para eliminação do resíduo de explosivo.
Continua...					

Tabela 38 – Matriz de técnicas de desmilitarização de munição. (Continuação)

Finalidade	Técnica	Descrição	Emprego	Maturidade	Observações
Remoção	Lavagem com água sob alta pressão	Retirada do material explosivo através de jato de água sob alta pressão.	Todos os tipos de munição, exceto às de pequeno calibre	Muito difundido	Utilização de pressão moderada; difícil de usar com munições pequenas.
	Retirada abrasiva por dióxido de carbono	Retirada do material energético por partículas de dióxido de carbono sob alta velocidade.	Explosivos prensados	Protótipo	Não há desperdício de água; utilizado associado ao método de usinagem para evitar o tratamento térmico de resíduos.
	Derretimento por vapor	Derretimento do explosivo por vapor ou jato de água quente.	Explosivos carregados pelo método de fundição	Muito difundido	Há desperdício de água; utilização de moderada pressão e temperatura.
	Derretimento em autoclave	Derretimento do explosivo por água quente em vaso pressurizado.	Explosivos carregados pelo método de fundição	Muito difundido	Reduz o desperdício de água; utilização de moderada pressão e temperatura.
	Derretimento por microondas	Derretimento do explosivo por microondas.	Explosivos carregados pelo método de fundição	Protótipo	Não há desperdício de água; uma série de precauções devem ser tomadas para garantir a segurança.
	Derretimento por indução	Derretimento do explosivo por corrente induzida.	Explosivos carregados pelo método de fundição	Protótipo	Não há desperdício de água; uma série de precauções devem ser tomadas para garantir a segurança.
Destruição	QA	Detonação realizada em local aberto, com auxílio de uma carga iniciadora	Itens e resíduos detonáveis	Muito difundido	Processo simples que não requer planta industrial; potencial impacto ao meio ambiente.
	DA	Queima realizada em local aberto	Itens e resíduos não detonáveis	Muito difundido	Processo simples que não requer planta industrial; potencial impacto ao meio ambiente.
	DF	Detonação realizada numa câmara fechada, com auxílio de uma carga iniciadora	Pequenos itens detonáveis	Em uso	Controle da poluição; mobilidade; capacidade de processamento de pequenos lotes.
Continua...					

Tabela 38 – Matriz de técnicas de desmilitarização de munição. (Continuação)

Finalidade	Técnica	Descrição	Emprego	Maturidade	Observações
Destruição	Incineração em forno estático	Incineração realizada numa câmara fechada; os itens podem queimar ou detonar	Exceto itens de detonação em grande escala depois do pré-tratamento	Em uso	Controle da poluição; capacidade de processamento de pequenos lotes; pode haver a necessidade de um pré-tratamento de alguns itens, como o seccionamento, por exemplo.
	Incineração em forno rotatório	Incineração realizada com os itens movendo-se lentamente no interior do forno	Itens não detonáveis ou detonáveis em pequena escala	Muito utilizado	Controle da poluição; pode haver a necessidade de um pré-tratamento de alguns itens, como o seccionamento, por exemplo.
	Incineração em forno com carro de alimentação móvel	Incineração realizada em fornos dotados de carros móveis para alimentação dos resíduos	Todos os tipos de munição; exceto itens de detonação em larga escala	Muito utilizado	Pode apresentar controle da poluição; capacidade de processamento de pequenos lotes.
	Biodegradação aquosa	Biodegradação por micróbios em um bioreator	Resíduo explosivo	Em uso	Para tratamento de perclorato; opção barata e ambientalmente amigável.
	Biodegradação enzimática	Biodegradação por catalizadores enzimáticos	Resíduo explosivo	Em pesquisa	Potencial para aprimorar a biodegradação do TNT.
	Oxidação (Actodemil®)	Oxidação em temperaturas moderadas e pressão atmosférica com hidróxido de potássio/reagente de ácido húmico	Resíduo explosivo	Em uso	O resíduo pode ser utilizado diretamente como fertilizante.
Recuperação e Reciclagem de Recursos	Revenda	Venda de munições para países estrangeiros	Munições em boas condições de uso	Em uso	Limitado por acordos internacionais de não proliferação de armas; limitado pelo tempo de fabricação do produto.
	Recuperação de sucata de metal	Revenda de sucata metálica oriunda de munições desmilitarizadas	-	Muito difundido	Requer meios para remoção de todo o material contaminante.
Continua...					

Tabela 38 – Matriz de técnicas de desmilitarização de munição. (Continuação)

<b>Finalidade</b>	<b>Técnica</b>	<b>Descrição</b>	<b>Emprego</b>	<b>Maturidade</b>	<b>Observações</b>
Recuperação e Reciclagem de Recursos	Reciclagem como fertilizante	Conversão de materiais energéticos em fertilizantes	-	Em uso	-
	Conversão química	Conversão de materiais energéticos em produtos químicos comerciais	-	Em uso	Aplicações típicas incluem produção de ácido fosfórico e ácido pícrico
	Recuperação como explosivo comercial	Reutilização de materiais energéticos recuperados em explosivos comerciais	Material energético recuperado	Em uso	-
	Recuperação de energia	Queima de lama residual de explosivos ou uso de energia residual de caldeiras nos incineradores	-	Em uso	-

Fonte: Modificado de MSIAC (2006).

