



Modelação Analítica da Deformação Plástica e Corte da Cinta de Travamento de um Projétil de Artilharia

Henrique Simões de Magalhães

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Luís V. O. Faria

Prof. Paulo A. F. Martins

Júri

Presidente: Prof. João O. M. G. Folgado

Vogal: Cor Eng Mat João B. Pereira da Silva

Vogal: Prof. Rui M. S. O. Batista

Outubro 2016

Resumo

A interação entre os projéteis de grande calibre com o tubo da respetiva arma, é facultado por um componente anelar, denominado por Cinta de Travamento. A cinta de travamento é um componente metálico que integra os projéteis de artilharia, e que se deforma no contacto com a alma estriada do tubo da arma fogo, devido à deflagração da carga propulsora.

Esta deformação permitirá uma obturação da câmara de combustão e gerará um movimento de rotação, que estabilizará o movimento do projétil dentro e fora do tubo da arma. Conhecer o mecanismo de deformação, é de extrema importância quando se pretende desenvolver e projetar este tipo de equipamentos

Nesta dissertação, os fenómenos físicos relacionados com a deformação quási-estática da cinta, serão abordados usando uma analogia com três processos de fabrico: extrusão, corte por arrombamento e corte por arranque de apara. Com esta analogia, pretende-se determinar um modelo analítico capaz de replicar o comportamento das cintas de travamento, quando estas entram em contacto com o interior estriado do tubo.

Concluiu-se que os processos de fabrico que envolvem o corte da cinta, têm um papel predominante em comparação com a extrusão causada pela presença do cone de forçamento e que, a dimensão geométrica que governa o processo de deformação, é o diâmetro exterior da cinta de travamento.

Ao longo desta investigação, foi criado um modelo analítico capaz de replicar o processo de deformação de qualquer cinta de travamento, independente da geometria ou do material da mesma.

Palavras-chave:

Cinta de Travamento, Modelação Analítica, Projétil de Artilharia, Deformação Plástica, Corte

Abstract

The interaction between large calibre artillery projectiles and the bore of the gun tube, it is made possible by a component called Rotating Band. This metallic annular shape component, deforms when it is forced against the forcing cone and the rifling of the bore.

This deformation will produce an obturation of the propellant chamber, which will generate a rotation. These are the main functions of a rotating band when considering real firing conditions. Knowing how this deformation occurs represents the main question when designing this type of equipments.

In this study, every physical phenomenon related to the quasi-static deformation will be approached considering three known manufacturing processes: extrusion, cut by punching and cut by chip. With this analogy it will be possible to compute and replicate the behaviour of the rotating band, when it is forced in the bore.

As a conclusion to this study, it is possible to say that the cut mechanism has a great influence on the whole process. However, the extrusion contribution to the result cannot be excluded. Also, it was found that the dimension that governs the rifling force is the outside diameter of the rotating band.

Throughout this investigation, an analytical model was created, replicating the deformation mechanism of any rotating band, regardless of its dimension or composition.

Keywords:

Rotating Band, Analytical Model, Artillery Projectile, Plastic Deformation, Cut.

Agradecimentos

Com o início do curso da Academia Militar em 2009, esta dissertação de mestrado representa um dos passos finais no caminho para alcançar os quadros permanentes do Exército Português. Este caminho ninguém o faz sozinho e, por isso, gostava de agradecer a todos os que estiveram ao meu lado nestes longos anos como aluno.

Ao Coronel Pereira da Silva, antigo Diretor de Curso do Serviço de Material, pela sua disponibilidade e dedicação demonstradas desde o momento que ingressei no Serviço de Material.

Ao Professor José Borges, professor na Academia Militar, que acompanhou a evolução do curso e que proporcionou várias oportunidades de aprendizagem.

A todos os meus amigos civis que compreenderam a minha ausência e o meu sacrifício.

Aos militares do meu curso que agora representam a minha segunda família, por terem partilhado todas as experiências e vivências e que, após estes longos anos, continuam a ser um exemplo a seguir.

À minha família sempre presente. Um porto seguro que me auxiliou e que me acompanhou constantemente, a quem eu dedico esta conquista.

À minha namorada Cristina, por me ter apoiado nestes últimos dois anos e por me ter tornado uma melhor pessoa e militar.

Índice

Resumo	i
Abstract.....	iii
Agradecimentos.....	v
Lista de Tabelas e Figuras	ix
Lista de Abreviações e Nomenclatura.....	xiii
Conceitos e Definições Militares	xvii
1. Introdução.....	1
2. Estado da Arte	5
2.1 Revisão do Estado da Arte.....	5
2.2 Processos Elementares de Deformação Plástica e Corte	13
3. Balística Interna	17
3.1 Obus M114 A1 155mm.....	17
3.2 Granada Convencional de Artilharia 155 mm	18
3.3 Carga Propulsora	19
3.4 Cinta de Travamento	21
4. Modelo Analítico	25
4.1 Modelo Analítico da Extrusão.....	25
4.2 Modelo Analítico do Mecanismo de Corte.....	29
4.2.1 Corte por Arrombamento.....	29
4.2.2 Corte por Arranque de Apará	31
5. Definição de Parâmetros	33
5.1 Dimensões.....	33
5.2 Definição do Material.....	36
6. Análise e Discussão de Resultados	39
6.1 Cinta de Travamento “Bin Wu”	39
6.1.1 Extrusão.....	39
6.1.2 Mecanismo de Corte	41
6.1.3 Força Total	43

6.1.4 Comparação com os Resultados Experimentais	45
6.2 Validação do Modelo	46
6.2.1 Influência do Material	46
6.2.2 Influência dos Parâmetros Dimensionais	47
6.3 Cinta de Travamento do Projétil do Projeto FIREND®	54
6.3.1 Extrusão.....	54
6.3.2 Mecanismo de Corte	57
6.3.3 Força Total	58
7. Conclusões e Trabalho Futuro	61
Referências	63
Anexos.....	1
Anexo A: Metodologia do modelo analítico da Extrusão.....	3

Lista de Tabelas e Figuras

Tabelas

Tabela 2-1: Valores máximos da pressão medidas no tubo e no projétil, obtidos através de ensaios experimentais para diferentes projéteis de calibre 155 mm (Hartman & Stirbis, 1973).....	6
Tabela 2-2: Valores máximos de pressão de deformação, obtidos experimentalmente e analiticamente para os diferentes projéteis (Hartman & Stirbis, 1973).	7
Tabela 2-3: Dimensões das características mais importantes dos tubos usados para ensaios experimentais em Wu et al. (2014a).	10
Tabela 2-4: Resultados obtidos experimentalmente usando diferentes dimensões, tubos e condições de carregamento (Wu, et al., 2014a).....	11
Tabela 3-1: Descrição do obus M114 A1 usado pelo Exército português (Santos H. J., 2012).....	17
Tabela 3-2: Alcances e velocidade de saída no obus M114 A1 (Rheinmetall, 1982).	21
Tabela 3-3: Propriedades do latão CuZn15 (Castanheira, 2012).	23
Tabela 5-1: Dados geométricos referentes às cintas e canos de “Firend” e “Bin Wu”.	34
Tabela 5-2: Definição das principais dimensões a usar nos modelos analíticos.....	35
Tabela 5-3: Coeficientes de resistência e de encruamento de acordo com a fonte bibliográfica.....	37
Tabela 5-4: Contante de correção para o corte por arrombamento (Rodrigues & Martins, 2010).	37
Tabela 5-5: Tensão de rotura nominal e verdadeira para cada material.	38
Tabela 5-6: Pressão específica de corte de acordo com os diferentes materiais (Schey, 1987).	38
Tabela 6-1: Comparação entre as dimensões modeladas e as convencionalmente utilizadas.	51

Figuras

Figura 2-1: Esquema ilustrativo da interação cinta-tubo que se verifica no cone de forçamento (Hartman & Stirbis, 1973).	6
Figura 2-2: Esquema das tensões e deformações aplicadas no tubo do obus (Andrews, 2006).....	8
Figura 2-3: Evolução da Pressão da Carga Propulsora (P_{gas}) e da Pressão da Cinta (PCT) de acordo com a distância à face culatra e a carga utilizada para efetuar o disparo (Andrews, 2006).	9
Figura 2-4: Fotografia da CSS-88500 EUTM em vários instantes durante os ensaios experimentais das cintas de travamento (Wu, et al., 2014a).	10

Figura 2-5: Representação esquemática das dimensões relevantes da seção transversal de um tubo (esquerda) e fotografia do tubo nº1 usado em Wu et al. (2014a) caracterizado pela Tabela 2-3 (Wu, et al., 2014a).....	10
Figura 2-6: Fotografias das cintas de travamento após os ensaios experimentais (Wu, et al., 2014a).	11
Figura 2-7: Evoluções força-deslocamento das várias cintas de travamento (Wu, et al., 2014a).....	12
Figura 2-8: Diagrama exemplificativo de uma extrusão direta (Rodrigues & Martins, 2010).	13
Figura 2-9: Evolução da força de extrusão de acordo com o deslocamento no processo de extrusão direta (Rodrigues & Martins, 2010).	14
Figura 2-10: Diferentes fases do corte por arrombamento; a) contacto entre o punção e a chapa, b) ligeira flexão no início da deformação, c) deformação plástica e abertura de fendas, d) separação completa da peça e d) extração da peça e inversão do movimento do punção. (Rodrigues & Martins, 2010).....	14
Figura 2-11: Evolução da força de corte durante o processo de corte por arrombamento em função do deslocamento do punção (Rodrigues & Martins, 2010).	15
Figura 2-12: Comparação esquemática entre a inclinação da aresta de corte (Rodrigues & Martins, 2010).....	15
Figura 2-13: Diagrama representativo da secção transversal do plano ortogonal (Toenshoff & Denkena, 2013).....	16
Figura 3-1: Obus M114A1 155 mm.	17
Figura 3-2: Representação esquemática do tubo do Obus M114 A1 (Marques, 2014).	18
Figura 3-3: Esquema representativo da seção transversal da alma estriada do cano; a) conjunto estria-intervalo; b) fundo; c) flancos e d) intervalo.	18
Figura 3-4: Esquema representativo da munição HE, M107 155 mm (Department of the Army, HEADQUARTERS, 1994).	19
Figura 3-5: Evolução temperatura-deslocamento em kelvin (esquerda) e pressão-deslocamento (direita) para uma granada 155 mm (Carlucci & Jacobson, 2014).....	20
Figura 3-6: Exemplo de uma curva pressão-tempo, representativa da evolução de pressão desenvolvida pela expansão de gases dentro do tubo de uma arma (Carlucci & Jacobson, 2014). ...	20
Figura 3-7: Carga M3A1 (Marques, 2014).	21
Figura 3-8: Evolução das granadas de artilharia antes da criação de cintas de travamento (Ammunition Pages).	22
Figura 3-9: Desenho técnico em corte da seção transversal e reconstituição computacional de uma cinta de travamento (Calado, 2013).	23

Figura 4-1: Fotografia de uma cinta de travamento de uma munição M107 antes (esquerda) e após o disparo (direita) com o sentido do bordo de ataque da cinta indicado.	25
Figura 4-2: Representação esquemática de a) extrusão de perfis ocios; b) extrusão de uma cinta de travamento e c) vista em corte da seção A-A.	26
Figura 4-3: Elemento de volume usado no Método da Fatia Elementar.	26
Figura 4-4: Esquema representativo da comparação entre o corte por arrombamento convencional e o corte da cinta de travamento.	30
Figura 4-5: Representação esquemática em vista de corte dos parâmetros dimensionais das estrias presentes no tubo.	31
Figura 4-6: Representação esquemática das dimensões de cada flanco.	31
Figura 4-7: Representação esquemática da comparação entre um processo convencional de corte por arranque de apara (esquerda) (Cardoso, 2012) e o corte de uma cinta de travamento (direita).	32
Figura 5-1: Esquema representativo da geometria modelada analiticamente com os principais parâmetros dimensionais assinalados.	33
Figura 5-2: Representação esquemática dos parâmetros dimensionais mais relevantes.	35
Figura 5-3: Comparação entre comportamento mecânico do material das cintas de travamento sobre diferentes condições de carregamento (Wu, et al., 2014b).	36
Figura 6-1: Evolução da força de extrusão no modelo “Bin Wu”.	40
Figura 6-2: Evolução da diferença entre a espessura antes da deformação (h_{Amax}) e a espessura depois da deformação (h_{Dmin}) e a relação com o fator corretivo.	41
Figura 6-3: Esquematização do processo de corte por arrombamento em que a) é o instante inicial de contacto e que b) c) e d) representam a estabilização no perímetro de corte máximo.	42
Figura 6-4: Evolução do perímetro de corte no modelo “Bin Wu”.	42
Figura 6-5: Evolução da força de corte por arrombamento para o modelo “Bin Wu”.	42
Figura 6-6: Evolução da força de corte por arranque de apara para o modelo “Bin Wu”.	43
Figura 6-7: Combinação dos modelos extrusão e corte por arrombamento para a cinta “Bin Wu”.	44
Figura 6-8: Combinação dos modelos extrusão e corte por arranque de apara para a cinta “Bin Wu”.	44
Figura 6-9: Comparação entre os dados obtidos experimentalmente (Wu, et al., 2014a) e analiticamente para a cinta “Bin Wu”.	45
Figura 6-10: Comparação entre as várias evoluções analíticas da força de deformação total, de acordo com o material escolhido.	47

Figura 6-11: Influência da alteração do comprimento da cinta de travamento na força de estriamento.	48
Figura 6-12: Influência da alteração do diâmetro da cinta de travamento na força de estriamento.	49
Figura 6-13: Seção transversal de uma cinta de travamento de uma granada 155 mm (Montgomery R. S., 1975).	50
Figura 6-14: Influência da forma geométrica na força de extrusão em granadas 155 mm.	51
Figura 6-15: Evolução da curva de força da cinta “Bin Wu”, com a forma geométrica convencional e com a redução do perímetro de corte.	53
Figura 6-16: Exemplo da situação de pressão/força de extrusão máxima.	55
Figura 6-17: Evolução da diferença entre as espessuras antes e depois da deformação, com exemplos ilustrativos.	55
Figura 6-18: Evolução da força de extrusão no modelo “Firend”.	56
Figura 6-19: Evolução do Perímetro de Corte para a cinta “Firend”.	57
Figura 6-20: Evolução da força de corte por arrombamento para o modelo “Firend”.	57
Figura 6-21: Evolução da força de corte por arranque de apara para o modelo “Firend”.	58
Figura 6-22: Combinação dos modelos extrusão e corte por arrombamento para a cinta “Firend”.	59
Figura 6-23: Combinação dos modelos extrusão e corte por arranque de apara para a cinta “Firend”.	59

Lista de Abreviações e Nomenclatura

Abreviaturas

AM	Academia Militar
cm	Centímetros
CuZn15	Liga de Cobre e Zinco
EUA	Estados Unidos da América
EUTM	<i>Electronic Universal Testing Machine</i>
FIREND®	Projeto de combate a incêndios florestais
h	Horas
IST	Instituto Superior Técnico
K	Kelvin
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
km	Quilómetros
kN	Quilo Newton
kPa	Quilo Pascal
m	Metros
m/s	Metros por segundo
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
N	Newton
TNT	Trinitrotolueno
ton	Toneladas

Nomenclatura

Símbolos Latinos	Definição
$h_{A\ max}$	Espessura pré deformação máxima
h_A	Espessura pré deformação
h_{CT}	Espessura da cinta de travamento
$h_{D\ min}$	Espessura pós deformação mínima
h_D	Espessura pós deformação
h_L	Espessura do intervalo
h_{estria}	Espessura de início das estrias
D_{CT}	Diâmetro exterior da cinta de travamento
D_E	Diâmetro das estrias
D_L	Diâmetro dos intervalos
$D_{projectil}$	Diâmetro do projétil sem cinta de travamento

F_a	Força de atrito
F_c	Força de Corte
F_{max}	Força Principal de Corte
K_S	Pressão Específica de Corte
P_{CT}	Pressão na cinta de travamento
P_e	Pressão de Extrusão
P_{gas}	Pressão na base do projétil devido à deflagração da carga propulsora
e_{max}	Profundidade de corte máxima no corte por arranque de apara
p_{ativo}	Perímetro de corte ativo
w_{CT}	Comprimento da cinta de travamento
w_E	Largura da estria
w_L	Largura do intervalo
h	Espessura/altura
A	Área da seção transversal
B	Parâmetro geométrico da extrusão
C	Constante corretiva do corte por arrombamento
D	Diâmetro do perfil
K	Coefficiente de Resistência
N	Número de estrias
e	Profundidade de corte no corte por arranque de apara
n	Coefficiente de Encruamento
p	Pressão na matriz e no projétil
pc	Perímetro de Corte
r	Eixo da direção radial
x'	Deslocamento axial
z	Eixo da direção longitudinal

Símbolos Gregos

Definição

ε_f	Extensão final
μ_1	Coefficiente de atrito na interação cone-cinta
μ_2	Coefficiente de atrito na interação projétil-cinta
σ_1	Tensão principal máxima na direção longitudinal
σ_3	Tensão principal máxima na direção radial
σ_R	Tensão de rotura verdadeira
σ_{UTS}	Tensão de rotura nominal
σ_e	Tensão limite de elasticidade
σ_{fm}	Tensão média de escoamento
σ_r	Tensão na direção radial

σ_{unif}	Tensão efetiva
σ_z	Tensão na direção longitudinal
σ_{zA}	Tensão longitudinal na seção anterior
σ_{zD}	Tensão longitudinal na seção posterior
τ_R	Tensão de rotura ao corte
α	Ângulo do cone de forçamento
δ	Folga entre o diâmetro da cinta de travamento e o diâmetro das estrias
ε	Extensão verdadeira
μ	Coefficiente de atrito
σ	Tensão verdadeira

Conceitos e Definições Militares

Alma do Tubo: a superfície interior do tubo entre a câmara e a boca (Santos R. , 2010);

Alma estriada: a superfície interior do tubo com sulcos helicoidais ou outra configuração em espiral, que permite conferir rotação ao projétil, dotando-o de estabilidade giroscópica (Santos R. , 2010);

Arma de Fogo: todo o engenho ou mecanismo portátil destinado a provocar a deflagração de uma carga propulsora geradora de uma massa de gases, cuja expansão impele um ou mais projeteis (Santos R. , 2010);

Artilharia: Arma do Exército português;

Balística Externa: Ciência que estuda todos os fenómenos físicos durante o voo do projétil, desde o instante em que abandona o tubo até ao instante do seu impacto ou detonação;

Balística Interna: Ciência que estuda os fenómenos físicos, mecânicos e químicos gerados no interior da arma antes da saída do projétil pela boca do tubo (Santos, 2010).

Boca do Tubo: a extremidade da alma do tubo por onde sai o projétil (Santos, 2010);

Calibre da Arma: a denominação da munição para que a arma é fabricada (Santos, 2010);

Calibre do Tubo: diâmetro interior do tubo, expresso em milímetros ou polegadas, correspondendo, nos calos de alma estriada, ao diâmetro de brocagem antes de abertas as estrias (Santos, 2010);

Câmara de Combustão: a parte do tubo ou, nos revolveres, a cavidade do tambor onde se introduz a munição e onde se dá a deflagração da carga propulsora (Santos, 2010);

Tubo: a parte da arma destinada a guiar o projétil no momento do disparo (Santos, 2010);

Carga Propulsora: a carga de composto químico usada para carregar as munições ou a carga de pólvora preta ou substância similar usada para carregar as armas de carregamento pela boca (Santos, 2010);

Ciclo de Fogo: o conjunto de operações realizadas sequencialmente que ocorrem durante o funcionamento das armas de fogo de carregar pela culatra (Santos, 2010);

Estriamento: Ato ou efeito de estriar, de fazer estrias em. Fenómeno verificado na interação entre a alma estriada do tubo e o componente responsável (do projétil) pela obturação dos gases. Nesta dissertação, esse elemento é a Cinta de Travamento

Granada: o projétil tipicamente explosivo de grande calibre disparado por morteiros ou obuses.

Munição: o cartucho ou invólucro ou outro dispositivo contendo o conjunto de componente que permitem o disparo do projétil ou de múltiplos projeteis, quando introduzidos numa arma de fogo (Santos, 2010);

Obturação dos gases: capacidade que impede o escape de gases para a frente do projétil, evitando perdas de carga e diminuições no rendimento da arma;

Obus: Arma de fogo de grande calibre usada pela artilharia;

Parâmetros Balísticos: todos os fatores que influenciam o cálculo e a própria trajetória do projétil;

Projétil ou Bala: a parte componente de uma munição ou carregamento que se destina a ser lançada através do tubo pelos gases resultantes da deflagração de uma carga propulsora ou outro sistema de propulsão (Santos, 2010);

Tempo de Carregamento: o tempo que que uma determinada arma demora entre disparos sucessivos.

Guarnição de uma arma: Número de militares necessários para operar uma arma, que permita tirar o máximo rendimento possível da mesma;

1. Introdução

Portugal não dispõe atualmente da capacidade económica, que lhe permita sustentar uma indústria bélica capaz de produzir todos os equipamentos necessários para armar as suas forças armadas. Logo, a resposta a essa limitação passa por importar esses mesmos equipamentos de países que possuam uma indústria desenvolvida.

De facto, é mais económico para o Estado Português importar estes equipamentos do que suportar os custos de uma indústria de produção, no entanto quando se pretende projetar/desenvolver algum destes equipamentos, é notório a falta de conhecimento científico que rodeia o modo de funcionamento dos mesmos. Isto verifica-se, uma vez que os países que exportam para Portugal ou para qualquer outra entidade importadora, apenas exportam os equipamentos físicos, mantendo o conhecimento aprofundado sobre os mecanismos/equipamentos e o modo de funcionamento confidenciais. Um destes equipamentos importados são as munições M107 de calibre 155 milímetros, usadas pela artilharia portuguesa, que são importadas e usadas desde 1983 (Santos H. J., 2012).

Apesar do conhecimento relativo a esta interação ser superficial e suficiente para permitir uma operação manual dos militares que a usam, nunca existiu a necessidade de aprofundar este mesmo conhecimento. Até que em 2005 surgiu o projeto conjunto entre a Academia Militar (AM) e o Instituto Superior Técnico (IST), que pretendia desenvolver uma munição de calibre 155 milímetros capaz de extinguir incêndios florestais de difícil acesso terrestre.

O projeto mencionado anteriormente denominado por FIREND®, tem como principal função ser capaz de transportar um agente extintor e dispersá-lo numa determinada área terrestre, onde estejam presentes fogos florestais ou industriais de difícil acesso terrestre.

Passados dez anos de desenvolvimento teórico e experimental, em 2015 o projeto assumiu uma vertente mais económica e ambiental, com o objetivo de desenvolver um projétil fabricado num material polimérico capaz de cumprir a mesma função. A mudança de um material metálico para um material polimérico reduz o custo e o impacto ambiental, mas altera significativamente a forma como os militares efetuam o disparo e calculam os parâmetros balísticos necessários para que o projétil atinga o alvo.

O ponto de partida para esse desenvolvimento foi a aplicação de um material polimérico devido ao seu baixo custo de produção quando produzidos em grande escala e também devido ao seu peso reduzido, quando comparados com as munições convencionais existentes. (Almeida, 2015)

Para que seja possível apresentar um projeto viável de uma granada de artilharia, é necessário conhecer a interação entre o projétil e o tubo. Esta interação é realizada por um componente convencionalmente metálico, denominado por Cinta de Travamento.

A cinta de travamento é um componente integrante da constituição de uma granada de artilharia, com uma forma anelar, apresentando a seção transversal com o diâmetro exterior maior de toda a granada. As suas características e funções serão apresentadas e analisadas mais pormenorizadamente no Capítulo 3. No entanto, é importante realçar que a cinta de travamento é um dos mecanismos mais

importantes de um projétil, visto que confere a estabilidade necessária tanto na fase de balística interna, como na fase da balística externa.

Pela importância que a cinta de travamento representa numa granada convencional, pretende-se com esta dissertação aprofundar o conhecimento e o funcionamento da mesma, de modo a possibilitar um projeto futuro viável destinado ao projeto *FIREND®*. Relativamente ao “funcionamento”, pretende-se estudar que fenómenos físicos estão presentes na interação cinta-tubo.

No âmbito desta dissertação, estes fenómenos que atuam na cinta serão denominados por “Estriamento da Cinta de Travamento”, por ser o termo militar usado atualmente para caracterizar este fenómeno. Tecnicamente a palavra “estriamento”, poderá não corresponder à verdade observada, visto que tudo indica para a presença de uma extrusão e de um mecanismo de corte.

O processo de estriamento de uma cinta de travamento é o processo mecânico que envolve a alteração da forma geométrica original, provocada pela interação com o cone de forçamento e as estrias¹. Até então desconhece-se se esta alteração é provocada por deformação plástica (com conservação de volume), por um mecanismo de corte ou por uma combinação de ambos.

