

Caraterização e Modelação do Comportamento Mecânico da Resina Fotopolimerizada V-Flash FTI-GN

Ana Marta Sales Frade

Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa

Prof. Carlos Manuel Alves da Silva

Júri

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista

Orientador: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa

Vogais: Prof. Ivo Manuel Ferreira de Bragança

Prof. José Alberto de Jesus Borges

Novembro 2015

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero deixar o meu agradecimento a todas as pessoas que direta ou indiretamente ajudaram à conclusão desta dissertação, e por consequência, à conclusão de todo um percurso que começou à seis anos atrás.

Ao meu Orientador, Professor Doutor Pedro Rosa por toda a ajuda e atenção prestada e por toda a disponibilidade ao longo do projeto.

Ao Professor Doutor Ivo de Bragança pela ajuda e acompanhamento enquanto a utilização da Impressora 3D e a todos os colaboradores que fazem parte do NOF por toda a ajuda e apoio prestado nessa tarefa.

Ao Professor José Alberto de Jesus Borges, por sempre se ter disponibilizado para qualquer dúvida ou problema referente não só a esta tese como também a todo o que pudesse surgir ao longo de todo o percurso académico.

Ao Coronel de Material João Paulo Barreiros Pereira da Silva por todo o apoio e dedicação que sempre demonstrou pelos alunos de Serviço de Material, mesmo quando cessou funções de Diretor de Curso.

Ao Tenente-Coronel Material Martins, Diretor de Curso de Material, pela atenção e preocupação.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto “FIREND - Projétil de artilharia para o combate de incêndios” parcialmente suportado pelo Centro de Investigação da Academia Militar / Estado Maior do Exército e pela Direção-Geral de Recursos da Defesa Nacional / Ministério da Defesa Nacional.

À minha prima, Mónica Pereira por todas as boas correções que fez a esta dissertação, em português e em inglês.

Ao Senhor José Domingues, do NOF, por me ter acompanhado aquando do fabrico de provetes e por sempre se ter disponibilizado para qualquer dúvida ou problema que pudesse vir a ter no âmbito dos processos de fabrico.

Ao Ricardo Pereira, por sempre ser um apoio enquanto estudante do Instituto Superior Técnico, por todas as horas que passou a estudar e a trabalhar comigo nestes últimos dois anos, em especial neste último semestre onde acompanhou sempre de perto o desenvolvimento deste projeto.

Aos meus camaradas de Engenharias da Academia Militar, em especial ao José Mestre por sempre que precisei estar lá para me ouvir e apoiar.

Aos meus avós por nunca deixarem de acreditar que era possível.

À minha irmã, Helena Frade, por sempre demonstrar todo o orgulho que tem por mim e por nunca me ter deixado desamparada.

Ao Rui Carvalho, por me mostrar que tudo é possível e que há motivos para continuar.

Por último, e porque é a eles que devo tudo, aos meus pais, João e Manuela, por todos os sacrifícios que fizeram, por terem sempre acreditado em mim e por serem uma referência para a minha vida, os meus heróis.

Resumo

A utilização de tecnologias de prototipagem em objetos e estruturas do dia-a-dia é cada vez maior. Porém, os componentes que é possível fabricar estão em geral associados a protótipos demonstrativos não funcionais. Para ultrapassar estas limitações têm vindo a ser desenvolvidos novos materiais, procurando a melhoria das suas características mecânicas.

A presente dissertação insere-se no projeto *Firend*®, que se tem vindo a desenvolver numa parceria entre a Academia Militar e outras instituições como o Instituto Superior Técnico e procura avaliar a viabilidade da utilização da técnica de deposição de resina fotopolimerizável por ultra-violeta no fabrico de projéteis para o transporte especial de agentes extintores, procurando caracterizar o desempenho deste material em condições operativas simulativas do disparo real.

A pesquisa bibliográfica da presente dissertação baseou-se numa breve introdução aos materiais poliméricos. O trabalho teórico consistiu na modelação numérica através do método dos elementos finitos do ensaio de compressão utilizando o programa *Deform*® e na respetiva validação do modelo através de comparação dos resultados das simulações com dados experimentais existentes na literatura da especialidade. O trabalho experimental fundamentou-se no fabrico e preparação de provetes através da tecnologia de impressão 3D, na descrição das ferramentas utilizadas e do plano experimental. No final verificou-se a fratura de todos os provetes ensaiados e uma grande dispersão dos resultados, conseguindo-se apenas retirar uma tensão de segurança que não deve ser ultrapassada. De acordo com o estudo realizado o material ensaiado demonstrou-se não ser apropriado para a aplicação pretendida e recomenda-se a avaliação de outros materiais igualmente utilizados pelas técnicas de prototipagem rápida, tais como uma mistura de uma resina polimérica com um outro material com características mecânicas mais adequadas.

Palavras-Chave

Caracterização mecânica de matérias; Polímeros; Viscoplasticidade; Viscoelasticidade

Abstract

The use technologies for rapid-prototyping in everyday objects and getting wider. However, the components that it's possible to manufacture are, in general, associated with demonstrative non-functional prototypes. To overcome these limitations new materials have been developed, seeking to improve their mechanical characteristics to allow the manufacture of functional prototypes.

This thesis is part of the project Firend®, that has been developed in partnership between the Academia Militar and the Instituto Superior Técnico, and aims to assess the feasibility of using the of UV-curable resin deposition technique in the ammunition's manufacture for special transport of extinguishing agents, seeking to analyze the performance of this material in real shooting conditions.

The literature review of this thesis consisted on a brief introduction to polymer materials. The theoretical work consisted in numerical modeling using the finite elements method of compression test using the Deform® and the respective model validation by comparison of the results of the simulations with experimental data available in the specialized literature. The experimental work consisted in the manufacture and preparation of specimens through the 3D printing technology, in the description of the tools and the the experimental plan. In the end it was found that the fracture of all specimens tested and a wide dispersion of the results, it was only achieved removing a security stress that must not be exceeded. According to the study the material tested demonstrated not to be appropriate for the intended application and it is recommended an assessment of other materials also used by rapid prototyping techniques, such as, a mixture of a polymeric resin with another material, with more appropriate mechanical characteristics.

Keywords

Mechanical Characterization of materials; Polymer; Viscoplasticity; Viscoelasticity

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo	iii
Palavras-Chave	iii
Abstract.....	iv
Keywords	iv
Lista de figuras	viii
Lista de tabelas	xi
Lista de abreviações.....	xii
1 Introdução	1
2 Estado da arte	3
2.1 Projeto FIREND®.....	3
2.2 Estereolitografia	3
2.3 Aplicações.....	4
2.4 Estrutura dos polímeros.....	4
2.5 Propriedades físicas dos polímeros.....	5
2.5.1 Processo de relaxação	5
2.5.2 Temperatura de transição vítrea e temperatura de fusão.....	6
2.6 Comportamento viscoelástico e viscoplástico	8
2.7 Deformação dependente do tempo	10
2.7.1 Descrição fenomenológica da dependência do tempo	10
2.7.2 Dependência do tempo e a ativação térmica	13
2.7.2.1 Deformação elástica dependente do tempo.....	13
2.7.2.2 Deformação plástica dependente do tempo.....	15
2.8 Modelos viscoelásticos e viscoplásticos	15
2.8.1 Modelos viscoelásticos	15
2.8.1.1 Modelo de Maxwell.....	15
2.8.1.2 Modelo de Kelvin-Voigt.....	16
2.8.2 Modelos viscoplásticos.....	16
2.8.2.1 Modelo de Johnson-Cook.....	16

2.8.2.2	Modelo de Zerilli-Armstrong	17
2.8.2.3	Modelo de Preston-Tonks-Wallace	18
2.8.2.4	Modelo Silva	18
3	Desenvolvimento teórico	21
3.1.	Software Deform®	21
3.2.	Desenvolvimento do modelo proposto	22
3.3.	Programação e validação do modelo Silva para a liga de alumínio AA1050	23
3.4.	Influência do modelo de atrito no decaimento da força	24
3.5.	O fenômeno da transferência de calor	26
3.6.	Validação dos parâmetros para uma análise de temperatura	33
3.7.	Verificação das unidades de alguns parâmetros do Deform® usando um problema de transmissão de calor	36
4	Desenvolvimento experimental	41
4.1.	Fabrico dos provetes com tecnologia de impressão 3D	41
4.2.	Preparação do material	42
4.3.	Montagem experimental	43
4.3.1.	Elementos estruturais	43
4.3.2.	Atuador eletromagnético	43
4.3.3.	Banco de potência	44
4.3.4.	Amortecedor pneumático	44
4.4.	Sistema de aquisição de dados	44
4.4.1.	Célula de carga e sensor deslocamento	44
4.4.2.	Calibração da célula de carga	45

4.5.	Plano experimental	47
5	Resultados e discussão	49
5.1.	Resultados experimentais	49
5.2.	Ensaio quasi-estáticos	52
5.3.	Ensaio dinâmicos	53
5.4.	Dimensionamento da espessura mínima do projétil	54
6.	Conclusões e trabalhos futuros	57
	Referências	58
	Anexos	60

Lista de figuras

Figura 2.2 - Representação das ligações de diferentes polímeros: (a) termoplástico - sem ligações cruzadas; (b) elastômero - poucas ligações cruzadas; (C) resina - muitas ligações cruzadas. (Rösler, et al., 2007).....	5
Figura 2.3 - Rotação dos átomos de carbono numa cadeia de moléculas de um Polietileno (Rösler, et al., 2007).....	6
Figura 2.4 - Dependência da temperatura de transição vítrea e de fusão, bem como do comportamento mecânico de um polímero cristalino ou semi-cristalino com o grau de polimerização. Adaptado de (Rösler, et al., 2007)	7
Figura 2.5 - Relação entre o volume específico e a temperatura. Adaptado de (Rösler, et al., 2007) ...	7
Figura 2.6 - Movimento de uma cadeia de moléculas através de um túnel formado pelas restantes cadeias (Rösler, et al., 2007).....	8
Figura 2.7 - Curva tensão-extensão para diferentes tipos de comportamento. Adaptado de (Kachanov, 1971).....	9
Figura 2.8 - Relação extensão - tempo com tensão constante para um material viscoelástico (Rösler, et al., 2007).....	10
Figura 2.9 – (a) Elemento mola; (b) elemento amortecedor; (c) modelo de Kelvin-Voigt; (d) modelo de quatro elementos (Rösler, et al., 2007)	11
Figura 2.10 - Obtenção das curvas isócronas (Costanzi, 2003)	12
Figura 2.11 - Curvas isócronas para o polimetilmetacrilato (Rösler, et al., 2007)	12
Figura 2.12 - Relação de Eyring para o Policarbonato (Rösler, et al., 2007)	15
Figura 2.13 - Modelo de Maxwell. Adaptado de (Ozkaya, et al., 2012)	16
Figura 3.1 – (a) Provete cilíndrico usado; (c) malha utilizada	22
Figura 3.2 - Relação entre a força e o deslocamento teórico e experimental	23
Figura 3.3 - Valores que definem o trajeto do punção em função do tempo	24
Figura 3.4 - Resultados para atrito zero: (a) - relação entre a força e o tempo; (b) - relação entre a extensão e o tempo; (c)- relação entre a velocidade de deformação e o tempo; (d)- relação entre a tensão e o tempo.....	25
Figura 3.5 – (a)- Relação força - tempo para atrito de 0.2 mantendo todos os outros parâmetros constantes; (b) - Novo ajuste na tabela que relaciona o deslocamento do punção com o tempo para um atrito de 0.2.....	26
Figura 3.6 – Resultados obtidos para um valor de atrito de 0.2: (a) - relação força-tempo; (b) - relação extensão-tempo; (c) - relação velocidade de deformação-tempo; (d) - relação tensão-tempo.....	26
Figura 3.7 - Modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Adaptado de (Incropera, et al., 2007)	27
Figura 3.8 - Transferência de calor unidimensional por condução	28
Figura 3.9 - Desenvolvimento da camada limite na transferência de calor por convecção. Adaptado de (Incropera, et al., 2007).	29

Figura 3.10 - Processos de transferência de calor por convecção: (a) convecção forçada; (b) convecção natural. Adaptado de (Incropera, et al., 2007).	29
Figura 3.11- Dependência com a temperatura da condutividade térmica para alguns materiais. Adaptado de (Incropera, et al., 2007).....	30
Figura 3.12 - Condições de fronteira de convecção com o ambiente: (a) no provete; (b) nas matrizes	30
Figura 3.13 – Simulação de temperatura no provete considerando trocas de calor	32
Figura 3.14 - Efeito da resistência térmica de contacto (Incropera, et al., 2007)	32
Figura 3.15- Opções a ativar no menu " <i>Simulation Controls</i> "	34
Figura 3.16 – Evolução da temperatura ao longo do ensaio (sem atrito entre as superfícies)	34
Figura 3.17 –(a) Evolução temperaturas mínimas e máximas (com atrito de 0.2 entre o provete e as matrizes); (b) distribuição de temperatura para uma compressão de 4,5 mm e atrito igual a 0.2 entre o provete e as matrizes	35
Figura 3.18 – (a) Evolução da temperatura máxima e mínima do provete ao longo do ensaio de compressão (compressão de 4,5 mm); (b) ilustração das temperaturas que o provete atinge numa compressão de 4,5 mm com um coeficiente de transmissão de calor de 1000 N/seg/mm/°C.....	36
Figura 3.19- Sistema de unidades do Deform®.....	37
Figura 3.20 - (a) Esfera utilizada na simulação; (b) condição de fronteira de troca de calor com o meio ambiente.....	38
Figura 3.21 - Relação temperatura vs tempo obtidos pelo Deform®.....	39
Figura 4.1 – (a) Desenho em <i>SolidWorks</i> ® dos provetes a serem impressos; (b) provetes impressos	42
Figura 4.2- Configuração experimental usada: (a) ferramenta de compressão; (b) prensa hidráulica utilizada para os ensaios quasi-estáticos; (c) atuador eletromagnético, parte constituinte da barra de Hopkinson.....	43
Figura 4.3 – (a) Transformador a que estão ligados os condensadores; (b) programa desenvolvido em Labview® responsável pelo disparo (c) amortecedor pneumático	44
Figura 4.4 - (a) Célula de carga utilizada; (b) sensor deslocamento	45
Figura 4.5 - (a) Instalação para calibração da célula de carga; (b) pormenor que ilustra a montagem da célula de carga na prensa hidráulica.....	46
Figura 4.6 - Valores medidos (a) na prensa; (b) na célula de carga.....	46
Figura 4.7- Relação entre os valores medidos na prensa (reais) e os medidos na célula de carga	47
Figura 4.8 – (a) Ferramenta utilizada para os ensaios quasi-estáticos; (b) modelo do ajuste entre os pratos de compressão e o provete que garante o alinhamento dos mesmos	48
Figura 5.1 - Resultados dos ensaios de teste: (a) ensaio quasi-estático ; (b) ensaio dinâmico a 120 V	50
Figura 5.2 - Resultado do ensaio de teste dinâmico a 120 V após o tratamento de dados	50
Figura 5.3 - Resultados obtidos para os ensaios quasi-estáticos, imagem ilustrativa do estado final de um dos provetes ensaiados e linha de segurança para projeto do projétil.....	52

Figura 5.4 - Resultados obtidos nos ensaios dinâmicos a 200 V, imagem ilustrativa do estado final de um dos provetes ensaiados e linha de segurança para o projeto do projétil 53

Figura 5.5- Vista em corte da parte inferior do corpo principal com algumas cotas (Calado, 2013). ... 54

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Valor das constantes experimentais do Modelo Silva para a liga de Alumínio AA1050. .	23
Tabela 3.2 - Valores Típicos do Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção. Adaptado de (Incropera, et al., 2007)	30
Tabela 3.3- Propriedades Liga Alumínio 2024	31
Tabela 3.4- Resistência térmica de contacto para (a) interfaces metálicas sob condições de vácuo e (b) interface de alumínio com diferentes fluidos interfaciais. Adaptado de (Incropera, et al., 2007)	33
Tabela 3.5 - Resistência de contacto em interface sólido/sólido. Adaptado de (Incropera, et al., 2007)	33
Tabela 3.6 - Propriedades da liga de alumínio 2024, à esquerda retiradas da literatura (Incropera, et al., 2007); à direita retiradas do software Deform®	37
Tabela 4.1 - 10 provetes de ensaio numerados com respetivas dimensões	42
Tabela 4.2 - Valores medidos na prensa e os medidos na célula de carga, respetivamente	47
Tabela 5.1- Resultados finais dos dois tipos de ensaios de compressão	49
Tabela 5.2 – Provetes de alumínio AA1050 usados nos ensaios de teste	50

Lista de abreviações

Nomenclatura

%	Porcentagem
2D	<i>Two dimensional</i> – Duas dimensões
3D	<i>Three Dimensional</i> – Três dimensões
μF	Microfaraday
μm	Micrometro
Δw	Gradiente de trabalho
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
ADN	Ácido desoxirribonucleico
AM	Academia Militar
ARN	Ácido ribonucleico
BCC	Estrutura cúbica de corpo centrada
CAD	<i>Computer Aided Design</i> – Desenho Assistido por Computador
c_p	Capacidade térmica mássica
DAQ	<i>Data Acquisition</i> – Sistema de Aquisição de Dados
dm^3	Decímetros cúbicos
FCC	Estrutura cúbica de face centrada
FEM	<i>Finite Element Method</i> – Método dos Elementos Finitos
IST	Instituto Superior Técnico
J	Joules
Kg	Quilograma
kHz	Quilohertz
kJ	Quilojoule
kN	Quilonewton
m	Metro
M	Massa
mm	Milímetros
Mol	Mole
MPa	Mega Pascal
mV	Milivolt
m^2	Metro quadrado
N	Newton
nm	Nanómetro
NOF	Núcleo de Oficinas

\emptyset	Diâmetro
PMMA	Polimetilmetacrilato
S	Segundo
SAD	Sistema de Aquisição de Dados
SI	Sistema Internacional
SLA	<i>Strereolitogrphy</i> - Estereolitografia
T	Temperatura
T_g	Temperatura de transição vítrea
T_m	Temperatura de fusão
V	Volts
Vs	Versus
W	Watts
WLF	Williams-Landel-Ferry
Equações	
A	Secção transversal
A_B	Área da base
A_{crit}	Área crítica ao corte
A, B, N	Constantes do modelo Johson-Cook
C_i	Constantes de índice i
D	Parâmetro adimensional do material na Lei de Voce
d_b	Diâmetro interno da base
d^*	Largura da barreira de ativação térmica
$\frac{dv_x}{dy}$	Gradiente da velocidade na direção x
$\frac{dv_y}{dx}$	Gradiente de velocidade na direção y
$\frac{dv}{dy}$	Gradiente de velocidade
E	Módulo de elasticidade
$E_c(t)$	Módulo de Young dependente do tempo
$E_r(t)$	Módulo de relaxação dependente do tempo
e_{xy}	Deformação no plano xy
F	Força
F_T	Força de tiro
G	Módulo de elasticidade à torção
H	Coefficiente de convecção
K	Kelvins
k	Condutividade térmica
k_B	Constante de Boltzmann

L	Comprimento
ln	Logaritmo neperiano
M	Massa Atômica
P	Probabilidade
p_r	Pressão máxima de tiro
Q	Energia de ativação
q_x	Transferência de calor por condução
q_x''	Fluxo térmico
$R_{t,c}''$	Resistência térmica de contacto
sin	Função “seno”
T_1	Temperatura no instante 1
T_2	Temperatura no instante 2
T_∞	Temperatura do fluido
T_H	Temperatura de referência
T_M	Temperatura de fusão
t_{min}	Espessura mínima da base
T_R	Temperatura usada no modelo Johnson-Cook
T_s	Temperatura na superfície
t_0	Tempo no instante zero
t_1	Tempo de carregamento no instante 1
t_2	Tempo de carregamento no instante 2
t_{atr}	Tempo de atraso
t_{rel}	Tempo de relaxação
A	Coeficiente de amortecimento longitudinal
B	Coeficiente de amortecimento angular
Γ	Distorção
E	Extensão
H	Coeficiente de atrito viscoso
θ	Constante de endurecimento na lei de Voce
M	Coeficiente de Atrito
Π	Pi
P	Densidade
Σ	Tensão
σ_{seg}	Tensão máxima de segurança
T	Tensão de corte
T_{max}	Tensão máxima de corte
exp	Exponencial
u	Deslocamento na direção x
v	Deslocamento na direção y
$\varepsilon(t)$	Extensão dependente do tempo

$\dot{\gamma}$	Taxa de distorção
$\dot{\epsilon}$	Velocidade de deformação
ϵ_0	Extensão no instante zero
ϵ_{eff}^p	Extensão plástica efetiva
τ_s	Tensão de endurecimento saturada normalizada
τ_s	Tensão de cedência normalizada

1 Introdução

A deformação de qualquer material pode, em geral, ser representada através de uma equação constitutiva que descreve a relação entre a tensão, a extensão, a velocidade de deformação e a temperatura. Estes modelos constitutivos deverão permitir reproduzir a resposta mecânica através de equações de complexidade adequada, devendo os seus parâmetros ser calibrados através de ensaios mecânicos padrão. No caso dos polímeros é possível observar para além da sua resposta elástica e plástica, a existência de um comportamento viscoso (Junior, 2002). Esta resposta é ainda acompanhada por um comportamento não linear quando solicitados e possuem uma alta sensibilidade a variações de velocidade de deformação e de temperatura (Vassoler, 2007).

O objetivo principal desta dissertação é a caracterização do comportamento mecânico de um polímero quando sujeito a impactos a alta velocidade. Este objectivo está enquadrado num projecto interinstitucional FIREND® onde se pretende determinar a lei de comportamento mecânico e a quantificação dos seus parâmetros para o dimensionamento de um invólucro (projétil de 155mm) para aplicações militares específicas. (Lima, 2005), (Castanheira, 2012) (Castanheira, 2012)

Para alcançar os objectivos da tese foi necessário realizar uma revisão bibliográfica sobre o tema em estudo, o fabrico de provetes e a realização de ensaios mecânicos em condições estáticas e dinâmicas. O trabalho da tese envolveu ainda o estabelecimento de um modelo numérico do ensaio de compressão, o qual foi validado com dados obtidos na literatura da especialidade. A simulação foi realizada também em condições estáticas e dinâmicas de carregamento, tendo permitido validar a metodologia numérica para posterior utilização de outras leis de comportamento adequadas para a modelação do comportamento de materiais poliméricos.

O documento da tese começa por apresentar uma breve introdução ao tema que vai ser tratado e qual o seu enquadramento. Definição dos objetivos para este projeto e apresentação da estrutura da dissertação. O capítulo 2 apresenta os conceitos relacionados com o tema desta dissertação e resumo de alguns modelos existentes utilizados. No capítulo de Desenvolvimento Teórico é descrito o software *Deform*® onde são feitas diversas simulações cujo objetivo é validar as funcionalidades usadas em ensaios de compressão, tais como atrito, temperatura, variações de velocidade do prato compressor e transferências de calor. Quanto ao capítulo de Desenvolvimento Experimental, segue uma descrição do processo de fabrico dos provetes de resina fotopolimerizável por ultra-violeta, descrição da configuração experimental usada ao longo dos ensaios onde é feita uma breve enumeração das principais ferramentas usadas assim como as suas propriedades e funcionamento. São também enumeradas as calibrações efetuadas necessárias ao bom funcionamento das ferramentas. É apresentado também o plano experimental. Por último, Os capítulo de Resultados e Discussão, e o capítulo de Conclusões, discutem os resultados obtidos nos ensaios realizados e apresentam as propostas de trabalhos futuros.

2 Estado da arte

Neste capítulo serão apresentados temas referentes à caracterização do comportamento mecânico de um material polimérico. Para introduzir o tema, começa-se por apresentar em que consiste o projeto FIREND® e é dada uma breve descrição do processo da técnica de prototipagem rápida por Estereolitografia (SLA). De seguida serão enumeradas alguns exemplos de utilização de polímeros em aplicações civis e militares. Posteriormente, serão apresentadas as propriedades mecânicas e físicas que caracterizam estes materiais tais como a relaxação. De seguida, descreve-se o comportamento viscoelástico e viscoplástico típico deste tipo de material e explica-se como o fator tempo influencia a deformação dos polímeros. Por último, são abordados os principais modelos viscoelásticos e viscoplásticos.

2.1 Projeto FIREND®

O projeto FIREND® iniciou-se com a iniciativa do Tenente-Coronel de Artilharia Marquês de Sousa, do Professor-Doutor Pedro Vilaça da Silva e do ex-aluno da Academia Militar Francisco Lima, numa colaboração entre a Academia Militar e o Instituto Superior Técnico, com o objetivo de “desenvolver um conceito e dimensionar um projétil de detonação mecânica, ..., mantendo a configuração exterior dos projéteis de artilharia de calibre 105 mm, ..., esta munição deve permitir a sua aplicação militar quer em tempo de guerra, quer em tempo de paz e em ações de apoio à sociedade civil, como é exemplo o combate a fogos florestais” (Lima, 2005). Em 2012, foi feito um protótipo que foi ensaiado em condições reais de tiro pelo Tenente Carlos Castanheira, onde se concluiu que seria útil aumentar o calibre do projétil de modo a aumentar também o volume de carga a transportar (Castanheira, 2012). Este projeto evoluiu, em 2013, para um novo projétil com calibre 155mm com detonação através de uma espoleta eletrónica (Calado, 2013).

A aplicação do FIREND® permite que seja utilizado sob quaisquer condições atmosféricas, independentemente da luminosidade existente, pode ser lançado para zonas inacessíveis por via terrestre, mesmo em zonas montanhosas, de forma ininterrupta e pode ser utilizado para atacar o fogo pelo topo das chamas ou na base de origem das mesmas (Castanheira, 2012).

2.2 Estereolitografia

A Estereolitografia, também conhecida por SLA, é o processo de prototipagem rápida, mais antiga e a mais usada, cujas características técnicas podem ser consultadas no Anexo A. O início da produção industrial por este tipo de processo deu-se no ano de 1987 pela 3D Systems Inc., nos Estados Unidos da América (Alves, et al., 2001). Tal como todos os processos de prototipagem rápida, a Estereolitografia consiste no fabrico de objetos por adição sucessivas de camadas, recorrendo para isso a um desenho CAD 3D que é convertido para um ficheiro .STL (que deriva da palavra “stereolithography”). O ficheiro .STL ao ser introduzido no equipamento de prototipagem rápida é convertido num ficheiro .SLI (que deriva da palavra inglesa “slice”) que divide o modelo em várias camadas de construção (Kochan, 1993). O material usado é uma resina polimérica líquida, que através

de um feixe laser de raios ultravioletas, sofre uma reação fotoquímica. Esta reação de polimerização da resina ocorre nas zonas onde os raios incidem e depende do tempo de exposição, da potência do feixe laser, do seu diâmetro e da velocidade de varrimento (Jacobs, 1996). Como a resina é líquida e pouco viscosa, a complexidade dos objetos a desenvolver pode ser elevada. Durante o fabrico dos modelos, a polimerização da resina é apenas parcial, razão pela qual é necessário um tratamento de pós-cura no final do processo para conferir ao material a sua máxima resistência mecânica (Alves, et al., 2001). Após esta etapa os componentes são normalmente submetidos a operações de polimento para melhorar o seu aspeto e funcionalidade.