## ANEXO C – VALORES DE "EF/EFF" RECOMENDADOS NO CÁLCULO ESTIMATIVO DA GERAÇÃO DE EMISSÕES

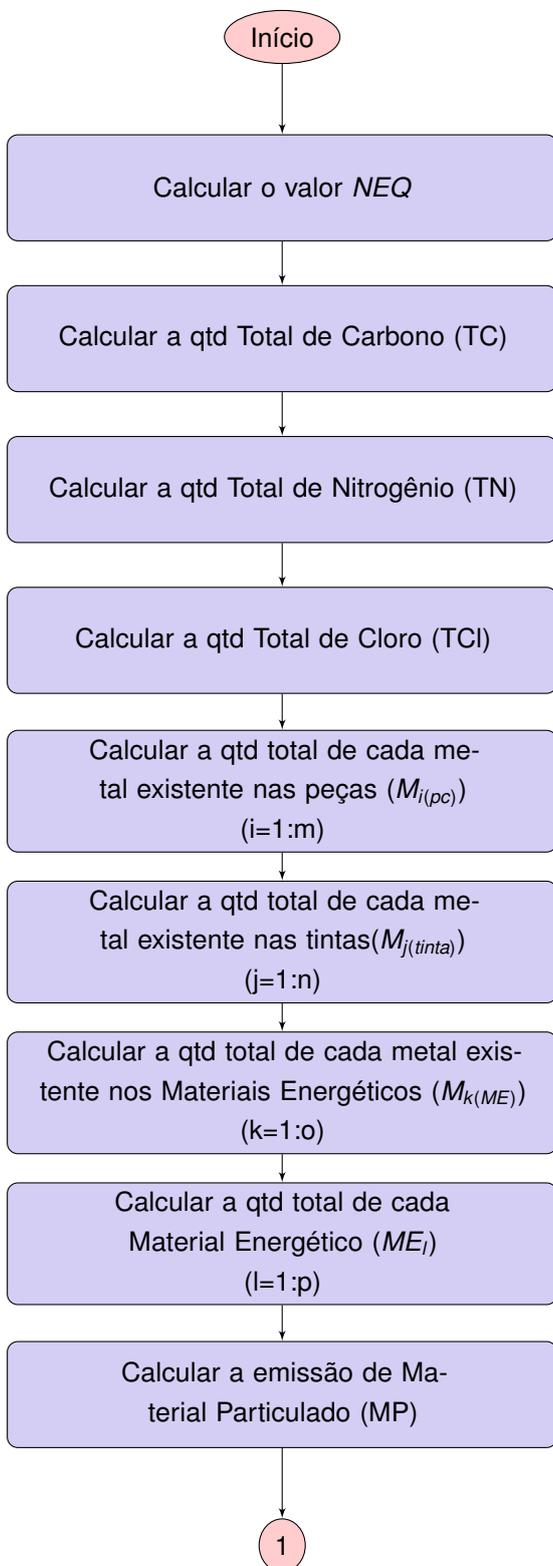
Tabela 39 – Valores de "EF/EFF" recomendados no cálculo estimativo da geração de emissões para uso na AIA e ARS.

<b>Emissão</b>	<b>EF/EFF - Unidade</b>	<b>QA</b>	<b>DA</b>
<i>MP</i>	(kg <i>MP</i> ) / (kg <i>NEQ</i> )	$1,1 \cdot 10^{-2}$	9,3
<i>SO</i> <sub>2</sub>	(kg <i>SO</i> <sub>2</sub> ) / (kg <i>NEQ</i> )	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$
<i>ME</i>	(kg <i>ME</i> <sub><i>i</i></sub> ) / (kg <i>ME</i> <sub><i>i</i></sub> no produto)	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$
Metais (existente nas peças)	(kg <i>Metal</i> <sub><i>i</i></sub> ) / (kg <i>Metal</i> <sub><i>i</i></sub> no produto)	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
Metais (existente nas tintas)	(kg <i>Metal</i> <sub><i>i</i></sub> ) / (kg <i>Metal</i> <sub><i>i</i></sub> no produto)	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$
Metais (existente nos ME)	(kg <i>Metal</i> <sub><i>i</i></sub> ) / (kg <i>Metal</i> <sub><i>i</i></sub> no produto)	$3,1 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$
<i>CO</i>	(kg <i>CO</i> ) / (kg <i>C</i> no produto)	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^{-2}$
<i>NO</i> <sub>x</sub> (como <i>NO</i> <sub>2</sub> )	(kg <i>NO</i> <sub>2</sub> ) / (kg <i>N</i> no produto)	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$
Cloro (como <i>HCl</i> )	(kg <i>HCl</i> ) / (kg <i>Cl</i> no produto)	$9,2 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$
Aromáticos (como benzeno)	(kg <i>Benzeno</i> ) / (kg <i>C</i> no produto)	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$
<i>HC</i> saturado (como etano)	(kg <i>Etano</i> ) / (kg <i>C</i> no produto)	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
<i>HC</i> não saturado (como etileno)	(kg <i>Etileno</i> ) / (kg <i>C</i> no produto)	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Metano	(kg <i>Metano</i> ) / (kg <i>C</i> no produto)	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$
<i>Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (PAH)</i> (como naftaleno)	(kg <i>Naftaleno</i> ) / (kg <i>C</i> no produto)	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
<i>Composto Policlorado de Dioxina e Furano (PCDD/PCDF)</i> (como <i>TEQ</i> <sup>1</sup> )	(kg <i>TEQ</i> ) / (kg <i>NEQ</i> )	$2 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-12}$