Por se desconhecer o que realmente provoca a alteração da forma geométrica da cinta, nesta dissertação serão efetuadas analogias com três processos de fabrico: extrusão, corte por arrombamento e corte por arranque de aparas. A partir destas analogias, serão criados vários modelos analíticos baseados nas propriedades mecânicas do material e nas dimensões da cinta, que terão como principal objetivo replicar a interação cinta-tubo.

Com a analogia criada entre a deformação de uma cinta e os processos referidos anteriormente, será possível obter valores de pressão e força que serão comparados com resultados de diversas fontes bibliográficas.

A comparação entre resultados analíticos e experimentais será importante quando se pretender determinar se, a pressão/força de estriamento necessária é compatível com a pressão/força gerada pela carga propulsora. Ou seja, a cinta tem como principal função retardar o movimento do projétil até que a pressão dos gases seja alta o suficiente e, após ter sido alcançado esse valor, a cinta deformar-se-á aderindo à forma da alma estriada do tubo iniciando o seu movimento. Os valores máximos necessários para abrir as estrias na cinta, não poderão ser maiores do que o valor máximo gerado pela carga propulsora, por significar que a carga não seria suficiente para estriar a cinta e efetuar o disparo. Esta será a principal condição que determinará o sucesso do modelo analítico final.

No Capítulo 2 serão apresentados os estudos de vários autores que investigaram a interação cinta-tubo e que efetuaram ensaios experimentais sobre condições de carregamento quási-estáticas. A principal fonte de resultados experimentais será Wu et al. (2014a) cujos resultados serão usados para validar os dados obtidos no Capítulo 6.

¹ Estrias são saliências presentes no interior do cano, dispostas de forma helicoidal ao longo do mesmo. (Calado, 2013)

A validação consistirá na criação de dois modelos analíticos (denominados por “*Firend*” e “*Bin Wu*”), que replicarão duas cintas de travamento diferentes. Um deles terá as mesmas dimensões e material que constituem as cintas usadas em Wu et al. (2014a). Se os resultados obtidos analiticamente forem compatíveis com os obtidos experimentalmente, então poderá ser afirmado que o modelo analítico corresponderá à realidade e que, alterando as dimensões da cinta ou o material, a validade dos resultados será a mesma.

Esta dissertação encontra-se organizada em sete capítulos principais, sendo a presente introdução o primeiro.

Capítulo 2 – “Estado da Arte” divide-se em duas partes principais. A primeira baseia-se na revisão bibliográfica sobre todos os aspetos relacionados com uma cinta de travamento; desde os ensaios experimentais até ao estudo da interação com outros componentes. A segunda aborda a analogia entre a entrada do projétil no tubo (designado por estriamento na terminologia militar) e três operações elementares de fabrico por deformação plástica e corte.

Capítulo 3 – “Balística Interna” expõe o conhecimento da terminologia militar, de modo a facilitar a compreensão de todos os termos utilizados ao longo da realização desta dissertação.

Capítulo 4 – “Modelo Analítico” apresenta o desenvolvimento dos modelos analíticos capazes de replicar a deformação e o corte da cinta de travamento durante os primeiros instantes de deslocamento.

Capítulo 5 – “Definição de Parâmetros” apresenta a aplicação dos modelos analíticos que foram desenvolvidos no Capítulo 4 a condições de ensaios experimentais disponíveis na literatura, procede à comparação dos resultados obtidos e perspectiva a utilização dos modelos para o projétil a utilizar no âmbito de um projeto em curso na Academia Militar.

Capítulo 6 – “Análise e Discussão de Resultados” trata da análise e obtenção de resultados provenientes do desenvolvimento dos modelos analíticos. Pretende-se com esses resultados realizar uma comparação com os dados experimentais expostos nos Capítulos 2 e 3 de modo a validar os resultados analíticos. Um outro objetivo deste capítulo, é determinar a influência de determinados parâmetros no resultado final.

Capítulo 7 – “Conclusões e Trabalhos Futuros” procede à identificação das principais conclusões que resultam da dissertação e identifica os assuntos que devem ser estudados noutros trabalhos que se venham a realizar no domínio desta dissertação.

2. Estado da Arte

Este capítulo encontra-se dividido em duas partes principais. A primeira consiste na revisão bibliográfica referente à investigação realizada até então, sobre o processo de deformação de uma cinta de travamento. A segunda, aborda os processos de fabrico que servirão de base na construção dos modelos analítico para que, em capítulos seguintes, a analogia entre o estriamento e os mesmos seja de fácil compreensão.

Pretende-se também expor os resultados provenientes de ensaios experimentais que, mais tarde serão utilizados na validação dos modelos criados ao longo desta dissertação.

2.1 Revisão do Estado da Arte

Relativamente ao conhecimento sobre o processo de estriamento da cinta, inúmeros autores aprofundaram o tema, mas não exclusivamente por métodos analíticos, como se pretende nesta dissertação.

Cronologicamente Hartman & Stirbis (1973) foram os primeiros autores a apresentar o seu trabalho de investigação relativo às pressões e forças desenvolvidas durante o processo de deformação em cintas de travamento.

Hartman & Stirbis (1973) realizaram uma série de ensaios quási-estáticos, que consistiam na aplicação de uma pressão na base de diversos projéteis de calibre 155 milímetros, com características dimensionais e mecânicas diferentes.

Tanto o tubo como os projéteis encontravam-se instrumentados com extensómetros, de modo a tornar possível a medição de uma pressão média de deformação, nos vários instantes de deslocamento ao longo do tubo. À medida que o projétil se deslocava axialmente e o centro da cinta passava diretamente por baixo de algum extensómetro, foi possível determinar uma pressão média gerada no tubo pela passagem da cinta, " P_{CT} ", que resulta da observação das deformações detetadas por esse extensómetro e o seu adjacente imediato (Hartman & Stirbis, 1973).

Na Tabela 2-1, é possível observar os resultados obtidos através das leituras provenientes dos extensómetros fixos no tubo e no projétil. Para o trabalho a desenvolver nos capítulos seguintes desta dissertação, é importante realçar a diferença existente nos comprimentos das cintas utilizadas, presente na segunda coluna da tabela. O comprimento da cinta de travamento, " w_{CT} ", será um dos fatores dimensionais que influenciarão os valores de pressão/força de deformação total. Esta influência será verificada no Capítulo 6.

Tabela 2-1: Valores máximos da pressão medidas no tubo e no projétil, obtidos através de ensaios experimentais para diferentes projéteis de calibre 155 mm (Hartman & Stirbis, 1973).

Projétil, designação	Comprimento da Cinta de Travamento, w_{CT} [mm]	Pressão no Tubo [MPa]	Pressão no Projétil [MPa]
M118	25.91	346	358
XM549	37.09	346	339
ATAM5	37.09	302	324.74

Na Figura 2-1 é possível observar a geometria inicial do modelo “analítico”² usada por Hartman & Stirbis (1973), que se baseia no desenvolvimento das forças de atrito, “ F_a ”, devido à aplicação de uma pressão na base do projétil, “ P_{gas} ”. A cinta do diagrama apresenta uma geometria simplificada, com um comprimento “ w_{CT} ” e uma altura “ h ”.

As dimensões mencionadas são os parâmetros mais importantes, que também serão aplicados durante o desenvolvimento de ambos os modelos analíticos correspondentes a cada cinta de travamento.

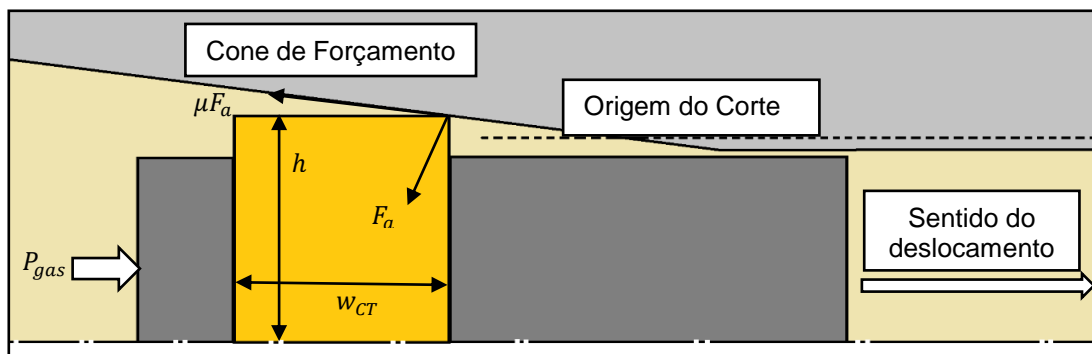


Figura 2-1: Esquema ilustrativo da interação cinta-tubo que se verifica no cone de forçamento (Hartman & Stirbis, 1973).

Aliando os dados obtidos experimentalmente com o modelo analítico gerado a partir da Figura 2-1, Hartman & Stirbis (1973) relacionaram a pressão da cinta, “ P_{CT} ”, com a pressão na base do projétil, “ P_{gas} ”, recorrendo à expressão 2.1:

$$P_{CT} = \frac{P_{gas} * A}{\mu * w_{CT} * (w_L + w_E) * N} \quad (2.1)$$

Em que:

- w_L : Largura do intervalo do tubo estriado [mm];
- w_E : Largura da estria do tubo estriado [mm];
- w_{CT} : Comprimento da cinta de travamento [mm];

² O modelo analítico criado por Hartman & Stirbis (1973), combina os resultados experimentais dos ensaios de compressão modificados com a modelação analítica das forças de atrito verificadas na interação cinta-tubo. A componente analítica foi baseada num equilíbrio de forças.

- A : Área da base do projétil [mm²];
- N : Número de estrias;
- μ : Coeficiente de atrito na interação cinta-tubo.

Estabelecendo um coeficiente de atrito igual a 0.3, igualando os parâmetros dimensionais à realidade das cintas que foram ensaiadas e utilizando os valores experimentais relativos à pressão na base do projétil, Hartman & Stirbis (1973) obtiveram uma aproximação bastante aceitável. Dos três projéteis considerados, dois deles (o M118 e o XM549) forneceram valores de pressão de cinta idênticos, embora o terceiro projétil (ATAM5) tenha apresentado uma diminuição de dez pontos percentuais (Hartman & Stirbis, 1973).

A Tabela 2-2 contém os valores máximos e os instantes no deslocamento correspondentes. É importante salientar que somente o projétil XM549 apresenta instantes diferentes onde ocorre a força de estriamento máxima.

Tabela 2-2: Valores máximos de pressão de deformação, obtidos experimentalmente e analiticamente para os diferentes projéteis (Hartman & Stirbis, 1973).

Projétil	Deslocamento Experimental [mm]	Deslocamento Analítico [mm]	Pressão Máxima Experimental [MPa]	Pressão Máxima Analítica [MPa]
M118	38.1	38.1	55.16	41.37
XM549	38.1	60.96	75.84	81.36
ATAM5	50.8	50.8	66.88	66.88

A interação cinta-tubo é um dos principais fatores que, para além de influenciar o sucesso do disparo, influencia a vida útil das próprias armas. Montgomery (1985) apresenta as consequências que as forças de atrito podem causar nos tubos e os vários mecanismos de atrito existentes nesta interação.

O desgaste radial excessivo na cinta de travamento irá resultar num desgaste na zona da boca (saída) do tubo, causando imprecisão no tiro. Por outro lado, se houver desgaste excessivo nos bordos da cinta, a área de corte poderá ser demasiado reduzida para haver corte efetivo pelas estrias, impossibilitando uma rotação estável e originando perdas de carga (Montgomery R. S., 1984).

Verifica-se a existência de dois tipos de mecanismos de desgaste na interação cinta-tubo. Nos instantes iniciais, no cone de forçamento perto do início das estrias, existe um escorregamento entre dois metais provocando um desgaste adesivo e abrasivo. Após alguns milímetros de deslocamento, parte da cinta forma um filme de material fundido, aumentando a lubrificação no resto do processo de desgaste (Montgomery R. S., 1984).

A vida útil dos tubos dos obuses é um dos fatores mais importantes no projeto deste tipo de equipamentos, estando diretamente relacionado com as cintas de travamento (visto que são o único elemento da granada que interagem com o próprio tubo) e com a carga propulsora.

Andrews (2006) apresenta um estudo experimental relativo à influência da carga propulsora e do tipo de projétil na vida útil do tubo do obus. Apesar da presente dissertação não aprofundar o estudo sobre

a tribologia e manutenção destes equipamentos, considerou-se o estudo importante por conter informações experimentais sobre os valores de pressão gerados por cada tipo de carga propulsora.

Andrews (2006) instrumentou o tubo do obus, similarmente ao observado em Hartman & Stirbis (1973), no entanto, Andrews (2006) efetuou ensaios experimentais em condições dinâmicas de carregamento.

Foram medidas, ao longo do dia de tiro, elevadas deformações quando o tubo se encontrava lubrificado, o que significa que foram efetuadas medições após a limpeza do tubo e após os três primeiros disparos que antecipavam uma longa paragem. No geral, as deformações associadas à cinta de travamento diminuíam com o aumento da carga propulsora e com o desgaste do tubo e, nas cargas mais elevadas, diminuíam à medida que o deslocamento no tubo era maior (Andrews, 2006).

Com a instrumentação do tubo do obus e/ou do projétil com extensómetros, foi possível medir as deformações do tubo com a passagem dos gases e da própria granada. Na Figura 2-2 é possível observar um diagrama exemplificativo das pressões que são lidas pelos extensómetros: a Pressão da Carga Propulsora, " P_{gas} ", e a Pressão da Cinta, " P_{CT} ".

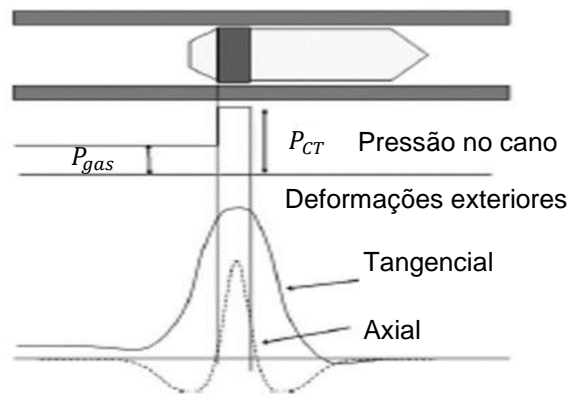


Figura 2-2: Esquema das tensões e deformações aplicadas no tubo do obus (Andrews, 2006).

Na Figura 2-3 é possível observar o resultado das leituras relativas às pressões da carga propulsora e da cinta de travamento. As deformações do tubo foram traduzidas em valores de pressão e distinguidas pela carga propulsora³ usada nesse disparo.

³ Tradução da língua inglesa da palavra "Charge" usada na Figura 2-3

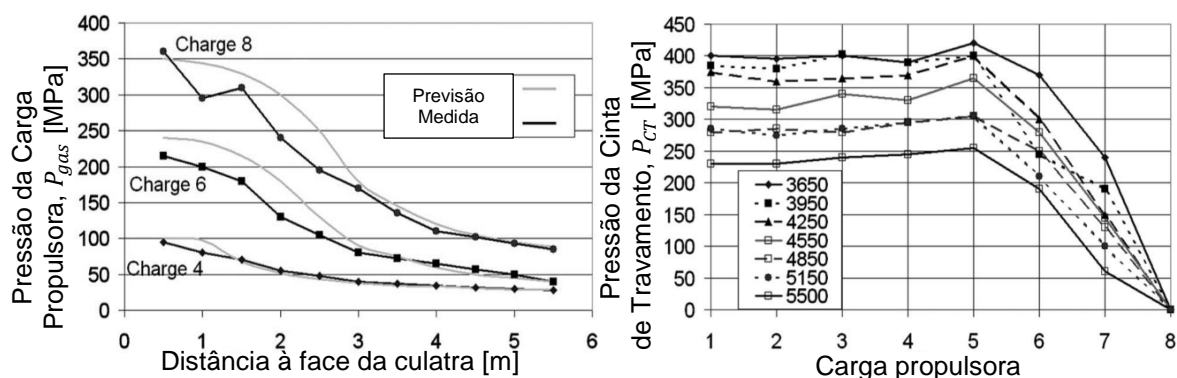


Figura 2-3: Evolução da Pressão da Carga Propulsora (P_{gas}) e da Pressão da Cinta (P_{CT}) de acordo com a distância à face culatra e a carga utilizada para efetuar o disparo (Andrews, 2006).

À esquerda da Figura 2-3, é possível observar o desenvolvimento da pressão dos gases ao longo do tubo de acordo com a carga utilizada. À direita o desenvolvimento da pressão provocada pela passagem da cinta de travamento em vários pontos do tubo.

Resumindo, a pressão máxima desenvolvida pela carga 8 é aproximadamente 360 MPa, enquanto que a mínima registada foi desenvolvida pela carga 4 e atingiu aproximadamente 95 MPa.

Os valores de pressão apresentados na figura anterior representam as condições de operação das cintas e dos tubos em regime dinâmico. Ou seja, durante o desenvolvimento dos modelos analíticos e futuramente no projeto da cinta, estes valores representarão o carregamento máximo e mínimo sobre os quais a cinta tem de ser capaz de operar corretamente. Entende-se por “operar corretamente”, resistir instantaneamente ao movimento do projétil de modo a atingir uma determinada velocidade de saída do tubo.

Para concluir a revisão bibliográfica, será apresentada a investigação realizada por Wu et al. (2014a e 2014b). Estes autores apresentam dois artigos científicos, um referente ao estudo da tribologia verificada nas cintas de travamento e outro referente ao atrito da interação cinta-tubo. Ambos os estudos são de extrema importância, por apresentarem os mais recentes dados experimentais de ensaios em condições quási-estáticas e dinâmicas, relativos à deformação de cintas de diversos materiais e dimensões.

Wu et al. (2014b) efetuou uma série de ensaios quási-estáticos (como Andrews (2016)) e dinâmicos. Para conduzir ensaios quási-estáticos, utilizou-se um ensaio de compressão modificado, maioritariamente idêntico ao observado em Hartman & Stirbis (1973) e, para os ensaios dinâmicos, utilizou-se um canhão de ar comprimido.

Ensaio de deformação de cintas de cobre e *nylon* foram realizados sobre condições quási-estáticas de carregamento na “CSS-88500 Electronic Universal Testing Machine” (EUTM - Figura 2-4). A velocidade do punção da EUTM foram definidos para os vários ensaios como 0.5, 1, 3, 5, 10 e 30 mm/s, e a força necessária foi medida eletronicamente em função do deslocamento axial (Wu, et al., 2014b)

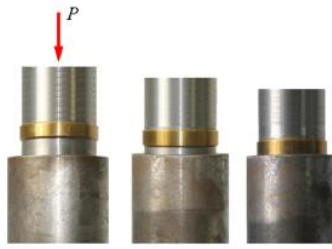


Figura 2-4: Fotografia da CSS-88500 EUTM em vários instantes durante os ensaios experimentais das cintas de travamento (Wu, et al., 2014a).

Estes autores investigaram também a interação entre a cinta de travamento e o tubo, e é neste artigo onde estão presentes os principais dados que serão usados para completar o desenvolvimento dos modelos analíticos ao longo desta dissertação.

Relativamente às dimensões das cintas de travamento e do tubo utilizado durante os ensaios, é importante referir que são bastante inferiores aos observados para uma granada 155 milímetros, tal como se pode observar na Tabela 2-3 e na Figura 2-5.

Tabela 2-3: Dimensões das características mais importantes dos tubos usados para ensaios experimentais em Wu et al. (2014a).

Cano	Diâmetro do Intervalo, D_L [mm]	Diâmetro da Estria, D_E [mm]	Comprimento do Intervalo, w_L [mm]	Comprimento da Estria, w_E [mm]	Número de Estrias
Tubo Estriado nº1	74.5	76.5	3	7	24
Tubo Estriado nº2	76.2	77.7	2.1	5.4	32

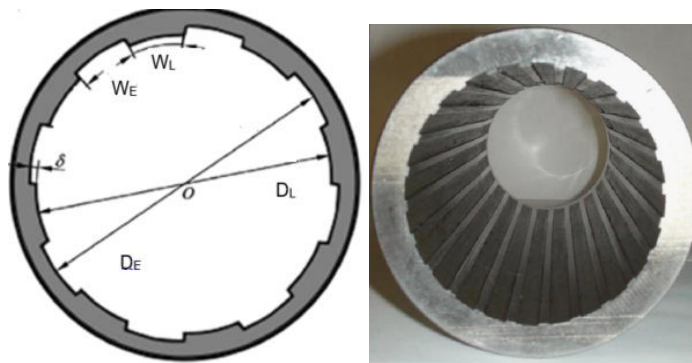


Figura 2-5: Representação esquemática das dimensões relevantes da seção transversal de um tubo (esquerda) e fotografia do tubo nº1 usado em Wu et al. (2014a) caracterizado pela Tabela 2-3 (Wu, et al., 2014a).

No final da realização dos ensaios quási-estáticos e dinâmicos experimentais, foram obtidos resultados que variam de acordo com as dimensões, tubo utilizado e tipo de carregamento, tal como se pode observar na Tabela 2-4 e nas Figura 2-6 e 2-7.

Na Tabela 2-4 é possível observar que, apesar de os ensaios apresentarem uma evolução de força similar, a magnitude dos valores é bastante distinta pelo facto de as cintas em *nylon* apresentarem valores significativamente mais reduzidos que as cintas em cobre.

Quando o carregamento é aplicado em condições quási-estáticas, as cintas de travamento de cobre não são cortadas pelas estrias, mas sim extrudidas visto que têm tempo suficiente para se deformarem (Wu, et al., 2014a). Na aplicação de um carregamento dinâmico, a cinta de travamento para além de ser extrudida, é também cortada pela presença das estrias no cone de forçamento, deformando-se em microssegundos, sendo o efeito da taxa de deformação e da temperatura no processo prominentes. No caso de um disparo real, a cinta de travamento deforma-se devido a maiores pressões, provocando uma maior taxa de deformação e temperatura (Wu, et al., 2014a).

Tabela 2-4: Resultados obtidos experimentalmente usando diferentes dimensões, tubos e condições de carregamento (Wu, et al., 2014a).

Imagem/Gráfico Correspondente	Nº do Tubo	Diâmetro da Cinta de Travamento, D_{CT} [mm]	Comprimento da Cinta de Travamento, w_{CT} [mm]	Tipo de Carregamento	Força Máxima [kN]
(a)	2	78.1	15	Quási-estático	160
(b)	2	78.1	15	Quási-estático	20
(c)	2	78.1	15	Quási-estático	140
(d)	1	76.7	15	Dinâmico	85
(e)	1	76.7	15	Dinâmico	7
(f)	1	76.7 + 76.8	10 + 10	Dinâmico	60+90

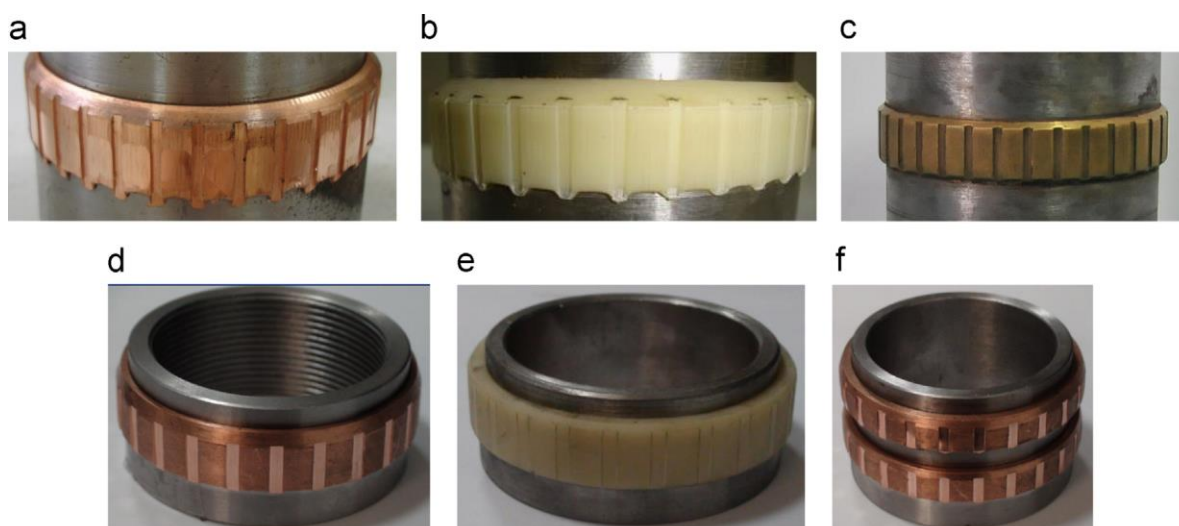


Figura 2-6: Fotografias das cintas de travamento após os ensaios experimentais (Wu, et al., 2014a).