As principais vantagens deste processo são a sua precisão dimensional, o facto de permitirem obter formas complexas e ser possível utilizar resinas de vários tipos consoante a função do componente a obter, nomeadamente, resistentes a altas temperaturas, rígidas e flexíveis. Como desvantagens tem-se o elevado custo das matérias-primas e o elevado tempo de fabrico.

2.3 Aplicações

A tecnologia SLA é usada em muitas indústrias para muitas aplicações. Por exemplo, a indústria médica utiliza este tipo de prototipagem rápida para a conceção de modelos à escala real de órgãos, estruturas ósseas e tumores onde é possível visualizar o interior do corpo humano sem a necessidade de uma intervenção cirúrgica ajudando muitas vezes a solucionar problemas nesse âmbito. São muitas as indústrias, como a automóvel, que utilizam esta tecnologia para fabricar protótipos de peças com o intuito de verificar a viabilidade, capacidade, funcionalidade e muitas outras características desse produto a partir de um modelo 3D. A tecnologia de Estereolitografia também pode ser usada para aplicações domésticas, com o fabrico de componentes funcionais (Alves, et al., 2001).

2.4 Estrutura dos polímeros

As propriedades mecânicas dos materiais são determinadas pela sua estrutura atómica. Para entender essas propriedades, é necessário estudar a estrutura dos materiais. A estrutura dos materiais é estudada pela física do estado sólido, mas para modelar as propriedades mecânicas não é necessário compreender em pleno todos os fenómenos desta temática uma vez que podem ser calibrados através de modelos empíricos simples. (Rösler, et al., 2007)

Os polímeros, chamados muitas vezes apenas por plásticos, são constituídos por macromoléculas, frequentemente sob a forma de grandes cadeias moleculares em que os átomos são mantidos unidos através de ligações covalentes, enquanto as ligações entre as diferentes cadeias são muito mais fracas. As cadeias moleculares que formam estes materiais são formadas por compostos orgânicos idênticos, os monómeros. Tipicamente, o número de monómeros numa cadeia molecular é da ordem de 10^3 a 10^5 , resultando num comprimento molecular total de poucos micrómetros, sendo que o número médio de monómeros na cadeia de moléculas de um polímero é chamado de grau de polimerização. Embora as unidades constitutivas dos polímeros sejam as cadeias lineares é possível que se criem ligações covalentes cruzadas formando uma rede molecular. Estas ligações cruzadas são muito importantes quando se pretende determinar as propriedades mecânicas de um polímero, uma vez que fixam as

cadeias umas às outras e torna-se impossível extrair as moléculas das cadeias simples (Rösler, et al., 2007). Por esta razão, é feita uma distinção entre os termoplásticos, sem ligações cruzadas, os elastómeros (ou borrachas), com um pequeno número de ligações cruzadas, e as resinas com muitas ligações cruzadas, como está representado na Figura 2.1.

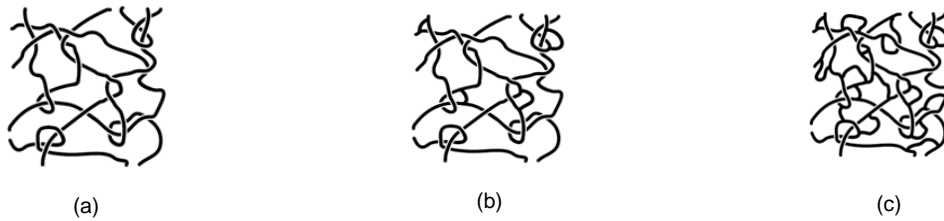


Figura 2.1 - Representação das ligações de diferentes polímeros: (a) termoplástico - sem ligações cruzadas; (b) elastómero - poucas ligações cruzadas; (C) resina - muitas ligações cruzadas. (Rösler, et al., 2007)

Os elastómeros e as resinas são sempre amorfos, os termoplásticos são semi-cristalinos, isto é, existe uma mistura de zonas cristalinas com zonas amorfas. A cristalinidade de um termoplástico é definida como a fração do volume das regiões cristalinas. As regiões cristalinas têm tipicamente uma espessura de aproximadamente 10 nm e um comprimento entre 1 μm e 10 μm . Entre regiões cristalinas encontram-se zonas amorfas.

As propriedades mecânicas dos termoplásticos amorfos são determinadas principalmente pelas ligações intermoleculares entre as cadeias e não pelas ligações covalentes dentro delas. Estas ligações intermoleculares são, dependendo da composição química, de Van der Waals, dipolares ou de hidrogénio. São as diferentes forças destas ligações intermoleculares que fazem os polímeros possuir propriedades mecânicas tão distintas.

A deformação destes materiais é, portanto, dependente do tempo, e nem sempre é fácil distinguir as deformações elásticas das deformações plásticas.

2.5 Propriedades físicas dos polímeros

2.5.1 Processo de relaxação

Como já foi referido, os termoplásticos amorfos são compostos por cadeias de moléculas ligadas covalentemente umas às outras através de interações intermoleculares.

A baixas temperaturas (de poucos Kelvin), as moléculas das cadeias estão fixas nas suas posições, mas a temperaturas elevadas o comportamento dos polímeros é muito mais complexo, uma vez que podem ocorrer rearranjos e movimentos dentro e entre as cadeias de moléculas. A estes processos dá-se o nome de *relaxação*, uma vez que provocam a relaxação do material, isto é, provocam uma redução das tensões aplicadas. Os processos de relaxação são, na sua grande maioria, reversíveis e são os principais responsáveis pelas propriedades físicas e mecânicas dos polímeros (Rösler, et al., 2007).

Nos polímeros amorfos, podem ocorrer vários processos de relaxação, que dependem da estrutura química do polímero e são ativos a temperaturas diferentes.

Um exemplo simples de um processo de relaxação é uma rotação de uma cadeia molecular em torno de uma ligação química. Para o Polietileno, por exemplo, a energia necessária para esta

rotação ocorrer é de 60 kJ/mol , energia essa que se atinge para temperaturas superiores a -100°C , como se pode verificar na figura 2.3 (Rösler, et al., 2007).

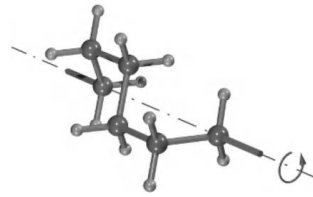


Figura 2.2 - Rotação dos átomos de carbono numa cadeia de moléculas de um Polietileno (Rösler, et al., 2007)

Assim, se um componente feito de polietileno for carregado mecanicamente, através deste processo de relaxação as moléculas podem reorganizar-se e permitir que o componente tenha uma deformação adicional. Uma vez que estes processos só ocorrem quando existe energia térmica suficiente, é necessário tempo e por isso diz-se que a deformação é dependente do tempo.

A temperaturas suficientemente altas, um segmento de uma cadeia que contenha mais de 50 unidades também se pode mover. Isto acontece uma vez que os processos de colisão entre os átomos são ativados termicamente e fazem com que a distância entre as cadeias de moléculas seja maior, permitindo assim que os segmentos de maiores dimensões possam deslizar uns sobre os outros. É esta mobilidade que causa a transição vítrea (Rösler, et al., 2007).

2.5.2 Temperatura de transição vítrea e temperatura de fusão

As propriedades físicas dos polímeros diferem caso se esteja a analisar uma zona amorfa ou cristalina, e por essa razão devem ser estudadas em separado. Tanto a temperatura de transição vítrea como a temperatura de fusão são caracterizadas pela necessidade de a energia térmica ser suficientemente alta para permitir os rearranjos das ligações entre as moléculas de uma cadeia. Para o caso específico dos polímeros, quando aquecidos, primeiro atinge-se a temperatura de transição vítrea e só depois a temperatura de fusão, uma vez que a temperatura de transição vítrea é cerca de 60% da temperatura de fusão, medidas em Kelvin.

Os valores a que correspondem as temperaturas de fusão, T_m , e transição vítrea, T_g , dependem do comprimento das moléculas da cadeia, ou seja, do grau de polimerização, como se pode verificar na Figura 2.3.

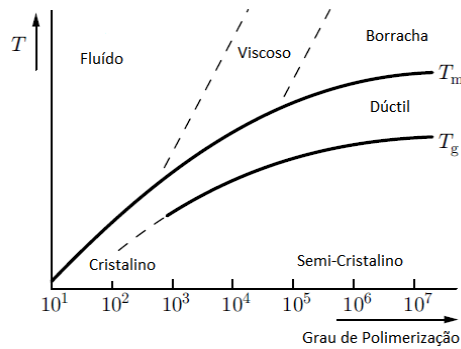


Figura 2.3 - Dependência da temperatura de transição vítrea e de fusão, bem como do comportamento mecânico de um polímero cristalino ou semi-cristalino com o grau de polimerização. Adaptado de (Rösler, et al., 2007)

As ligações de uma cadeia cristalina são muito mais fortes do que as ligações de uma cadeia amorfa, razão pela qual é necessária uma maior energia, e por consequência uma maior temperatura, para as quebrar e originar novas ligações mais estáveis. Por este motivo, nas zonas amorfas as quebras de ligações e formação de novas ligações acontece acima da temperatura de transição vítrea, T_g , enquanto para as zonas cristalinas estes fenómenos ocorrem para temperaturas acima da temperatura de fusão, T_m .

A temperatura de transição vítrea depende, entre outros fatores, do volume específico. O volume específico de polímeros amorfos depende da temperatura como se verifica na Figura 2.4

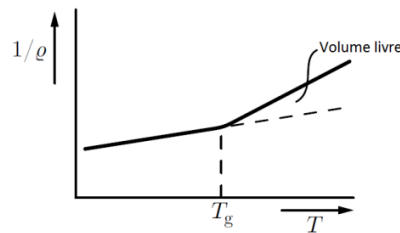


Figura 2.4 - Relação entre o volume específico e a temperatura. Adaptado de (Rösler, et al., 2007)

A baixas temperaturas, o volume específico aumenta linearmente com a temperatura devido à expansão térmica, até que é atingida uma determinada temperatura, a temperatura de transição vítrea, para a qual o declive da reta do volume específico é alterado, crescendo mais rapidamente com a temperatura do que antes e o volume adicional denomina-se por volume livre. Microscopicamente, este aumento rápido implica que a distância entre as cadeias moleculares aumente mais rapidamente do que em baixas temperaturas. Isto ocorre devido à ativação térmica que, uma vez ultrapassada a temperatura de transição vítrea, é suficientemente alta para superar as ligações intermoleculares e aumentar a mobilidade das moléculas. É comum dizer-se que as ligações “derretem” quando se atinge a temperatura de transição vítrea. Tal não significa que as ligações entre as cadeias são quebradas, mas sim que a energia térmica é suficientemente alta para permitir rearranjos das moléculas sem ser necessário a aplicação de uma tensão externa (Rösler, et al., 2007).

Para temperaturas acima da temperatura de transição vítrea continuam a existir ligações interatómicas fortes, mas a ativação térmica permite que as ligações se quebrem e se voltem a formar

com bastante frequência de modo a permitir que as cadeias de moléculas sejam capazes de se mover livremente ao longo umas das outras, como está representado na Figura 2.5.

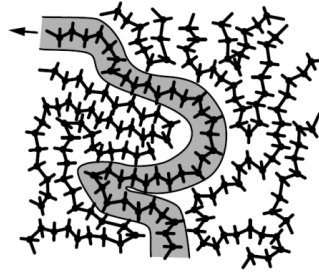


Figura 2.5 - Movimento de uma cadeia de moléculas através de um túnel formado pelas restantes cadeias (Rösler, et al., 2007)

Devido à forma complexa do túnel, as moléculas devem ser capazes de girar ao longo das ligações covalentes que ligam as moléculas da cadeia. Devido ao aumento do volume livre com a temperatura, a mobilidade das moléculas aumenta e, por consequência, a viscosidade diminui. É importante referir que são muitas as propriedades físicas que dependem do grau relativo de liberdade de movimento molecular e que, depois de alcançada a temperatura de transição vítrea, são alteradas. São exemplo o coeficiente de dilatação térmica, a capacidade calorífica, o índice de refração e as propriedades elétricas (Nicholson, 1997).

2.6 Comportamento viscoelástico e viscoplástico

O comportamento dos materiais com massa molecular relativamente baixa, como são exemplo os polímeros, é visto como uma combinação de dois tipos particulares de material ideal, o sólido elástico e o líquido viscoso, denominado como comportamento viscoelástico. O sólido elástico tem uma forma bem definida e é deformado por forças externas assumindo uma nova forma de equilíbrio. À medida que são deformados, os sólidos elásticos armazenam toda a energia aplicada pelas forças externas durante a deformação, que depois é utilizada para voltar à forma original logo que as cargas são removidas. Por outro lado, o líquido viscoso não possui uma forma definida e quando são aplicadas forças externas deforma de forma irreversível.

Os polímeros são materiais que apresentam toda a gama de propriedades viscoelásticas, dependendo da temperatura e da escala de tempo escolhida experimentalmente.

De toda a gama de polímeros vítreos, os termoplásticos são os mais usados para aplicações estruturais que requerem uma alta resistência ao impacto, tais como os vidros de segurança de janelas e duchas, para-brisas de automóveis e aviões e blindagens transparentes. Uma das principais razões que fazem estes materiais resistentes a impactos é a sua alta ductilidade e a sua resposta viscoelástica e viscoplástica não linear. A primeira permite que as estruturas construídas com este tipo de material sofram grandes deformações antes de se fraturarem e a segunda permite que o material transforme uma grande parte da energia de impacto em calor ou energia interna (Frank, et al., 1998). É esta não linearidade no comportamento viscoelástico e viscoplástico que permite que os polímeros sejam muito resistentes a impactos mas também faz com seja muito difícil prever a sua resposta aos mesmos.

A lei de viscosidade de Newton define a viscosidade da seguinte forma:

$$\sigma = \eta \frac{dv}{dy} \quad (2.1)$$

Onde η é o coeficiente de atrito viscoso, v a velocidade e y a direção do gradiente de velocidade. Para um gradiente de velocidade no plano xy a Lei de Viscosidade de Newton é expressa na equação (2.2)

$$\sigma = \eta \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \quad (2.2)$$

Onde $\partial v_x/\partial y$ e $\partial v_y/\partial x$ representam os gradientes de velocidade nas direções x e y respetivamente. Como $v_x = \partial u/\partial t$ e $v_y = \partial v/\partial t$ onde u e v são os deslocamentos nas direções x e y respetivamente e e_{xy} representa a deformação no plano xy , a equação (2.2) pode ser escrita da seguinte maneira.

$$\begin{aligned} \sigma_{xy} &= \eta \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ &= \eta \frac{\partial e_{xy}}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.3)$$

O comportamento viscoelástico linear combina a Lei de Hooke, lei que descreve o comportamento elástico linear (equação (2.4)), com a lei de Newton, apresentada na equação (2.5).

$$(\sigma_{yx})_e = G \varepsilon_{xy} \quad (2.4)$$

$$(\sigma_{yx})_v = \eta \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\sigma_{yx} = (\sigma_{yx})_e + (\sigma_{yx})_v = G \varepsilon_{xy} + \eta \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial t} \quad (2.6)$$

A equação (2.6) representa um dos modelos mais simples que traduzem o comportamento viscoelástico linear, denominado por modelo de Kelvin - Voight. Este modelo será explicado com mais pormenor na secção 2.5.

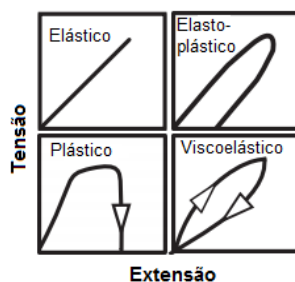


Figura 2.6 - Curva tensão-extensão para diferentes tipos de comportamento. Adaptado de (Kachanov, 1971)

A viscoplasticidade é a teoria que descreve a dependência da taxa de deformação de materiais sólidos, que se traduz numa deformação que depende da taxa à qual é aplicada a carga. O comportamento não elástico descrito nesta teoria refere-se a uma deformação plástica, ou seja, existe uma deformação irreversível do material quando é aplicada uma certa intensidade de carga.

2.7 Deformação dependente do tempo

Sabe-se que o módulo de Young dos polímeros é cerca de duas ordens de grandeza menor do que o dos materiais metálicos e cerâmicos, enquanto a tensão de cedência é menor apenas uma ordem de grandeza aproximadamente. O que significa que este tipo de material pode apresentar elevadas deformações elásticas sem se deformar plasticamente.

Tanto o comportamento elástico como o plástico são dependentes do tempo, o que faz com o que os polímeros sejam viscoelásticos e viscoplásticos.

Nas próximas secções serão abordados pontos que explicam os fenómenos de deformação dependentes do tempo e a relação entre os processos de relaxação térmica e essa mesma dependência.

2.7.1 Descrição fenomenológica da dependência do tempo

Os materiais poliméricos apresentam um comportamento que é dependente do tempo. As tensões e deformações induzidas quando a carga é aplicada são funções do tempo, e, de uma forma genérica, este comportamento pode ser explicado como uma superfície tridimensional. As relações de tensões–deformações–tempo, ou seja, as leis constitutivas, podem ser determinadas através de ensaios de longa duração em provetes sob tensão constante (medindo–se as deformações lentas – fluência) ou sob deformação constante (medindo–se a perda de tensões ao longo do tempo – *Relaxação*). Outra hipótese é a construção de curvas isócronas (intervalos de tempo constantes) através do corte desta superfície tridimensional a intervalos de tempos constantes. (Gomes, et al., 2013)

Quando a tensão passa do valor zero para um certo valor σ abaixo do valor do limite de tensão de cedência de forma abrupta e se mantém constante, o polímero apresenta uma extensão dependente do tempo, $\varepsilon(t)$. A extensão atinge instantaneamente um valor ε_0 , mas depois aumenta progressivamente com o tempo. Quando o módulo de Young depende do tempo, para uma tensão constante este define-se como:

$$E_c(t) = \frac{\sigma}{\varepsilon(t)} \quad (2.7)$$

Muitas vezes, este Módulo de Young é denominado de Módulo de Fluência. Quer a deformação, quer o Módulo de Young, aproximam-se de um valor constante quando o tempo de carga é elevado. Se a carga for retirada antes de um tempo t_0 , a extensão decai de forma instantânea um valor ε_0 , diminuindo depois lentamente até zero (Figura 2.7). O tempo de atraso, τ_{atr} , é definido como o tempo necessário para diminuir a parte dependente do tempo da deformação por um fator de $1/e$.

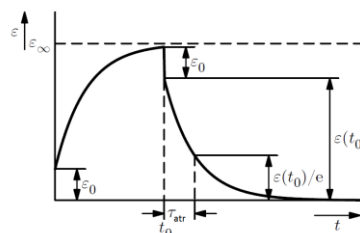


Figura 2.7 - Relação extensão - tempo com tensão constante para um material viscoelástico (Rösler, et al., 2007)

Para pequenas extensões, os polímeros são materiais viscoelásticos lineares, ou seja, um aumento na tensão causa um aumento proporcional na extensão. Para extensões de maior dimensão, o mesmo já não se verifica.

Se em vez de se aplicar uma tensão num componente for estabelecida uma extensão, a tensão vai diminuir com o tempo (tensão de relaxação). Analogamente com o que acontecia com a extensão, a tensão também aumenta até um certo valor instantaneamente, diminuindo ao longo do tempo até atingir um valor constante. Neste caso, tem-se o módulo de relaxação e o tempo de relaxação, t_{rel} . O módulo de relaxação pode ser definido como:

$$E_r(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon} \quad (2.8)$$

O módulo e o tempo de relaxação nunca assumem valores mais elevados que o módulo de fluência e o tempo de atraso, respetivamente.

Fenomenologicamente, o comportamento viscoelástico linear pode ser descrito utilizando modelos simples, como o modelo de Kelvin-Voigt. Neste modelo, o comportamento do material é descrito por uma ligação em paralelo de uma mola e de um amortecedor. A mola obedece a uma relação de tensão-deformação do tipo linear como se pode verificar na equação (2.9), onde σ é a tensão, E o módulo de elasticidade, ε a deformação, τ a tensão de corte, G o módulo de elasticidade à torção e γ a distorção.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (2.9)$$

$$\tau = G \times \gamma$$

Os amortecedores são os componentes responsáveis pela resposta viscoelástica e obedecem a uma relação também linear onde α é o coeficiente de amortecimento longitudinal e β o coeficiente de amortecimento angular.

$$\sigma = \alpha \times \dot{\varepsilon} \quad (2.10)$$

$$\tau = \beta \times \dot{\gamma}$$

Uma carga constante aplicada no elemento estende a mola, no entanto o atrito no interior do amortecedor proporciona uma grande resistência inicial à deformação, fazendo com que a extensão aumente com o tempo. Este modelo descreve o comportamento de um material puramente viscoelástico. Contudo, sabe-se que na realidade o comportamento de um polímero não é só viscoelástico. Existe sempre uma contribuição elástica instantânea na deformação independente do tempo e, a temperaturas elevadas, uma deformação plástica irreversível. Tal como as propriedades elásticas, também as propriedades plásticas são dependentes do tempo, sendo os polímeros por isso também materiais viscoplásticos. O comportamento viscoplástico pode ser descrito através do modelo de quatro parâmetros que contém uma mola e um amortecedor em série com um modelo Kelvin-Voigt, que se pode verificar na Figura 2.8.

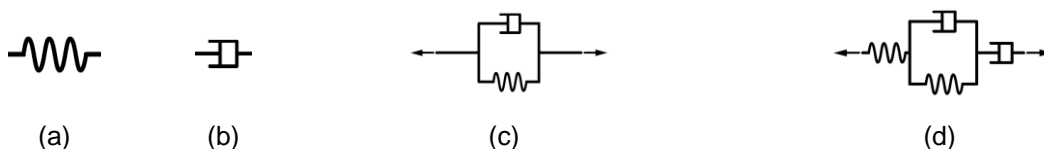


Figura 2.8 – (a) Elemento mola; (b) elemento amortecedor; (c) modelo de Kelvin-Voigt; (d) modelo de quatro elementos (Rösler, et al., 2007)

A rigidez da mola e os parâmetros de amortecimento do amortecedor dependem da temperatura, ou seja, para baixas temperaturas, bem abaixo da temperatura de transição vítrea, domina o comportamento elástico linear; com o aumento da temperatura, o comportamento do material torna-se viscoelástico; para um aumento ainda maior, para temperaturas acima da temperatura de transição vítrea, o material comporta-se como um líquido viscoso, com o elemento amortecedor a determinar o seu comportamento.

Quantitativamente este modelo não é correto e não equaciona com o facto de a tensão ser dependente do tempo, sendo por isso necessário ter precaução quando se usam estes modelos e ter em atenção estes fatores.

Por fim existem as curvas isócronas. Estas curvas mostram a relação tensão-extensão para um tempo de ensaio bem definido e são obtidas a partir de vários ensaios a temperatura e tensão constante, como se pode ver na Figura 2.9.

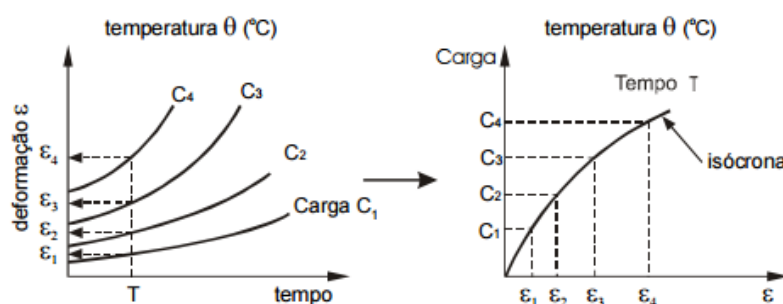


Figura 2.9 - Obtenção das curvas isócronas (Costanzi, 2003)

Muito diferentes das curvas convencionais de tensão-extensão, verifica-se que para cada tensão é necessário fazer um ensaio e que a deformação aumenta para tempos de ensaios maiores. Como exemplo, mostra-se, na Figura 2.10, algumas curvas isócronas para o polimetilmetacrilato (PMMA) cuja temperatura de transição vítrea é 100°C.

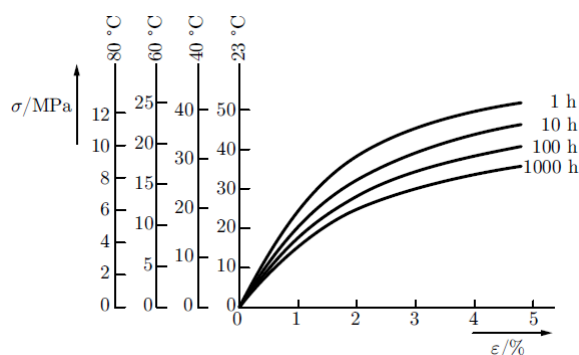


Figura 2.10 - Curvas isócronas para o polimetilmetacrilato (Rösler, et al., 2007)

Através destas curvas é possível verificar uma zona viscoelástica linear para pequenas extensões, sendo o declive de cada reta dependente do tempo de ensaio. O declive é igual ao módulo de fluência, que foi definido em cima, e diminui com o aumento do tempo de carregamento. Também é possível verificar que para valores de extensão maiores que 0.5% “perde-se” o efeito linear e o material

torna-se viscoelástico não linear e, para extensões ainda maiores, verifica-se um comportamento viscoplástico. Os efeitos viscoelásticos podem ocorrer em temperaturas abaixo da temperatura de transição vítrea. Para o caso exposto estes efeitos ocorrem para temperaturas 80°C abaixo da temperatura de transição vítrea, fator esse que tem de ser tido em consideração quando se pretende projetar polímeros. Os efeitos viscoelásticos e viscoplásticos podem ser desprezados apenas para casos onde a extensão e o tempo de carregamento são ambos pequenos (Rösler, et al., 2007).