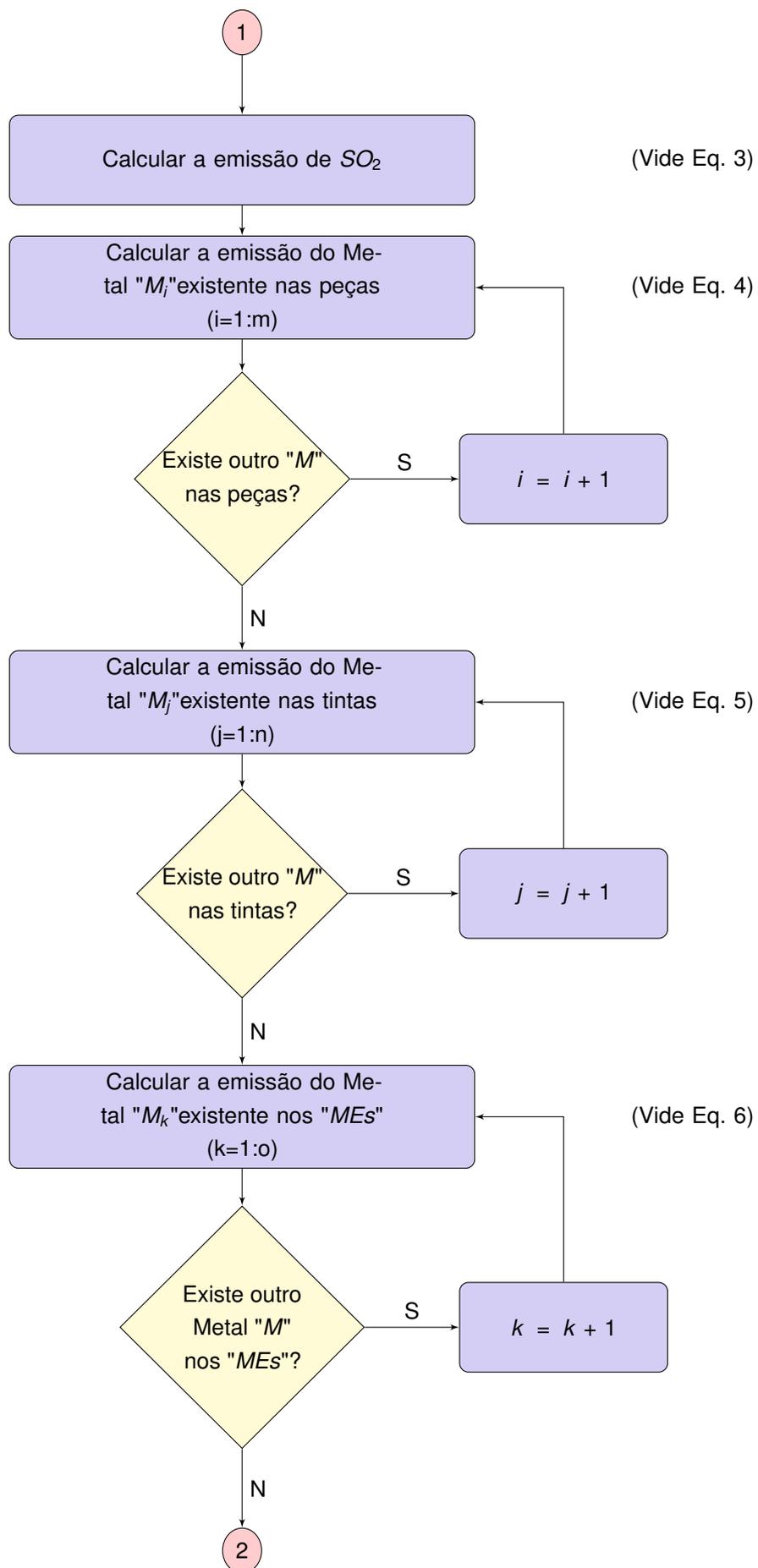
Fonte: Extraído de SEESAC (2004).

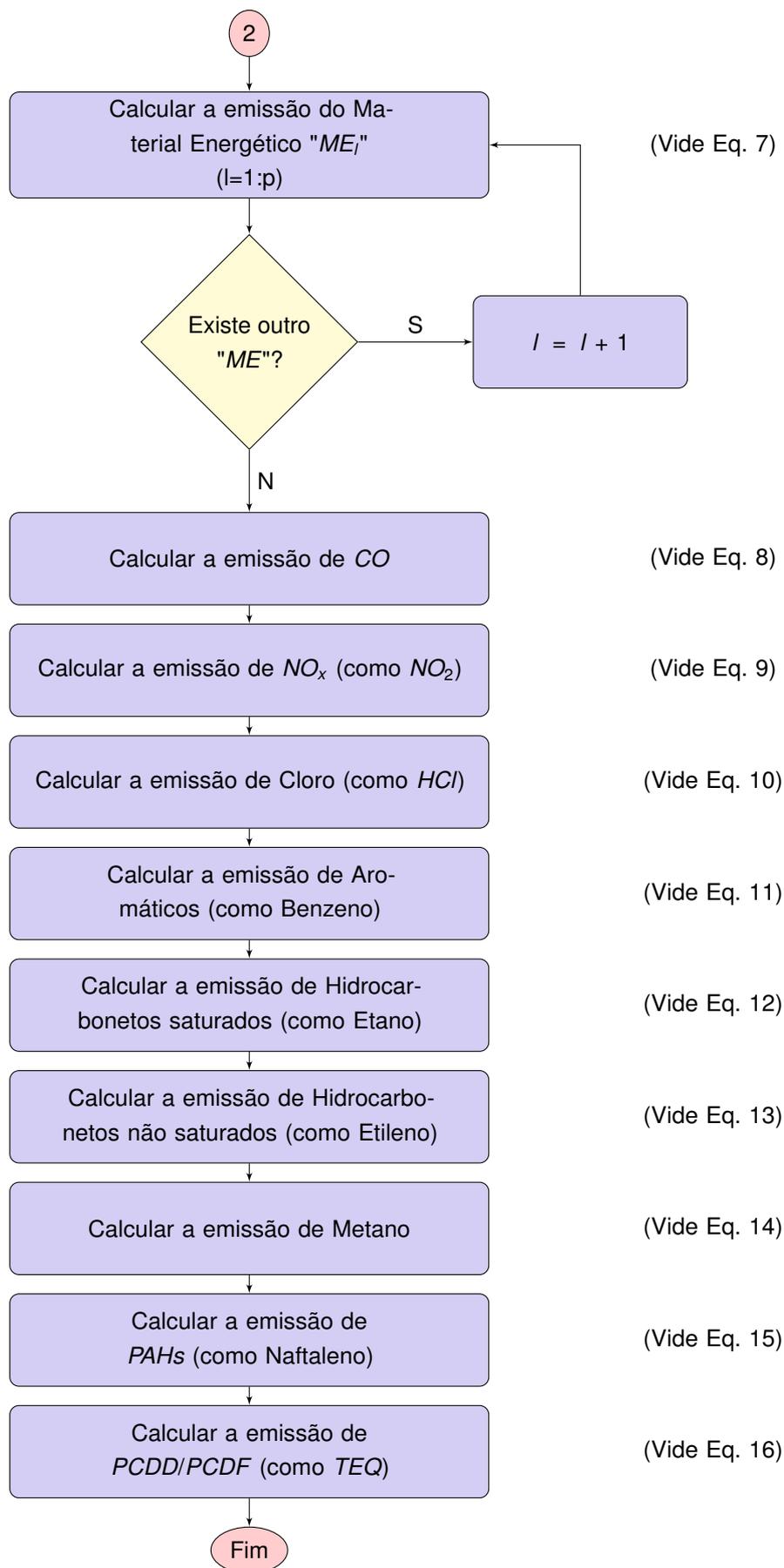
<sup>1</sup> Massa total do composto clorado de dioxina e furano considerada como a massa do composto de dioxina mais tóxico (2,3,7,8-tetraclorodioxina). Fonte: SEESAC (2004).