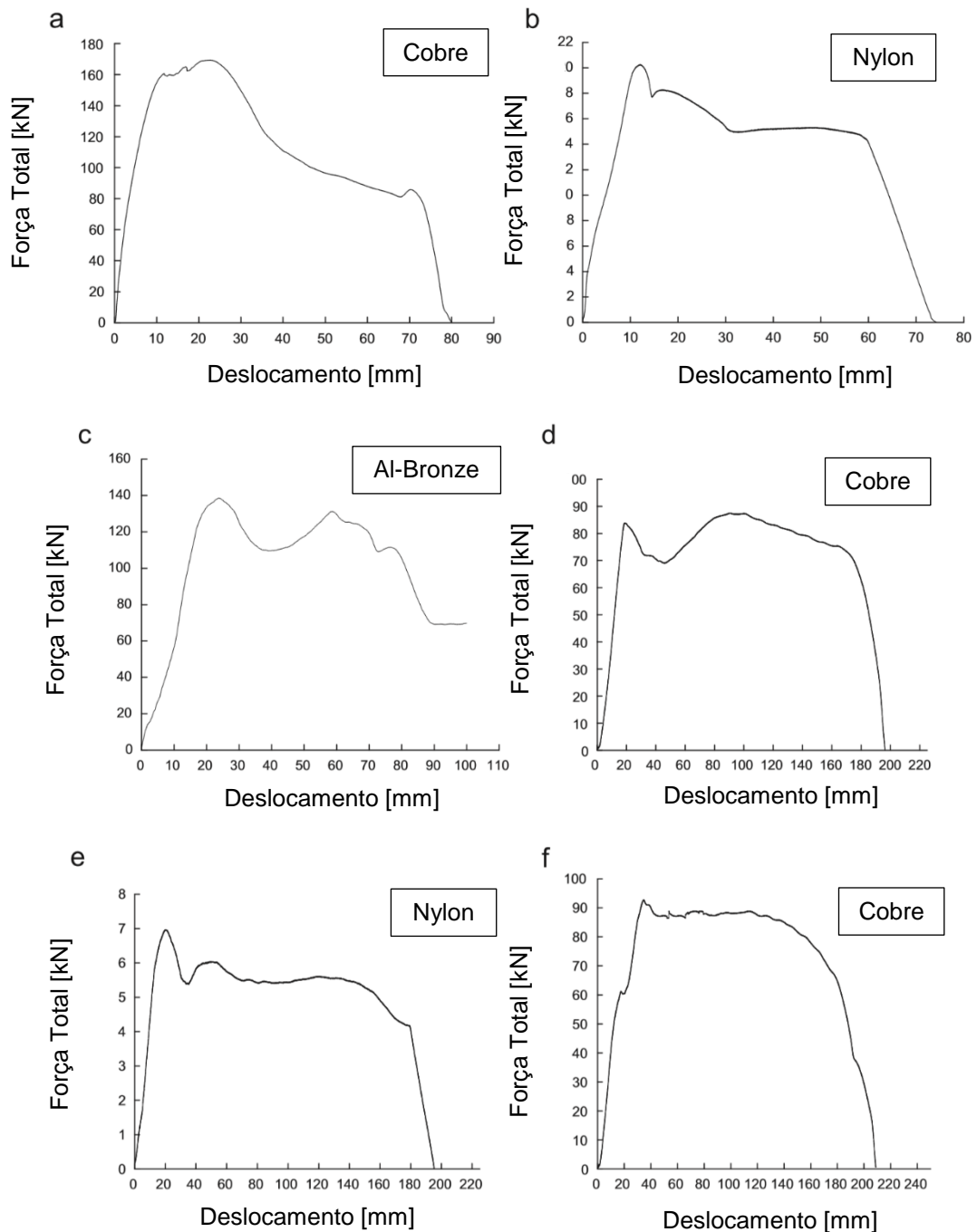


Figura 2-7: Evoluções força-deslocamento das várias cintas de travamento (Wu, et al., 2014a).

Com os resultados experimentais observados ao longo deste capítulo, será possível validar os resultados obtidos analiticamente nos próximos capítulos da dissertação. A validação será realizada usando os valores experimentais apresentados por Wu et al. (2014a), visto que é a fonte mais recente e que fornece mais pormenores relativos à geometria do problema.

2.2 Processos Elementares de Deformação Plástica e Corte

Neste subcapítulo será realizada uma breve introdução aos processos de fabrico mencionados anteriormente, onde serão referidas apenas as vertentes úteis no âmbito da temática desta dissertação e posteriormente, será introduzida a analogia entre estes processos e o estriamento de uma cinta de travamento.

A extrusão é um processo tecnológico de deformação plástica na massa, onde o material submetido a pressões elevadas, aplicadas por intermédio de um punção, é forçado a passar pelo orifício de uma matriz, de modo a reduzir e/ou modificar a forma da sua seção transversal (Rodrigues & Martins, 2010). (Figura 2-8)

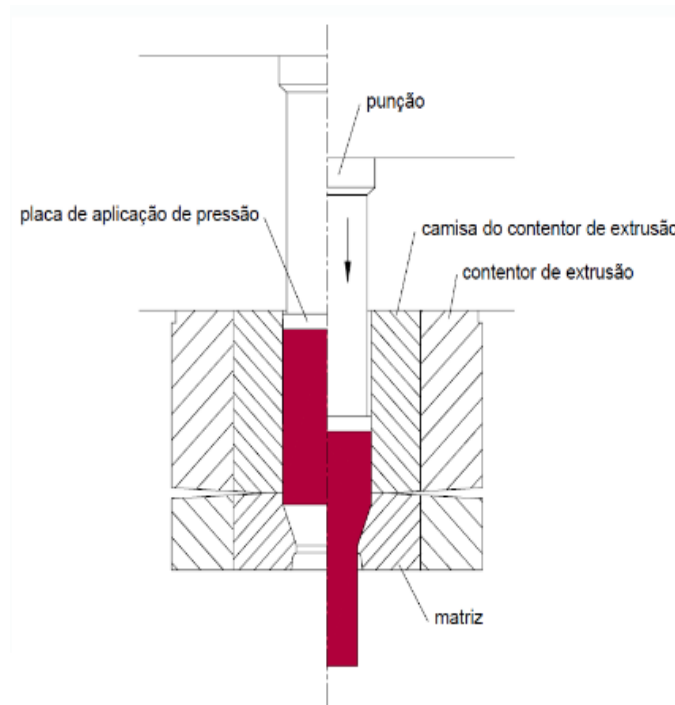


Figura 2-8: Diagrama exemplificativo de uma extrusão direta (Rodrigues & Martins, 2010).

A analogia que será apresentada no Capítulo 4, usará a informação relativa à extrusão direta, visto que é a que mais se assemelha com a deformação da cinta de travamento. A curva da evolução força-deslocamento habitualmente observada durante a realização do processo apresenta a forma da Figura 2-9.

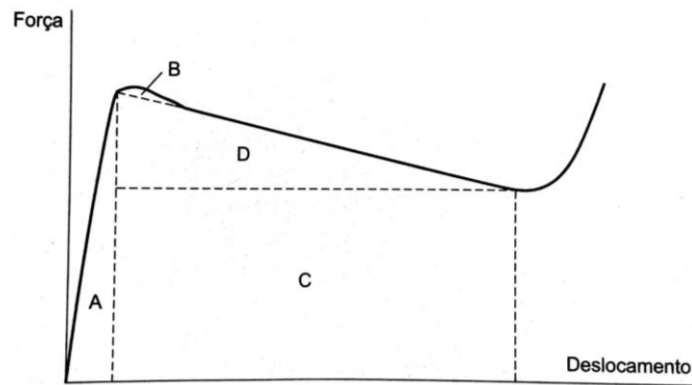


Figura 2-9: Evolução da força de extrusão de acordo com o deslocamento no processo de extrusão direta (Rodrigues & Martins, 2010).

A evolução divide-se em quatro regiões distintas que representam os diferentes instantes energéticos verificados ao longo do processo: (Rodrigues & Martins, 2010)

- A – Energia necessária para deformar o material à geometria interior do contentor;
- B – Energia necessária para iniciar o processo;
- C – Energia necessária para deformar plasticamente o volume do material;
- D – Energia necessária para vencer o atrito que se verifica no contacto entre o material e o contentor.

O corte por arrombamento é um dos processos tecnológicos mais usado para cortar chapa, embora também seja utilizado no corte de varão, de barra, de tubo e perfis estruturais (Rodrigues & Martins, 2010).

Uma ferramenta típica de corte por arrombamento é constituída por um punção, cujo contorno tem a geometria da peça a cortar, e por uma matriz que assegura a passagem do punção e das peças cortadas. Entre o punção e a matriz existe uma folga que estabelece uma diferença de cotas entre as superfícies laterais do punção e da matriz. É habitual designar por corte por arrombamento as operações em que a peça que sai pela matriz é a peça final ou estampa, e por puncionamento as operações em que a peça final fica sobre a matriz e pelo seu furo sai o desperdício ou rombo (Rodrigues & Martins, 2010). (Figura 2-10)

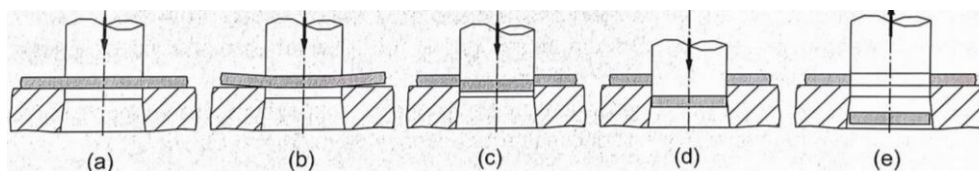


Figura 2-10: Diferentes fases do corte por arrombamento; a) contacto entre o punção e a chapa, b) ligeira flexão no início da deformação, c) deformação plástica e abertura de fendas, d) separação completa da peça e d) extração da peça e inversão do movimento do punção. (Rodrigues & Martins, 2010).

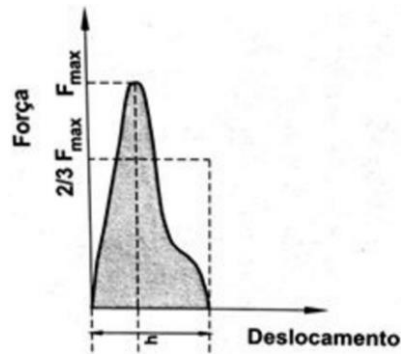


Figura 2-11: Evolução da força de corte durante o processo de corte por arrombamento em função do deslocamento do punção (Rodrigues & Martins, 2010).

Com o objetivo de reduzir as forças de corte geradas durante o processo (Figura 2-11), utilização uma técnica denominada por: inclinação da aresta de corte.

A inclinação da aresta de corte provoca um corte progressivo da chapa que, de acordo com o ângulo de inclinação da ferramenta ou da matriz, provocará a redução desejada através da alteração do perímetro de corte. (Figura 2-12)

A geometria do cone de forçamento, vai exigir que no desenvolvimento do modelo analítico se considere um modelo de corte inclinado.

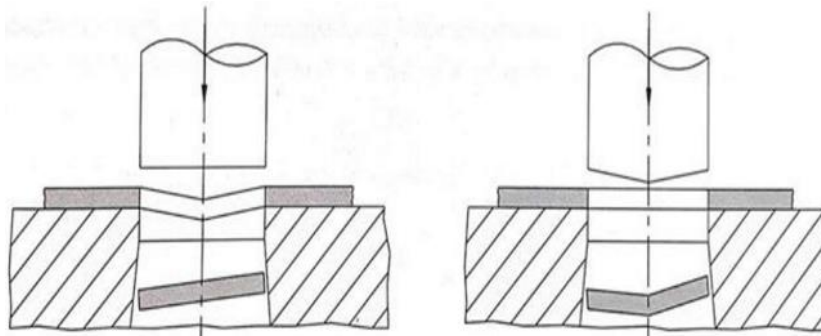


Figura 2-12: Comparação esquemática entre a inclinação da aresta de corte (Rodrigues & Martins, 2010).

Para além do corte por arrombamento, um outro processo de corte muito utilizado é o corte por arranque de apara. A aresta de corte da respetiva ferramenta, ao penetrar a peça provoca uma deformação plástica local seguida de uma fissura, que por sua vez se propaga causando a separação do material denominado por aparas.

O corte por arranque de apara é um processo tecnológico de alteração da forma através da remoção de material excedentário necessário à obtenção de um componente mecânico com uma determinada geometria. (Batista, 2010)

O processo de formação de apara em condições de deformação plástica plana também designado por corte ortogonal, encontra-se representado na Figura 2-13.

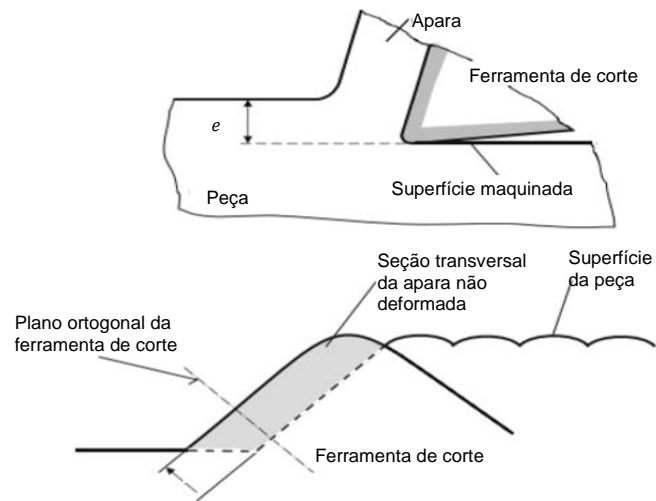


Figura 2-13: Diagrama representativo da seção transversal do plano ortogonal (Toenshoff & Denkena, 2013).

Dependendo do comportamento mecânico do material da peça e das condições de corte aplicadas, existem diversos mecanismos de formação de apara: (Toenshoff & Denkena, 2013)

- Formação de apara contínua regular;
- Formação de apara contínua irregular;
- Formação de apara descontínua;

Com esta apresentação sumária dos processos de tecnologia mecânica, fica por apresentar a comparação entre estes mesmos processos e a deformação da cinta de travamento. Essa comparação será introduzida no Capítulo 4.

3. Balística Interna

Durante a realização desta dissertação serão enumerados diversos parâmetros e definições que têm origem na terminologia militar. Com este capítulo pretende-se aumentar a compreensão desta terminologia, de modo a facilitar a compreensão de todas as informações que serão explanadas ao longo deste documento.

3.1 Obus M114 A1 155mm

Arma desenvolvida pelo Exército Norte-americano nos anos 40, usada na 2ª Guerra Mundial, na Guerra das Coreias e na Guerra do Vietnam (Figura 3-1). Em 1983 foi adquirida pelo exército Português, substituindo o desatualizado "Obus 14 cm". Trata-se de uma boca-de-fogo média rebocada por uma viatura de 5 toneladas 4x4 (Santos H. J., 2012).

Na Tabela 3-1, estão definidas as principais características deste tipo de armamento. Embora seja utilizado pelos militares portugueses, existem atualmente equipamentos que apresentam capacidades superiores, tanto a nível de eficácia de tiro como a nível de mobilidade.



Figura 3-1: Obus M114A1 155 mm.

Tabela 3-1: Descrição do obus M114 A1 usado pelo Exército português (Santos H. J., 2012).

Tração	Rebocado
Guarnição	11 Militares
Comprimento do Tubo	3.79 [m]
Elevação do Tubo	-2 a 63 [°]
Inclinação Transversal	50 [°]
Cadência de Tiro	40 [disparos/h]
Alcance Máximo	14.6 [km]
Peso	5.6 (pronto para tiro), 5.8 (transporte) [ton]
Comprimento no Transporte	7.32 [m]
Largura no Transporte	2.44 [m]
Altura no Transporte	1.8 [m]

Na Figura 3-2, é possível observar uma representação esquemática da seção transversal do tubo do Obus M114 A1, que é constituído pelas seguintes partições (Marques, 2014):

- A: Forma simplificada que representa a Culatra do obus, que garante a obturação do tubo a quando da deflagração da carga propulsora;
- B: Câmara de Combustão;
- C: Cone de Concordância que tem como principal objetivo centrar o projétil;
- D: Cone de Forçamento que serve de ligação entre a Cinta de Travamento e o Tubo;
- E: Alma do Tubo;
- F: Tulipa ou Joia, que é a parte final do tubo com um diâmetro relativamente maior de modo a reduzir o esforço do projétil ao abandonar o mesmo.

No desenvolvimento dos modelos analíticos, as partições que apresentam a maior importância são o “Cone de Forçamento” e os primeiros milímetros da “Alma do Tubo”. As suas dimensões serão apresentadas posteriormente quando o seu conhecimento for necessário na compreensão dos modelos criados. Na Figura 3-3 é possível observar a esquematização das partes constituintes de uma alma estriada.



Figura 3-2: Representação esquemática do tubo do Obus M114 A1 (Marques, 2014).

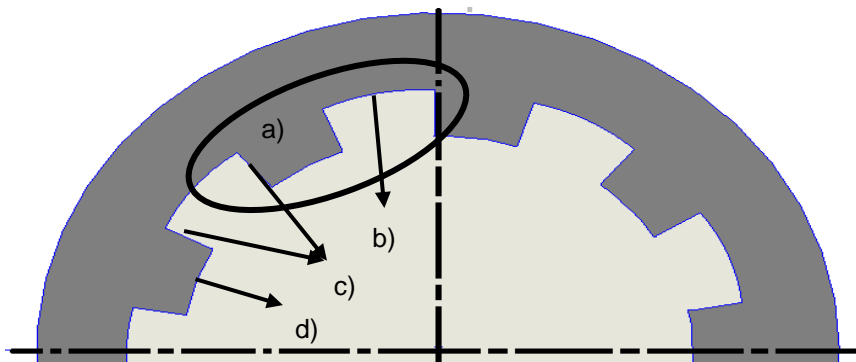


Figura 3-3: Esquema representativo da seção transversal da alma estriada do cano; a) conjunto estria-intervalo; b) fundo; c) flancos e d) intervalo.

3.2 Granada Convencional de Artilharia 155 mm

A universalidade que permite que o mesmo obus dispare munições de calibre diferente não existe, assim como existem restrições em usar granadas projetadas por outros fabricantes. Esta característica, para além de criar uma fidelização entre o fabricante e o utilizador, mantém o nível de segurança elevado durante o manuseamento deste tipo de equipamentos.

A granada usada pelo obus M114 A1 é o projétil de Artilharia M107 155 mm (Figura 3-4). Esta munição contém no seu interior uma carga de 6.6 quilos de TNT ou 7 quilos de Compósito B, que no final da sua

cadeia de fogo, produz um efeito de sopro (explosão) dispersando uma enorme quantidade de fragmentos cortantes, que podem causar danos num raio de 30 metros. (Canadian Army, 1992)

Este projétil tem uma forma ogival que lhe confere estabilidade aerodinâmica, contem uma cinta de travamento (*Rotating Band ou Driving Band*) que induz um movimento de rotação ao entrar em contacto com as estrias do tubo do obus e, na sua base, possui uma placa de aço que previne a entrada de gases provenientes da deflagração da carga propulsora. (Department of the Army, HEADQUARTERS, 1994)

Antes do carregamento manual da munição da câmara de combustão, é retirada a proteção da cinta de travamento (*Grommet*) e a pega de transporte (*Lifting Plug*) é substituída pela espoleta. As espoletas mais comuns são as de acionamento mecânico e as de tempos. A de acionamento mecânico inicia a sua cadeia de fogo somente com o impacto no alvo, enquanto a espoleta de tempos permite uma detonação em pleno voo.

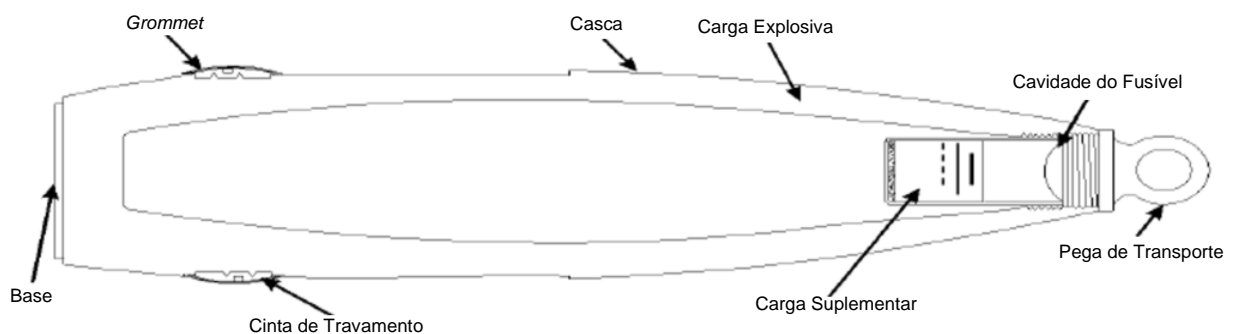


Figura 3-4: Esquema representativo da munição HE, M107 155 mm (Department of the Army, HEADQUARTERS, 1994).

3.3 Carga Propulsora

Independentemente do calibre e função, todas as munições usam algum sistema de propulsão. Existem cargas propulsoras projetadas de modo a proporcionarem uma queima longa e constante (como as existentes em mísseis), no entanto quando se pretende que os projéteis atinjam longas distâncias e velocidades elevadas, é usada uma carga propulsora. Esta carga deflagra em microssegundos num volume fechado (câmara de combustão), aumentando a pressão e fazendo com que o projétil seja expelido pela boca do tubo a elevadas velocidades.

Com este aumento, o movimento do projétil iniciar-se-á quando a pressão for suficientemente elevada. O valor máximo da pressão dependerá da cinta de travamento da granada, visto que é a cinta o elemento responsável por resistir momentaneamente às pressões geradas na base do projétil.

Quando a pressão dos gases na câmara de combustão for elevada o suficiente, a cinta de travamento começará a deformar-se (início do processo de deformação). Este retardamento criado pela cinta, serve

para garantir que o projétil atinja a velocidade final (velocidade de saída do tubo), que permitirá alcançar uma determinada distância.

A título de exemplo, Carlucci e Jacobson (2014) apresentam o estudo da balística interna quando a deflagração da carga propulsora gera um volume de gás ideal. A lei dos gases ideais é essencialmente a combinação de três relações: o volume do gás é directamente proporcional à sua temperatura e ao número de moles presente e inversamente proporcional à pressão do próprio gás (Carlucci & Jacobson, 2014).

Esta simplificação permite apresentar os dados relativos à pressão e temperatura em função do deslocamento. Para o caso de uma munição de calibre 155 milímetros de 45 quilos, com uma pressão inicial de 45 MPa e um tubo com um comprimento de 6 metros, obtêm-se as evoluções de pressão e temperatura observadas na Figura 3-5.

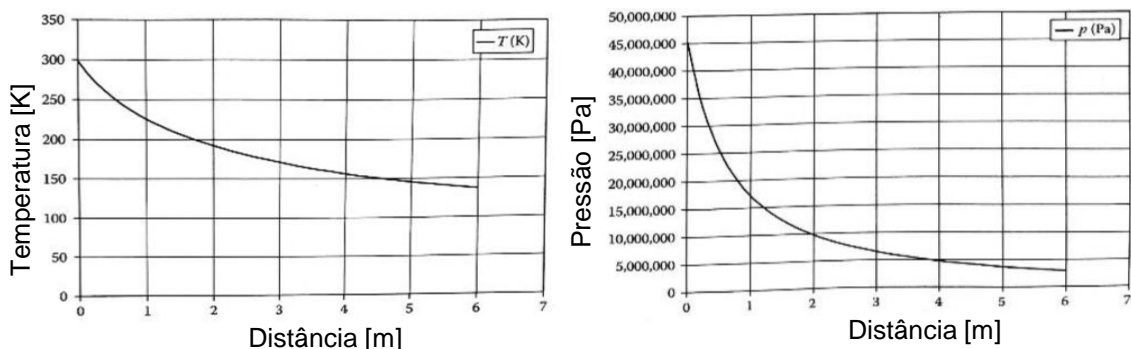


Figura 3-5: Evolução temperatura-deslocamento em kelvin (esquerda) e pressão-deslocamento (direita) para uma granada 155 mm (Carlucci & Jacobson, 2014).

A curva pressão-tempo observada durante a deflagração da carga propulsora dentro do tubo de uma arma, possui a forma geral exemplificada pela Figura 3-6. Na figura, é possível observar que existe um máximo na pressão que surge devido à resistência da cinta de travamento e devido à inércia da própria munição.

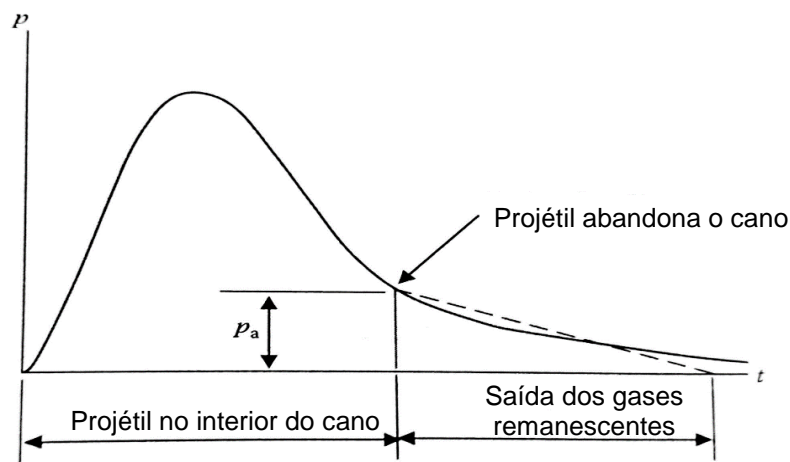


Figura 3-6: Exemplo de uma curva pressão-tempo, representativa da evolução de pressão desenvolvida pela expansão de gases dentro do tubo de uma arma (Carlucci & Jacobson, 2014).