2.7.2 Dependência do tempo e a ativação térmica

O processo de relaxação explicado na secção 2.5.1, é um fator de extrema importância na deformação dos polímeros. Uma vez que os polímeros são ativados termicamente a temperaturas elevadas, a probabilidade da ocorrência de processos de relaxação aumenta exponencialmente com a temperatura e com o tempo disponível para o processo. De modo a explicar este fenómeno em detalhe, considere-se um segmento de uma cadeia polimérica que tem de superar uma barreira de energia Q de modo a conseguir deslizar entre segmentos vizinhos e permitir a deformação (processo de relaxação). A probabilidade P de este segmento conseguir ultrapassar esta barreira de ativação térmica é:

$$P \propto \exp(-Q/k_B T) \quad (2.11)$$

Onde T é a temperatura e k_B a constante de Boltzmann. A aplicação de uma tensão externa σ facilita a superação desta barreira. Se esta tensão atuar sobre um segmento molecular de secção transversal A e se a largura da barreira for d^* , a probabilidade de superar a barreira é a descrita na equação (2.12).

$$P^+ \propto \exp\left(-\frac{Q - \sigma A d^*}{kT}\right) \quad (2.12)$$

Após a barreira ser superada, a tensão externa pode provocar o efeito contrário, embora este efeito seja menos provável de acontecer (equação (2.13)).

$$P^- \propto \exp\left(-\frac{Q + \sigma A d^*}{kT}\right) \quad (2.13)$$

A probabilidade total de superar a barreira térmica é a diferença entre as duas contribuições da tensão.

$$P = P^+ - P^- \propto \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{\sigma A d^*}{kT}\right) - \exp\left(-\frac{\sigma A d^*}{kT}\right) \right] \quad (2.14)$$

Da equação (2.14) pode-se obter a velocidade de deformação, $\dot{\epsilon}$, onde $\dot{\epsilon}_0$ é uma constante.

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) 2 \sinh\left(\frac{\sigma A d^*}{kT}\right) \quad (2.15)$$

A equação (2.15) é a equação que vai ser utilizada para o estudo do comportamento elástico e plástico dependente do tempo.

2.7.2.1 Deformação elástica dependente do tempo

Sabe-se da análise matemática que $\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$, no entanto para tensão de pequena intensidade, pode-se usar a seguinte aproximação.

$$\sinh x \approx x \quad (2.16)$$

Substituindo a equação (2.16), para pequenos valores de tensão, a taxa de deformação é proporcional à tensão aplicada, sendo neste caso o comportamento do material linear, viscoso e elástico, uma vez que existe uma força de recuperação correspondente ao elemento mola representado na Figura 2.8 (a), sendo que a equação (2.16) representa o elemento amortecedor desse mesmo modelo. Para tensões de maior intensidade, o comportamento do material deixa de ser linear mas não perde a sua viscoelasticidade. De acordo com o que foi explanado até este ponto, assumir que o comportamento de um polímero a pequenas temperaturas num longo período de tempo é semelhante a estar a altas temperaturas num pequeno período de tempo parece aceitável. De facto, é possível encontrar os fatores de conversão que permitem extrapolar o módulo de fluência ou o módulo de relaxação de uma temperatura para outra diferente (Rösler, et al., 2007). Por exemplo, se for considerado o módulo de fluência, isto é, o módulo de Young dependente do tempo a tensão constante e assumindo que este foi medido a uma temperatura T_1 num tempo de carregamento t_1 . De acordo com o proposto acima, o módulo de fluência para uma temperatura T_2 deve ter o mesmo valor do primeiro se se alterar o tempo de carregamento para t_2 . Como o comportamento viscoelástico é dominado pelos processos de relaxação cuja energia de ativação tem um valor Q , o valor de t_2 pode ser facilmente calculado através de uma expressão semelhante à equação (2.15), considerando uma tensão constante :

$$\dot{\varepsilon} = A \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \quad (2.17)$$

Para que o valor das extensões seja idêntico a diferentes temperaturas, o produto entre o tempo de carregamento e a taxa de deformação deve ser constante.

$$t_1 \dot{\varepsilon}_1 = t_2 \dot{\varepsilon}_2 \Rightarrow \frac{t_1}{t_2} = \frac{\exp\left(-\frac{Q}{kT_2}\right)}{\exp\left(-\frac{Q}{kT_1}\right)} = \exp\left[-\frac{Q}{k}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right] \quad (2.18)$$

Se a energia de ativação Q for conhecida, esta equação pode ser usada para calcular diretamente o valor do tempo de carregamento t_2 , de outro modo é necessário fazer um caso experimental adicional à temperatura T_2 para determinar a energia de ativação. Em todos estes cálculos, assume-se que as propriedades viscoelásticas são determinadas por uma única energia de ativação. No entanto, é necessário ter em atenção que na realidade isto não é totalmente correto e que a equação (2.18) pode ser usada como um cálculo aproximado, desde que se tenha em conta os processos de relaxação. A equação (2.18) não pode ser usada para temperaturas baixas onde não ocorrem os processos de relaxação nem para temperaturas altas onde outros processos adicionais são ativados.

Perto da temperatura de transição vítrea e para temperaturas mais elevadas, esta conversão entre a temperatura e o tempo não é válida e passa a usar-se outro fator de conversão (equação (2.19)).

$$\frac{t_1}{t_2} = \exp\frac{\ln 10 \cdot C_1(T_2 - T_1)}{C_2 + (T_2 - T_1)} \quad (2.19)$$

Onde C_1 e C_2 são constantes cujos valores são aproximadamente sempre os mesmos para todos os polímeros amorfos. Se $T_1 = T_g$, então $C_1 = 17,5 K$ e $C_2 = 52 K$, e esta equação denomina-se por Equação Williams-Landel-Ferry, ou equação WLF (Rösler, et al., 2007).

2.7.2.2 Deformação plástica dependente do tempo

Dentro da gama de temperaturas que, tecnicamente, são relevantes, todos os polímeros deformam por fluência. Para descrever o fenómeno de deformação plástica dependente do tempo vai-se usar novamente a equação (2.15) para descrever o comportamento do elemento amortecedor como os que estão indicados na Figura 2.8. Ao contrário do que acontece na deformação viscoelástica, não existe nenhuma força de recuperação neste tipo de deformação.

Para tensões elevadas, pode-se aproximar o termo $2 \times \sinh x \approx \exp x$ e alterar na equação (2.15).

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon} &= \epsilon_0 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \exp\left(\frac{\sigma Ad^*}{kT}\right) \\ \Leftrightarrow \frac{\sigma}{T} &= \frac{k}{Ad^*} \left(\frac{Q}{kT} + \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0}\right)\end{aligned}\tag{2.20}$$

A relação entre o quociente entre a tensão σ e a temperatura e o logaritmo da taxa de deformação, denomina-se de relação de Eyring, e é representado na Figura 2.11 para o policarbonato.

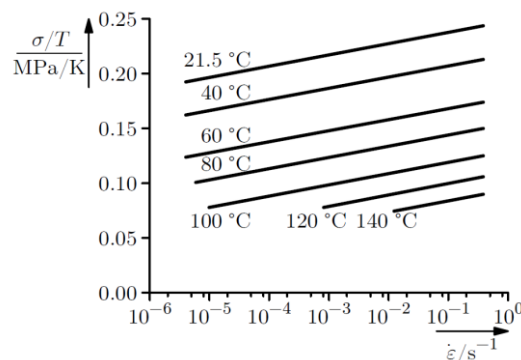


Figura 2.11 - Relação de Eyring para o Policarbonato (Rösler, et al., 2007)

2.8 Modelos viscoelásticos e viscoplásticos

Neste subcapítulo vão ser apresentados alguns dos modelos disponíveis na literatura, usados para caracterizar os comportamentos viscoelástico e viscoplástico.

2.8.1 Modelos viscoelásticos

As relações viscoelásticas podem ser expressas na forma integral ou diferencial. A forma integral é muito útil quando se pretende uma análise mais teórica enquanto a forma diferencial está relacionada com os modelos reológicos que interpretam este comportamento do ponto de vista da física. Os modelos viscoelásticos mais usados são o modelo de Maxwell e o modelo de Kelvin-Voigt, que embora já abordados anteriormente vão ser novamente apresentados.

2.8.1.1 Modelo de Maxwell

O modelo de Maxwell é, tal como todos os modelos viscoelásticos, constituído por uma mola e um amortecedor em série, como é ilustrado na Figura 2.12. Quando uma tensão σ é aplicada no sistema, é aplicada em todos os elementos com igual intensidade, ou seja, $\sigma = \sigma_{mola} = \sigma_{amortecedor}$, enquanto a extensão, ϵ , é a soma das extensões da mola e do amortecedor, $\epsilon = \epsilon_{mola} + \epsilon_{amortecedor}$.

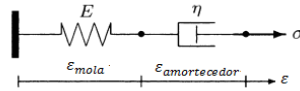


Figura 2.12 - Modelo de Maxwell. Adaptado de (Ozkaya, et al., 2012)

O modelo de Maxwell pode ser representado por uma equação (equação (2.21)):

$$\frac{d\varepsilon_{total}}{dt} = \frac{d\varepsilon_{mola}}{dt} + \frac{d\varepsilon_{amortecedor}}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} + \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} \quad (2.21)$$

O que este modelo descreve é que quando se sujeita o material a uma extensão constante, as tensões vão diminuindo de forma gradual, processo de relaxação, prevendo, também, o decaimento exponencial da tensão com o tempo. Uma limitação deste modelo é o facto de não conseguir avaliar a fluência de forma precisa. Ao usar este modelo, prevê-se um aumento linear da extensão ao longo do tempo quando aplicada uma tensão constante, no entanto na maioria dos casos a taxa de deformação diminui ao longo do tempo (Roylance, 2001).

2.8.1.2 Modelo de Kelvin-Voigt

Como pode ser observado na Figura 2.8 (c), este modelo é constituído por uma mola e um amortecedor em paralelo e é usado para explicar o processo de fluência que ocorre neste tipo de materiais. O modelo de Kelvin-Voigt é expresso pela seguinte equação:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.22)$$

Tal como acontece com o modelo de Maxwell, também este modelo tem as suas limitações. Quando se pretende estudar a relaxação do material este modelo é muito menos preciso que o anterior apesar de ser muito exato na modelação da fluência.

O modelo de Kelvin-Voigt diz que, para uma carga constante, o material deforma a uma taxa decrescente até se aproximar do estado de extensão estacionária. Ao deixar de aplicar a carga o material vai relaxar de forma gradual até atingir o estado não-deformado (Roylance, 2001).

2.8.2 Modelos viscoplásticos

A literatura propõe diversos modelos que representam os efeitos da extensão, taxa de deformação e temperatura nas características dos polímeros, no entanto apenas vão ser apresentados os mais usados, tais como o modelo de Johnson-Cook, o modelo de Preston-Tonks-Wallace e o modelo usado neste trabalho, o Modelo Silva.

2.8.2.1 Modelo de Johnson-Cook

O modelo constitutivo de Johnson-Cook foi apresentado em 1983 e é um modelo fenomenológico, isto é, não é baseado na teoria da plasticidade tradicional, que reproduz várias respostas em casos de impacto e perfuração de metais. O modelo constitutivo de Johnson-Cook apenas combina três desses parâmetros, o encruamento, os efeitos da velocidade de deformação e o amaciamento (Schwer, 2007).

$$\sigma_y = [A + B(\varepsilon_{eff}^p)^N] [1 + C \ln(\dot{\varepsilon})] [1 - (T_H)^M] \quad (2.23)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{eff}^p}{\varepsilon_0} \quad (2.24)$$

$$T_H = \frac{T - T_R}{T_M - T_R} \quad (2.25)$$

Onde ε_{eff}^p representa a extensão plástica efetiva, T_H representa a temperatura de referência, T_M representa a temperatura de fusão do material em estudo, ε_0 representa a velocidade de deformação e T_R representa o valor de temperatura usada para determinar as constantes A, B e N .

O primeiro termo diz respeito à tensão em função da extensão ε_0 para uma temperatura $T = T_R$, o segundo termo representa os efeitos da velocidade de deformação e o terceiro termo representa os efeitos da temperatura. Embora este modelo seja muito utilizado para análises de dano de metais, não é muito utilizado quando o material a usar é um polímero, pois segundo este modelo, a tensão de cedência apenas pode aumentar segundo uma equação linear o que não é verdade para materiais como os polímeros que apresentam uma dependência bi-linear sobre a velocidade de deformação.

2.8.2.2 Modelo de Zerilli-Armstrong

O modelo de Zerilli-Armstrong foi apresentado em 1987 e combina os efeitos da extensão, da velocidade de deformação e temperatura como os que decorrem da estrutura cristalina dos materiais. O modelo exhibe equações diferentes para as diferentes estruturas, para materiais com estrutura cubica de face centrada (FCC) e cubica de corpo centrado (BCC) tem-se as seguintes equações, equação (2.26) e (2.27), respetivamente.

$$\sigma = C_0 + C_2 \varepsilon^{-1/2} \exp(-C_3 T + C_4 T \ln \dot{\varepsilon}) \quad (2.26)$$

$$\sigma = C_0 + C_1 \exp(-C_3 T + C_4 T \ln \dot{\varepsilon}) + C_5 \varepsilon^n \quad (2.27)$$

Onde T representa a temperatura, C_1 a C_5 e n são constantes e C_0 é uma variável que tem em conta aspetos relacionados com a densidade das deslocações.

Na equação (2.26) considera-se que o amaciamento térmico e o endurecimento dependentes da tensão de escoamento são maiores com o aumento do encruamento. Na equação (2.27), o fator de encruamento é desacoplado do endurecimento e do amaciamento.

Tal como acontece em todos os modelos, também este tem as suas lacunas. No caso da estrutura FCC, a constante C_0 é independente da velocidade de deformação e da temperatura e a tensão de cedência é constante apesar das alterações na velocidade de deformação e/ou na temperatura, o que não corresponde ao que acontece na realidade, onde a tensão de cedência varia com estes parâmetros. Para a estrutura BCC, o fator de encruamento $C_5 \varepsilon^n$ é independente dos termos do endurecimento e do amaciamento, o que faz com que este modelo seja incapaz de mostrar as mudanças de endurecimento com as variações da velocidade de deformação e temperatura (Huh, et al., 2014)

2.8.2.3 Modelo de Preston-Tonks-Wallace

O modelo de Preston-Tonks-Wallace é uma tentativa de proporcionar um modelo para tensões de escoamento com velocidades de deformação acima de $10^{11} s^{-1}$ e temperaturas próximas do ponto de fusão do material.

$$\text{(regime térmico)} \quad \sigma_y = 2 \left[\tau_s + \alpha \ln \left(1 - \varphi \exp \left(-\beta - \frac{\theta \varepsilon_p}{\alpha \varphi} \right) \right) \right] \mu(p, T) \quad (2.28)$$

$$\text{(regime de choque)} \quad \sigma_y = 2\tau_s \mu(p, T) \quad (2.29)$$

$$\alpha = \frac{s_0 - \tau_s}{d}; \quad \beta = \frac{\tau_s - \tau_y}{\alpha}; \quad \varphi = \exp(\beta) - 1 \quad (2.30)$$

Neste modelo, τ_s representa a tensão de endurecimento saturada normalizada, s_0 representa o valor de τ_0 para a temperatura de $0 K$, τ_y representa a tensão de cedência normalizada, θ é a constante de endurecimento usada na lei de Voce e d é um parâmetro adimensional do material que modifica a lei de Voce.

Para este modelo, a tensão de saturação e a tensão de cedência são dadas pelas seguintes relações:

$$\tau_s = \max \left[s_0 - (s_0 - s_\infty) \operatorname{erf} \left[k \hat{T} \ln \left(\frac{\gamma \dot{\xi}}{\varepsilon_p} \right) \right], s_0 \left(\frac{\varepsilon_p}{\gamma \dot{\xi}} \right)^{(s_1)} \right] \quad (2.31)$$

$$\tau_y = \max \left[y_0 - (y_0 - y_\infty) \operatorname{erf} \left[k \hat{T} \ln \left(\frac{\gamma \dot{\xi}}{\varepsilon_p} \right) \right], \min \left[y_1 \left(\frac{\varepsilon_p}{\gamma \dot{\xi}} \right)^{(y_2)}, s_0 \left(\frac{\varepsilon_p}{\gamma \dot{\xi}} \right)^{(s_1)} \right] \right] \quad (2.32)$$

Onde s_∞ representa o valor de τ_s para temperaturas próximas da temperatura de fusão, (y_0, y_∞) representam os valores de τ_y à temperatura de $0 K$ e a uma temperatura próxima da temperatura de fusão, respetivamente, (k, γ) são constantes do material, $\hat{T} = \frac{T}{T_m}$, (s_0, y_1, y_2) representam parâmetros do material para regimes de altas velocidades de deformação e:

$$\dot{\xi} = \frac{1}{2} \left(\frac{4\pi\rho}{3M} \right)^{(1/3)} \left(\frac{\mu(p, T)}{\rho} \right)^{(1/2)} \quad (2.33)$$

Onde ρ representa a densidade do material e M a sua massa atômica (Huh, et al., 2014).

2.8.2.4 Modelo Silva

A falta de informação sobre a caracterização mecânica dos materiais para os níveis de extensão e velocidade de deformação aproximadas às dos processos de deformação plástica e corte é uma fonte de erro muito habitual nas simulações numéricas efetuadas com programas de elementos finitos (Silva, et al., 2012). Esses erros surgem devido ao uso de modelos empíricos que nem sempre reproduzem de forma real o comportamento dos materiais. De modo a corrigir este problema, foi desenvolvido no IST pelo professor Carlos Silva um modelo que consegue descrever uma série de comportamentos de materiais ao mesmo tempo que retrata alguns dos modelos tradicionais numa única equação empírica, que aqui se denomina por modelo Silva.

Este modelo combina o conceito multiplicativo que foi apresentado nos modelos anteriores, sendo que a dependência da tensão com a extensão e velocidade de deformação neste modelo é a seguinte:

$$\sigma = (A + e^{m\varepsilon}\varepsilon^n)(B + C \ln[D + \dot{\varepsilon}]) \quad (2.34)$$

Onde as constantes A, B, C, D, m e n dependem do material e devem ser determinadas por recurso a ensaios experimentais de caracterização mecânica.

O primeiro termo da expressão matemática representada na equação (2.34) está relacionada com a extensão e com o encruamento enquanto o segundo termo diz respeito à velocidade de deformação.

3 Desenvolvimento teórico

Os polímeros existem na sua forma natural desde que a vida começou no nosso planeta. São exemplos de polímeros naturais o ADN, o ARN, as proteínas, os polissacarídeos, as borrachas e a lã. Apesar de o Homem desde sempre “transformar” os polímeros naturais em roupas, armas, abrigos e ferramentas, foi no século XIX que foram feitas descobertas importantes sobre este tipo de material e que foi possível produzir polímeros sintéticos muito mais sofisticados do que os naturais.

Atualmente é cada vez mais usual a utilização de materiais poliméricos nas mais diversas aplicações, devido principalmente ao seu baixo custo e às suas boas propriedades mecânicas que fazem deles uma boa alternativa aos materiais metálicos e cerâmicos. Os polímeros são, também, muito apreciados devido à sua leveza, boa qualidade mecânica e plasticidade, nomeadamente por serem facilmente trabalhados e modelados. As propriedades mecânicas dos polímeros são caracterizadas pelo modo com que estes materiais respondem às solicitações mecânicas aplicadas, podendo estas últimas serem do tipo tensões ou deformações. A natureza dessa resposta depende da estrutura química, temperatura, tempo e das condições de processamento do polímero.

O objetivo desta dissertação consiste na caracterização mecânica da resina de impressão 3D V-Flash FTI-GN (ver ficha técnica do material no Anexo B). Através de *softwares* de simulação numérica, como o *Deform*®, é possível simular as deformações a pressão e temperatura como as de um disparo real, que um involucro de resina polimérica sofre ao longo da boca-de-fogo assim como as forças que nele são exercidas.

Em primeiro lugar será feita uma breve descrição deste *software* de elementos finitos, o *Deform*®, seguindo-se do desenvolvimento do modelo proposto. De seguida são apresentados uma serie de ensaios de compressão efetuados nesta ferramenta que ajudam a validar certos parâmetros como leis de comportamento de materiais, que explicam como o atrito influencia o desenvolvimento da força e que ajudam a perceber como os fenómenos de transferência de calor são considerados por esta ferramenta.

3.1. Software Deform®

O *Deform*® é um *software*, que utiliza os Métodos de Elementos Finitos (FEM), que permite simular e analisar vários processos de forjamento, tratamento térmico e corte por arranque de apara, entre outros. Ao simular processos de fabrico num computador, esta ferramenta permite a *designers* e engenheiros: reduzir a necessidade de ensaios experimentais e o redesenho de ferramentas e processos; melhorar o projeto das ferramentas e da matriz de modo a reduzir os custos de produção e de materiais; melhor controlo dos processos e uma melhor qualidade dos produtos gerados.

Ao contrário de outros códigos de FEM de uso geral, o *Deform*® é adaptado para a modelação de casos de deformação. A interface gráfica deste *software* permite a introdução de dados de modo rápido, fácil e intuitivo, de modo a que não seja necessária uma formação exaustiva de iniciação ao *Deform*®. Um componente chave deste *software* é o sistema de “remalhagem” totalmente automático, otimizado especificamente para problemas de grande deformação.

O *Deform*® divide-se em três partes distintas, o Pré-Processador, o Simulador e o Pós-Processador, cuja descrição pode ser consultada no Anexo C.

3.2. Desenvolvimento do modelo proposto

Numa primeira fase pretende-se simular uma operação básica de compressão a frio utilizando um provete cilíndrico com $7,5\text{mm}$ de diâmetro e 6mm de altura, como se pode observar na Figura 3.1 (a).

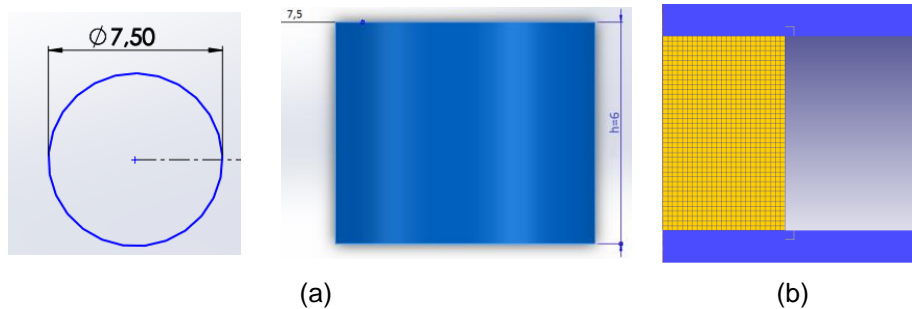


Figura 3.1 – (a) Provete cilíndrico usado; (c) malha utilizada

No pré-processador do *software*, existe uma opção muito simples de modelar um problema de forjamento, seguindo uma série de passos sucessivos dados pelo programa, que vão aparecendo no canto inferior direito da janela. Essa opção chama-se “*Forming*”. A geometria que se pretende é do tipo “*2D Axisymmetric*” e a operação é “*Cold Forming*”, pois pretende-se simular uma compressão a frio. O *software* separa a peça das matrizes e modela-se, numa primeira fase, tudo o que diz respeito à peça e só depois as matrizes. A geometria da peça que se propõe é um cilindro com raio de $3,75\text{mm}$ e altura de 6mm , como foi referido anteriormente e tal como está representado na Figura 3.1 (a), com uma malha com 2500 elementos, como se pode ver na Figura 3.1 (b). Quanto ao material da peça, ou se escolhe um disponível da biblioteca no *software* ou se cria um novo, sendo que caso se pretenda um que não conste na base de dados é necessário conhecer todas as propriedades do mesmo e colocá-las manualmente. Por último, colocou-se as condições de fronteira da peça que se considerem necessárias. De seguida modelou-se as matrizes, primeiro a superior e depois a inferior. Para a superior, começou-se por dar dimensões, para este estudo começou-se com matrizes com dimensões de 16mm de comprimento e 30mm de altura. Para a matriz superior é necessário colocar a condição de fronteira de movimento no eixo dos yy , com sentido negativo, de modo a existir compressão, com uma velocidade de 1mm/s , numa primeira análise. Para a matriz inferior, não é necessária nenhuma condição de fronteira. Para primeira aproximação, escolheu-se um valor de atrito zero, de modo a simplificar o primeiro estudo. Todos os parâmetros vão ser analisados e calibrados ao longo desta dissertação de modo a obter resultados fiáveis e coerentes. Por fim definiu-se o número de steps que se pretende obter e a condição de paragem do programa. Escolheu-se 300 steps para análise e o critério de paragem foi o deslocamento da matriz superior no valor de $4,5\text{mm}$, ou seja pretende-se analisar em 300 steps uma compressão de $4,5\text{mm}$. Todos os passos executados podem ser

consultados no Anexo D, onde é possível ver passo-a-passo todas as etapas do desenvolvimento deste modelo.

3.3. Programação e validação do modelo Silva para a liga de alumínio AA1050

De modo a validar quer a programação de sub-rotinas (ver Anexo E), quer a equação que relaciona a tensão com a extensão e a velocidade de deformação, foi efetuada uma simulação onde a lei do comportamento do material é a lei Silva. O que se pretende é simular no *software* Deform® um ensaio de compressão com um provete cujo material é a liga de alumínio AA1050 e comparar com os resultados teóricos obtidos através da utilização de uma máquina de compressão com came por atuação eletromagnética. A expressão genérica da lei de comportamento do material utilizada é a seguinte:

$$\sigma = [A + e^{m\epsilon}\epsilon^n] [B + C \ln(D + \dot{\epsilon})] \quad (\text{Eq.3.1})$$

Os valores obtidos para as constantes experimentais A, B, C, D, m, n do modelo tensão-extensão-velocidade de deformação proposto podem ser consultados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Valor das constantes experimentais do Modelo Silva para a liga de Alumínio AA1050.