## ANEXO D – CÁLCULO DAS EMISSÕES PRODUZIDAS PELAS TÉCNICAS DE DESTRUIÇÃO QA E DA (FLUXOGRAMA)



(Vide Eq. 2)





Fonte: Elaborado pelo autor. Baseado na metodologia apresentado em SEESAC (2004).

**Legenda:**

$NEQ$  – Massa Explosiva Total do material detonado ou queimado, excluindo a massa de todos os materiais não energéticos (kg)

$TC$  – Quantidade total de Carbono encontrado no material a ser destruído (kg)

$TN$  – Quantidade total de Nitrogênio encontrado no material a ser destruído (kg)

$TCI$  – Quantidade total de Cloro encontrado no material a ser destruído (kg)

$E_{MP}$  – Quantidade de Material Particulado emitido à atmosfera (kg.)

$E_{SO_2}$  – Quantidade de  $SO_2$  emitido à atmosfera (kg).

$E_{M_{i(PC)}}$  – Quantidade do Metal "i", proveniente das peças, emitido à atmosfera (kg).

$E_{M_{j(tinta)}}$  – Quantidade do Metal "j", proveniente das tintas, emitido à atmosfera (kg).

$E_{M_{k(ME)}}$  – Quantidade do Metal "k", proveniente dos Materiais Energéticos, emitido à atmosfera (kg).

$E_{ME_i}$  – Quantidade do Material Energético "i" emitido à atmosfera (kg).

$E_{CO}$  – Quantidade de  $CO$  emitido à atmosfera (kg).

$E_{NO_2}$  – Quantidade de  $NO_2$  emitido à atmosfera (kg).

$E_{HCl}$  – Quantidade de  $HCl$  emitido à atmosfera (kg).

$E_{C_6H_6}$  – Quantidade de  $C_6H_6$  emitido à atmosfera (kg).

$E_{C_2H_6}$  – Quantidade de  $C_2H_6$  emitido à atmosfera (kg).

$E_{C_2H_4}$  – Quantidade de  $C_2H_4$  emitido à atmosfera (kg).

$E_{CH_4}$  – Quantidade de  $CH_4$  emitido à atmosfera (kg).

$E_{C_{10}H_8}$  – Quantidade de  $C_{10}H_8$  emitido à atmosfera (kg).

$E_{TEQ}$  – Quantidade de  $TEQ$  emitido à atmosfera (kg).

$M_{i(PC)}$  – Quantidade do Metal "i" encontrado nas peças (kg).

$M_{j(tinta)}$  – Quantidade do Metal "j" encontrado nas tintas (kg).

$M_{k(ME)}$  – Quantidade do Metal "k" encontrado nos materiais energéticos(kg).

$ME_i$  – Quantidade total do Material Energético "i" (kg).

$(EF/EFF)_{MP}$  – Valor de "EF/EFF" relacionado ao Material Particulado. Vide Tabela 39 do Anexo C.

$(EF/EFF)_{SO_2}$  – Valor de "EF/EFF" relacionado ao  $SO_2$ . Vide Tabela 39 do Anexo C.

$(EF/EFF)_{M_{PC}}$  – Valor de "EF/EFF" relacionado aos metais existentes nas peças. Vide Tabela 39 do Anexo C.

$(EF/EFF)_{M_{tinta}}$  – Valor de "EF/EFF" relacionado aos metais existentes nas tintas. Vide Tabela 39 do Anexo C.

$(EF/EFF)_{M_{ME}}$  – Valor de "EF/EFF" relacionado aos metais existentes nos materiais energéticos. Vide Tabela 39 do Anexo C.

$(EF/EFF)_{CO}$  – Valor de "EF/EFF" relacionado ao  $CO$ . Vide Tabela 39 do Anexo C.

$(EF/EFF)_{NO_2}$  – Valor de "EF/EFF" relacionado ao  $NO_2$ . Vide Tabela 39 do Anexo C.

$(EF/EFF)_{HCl}$  – Valor de "EF/EFF" relacionado ao  $HCl$ . Vide Tabela 39 do Anexo C.

$(EF/EFF)_{C_6H_6}$  – Valor de "EF/EFF" relacionado ao  $C_6H_6$ . Vide Tabela 39 do Anexo C.

$(EF/EFF)_{C_2H_6}$  – Valor de "EF/EFF" relacionado ao  $C_2H_6$ . Vide Tabela 39 do Anexo C.

$(EF/EFF)_{C_2H_4}$  – Valor de "EF/EFF" relacionado ao  $C_2H_4$ . Vide Tabela 39 do Anexo C.

$(EF/EFF)_{CH_4}$  – Valor de "EF/EFF" relacionado ao  $CH_4$ . Vide Tabela 39 do Anexo C.