Como já foi referido no Capítulo 2, Andrews (2006) apresenta dados de pressão relativos às diversas cargas propulsoras. Estas diferentes cargas propulsoras, consistem em sacos de pólvora (Figura 3-7) que são adicionados ou retirados de acordo com a distância que se pretende alcançar. Na Tabela 3-2 é possível observar a influência que cada carga tem sobre o alcance do obus.

Tabela 3-2: Alcances e velocidade de saída no obus M114 A1 (Rheinmetall, 1982).

Carga	Alcance Mínimo [m]	Alcance Máximo [m]	Velocidade de Saída [m/s]
1	2900	3900	207
2	3700	4800	235
3	4600	6100	268
4	5900	7800	311
5	7500	9700	372
6	9400	12000	463
7	11600	14600	564



Figura 3-7: Carga M3A1 (Marques, 2014).

3.4 Cinta de Travamento

Como referido anteriormente, a cinta de travamento é um dos componentes-chave para efetuar tiro eficiente e eficaz, no entanto este componente não foi a primeira invenção que pretendia a estabilização do projétil. Quando os primeiros projéteis começaram a ser disparados, a eficiência e o alcance das armas eram bastante reduzidos, logo a necessidade de aumentar estas qualidades tornou-se extremamente importante.

Estes projéteis de artilharia surgiram com uma forma esférica e, aquando da evolução para uma forma cilíndrica, a precisão e estabilidade aumentaram consideravelmente. No entanto, para um corpo cilíndrico possuir a estabilidade aerodinâmica de uma esfera, necessita de ser estabilizado de alguma forma, usando estabilizadores de voo ou inculindo um movimento giroscópico. Ambos os métodos são

utilizados atualmente, sendo a rotação o método mais econômico. Apesar das vantagens aerodinâmicas, o movimento de rotação dá origem a um fenômeno que é necessário ter em conta quando se efetua tiro. Este fenômeno é denominado como Derivação⁴.

Antes da cinta de travamento ser introduzida como meio de conferir rotação ao projétil, outros métodos foram apresentados, desde a utilização de projeteis “torcidos” até à utilização de saliências ao longo do corpo do projétil.

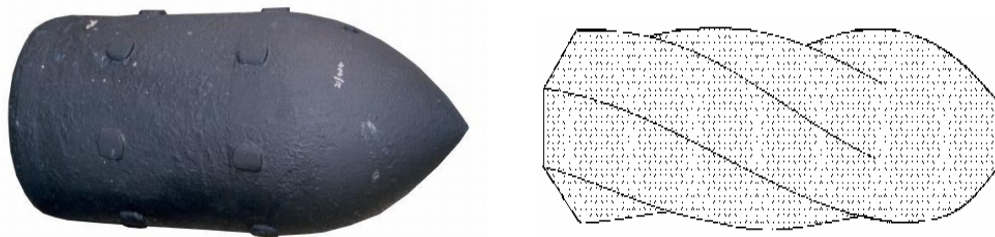


Figura 3-8: Evolução das granadas de artilharia antes da criação de cintas de travamento (Ammunition Pages).

As funções de uma cinta de travamento são as seguintes: (1) centrar a granada no tubo do obus; (2) evitar a fuga dos gases gerados na câmara de combustão para a frente da granada; (3) retardar o movimento do projétil ao longo do tubo momentaneamente, até que a pressão desejada seja alcançada; (4) induzir um movimento de rotação na granada aumentando a sua estabilidade e (5) fixar a granada no tubo quando o seu ângulo de elevação é elevado (Wu, et al., 2014b).

As cintas de travamento convencionais, possuem diversas formas e são constituídas por diversos materiais que variam de fabricante para fabricante. No caso da munição M107 modeladas nesta dissertação, esta apresenta uma forma cilíndrica anelar com um diâmetro exterior máximo de 159 milímetros. Na Figura 3-9 é possível observar um desenho técnico em corte da seção transversal (direita) e uma reconstituição computacional da mesma (esquerda).

⁴ Derivação é um fenômeno físico-dinâmico que faz com que o projétil se desvie lateralmente no seu plano de tiro, devido à rotação provocada pela cinta de travamento (Ministerio del Ejercito, 1977)

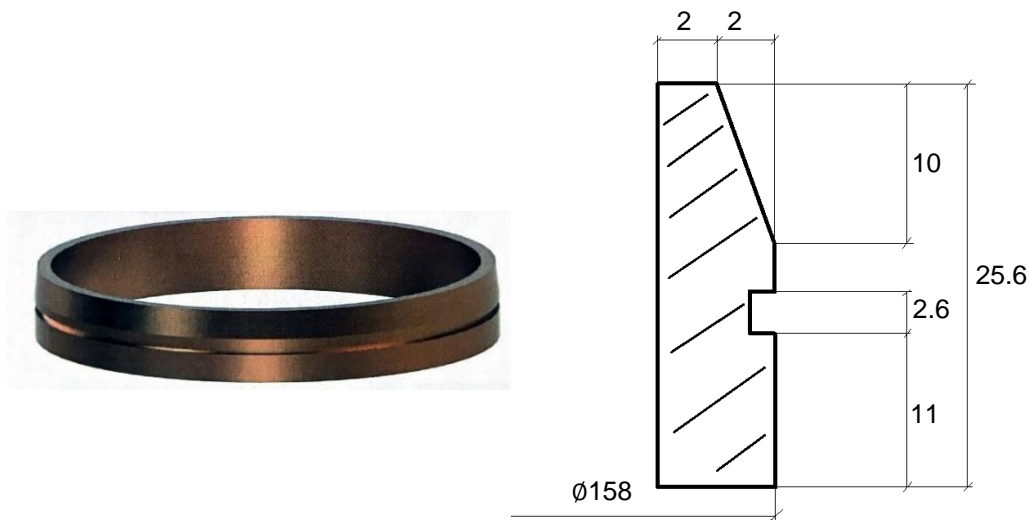


Figura 3-9: Desenho técnico em corte da seção transversal e reconstituição computacional de uma cinta de travamento (Calado, 2013).

Castanheira (2012), com o objetivo de superar esse obstáculo, efetuou uma série de ensaios de caracterização mecânica e chegou à conclusão que as cintas que equipam as munições M107, são de uma liga de cobre CuZn15 com as características observadas na Tabela 3-3 (Castanheira, 2012). Esta conclusão permite complementar a informação referente ao material utilizado nas cintas nos ensaios quase-estáticos de Wu et al. (2014a).

Tabela 3-3: Propriedades do latão CuZn15 (Castanheira, 2012).

Material	Densidade [kg/m ³]	Dureza Vickers	Tensão de Rotura [MPa]	Tensão Limite de Elasticidade [MPa]	Módulo de Elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson
CuZn15	8750	120	460	392	115	0.307

4. Modelo Analítico

Existem inúmeras abordagens que podem ser adotadas, quando o objetivo é compreender e analisar os fenômenos físico-mecânico presentes no contacto entre uma cinta de travamento convencional e o tubo de uma arma de fogo.

Nesta dissertação, os fenômenos mecânicos relacionados com a deformação/corte quási-estático da cinta de travamento (Figura 4-1) serão tratados analiticamente. Apesar da diversidade de autores que usaram análises computacionais e experimentais, o mecanismo responsável por tais fenômenos permanece uma incógnita.

Assim, neste capítulo será descrito o modelo analítico que se baseia numa analogia com três processos de fabrico elementares: extrusão; corte por arrombamento e corte por arranque de apara.

O modelo analítico será apresentado em condições *quá*si-estáticas, pretendendo-se obter um valor de força/pressão máxima, combinando a extrusão e um dos mecanismos de corte, de modo a determinar qual o par se aproxima à realidade observada experimentalmente.

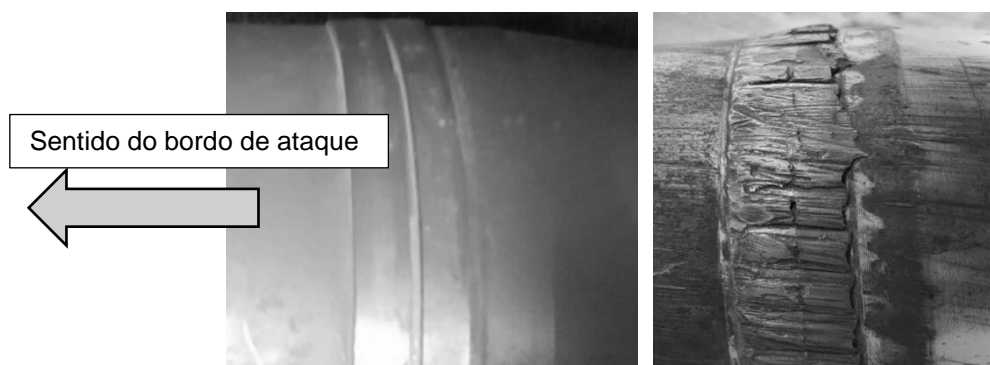


Figura 4-1: Fotografia de uma cinta de travamento de uma munição M107 antes (esquerda) e após o disparo (direita) com o sentido do bordo de ataque da cinta indicado.

4.1 Modelo Analítico da Extrusão

No caso de uma cinta de travamento convencional, devido à presença do cone de forçamento (ver Capítulo 3.1), haverá uma redução do diâmetro exterior, que assegurará a estabilidade do projétil e a obturação dos gases que se formam na câmara de combustão. A redução no diâmetro exterior é o ponto-chave que justifica a presença de uma extrusão em qualquer cinta de travamento cujo tubo da arma apresente um cone de forçamento.

Na Figura 4-2 é possível observar uma comparação entre uma extrusão convencional de um tubo (a) (Rowe, 1965), com a extrusão verificada no cone de forçamento (b). O volume que deformará plasticamente é bastante superior no caso de uma extrusão de tubos, visto que a cinta de travamento tem um comprimento bastante reduzido em comparação com o comprimento do projétil. Tanto numa situação com na outra, existe uma espessura antes e depois da deformação, “*h*”, que influenciará as

tensões no elemento de volume definido e a pressão provocada pelas interações projétil-cinta e cinta-tubo.

A situação observada na Figura 4-2 b), corresponde a um esquema mais próximo da realidade presente nas cintas de travamento convencionais, no entanto a forma apresentada não corresponde à usada no modelo analítico. Neste modelo, a cinta apresenta uma forma cilíndrica uniforme, em que as bases posteriores e anteriores se encontram com a mesma espessura.

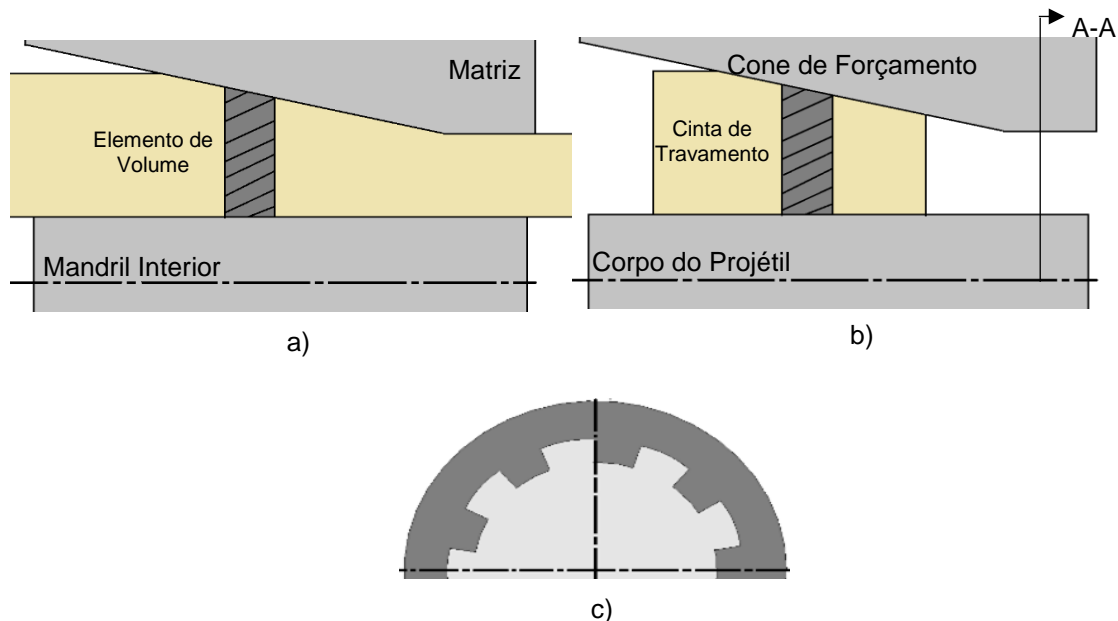


Figura 4-2: Representação esquemática de a) extrusão de perfis ocós; b) extrusão de uma cinta de travamento e c) vista em corte da seção A-A.

O elemento de volume usado no método da Fatia Elementar pode ser observado na figura seguinte, onde estão presentes as principais componentes de tensão, pressão e atrito do problema em desenvolvimento.

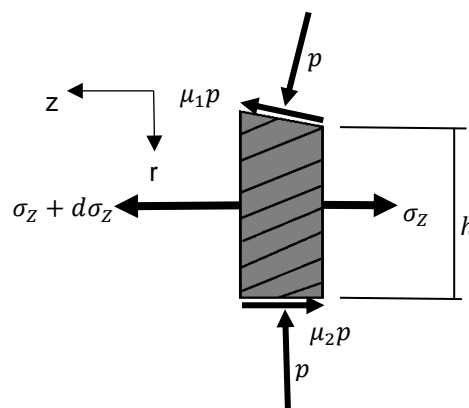


Figura 4-3: Elemento de volume usado no Método da Fatia Elementar.

Rowe (1965) apresenta a dedução da expressão referente a uma extrusão de perfis ocios (Figura 4-2 a)). Esta mesma expressão relaciona a pressão na matriz durante a extrusão com o ângulo de inclinação da mesma e com a tensão de cedência do material utilizado no fabrico dos perfis.

A dedução seguinte baseia-se no método da fatia elementar e difere da solução apresentada por Rowe (1965), visto que o caso deduzido apresenta algumas diferenças, nomeadamente o sentido das forças de atrito.

Antes de aplicar o equilíbrio de forças na direção longitudinal (zz), obtêm as seguintes expressões parcelares:

- Tensão longitudinal (zz) no elemento de volume:

$$(\sigma_z + d\sigma_z)(h + dh)\pi D - h\pi D\sigma_z = \pi D(\sigma_z dh + hd\sigma_z) \quad (4.1)$$

- Pressão na matriz/cone de forçamento:

$$\int_0^{2\pi} p \left(\frac{dz}{\cos\alpha} * \frac{D}{2} \right) d\theta * \text{sen}\alpha = \pi D p \text{tg}\alpha dz \quad (4.2)$$

- Atrito na matriz/cone de forçamento:

$$\int_0^{2\pi} \mu_1 p \left(\frac{dz}{\cos\alpha} * \frac{D}{2} \right) d\theta * \cos\alpha = \pi D \mu_1 p dz \quad (4.3)$$

- Atrito no mandril/projétil:

$$- \int_0^{2\pi} \mu_2 p \left(dz * \frac{D}{2} \right) d\theta = -\pi D \mu_2 p dz \quad (4.4)$$

Em que:

- σ_z : tensão no elemento de volume na direção longitudinal;
- h : espessura (altura) do elemento de volume;
- D : diâmetro exterior da cinta de travamento;
- α : ângulo do cone de forçamento;
- p : pressão no cone de forçamento e projétil;
- μ_1 : coeficiente de atrito entre cone-cinta;
- μ_2 : coeficiente de atrito entre projétil-cinta.

Aplicando um equilíbrio de forças na direção longitudinal, obtém-se a seguinte expressão:

$$(\sigma_z dh + hd\sigma_z)\pi D + p\pi D(\text{tg}\alpha)dz + \mu_1 p \pi D dz - \mu_2 p \pi D dz = 0 \quad (4.5)$$

Sabendo que a variação da espessura no caso de uma cinta de travamento é dada pela expressão 4.6 e eliminando os termos πD , obtém-se a expressão 4.7

$$dh = dz \tan\alpha \quad (4.6)$$

$$(\sigma_z dh + h d\sigma_z) + p dh [1 + B] = 0, \quad B = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\tan\alpha} \quad (4.7)$$

Pelo facto de os valores do ângulo do cone de forçamento, "α", e do atrito, "μ₁" e "μ₂", serem significativamente reduzidos, pode considerar-se que na direcção radial:

$$\sigma_r \cong -p \quad (4.8)$$

Ao introduzir o critério de plasticidade de Tresca, é possível relacionar as tensões principais da seguinte forma:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_z - (-p) = \sigma_e \quad (4.9)$$

Em que "σ_e" é a tensão limite de elasticidade do material que será abordada no próximo capítulo.

Este resultado é de extrema importância pois permite a eliminação de uma variável da equação diferencial 4.7, conferindo a hipótese de transformar a equação mencionada numa forma diferencial de variáveis separáveis.

$$\frac{d\sigma_z}{B * \sigma_z - \sigma_e(1 + B)} = -\frac{dh}{h} \quad (4.10)$$

Ao integrar diretamente a expressão anterior, surge uma constante de integração que introduz no problema a necessidade de implementar uma condição fronteira para a determinar. Para tal, serão consideradas condições de fronteira estáticas na operação de extrusão relacionadas com as secções antes e depois da deformação.

Numa situação de extrusão convencional, como existe uma força que atua na parte posterior do perfil extrudido, que faz com que o material se desloque e se deforme, quando "h" é igual a "h_D", a tensão "σ_{zD}" é nula. No entanto, no caso de uma cinta de travamento, a força que faz com que o material se mova e se deforme atua na parte anterior, logo a condição fronteira a utilizar é a seguinte:

$$h = h_D, \quad \sigma_z = \sigma_{zD} = 0 \quad (4.11)$$

Em que:

- h_A = espessura antes (A) da deformação;
- h_D = espessura depois (D) da deformação;
- σ_{zA} = tensão longitudinal na secção anterior da deformação;
- σ_{zD} = tensão longitudinal na secção posterior da deformação;

Aplicando a condição fronteira, a constante de integração é determinada e a expressão final que servirá de base ao modelo analítico da extrusão é:

$$\sigma_z = \sigma_e * \frac{1 + B}{B} (1 - (\frac{h}{h_D})^B) \quad (4.12)$$

A expressão 4.12 relaciona a tensão longitudinal, " σ_z ", do elemento em deformação plástica com a geometria do tubo do obus. A expressão permite ainda determinar a força e a pressão de extrusão, " P_e ", fazendo $h = h_D$. Com a pressão de extrusão determinada (expressão 4.13), usando a área de contato entre a cinta e a matriz, é possível obter a força de extrusão que permitirá a comparação com os dados fornecidos por Wu et al. (2014a)

$$P_e = \sigma_e * \frac{1 + B}{B} (1 - (\frac{h_A}{h_D})^B) \quad (4.13)$$

Pelo facto de o modelo analítico ter sido desenvolvido em condições rígido-perfeitamente plásticas (desprezando o efeito do encruamento), nesta dissertação irá considerar-se uma tensão média de escoamento, " σ_{unif} ", que será abordada no próximo capítulo.

4.2 Modelo Analítico do Mecanismo de Corte

Neste seção serão apresentadas duas situações de corte distintas. Estas situações de corte baseiam-se na teoria do corte por arrombamento e do corte por arranque de apara, que no Capítulo 6 serão analisadas/testadas como hipóteses viáveis do corte de uma cinta de travamento. Apenas foram considerados estes processos de fabrico para serem comparados com o estriamento da cinta, pelo facto de apresentarem características e parâmetros de corte similares.

4.2.1 Corte por Arrombamento

A primeira hipótese será considerar que o mecanismo de corte da cinta se assemelha ao corte por arrombamento. Na Figura 4-4 é possível observar um esquema comparativo das duas aplicações. Na metade direita da figura, está presente uma estria com um ângulo na sua face de corte (correspondente ao ângulo do cone de forçamento, " α "), sendo possível verificar que o percurso da ferramenta de corte será igual ao comprimento da cinta, " w_{CT} ".

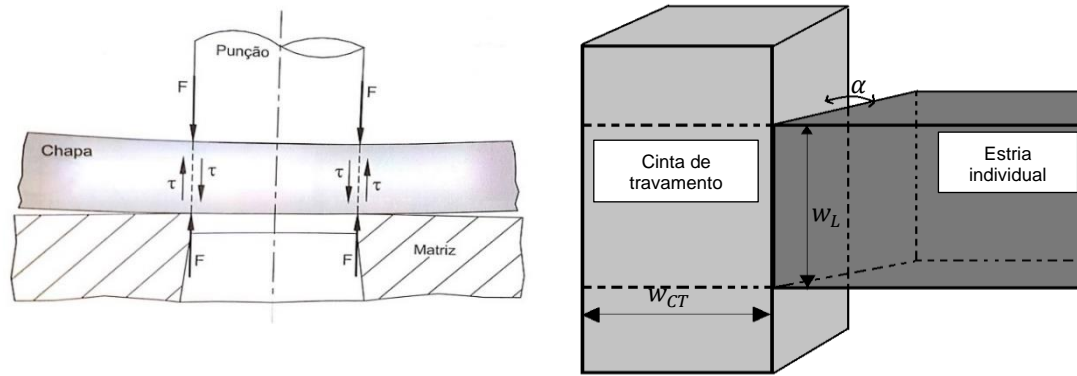


Figura 4-4: Esquema representativo da comparação entre o corte por arrombamento convencional e o corte da cinta de travamento.

O valor máximo da força de corte, denominada por Força Principal de Corte, " F_{max} ", assim como o conhecimento da sua evolução à medida que a ferramenta de corte avança, são dois dos fatores mais importantes, tanto para o processo convencional como para a aplicação em estudo.

Tendo em conta que o corte tem origem na ação nas tensões de corte, a força principal de corte é dada pela expressão:

$$F_{max} = \tau_R * pc * w_{CT} \quad (4.14)$$

Em que:

- τ_R = Tensão de Rotura ao Corte [MPa];
- pc = Perímetro de Corte [mm];
- w_{CT} = Comprimento da Cinta de Travamento [mm];

Por não se encontrar o valor de tensão de rotura ao corte tabelado, foi criada uma constante de correção " C ", que permitirá a utilização de um valor tabelado, a tensão de rotura do ensaio de tração uniaxial, σ_R (Rodrigues & Martins, 2010).

$$F_{max} = C * \sigma_R * pc * w_{CT} \quad (4.15)$$

Em que:

- C = Fator de Correção;
- σ_R = Tensão de Rotura [MPa];

Ao contrário da expressão da extrusão, esta última relaciona diretamente a força necessária para cortar uma cinta de travamento, de acordo com o material e dimensões geométricas do próprio corte.

Como já foi referido no Capítulo 2, existe uma vertente do corte por arrombamento que se baseia na inclinação da aresta de corte. Esta inclinação provoca uma redução na força de corte dada pela expressão 4.16.

$$F_{max} = \frac{2}{3} C * \sigma_R * p_C * w_{CT} \quad (4.16)$$

Analisando a expressão 4.16 é possível afirmar que a força de corte está diretamente relacionada com o número e geometria das estrias. Na Figura 4-5 é possível observar uma estria individual responsável pelo corte. O perímetro de corte é determinado individualmente para cada estria e multiplicado pelo número de estrias, "N".

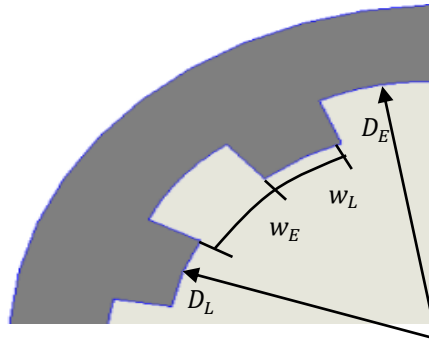


Figura 4-5: Representação esquemática em vista de corte dos parâmetros dimensionais das estrias presentes no tubo.

Neste caso, a alma do tubo assume a função de punção de corte que, devido à sua geometria, impõe uma variação no perímetro de corte à medida que a cinta se desloca axialmente. Ou seja, existe um aumento progressivo do perímetro de corte até ao seu valor máximo, seguido de uma estabilização no valor máximo. O perímetro de corte é dado pela seguinte expressão:

$$p_C = (p_1 + p_2) * N \quad (4.17)$$

Em que "p₁" e "p₂" representam a espessura de cada flanco da estria no seu valor máximo e "N" o número de estrias presente no interior do tubo (Figura 4-6).