		A	$B (10^2)$	C	$D (10^2)$	m	n
AA1050	Came Logística	0.22	1.34	12.5	0.008	-0.34	0.36

Implementou-se uma sub-rotina no Deform® com esta equação, e simulou-se um ensaio de compressão de um provete com 7mm de diâmetro e 6mm de altura. Considerou-se o provete completamente plástico. Foi utilizada uma malha de elementos quadrados com 2500 elementos, com uma proporção de tamanho ("size ratio") de 1 e 2624 nós. As matrizes são consideradas rígidas e com dimensões de 16 mm de comprimento e 30 mm de altura. Devido à simetria do provete apenas se considerou metade da geometria. Os resultados obtidos foram sobrepostos com os teóricos (Silva, et al., 2012) e podem ser consultados na Figura 3.2

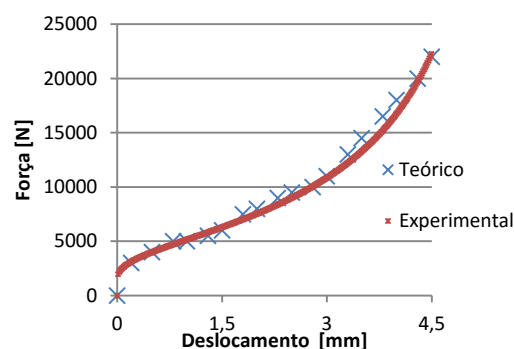


Figura 3.2 - Relação entre a força e o deslocamento teórico e experimental

Como se pode verificar, é possível validar quer todos os parâmetros da equação Silva como também toda a simulação efetuada, dando assim uma maior confiança nos resultados obtidos futuramente pelo programa, quando se simular para outro tipo de material ainda não estudado.

3.4. Influência do modelo de atrito no decaimento da força

O atrito assume um papel muito importante quando se fala em simulação de elementos finitos cujo objetivo é obter resultados muito próximos do que acontece na realidade em casos experimentais. O atrito, no caso concreto do forjamento, depende não só das características do material usado como também do acabamento superficial, temperatura, pressão de contato e da tensão normal ao longo da interface entre a peça e a ferramenta (Kim, et al.). Uma vez que no processo de forjamento, a interface entre a peça e a ferramenta se encontra a altas pressões e temperaturas torna-se complicado fazer um estudo detalhado de todos estes fatores e apurar que influência exercem no atrito.

De todas as leis de atrito propostas, existem duas que são mais usadas em programas de simulações de elementos finitos, a lei de atrito de Coulomb e a lei de atrito de corte. Ambas quantificam o atrito através de um coeficiente, o coeficiente de atrito μ . De acordo com a lei de atrito de Coulomb (eq.3.2), a força de atrito é proporcional à tensão normal N , enquanto na lei de atrito de corte a força de atrito é uma parcela da tensão de cedência ao corte do material, não refletindo nenhum efeito da tensão normal no valor da força de atrito. É claro que a força de atrito está relacionada com a tensão normal, e por isso a lei de Coulomb e as suas variantes são as que melhor descrevem o comportamento real do atrito. No entanto, a lei de atrito de Corte é muito usada em simulações numéricas devido à sua simplicidade (Joun, et al., 2009).

$$F_{atrito} = \mu \times N \quad (3.2)$$

No modelo apresentado foi usado sempre o atrito de Coulomb e, uma vez que à temperatura ambiente e em ensaios onde a distribuição da tensão normal na área de contacto é uniforme as duas leis dão resultados semelhantes, todas as simulações futuras vão ser executadas com atrito de Coulomb.

O modelo usado para este estudo é o modelo anteriormente descrito, com a diferença que foi imposta uma tensão constante de 1 MPa e foi dado um movimento ao punção do tipo “*path*” cujas entradas na tabela permitissem ao punção descer 4,5 mm em 0.001 segundos e depois tivesse um deslocamento muito lento até aos 10 segundos, como se pode observar na Figura 3.3, com um tempo por passo de 0,00001 segundos. O primeiro estudo, o qual serve de referência, assume-se atrito Coulomb igual a zero, e está representado na Figura 3.4.

Arbitrary Path = f(Time)			
Time	Stroke(x)	Stroke(y)	▲
1	0	0	0
2	0.001	0	-4.5
3	10	0	-4.52
4			
5			
6			
7			

Figura 3.3 - Valores que definem o trajeto do punção em função do tempo

Quando se aumenta o atrito para o valor pretendido, como por exemplo 0.2, verifica-se que, mantendo constantes todos os parâmetros definidos acima, os resultados não se mantêm regulares como os representados na Figura 3.4, sendo visíveis algumas descidas e subidas súbitas, sobretudo

no segundo 0.001, segundo onde o punção deixa de ter um movimento rápido e abranda bruscamente quase que parando, como se pode ver na Figura 3.5 (a).

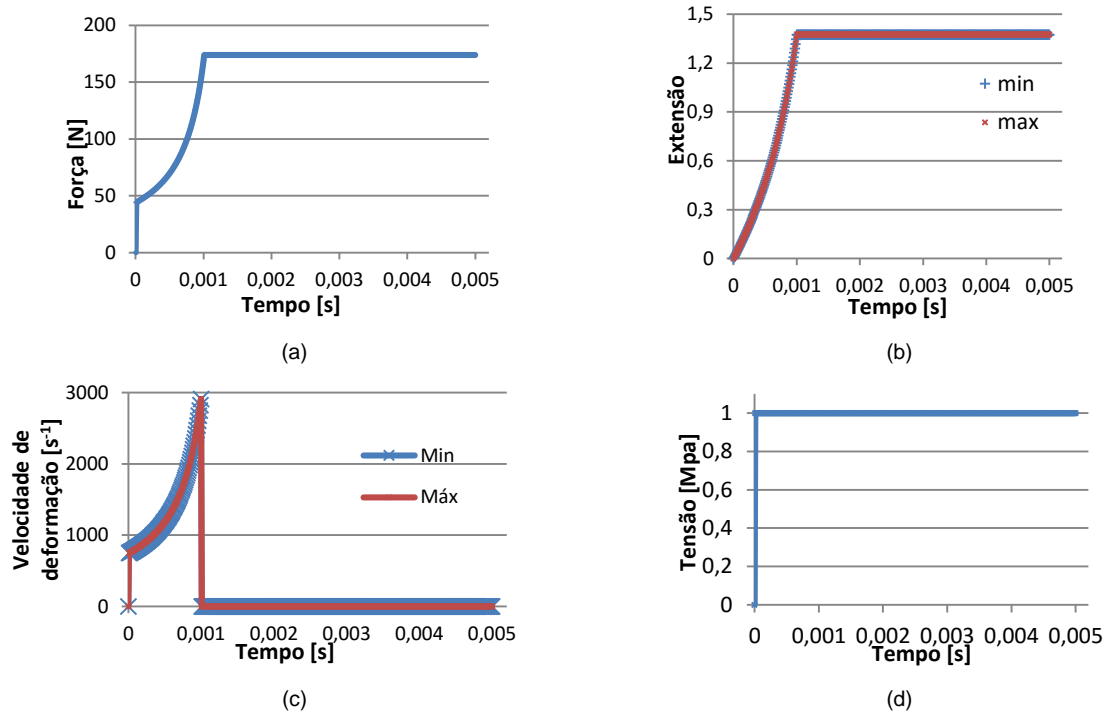
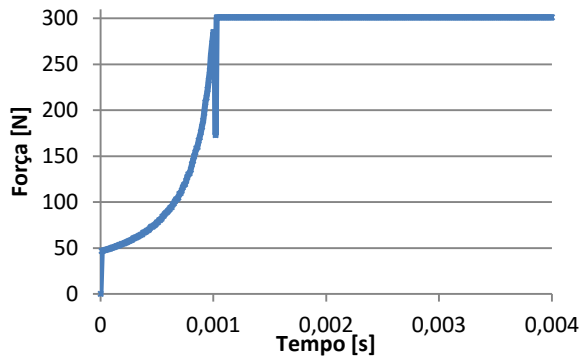


Figura 3.4 - Resultados para atrito zero: (a) - relação entre a força e o tempo; (b) - relação entre a extensão e o tempo; (c)- relação entre a velocidade de deformação e o tempo; (d)- relação entre a tensão e o tempo

De modo a suavizar estes picos de força são muitos os parâmetros que se podem alterar. Após um processo de tentativa-erro, verifica-se que quer alterando o tempo por step quer alterando o número de steps, nenhuma das opções é eficaz na resolução deste problema. Um parâmetro a ter cuidado é o limite de erro de convergência. Ao diminuir demasiado esses limites o programa não consegue correr a simulação e avisa que a solução não está a convergir dentro dos limites. Para que isso não ocorra, utilizou-se um limite de erro convergência de velocidade de 0.0001 e um limite de erro de convergência de força de 0.001. Através da observação do resultado obtido é possível retirar os instantes em que ocorrem os picos e a solução obtida de maneira a remove-los é ajustar os valores da tabela do deslocamento do punção em função do tempo, isto é, tornar a função o menos brusca possível, colocando mais pontos na tabela de maneira a suavizar o decréscimo da velocidade.



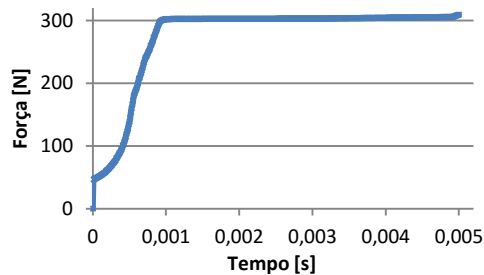
(a)

Arbitrary Path - f(Time)		
Time	Stroke(x)	Stroke(y)
1	0	0
2	0.00055	0
3	0.0007	-4.3
4	0.0009	-4.49
5	0.00095	-4.5
6	0.00096	-4.5005
7	0.00097	-4.5006
8	0.000979	-4.5008
9	0.00098	-4.5009
10	0.00099	-4.5011
11	0.001	-4.5012
12	0.00101	-4.5013
13	0.00104	-4.5014
14	0.0011	-4.5015
15	0.0013	-4.5019
16	0.0014	-4.502
17	0.002	-4.5025
18	0.003	-4.503
19	0.0049	-4.51
20	0.005	-4.52
21	0.00581	-4.501
22	10	0

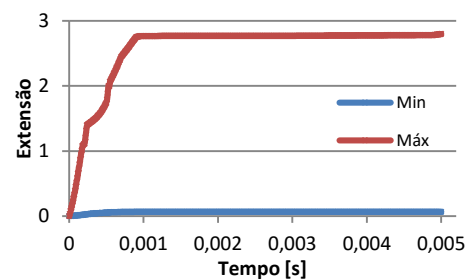
(b)

Figura 3.5 – (a)- Relação força - tempo para atrito de 0.2 mantendo todos os outros parâmetros constantes; (b) - Novo ajuste na tabela que relaciona o deslocamento do punção com o tempo para um atrito de 0.2

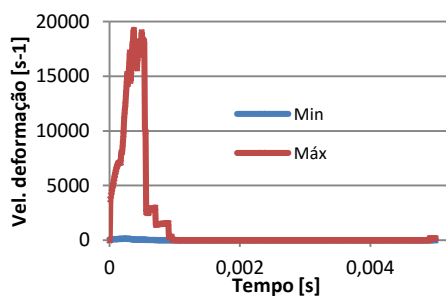
Através deste processo iterativo é possível retirar as irregularidades da força ao longo do tempo. É de salientar que diferentes valores de atrito necessitam de diferentes ajustes nos valores que se inserem na tabela. De seguida, na Figura 3.6, são apresentados os resultados para a força, extensão, velocidade de deformação e tensão para um atrito de 0.2 para um trajeto do punção como o apresentado na Figura 3.5 (b).



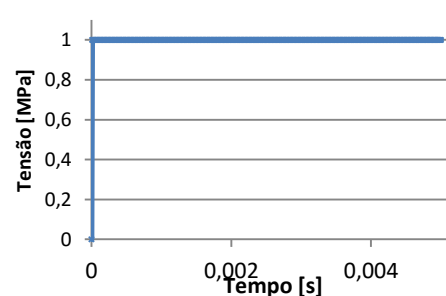
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.6 – Resultados obtidos para um valor de atrito de 0.2: (a) - relação força-tempo; (b) - relação extensão-tempo; (c) - relação velocidade de deformação-tempo; (d) - relação tensão-tempo

3.5. O fenómeno da transferência de calor

Existe transferência de calor sempre que há energia térmica em movimento devido a uma diferença de temperaturas no espaço (Incropera, et al., 2007), ou seja, sempre que existir uma diferença de temperaturas entre dois corpos ou entre um corpo e o meio haverá transferências de calor. Existem

três modos de transferência de calor, nomeadamente, condução, convecção e radiação (Figura 3.7). A condução ocorre quando existe um gradiente de temperatura num meio estacionário, que pode ser um sólido ou um fluido. A convecção é o modo de transferência de calor que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento quando a diferentes temperaturas. A radiação ocorre quando, na ausência de um meio interposto participante, duas superfícies com temperaturas diferentes emitem energia sob a forma de ondas eletromagnéticas.

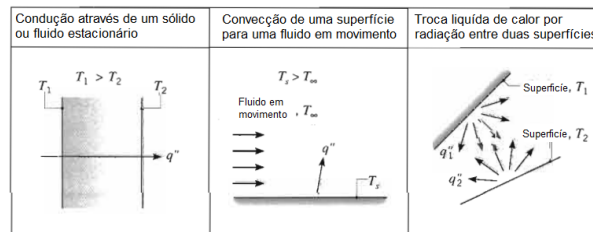


Figura 3.7 - Modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Adaptado de (Incropera, et al., 2007)

No âmbito desta dissertação, torna-se fundamental compreender os fenómenos de transferência de calor uma vez que o disparo de um projétil provoca, ao longo da boca-de-fogo, valores de pressão e temperatura elevados e que não podem ser desprezados. Torna-se por isso necessário fazer uma análise de transferência de calor à resina utilizada, a resina V-Flash™ FTI-GN, de modo a estimar o comportamento do material em termos de trocas de calor e se a resina é resistente o suficiente para suportar as pressões e temperaturas ao longo do óbus.

Na análise feita nesta dissertação, pode-se desprezar o modo de transferência de calor por radiação, uma vez que todos os ensaios são realizados num meio a temperatura ambiente e as trocas entre o meio são muito pequenas quando comparada com as restantes. Importa então compreender os fenómenos de condução e convecção de forma a obter resultados mais realistas. A condução pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas devido às interações entre elas. É a forma de transferência de calor entre dois corpos em contacto com diferentes temperaturas, do corpo mais quente para o mais frio. É possível quantificar os modos de transferência de calor através de uma equação, que pode ser usada para calcular a quantidade de energia transferida por unidade de tempo. Para a condução térmica, a equação é conhecida como lei de Fourier e, para uma parede plana unidimensional, como a da Figura 3.8, com uma distribuição de temperaturas $T(x)$, representada pela equação (3.3).

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (3.3)$$

O fluxo térmico, q_x'' , cujas unidades são W/m^2 , é a taxa de transferência de calor na direção x por unidade de área perpendicular à direção da transferência de calor e proporcional ao gradiente de temperaturas dT/dx nessa direção (Incropera, et al., 2007). O parâmetro k é uma propriedade de transporte conhecida como condutividade térmica e é uma característica do material, com unidades $W/m.K$. O sinal negativo é colocado devido ao facto de o calor ser transferido na direção da temperatura decrescente.

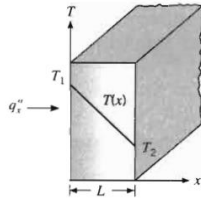


Figura 3.8 - Transferência de calor unidimensional por condução

Em condições de estado estacionário, a distribuição de temperaturas é linear e o gradiente de temperaturas pode ser representado como

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (3.4)$$

E o fluxo térmico pode ser expresso dos seguintes modos:

$$q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (3.5)$$

É de salientar que o fluxo térmico é a taxa de transferência de calor por unidade de área. Para calcular a transferência de calor por condução, q_x , em Watts, é necessário multiplicar o fluxo de calor pela área da parede plana.

$$q_x = q_x'' \times A \quad (3.6)$$

O modo de transferência de calor por convecção abrange dois mecanismos, ou seja, além da transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório também existe transferência de energia através do movimento global do fluido (Incropera, et al., 2007). A convecção ocorre quando uma superfície entra em contacto com um fluido em movimento, estando os dois a diferentes temperaturas. Ao considerar o escoamento de um fluido sobre uma superfície aquecida, a consequência dessa interação é o desenvolvimento de uma região no fluido através da qual a sua velocidade varia entre zero, no contacto com a superfície, ou seja em $y = 0$, e um valor finito u_∞ , associado ao escoamento do fluido. Esta região é denominada por camada limite hidrodinâmica ou de velocidade. Para além disto, caso as temperaturas da superfície e do fluido sejam diferentes, existirá uma região no fluido através da qual a temperatura variará de T_s em $y = 0$ até T_∞ , associada à região do escoamento afastada da superfície. Esta região denomina-se de camada limite térmica e pode ser menor, maior ou pode ter o mesmo tamanho da camada limite de velocidade (Figura 3.9).

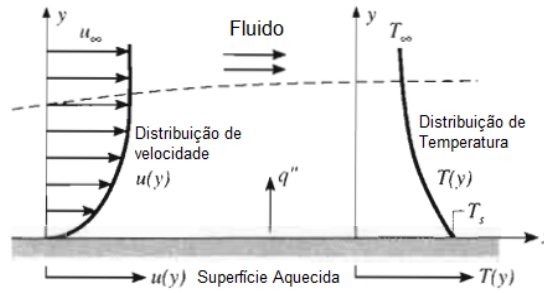


Figura 3.9 - Desenvolvimento da camada limite na transferência de calor por convecção. Adaptado de (Incropera, et al., 2007).

Em qualquer um dos casos, se $T_s > T_\infty$, existirá transferência de calor por convecção da superfície para o fluido, e esta pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido em convecção forçada ou convecção natural, como está representado na Figura 3.10. Diz-se que se está em convecção forçada quando o escoamento é causado por meios externos tais como ventiladores, bombas ou ventos atmosféricos, e diz-se que se está em convecção natural quando o escoamento do fluido é induzido por forças de flutuação, originadas a partir de diferenças de densidades (massas específicas) causadas por variações de temperatura no fluido (Incropera, et al., 2007).

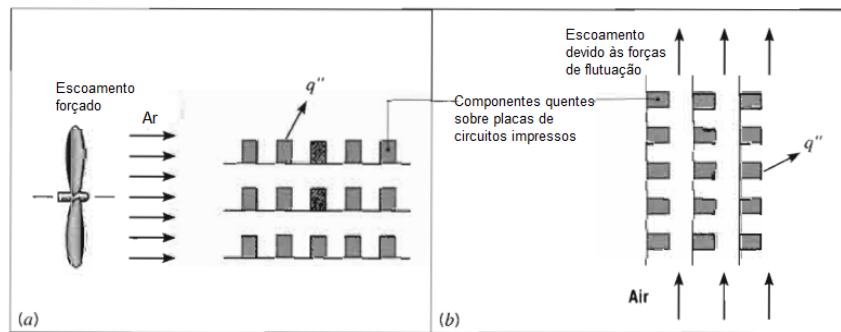


Figura 3.10 - Processos de transferência de calor por convecção: (a) convecção forçada; (b) convecção natural. Adaptado de (Incropera, et al., 2007).

Independentemente da natureza do processo de transferência de calor por convecção, a equação apropriada para a taxa de transferência é a seguinte.

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (3.7)$$

Onde q'' é o fluxo de calor por convecção, cuja unidade é W/m^2 , e é proporcional à diferença entre as temperaturas da superfície, T_s , e do fluido, T_∞ . Esta expressão é conhecida como sendo a lei de arrefecimento de Newton, e o parâmetro h é chamado de coeficiente de convecção, e tem como unidades $W/m^2.K$. Este coeficiente depende das condições da camada limite, que por sua vez dependem da natureza do escoamento do fluido, pela geometria da superfície e por uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido (Incropera, et al., 2007). Os valores típicos deste coeficiente podem ser consultados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Valores Típicos do Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção. Adaptado de (Incropera, et al., 2007)

Processos	h ($W/m^2 \cdot K$)
Convecção Natural	
Gases	2–25
Líquidos	50–1000
Convecção Forçada	
Gases	25–250
Líquidos	100–20,000
Convecção com mudanças de fase	
Ebulição ou condensação	2500–100,000

O software *Deform*® executa em todas as suas análises os cálculos referentes à transferência de calor, desde que seja ativado o modo “*heat transfer*” no menu “*Simulation Controls*” do Pré-processador. No entanto são precisos alguns cuidados, quer na definição das condições de fronteira quer nos valores que o programa admite para os coeficientes de condução, k , e de convecção, h . Todavia, é necessário referir que, por exemplo o coeficiente de transferência de calor por condução, k , varia com a temperatura, o que influencia toda a análise, como se pode verificar na Figura 3.11.

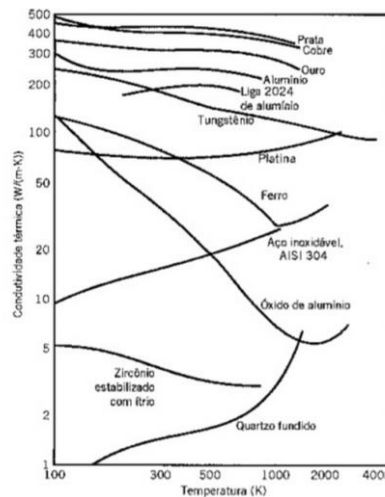


Figura 3.11- Dependência com a temperatura da condutividade térmica para alguns materiais. Adaptado de (Incropera, et al., 2007)

Para o modelo utilizado, que continua a ser o mesmo referido na secção anterior, é necessário admitir a condição de fronteira de trocas de calor com o meio ambiente tanto no provete como nas matrizes, como pode ser observado na Figura 3.12.

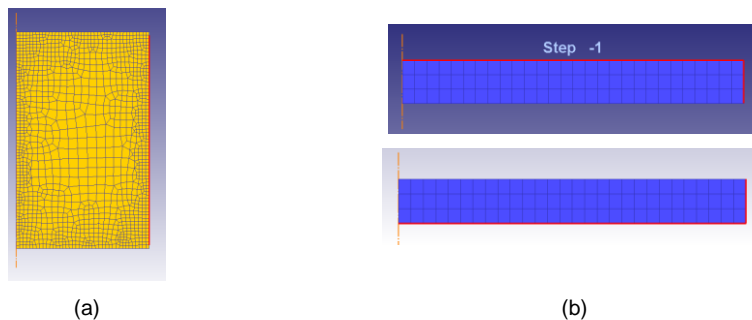


Figura 3.12 - Condições de fronteira de convecção com o ambiente: (a) no provete; (b) nas matrizes

Ao início pensou-se que era necessário colocar uma condição de fronteira de transferência de calor por condução na interface provete-matrizes, mas quando se escolhe os materiais para o provete e para as matrizes o programa já tem em base de dados os coeficientes de condução para cada um deles e admite que existe condução entre eles ao longo do ensaio, pelo que se concluiu que as primeiras simulações efetuadas estavam erradas. Do ponto de vista da transferência de calor, a condição de fronteira que existe na interface provete-matriz é a condição de temperatura constante, ou seja, a temperatura que se verifica na zona de contacto do provete tem de ser a mesma que se verifica na matriz nessa mesma zona. Uma forma relativamente simples de verificar se os resultados obtidos pelas simulações estão próximos da realidade é fazer os cálculos analiticamente e obter uma aproximação da diferença da temperatura média que se deve ter entre o início e o fim do ensaio de compressão. De seguida irão ser feitos esses cálculos admitindo que se está a trabalhar com um provete de alumínio cujo coeficiente de transferência de calor por condução é de $k = 180.195 \text{ N/s.K}$, valor e unidades dados pelo programa para a liga de Alumínio 2024. Após correr a simulação vai-se ao pós-processador e tira-se o valor máximo da força que o punção exerce sobre o provete ao longo do ensaio de forma a tirar a energia do processo. Pretende-se uma compressão de $4,5 \text{ mm}$, o que dá um comprimento final $(y_2 - y_1)$ de $1,5 \text{ mm}$.

$$\begin{aligned}
 \Delta W &= \int_{y_2}^{y_1} F_y(y) dy = F \times (y_2 - y_1) \sim \\
 &\sim 54 \times 10^3 \text{ N} \times (1,5 \times 10^{-3} \text{ m}) \sim 81 \text{ J}
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

Como o processo de compressão é um processo muito rápido, é considerado adiabático. Para continuar os restantes cálculos é necessário ir buscar os seguintes dados para a liga de alumínio 2024, dados pelo programa, e expressos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Propriedades Liga Alumínio 2024

Capacidade térmica mássica, c_p	900 J/Kg.K
Massa, m	$\sim 7 \times 10^{-4} \text{ Kg}$
Densidade, ρ	$2,7 \text{ kg/m}^3$

Um cálculo simples onde é possível retirar a diferença de temperaturas durante o ensaio é o representado na equação (3.9).

$$c_p \times m \times \Delta T = Q = \Delta W \tag{3.9}$$

Substituindo tem-se:

$$\Delta T = \frac{\Delta W}{c_p \times m} = \frac{81}{900 \times 7 \times 10^{-4}} = 128,57 \text{ K} = 144,65^\circ\text{C} \tag{3.10}$$

É de salientar que nos cálculos não estão previstos os efeitos do atrito, pelo que se espera que a diferença de temperatura média ao longo do ensaio seja superior ao calculado. Os resultados obtidos pelas simulações dão um máximo de diferença de temperatura média de 159°C (diferença entre a média da temperatura máxima e temperatura mínima e a temperatura no início do ensaio), como se pode verificar na Figura 3.13, o que é um valor próximo do teórico.

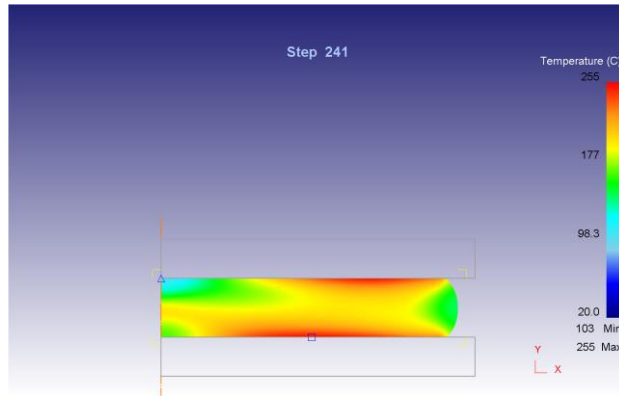


Figura 3.13 – Simulação de temperatura no provete considerando trocas de calor

É de salientar que há mais fatores que não foram considerados nos cálculos efetuados e que o programa deve contabilizar nos seus cálculos, tal como a resistência térmica de contacto. A resistência térmica de contacto deve-se principalmente aos efeitos das rugosidades das superfícies, que faz com que os pontos de contacto entre as duas superfícies sejam intercalados com interstícios que são, na grande maioria, preenchidos com ar. Isto faz com que a transferência de calor seja devida à condução através da área de contacto real e à condução e/ou radiação através dos interstícios, como está representado na Figura 3.14.