$(EF/EFF)_{C_{10}H_8}$  – Valor de "EF/EFF" relacionado ao  $C_{10}H_8$ . Vide Tabela 39 do Anexo C.

$(EF/EFF)_{TEQ}$  – Valor de "EF/EFF" relacionado ao  $TEQ$ . Vide Tabela 39 do Anexo C.

$TEQ$  – Massa total do composto clorado de dioxina e furano considerada como a massa do composto de dioxina mais tóxico (2,3,7,8-tetraclorodioxina) (kg).

**Formulações:**

$$E_{MP} = (EF/EFF)_{MP} \cdot NEQ \quad (2)$$

$$E_{SO_2} = (EF/EFF)_{SO_2} \cdot NEQ \quad (3)$$

$$E_{M_{i(PC)}} = (EF/EFF)_{M_{PC}} \cdot M_{i(PC)} \quad (4)$$

$$E_{M_{j(tinta)}} = (EF/EFF)_{M_{tinta}} \cdot M_{j(tinta)} \quad (5)$$

$$E_{M_{k(ME)}} = (EF/EFF)_{M_{ME}} \cdot M_{k(ME)} \quad (6)$$

$$E_{ME_i} = (EF/EFF)_{ME} \cdot ME_i \quad (7)$$

$$E_{CO} = (EF/EFF)_{CO} \cdot TC \quad (8)$$

$$E_{NO_2} = (EF/EFF)_{NO_2} \cdot TN \quad (9)$$

$$E_{HCl} = (EF/EFF)_{HCl} \cdot TCl \quad (10)$$

$$E_{C_6H_6} = (EF/EFF)_{C_6H_6} \cdot TC \quad (11)$$

$$E_{C_2H_6} = (EF/EFF)_{C_2H_6} \cdot TC \quad (12)$$

$$E_{C_2H_4} = (EF/EFF)_{C_2H_4} \cdot TC \quad (13)$$

$$E_{CH_4} = (EF/EFF)_{CH_4} \cdot TC \quad (14)$$

$$E_{C_{10}H_8} = (EF/EFF)_{C_{10}H_8} \cdot TC \quad (15)$$

$$E_{TEQ} = (EF/EFF)_{TEQ} \cdot NEQ \quad (16)$$

## ANEXO E – PROPRIEDADES GERAIS DOS EXPLOSIVOS

Tabela 40 – Propriedades gerais de explosivos comumente utilizados na fabricação de munição.

EXPLOSIVO	PROPRIEDADES						
	Composição	Higroscopicidade	Densidade	Temperatura de fusão	Temperatura de ebulição	Temperatura de detonação/ deflagração	Velocidade de detonação/ deflagração
	[%]	[%] (30°C, 90% UR <sup>1</sup> )	[g/cm <sup>3</sup> ]	[°C]	[°C]	[°C]	[m/s]
Azida de chumbo	N: 28,8 Pb: 71,2	Dextrinada: 0,8 Não dextrinada: 0,03	Cristal: 4,80 Dextrinada: 4,38	-	-	396 (0,1 s) 356 (1 s) 340 (5 s) 335 (10 s)	4.070 (2,0 g/cm <sup>3</sup> ) 4.630 (3,0 g/cm <sup>3</sup> ) 5.180 (4,0 g/cm <sup>3</sup> )
Composto A-4	RDX: 97 Cera: 3	-	-	-	-	-	-
Composto B	RDX: 60 TNT: 40 Cera: 1 (acrescentado)	0,02	1,65 (fundido)	78-80	-	526 (0,1 s) 368 (1 s) 278 (5 s) 255 (10 s)	7.840 (1,68 g/cm <sup>3</sup> )
Estifinato de chumbo	C: 15,4 H: 0,6 N: 9,0 O: 30,8 Pb: 44,2	0,02	3,02 (cristal)	260-310	-	282 (5 s) 276 (10 s) 272 (15 s) 267 (20 s)	5.200 (2,9 g/cm <sup>3</sup> )
Continua...							

Tabela 40 – Propriedades gerais de explosivos comumente utilizados na fabricação de munição. (Continuação)

EXPLOSIVO	PROPRIEDADES						
	Composição	Higroscopicidade	Densidade	Temperatura de fusão	Temperatura de ebulição	Temperatura de detonação/deflagração	Velocidade de detonação/deflagração
	[%]	[%] (30° C, 90% UR)	[g/cm <sup>3</sup> ]	[°C]	[°C]	[°C]	[m/s]
Fulminato de mercúrio	C: 8,4 N: 9,8 O: 11,2 Hg: 70,6	0,02	4,43 (cristal)	-	-	263 (0,1 s) 239 (1 s) 210 (5 s) 199 (10 s) 194 (15 s) 190 (20 s)	3.500 (2,0 g/cm <sup>3</sup> ) 4.250 (3,0 g/cm <sup>3</sup> ) 5.000 (4,0 g/cm <sup>3</sup> )
Nitrocelulose	C: 25,29 H: 2,52 N: 13,45 O: 58,74	2	-	-	-	230 (5 s)	7.300 (1,20 g/cm <sup>3</sup> )
Nitroglicerina	C: 15,9 H: 2,2 N: 18,5 O: 63,4	0,06	1,591 (25° C, líquido) 1,596 (20° C, líquido)	13,2 (forma estável)	145	222 (5 s)	1.600-1.900 (1,6 g/cm <sup>3</sup> , diâm. carga 9,9 mm, confinamento: em vidro) 7.700 (1,6 g/cm <sup>3</sup> , diâm. carga 31,75 mm, confinamento: em aço)
Continua...							