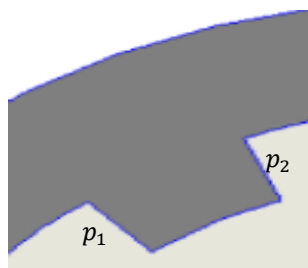


Figura 4-6: Representação esquemática das dimensões de cada flanco.

4.2.2 Corte por Arranque de Aparas

Uma outra possibilidade de caracterizar o processo de estriamento, passa por criar uma analogia com o corte por arranque de aparas. Na Figura 4-7 é possível observar a comparação entre o processo convencional e a aplicação que envolve o corte da cinta de travamento.

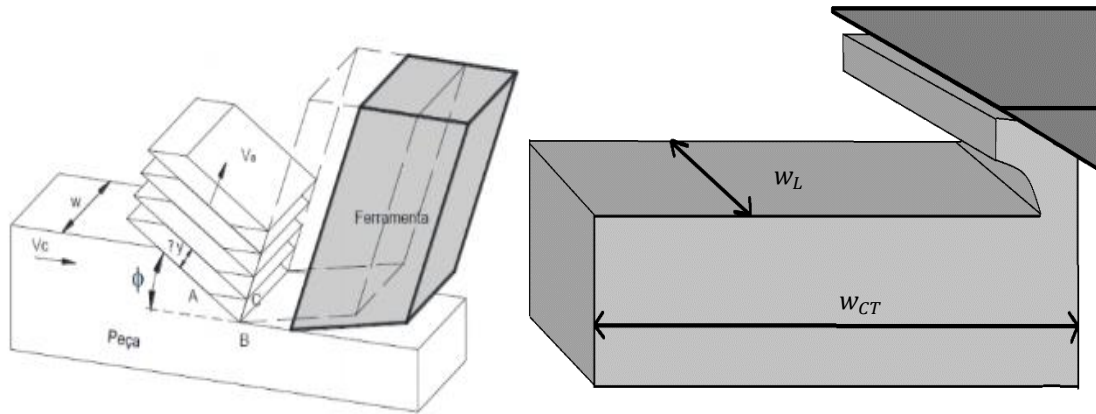


Figura 4-7: Representação esquemática da comparação entre um processo convencional de corte por arranque de apra (esquerda) (Cardoso, 2012) e o corte de uma cinta de travamento (direita).

Neste caso, a força de corte para este processo é dada pela expressão:

$$F_c = K_s * e * w_L \quad (4.18)$$

Em que:

- K_s = Pressão Específica de Corte [MPa];
- e = Profundidade de Corte [mm];
- w_L = Largura da ferramenta de Corte [mm].

Em situações que se requer apenas uma aproximação com uma determinada precisão suficiente, é uso comum utilizar constantes retiradas de ensaios experimentais para obter valores de pressão e força. Uma destas constante é a pressão específica de corte, " K_s ", que apesar de apresentar as dimensões de uma tensão, não é uma tensão verdadeira. (Schey, 1987)

No corte em estudo, a largura da ferramenta de corte corresponderá à largura do intervalo, " w_L ", e a profundidade de corte, " e ", será variável numa primeira fase, estabilizando no valor máximo, " e_{max} ", que é determinado pela seguinte expressão:

$$e_{max} = \frac{D_E - D_L}{2} \quad (4.19)$$

Este processo, como o nome indica, implica a criação de aparas que terão uma determinada direção e dimensão. Em aplicações comerciais de acabamento, as dimensões e direção das aparas são importantes visto que influenciam o resultado final da aplicação, no entanto, no numa cinta de travamento a criação de aparas não é relevante. Como o material da cinta é muito mais macio que o material do tubo, com a deflagração da carga propulsora todas as aparas criadas serão expelidas juntamente com a munição pela boca do tubo.

5. Definição de Parâmetros

No capítulo anterior foram apresentados os modelos analíticos referentes à deformação plástica e ao corte, que surgem aquando da utilização de uma cinta de travamento. Para poder apresentar a obtenção e a análise de resultados, é necessário definir uma série de parâmetros que serão introduzidos nos modelos. A introdução destes parâmetros (como dimensões e materiais) necessitam estar corretamente definidos, de modo a obter resultados válidos tanto no modelo da extrusão como no modelo do mecanismo de corte.

5.1 Dimensões

Como um dos objetivos do projeto FIREND é utilizar os obuses 155 milímetros já existentes em Portugal, a geometria do tubo é fixa. No entanto, serão apresentadas duas geometrias diferentes, a do obus convencional e a do tubo usado por Wu et al. (2014a).

Na Tabela 5-1, serão apresentados os dados dimensionais relevantes para o desenvolvimento dos modelos analíticos das cintas “Firend” e “Bin Wu”. Nessa mesma tabela, é possível observar as diferenças entre os tubos usados por Wu et al. (2014a) em ensaios quási-estáticos e dinâmicos. No próximo capítulo serão expostos somente os resultados obtidos a partir da geometria nº2, por ter sido o tubo usado nos ensaios quási-estáticos.

Na Figura 5-1 é possível observar um esquema do conjunto munição-tubo utilizado na modelação dos modelos analíticos, corresponde à situação inicial do contacto entre a cinta de travamento e o cone de forçamento.

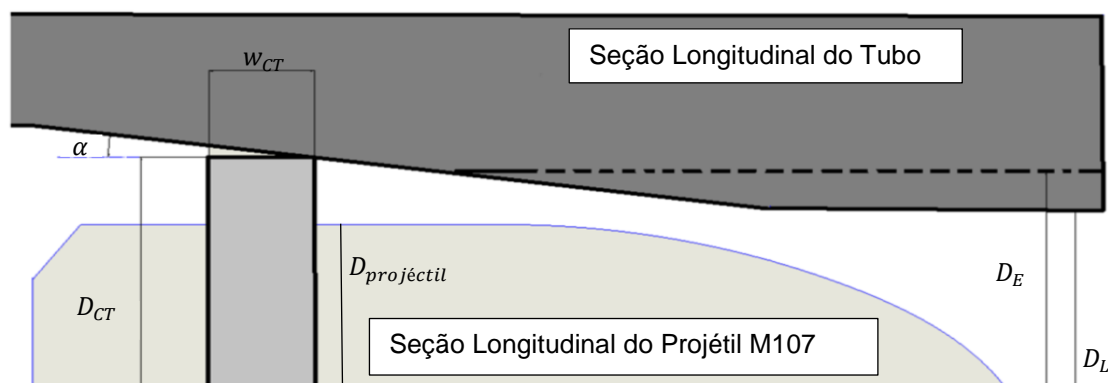


Figura 5-1: Esquema representativo da geometria modelada analiticamente com os principais parâmetros dimensionais assinalados.

Tabela 5-1: Dados geométricos referentes às cintas e canos de “Firend” e “Bin Wu”.

Dimensões	“Firend”	“Bin Wu” 1	“Bin Wu” 2
Comprimento da Cinta, w_{CT} [mm]	25.6	15	15
Ângulo do Cone de Forçamento, α [°]	2.9	1.5	1.5
Diâmetro Externo da Cinta, D_{CT} [mm]	159	76.7	78.1
Diâmetro das Estrias, D_E [mm]	157.582	76.5	77.7
Diâmetro dos Intervalos, D_L [mm]	154.991	74.5	76.2
Diâmetro do Projétil, $D_{projétil}$ [mm]	151	73	73
Comprimento da Estria, w_E [mm]	6	7	5.4
Comprimento do Intervalo, w_L [mm]	4	3	2.1
δ [mm] ⁵	0.709	0.1	0.2
Nº de estrias, “N”	48	24	32

Com os parâmetros dimensionais definidos na tabela anterior, falta realçar quais é que influenciam diretamente o desenvolvimento dos modelos do Capítulo 6. Os valores destes parâmetros surgem na Tabela 5-2 e na Figura 5-2.

Na expressão 5.1, que governa a pressão de extrusão, é necessário determinar a espessura antes e depois da deformação, “ h_A ” e “ h_D ” respetivamente. Estas dimensões são determinadas usando a seguinte fórmula:

$$h_{A,D} = \frac{D_{CT,L} - D_{projétil}}{2} \quad (5.1)$$

A espessura da cinta de travamento, “ h_{CT} ”, corresponde à espessura máxima de deformação “ $h_{A\ max}$ ” e a espessura dos intervalos, “ h_L ”, correspondem à espessura mínima de deformação “ $h_{D\ min}$ ”.

A espessura da cinta de travamento, quando esta atinge o início das estrias, é determinado pela expressão:

$$h_{estria} = \frac{D_E - D_{projétil}}{2} \quad (5.2)$$

Finalmente, devido à presença de um cone de forçamento, existirão comprimentos no mesmo correspondentes à presença de estrias. O comprimento do cone de forçamento que não possui estrias é dado por “ w_A ” e o comprimento do cone influenciado pela presença das estrias, é dado por “ w_B ”. Estes comprimentos são determinados através da seguinte expressão:

$$w_{A,B} = \frac{h_{CT,estria} - h_{estria,D\ min}}{tg\alpha} \quad (5.3)$$

⁵ $\delta = \frac{D_{CT} - D_E}{2}$

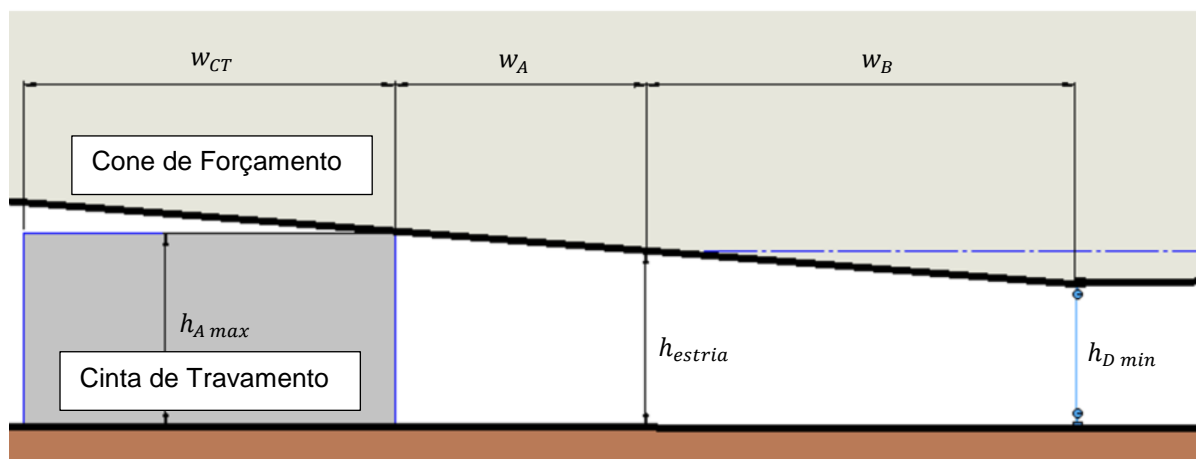


Figura 5-2: Representação esquemática dos parâmetros dimensionais mais relevantes.

Tabela 5-2: Definição das principais dimensões a usar nos modelos analíticos.

Parâmetros Dimensionais	"Firend"	"Bin Wu" 2
Comprimento da Zona Extrusão Total, w_A [mm]	16.14	7.63
Comprimento da Zona Extrusão Parcial, w_B [mm]	23.72	28.64
Comprimento da Cinta de Travamento, w_{CT} [mm]	25.6	15
Espessura Máxima Inicial, $h_{A\ max}$ [mm]	4	2.55
Espessura das Estrias, h_{estria} [mm]	3.19	2.35
Espessura Mínima Final, $h_{D\ min}$ [mm]	1.995	1.6

É possível afirmar que uma das principais diferenças entre os dois modelos é o início das estrias no cone de forçamento. A presença das estrias irá diminuir a força de extrusão, visto que apenas uma determinada percentagem do volume a deformar atinge o valor " $h_{D\ min}$ ", enquanto o restante volume sofre uma extrusão somente até " h_{estria} ". Esta percentagem (ou fator corretivo), é determinada usando os comprimentos de cada estria e intervalo, " w_E " e " w_L " (conjunto "estria-intervalo" observado na Figura 3-3). Ou seja, no modelo da cinta "Firend", a redução será aproximadamente de 60% enquanto no modelo da cinta "Bin Wu" será de 72%.

Esta redução surge quando a cinta atinge " h_{estria} ", e como se pode concluir através dos dados da tabela anterior, este valor é atingido mais rapidamente no modelo "Bin Wu", o que justifica as forças menores verificadas.

No caso "Firend", nos primeiros 14 milímetros de deslocamento, existirá apenas uma extrusão "Completa" (ver Anexo A). A partir dos 15 milímetros de deslocamento da base anterior da cinta, existirão duas componentes de pressão que terão que ser somadas para obter a pressão total de extrusão da cinta.

Para obter a força de extrusão necessária para a comparação com o caso experimental, usou-se a metodologia apresentada no Anexo A. Esta metodologia foi usada tanto para o modelo "Firend" como para o modelo "Bin Wu".

5.2 Definição do Material

Com as dimensões geométricas estabelecidas, fica por definir a lei de comportamento mecânico do material mais apropriada para o estriamento de uma cinta de travamento. É importante que, para os modelos criados, a modelação do material seja a mais uniforme possível.

Tensão de Escoamento Média, σ_{unif}

No modelo que aborda o problema tratando-se de uma extrusão, a lei de comportamento do material usada será baseada na equação de Ludwik-Hollomon. Esta hipótese baseia-se no facto de se verificar que a componente elástica da deformação será desprezada. (Rodrigues & Martins, 2010)

Numa aplicação como a extrusão, onde o material se deforma progressivamente ao passar pela matriz, neste caso o cone de forçamento, deve-se utilizar o valor médio da tensão efetiva, " σ_{unif} ". Esta tensão obtida a partir de uma lei Ludwik-Hollomon, tem a seguinte forma:

$$\sigma_{unif} = \frac{K \varepsilon^n}{n + 1} \quad (5.4)$$

Na expressão anterior verifica-se a presença de dois coeficientes, o coeficiente de encruamento, " n ", e o coeficiente de resistência, " K ". Estes valores são constantes que se encontram na Tabela 5-3.

No entanto, Wu et al. (2014b) apresenta o comportamento mecânico de um cobre (T2) dado pela Figura 5-3. Verifica-se que o comportamento mecânico dos materiais sobre condições de carregamento dinâmicas (linha cinzenta) ou quási-estáticas (linha vermelha) é significativamente diferente. Durante o desenvolvimento do modelo referente à cinta "*Bin Wu*", recorrer-se-á a esta figura para poder replicar analiticamente o comportamento mecânico do material. Desta mesma figura é possível retirar os valores de " K " e " n ".

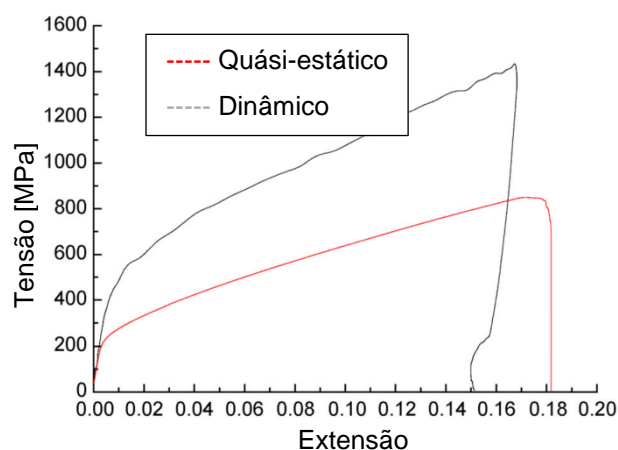


Figura 5-3: Comparação entre comportamento mecânico do material das cintas de travamento sobre diferentes condições de carregamento (Wu, et al., 2014b).

Tabela 5-3: Coeficientes de resistência e de encruamento de acordo com a fonte bibliográfica.

Material	Coeficiente de Resistência, K	Expoente de Encruamento, n
Liga de Cobre CuZn30 (Kalpakjian & Schmid, 2008)	895	0.49
Liga de Cobre CuZn15 (Kalpakjian & Schmid, 2008)	580	0.34
Cobre (T2) (Wu, et al., 2014b)	1700	0.46

Durante o desenvolvimento dos modelos analíticos, estes diferentes materiais serão usados para determinar a influência do material na evolução da força ao longo do deslocamento.

Tensão de Rotura, σ_R

Como mencionado no Capítulo 4, o corte por arrombamento é baseado na geração de tensões de corte, no entanto utiliza a tensão de rotura do ensaio uniaxial por ser o valor que existe tabelado. Este valor é corrigido através de uma constante, "C". Esta assume um determinado valor de acordo com o material em causa. (Tabela 5-4)

Tabela 5-4: Contante de correção para o corte por arrombamento (Rodrigues & Martins, 2010).

Material	Valor da Constante de Correção, C
Ligas de Cobre	0.65~0.7
Cobre	0.65~0.7

Relativamente à tensão de rotura, " σ_R ", existem novamente inúmeras fontes bibliográficas que fornecem este dado tabelado, no entanto, para manter a uniformidade na escolha do material, esta tensão será determinada para cada cinta usando o Modelo de *Consideré* (expressão 5.4), utilizando os coeficientes de resistência e encruamento respetivos. A utilização deste modelo de instabilidade plástica, permite a determinação da tensão no ponto de carga máxima, ou tensão de rotura. Este modelo assegura também, a compatibilidade com a lei do material referida anteriormente.

$$\sigma_R = Kn^n, \quad \varepsilon = n \quad (5.5)$$

No entanto, a tensão determinada anteriormente trata-se da tensão de rotura verdadeira que pode ser corrigido para tensão de rotura nominal, " σ_{UTS} ", dada pela seguinte expressão (Martins & Atkins, 2013):

$$\sigma_{UTS} = K \left(\frac{n}{e} \right)^n \quad (5.6)$$

Usando as expressões 5.5 e 5.6, obtém-se a Tabela 5-5, que compara o valor da tensão nominal com o valor da tensão verdadeira.

Tabela 5-5: Tensão de rotura nominal e verdadeira para cada material.

Material	Tensão de Rotura Verdadeira, σ_R [MPa]	Tensão de Rotura Nominal, σ_{UTS} [MPa]
Liga de Cobre CuZn30 (Kalpakjian & Schmid, 2008)	630.9	386.5
Liga de Cobre CuZn15 (Kalpakjian & Schmid, 2008)	402	286
Cobre (T2) (Wu, et al., 2014b)	1189.4	750.8

Pressão Específica de Corte

Relativamente ao corte por arranque de apara é necessário obter o valor da pressão específica de corte, " K_s ". Na Tabela 5-6 pode ser observado os valores que variam de material para material.

Tabela 5-6: Pressão específica de corte de acordo com os diferentes materiais (Schey, 1987).

Material	Pressão Específica de Corte, K_s [GPa]
Cobre	1.2
Ligas de Cobre	0.8

Com a definição dos modelos analíticos no Capítulo 4 e com a atribuição de dimensões e materiais neste capítulo, é necessário estabelecer o que se pretende obter como resultados no próximo capítulo.

O que provavelmente se aproximará da realidade é a combinação de dois dos processos mencionados, a extrusão e um dos processos de corte. Pensa-se que se verificará, pela geometria que o tubo e a cinta apresentam uma extrusão, seguida de um mecanismo de corte. A extrusão garante a obturação dos gases na câmara de combustão, enquanto que o mecanismo de corte confere um movimento de rotação.

Desconhecendo qual/quais processos de fabrico correspondem à realidade da deformação, no próximo capítulo serão obtidos valores de pressão e força de estriamento. Os valores obtidos através do modelo da cinta de "*Bin Wu*" serão comparados com os dados experimentais expostos no Capítulo 2 por Wu et al. (2014a).

6. Análise e Discussão de Resultados

No Capítulo 2 foram apresentados inúmeros resultados experimentais referentes à deformação de diversas cintas de travamento. A existência destes resultados experimentais é a resposta que faltava para poder validar os resultados obtidos através dos modelos criados. A validação consistirá na criação de dois modelos diferenciados pelo material e dimensões. Ou seja, cada modelo corresponderá a uma cinta diferente, que serão denominadas por “*Firend*” e “*Bin Wu*”. Se se verificar uma semelhança entre os dados obtidos a partir do modelo analítico “*Bin Wu*” e os dados experimentais, poderá ser afirmado que a metodologia usada é válida para qualquer cinta de travamento.

6.1 Cinta de Travamento “*Bin Wu*”

Tendo em consideração o que já foi referido, o possível mecanismo de deformação presente na cinta de travamento, representa uma das incógnitas desta dissertação. Para obter a solução desejada, dentro de cada modelo “*Firend*” e “*Bin Wu*”, serão replicados três processos fabrico e só posteriormente é que serão combinados.

O primeiro passo do desenvolvimento do modelo passa por descrever o processo referente à extrusão, que surge devido à presença de um cone de forçamento.

6.1.1 Extrusão

O cone de forçamento, no caso “*Bin Wu*”, apresenta um ângulo de 1.5° (ver Tabela 5-1) que ao ser aliado com uma condição de conservação de volume, provoca deslocamentos diferentes da base posterior (bordo de ataque) e anterior (bordo de fuga). Ou seja, ao implementar incrementos de 1 milímetro na base anterior, os incrementos equivalentes da base posterior serão sempre maiores até que a cinta abandone por completo o cone de forçamento, traduzindo o fim do processo de deformação.

Com o comportamento do material modelado (Figura 5-3), é possível obter as curvas correspondentes à força de extrusão. Devido à similaridade na construção sistemática dos modelos, ambos os modelos (“*Bin Wu*” e “*Firend*”) devem apresentar evoluções similares com magnitudes distintas.

Na figura seguinte é possível observar o desenvolvimento da força de extrusão, em relação ao deslocamento da cinta dentro do tubo do obus.

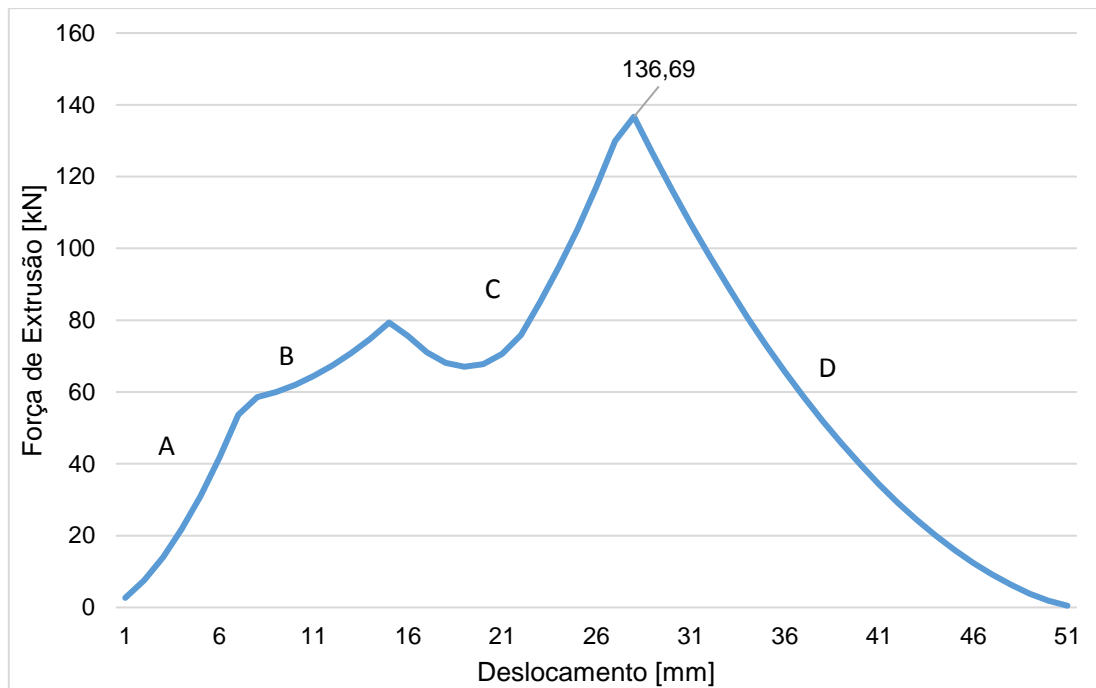


Figura 6-1: Evolução da força de extrusão no modelo “Bin Wu”.

Na seção “A” assinalada na figura anterior, que traduz a deformação desde o início até aos 8 milímetros, representa o deslocamento sem que haja contacto com as estrias. Quando se dá o contacto inicial com as estrias (seção “B”), a evolução apresenta uma taxa de crescimento menor devido à presença de um fator corretivo (Figura 6-2) que diminui a força de extrusão. Esta diminuição é justificada, pelo facto de somente 28% do volume da estria ser extrudido até à espessura mínima “ $h_{D\ min}$ ”.

Em “C” observa-se uma diminuição seguida de um aumento até que se atinga o valor máximo. A diminuição deve-se ao facto de todo o volume da cinta estar em contacto com as estrias, e o aumento da força traduz-se na diferença máxima entre as espessuras antes e depois da deformação. Na seção “D” inicia-se a diminuição da força de extrusão visto que já se atingiu a espessura de saída.

