

AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA ATRAVÉS DE ENSAIOS DE ANÉIS EMPILHADOS

José dos Reis Sequeira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Maria Beatriz Cipriano de Jesus Silva Prof. Carlos Manuel Alves da Silva

Júri

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista Orientador: Prof. Maria Beatriz Cipriano de Jesus Silva Vogal: Prof. Paulo António Firme Martins

Julho 2017

Resumo

Recentemente, tem sido desenvolvida uma nova tecnologia de fabrico, denominada por deformação plástica de chapa na massa (DPCM), que combina a deformação de chapa com carregamentos tridimensionais, típicos dos processos de deformação plástica na massa (DPM). O processo DPCM permite obter componentes com geometria complexa e elevada resistência mecânica.

Esta nova tecnologia utiliza chapa como matéria prima, existindo a necessidade de adaptar caraterização mecânica e tribológica a estes novos processos de deformação de chapa.

Existem ensaios simulativos para caracterizar o atrito em deformação plástica de chapa, no entanto estes ensaios não são aplicáveis em DPCM. Este trabalho propõe o ensaio de anéis empilhados (EAE) com o objetivo de permitir a caraterização do atrito em processos de DPCM.

O trabalho experimental consistiu na realização da caraterização mecânica do material, bloco de liga de alumínio AA6061-T651, através da realização de ensaios de compressão de um cilindro. Para a caraterização tribológica foram realizados, considerando o mesmo bloco de liga de liga de alumínio, ensaios de anel convencional (EA) e EAE com 2 e 4 anéis, utilizando Bi-sulfureto de Molibdénio (MoS2) e Politetrafluoretileno (teflon) como lubrificantes.

A validação numérico-experimental dos EA e dos EAE foi realizada, através de análise às curvas de evolução da força com a percentagem de redução de altura dos provetes, para a utilização de teflon e M_oS_2 .

Através do mapeamento dos pontos experimentais nas curvas de calibração do atrito numéricas, verificou-se que o EAC e o EAE apresentam valores de atrito semelhantes para cada lubrificante, confirmando-se a eficiência do EAE.

Palavras-chave: Deformação plástica de chapa na massa, Ensaio de Anel, Anéis empilhados, Trabalho experimental, Simulação Numérica.

ii

Abstract

Recently, a new manufacturing technology, that combines sheet forming with three-dimensional loads that are usually utilized in bulk forming, known as sheet bulk forming (SBF) has been developed. SBF allows to obtain parts with high complexity details in an economic way, and uses sheet as raw material, making difficult the utilization of the Ring Compression Test (RCT) to characterize friction in the tool-workpiece interface.

The Stack Ring Compression Test (SRCT) is proposed in order to solve the lack of a tribological evaluation experimental test in sheet. The flow curve of the material, a single block of AA6061-T651 Aluminum alloy, was obtained by means of compression tests carried out on solid cylinder specimens.

Experimental tests of the conventional RCT and the SRCT with 2 and 4 rings, using molybdenum disulphide (M_oS_2) and polytetrafluoroethylene in form of sheets (teflon), were carried out.

The numerical validation of the experimental results were performed by means of load vs. reduction of height (%) curves.

The friction values were obtained by mapping the experimental friction points on the friction calibration curves. Finally, it was confirmed that each lubricant provides identical friction values for the conventional RCT and for the SRCT, allowing the validation of the SRCT for the characterization of friction in sheet.

Keywords: Sheet Bulk Forming, Ring Compression Test, Stack Ring Compression Test, I-Form 2D, Numerical Simulations.

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar à Professora Beatriz Silva pela sua disponibilidade, pelo apoio prestado, pela constante motivação durante a realização da dissertação, assim como pelos conhecimentos científicos transmitidos.

Agradeço ao Professor Carlos Silva pelo apoio.

Agradeço, em especial, ao João Pedro Grosa Magrinho, por todo o apoio prestado, motivação transmitida, disponibilidade e amizade.

Agradeço ao Senhor Carlos Farinha pela ajuda e disponibilidade.

Agradeço à Área Científica de Tecnologia Mecânica e Gestão Industrial do Instituto Superior Técnico pelas facilidades e meios concedidos que tornaram possível a realização desta dissertação.

Agradeço ao Domingos Carvalho Fernandes, André Catarro, Rui Pacheco, Afonso Fernandes, Carlos Gomes, Luís Oliveira, Olivier Marques, Eduardo Pedro, Ekaterina Kucheruk, Bruno Pereirinha e Francisco Barral pela amizade, disponibilidade e ajuda prestada ao longo da realização da dissertação.

Agradeço aos meus amigos e colegas por toda a sua amizade, companheirismo, solidariedade e espírito de entreajuda.

A Viktoriia Oleksandrivna Myronets agradeço em especial pela grande amizade e companheirismo.

Aos meus Pais, Joaquim e Maria Helena, por tudo o que fizeram e fazem por mim.