Tabela 40 – Propriedades gerais de explosivos comumente utilizados na fabricação de munição. (Continuação)

EXPLOSIVO	PROPRIEDADES						
	Composição	Higroscopicidade	Densidade	Temperatura de fusão	Temperatura de ebulição	Temperatura de detonação/deflagração	Velocidade de detonação/deflagração
	[%]	[%] (30° C, 90% UR)	[g/cm <sup>3</sup> ]	[°C]	[°C]	[°C]	[m/s]
Nitroguanidina	C: 11,5 H: 3,9 N: 53,8 O: 30,8	não há	1,72 (cristal)	232	-	275	7.650 (1,55 g/cm <sup>3</sup> )
PETN	C: 19,0 H: 2,5 N: 17,7 O: 60,8	0,0	1,77	141	-	272 (0,1 s) 244 (1 s) 225 (5 s) 211 (10 s)	8.300 (1,7 g/cm <sup>3</sup> )
Pólvora negra	Nitrato de Potássio: 74,0 S: 10,4 Carvão: 15,6	2,51	variável	-	-	510 (0,1 s) 490 (1 s) 427 (5 s) 356 (10 s)	400 (1,6 g/cm <sup>3</sup> )
RDX	C: 16,3 H: 2,7 N: 37,8 O: 43,2	0,02 (25° C, 100% UR)	1,82 (cristal)	204	-	405 (0,1 s) 316 (1 s) 260 (5 s) 240 (10 s) 235 (15 s)	8.180 (1,65 g/cm <sup>3</sup> )
Continua...							

Tabela 40 – Propriedades gerais de explosivos comumente utilizados na fabricação de munição. (Continuação)

EXPLOSIVO	PROPRIEDADES						
	Composição	Higroscopicidade	Densidade	Temperatura de fusão	Temperatura de ebulição	Temperatura de detonação/deflagração	Velocidade de detonação/deflagração
	[%]	[%] (30° C, 90% UR)	[g/cm <sup>3</sup> ]	[°C]	[°C]	[°C]	[m/s]
Tetraceno	C: 12,8 H: 4,3 N: 74,4 O: 8,5	0,77	1,05 (20,68 MPa)	140-160	-	160 (5 s)	-
Tetril	C: 29,3 H: 1,7 N: 24,4 O: 44,6	0,04	1,73 (cristal)	130	-	340 (0,1 s) 314 (1 s) 257 (5 s) 238 (10 s) 236 (15 s) 234 (20 s)	7.850 (1,71 g/cm <sup>3</sup> )
TNT	C: 37,0 H: 2,2 N: 18,5 O: 42,3	0,03	1,65 (cristal)	81	-	570 (0,1 s) 520 (1 s) 475 (5 s) 465 (10 s)	6.825 (1,56 g/cm <sup>3</sup> , prensado) 6.640 (1,56 g/cm <sup>3</sup> , fundido)

Fonte: Extraído de USAMC (1971).

## ANEXO F – PRINCIPAIS TERMOS TÉCNICOS USUALMENTE UTILIZADOS NA ACV

Tabela 41 – Lista dos principais termos utilizados na ACV e suas respectivas definições.

Termo	Definição
Processo	Conjunto de atividades inter-relacionadas ou interativas que transformam entradas em saídas
Fluxo elementar	Material ou energia retirado do meio ambiente e que entra no sistema em estudo sem sofrer transformação prévia por interferência humana, ou material ou energia que é liberado no meio ambiente pelo sistema em estudo sem sofrer transformação subsequente por interferência humana
Matéria-prima	Material primário ou secundário que é utilizado para produzir um produto
Alocação	Repartição dos fluxos de entrada ou saída de um processo ou sistema de produto entre o sistema de produto em estudo e outro(s) sistema(s) de produto(s)
UF	Desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como unidade de referência
Entrada	Fluxo de produto, material ou energia que entra em um processo elementar
Fluxo intermediário	Fluxo de produto, material ou energia que ocorre entre processos elementares do sistema de produto em estudo
Produto intermediário	Saída de um processo elementar que se constitui em entrada para um outro processo elementar e que requer transformação adicional dentro do sistema de produto
Saída	Fluxo de produto, material ou energia que deixa um processo elementar
Energia de processo	Entrada de energia requerida para operar o processo dentro de um processo elementar, excluindo as entradas de energia para produção e distribuição da própria energia
Fluxo de produto	Entrada ou saída de produtos provenientes de ou com destino a um outro sistema de produto
Sistema de produto	Conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e de produto, desempenhando uma ou mais funções definidas e que modela o ciclo de vida de um produto
Fluxo de referência	Medida das saída de processos em um dado sistema de produto, requeridas para realizar a função expressa pela UF
Liberações	Emissões para a atmosfera e descargas para corpos d'água e para o solo
Fronteira do sistema	Conjunto de critérios que especificam quais processos elementares fazem parte de um sistema de produto
Processo elementar	Menor elemento considerado na análise de inventário do ciclo de vida para o qual dados de entrada e saída são quantificados
Resíduo	Substâncias ou objetos os quais o detentor pretende ou é obrigado a dispor
Fator de caracterização	Fator derivado de um modelo de caracterização que é aplicado para converter o resultado da análise do inventário do ciclo de vida na unidade comum do indicador de categoria
Categoria de impacto	Classe que representa as questões ambientais relevantes às quais os resultados da análise do inventário do ciclo de vida podem ser associados
Indicador de categoria de impacto	Representação quantificável de uma categoria de impacto

Fonte: Adaptado de ABNT (2014a).

## ANEXO G – CATEGORIAS DE IMPACTO

Tabela 42 – Categorias de impacto usualmente utilizadas na ACV.