Na Figura 6-2, é possível observar um gráfico que exemplifica o movimento da cinta de travamento à medida que esta se desloca axialmente, e a sua relação com o fator corretivo gerado pelo contacto com as estrias (linha laranja). Este fator corretivo é calculado através da largura de cada estria e intervalo, “ w_E ” e “ w_L ”, observados na Tabela 5-1. Ou seja, este fator corretivo será multiplicado à força de extrusão dependente da sua posição no cone de forçamento.

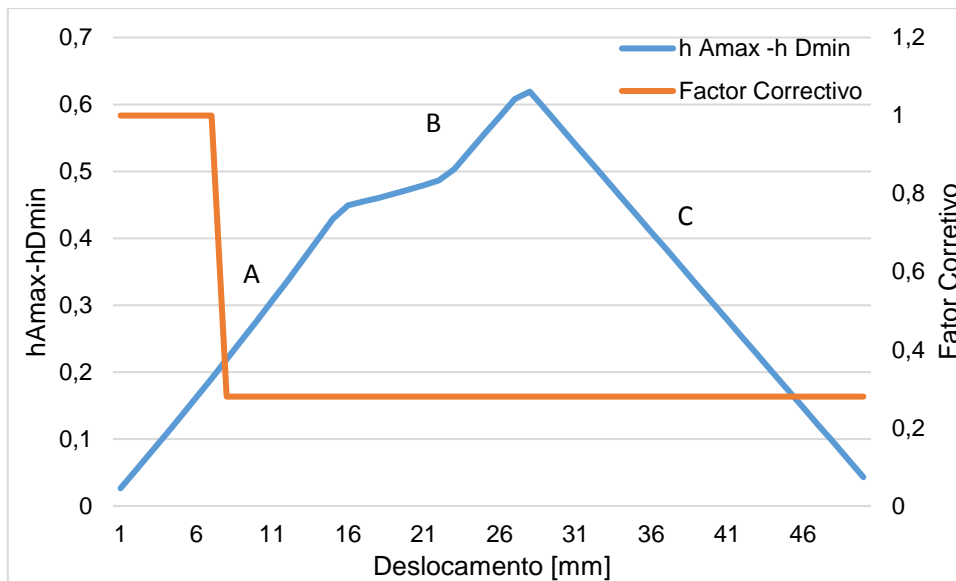


Figura 6-2: Evolução da diferença entre a espessura antes da deformação (h_{Amax}) e a espessura depois da deformação (h_{Dmin}) e a relação com o fator corretivo.

Verifica-se durante a primeira fase de crescimento “A”, a espessura da base posterior diminui enquanto que a base anterior se mantém praticamente constante. Na seção “B”, verifica-se o final do contacto entre a cinta e o cone de forçamento sem a presença das estrias. O pico traduz o instante máximo de carga, em que a base posterior atingiu o seu valor mínimo e a base anterior está na iminência de iniciar o seu decrescimento. No terceiro e último instante “C”, existe uma determinada percentagem do volume da cinta que já abandonou o cone de forçamento, enquanto o restante continua em contacto com as estrias.

6.1.2 Mecanismo de Corte

Corte por Arrombamento

A Figura 6-3, procede a uma representação esquemática do deslocamento da cinta de travamento contra o cone de forçamento e na Figura 6-4, é possível observar o patamar constante definido pelo perímetro de corte constante, “ p_{ativo} ”.

É possível observar que desde o primeiro deslocamento a) até c), o perímetro de corte manteve-se constante no seu valor máximo, “ p_{ativo} ”. Após o terceiro deslocamento, o perímetro de corte volta a diminuir até que toda a cinta esteja estriada uniformemente.

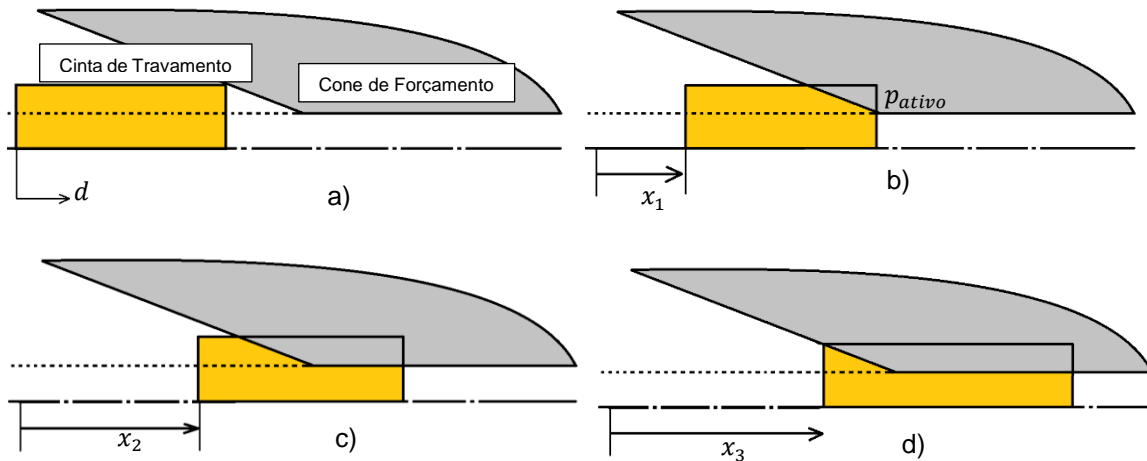


Figura 6-3: Esquemática do processo de corte por arrombamento em que a) é o instante inicial de contacto e que b) c) e d) representam a estabilização no perímetro de corte máximo.

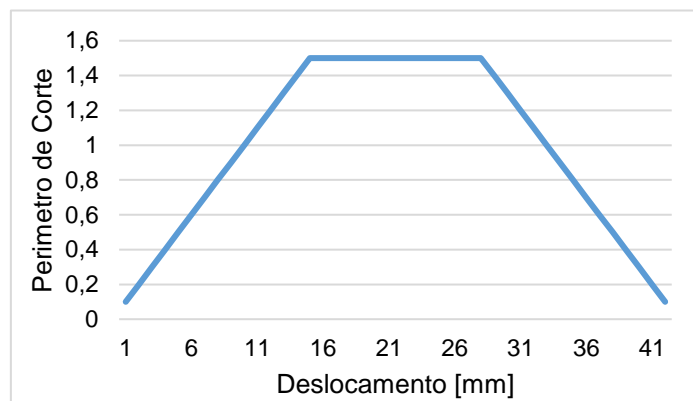


Figura 6-4: Evolução do perímetro de corte no modelo "Bin Wu".

Com o perímetro de corte estabelecido, o principal parâmetro que influenciará os valores da força de corte por arrombamento, terá origem no material que esta a ser cortado. No capítulo anterior, durante a definição do material, estabeleceu-se os valores da tensão de rotura. Na Figura 6-5, a força de corte segue a forma do perímetro de corte, apresentando um valor máximo de corte de 210 kN.

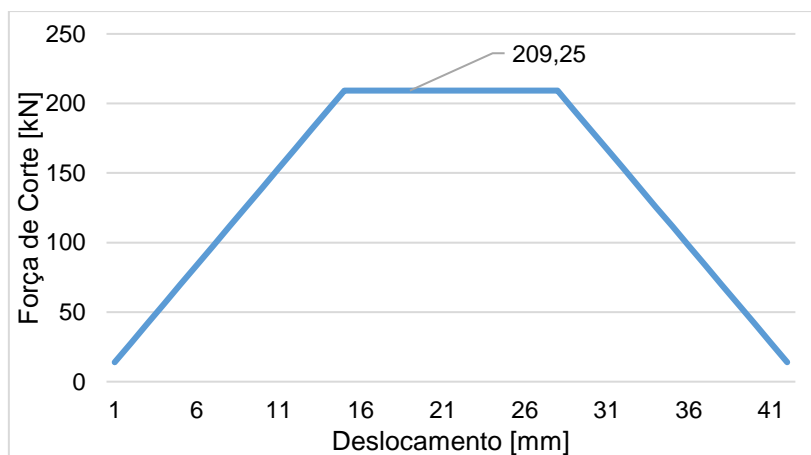


Figura 6-5: Evolução da força de corte por arrombamento para o modelo "Bin Wu".

Corte por Arranque de Apara

No caso de se considerar o corte por arranque de apara, o parâmetro que relaciona a força de corte e o material que está a ser cortado, é a Pressão Específica de Corte, " K_S ", exposto no capítulo anterior para ligas de cobre, que assume o valor de 1.2 GPa

A forma da evolução da força de corte é definida pela espessura de corte, " e ". Este parâmetro dimensional apresenta uma fase crescente, estabilizando no seu valor máximo definido por " e_{max} ".

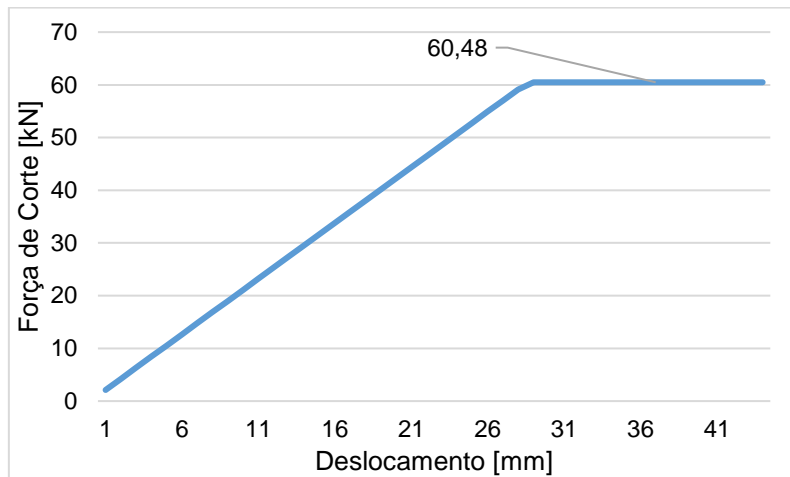


Figura 6-6: Evolução da força de corte por arranque de apara para o modelo "Bin Wu".

6.1.3 Força Total

De modo a concluir a análise dos resultados obtidos analiticamente, é necessário combinar os processos de fabrico apresentados anteriormente, com o objetivo de se determinar a analogia que mais se aproxima à realidade observada nos ensaios experimentais de Wu et al. (2014a).

Como foi referido no Estado da Arte, Wu et al. (2014a) descreve a força necessária para deformar diversas cintas de travamento, como se pode observar na Figura 2-7. Pode constatar-se que em condições *quási*-estáticas, a força de estriamento máxima para uma cinta de cobre é de 160 kN (Wu, et al., 2014a).

De seguida serão apresentadas as evoluções das forças totais necessárias para gerar o estriamento da cinta de travamento, de acordo com a combinação escolhida.

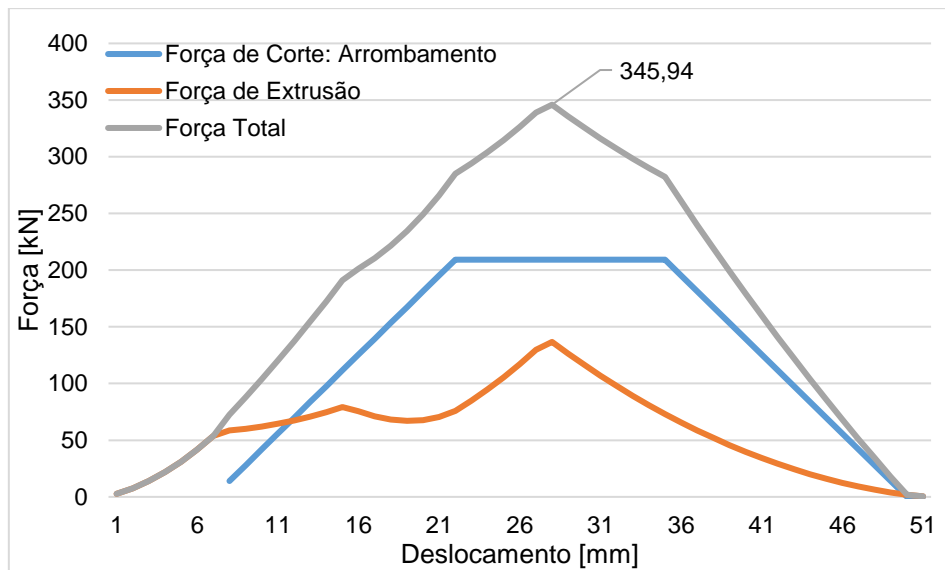


Figura 6-7: Combinação dos modelos extrusão e corte por arrombamento para a cinta “Bin Wu”.

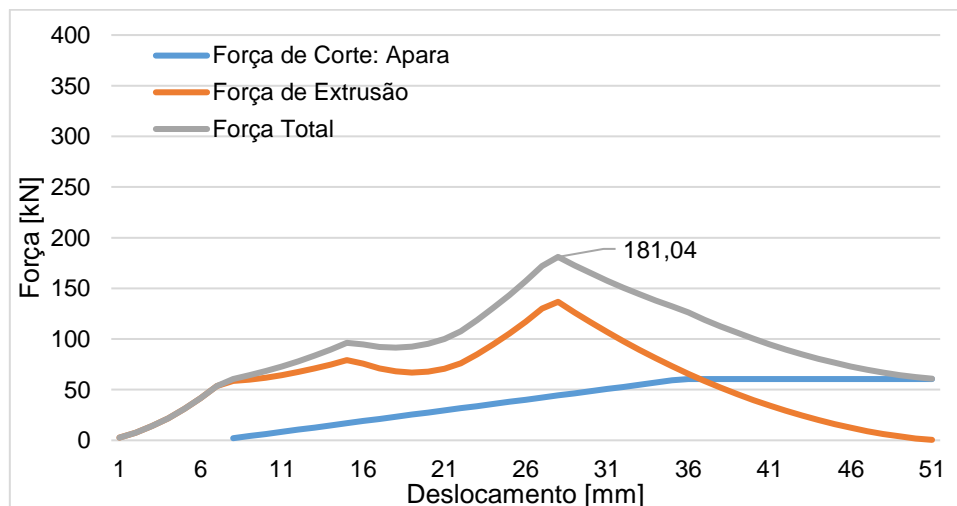


Figura 6-8: Combinação dos modelos extrusão e corte por arranque de apara para a cinta “Bin Wu”.

Nas Figuras 6-7 e 6-8 é possível concluir que existe uma diferença significativa ao considerar os dois mecanismos de corte abordados.

O corte por arrombamento apresenta uma evolução mais estável, sem pontos de inflexão tão acentuados, no entanto, a magnitude dos valores de força obtida é significativamente superior. Na combinação com o corte por arranque de apara, a magnitude dos valores é mais reduzida, apresentando inúmeros pontos de inflexão acentuados.

Neste momento, tendo em consideração os dados experimentais apresentados no Capítulo 2, é possível afirmar que, usando o corte por arrombamento obtém-se uma evolução similar, mas com valores de força mais elevados, e usando o corte por arranque de apara, obtém-se valores mais similares, mas com uma curva de evolução mais distinta.

Na próxima seção será feita uma comparação com os resultados experimentais, de modo a estabelecer qual dos modelos corresponde à realidade experimental.

6.1.4 Comparação com os Resultados Experimentais

Na Figura 6-9 é possível observar a comparação entre os resultados experimentais e os resultados obtidos analiticamente. A semelhança dos resultados obtidos nos primeiros 50 milímetros de deslocamento é nítida, tanto na evolução força-deslocamento como na magnitude dos valores. No entanto existem algumas diferenças que são facilmente explicadas.

Uma das simplificações aplicadas no modelo analítico, é a forma geométrica da cinta modelada. Verifica-se que a forma convencional de uma cinta de travamento não é exatamente igual à modelada, por possuir uma seção cônica. Esta seção irá diminuir as forças, pelo facto de reduzir o volume que será extrudido (ver Figura 3-9).

A alteração da forma geométrica irá causar uma redução tanto na extrusão como no mecanismo de corte, por afetar diretamente as espessuras antes e depois da deformação e a respetiva geometria de corte.

As curvas (experimental e analítica) apresentam o pico de força máxima, praticamente no mesmo instante do deslocamento, assim como apresentam os mesmos pontos de inflexão justificados anteriormente. Nos primeiros 25 milímetros de deslocamento, os pontos de inflexão da curva experimental representam o início do contacto entre a cinta e as estrias, tal como se verifica na curva analítica.

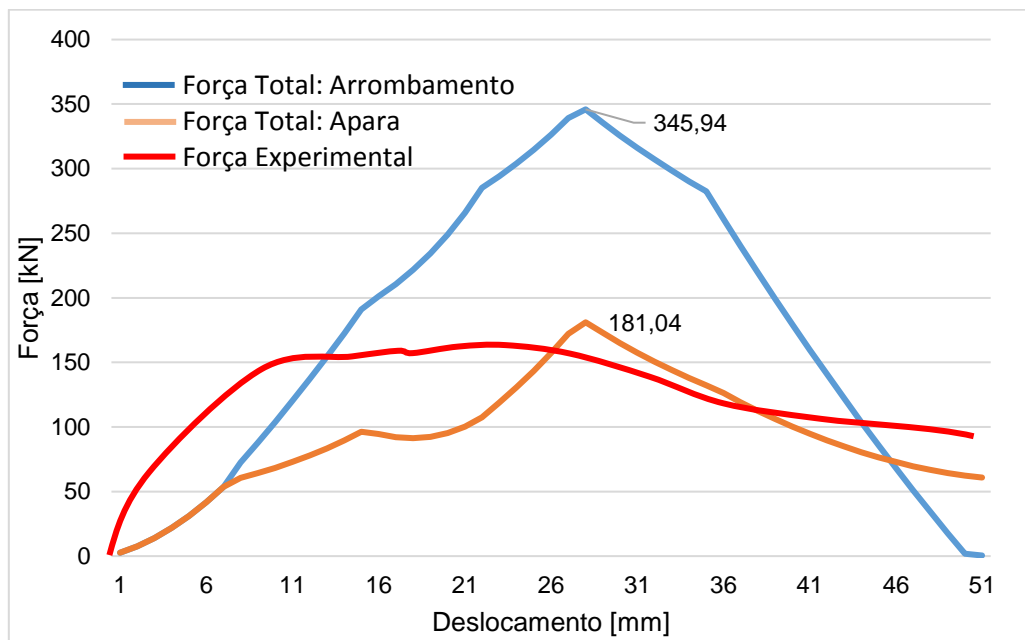


Figura 6-9: Comparação entre os dados obtidos experimentalmente (Wu, et al., 2014a) e analiticamente para a cinta "Bin Wu".

Com os resultados expostos na figura anterior, é possível afirmar que existe uma forte probabilidade de o modelo analítico criado, corresponder à deformação de uma cinta de travamento em condições quase-estáticas. Não só pela magnitude dos valores, mas também pelo facto de possuírem evoluções similares e picos de força máxima nos mesmos instantes do deslocamento.

Até então, a escolha entre os dois mecanismos de corte não é evidente, visto que existem inúmeras simplificações que reduzirão a força de corte. Na próxima seção, a influência destas simplificações será analisada, de modo a permitir uma conclusão que se aproxime da realidade experimental.

6.2 Validação do Modelo

Na seção 6.1, chegou-se à conclusão que existem similaridades apresentadas tanto pela combinação entre a extrusão e o corte por arrombamento, como entre a extrusão e o corte por arranque de aparta. Esta semelhança dificulta a conclusão sobre qual a combinação que corresponde à realidade experimental.

Nesta seção, será determinado o grau de influência do material e de determinados parâmetros geométricos, na obtenção das respectivas forças totais de deformação da cinta de travamento “*Bin Wu*”, de modo a determinar qual a combinação correspondente aos valores experimentais de Wu et al. (2014a).

6.2.1 Influência do Material

Com as dimensões corretas, o comportamento do material das cintas poderá representar um dos principais fatores influenciadores. No Capítulo 5, durante a definição do material, foram apresentadas várias hipóteses que se traduzem na escolha de um material diferente. Na Figura 6-10, é possível observar a influência da escolha do material nos resultados obtidos relativamente à força de deformação total da cinta “*Bin Wu*”.

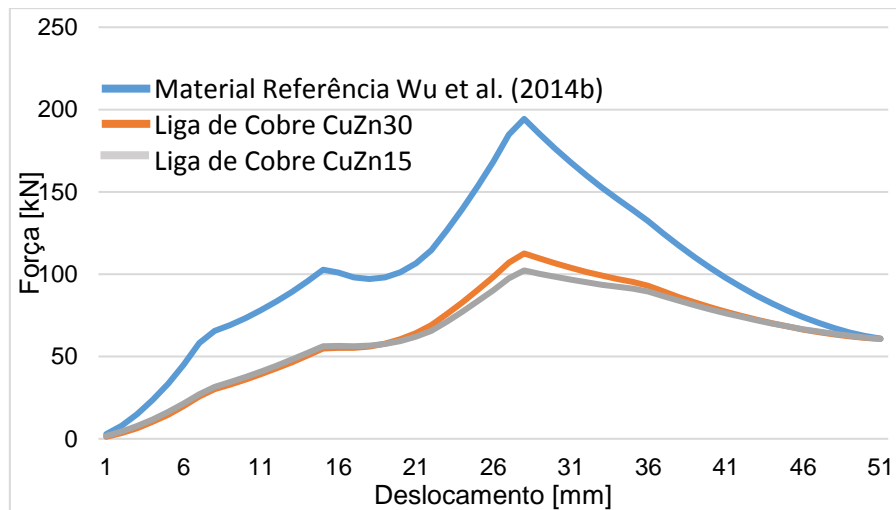


Figura 6-10: Comparação entre as várias evoluções analíticas da força de deformação total, de acordo com o material escolhido.

É notória a diferença gerada pela escolha do material na evolução da curva de extrusão. Existe uma grande aproximação entre os valores obtidos através das ligas de cobre, no entanto, o material obtido experimentalmente apresenta uma diferença considerável que representa um aumento de 100% na força de estriamento máxima.

Da figura anterior, é possível concluir sobre a importância que a escolha do material adequado, pode ter na obtenção de resultados finais.

6.2.2 Influência dos Parâmetros Dimensionais

Durante o desenvolvimento dos modelos analíticos, surgiram vários parâmetros dimensionais que se destacaram pelo seu grau de influência nos cálculos realizados. Parâmetros estes que se traduzem no comprimento da cinta, " w_{CT} "; e no seu diâmetro externo, " D_{CT} ". Outras dimensões como o ângulo do cone de forçamento, " α ", ou a largura de cada estria e intervalo, " w_E " e " w_L ", ficam de fora desta análise por dependerem da geometria do tubo do obus.

Comprimento da Cinta de Travamento, w_{CT}

Ao aumentar o comprimento da cinta para o dobro da sua dimensão original (30 mm), obtém-se a evolução da força de extrusão observada na Figura 6-11.

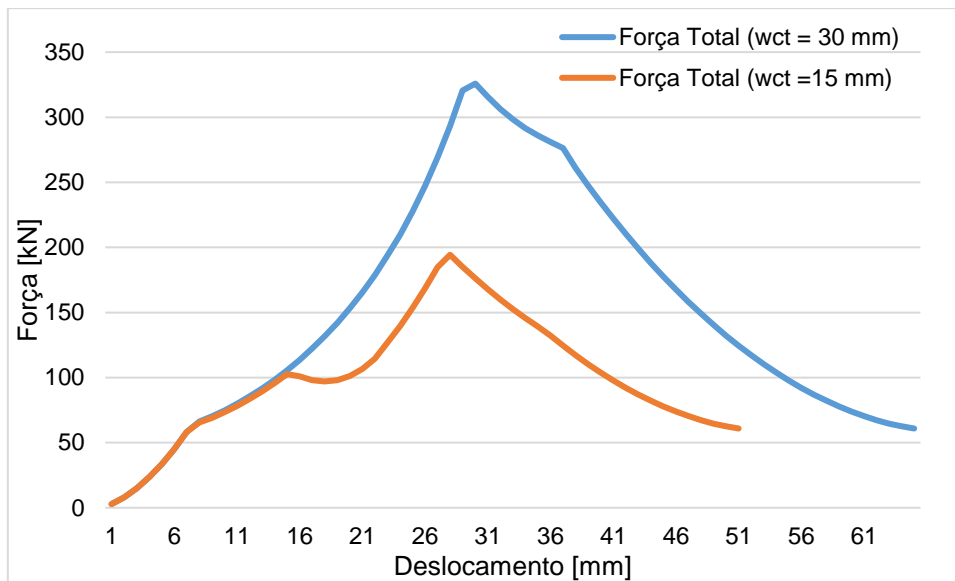


Figura 6-11: Influência da alteração do comprimento da cinta de travamento na força de estriamento.

É possível observar um aumento significativo no valor máximo e uma alteração na forma da evolução. Ambas as alterações são explicadas pelo facto de existir mais volume de cinta que requer deformação. Neste caso, com um aumento de 100% do comprimento da cinta, registou-se um aumento de 164% em relação à força máxima de estriamento.