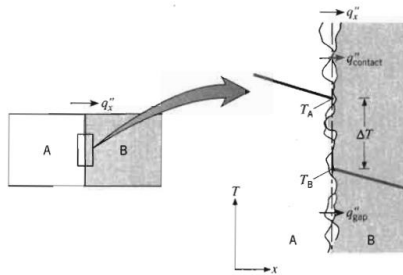


Figura 3.14 - Efeito da resistência térmica de contacto (Incropera, et al., 2007)

A resistência térmica de contato pode ser calculada através da equação (3.11) e pode ser vista como duas resistências em paralelo, a resistência devido à área de contacto e a resistência devido aos interstícios.

$$R''_{t,c} = \frac{T_A - T_B}{q_x''} \quad (3.11)$$

Existem alguns estudos que estimam o valor da resistência de contacto sob determinadas condições e podem ser consultados nas tabelas 3.4 e 3.5.

Tabela 3.4- Resistência térmica de contacto para (a) interfaces metálicas sob condições de vácuo e (b) interface de alumínio com diferentes fluidos interfaciais. Adaptado de (Incropera, et al., 2007)

Resistência Térmica, $R''_{tc} \times 10^4$ (m ² ·K/W)				
Vácuo na Interface			Fluido Interfacial	
Pressão de contato	100 kN/m ²	10.000kN/m ²	Ar	2,75
Aço inoxidável	6–25	0,7–4,0	Hélio	1,05
Cobre	1–10	0,1–0,5	Hidrogênio	0,720
Magnésio	1,5–3,5	0,2–4,0	Óleo de silicone	0,525
Alumínio	1,5–5,0	0,2–4,0	Glicerina	0,265

(a)

(b)

Tabela 3.5 - Resistência de contacto em interface sólido/sólido. Adaptado de (Incropera, et al., 2007)

Interface	$R''_{tc} \times 10^4$ (m ² ·K/W)
Chip de silício/alumínio esmerilhado com ar (27–500 kN/m ²)	0,3–0,6
Alumínio/alumínio com preenchimento de folha de índio (~100 kN/m ²)	~0,07
Aço inoxidável/aço inoxidável com preenchimento de folha de índio (~3500 kN/m ²)	~0,04
Alumínio/alumínio com revestimento metálico (Pb)	0,01–0,1
Alumínio/alumínio com graxa Dow Corning 340 (~100 kN/m ²)	~0,07
Aço inoxidável/aço inoxidável com graxa Dow Corning 340 (~100 kN/m ²)	~0,04
Chip de silício/alumínio com 0,02 mm de epóxi	0,2–0,9
Latão/latão com 15 µm de solda de estanho	0,025–0,14

Por todas estas razões torna-se necessário realizar um caso de estudo experimental para medir as diferenças de temperaturas ao longo de um ensaio de compressão de forma a conseguir fazer uma calibração dentro do *software* de maneira a conseguir equilibrar todos os efeitos produzidos quer pelo atrito quer pela resistência térmica de contacto cujas contribuições não vêm contabilizadas nos cálculos analíticos.

3.6. Validação dos parâmetros para uma análise de temperatura

Quando se pretende fazer uma análise da temperatura gerada no provete devido à sua deformação a altas velocidades têm-se de alterar alguns dos parâmetros do *software*. Todas as alterações devem ser feitas no pré-processador “*DEFORM 2D/3D PRE*”, de modo a não perder nenhum dado ou informação. Em termos de modelação do problema, não é necessário alterar nada, as dimensões do provete e das matrizes assim como todas as suas propriedades em termos de material e malha são as mesmas. O único aspeto a ter em atenção diz respeito à lei do material. No caso em estudo esta preocupação não se aplica uma vez que estamos a trabalhar com uma equação e essa equação abrange todo o domínio de temperaturas, extensão e velocidade de deformação. Mas quando se está a trabalhar com alguma das funções disponíveis no programa é necessário verificar se essas funções estão válidas para todos esses domínios (temperatura, extensão e velocidade de deformação). Por exemplo, neste caso de estudo foi utilizada a liga de alumínio 2024, cuja gama de temperaturas vai desde os 20 graus aos 500 graus, a velocidade de compressão do ensaio será de 5000 mm/seg e a lei que se irá utilizar é

$$\sigma = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) \quad (3.12)$$

Quando se edita esta lei, verifica-se que a mesma está definida segundo uma tabela. É necessário verificar se esses valores estão dentro dos domínios. Para este ensaio o domínio disponível não é suficiente. É preciso adicionar às tabelas o valor de 500 graus para a temperatura, $5000s^{-1}$ para a velocidade de deformação e o valor de 5 na extensão de modo a garantir que a lei do material esteja definida para um domínio suficientemente alargado. Após isso, copiou-se os valores da tabela que antecedem os novos colocados de modo a manter os valores constantes e diferentes de zero como inicialmente estavam.

O passo seguinte é alterar a análise a fazer pelo programa. No painel “*Simulation Controls*”, no submenu “*Main*”, colocar ativa a opção “*Heat Transfer*” e no submenu “*Advanced*” no separador “*Output Control*” colocar ativas as opções “*Plastic*”, “*Transformation Plasticity*”, “*Thermal Volumetric*” e “*Transformation Volumetric*” (Figura 3.15).

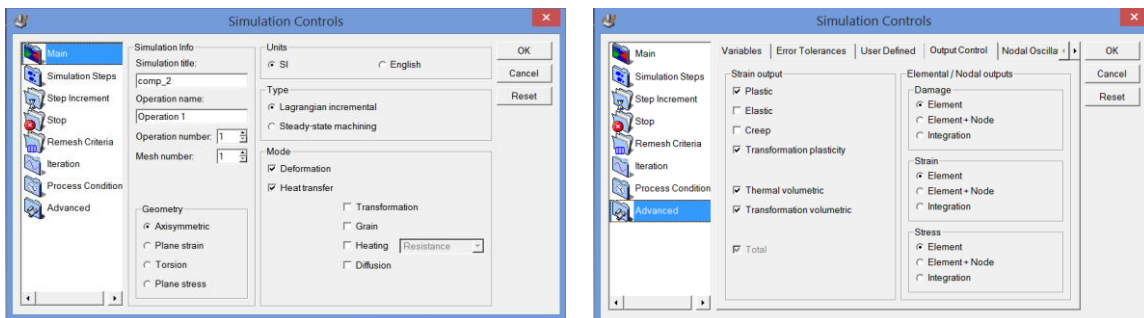


Figura 3.15- Opções a ativar no menu "Simulation Controls"

Numa primeira fase foi simulado para um deslocamento do punção de 4,5 mm sem atrito entre o provete e as matrizes. O resultado obtido foi uma temperatura máxima de 200°C como está representado na Figura 3.16.

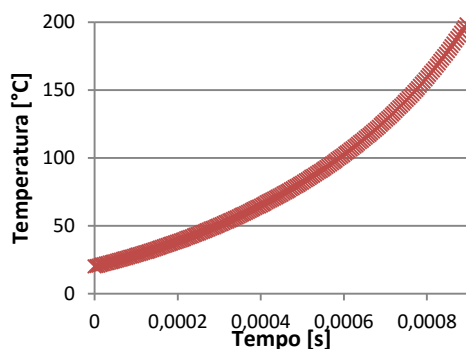


Figura 3.16 – Evolução da temperatura ao longo do ensaio (sem atrito entre as superfícies)

É de referir que os valores da temperatura ao longo do ensaio são muito elevados, mas tal deve-se ao facto de não haver transmissão de calor entre as superfícies, ou seja, não existirem trocas de calor entre o provete e as matrizes. A temperatura é uniforme em todo o provete uma vez que não foram criadas condições de fronteira, ou seja, não se definiu nem contacto nem atrito entre o provete e as matrizes.

A próxima simulação foi efetuada tendo em conta que existe contacto e atrito entre o provete e as matrizes. Numa situação de teste, foi aplicado o mesmo valor de atrito entre o provete e o punção e

entre o provete e a matriz inferior, cujo valor será 0.2. Todas as outras condições se mantêm inalteradas.

A solução obtida neste ensaio foi uma temperatura máxima de 453°C (Figura 3.17). Mais uma vez, é de referir que não existem trocas de calor entre o provete e as matrizes, daí as temperaturas tão elevadas.

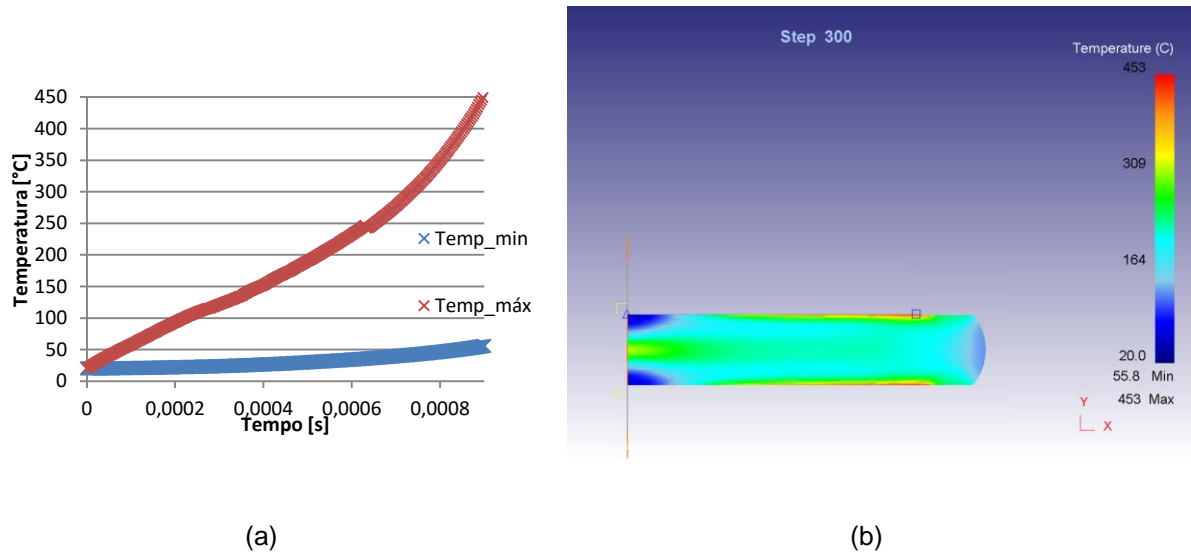


Figura 3.17 –(a) Evolução temperaturas mínimas e máximas (com atrito de 0.2 entre o provete e as matrizes); (b) distribuição de temperatura para uma compressão de 4,5 mm e atrito igual a 0.2 entre o provete e as matrizes

Considerou-se agora a existência um coeficiente de transferência de calor no valor de 1000 N/s/mm/°C entre o provete e cada uma das matrizes mantendo constantes todos os outros parâmetros analisados anteriormente. O modo mais correto e fidedigno de colocar um coeficiente de transferência de calor entre duas superfícies em contacto é através do comando “*Inter-object*”. Neste submenu é possível verificar todas as relações de contacto entre as superfícies e defini-las.

O resultado obtido apresenta um decréscimo da temperatura máxima e mínima do provete ao longo do ensaio de compressão, como era esperado.

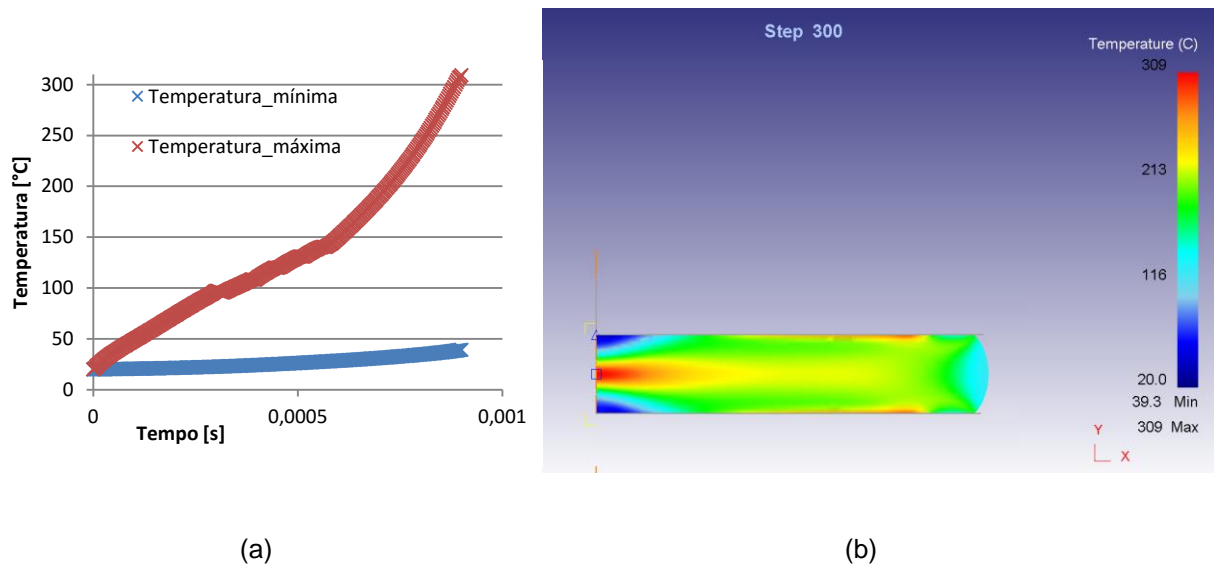


Figura 3.18 – (a) Evolução da temperatura máxima e mínima do provete ao longo do ensaio de compressão (compressão de 4,5 mm); (b) ilustração das temperaturas que o provete atinge numa compressão de 4,5 mm com um coeficiente de transmissão de calor de 1000 N/seg/mm/°C

3.7. Verificação das unidades de alguns parâmetros do Deform® usando um problema de transmissão de calor

Como todos os programas de simulação numérica, podem ser usadas quaisquer unidades que sejam mais confortáveis para o utilizador desde que todas as variáveis sejam consistentes. No entanto, por omissão, o *software* vem programado quer para unidades do Sistema Internacional (SI) quer para unidades do Sistema Inglês. O utilizador define no início de cada simulação qual o sistema de unidades que quer utilizar. Na Figura 3.19 é possível consultar as unidades dos dois Sistemas utilizadas pelo *software*.

Variables	SI	Eng	Conversion Factor (SI -> Eng)
Area	mm^2	in^2	0.001550003
Angular velocity /Rotational speed (Omega)	rpm	rad/sec	0.104719755
Body force/ Weight Density (rho*g)	ton/(mm^2 Sec^2)	(klbf / in^3)	1422.328268
Centrifugal force (rho*Omega^2)	ton/(mm^3 Sec^2)	klbf/in^4	36127.138
Convection coefficient	N/sec/mm^2C	Btu/sec/in^2/F	0.000339789
Current Density	(Ampere/m^2)	(Ampere/in^2)	0.00064516
Diffusion coefficient	mm^2/second	in^2/second	0.001550003
Distance / Length	mm	in	0.039370079
Electric field intensity	V/mm	V/in	25.4
Electrical resistivity	ohm-mm	ohm-in	0.039370079
Force	N	Klbf	0.000224809
Heat Capacity	N/mm^2/C	Btu/in^3/F	0.008628872
Heat Energy	M-mm	BTU	9.47867E-07
Heat flux rate	N/mm^2/sec	BTU/in^2/sec	1635.3
Mass	Kg	lb	2.2046
Mass Density (rho)	ton/mm^3	(klbf * Sec^2) / in^4 (or) klb/in^3	36127.138
Mechanical Energy	N-mm	klbf-in	8.84956E-06
Pressure/Stress / Youngs modulus	Mpa	KSI	0.145037681
Relative Density	N-s^2/mm^4	klb-s^2/in^4	1
Strain	mm/mm	in/in	1
strain rate	(mm/mm)/sec	(in/in)/sec	1
Temperature	C	F	[(deg C *1. 8)+32]
Thermal conductivity	N/sec/C	Btu/sec/in/F	1.33754E-05
Thermal expansion coefficient	1/C	1/F	0.555556
Time	sec	sec	1
Torque	N-mm	klb-in	8.85075E-06
Universal Gas Constant R	J/(mol*K)	J/(mol*F)	0.555556
Velocity	mm/sec	in/sec	0.039370079
Volume	mm^3	in^3	6.1024E-05

Figura 3.19- Sistema de unidades do Deform®

Como pode ser observado, as unidades usadas no SI são unidades pouco usuais, diferentes das que são usadas nos cálculos analíticos. A falta de cuidado e atenção pode levar a erros uma vez que os valores que se colocam no *software* devem ser tratados de maneira a ter unidades compatíveis. Uma forma simples de demonstrar a importância deste cuidado é através de uma comparação entre os resultados fornecidos pelo *software* e os obtidos através de cálculos analíticos. Para isso será feito um estudo ao nível da transmissão de calor, onde se sujeita uma esfera que se encontra a 20°C a um ambiente cuja temperatura é de 200°C. O material da esfera é a liga de Alumínio 2024 cujas propriedades podem ser consultadas na Tabela 3.6. Com este estudo pretende-se verificar quanto tempo demora a esfera a aquecer até aos 100°C, através da simulação e de cálculos analíticos e comparar os dois. Outro parâmetro importante é o coeficiente de convecção, h . Da literatura retira-se que para o caso típico de convecção natural ao ar (Incropera, et al., 2007) tem-se um $h = 20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$, enquanto o *software* Deform® assume um valor de $h = 0.02 \text{ N/s} \cdot \text{mm} \cdot \text{°C}$.

Tabela 3.6 - Propriedades da liga de alumínio 2024, à esquerda retiradas da literatura (Incropera, et al., 2007); à direita retiradas do software Deform®

$k = 177 \text{ W/m} \cdot \text{K}$	$k = 180,195 \text{ N/s} \cdot \text{°C}$
$\rho = 2770 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 2,78 \times 10^{-9} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{mm}^4$
$c_p = 875 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$	$c_p = 2,43328 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{°C}$

À primeira vista, conclui-se que os valores usados são muito próximos à exceção do valor da capacidade térmica mássica, c_p , cujos valores são muito diferentes. O primeiro passo é transformar as unidades utilizadas pelo Deform® nas unidades utilizadas na literatura.

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2 \quad (3.13)$$

$$1 J = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2 \quad (3.14)$$

$$1 W = 1 J / \text{s} \quad (3.15)$$

As equações (3.13), (3.14) e (3.15) são muito importantes e devem estar bem presentes ao longo de todo este estudo.

De seguida serão feitas as alterações nas unidades dos parâmetros acima referidos.

$$\begin{aligned} k: \quad & 177 \text{ N/s} \cdot ^\circ\text{C} = 177 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C} \\ & = 177 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{m} \cdot \text{s}^3 \cdot ^\circ\text{C} = 177 \text{ J/s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C} \\ & = 177 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \rho: \quad & 2,78 \times 10^{-9} \text{ N} \cdot \text{s}^2 / \text{mm}^4 = 2,78 \times 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2 / \text{mm}^4 \cdot \text{s}^2 \\ & = \frac{2,78 \times 10^{-9}}{10^{-12}} \text{ kg} \cdot \text{m/m}^4 = 2,78 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} h: \quad & 0,02 \text{ N/s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C} = 0,02 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C} \\ & = \frac{0,02}{10^{-3}} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} = 20 \text{ J/s} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \\ & = 20 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} c_p: \quad & 2,43328 \text{ N/mm}^2 \cdot ^\circ\text{C} = \frac{2,43328 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \cdot \text{mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{2780 \times 10^{-9} \text{ kg/mm}^3 \times 1000} \\ & = 875,28 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (3.19)$$

A esfera que se pretende analisar tem 5mm de diâmetro e tem como condição de fronteira troca de calor com o meio ambiente por convecção (Figura 3.20), pelo que se utilizou uma malha com 3000 elementos. Pretende-se obter 1000 steps e um tempo por step de 0.1 s/step sendo que o critério de paragem da simulação é atingir um tempo de simulação de 80 segundos, que em princípio é tempo mais do que suficiente para se atingir a temperatura de 100°C.

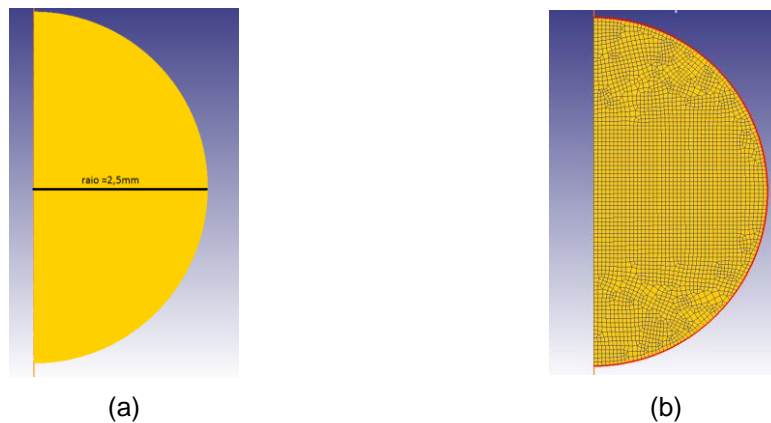


Figura 3.20 - (a) Esfera utilizada na simulação; (b) condição de fronteira de troca de calor com o meio ambiente

Analicamente, este é um problema de aquecimento e o tempo, t , que é preciso decorrer até uma esfera, com uma temperatura T_i , que se encontra num meio com uma temperatura T_∞ atingir uma certa temperatura T pode ser calculado através da equação (3.20).

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{\rho \left(\frac{\pi D^3}{6} \right) c_p}{h(\pi D^2)} \ln \left(\frac{T_i - T_\infty}{T - T_\infty} \right) \\
 &= \frac{\rho D c_p}{6h} \ln \left(\frac{T_i - T_\infty}{T - T_\infty} \right)
 \end{aligned}
 \tag{3.20}$$

Utilizando os valores fornecidos pelo *software* nas unidades corrigidas, para a esfera aquecer até aos 100°C são precisos aproximadamente 60 segundos (equação (3.21)).

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{2780 \times 0.005 \times 875,28}{6 \times 20} \ln \left(\frac{20 - 200}{100 - 200} \right) \\
 &= 59,59 \text{ segundos}
 \end{aligned}
 \tag{3.21}$$

Os resultados obtidos pelo *software* são apresentados num gráfico Temperatura-tempo de modo a conseguir-se observar a evolução da temperatura ao longo do tempo (Figura 3.21).

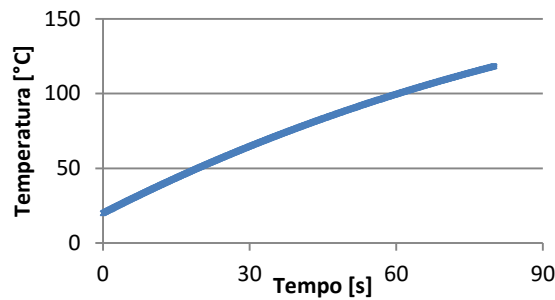


Figura 3.21 - Relação temperatura vs tempo obtidos pelo Deform®

Como é facilmente observável, o tempo necessário até a esfera chegar aos 100°C é de 60 segundos aproximadamente, tal como foi obtido analiticamente. Com este estudo conclui-se que com as respetivas alterações de variáveis os dados fornecidos pelo *software* são confiáveis assim como os cálculos que o programa executa internamente ao longo das simulações.

4 Desenvolvimento experimental

Para caracterizar um material em condições dinâmicas é importante que sejam desenvolvidas metodologias experimentais que permitam caracterizar o material ao mesmo tempo que permite ao utilizador ter o controlo quer da velocidade de deformação do provete quer do deslocamento sofrido pelo mesmo.

Este capítulo apresenta de forma resumida o desenvolvimento experimental necessário para a caracterização do polímero em estudo, uma breve descrição do equipamento utilizado assim como todas as calibrações que foi necessário fazer e descreve, ainda, forma também resumida, toda a preparação dos provetes produzidos.

O objetivo desta tese é realizar testes de compressão e de relaxação em provetes produzidos através do processo de prototipagem rápida utilizando uma impressora 3D acima já mencionada. Para ambos os testes foi aplicado o mesmo deslocamento da ferramenta e foram realizados dois tipos de ensaios, ensaios quasi-estáticos e ensaios dinâmicos.

4.1. Fabrico dos provetes com tecnologia de impressão 3D

Para iniciar o estudo da caracterização mecânica de um material, a primeira coisa a fazer é escolher o material e fabricar os provetes que se pretendem estudar. Para esta dissertação, o material que será usado é uma resina de impressão 3D, utilizada na impressora 3D disponibilizada pelo Núcleo de Oficinas (NOF) do IST, a Impressora 3D Flash FTI 230 Desktop Modelar.

Numa primeira fase foram testadas algumas funcionalidades da máquina tais como, expor o filme plástico com e sem resina e testar o elevador que transporta a placa para cima e para baixo de modo a serem depositadas as camadas de resina. Todos os testes foram feitos com sucesso à exceção da subida e descida do elevador, no entanto não existe nenhuma avaria com a impressora uma vez que quando é para imprimir o elevador executa todos os movimentos necessários à correta impressão do objeto pretendido. Esta impressora aceita desenhos com extensão .STL, compatível com o *software* de desenho SolidWorks®, pelo que o desenho dos provetes foi feito nesta ferramenta. Foram desenhados numa primeira fase 20 provetes cilíndricos com dimensões de 7,5 mm de altura e 7,5 mm de diâmetro. Nesta primeira tentativa foram agrupados 15 provetes dispostos na vertical todos em linha e 5 provetes dispostos na horizontal também em linha. O *software* da impressora criou 157 *layers*, cada *layer* é uma camada de resina, que corresponde a 1 ciclo da máquina, sendo que as 157 *layers* correspondem a 1 hora e 37 minutos de impressão. As placas de impressão a serem usadas têm de ser novas e não devem estar expostas à luz solar, de modo a não se danificarem. Quando foi atingida a *layer* 57 foi feita uma pausa na impressão e verificou-se o estado da mesma. Reparou-se que esta disposição dos provetes não é a mais indicada dado que muitos dos provetes caíram durante a impressão ou não chegaram a ser impressos. Por essa questão decidiu-se alterar a disposição dos provetes para a que está indicada na Figura 4.1 (a).

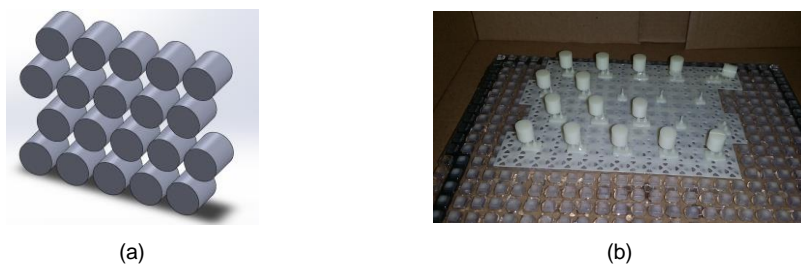


Figura 4.1 – (a) Desenho em *SolidWorks*® dos provetes a serem impressos; (b) provetes impressos

No final da impressão verificou-se que faltavam alguns provetes que foram ou não impressos ou que por gravidade acabaram por cair, como se pode observar na Figura 4.1 (b). No final ficou-se com 15 provetes para testar mais tarde.