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Escala</b>	<b>Exemplo de dados do inventário (Classificação)</b>	<b>Possível fator de caracterização comum</b>	<b>Descrição do fator de caracterização</b>
Aquecimento global	Global	Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ) Dióxido de Nitrogênio ( $NO_2$ ) Metano ( $CH_4$ ) Cloroflurcarbonos (CFCs) Hidrocloroflurcarbonos (HCFCs) Brometo de Metil ( $CH_3Br$ )	Potencial de aquecimento global	Converte dados do <i>Inventário do Ciclo de Vida (ICV)</i> em equivalentes de dióxido de carbono. Nota: potenciais de aquecimento global podem ser potenciais 50, 100 ou 500 anos.
Destruição da camada de ozônio	Global	Cloroflurcarbonos (CFCs) Hidrocloroflurcarbonos (HCFCs) Halons Brometo de Metil ( $CH_3Br$ )	Potencial de destruição da camada de ozônio	Converte dados do inventário em triclorofluormetano (CFC – 11) equivalente.
Acidificação	Local Regional	Óxidos de Enxofre ( $SO_x$ ) Óxidos de Nitrogênio ( $NO_x$ ) Ácido Hidroclorídrico (HCl) Ácido Hidrofluorídrico (HF) Amônia ( $NH_4$ )	Potencial de acidificação	Converte dados do ICV em equivalentes de íons de Hidrogênio (H+).
Eutrofização	Local	Fosfato ( $PO_4$ ) Óxidos de Nitrogênio (NO) Dióxido de Nitrogênio ( $NO_2$ ) Nitratos Amônia ( $NH_4$ )	Potencial de eutrofização	Converte dados do ICV em equivalentes de Fosfato
Oxidação fotoquímica	Local	Hydrocarbonetos não metano (NMHC)	Potencial de criação de oxidante fotoquímico	Converte dados do ICV em equivalentes de Etano ( $C_2H_6$ )
Continua...				

Tabela 42 – Categorias de impacto usualmente utilizadas na ACV. (Continuação)

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Escala</b>	<b>Exemplo de dados do inventário (Classificação)</b>	<b>Possível fator de caracterização comum</b>	<b>Descrição do fator de caracterização</b>
Toxicidade terrestre	Local	Produtos químicos com concentração letal reportada para roedores	$LC_{50}$	Converte os dados $LC_{50}$ em equivalentes
Toxicidade aquática	Local	Produtos químicos com concentração letal reportada para peixes	$LC_{50}$	Converte os dados $LC_{50}$ em equivalentes
Saúde humana	Global Regional Local	Emissão total para o ar, água e solo	$LC_{50}$	Converte os dados $LC_{50}$ em equivalentes
Depleção de recursos	Global Regional Local	Quantidade de minerais utilizados Quantidade de combustíveis fósseis utilizados	Potencial de depleção dos recursos	Converte os dados do inventário para a razão da quantidade de recursos utilizados sobre a quantidade de recursos disponíveis na reserva
Uso da terra	Global Regional Local	Quantidade descartada no aterro	Disponibilidade de terra	Converte a massa do resíduo sólido em volume, usando uma densidade estimada
Uso da água	Regional Local	Água utilizada ou consumida	Potencial de escassez de água	Converte os dados do inventário para a razão da quantidade de água utilizada sobre a quantidade de recursos disponíveis na reserva

Fonte: Adaptado de EPA (2006).

## ANEXO H – MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO IMPACTO

Tabela 43 – Métodos de avaliação do impacto usualmente utilizados na ACV.

		Métodos							
		Ecological Scarcity	CML	TRACI	IMPACT 2002+	LIME	ReCiPe	EU-LCA	IMPACT World+
Nível de avaliação		Objetivos políticos	Ponto intermediário	Ponto intermediário	Ponto intermediário e danos	Ponto intermediário e danos	Ponto intermediário e danos	Ponto intermediário e danos	Ponto intermediário e danos
Normalização e Ponderação		Ambos baseados em fluxos ambientais atuais e objetivos políticos	Normalização	Normalização de danos para os EUA	Normalização de danos. Ponderação para o usuário	Normalização e ponderação japonesa	Ambos (padrão de ponderação: 0,4 saúde humana; 0,4 ecossistemas; 0,2 recursos	Normalização ainda indisponível	Normalização mundial. Ponderação passo a passo (Weidema 2009) opcional
Categorias intermediárias abordadas	Aquecimento global	X	X	X	X	X	X	X	X
	Acidificação oceânica	-	-	-	-	-	-	-	X
	Destruição da camada de ozônio estratosférica	-	X	X	X	X	X	X	X
Continua...									

Tabela 43 – Métodos de avaliação do impacto usualmente utilizados na ACV. (Continuação)

		Métodos							
		Ecological Scarcity	CML	TRACI	IMPACT 2002+	LIME	ReCiPe	EU-LCA	IMPACT World+
Categorias intermediárias abordadas	Impactos na saúde humana de particulados e tóxicos	X	X	X	X	X	X	X	X
	Impactos internos e trabalhadores	-	-	-	-	-	-	-	X
	Acidentes	-	X	-	-	-	-	-	-
	Radiação ionizante	X	X	-	X	-	X	X	X
	Formação de fotooxidante	X	X	X	X	X	X	X	X
Categorias de danos abordadas	Acidificação	X	X	X	X	X	X	X	X
	Eutrofização	X	X	X	X	X	-	X	X
	Ecotoxicidade	X	X	X	X	X	X	X	X
	Uso da terra	X	X	-	X	X	X	X	X
	Uso de energia	X	X	X	X	X	X	X	X
	Extração mineral	-	-	-	X	X	X	X	X
	Uso da água	X	-	-	-	-	X	X	X
	Qualidade do solo	-	-	-	-	-	-	-	X
Continua...									

Tabela 43 – Métodos de avaliação do impacto usualmente utilizados na ACV. (Continuação)

		Métodos							
		Ecological Scarcity	CML	TRACI	IMPACT 2002+	LIME	ReCiPe	EU-LCA	IMPACT World+
Categorias de danos abordadas	Uso de recursos bióticos	-	X	-	-	X	-	-	X
	Saúde humana	-	-	X	X	X	X	X	X
	Ambiente biótico natural (ecossistemas)	-	-	X	X	X	X	X	X
	Recursos abióticos naturais	-	-	X	X	X	X	X	X
	Recursos bióticos naturais (ex: atum)	-	-	-	-	X	-	-	X
	Recursos bióticos artificiais (ex: cultivo)	-	-	-	-	X	-	-	-
	Recursos abióticos artificiais (ex: construções)	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de Shaked *et al.* (2016).