Esta alteração explica as diferenças observadas entre os resultados obtidos para cada uma das cintas. Enquanto que a cinta “*Bin Wu*” apresenta um comprimento de 15 mm, a cinta “*Firend*” possui um comprimento de 25.6 mm.

Diâmetro exterior da Cinta de Travamento, D_{CT}

Outra dimensão que causará aumento das forças de extrusão será o diâmetro exterior da cinta de travamento. Originalmente, este valor correspondia a 78.1 milímetros, que serão alterados para 82 milímetros, o que corresponde a um aumento de 5%. Na figura seguinte, é possível observar a influência do aumento do diâmetro da cinta na força de extrusão.

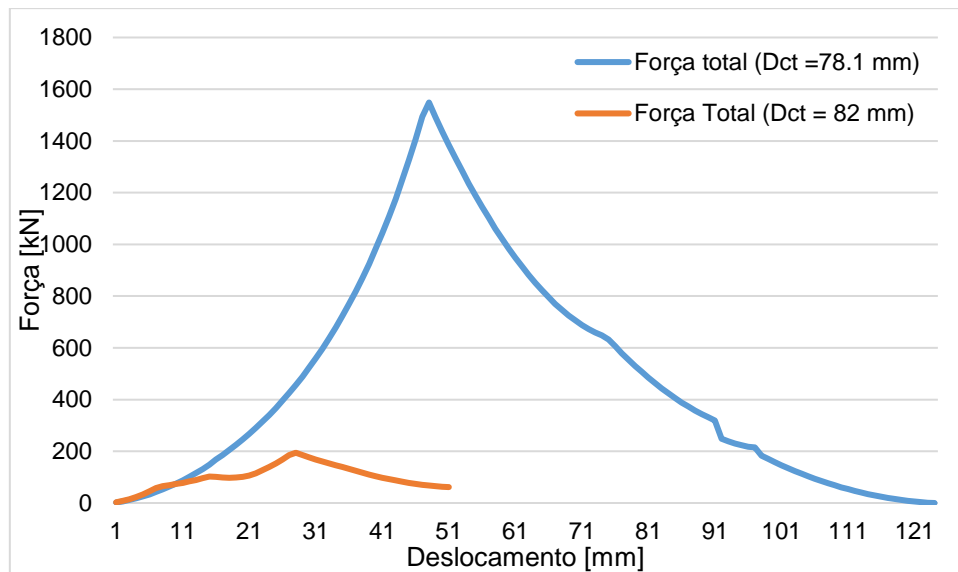


Figura 6-12: Influência da alteração do diâmetro da cinta de travamento na força de estriamento.

Verificou-se que um aumento de 100% no comprimento da cinta, provocou um aumento de 164% no valor da força máxima de extrusão. Por outro lado, se se registar um aumento de 5% no diâmetro exterior da cinta, o aumento correspondente do valor da força máxima está na ordem dos 780%, o que se verifica significativamente maior.

Concluindo, o parâmetro que mais influencia as forças geradas na deformação das cintas de travamento, é o diâmetro exterior da cinta de travamento, " D_{CT} ", pelo facto de um aumento de 5% no seu diâmetro ter originado um aumento na ordem dos 780%. Com o aumento do diâmetro, o mecanismo de corte perde relevância no processo de deformação, sendo a extrusão o processo de fabrico que governa o estriamento da cinta de travamento.

Esta conclusão confirma a informação fornecida por Wu et al. (2014a), que afirma que o principal parâmetro geométrico que influencia a força máxima de estriamento é o diâmetro da cinta de travamento. Este parâmetro dimensional controla todo o processo de deformação das cintas de travamento. (Wu, et al., 2014a)

Alteração da Forma Geométrica

Como já foi referido anteriormente, a forma geométrica da cinta modelada analiticamente, apresenta diversas simplificações quando comparada com as cintas convencionais. As duas diferenças mais significativas são:

- A concordância pré-existente entre a superfície da cinta e o cone de forçamento (tal como se pode observar na Figura 3-9);
- Os bordos de ataque e de fuga da cinta não possuem a mesma cota, diminuindo significativamente as espessuras antes e depois da deformação, assim como a geometria do corte.

Ambas estas diferenças/simplificações, que auxiliaram os cálculos e a determinação das forças de deformação, elevam a magnitude dos resultados obtidos. Logo, nesta seção, pretende-se replicar uma cinta mais próxima da realidade, com o objetivo de apresentar uma estimativa sobre a redução causada pela alteração da sua forma geométrica.

Na Figura 6-13, é possível observar o esquema exemplificativo da seção transversal de uma cinta de travamento convencional usada em munições 155 mm. Como se pode constatar, as diferenças geométricas são evidentes. O ângulo da superfície da cinta é aproximadamente 2.3° e fará com que não haja um desenvolvimento de forças tão elevado nos instantes iniciais, por reduzir a espessura de deformação “ h ”. A concordância observada entre a superfície da cinta e o cone de forçamento, permitirá que um menor volume da cinta entre em contacto com o cone de forçamento sem presença de estrias.

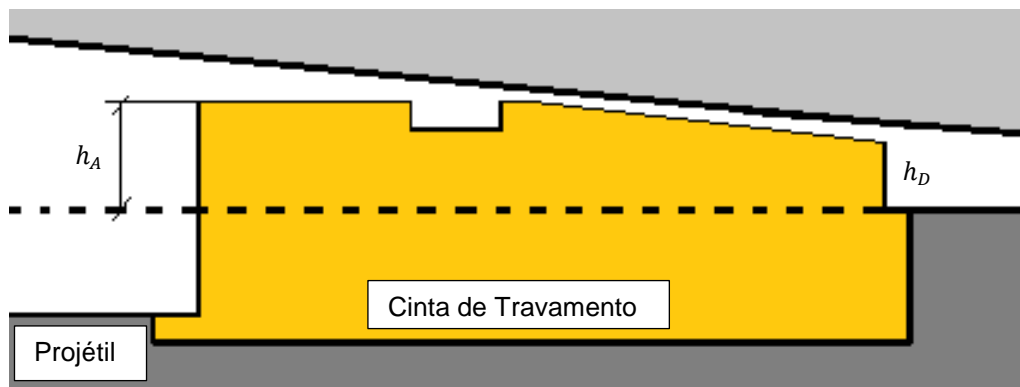


Figura 6-13: Seção transversal de uma cinta de travamento de uma granada 155 mm (Montgomery R. S., 1975).

Montgomery (1975) fornece as definições geométricas necessárias para aplicar a metodologia usada anteriormente. O diâmetro exterior da cinta são 158 mm na base anterior (bordo de fuga) e 157.14 na base posterior (bordo de ataque).

Ao aplicar a mesma metodologia usada no desenvolvimento dos modelos analíticos, com as dimensões de Montgomery (1975) e o mesmo material da cinta “*Firend*”, é possível determinar a influência da forma geométrica. Da Figura 6-13 é possível deduzir as dimensões necessárias para a construção do modelo analítico, que estão expostas na Tabela 6-1.

Tabela 6-1: Comparação entre as dimensões modeladas e as convencionalmente utilizadas.

Dimensão	Forma Convencional	"Firend"
Comprimento da Cinta, w_{CT} [mm]	25.91	25.6
Ângulo do Cone de Forçamento, α [°]	2.9	2.9
Diâmetro Externo da Cinta, D_{CT} [mm]	158	159
Diâmetro das Estrias, D_E [mm]	157.582	157.582
Diâmetro dos Intervalos, D_L [mm]	154.991	154.991
Comprimento da Estria, w_E [mm]	6	6
Comprimento do Intervalo, w_L [mm]	4	4
Nº de estrias, "N"	48	48
Espessura Máxima Inicial, $h_{A\ max}$ [mm]	1.7	4
Espessura Mínima Final, $h_{D\ min}$ [mm]	0.19	1.995

Com as dimensões anteriormente estabelecidas é possível obter a evolução da força de extrusão observada na Figura 6-14. Nesta mesma figura, só estão presentes as componentes relativas à extrusão, no entanto a diferença entre as duas evoluções é significativa, não só a magnitude dos valores, mas também na evolução da força.

Com a redução significativa gerada pela alteração da modelação da forma geométrica, a combinação com o mecanismo de corte irá apresentar valores igualmente reduzidos, o que poderá representar a validade da combinação com o corte por arrombamento.

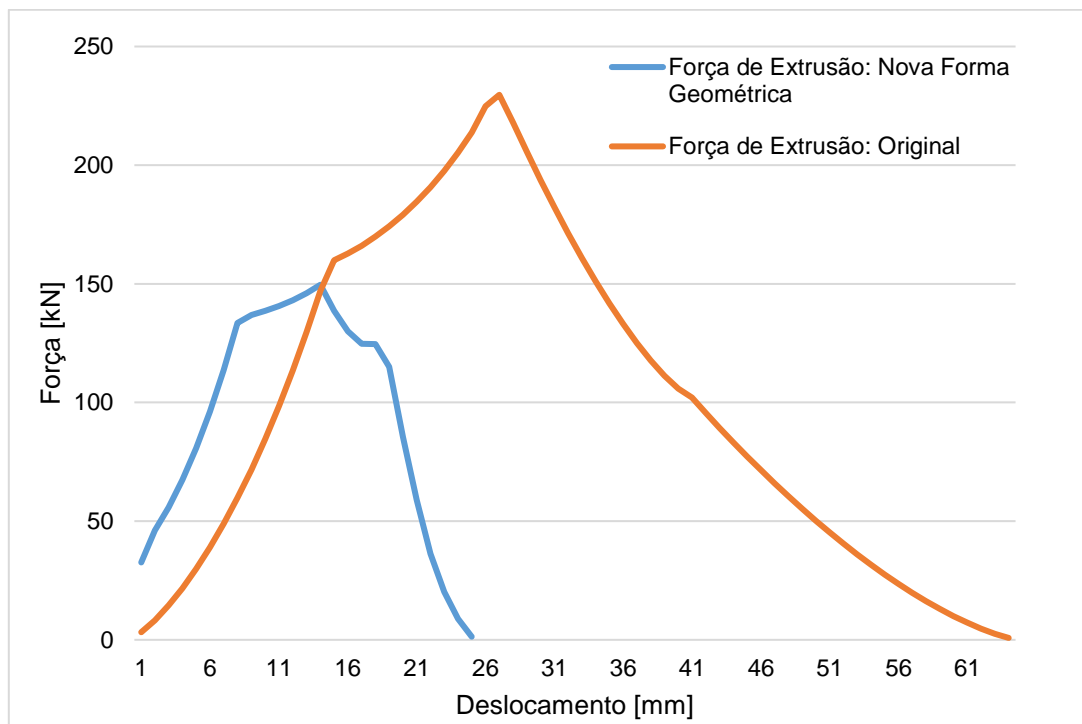


Figura 6-14: Influência da forma geométrica na força de extrusão em granadas 155 mm.

A redução observada anteriormente, representa uma redução de 50% no valor de força de extrusão obtido. Ao aplicar esta redução na força total da cinta “*Bin Wu*”, obtém-se valores significativamente mais reduzidos na parcela da extrusão.

Varição da metodologia associada ao Mecanismo de Corte

Com a alteração geométrica abordada anteriormente, é possível concluir que somente o processo de extrusão é afetado pela alteração da forma geométrica. A construção do modelo analítico apresentada, não permite a interferência com o corte das estrias, pelo facto de a geometria de corte pertencer ao interior do tubo, que se mantém inalterada.

No entanto, esta poderá não ser a abordagem correta para a situação em mãos. Ou seja, o perímetro de corte máximo, “ p_{ativo} ”, é determinado pela diferença entre o diâmetro das estrias e dos intervalos, significando que se está a assumir que não existe folga entre a cinta e o fundo da estria (ver Figura 3-3). Esta assunção foi gerada pelo conceito de que não devem existir folgas, pelas quais os gases da carga propulsora possam escapar. No entanto, havendo um processo de deformação plástica (extrusão) antes do contacto com as estrias, este irá garantir a tal obturação.

Assumindo a existência de folgas entre a cinta e o fundo das estrias, que atingem os 80% do perímetro de corte assumido anteriormente, a força de corte e consequentemente a força de deformação total irá diminuir consideravelmente.

Uma outra consequência desta nova consideração sobre o mecanismo de corte, é o facto de a nova geometria permitir que parte do volume da cinta (seção cónica do bordo de ataque), não entre em contacto com o cone ou com as estrias. Esta característica permite a fixação da granada no tubo quando este se encontra com um determinado grau de elevação em relação ao solo.

Em termos analíticos, esta consideração irá diminuir o comprimento de corte que causará uma redução das forças de corte necessárias para realizar o arrombamento.

Na Figura 6-15 é possível verificar a evolução da força de deformação da cinta “*Bin Wu*”, caso se proceda à alteração da forma geométrica (redução de 50% na força de extrusão), caso exista a discutida folga, que causará uma redução de 20% no perímetro de corte e se se verificar uma redução de 5 milímetros no comprimento de corte.

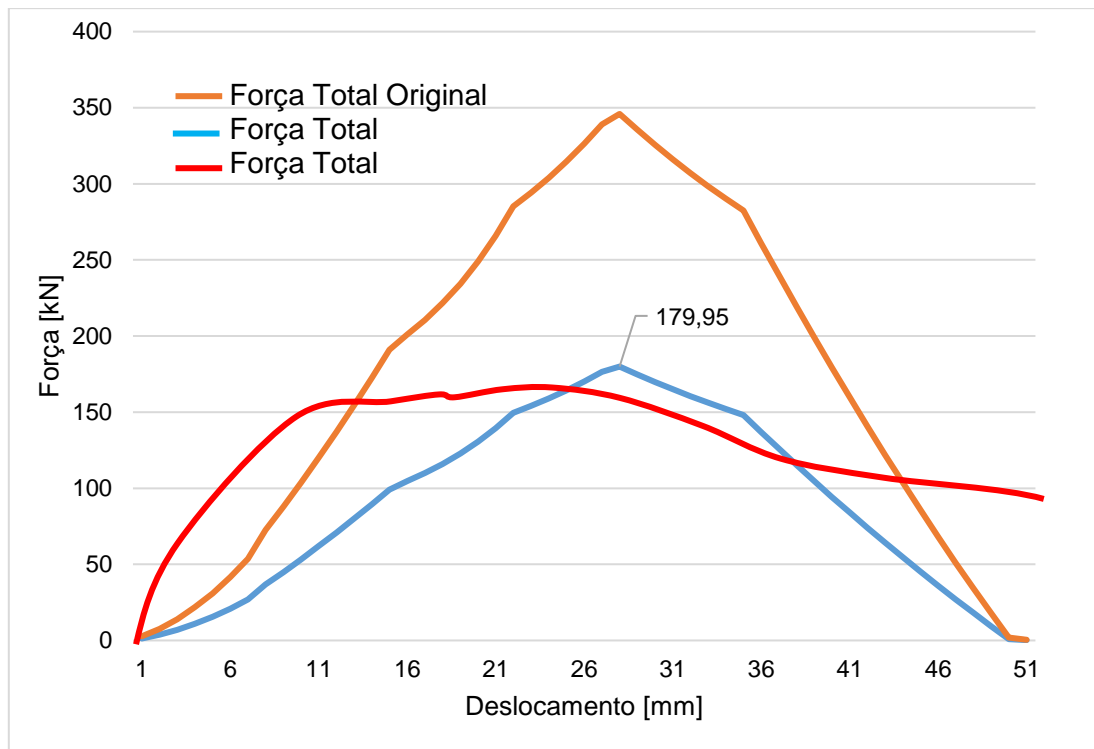


Figura 6-15: Evolução da curva de força da cinta “Bin Wu”, com a forma geométrica convencional e com a redução do perímetro de corte.

Comentários Finais

Resumindo, nesta subseção foram apresentados inúmeras simplificações e hipóteses que levaram a um aumento da força de deformação determinada analiticamente. Ao atenuar a influência dessas simplificações, regista-se uma diminuição significativa dos valores registados.

Registou-se que o comprimento da cinta de travamento e o seu diâmetro exterior, têm pesos diferentes na influência que provocam no desenvolvimento da força de deformação. A determinação correta do comportamento mecânico do material a modelar, demonstrou ser fundamental na obtenção de resultados válidos e coerentes com a realidade. Por fim, é possível concluir que as simplificações assumidas ao longo desta dissertação (forma geométrica e geometria de corte), provocam alterações significativas, capazes de validar o modelo usado quando aplicadas.

Esta nova evolução (observada na figura anterior) torna a combinação entre o corte por arrombamento e a extrusão, a hipótese mais coerente com a realidade experimental apresentada por Wu et al. (2014a), tanto pela magnitude dos valores como pela sua evolução. Relativamente à combinação com o corte por arranque de aparas, é possível afirmar que foi desprezada por, à luz dos novos resultados, apresentar valores significativamente mais reduzidos.

6.3 Cinta de Travamento do Projétil do Projeto FIREND®

Ao contrário do que se verificou na seção passada, o comportamento do material das cintas de projéteis de calibre 155 milímetros não se encontra definido. Logo, recorreu-se a coeficientes tabelados e exposto no Capítulo 5. Considerou-se que a cinta é constituída por uma liga de cobre CuZn15 com um coeficiente de resistência e encruamento igual a 580 e 0.34 respetivamente (Kalpakjian & Schmid, 2008).

6.3.1 Extrusão

O valor obtido para a pressão de extrusão depende dos valores das espessuras das bases anterior e posterior. Estes mesmos valores dependem da geometria do problema e dos deslocamentos axiais que são incrementados nas bases. Na Figura 6-17 é possível verificar a diferença entre os valores da espessura à medida que a cinta se desloca axialmente.

Quando o incremento no deslocamento axial da base posterior é determinado, torna-se necessário saber se a espessura " h_{estria} " foi atingida. Se tal não se verificar, a extrusão é "Completa⁶" e contém apenas uma parcela ("Extrusão Completa", ver Anexo A), que dará origem à pressão de extrusão naquele instante. Caso contrário existem duas parcelas de pressão ("Extrusão Completa" e "Extrusão Parcial⁷", ver Anexo A), que terão de ser somadas para obter a pressão de extrusão total para o mesmo instante. A parcela da "Extrusão Parcial" é a única que será afetada pelo fator corretivo referido anteriormente.

A título de exemplo sobre a aplicação da metodologia referida, surge a Figura 6-16. Nesta figura é possível observar a situação inicial do contato da cinta de travamento e o instante em que surge o valor de pressão de extrusão máxima.

Como pode ser observado, a espessura da base anterior (1') já se encontra numa posição diferente da original (1). Por outro lado, a espessura da base posterior (2') ainda não atingiu o seu valor mínimo, significando que ainda não abandonou o cone de forçamento.

É possível constatar a presença das duas parcelas da extrusão mencionadas anteriormente, "Completa" e "Parcial". A extrusão "Completa", surge desde o momento em que a base posterior (2) se começa a deslocar até à base anterior (1') atingir o início das estrias. Por outro lado, a parcela "Parcial" inicia-se quando a base posterior (2) atinge o início da estria e acaba somente quando todo o volume da cinta ultrapassa o cone de forçamento.

⁶ Por "Extrusão Completa" entenda-se que não existe contato com as estrias, logo não se pode aplicar a redução relacionada com a presença do conjunto estria-intervalo

⁷ Por "Extrusão Parcial" entenda-se que existe contacto com as estrias, logo existirá uma redução devido ao volume da cinta que não está a sofrer deformação plástica.

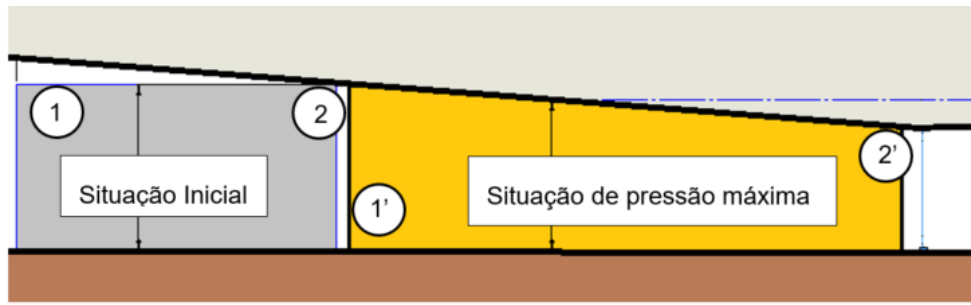


Figura 6-16: Exemplo da situação de pressão/força de extrusão máxima.

O que se pretende demonstrar com a metodologia apresentada em anexo, é o facto de os incrementos axiais influenciarem as espessuras " h_A " e " h_D ", que por sua vez serão o parâmetro mais importante no cálculo da pressão de extrusão, " p_e ".

Nas figuras seguintes, é possível verificar que o máximo surge quando o deslocamento da base anterior é igual a 27 milímetros. Este máximo traduz o instante da deformação em que a diferença das espessuras, " h_A " e " h_D ", é maior (Figura 6-17).

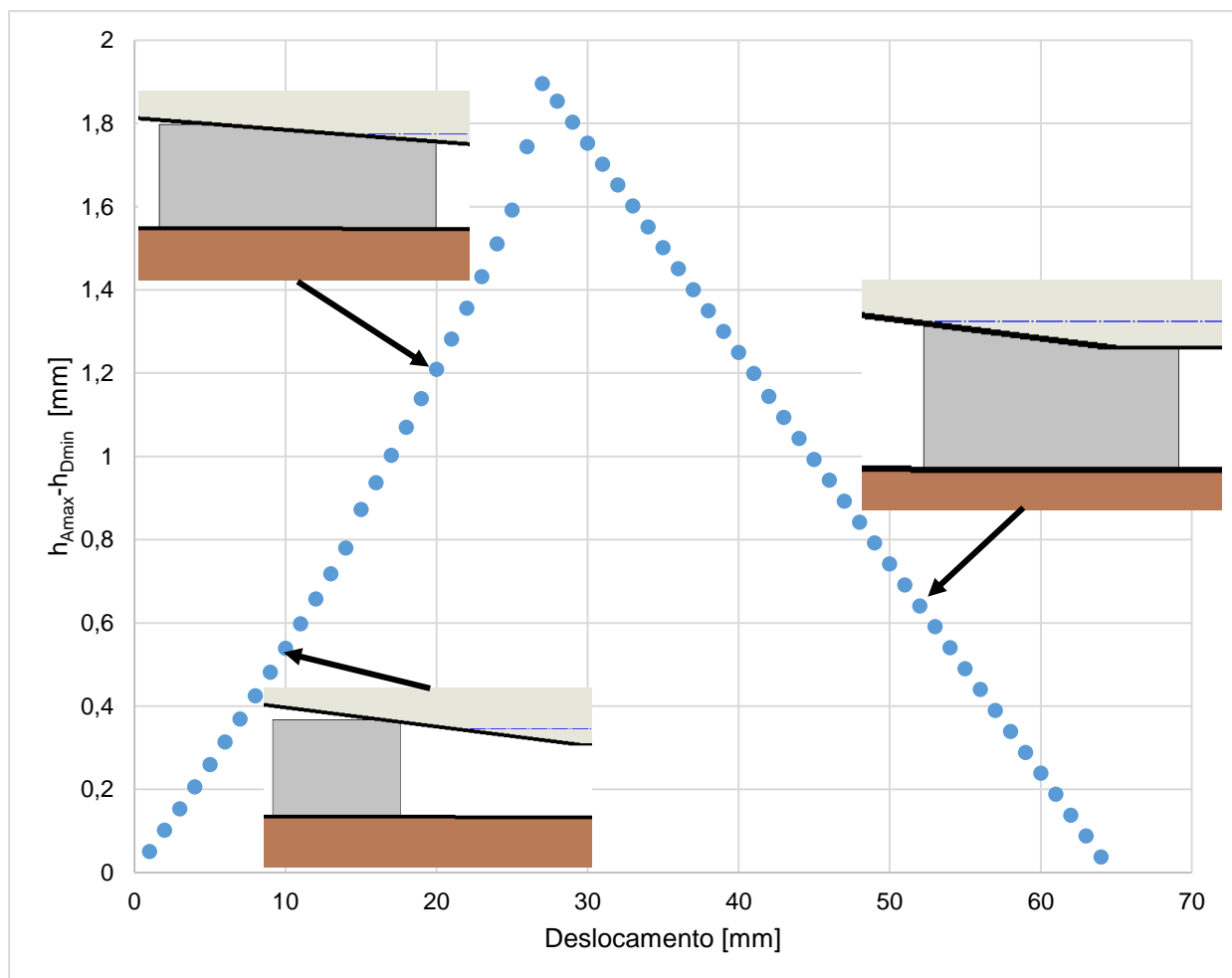


Figura 6-17: Evolução da diferença entre as espessuras antes e depois da deformação, com exemplos ilustrativos.

Com o fim da caracterização do processo de extrusão para os dois modelos é possível concluir que ambos os modelos apresentam perfis de força aceitável. Ou seja, ambos começam e terminam com valores reduzidos a tender para zero, apresentando um pico máximo e diversos pontos de inflexão.