De seguida procedeu-se à lavagem dos provetes durante 10 minutos, 5 minutos num reservatório com a solução *Clean-A-Part* e 5 minutos em água. Por último foi feita a cura do material durante 20 minutos.

4.2. Preparação do material

Como foi descrito no capítulo anterior, foram desenhados no *software* *SolidWorks*® 15 provetes, todos com 7,5mm de comprimento e diâmetro. Os mesmos foram produzidos por impressão 3D, tal como já foi explicado mais detalhadamente no tópico anterior. No entanto os pratos compressores usados quer nos ensaios quasi-estáticos quer nos ensaios dinâmicos vão ser os mesmos e não permitem provetes com uma altura como as dos provetes impressos. Como tal e usando um torno, reduziu-se a altura dos provetes de 7,5 mm para 6 mm, mantendo-se inalteradas as dimensões dos diâmetros dos mesmos, como se pode verificar na Tabela 4.1. É de referir que os primeiros 3 provetes foram intencionalmente torneados de modo a terem alturas mais reduzidas e de forma a garantir uma menor deformação do provete pois sendo um material muito frágil pensa-se que se o provete for menos comprimido não haverá fratura do mesmo. Como não se consegue controlar o deslocamento do punção, ou seja o deslocamento é fixo, reduziu-se o tamanho dos provetes. Os primeiros 5 provetes serão utilizados nos ensaios quasi-estáticos enquanto que os 5 últimos serão utilizados nos ensaios dinâmicos. Os restantes 5 provetes impressos foram utilizados em ensaios experimentais e de calibração, não sendo contabilizados como provetes de ensaio.

Tabela 4.1 - 10 provetes de ensaio numerados com respetivas dimensões

Número Provete	Altura [mm]	Diâmetro [mm]	Número Provete	Altura [mm]	Diâmetro [mm]
1	2,82	7,42	6	5,85	7,16
2	2,78	7,26	7	6,2	7,4
3	3,42	7,38	8	6,05	7,27
4	6,1	7,05	9	6,1	7,35
5	6,02	7,29	10	5,61	7,25

4.3. Montagem experimental

Tanto para os ensaios quasi-estáticos como para os ensaios dinâmicos, foi usada uma ferramenta projetada por Vasco Ezequiel e fabricada no IST denominada por ferramenta de compressão (Ezequiel, 2010). Para os ensaios quasi-estáticos esta ferramenta foi montada numa prensa hidráulica, para os ensaios dinâmicos a ferramenta de compressão foi montada num outro equipamento, que também foi desenvolvido no IST em parceria com a Academia Militar (AM), denominado por barra de Hopkinson, como se pode ver na Figura 4.2. O equipamento responsável por fornecer toda a força necessária para efetuar os testes numa velocidade consideravelmente alta definida pelo utilizador é o atuador eletromagnético (Figura 4.2 (c)).

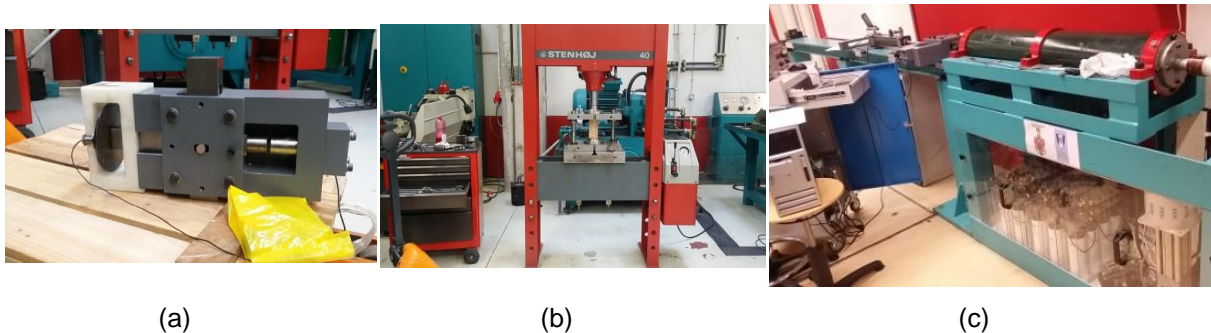


Figura 4.2- Configuração experimental usada: (a) ferramenta de compressão; (b) prensa hidráulica utilizada para os ensaios quasi-estáticos; (c) atuador eletromagnético, parte constituinte da barra de Hopkinson

Nos próximos subcapítulos serão referidas em detalhe todas as partes constituintes da barra de Hopkinson, onde está instalado o atuador eletromagnético, de modo a compreender melhor todas as suas especificidades e todo o seu funcionamento.

4.3.1. Elementos estruturais

Os elementos estruturais servem de suporte aos diversos sistemas que integram esta bancada de ensaios. Os elementos estruturais encontram-se pintados a azul, como se pode verificar na Figura 4.2 (c). O objetivo principal destas estruturas é garantir a estabilidade de todo o equipamento durante os ensaios bem como é onde se monta a ferramenta de compressão e o atuador eletromagnético.

4.3.2. Atuador eletromagnético

O conceito base do atuador eletromagnético consiste na incorporação de vários núcleos ferromagnéticos fazendo corresponder uma bobine a cada núcleo, permitindo assim um somatório de forças originárias de cada um dos conjuntos bobine-núcleo, sendo o disparo efetuado em simultâneo (Pinto, 2009). As bobines são elementos essenciais na propulsão eletromagnética e são compostas por um enrolamento de fio de cobre em espiral com $4mm$ de diâmetro sendo que a espiral se prolonga por um comprimento de $90mm$. O diâmetro interno de cada bobine é de $68mm$ e o diâmetro exterior de $160mm$ (Pinto, 2009).

4.3.3. Banco de potência

O Banco de potência é um conjunto de cinco circuitos RLC, cada um com quatro condensadores de 450 V e 6000 μF em paralelo ligados a cada bobine. Os condensadores estão ligados a um transformador de 2000 V (Figura 4.3 (a)), estando este por sua vez ligado a um transformador variável que permite regular a tensão da rede, definindo assim o valor de carga dos condensadores. É importante referir que os condensadores são carregados com um valor de tensão proporcional à velocidade que se pretende para a ativação da barra de impacto. Uma vez carregados, os circuitos de carregamento devem ser desligados, através do interruptor existente, e deve-se ligar o interruptor de disparo. Os procedimentos de carregamento e disparo podem ser consultados no Anexo F.

Para descarregar foi desenvolvido um programa no *software* Labview® que permite enviar pulsos de onda quadrada que ativam a descarrega, que se pode visualizar na Figura 4.3 (b).

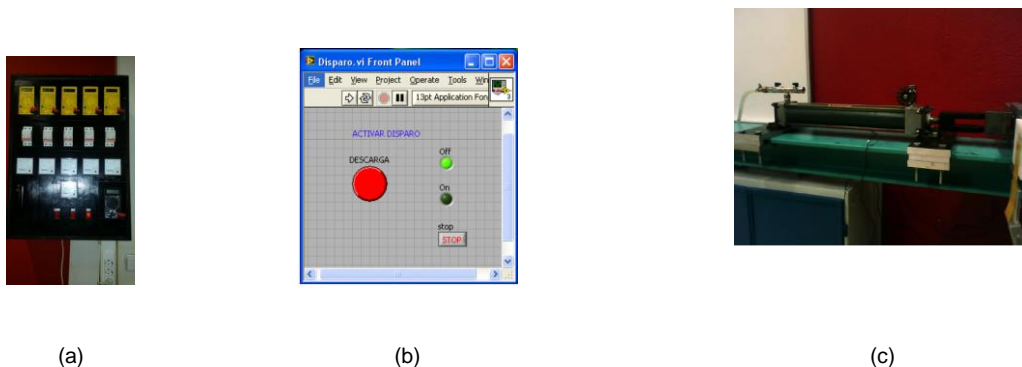


Figura 4.3 – (a) Transformador a que estão ligados os condensadores; (b) programa desenvolvido em Labview® responsável pelo disparo (c) amortecedor pneumático

4.3.4. Amortecedor pneumático

Este sistema permite dissipar energia cinética remanescente do disparo tornando o sistema mais estável com menos vibrações. O amortecedor pneumático coloca-se após a ferramenta de compressão, como se pode visualizar na Figura 4.3 (c).

4.4. Sistema de aquisição de dados

Existem diversos métodos para a aquisição de dados na barra de Hopkinson, nesta dissertação foram utilizados dois, designadamente, o método convencional usando uma célula de carga, ou transdutor de carga, baseada na tecnologia de extensometria e um sensor de deslocamento.

4.4.1. Célula de carga e sensor deslocamento

A célula de carga utilizada foi uma célula comercial com capacidade de carga de 50 kN da HBM do tipo C9B. Esta célula de carga tem uma sensibilidade de 1 mV/V e uma classe de precisão de 0.5, o que lhe permite medir forças compressivas estáticas e dinâmicas. Como o sinal que sai da célula de carga tem um valor muito baixo, o sistema de aquisição de dados (SAD) não consegue ler esse valor com precisão. Para resolver essa situação usou-se um amplificador de sinal de modo a amplificar o

sinal mil vezes, transformando milivolts em volts. Assim, o valor da tensão de saída deve ser multiplicado por 10000, a fim de se obter a força no provete.

$$F[N] = 10000 \times F [V] \quad (4.1)$$



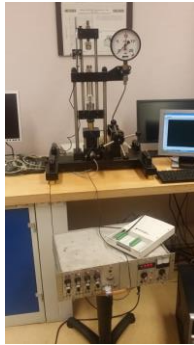
Figura 4.4 - (a) Célula de carga utilizada; (b) sensor deslocamento

O sensor deslocamento é composto por uma sonda com um cabo uniaxial, que liga a sonda ao sensor, e por um transformador. O seu funcionamento consiste na leitura das correntes de Eddy que a sonda produz e que chegam até ao alvo (ver Figura 4.4 (b)). De forma mais detalhada, este sensor funciona da seguinte forma: a sonda é fixa e gera um campo magnético enquanto o alvo consiste numa placa de um material magnético que é acoplado na ferramenta de compressão. Quando se inicia a compressão, o alvo move-se para longe da sonda, o que interfere com o campo magnético gerado pela sonda, fazendo com que exista um sinal de tensão de saída proporcional à distância entre a sonda e o alvo, que é interpretado pelo sensor para a medição do deslocamento que ocorreu. Todos estes dados são adquiridos através de uma placa de aquisição de dados, a placa DAQ NI-PCI-6070E (M10-16E-1) de 16 entradas analógicas a 1,25 MS/s com resolução de 12 bits e escala de entrada de ± 10 V, ligada a um computador e processados por um programa criado no *software* LabView®, onde os dados são compilados num ficheiro .txt para serem analisados posteriormente. Os dados são adquiridos em 100k HZ durante 2 segundos de modo a registar com precisão os ensaios de compressão realizados.

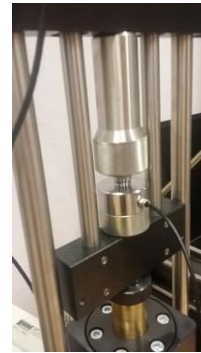
Esta parte do setup experimental requer muitos cuidados, entre os quais: não danificar nenhum dos cabos do transdutor de carga e do sensor deslocamento, sendo que quando se transporta estas duas ferramentas os cabos devem ser protegidos; ambos os sensores precisam de ser calibrados devido ao uso anterior dos mesmos; a caixa que protege a célula de carga necessita de ser refeita, uma vez que a célula de carga deve mover-se livremente dentro da mesma e se verificou que no final de cada ensaio a célula de carga fica presa deve-se desapertar toda a caixa de modo a desprender a mesma.

4.4.2. Calibração da célula de carga

Antes de iniciar os ensaios experimentais na prensa hidráulica, os ensaios quasi-estáticos, foram efetuados testes à célula de carga de forma a certificar que todos os resultados retirados dos ensaios são válidos e que não há nenhum problema com este dispositivo. Levou-se a célula de carga juntamente com o amplificador até uma outra prensa hidráulica, onde é possível o utilizador controlar a força exercida pela mesma, como se pode ver na Figura 4.5. O teste consistiu em aplicar uma força conhecida na célula hidráulica e confirmar que a célula de carga devolve o mesmo valor de carga.



(a)



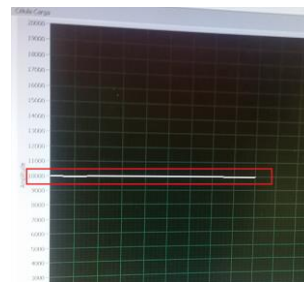
(b)

Figura 4.5 - (a) Instalação para calibração da célula de carga; (b) pormenor que ilustra a montagem da célula de carga na prensa hidráulica

Começou-se por aplicar 10 kN na célula de carga e verificou-se que a força exercida pela prensa para a célula de carga devolver esse valor era mais baixo, na ordem dos $7,5\text{ kN}$, como se pode verificar na Figura 4.6.



(a)



(b)

Figura 4.6 - Valores medidos (a) na prensa; (b) na célula de carga

Conclui-se que existe uma avaria na célula de carga devido a uma sobrecarga e que a mesma precisa de ser substituída por uma nova. Como tal não é factível dentro do prazo estabelecido para a entrega da presente dissertação, serão tirados vários valores reais e os respetivos valores medidos pela célula de carga e vai tirar-se um fator de calibração, de forma a ter valores mais próximos dos reais e que possam ser usados neste estudo. Os valores retirados quer da prensa quer da célula de carga podem ser consultados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Valores medidos na prensa e os medidos na célula de carga, respetivamente

Valores medidos na prensa [N]	Valores medidos pela célula de carga [N]
1000	1170
2000	2520
3000	3900
5000	6660
7000	9500
10000	13800
15000	20750

Ao colocar estes dados num gráfico foi possível retirar o fator de calibração a aplicar em todos os valores da força que forem dados pela célula de carga ao longo de todo este estudo. Este fator de calibração está expresso na equação (4.2) e o respetivo gráfico pode ser consultado na Figura 4.7.

$$F(\text{corrigida})[N] = \frac{1}{1,3662} \times F[N] \quad (4.2)$$

Também se verificou anomalias no suporte da célula de carga. Quando a célula de carga é sujeita a uma carga esta devia conseguir movimentar-se livremente dentro do suporte e verificou-se que após esforço a célula de carga fica presa no suporte o que influenciava negativamente as medições. Para este mau dimensionamento do suporte foi pedido ao NOF que alargasse o diâmetro do suporte de modo a permitir a livre movimentação da célula de carga e que se corrigissem possíveis raios de curvatura na mesma.

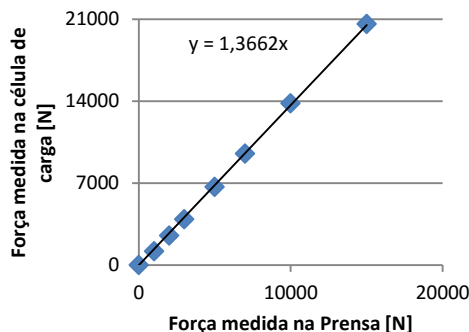


Figura 4.7- Relação entre os valores medidos na prensa (reais) e os medidos na célula de carga

4.5. Plano experimental

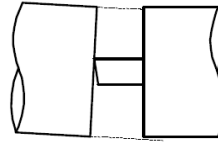
Como foi mencionado no início deste capítulo, os ensaios serão divididos em duas partes, uma parte estática e outra dinâmica.

De modo a conseguir obter as propriedades quasi-estáticas do material e a respetiva curva de engenharia, vai-se montar a ferramenta de compressão numa prensa hidráulica, representada na Figura 4.8 (a), na vertical de modo ao punção da prensa atuar na ferramenta. Para este ensaio deve-se ter em atenção a velocidade do punção, que deve ser relativamente baixa e sempre constante ao longo de todos os ensaios. Também se deve garantir que se retiram todas as folgas entre os pratos

compressores e os provetes de modo a garantir um alinhamento perfeito entre os três e que todos os parafusos estão bem apertados.



(a)



(b)

Figura 4.8 – (a) Ferramenta utilizada para os ensaios quasi-estáticos; (b) modelo do ajuste entre os pratos de compressão e o provete que garante o alinhamento dos mesmos

Para os ensaios dinâmicos foi utilizada a mesma ferramenta de compressão, desta vez acoplada na barra de Hopkinson. Como a maneira mais fácil e prática de controlar a energia armazenada nos condensadores do banco de potência é através da sua voltagem, serão realizados ensaios a 200V. Escolheu-se este valor de tensão, uma vez que o mínimo de valor de voltagem necessário para existir movimento do atuador eletromagnético é de 100 V e o máximo valor de voltagem permitido pelos condensadores para estes manterem as boas condições de trabalho é de 400V, sendo que os 200V é o valor que se encontra a meio dos dois limites.

5 Resultados e discussão

O presente capítulo é dividido em 3 partes, a primeira parte expõe o tratamento inicial dos dados obtidos assim como a verificação das ferramentas e dos resultados antes de realizar os ensaios propriamente ditos; a segunda parte refere-se aos resultados obtidos nos ensaios quasi-estáticos enquanto a terceira parte trata dos resultados obtidos nos ensaios dinâmicos.

Os ficheiros de dados foram obtidos com um período de amostragem de 1/200 segundos, o que resultou num ficheiro com 40000 linhas de dados com valores de tempo, força e deslocamento.

5.1. Resultados experimentais

Excluindo os ensaios efetuados durante todos os processos de manutenção e calibração dos equipamentos usados de modo a garantir o bom funcionamento de todos eles e garantir a maior exatidão e confiança nos resultados obtidos (ensaios estes realizados com provetes da liga de alumínio AA1050 de modo a conservar os 15 provetes poliméricos existentes para este trabalho), ensaiaram-se 10 provetes, 5 para ensaios quasi-estáticos e 5 para ensaios dinâmicos. Uma vez que os pratos compressores têm um deslocamento fixo, ou seja, para qualquer tipo de ensaio de compressão realizado os provetes terminam o ensaio com um comprimento final de aproximadamente 1,8mm, inicialmente pensou-se que se se diminuísse o comprimento dos provetes de modo a que estes sofressem um deslocamento menor estes acabariam um ensaio sem que ocorresse a fratura do material (provetes 1, 2 e 3 da Tabela 5.1). Dada a elevada porosidade do material e a sua não homogeneidade, mesmo os provetes de menor dimensão fraturaram não se conseguindo por isso obter nenhuma amostra final dos provetes em nenhum dos ensaios realizados, como se pode verificar na Tabela 5.1.

Tabela 5.1- Resultados finais dos dois tipos de ensaios de compressão

Proвете	Quasi-Estáticos					Dinâmicos [200V]				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Comprimento Inicial [mm]	2,82	2,78	3,42	6,1	6,02	5,85	6,2	6,05	6,1	5,61
Diâmetro Inicial [mm]	7,42	7,26	7,38	7,05	7,29	7,16	7,4	7,27	7,35	7,25
Estado Final do Proвете	Fratura	Fratura	Fratura	Fratura	Fratura	Fratura	Fratura	Fratura	Fratura	Fratura

Como foi referido anteriormente, foram realizados ensaios de teste com provetes da liga de alumínio AA1050 de modo a validar os resultados obtidos e calibrar as células de carga e as ferramentas, tanto para os ensaios quasi-estáticos como para os ensaios dinâmicos. Os provetes usados nestes ensaios de calibração não foram contabilizados nesta dissertação, porém serão mostrados dois resultados, um de um ensaio estático e outro de um dinâmico, que demonstram os últimos resultados obtidos antes de realizar os ensaios desta dissertação depois de todos os ajustes e calibrações.

Os provetes usados podem ser consultados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Provete de alumínio AA1050 usados nos ensaios de teste

	Quasi-Estático	Dinâmico [120V]
Provete	01	02
Comprimento inicial [mm]	5,93	5,51
Diâmetro inicial [mm]	6,18	5,62
Comprimento Final [mm]	1,79	1,84

Os resultados obtidos são os representados na Figura 5.1.

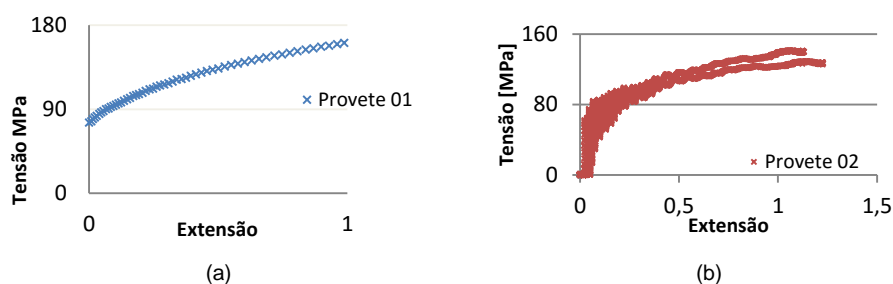


Figura 5.1 - Resultados dos ensaios de teste: (a) ensaio quasi-estático ; (b) ensaio dinâmico a 120 V

Como se pode observar na Figura 5.1, enquanto nos ensaios estáticos (Figura 5.1 (a)) a qualidade do sinal obtido é boa, o que permite ter um resultado aceitável, para os ensaios dinâmicos isto não se verifica. O sinal obtido pela célula de carga e pelo sensor deslocamento é de pouca qualidade e necessita ser tratado de modo a possibilitar a obtenção de um resultado aceitável e confiável. Após uma análise mais pormenorizada dos resultados obtidos, observa-se que os dados referentes à força não apresentam problemas mas os dados referentes ao deslocamento apresentam pequenas oscilações de amplitude ao longo de todo o ensaio, as quais influenciam os resultados finais, como se observa na Figura 5.1 (b). Este problema ocorre devido a um comportamento interno do sensor deslocamento e foi resolvido fazendo a média do intervalo de 16 linhas de dados. De modo a prevenir outras oscilações que pudessem passar despercebidas optou-se por utilizar o valor da média da força, feita também a partir de intervalos de 16 valores obtidos.

Aplicando esta técnica no ensaio-teste representado na Figura 5.1 (b), obtém-se o seguinte resultado representado na Figura 5.2.

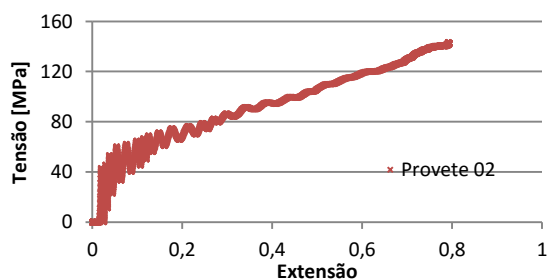


Figura 5.2 - Resultado do ensaio de teste dinâmico a 120 V após o tratamento de dados

Após uma análise aos resultados obtidos para o alumínio AA1050, verificou-se que os valores de 160 MPa para o ensaio quasi-estático e de 140 MPa para o ensaio dinâmico a 120V são valores que se encontram dentro do limite do aceitável quando comparados com outros ensaios já efetuados e, por isso, validados demonstrando que é possível realizar os ensaios com os provetes de resina polimérica com confiança nos resultados obtidos.

O próximo passo é analisar os dados de modo a filtrar aqueles que representam o ensaio de compressão daqueles que não fazem parte do ensaio. O programa desenvolvido em *LabView®* permite a discretização de pequenas frações de segundos em vários milhares de linhas de dados que precisam de ser analisadas e filtradas de modo a apenas se retirar aquelas que realmente representam o ensaio realizado. A melhor forma de encontrar o instante que represente o início de compressão é através da alteração do valor do deslocamento. Encontrado esse valor, conservam-se alguns pontos antes para representar o estado inicial antes do ensaio, todo o resto pode ser removido da análise. Depois é necessário ajustar os dados de modo que a secção inicial da curva força-deslocamento passe pela origem do gráfico, sendo que a inclinação dessa secção representa a rigidez de teste.

Outro fator a ter em atenção é não conservação de volume que se verifica neste tipo de material. Ao contrário do que acontece nos metais, que o princípio de conservação de volume é válido e permite calcular a tensão real e a extensão real a partir das medidas iniciais dos provetes, para os materiais poliméricos, incluindo as resinas como a usada nesta dissertação, este princípio não é válido, o que significa que não se pode utilizar as mediadas iniciais dos provetes para obter a tensão e a extensão reais. A técnica utilizada para ultrapassar esta dificuldade foi aplicar o princípio de conservação de volume e multiplicar por um fator de correção. Este fator de correção foi obtido através de um processo iterativo até chegar a um valor aceitável. Este processo consiste no seguinte: num dos ensaios estáticos não considerados nesta dissertação conseguiu-se obter um provete de resina que não fraturou por completo, conseguindo-se retirar desse provete a sua altura final e o seu diâmetro final. Assim, foi possível retirar a área final do mesmo. Aplicando o princípio de conservação de volume, é possível tirar o valor da área que o provete terá ao longo do ensaio e vai-se multiplicando os valores obtidos por um valor constante entre 0 e 1 até que o valor da área instantânea no instante final da compressão corresponda ao valor real final desse provete. O valor encontrado é um valor aproximado para aquele provete em específico, mas que por ser o mais próximo da realidade vai ser usado para todos os ensaios. Esse valor é 0,65.

Após executar todas estas fases de tratamento dos dados, é possível retirar os gráficos tensão-extensão de cada um dos provetes para os dois tipos de ensaios, que podem ser consultados de seguida.

5.2. Ensaio quasi-estáticos

Os resultados obtidos para os cinco ensaios realizados podem ser consultados na Figura 5.3.