## ANEXO I – TRANSPORTE: ENERGIA E PEGADA DE CARBONO

Tabela 44 – Relação entre os tipos de transporte, a energia consumida e a pegada de carbono impressa ao meio ambiente.

Classe	Tipo de transporte (combustível)	Energia [MJ/t.km]	Pegada de carbono [kg de CO <sub>2eq</sub> /t.km]
Marítima	Navio <i>container</i> , muito grande - 20.000 TEU (diesel)	0,04	0,003
	Navio tanque - 100.000 toneladas (diesel)	0,08	0,006
	Graneleiro - 25.000 toneladas (diesel)	0,11	0,008
	Oceânico - 10.000 toneladas (diesel)	0,18	0,014
	Navegação costeira (diesel)	0,27	0,021
	Barcaça (diesel)	0,4	0,031
Ferroviária	Frete ferroviário (elétrico)	0,22	0,016
	Frete ferroviário (diesel)	0,22	0,016
Rodoviária (caminhão)	Caminhão 55 toneladas - 8 eixos (diesel)	0,71	0,055
	Caminhão 40 toneladas - 6 eixos (diesel)	0,82	0,063
	Caminhão 32 toneladas - 4 eixos (diesel)	0,94	0,072
	Caminhão 26 toneladas - 3 eixos (diesel)	1,1	0,085
	Caminhão 14 toneladas - 2 eixos (diesel)	1,5	0,12
	Caminhão de mercadorias leves (diesel)	2,2	0,17
Rodoviária (carro)	Carro familiar (diesel)	1,7	0,13
	Carro familiar (gasolina)	2,6	0,18
	Carro familiar (gás propano líquido)	2,6	0,13
	Carro familiar (híbrido: gasolina-elétrico)	1,4	0,10
	Carro super esportivo e SUV (gasolina)	3,4	0,24
Aérea	Avião para longas viagens (querosene)	6,5	0,54
	Avião para curtas viagens (querosene)	13	1,1

Fonte: Modificado de Ashby (2021).

## ANEXO J – MIX DE ENERGIA POR PAÍS

Tabela 45 – Relação dos valores de mix de energia e  $kg\ CO_2/kwh$  por país.

País	Combustível fóssil		Nuclear	Renováveis	kg $CO_2$ <sup>b</sup> /kwh <sup>c</sup>
	Proporção	Eficiência ( $\eta$ ) <sup>a</sup>	Proporção	Proporção	
Alemanha	0,61	0,38	0,26	0,13	0,41
Austrália	0,92	0,33	0,00	0,08	0,71
Áustria	0,33	0,33	0,00	0,67	0,25
Bélgica	0,39	0,33	0,54	0,06	0,29
Brasil	0,10	0,33	0,03	0,87	0,08
Canadá	0,24	0,38	0,16	0,60	0,16
China	0,83	0,33	0,02	0,15	0,64
EUA	0,71	0,36	0,19	0,10	0,50
França	0,10	0,40	0,78	0,12	0,06
Índia	0,81	0,27	0,03	0,17	0,77
Inglaterra	0,75	0,43	0,19	0,06	0,45
Itália	0,81	0,45	0,00	0,19	0,46
Japão	0,61	0,43	0,28	0,11	0,36
México	0,80	0,38	0,04	0,16	0,54
Noruega	0,01	0,33	0,00	0,99	0,01
Portugal	0,66	0,33	0,00	0,34	0,51
Rússia	0,66	0,32	0,16	0,18	0,53
Suécia	0,03	0,33	0,47	0,50	0,02

<sup>a</sup> Eficiência de conversão de combustível fóssil para eletricidade;

<sup>b</sup>  $CO_2$  liberado por kwh de eletricidade entregue de todas as fontes;

<sup>c</sup> 1 kwh equivale a 3,6 MJ<sub>energia-eletrica</sub>.

Fonte: Modificado de Ashby (2021).

**ANEXO K – COMBUSTÃO: LIBERAÇÃO DE CO<sub>2</sub>**Tabela 46 – Quantidade de CO<sub>2</sub> liberada na combustão.

<b>Material</b>	<b>CO<sub>2</sub> de combustão [kg CO<sub>2</sub>/kg]</b>
Papel e papelão	1,5
Madeira (macia)	1,8
Madeira (dura)	1,7

Fonte: Modificado de Ashby (2021).

## ANEXO L – EQUIPAMENTO: TORNO CNC (ADAPTADO)

Figura 81 – Equipamento torno CNC Romi Centur 45.



Fonte: Romi (2022).

Tabela 47 – Especificação técnica do equipamento.

<b>Característica técnica</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Potência	33,6	<i>kW</i>
Diâmetro do furo do eixo árvore	160	<i>mm</i>
Taxa de remoção da espoleta do corpo do projétil <sup>a</sup>	6	<i>unid/h</i>
Curso longitudinal do carro (eixo z)	3.020 - 5.020	<i>mm</i>
Barramento (largura)	460	<i>mm</i>
Barramento (altura)	420	<i>mm</i>

<sup>a</sup> Valor estimado.

Fonte: Romi (2022).

**ANEXO M – EQUIPAMENTO: MÁQUINA DE SERRA DE FITA**

Figura 82 – Equipamento serra de fita modelo Starrett S5050.



Fonte: Starrett (2022).

Tabela 48 – Especificação técnica do equipamento.

<b>Característica técnica</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Potência	6,5	<i>kW</i>
Velocidade de corte	20 a 85	<i>m/min</i>
Capacidade de corte (diâmetro da peça)	até 510	<i>mm</i>
Bomba de refrigeração (modelo BC-91 S/T)		
Potência	16	<i>hp</i>
Vazão	até 2,3	<i>m<sup>3</sup>/h</i>

Fonte: Starrett (2022).