Na Figura 6-18, o primeiro ponto de inflexão, localizado em “A”, surge pelo facto de a contribuição gerada pelo processo de corte iniciar nesse ponto (extrusão “Parcial”). A extrusão e o processo de corte não surgem no mesmo instante, visto que as estrias têm início no cone de forçamento, como mostra a Figura 5-1.

O instante onde se verifica a força máxima de extrusão “B”, verifica-se no segundo ponto de inflexão, aproximadamente quando o deslocamento axial é igual a 27 milímetros. A força de extrusão máxima surge quando a diferença entre a maior e menor espessura é a mais elevada possível, como se pode observar na Figura 6-17.

O terceiro e último ponto de inflexão surge aos 41 milímetros de deslocamento “C”, e assinala o fim da extrusão “Completa”. Ou seja, a espessura anterior máxima, “ $h_{D\ max}$ ”, atinge a espessura onde se iniciam as estrias no cone de forçamento, acabando com a parcela de extrusão “Completa” que contribuía para a determinação da força de extrusão final.

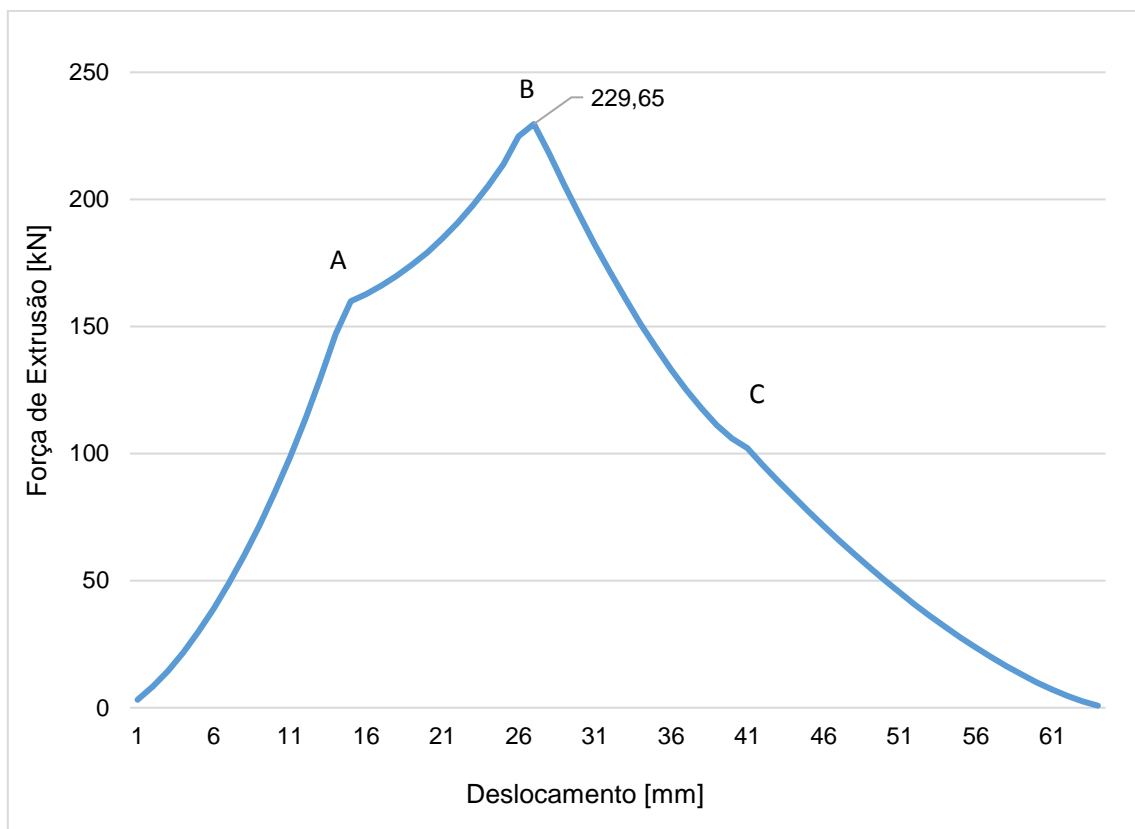


Figura 6-18: Evolução da força de extrusão no modelo “Firend”.

6.3.2 Mecanismo de Corte

Corte por Arrombamento

Tal como se verificou para o corte da cinta de travamento “*Bin Wu*”, o corte por arrombamento depende da geometria de corte. No entanto, devido às dimensões apresentadas pelo interior do tubo do obus 155 mm e pela própria cinta, o patamar onde se regista um perímetro de corte constante, é significativamente menor do que no caso anterior.

Este aumento nas forças de corte é justificado pela geometria da alma estriada e pelo maior número de estrias que o tubo apresenta. A influência da definição do material, também é predominante visto que os valores de “*K*” e “*n*” utilizados, são significativamente reduzidos.

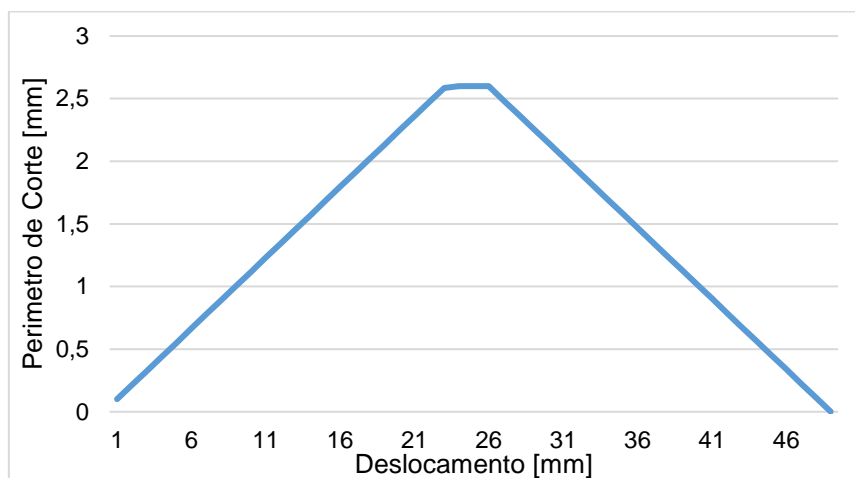


Figura 6-19: Evolução do Perímetro de Corte para a cinta “*Firend*”.

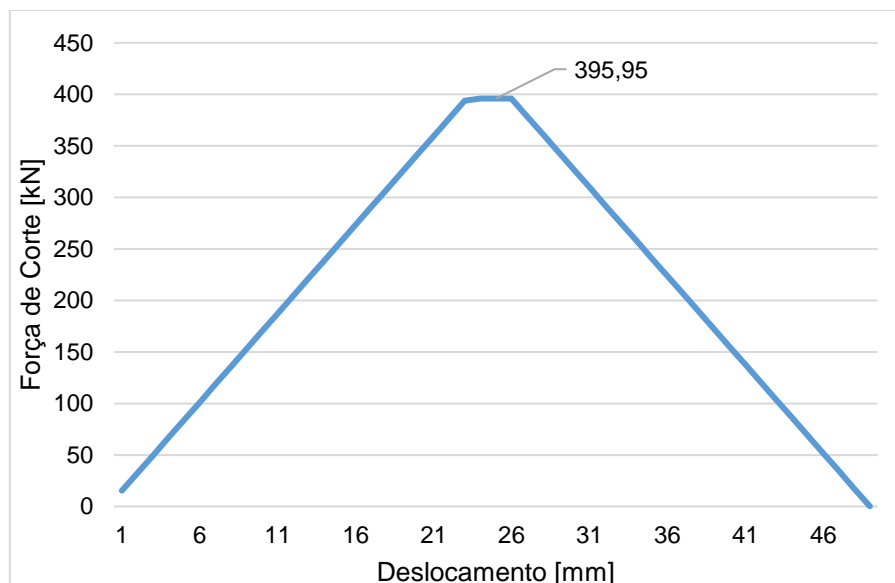


Figura 6-20: Evolução da força de corte por arrombamento para o modelo “*Firend*”.

Corte por Arranque de Apara

No caso de o mecanismo de corte se assemelhar ao corte por arranque de apara, as únicas alterações efetuadas entre as duas cintas, foi o aumento da espessura de corte provocado pelo aumento dos parâmetros dimensionais e a alteração da pressão específica de corte.

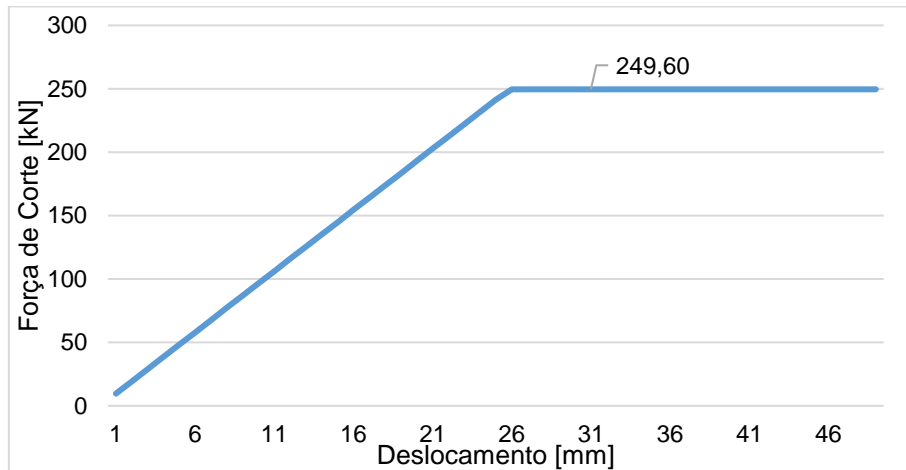


Figura 6-21: Evolução da força de corte por arranque de apara para o modelo "Firend".

6.3.3 Força Total

À semelhança do que foi realizado na seção anterior, será efetuada uma combinação dos diversos mecanismos de corte. Observa-se novamente, que a combinação com o corte por arrombamento apresenta valores consideravelmente mais elevados.

A hipótese que considera o corte por arranque de apara, apresenta valores mais reduzidos tal como se verificou na cinta "Bin Wu". No entanto, para a cinta anterior verificou-se que existem uma série de simplificações, que aumentam a força de corte determinada analiticamente.

Caso se atenuem a influência dessas mesmas simplificações, à semelhança do que foi verificado para a cinta "Bin Wu", a combinação entre a extrusão e o corte por arrombamento será a que mais se aproxima da realidade experimental. No entanto, esta verificação só será possível, quando o material da cinta estiver mecanicamente caracterizado e quando se efetuarem ensaios experimentais com cintas geometricamente idênticas.

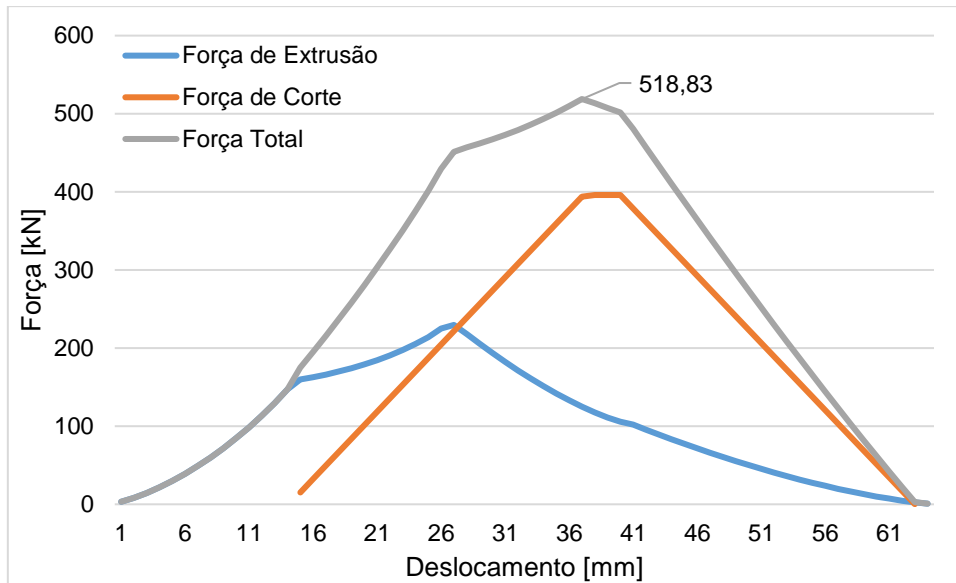


Figura 6-22: Combinação dos modelos extrusão e corte por arrombamento para a cinta "Firend".

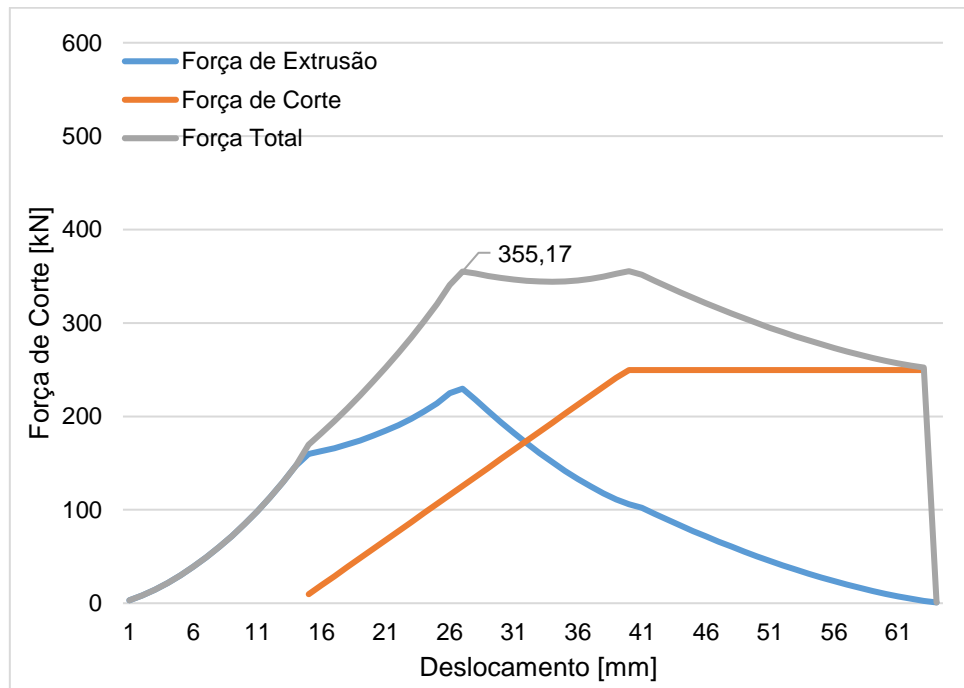


Figura 6-23: Combinação dos modelos extrusão e corte por arranque de aparta para a cinta "Firend".

7. Conclusões e Trabalho Futuro

A realização desta dissertação contribuiu significativamente para o conhecimento referente à deformação das cintas de travamento, quando esta entra em contacto com o cone de forçamento e com as estrias. Estes dois elementos (estrias e cone de forçamento), demonstraram-se necessários quando se pretende obter uma deformação plástica da cinta e provando ser essenciais para obturar os gases e conferir um movimento de rotação à granada.

Chegou-se à conclusão que existiam três possibilidades elementares, quando se pretendia replicar o processo físico de deformação da cinta. Estas possibilidades traduziam-se nos processos de fabrico extrusão, corte por arrombamento e corte por arranque de apara.

Apesar da combinação entre a extrusão e o corte por arrombamento gerar valores de força ligeiramente superiores que os dados experimentais de Wu et al. (2014a), pode-se afirmar que é a combinação que melhor descreve a realidade experimental, pelo facto de apresentar uma evolução mais estável, tal como se verifica experimentalmente.

Como foi explorado no Capítulo 6, existem inúmeras diferenças e simplificações que auxiliam nos cálculos, mas que elevam os valores de força obtidos. A diferença nos valores obtidos é explicada pelos seguintes pontos:

- Dimensões geométricas: a forma geométrica de uma cinta convencional possui diferenças que causam uma diminuição na força de deformação da própria cinta. A forma simplificada da cinta foi adotada de modo a simplificar os cálculos;
- Comportamento mecânico: os parâmetros/coeficientes que modelam o comportamento da cinta foram retirados da literatura disponível e de um ensaio experimental, que introduz discrepâncias entre os valores analíticos e experimentais.

Desde a Figura 6-9, que efetuou a primeira comparação com os resultados experimentais, até à Figura 6-15, que apresenta a nova curva de evolução da combinação extrusão-arrombamento, registou-se uma diminuição significativa no instante de carga máxima, na ordem dos 170 kN. Esta diferença, é um exemplo da influência que as hipóteses simplificativas podem causar no resultado final.

É possível concluir que as estimativas apresentadas durante o Capítulo 6, sobre o grau de influência de cada parâmetro, irão reduzir as forças obtidas analiticamente que só poderão ser confirmadas na realização de novos ensaios experimentais.

No entanto, apesar das diferenças entre os valores analíticos e experimentais, existem fatores que se demonstraram semelhantes num caso e no outro. Verificou-se em Wu et al. (2014a), que o principal parâmetro dimensional que governa a deformação das cintas de travamento é o diâmetro exterior da cinta, tal como acontece no modelo analítico gerado e que os pontos de inflexão, são comuns e localizam-se praticamente nos mesmos instantes de deslocamento, como o instante de carga máxima.

Estes fatores traduzem o sucesso do trabalho desenvolvido durante esta dissertação, com o objetivo de compreender os fenómenos relacionados com a deformação de cintas de travamento.

Com o objetivo de preencher o conhecimento sobre a deformação das cintas, são propostos os seguintes trabalhos futuros:

- Tendo esta dissertação abordado a questão da deformação em condições quási-estáticas de carregamento, é necessário continuar a investigação de modo a determinar o comportamento das cintas em condições dinâmicas. Parâmetros como a velocidade de deformação, acelerações do projétil e temperatura gerada pela pólvora, são de extrema importância por afetarem o comportamento mecânico do material e por estarem presentes no disparo real das granadas;
- A realização de ensaios experimentais introduz a possibilidade de confirmação dos dados obtidos através de modelos analíticos ou computacionais. Logo, será importante criar a capacidade de efetuar ensaios quási-estáticos e dinâmicos no decorrer de trabalhos futuros. A realização de ensaios dinâmicos, poderá traduzir-se na instrumentação de um obus durante a realização de disparos reais, que são realizados todos os anos em Portugal;
- A capacidade de realizar ensaios experimentais, permite também a determinação dos principais fatores mecânicos e geométricos que influenciam todo o processo de deformação. Inúmeras cintas de diferentes materiais e geometrias, podem ser produzidas e testadas, de modo a determinar qual a melhor forma e material a adotar em diferentes aplicações, como o projeto FIREND®;
- Tendo em vista os objetivos apresentados pelo projeto FIREND®, seria interessante determinar a influência da utilização de materiais poliméricos na constituição das cintas, e determinar quais os parâmetros dimensionais e mecânicos, necessários para que se verifique um disparo bem-sucedido.

Referências

- Almeida, L. (2015). *Stress analysis and design of a 155 mm projectile shell to be used in fire fighting*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Mecânica, Lisboa.
- Ammunition Pages. (n.d.). *Ammunition of the World*. Retrieved Maio 17, 2016, from Ammunition Pages: www.ammunitionpages.com/download/.../Driving%20Bands.pdf
- Andrews, T. D. (2006). Projectile Driving Band Interactions With Gun Barrels. *Journal Of Pressure Vessel Technology*, 273-277.
- Aurubis Global. (n.d.). *Technical Datasheet: CuZn15*. Alemanha. Retrieved Agosto 2016, from www.arubis.com
- Aurubis Global. (n.d.). *Technical Datasheet: CuZn30*. Alemanha. Retrieved Agosto 2016
- Batista, R. (2010). *Tendências do Corte por Arranque de Aparas*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica, Porto.
- Calado, J. F. (2013). *Projecto de um Projéctil de Calibre 155mm para Combate a Incêndios Florestais*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Lisboa.
- Callister, W. D. (2007). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (7ª ed.). Estados Unidos da América: John Wiley & Sons, Inc.
- Canadian Army. (1992). *Field Artillery: Ballistics and Ammunition* (Vol. Volume 6). Canada.
- Cardoso, J. R. (2012). *Comportamento Mecânico de Materiais em Processos de Fabrico por Separação*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Mecânica, Lisboa.
- Carlucci, D. E., & Jacobson, S. S. (2014). *Ballistics, Theory and Design of Guns and Ammunition* (2º ed.). New York: CRC Press.
- Castanheira, C. (2012). *Fabrico e Ensaio Balístico em Condições Reais de Conceito Melhorado de um Projétil de Detonação Mecânica*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Mecânica, Lisboa.
- Department of the Army, HEADQUARTERS. (1994). *Army ammunition Data Sheets*. Technical Manual, Exército Norte-americano. Retrieved Abril 2016
- Garcia, A., Spim, J. A., & Santos, C. A. (2000). *Ensaios dos Materiais*. Rio de Janeiro, Barsil: LTC.
- Hartman, W. F., & Stirbis, P. P. (1973, Abril). Rotating Band Pressures and Engraving Forces in 155mm Artillery Shells. *Journal of Enginnering Materials and Technology*, 124-129.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). *Manufacturing Processes for Engineering Materials* (5º ed.). Pearson Education.

- Marques, D. F. (2014). *Estudo da Balística Interna*. Tese de Mestrado, Academia Militar, Departamento de Engenharia Mecânica, Lisboa.
- Martins, P. A., & Atkins, A. G. (2013). Revisiting the empirical relation for the maximum shearing force using plasticity and ductile fracture mechanics. *Journal of Materials Processing Technology*, 1516-1522.
- MatWeb. (n.d.). *MatWeb*. Retrieved Maio 2016, from Material Property Data.
- Ministerio del Ejercito. (1977). *Fundamentos Tecnicos del Tiro de Artilleria*. Madrid, Espanha. Retrieved Abril 2016
- Montgomery, R. S. (1975). *Surface Melting of Rotating Bands*. Relatório Técnico, Benet Weapons Laboratory, U.S. Armt Armament Command.
- Montgomery, R. S. (1984). Wear of Projectile Rotating Bands. *Elsevier Sequoia*, 347-356.
- Rheinmetall. (1982). *Handbook on Weaponry* (2ª ed.). Frankfurt. Retrieved Março 2016
- Rodrigues, J., & Martins, P. (2010). *Tecnologia Mecânica* (2º ed., Vol. II). Lisboa: Escolar Editora.
- Rowe, G. W. (1965). *An introduction to the principles of metalworking*.
- Santos, H. J. (2012). As Armas e Munições na Artilharia de Campanha. *Boletim de Informação e Divulgação*.
- Santos, R. (2010). *Elementos de Armamento: Manual do Aluno*. Amadora: Academia Militar.
- Schey, J. A. (1987). *Introduction to Manufacturing Processes* (2ª ed.). McGRAW-HILL.
- Toenshoff, H. K., & Denkena, B. (2013). Basics of Cutting and Abrasive Processes. *Lecture Notes in Production Engineering*. doi:10.1007/978-3-642-33257-9_2
- Wu, B., Zheng, J., Tian, Q.-t., Zou, Z.-q., Chen, X.-l., & Zhang, K.-s. (2014a). Friction and wear between rotating band and gun barrel during engraving process. *Wear*, 106-113.
- Wu, B., Zheng, J., Tian, Q.-t., Zou, Z.-q., Yu, X.-h., & Zhang, K.-s. (2014b). Tribology of rotating band and gun barrel during engraving process under quasi-static and dynamic loading. *Friction*, 330-342.

Anexos

Anexo A: Metodologia do modelo analítico da Extrusão

1. Incremento de 1mm na base anterior (deslocamento axial, x);
2. Cálculo do incremento correspondente da base posterior (deslocamento axial, x');
3. Determinação de h_A e h_D utilizando relações trigonométricas;
 - a. Se $h_D > h_{estria}$ então só existe uma componente: “Extrusão Completa”. As estrias ainda não entraram em contato com a cinta;
 - b. Se $h_D < h_{estria}$ existem duas componentes (“Extrusão Completa” e “Extrusão Parcial”) que terão que ser somadas no final para se obter a pressão de extrusão total. Neste caso as estrias já estão em contacto com a cinta.
4. Determinação das áreas das seções transversais antes e depois da deformação, A_A e A_D através da seguinte expressão:

$$A_{A,D} = \pi \left(\frac{D_{projetil}}{2} + h_{A,D} \right)^2 - \pi \left(\frac{D_{projetil}}{2} \right)^2 \quad (A.1)$$

5. Determinação da extensão verdadeira, ε :

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{A_A}{A_D} \right) \quad (A.2)$$

6. Determinação da tensão efetiva, “ σ_{unif} ” usando a expressão 5-1 e os valores de “ K ” e “ n ” correspondentes a cada material;
7. Determinação da pressão de extrusão, “ p_e ”, para o instante correspondente, usando a expressão 4.13;
8. Determinação da força de extrusão total multiplicando o valor da pressão de extrusão, pela área A_A ;
 - a. Se não houver contacto entre as estrias e a cinta, só existe uma componente de extrusão;
 - b. Se as estrias estiverem em contacto com a cinta, existirão duas componentes que terão de ser somadas para obter a força de extrusão total.