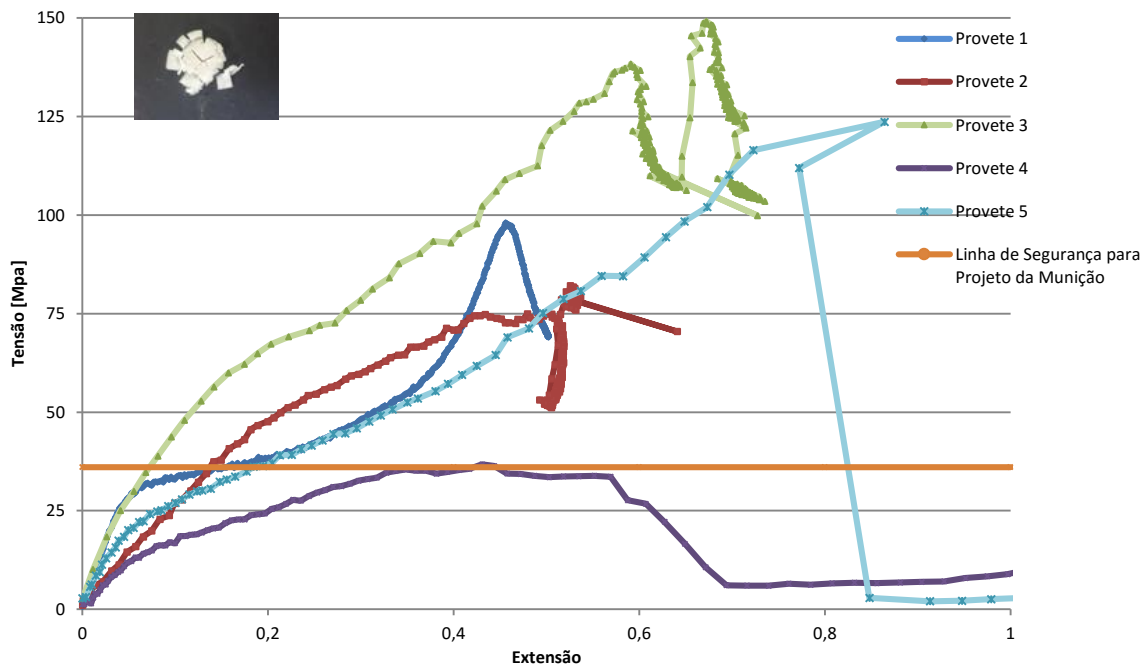


Figura 5.3 - Resultados obtidos para os ensaios quasi-estáticos, imagem ilustrativa do estado final de um dos provetes ensaiados e linha de segurança para projeto do projétil

Através da análise da Figura 5.3 pode-se observar que todas as curvas obtidas possuem a mesma forma, exceto a curva do provete 1, pelo que se pode dizer com alguma certeza que houve algo de errado com esse ensaio visto que a curva sofre uma curvatura logo após a zona que se pode considerar como a zona elástica, o que não se verifica em mais nenhum ensaio. Todos os ensaios têm em comum o valor de extensão onde ocorre a fratura, independentemente do valor da altura inicial do provete. Ao contrário do que se pensava inicialmente, a altura inicial do provete não influencia a fratura ou não do provete, sendo que todos os provetes analisados fraturaram no valor de extensão de 0,4, exceto o provete 5 que fraturou um pouco mais tarde, no valor de extensão de 0,8, valor esse que não é muito significativo e que pode-se considerar bastante próximo do valor obtido para os outros provetes.

Verificou-se também que após a fratura existe um decaimento significativo da força, e que para os provetes 1, 2 e 3, provetes com alturas iniciais mais reduzidas, o ensaio termina aí, não havendo registos de força significativas após esse momento do ensaio, como acontece com os provetes 4 e 5, que após a fratura, a força decai significativamente, mantendo-se depois mais ou menos constante durante a fase de relaxação até que chega a um certo valor de extensão (perto dos 1,3) em que se verifica a existência de um "borrão" onde o valor da extensão sobe e desce. Como os provetes fraturaram todos e apenas se obteve pequenos fragmentos dos provetes pode-se dizer que, como os provetes 4 e 5 por serem de maiores dimensões, ao fraturarem acumula-se material no centro do provete que permite que a célula de carga e o sensor deslocamento continuem a acumular dados uma vez que continua a existir compressão do material acumulado.

Nada se pode concluir acerca da tensão limite de elasticidade e da tensão de rotura devido às grandes disparidades entre os ensaios. A Tensão de rotura varia desde os 37 MPa (provetes 4) até os

150 MPa (provete 3), podendo apenas concluir-se que não se devem aplicar tensões superiores a 40 MPa, correndo o risco de o material fraturar a qualquer valor de tensão acima deste valor, como está representado com a Linha de Segurança na figura 5.3. Quanto à tensão limite de elasticidade, a zona que separa a zona elástica da zona plástica não é muito nítida e também ela varia de ensaio para ensaio, não havendo qualquer tipo de repetibilidade nos ensaios, sendo que apenas se consegue distinguir duas zonas, uma zona elástica visível logo no início de cada um dos ensaios e a zona onde se dá a rotura.

5.3. Ensaio dinâmico

Os resultados obtidos nos ensaios dinâmicos efetuados a 200V foram os apresentados na Figura 5.4.

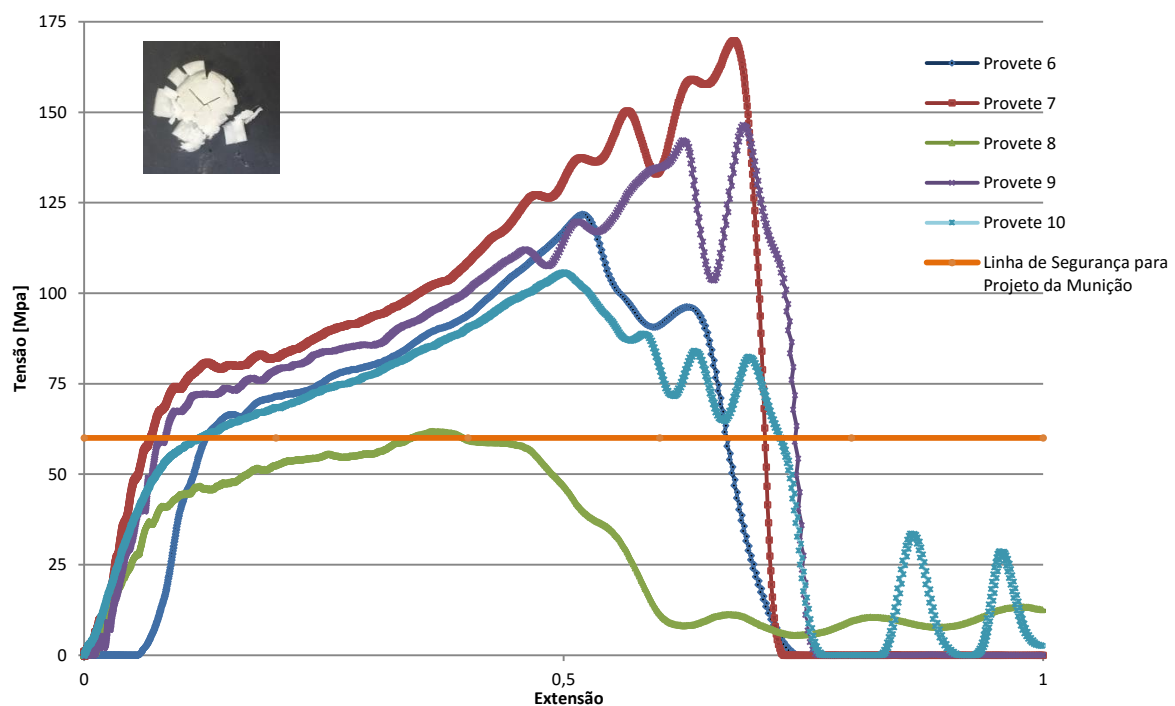


Figura 5.4 - Resultados obtidos nos ensaios dinâmicos a 200 V, imagem ilustrativa do estado final de um dos provetes ensaiados e linha de segurança para o projeto do projétil

Tal como se verificou nos ensaios quasi-estáticos também neste ensaio não existe repetibilidade dos resultados, sendo que as condições de ensaio foram as mesmas e os provetes em tudo semelhantes, dimensões semelhantes, o material é o mesmo e os provetes foram todos fabricados sob as mesmas condições. A fratura do material também acontece no mesmo intervalo de extensão, entre os 0,4 e os 0,7 (valores entre os quais também ocorre a fratura nos ensaios quasi-estáticos), sendo este o único fator que se repete em todos os ensaios.

Dada a elevada divergência dos valores obtidos para a tensão de rotura, que vai dos 60 MPa (provete 8) aos 170 MPa (provete 7), não é possível concluir nada acerca desta propriedade do material, apenas se pode afirmar que a tensão máxima de segurança para este material em condições dinâmicas é 60 MPa, como está representado com a linha a cor de laranja na figura 5.4, sendo que para qualquer valor de tensão acima desse valor pode ocorrer a fratura do material.

Após a fratura, durante a fase de relaxação, o valor da força decai de forma bastante significativa, à exceção da curva do provete 8, que decresce dos 60 MPa para os 10 MPa e se mantém mais ou menos constante nesse valor, apresentado algumas oscilações no sinal que podem ter diversos motivos, tais como a acumulação de material após fratura, vibrações da ferramenta após o impacto, entre outros. Os restantes provetes, após a fratura a força decai para zero, sofrendo depois oscilações que podem ser maiores ou menores consoante o ensaio, como se pode ver na Figura 5.4. Tal fenómeno pode ocorrer devido a vibrações da ferramenta após o impacto, que por existirem pequenos fragmentos de material dentro dos pratos compressores com dimensões consideráveis podem provocar picos de força, podendo também ocorrer devido a ruídos.

5.4. Dimensionamento da espessura mínima do projétil

Apesar de apenas se ter encontrado uma tensão máxima de segurança, é importante referir que para este projeto deve-se assegurar a integridade mínima do projétil, ou seja, mesmo que ocorram fenómenos elástico-viscoplásticos como a relaxação e a deformação permanente do projétil, o importante é que o transporte da substância seja garantido. Para tal, torna-se necessário calcular uma espessura mínima que garanta o transporte da substância colocada na munição para a tensão de segurança encontrada para o material usado nesta dissertação.

Para o dimensionamento da munição vão ser usados todos os constrangimentos e valores usados pelo antigo aluno da AM João Calado.

Para o corpo principal do projétil foram tidos em conta dois constrangimentos: o diâmetro exterior tem de ser menor ou igual a 155mm e a altura somada dos componentes que formam a estrutura do projétil deve ser de aproximadamente 700mm (Calado, 2013). O diâmetro interior terá 130,6mm, como se pode verificar na Figura 5.5.

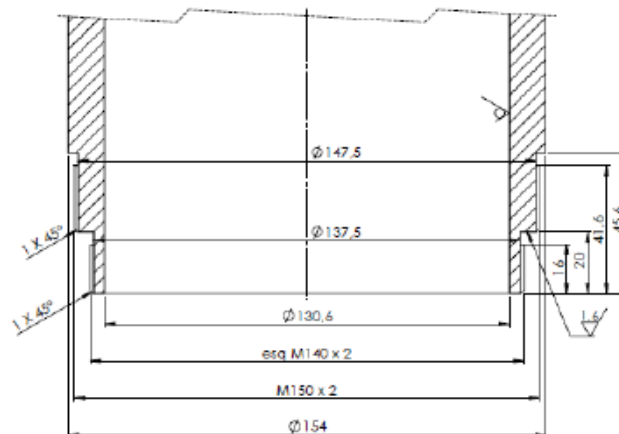


Figura 5.5- Vista em corte da parte inferior do corpo principal com algumas cotas (Calado, 2013).

Quando disparado, a base do projétil é a zona que sofre os maiores esforços, uma vez que é nessa zona onde são aplicadas as maiores pressões, geradas pela deflagração das pólvoras. A pressão exercida no fundo da base é suportada pela reação do corpo secundário e as tensões de corte exercidas na base podem ser críticas, pelo que a espessura da base deve ser dimensionada (Calado, 2013).

Dos ensaios dinâmicos realizados nesta dissertação, retirou-se a tensão de segurança de 60MPa.

Acerca do projétil, são necessários os seguintes dados: o diâmetro interno da base, d_b , a pressão máxima de tiro, p_T , e a tensão máxima de corte, $\tau_{max} = 0,577 \times \sigma_{seg} = 34,62 \text{ MPa}$.

A pressão máxima de tiro depende, entre muitas coisas, do tipo de carga de tiro usada. A carga de tiro é a quantidade de pólvora colocada na câmara de combustão do obus, que, para o caso de tiro curvo, pode variar de 1 a 7, sendo a carga 1 a mínima para efetuar tiro e a carga 7 a mais potente.

Para os cálculos de dimensionamento do projétil é necessário conhecer o valor da pressão máxima de tiro para esta aplicação, que até ao momento ainda não foi dimensionada. No entanto serão explanadas as expressões que permitem calcular a espessura mínima.

A força de tiro, F_T , é dada pela seguinte equação:

$$F_T = p_T \times A_B = p_T \times \pi \times \frac{d_b^2}{4} \quad (5.1)$$

A tensão máxima de corte é dada em função da área crítica ao corte A_{crit} :

$$\tau_{max} = \frac{F_T}{A_{crit}} = \frac{F_T}{\pi \times d_b \times t_{min}} \quad (5.2)$$

Relacionando as equações (5.1) e (5.2), obtém-se:

$$\tau_{max} = \frac{p_T \times \pi \times \frac{d_b^2}{4}}{\pi \times d_b \times t_{min}} \Leftrightarrow t_{min} \geq \frac{p_T \times d_b}{4 \times \tau_{max}} \quad (5.3)$$

Da equação (5.3) é possível retirar a espessura mínima t_{min} da base nas condições de projeto.

Para este cálculo não foi tido em conta nenhum coeficiente de segurança, que deve ser adicionado ao cálculo posteriormente.

6. Conclusões e trabalhos futuros

O principal objetivo desta dissertação era o estudo as características estáticas e dinâmicas da resina acrílica usada na Impressora 3D Flash FTI 230 Desktop Modelar com vista a poder caracterizar mecanicamente o mesmo e obter a expressão tensão-extensão-velocidade de deformação. O objectivo não foi atingido com sucesso, uma vez que não se verificou repetibilidade nos resultados, mas sim uma grande dispersão dos mesmos. Conclui-se assim que este material não é fiável nem confiável para objetos e estruturas que sejam submetidos a cargas elevadas e contínuas uma vez que se tornam imprevisíveis e fraturam com facilidade. A resina usada nesta dissertação é uma resina bastante porosa que fratura de fora para dentro, não homogênea verificando-se que provetes fabricados na mesma altura nas mesmas condições de impressão, lavagem e cura apresentam propriedades bastante diferentes, como se demonstrou ao longo desta dissertação. Este material é apropriado para o fabrico de objetos funcionais, meramente decorativos que não sejam submetidos a grandes cargas. Para aplicações estruturais que necessitem de uma boa resistência mecânica, uma resina só por si não funciona, necessita sempre de ser “misturada” com outro material para reforçar a sua estrutura e as suas propriedades, como se verifica nos materiais compósitos.

O objetivo secundário da presente dissertação consistia na elaboração de um guia de iniciação ao *software Deform®*. Este objetivo foi concluído com sucesso, conseguindo-se explorar algumas das muitas funcionalidades do *software*. Foram apresentados vários estudos, incluindo estudos de compressão simples, compressão com atrito, compressão com diferentes velocidades do prato compressor, compressão com transferência de calor. Muitas das funcionalidades ainda estão por explorar, mas estão disponíveis nesta dissertação pontos-chave importantes para futuros estudos nesta área. Com este software é possível simular um ensaio de compressão estático ou dinâmico com todos os fenómenos que ocorrem nos mesmos, para todo o tipo de material, sendo necessário apenas conhecer as características e a lei que o material segue.

Como trabalho futuro sugere-se:

A alteração do material: Estando esta dissertação inserida no projeto Firend®, e visto este material ser impróprio para aplicações estruturais, torna-se necessário repetir todos os passos e testes utilizando um outro tipo de material, como por exemplo uma mistura de uma resina polimérica com um outro material com características mecânicas mais adequadas.

Referências

- Alves, Fernando, et al. 2001. *ProtoClick!: Prototipagem Rápida*. Porto : s.n., 2001.
- Calado, João. 2013. *Projeto de um Projétil de Calibre 155mm para Combate a Incêndios Florestais*. Lisboa : Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico, 2013.
- Castanheira, Carlos. 2012. *Fabrico e ensaio Balístico em Condições Reais de Conceito Melhorado de um Projétil de Detonação Mecânica*. Lisboa : Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico, 2012.
- Chaves, Eduardo Walter Vieira e Alvarado, Esteban Samaniego. *Visco-Plasticity and Visco-Damage Constitutive Models by Continuum Mechanics*. Escola Técnica Superior D'engineyrs de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya : s.n.
- Costanzi, Marcio Antonio. 2003. Emprego do método SIM para obtenção das curvas isócronas e de ruptura por fluência. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo : s.n., 2003.
- Effects of friction laws on metal forming processes*. Joun, M. S., et al. 2009. 2009, Science Direct.
- Ezequiel, Vasco. 2010. *Influência da Velocidade de Deformação e da Tensão Normal na Tenacidade à Fratura da liga de Alumínio AA1050*. s.l. : Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2010.
- Frank, Geoffrey J. e Brockman, Robert A. 1998. *A viscoelastic-viscoplastic constitutive model for glassy polymers*. 1998.
- Gomes, Herbert M. e Marchese, Tiago. 2013. Ajuste de Modelos Reológicos Mecânicos no Creep de Polipropileno, Poliestireno e Policarbonato: Comparação com o MEF. *Revista Iberoamericana de Polímero*. Março de 2013.
- Huh, Hoon, et al. 2014. *Evaluation of Dynamic Hardening Models for BCC, FCC and HCP metals at a wide range of strain rates*. s.l. : Journal of Materials Processing Technology, 2014.
- Incropera, Frank P., et al. 2007. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 2007.
- Jacobs, P. S. 1996. *Stereolytography and Others RP&M Technologies*. s.l. : Society of Manufacturing Engineers - American Society of Mechanical Engineers, 1996.
- Joun, M. S., et al. 2009. *Effects of friction laws on metal forming processes*. 2009.
- Junior, Sebastião Vicente Canevarolo. 2002. Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. *Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. s.l. : Artliber, 2002, pp. 139-141.
- Kachanov, L. M. 1971. Foundations of the Theory of Plasticity. 1971, pp. 1-2.
- Kim, Hyunok e Kardes, Nimet. ASM International. [Online] [Citação: 16 de Junho de 2015.] http://www.asminternational.org/documents/10192/3477814/05340G_Sample.pdf/274eeee5-af5e-4920-8607-ecad5682a521.
- Kochan, D. 1993. *Solid Freeform Manufacturing: Advanced Rapid Prototyping*. s.l. : Vol. 19 in Manufacturing Research Technology, Elsevier Publishers B. V., 1993.
- Lima, Francisco. 2005. *Desenvolvimento de um Projétil de Detonação Mecânica*. Lisboa : Instituto Superior Técnico, 2005.
- Marques, Luísa. O que são polímeros e porque são interessantes? [Online] [Citação: 19 de Abril de 2015.] <http://www.videos.uevora.pt/oquesaopolimeros.pdf>.

- Nicholson, John W. 1997. The Chemistry of Polymers. *The Chemistry of Polymers*. s.l. : RSC Paperbacks, 1997, p. 68.
- Núcleo de Oficinas (NOF). *Instituto Superior Técnico*. [Online] [Citação: 19 de Junho de 2015.] <http://nof.tecnico.ulisboa.pt/sobre-o-nof/>.
- Ozkaya, Nihat, et al. 2012. *Fundamentals of Biomechanics: Equilibrium, Motion and Deformation*. 2012.
- Pinto, José. 2009. *Avaliação do Comportamento Mecânico de Blindagens Balísticas*. s.l. : Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2009.
- Rösler, J., Harders, H. e Bäker, M. 2007. Mechanical Behaviour of Engineering Materials: Metals, Ceramics, Polymers, and Composites. *Mechanical Behaviour of Engineering Materials: Metals, Ceramics, Polymers, and Composites*. s.l. : Springer, 2007.
- Royle, David. 2001. *Engineering Viscoelasticity*. s.l. : Department of materials Science and Engineering , 2001.
- Schwer, Len. 2007. *Optical Strain-rate forms for the Johnson Cook Constitutive Model and the role of the parameter Epsilon_0*. 2007.
- Silva, Carlos, Rosa, Pedro e Martins, Paulo. 2012. *Electromagnetic Cam Driven Compression Testing Equipment*. 2012.
- Vassoler, Jackson. 2007. Modelos Constitutivos Variacionais de Viscoelasticidade e Viscoplasticidade para Materiais Termoplásticos submetidos a Deformações Finitas. [Online] Agosto de 2007. [Citação: 07 de Abril de 2015.] <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/90719/252389.pdf?sequence=1>.

Anexos

Anexo A – Características técnicas da estereolitografia

Anexo B – Propriedades do material utilizado pela Impressora 3D Flash FTI 230 Desktop Modular

Anexo C – Descrição das funcionalidades do software Deform®

Anexo D- Passo-a-passo na criação do modelo no software Deform®

Anexo E- Criação de sub-rotinas do *software* Deform®

Anexo F – Procedimentos para carregar o banco de potência e para disparar o atuador eletromagnético

Anexo G – Procedimentos para colocar o provete na ferramenta de compressão

Anexo H - Procedimentos a ter para os sensores no início de cada ensaio

Anexo I – Procedimentos para o Amortecedor Pneumático

Anexo J – Procedimentos do Computador

Anexo A – Características técnicas da estereolitografia

Tecnologia	Estereolitografia
Abreviatura	SLA
Materiais usados	Polímero líquido
Materiais Disponíveis	Termoplásticos (Elastômeros)
Tamanho máximo de impressão	150 cm × 75 cm × 50 cm
Resolução máxima	0,00254 cm
Tolerância	+/- 0,0127 cm
Acabamento	Refinado
Velocidade de impressão	Média
Aplicações	- Testes anatômicos - Testes funcionais - Padrões de ferramental rápido, encaixamento por pressão, peças muito detalhadas, modelos de apresentação, aplicações em altas temperaturas

Safety Data Sheet

Material Name: V-Flash™ FTI Resin

Page 1 of 5
Date: 9-Apr-09

1. CHEMICAL PRODUCT AND COMPANY IDENTIFICATION

Product/Trade Name: V-Flash™ FTI-GN Material

Chemical Family: Organic mixture

SDS Issue date: 22-Aug-08, version A

Product Use: For use with film transfer imaging (FTI) systems

Product Number: 24034-S02-02

Manufacturer:



Manufacturer Contact	3D Systems Europe Ltd. Mark House, Mark Road Hemel Hempstead Herts HP2 7 United Kingdom
For Information	Phone: +44 144-2282600
Emergency	In an emergency call a local national poison control unit or the Chemtrec emergency number in the U.S: (+1) 703.527.3887

2. HAZARD IDENTIFICATION

Main Hazards:

Irritant. Irritating to eyes and skin. May cause sensitisation by skin contact. Harmful to aquatic organisms, may cause long-term adverse effects in the aquatic environment. Hazardous polymerisation may occur upon depletion of inhibitor or exposure to heat or light.

Hazard Classification: Hazardous, according to Directive 1999/45/EC and Annex VI, Directive 67/548/EEC



Xi (Irritant)

Risk Phrases:

- R36/38 Irritating to eyes and skin
- R43 May cause sensitization by skin contact
- R52/53 Harmful to aquatic organisms, may cause long-term adverse effects in the aquatic environment.

Safety Phrases:

- S23 Do not breathe fumes.
- S24/25 Avoid contact with skin and eyes.
- S61 Avoid release to the environment. Refer to special instructions/safety data sheets.

3. COMPOSITION INFORMATION

Name	E.C. No.	CAS No.	Content	Symbol	R
(Octahydro-4,7-methano-1H-indenediyl)bis(methylene) diacrylate	255-901-3	42594-17-2	35 - 45%	Xi	43
Polyurethane diacrylate	polymer	--	15 - 25%	Xi	36/38
Polyester acrylate oligomer	polymer	--	8 - 12%	Xi	36/38
Exo-1,7,7-trimethylbicyclo-[2.2.1]hept-2-yl acrylate	227-561-6	5888-33-5	5 - 10%	Xi, N	36/37/38, 51/53
Polyol acrylate	polymer	--	1 - 5%	Xi	36
Phenyl bis(2,4,6-trimethylbenzoyl)-phosphine oxide	423-340-5	162881-26-7	1 - 5%	Xi	43,53
2-ethyl-2-[[[(1-oxoallyl)oxy]methyl]-1,3-propanediyl diacrylate	239-701-3	15625-89-5	0.1 - 1%	Xi	43



Safety Data Sheet

Material Name: V-Flash™ FTI Resin

Page 2 of 5

Date: 9-Apr-09

4. FIRST AID MEASURES

Skin contact: Immediately flush skin with plenty of soap and water. Remove contaminated clothing and shoes. Get medical attention if symptoms occur. Wash clothing before reuse.

Eye contact: Immediately flush eyes with plenty of water for at least 15 minutes. Get medical attention if irritation persists. Avoid exposure to light sources.

Inhalation: Move affected person to fresh air. In case of asphyxia, initiate artificial respiration immediately. If breathing is difficult, give oxygen. Get medical attention immediately.

Ingestion: Ingestion is unlikely. However, if large quantities are swallowed, get medical attention do not induce vomiting. Never give anything by mouth to an unconscious person.

Notes to Physician

Allergic dermatitis in susceptible individuals may be delayed. It may appear after weeks or even months of frequent and prolonged contact.

5. FIRE FIGHTING MEASURES

Flash Point: > 93 °C, (> 200 °F) **Method Used:** estimated

Upper Flammable Limit (UFL): NA **Lower Flammable Limit (LFL):** NA

Auto Ignition: NA **Rate of Burning:** NA

General Fire Hazards: Inhibitor depletion caused by exposure to heat, radiation or oxidizers can cause spontaneous polymerization generating heat and pressure.

Hazardous Combustion Products: Thermal decomposition products can include CO₂, CO, NO_x and smoke.

Extinguishing Media: Use water mist, dry chemical, carbon dioxide, or chemical foam. Avoid the use of a stream of water to control fire since frothing can occur.

Fire Fighting Equipment/Instructions: Wear full protective clothing, including helmet, self-contained positive-pressure or pressure-demand breathing apparatus, protective clothing and facemask. Move container from area if it can be done without risk. Cool containers with water spray. Do not use high-volume water jet. Avoid inhalation of material or combustion by-products.

6. ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

Containment Procedures: Stop the flow of material, if this is without risk. Ventilate contaminated area. Eliminate sources of ignition. Do not release material or contaminated water into drains, soil or surface waters.

Clean-Up Procedures: Wear appropriate protective equipment and clothing. Absorb spillage with non-combustible absorbent materials. Place all waste in an appropriate container for disposal.

Evacuation Procedures: Keep unnecessary personnel away.

Special Procedures: NA

7. HANDLING AND STORAGE

Handling Procedures: Provide adequate ventilation. Avoid contact with skin and eyes. Do not breathe vapours or mist.

Storage Procedures: Store sealed in the original container at room temperature. Keep this material indoors in a cool, dry, well-ventilated place. Store out of direct sunlight or other light sources.

Storage Temperature: 0 °C – 35 °C / 32 °F – 95 °F

8. EXPOSURE CONTROLS/PERSONAL PROTECTION

Exposure Guidelines

A: General Product Information: No occupational exposure limits have been established.

B: Component Analysis:

Component	Manufacturer IEL
Phenyl bis(2,4,6-trimethylbenzoyl)-phosphine oxide (CAS# 162981-26-7/EC# 423-340-5)	1.0 mg/m ³ air (8-hour TWA)

Engineering Controls

Ventilation must effectively remove any vapours. An eyewash fountain and safety shower are recommended.

PERSONAL PROTECTIVE EQUIPMENT

Eyes/Face: Wear chemical goggles or face shield.

Skin: Use impervious nitrile gloves and apron.

Respiratory: If ventilation cannot effectively keep vapor concentrations below established limits, appropriate certified respiratory protection must be provided.



9. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

Appearance.....	Milky yellow	Odor.....	Mild
Physical State.....	Liquid	pH.....	NA
Vapor Pressure.....	NA	Vapor Density.....	NA
Boiling Point.....	NA	Viscosity.....	NA
Solubility (H ₂ O).....	Insoluble @ 20°C (68 °F)	Specific Gravity.....	NA
Percent Volatile.....	NA	Molecular Weight.....	NA

10. CHEMICAL STABILITY AND REACTIVITY

Chemical Stability:	Stable under normal conditions of handling, use and transportation.
Conditions to Avoid:	Avoid exposure to heat and light.
Incompatibility:	Oxidizing materials, strong acids and strong bases.
Hazardous Decomposition:	Thermal decomposition products can include CO ₂ , CO, NOx, and smoke.
Hazardous Polymerization:	Can occur, see sections 2 and 5.

11. TOXICOLOGICAL INFORMATION

Warning Statements and Properties: Irritating to skin and eyes. May cause sensitization by skin contact.
Routes of absorption: Inhalation, skin, eyes

Signs, symptoms and effects of exposure:

Eyes:	May cause irritation consisting of redness, swelling and pain.
Skin:	May cause irritation or other allergic reactions, including redness and/or swelling.
Inhalation:	May cause respiratory irritation.
Ingestion:	Ingestion is unlikely but may cause nausea, diarrhea and/or stomach pain.
Chronic:	Can cause an allergic skin reaction with repeated or prolonged exposure consisting of redness, swelling and/or rash (urticaria).

Medical Conditions Aggravated by Exposure: Could irritate an existing dermatitis or respiratory condition.

Acute and Chronic Toxicity

A: General Product Information: No data available.

B: Component Analysis:

Component	Skin Sensitisation	LD ₅₀ Oral	LD ₅₀ Dermal
Phenyl bis(2,4,6-trimethylbenzoyl)-phosphine oxide	3/10 positive (Guinea pig maximization test)	>2000 mg/Kg (rat)	>2000 mg/Kg (rat)

Carcinogenicity

A: General Product Information: None.

B: Component Carcinogenicity: Neither this product or any of its components are listed by ACGIH, IARC, OSHA, NIOSH, or NTP.

12. ECOLOGICAL INFORMATION

Ecotoxicity

A: General Product Information: The ecological assessment of this material is based on an evaluation of its components. This product contains components that are harmful to the environment and aquatic life. Do not allow into drains and waterways.

B: Component Analysis - Ecotoxicity - Aquatic Toxicity: Components listed are toxic to aquatic organisms and could cause long-term adverse effects in the aquatic environment.

Component	EC ₅₀	LC ₅₀	IC ₅₀	EC ₅₀
Phenyl bis(2,4,6-trimethylbenzoyl)-phosphine oxide	>1.175mg/l* (<i>Daphnia magna</i> , 48 hr)	>0.09 mg/l* (<i>Brachydanio rerio</i> , 96 hr)	> 100mg/l (<i>Sewage Sludge</i>)	>0.26 mg/l (<i>Scenedesmus sp.</i>)

* Not toxic at maximum concentration level for medium.

Environmental Fate: No information available for product.



Safety Data Sheet

Material Name: V-Flash™ FTI Resin

Page 4 of 5
Date: 9-Apr-09

13. DISPOSAL CONSIDERATIONS

Waste Disposal Instructions

Do not contaminate drains, soil or surface waters with this material or its container.

Reduce waste by attempting to utilize product completely.

Dispose of this product and its container in accordance with all local, state, and federal regulations. Prior to disposal of unused material, 3D Systems Inc., recommends consulting an approved waste disposal operative to ensure regulatory compliance.

14. TRANSPORT INFORMATION

Shipping Name	US DOT	RID/ADR	IMDG	IATA	IMO	Canada TDG
Not Regulated						

15. REGULATORY INFORMATION

European Union Regulatory Information

This product is labeled as follows:

Xi	Irritant
R36/37/38	Irritating to eyes and skin.
R43	May cause sensitisation by skin contact.
R52/53	Harmful to aquatic organisms, may cause long-term adverse effects in the aquatic environment.
S23	Do not breathe fumes/vapour.
S24/25	Avoid contact with skin and eyes.
S61	Avoid release to the environment. Refer to special instructions/safety data sheets.

Contains: Tricyclodecane Dimethanol Diacrylate, phenyl bis(2,4,6-trimethylbenzoyl)-phosphine oxide and trimethylolpropane triacrylate. Can cause an allergic reaction.

16. ADDITIONAL INFORMATION

Full text of all Risk Phrases in Sections 2 & 3

R36	Irritating to skin.
R36/38	Irritating to eyes and skin
R36/37/38	Irritating to eyes, respiratory system and skin
R43	May cause sensitization by skin contact.
R51/53	Toxic to aquatic life. May cause long-term adverse effects in the aquatic environment.
R52/53	Harmful to aquatic organisms, may cause long-term adverse effects in the aquatic environment.
R53	May cause long-term adverse effects in the aquatic environment.

MSDS Creation Date: 22 August 2008

MSDS Revision #: A

MSDS Revision Date: NA

Reason for Revision: Release

For more information: www.3dsystems.com

800.793.3669 (Toll-free in the US GMT-07:00; N. America, Mon – Fri, 6:00 a.m. to 6 p.m.)
803-326-3900 (Outside the U.S. GMT-07:00; N. America, Mon – Fri, 6:00 a.m. to 6 p.m.)

DISCLAIMER OF LIABILITY: The following supersedes any provision in your company's forms, letters, and papers. 3D Systems, Inc. makes no warranty whether expressed or implied, including warranties of merchantability or of fitness for a particular purpose for this product. No statements or recommendations contained in the product literature are to be construed as inducements to infringe any relevant patent now or hereafter in existence. Under no circumstances shall 3D Systems, Inc. be liable for incidental, consequential, or other damages from alleged negligence, breach of warranty, strict liability or any other theory, arising out of the use or handling of this product. The sole liability of 3D Systems, Inc. for any claims arising out of the manufacture, use or sale of its products shall be for the buyer's purchase price.

© Copyright 2008 by 3D Systems, Inc. All rights reserved. Subject to change without notice. V-Flash™ is a trademark of 3D Systems, Inc. 3D Systems and the 3D Systems logo are registered trademarks of 3D Systems, Inc.



Safety Data Sheet

Material Name: V-Flash™ FTI Resin

Page 5 of 5
Date: 9-Apr-09

Key/Legend

ACGIH = American Conference of Governmental Industrial Hygienists

CAS = Chemical Abstracts Service

CERCLA = Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act

CFR = Code of Federal Regulations

CPR = Controlled Products Regulations

DOT = Department of Transportation

DSL = Domestic Substances List

EINECS = European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances

EPA = Environmental Protection Agency

IARC = International Agency for Research on Cancer

IATA = International Air Transport Association

IDL = Ingredients Disclosure List

IEL = Internal Exposure Limit

mg/Kg = milligrams per Kilogram

mg/L = milligrams per Liter

mg/m³ = milligrams per Cubic Meter

MSHA = Mine Safety and Health Administration

NA = Not Applicable or Not Available

NIOSH = National Institute for Occupational Safety and Health

NJTSR = New Jersey Trade Secret Registry

NTP = National Toxicology Program

OSHA = Occupational Safety and Health Administration

SARA = Superfund Amendments and Reauthorization Act

STEL = Short Term Exposure Limit

TDG = Transport Dangerous Goods

TSCA = Toxic Substances Control Act

WHMIS = Workplace Hazardous Materials Information System.



Anexo C – Descrição das funcionalidades do software Deform®

O Pré-Processador divide-se em módulos, cada um direcionado para uma análise específica, de modo a simplificar a introdução dos dados e das especificações que se pretende estudar, com a particularidade que a qualquer altura se pode alterar de pré-processador sem se perder a informação gravada anteriormente. Os pré-processadores específicos, como o “*Forming*”, são compostos por vários passos sequenciados que permitem ao utilizador fazer as especificações, tais como, geometria das matrizes e da peça, material das mesmas e condições de fronteira, de forma rápida e muito intuitiva, como vai ser descrito no ponto onde vai ser explicado o modelo utilizado. Em qualquer altura se podem alterar os dados no pré-processador que for mais conveniente.

O Simulador é um mecanismo de simulação que realiza os cálculos numéricos necessários durante cada análise e “escreve” os resultados em ficheiros .KEY e .DB que ficam guardados em bases de dados que podem ser abertos quer pelo Pré-Processador, para alterar algum parâmetro que se ache conveniente, e pelo Pós-Processador para visualizar e analisar os resultados, e que ficam guardados na janela azul da figura I. Os ficheiros .KEY são ficheiros que contêm os dados que definem o problema e que vão ser lidos pelo Pré-Processador e usados para criar um arquivo de dados de entrada. Esta informação é guardada em formato ASCII e pode ser lida e editada no bloco de notas. Os ficheiros .DB contêm todos os dados de entrada e todos os dados guardados por step ao longo de toda a simulação. Este ficheiro apenas pode ser aberto pelo Pré e/ou Pós-Processador. Este Simulador funciona com o sistema de “remalhagem” automática onde é gerada uma nova malha na peça em estudo sempre que necessário. Este sistema também regista toda a informação referente a toda a análise enquanto corre a mesma, incluindo mensagens de erro, em ficheiros .MSG e .LOG, que aparecem na janela cor-de-rosa da figura I. Os ficheiros .MSG são criados à medida que a simulação é corrida e contêm informação detalhada sobre o comportamento da simulação e caso a simulação seja interrompida, é neste ficheiro que vem escrito o porquê disso acontecer. Os ficheiros .LOG contêm informação sobre os tempos de início e fim da simulação, informação sobre a “remalhagem”, caso haja, e pode conter mensagens de erro caso a análise pare de forma inesperada.

No Pós-Processador pode ser vista a operação step por step ou todo de seguida e podem ser analisados vários parâmetros durante a simulação tais como temperatura, tensões de Von-Mises, velocidade de deformação entre outros. Também é possível extrair imagens, animações e gráficos a partir do Pós-Processador.

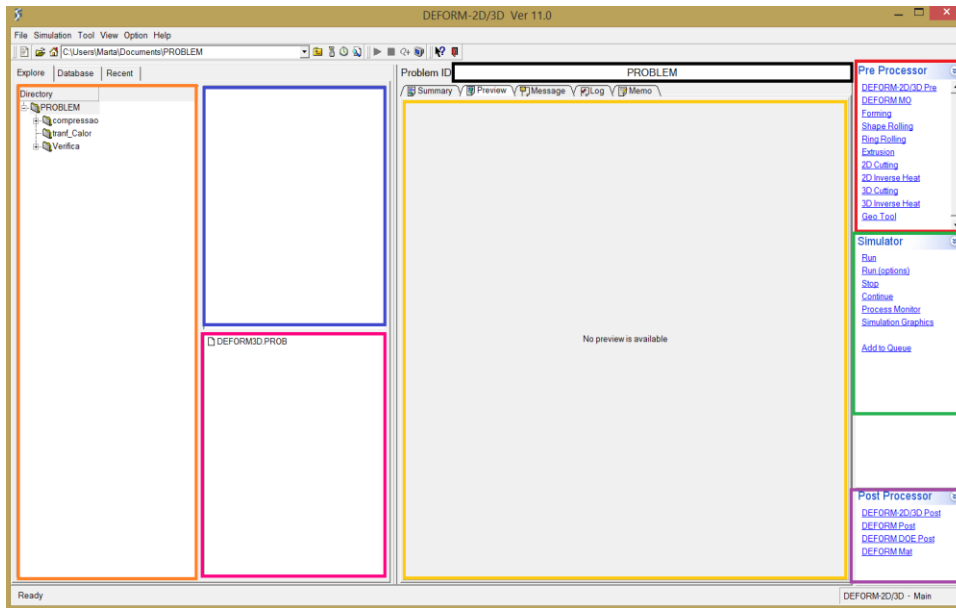


Figura I - Janela Inicial do *Software Deform*®: da direita para a esquerda, a laranja a diretoria, a azul onde ficam guardados os ficheiros .key e .db, a cor-de-rosa onde estão os outros ficheiros gerados, a preto o nome do problema que se está a tratar, a amarelo onde corre a simulação, a vermelho o pré-processador, a verde o simulador e a roxo o pós-processador.

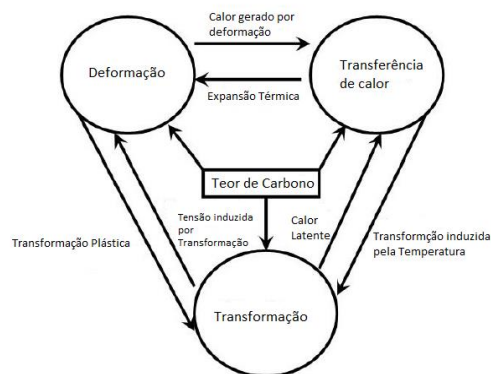
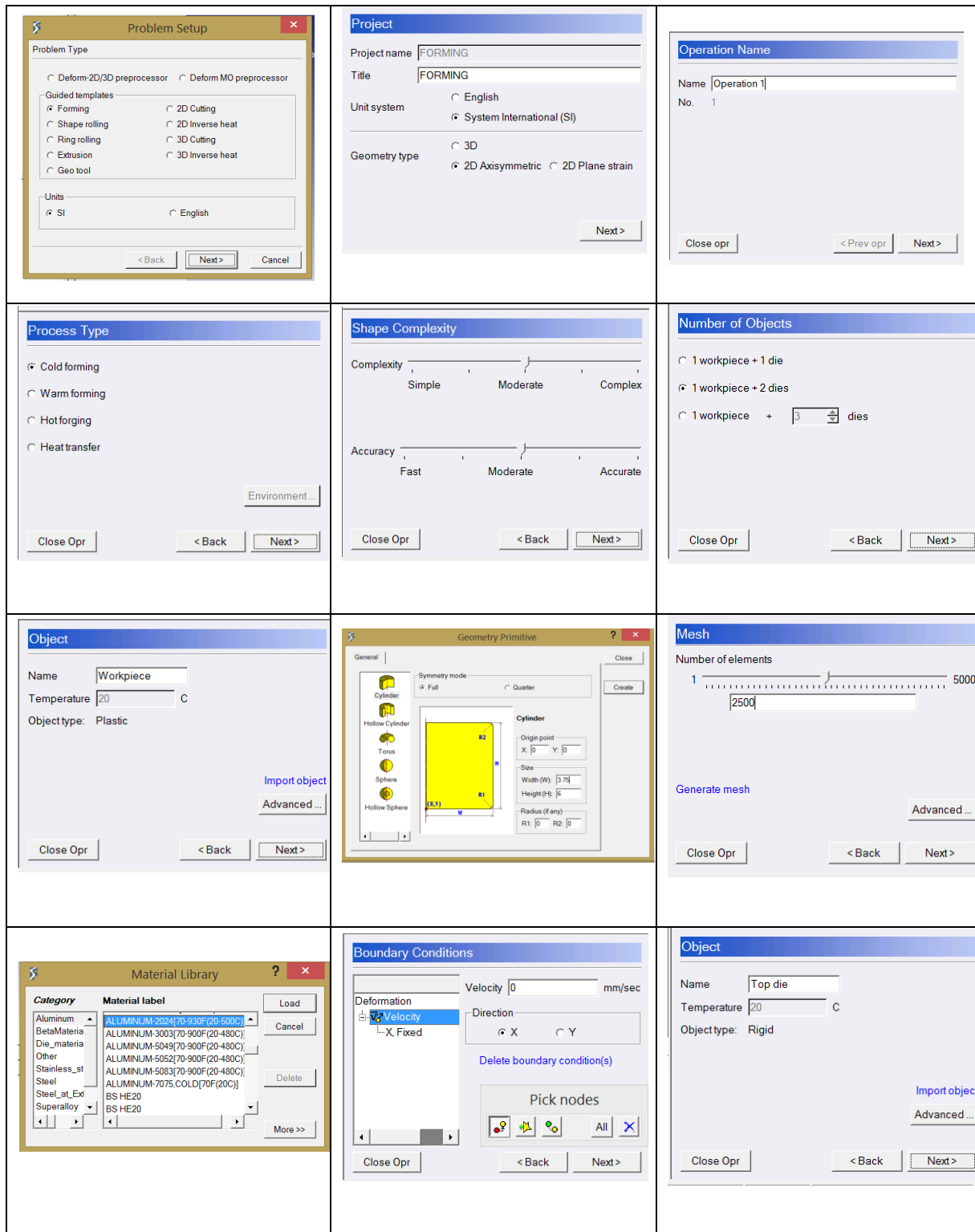
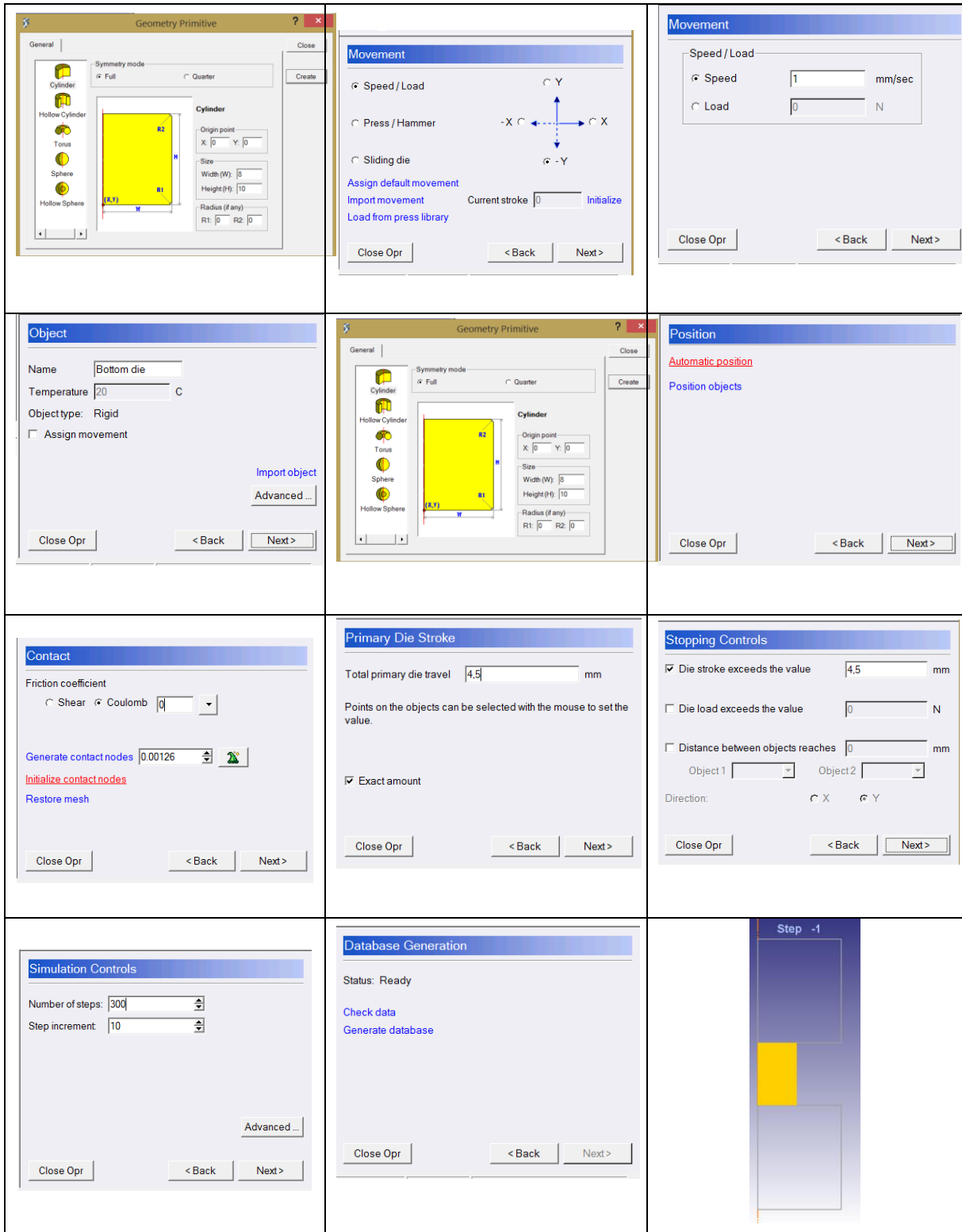


Figura II - Relação entre os vários módulos do *Deform*®.

Anexo D- Passo-a-passo na criação do modelo no software Deform®





Anexo E- Criação de sub-rotinas do *software* Deform®

- Efetuar uma cópia de segurança (Backup) da pasta DEF_SIM (que se encontra na seguinte localização: C:\Program Files\SFTC\DEFORM\v11.0\2D\UserRoutine) para o ambiente de trabalhar de modo a salvar os ficheiros originais.

- Num ficheiro .txt começa-se por definir as constantes da função que se quer programar.
- Definir a função, tendo em atenção que as variáveis a usar estão definidas no ficheiro que contém cada sub-rotina.
- Passar o que foi escrito no ficheiro .txt para o ficheiro .f que contém a sub-rotina que se pretende alterar (por exemplo, usr_mtr.f).
- Guardar o novo ficheiro.
- Abrir o ficheiro DEF_SIM_USR_Absoftv110.atools. O compilador *Absoft Tools*® será aberto automaticamente contendo todas as sub-rotinas.
- Compilar.
- Será criado na pasta que se encontra no ambiente de trabalho um executável com o nome DEF_SIM.EXE. Copiar o executável para a pasta 2D (na pasta original do programa).
- Por fim, pode-se correr a simulação.

Programação do Modelo Silva:

```
C*****  
C      BEGIN SILVA FLOW STRESS MODEL  
C*****  
C  
C work material:  
C  
C   Parameter A  
C     A = 0.22  
C   Parameter B  
C     B = 134  
C   Parameter C  
C     C = 12.5  
C   Parameter D  
C     D = 0.8  
C   Parameter n  
C     E = 0.36  
C   Parameter m  
C     F = -0.34  
C
```

```

C      Strain influence
      P = (A+(EXP(F*TEPS)*TEPS**E))
C      Strain rate effectcs
      Q = (B+(C*ALOG(D+EFEPS)))
C
C      Flow stress
      YS = P*Q
C
C*****
C      END SILVA FLOW STRESS MODEL
C*****

```

Anexo F – Procedimentos para carregar o banco de potência e para disparar o atuador eletromagnético

- Verificar que o transformador regulável esta na posição de 0 V
- Ligar os voltímetros e ligar o atuador a rede elétrica
- Ligar o Geral. Verificar as ligações das extensões na zona dos condensadores
- Ligar o Carga para iniciar o processo de carga dos condensadores:
 - Ligar os disjuntores dos bancos de condensadores a carregar
 - Regular o transformador, aumentando a tensão sem que a corrente geral passa os 5A, até que os condensadores atinjam o valor de carga desejada
 - Desligar os disjuntores
 - Desligar o Carga
- Ligar o Descarga
 - Fazer o disparo com o computador. Colocar a gravar e logo depois carregar no *Trigger*
 - Desligar o Descarga
- Desligar o Geral e os voltímetros
- Desligar o atuador da rede.

Anexo G – Procedimentos para colocar o provete na ferramenta de compressão

- Verificar a mobilidade da barra de impacto:
 - Colocar na posição de disparo (face da came no plano da ferramenta)
 - Verificar a posição do batente de borracha
- Verificar a camada de óleo em toda a ferramenta
- Colocar o provete entre os pratos o mais centrado possível
- Verificar as ligações aparafusadas nas partes móveis do equipamento:
 - Ligação da barra de impacto à came
 - Ligação da barra de seguimento ao alvo do sensor de deslocamento
 - Ligação do prato superior à barra de seguimento
 - Verificar o aperto da tampa da ferramenta

Anexo H - Procedimentos a ter para os sensores no início de cada ensaio

- Verificar a excitação e amplificação da célula de carga no amplificador (usar multímetro):
 - Ver tensão de excitação nas saídas do módulo da fonte de energia do amplificador
 - Verificar o ganho de 1000 do amplificador com o multímetro (ocasionalmente)*
- Verificar o sensor de deslocamento
 - Verificar as condições do cabo da sonda
 - Verificar o ganho do sensor
- Verificar a taxa de aquisição da placa (adquirir 400k pontos a uma taxa de 200k>>> 2s)
- Se o sinal obtido tiver ruído em excesso, verificar as ligações dos cabos dos sensores
 - À placa de aquisição e ao amplificador
 - À terra
 - Entre a malha do cabo da célula de carga e o amplificador

* $F(N)=10000 \cdot F(V)$

Anexo I – Procedimentos para o Amortecedor Pneumático

- Função de amortecedor no ensaio:
 - Colocar o batente da haste na posição de disparo (encostado à Came)
 - Verificar que não há pressão no cilindro **
 - Verificar que a válvula de saída está aberta
 - Regular a válvula de escape do cilindro para a posição de amortecimento desejado ***
 - Verificar que a tampa da ferramenta está bem apertada ***
- Função de atuador pneumático:
 - Encostar o batente da haste à face da Came
 - Abrir a válvula de admissão de ar a ¼ do curso, com a válvula de escape aberta
 - Regular a velocidade da haste com a válvula de escape, podendo desapertar a tampa da ferramenta ou aumentar o caudal de ar para facilitar a tarefa

**** Assumindo que o posicionamento do cilindro é para esta situação.**

***** Caso contrário o cilindro funciona como uma mola**

Anexo J – Procedimentos do Computador

- Verificar a ligação da extensão exterior à rede elétrica. Verificar a extensão interior.
- Ligar a extensão interna no botão:
 - Ligar o computador
 - Ligar a placa de aquisição de dados
 - Ligar o amplificador (deixar aquecer durante 30 minutos)