Índice

Resumo	i
Abstract	iii
Agradecimentos	V
Lista de Tabelas	ix
Lista de Figuras	xi
Abreviaturas	xvii
Nomenclatura	xix
1. Introdução	1
2. Estado da Arte	5
2.1. Ensaio de compressão de um cilindro	5
2.2. Atrito	7
2.3. Ensaio de anel	
2.4. Influência da anisotropia	18
2.5. Influência do tipo de carregamento	21
2.6. Variantes	
3. Trabalho Experimental	31
3.1. Caraterização mecânica do material	31
3.1.1. Ensaio de compressão de um cilindro	
3.2. Ensaio de anel convencional e de anéis empilhados	33
3.3. Metodologia utilizada para a realização dos ensaios	35
3.4. Preparação dos provetes e equipamentos utilizados	35
4. Trabalho Numérico	39
4.1. Simulação numérica	39
4.2. Modelos numéricos	40
4.2.1. Modelo numérico dos ensaios em anel e anéis empilhados	40
4.3. Análises de sensibilidade	41
4.3.1. Coeficiente de atrito	41
4.3.2. Velocidade de ensaio	43
4.3.3. Dimensão da malha	45
4.3.4. Incremento de tempo	

4.3.5. Geometria	7
5. Resultados e Discussão	3
5.1.1. Propriedades do material	3
5.2. Ensaio de anel	6
5.2.1. Resultados experimentais	6
5.2.2. Validação numérico-experimental5	7
5.2.3. Obtenção dos valores de atrito através da utilização de curvas de calibração teóricas 50	8
5.3. Ensaio de anéis empilhados60	D
5.3.1. Resultados experimentais 6	1
5.3.2. Validação numérica-experimentalmente	4
5.3.3. Obtenção dos valores de atrito através da utilização de curvas de calibração teóricas 60	6
5.4. Condições extremas de atrito 66	B
6. Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro7	1
7. Referências	3

Lista de Tabelas

Tabela 2.1- Diferentes tipos de analise considerados para obtenção das curvas de calibração 16
Tabela 2.2-Metodologias utilizadas na obtenção das curvas de atrito experimentais
Tabela 3.1 - Plano de ensaios para compressão de provetes nas direções x, y e z 32
Tabela 3.2 - Plano de ensaios para compressão cilíndrica 33
Tabela 3.3 - Plano de ensaios para realização dos ensaios em anel
Tabela 4.1- Principais caraterísticas e aplicações da formulação do escoamento utilizada pelo I- FORM2
Tabela 4.2-Parâmetros utilizados na realização dos ensaios em anel e de discos empilhados 41
Tabela 4.3- Parâmetros de simulação utilizados para a analise de sensibilidade do atrito e respetivostempos de computação
Tabela 4.4- Parâmetros de simulação utilizados para a analise de sensibilidade da velocidade erespetivo tempo de computação
Tabela 4.5- Parâmetros de simulação utilizados para a analise de sensibilidade da malha e respetivotempo de computação45
Tabela 4.6- Parâmetros de simulação utilizados para a analise de sensibilidade do incremento de tempoe respetivo tempo de computação
Tabela 4.7- Parâmetros de simulação utilizados para a analise de geometria 47
Tabela 5.1-Valores médios de K e n para cada condição de realização do ensaio de compressão de um cilindro

Lista de Figuras

Figura 2.1- Representação esquemática do ensaio de compressão uniaxial de um provete cilíndrico. 6
Figura 2.2 - Representação esquemática da sensibilidade ao atrito: (a) $\frac{h_0}{d_0} = 0.5$; (b) $\frac{h_0}{d_0} = 2$
Figura 2.3- Representação esquemática do modo como é feita a interação entre duas superfícies, para valores de pressão normal baixos
Figura 2.4-Representação esquemática da variação da tensão de corte em função da tensão normal de contacto aplicada
Figura 2.5- Valores típicos do fator de aspereza <i>f</i> 9
Figura 2.6- Representação de como varia a pressão na compressão de um cilindro e qual a influência que o atrito apresenta no valor da tensão normal de compressão, P: (a) lei de Coulomb; (b) lei de Prandtl
Figura 2.7- Curva proposta por Stribeck de modo a assinalar os regimes de transição entre os diferentes tipos de lubrificação
Figura 2.8-Representação da influência do atrito na forma do provete; a) Secção transversal intermédia do provete comprimido entre pratos rugosos; b) Secção transversal intermédia do provete comprimido entre pratos lisos
Figura 2.9- Método de Cook e Larke para obtenção da curva de escoamento homogenia 12
Figura 2.10-Metodo de Watts e Ford para obtenção da curva de escoamento homogénea 13
Figura 2.11-Geometria dos provetes utilizados: (a) Cilíndrico; (b) Provete proposto por Rastegaev; (c) Provete em anel
Figura 2.12-Representação esquemática da geometria do anel antes e depois de ser comprimido: a) sob condições de atrito baixas; b) sob condições de atrito elevadas
Figura 2.13- Esquema da deformação do anel para os vários níveis de atrito, m : a) $m = 0$ e $Rn = 0$; b) m baixo e $0 < Rn < Ri$; c) m intermédio ou elevado e $0 < Rn < Ri$
Figura 2.14- Exemplo de curvas de calibração: (a) Lei de Coulomb; (b) Lei do fator de atrito de Prandtl
Figura 2.15- Diagrama ilustrativo da técnica de medição proposta por Hartley et al., (2007) 17
Figura 2.16- Provetes utilizados para a obtenção dos rácios de tensão para o critério de Hill 19
Figura 2.17- Curvas tensão-extensão obtidas (através de ensaios de compressão e de tração) para a liga de alumínio AA6082 em diferentes orientações do material
Figura 2.18- Imagem com a orientação dos provetes utilizados

Figura 2.19- Distribuição da tensão radial para o caso (1); a) Resultados numéricos para o caso (1) com $\mu = 0.027$; b) Ensaio experimental com teflon; c) Resultados numéricos para o caso (1) com $\mu = 0.20$;
d) Ensaio experimental sem lubrificação21
Figura 2.20- Gráfico com as curvas de atrito obtidas pelo método dos elementos finitos e as obtidas através dos ensaios experimentais
Figura 2.21- Imagem dos provetes utilizados em ensaios de compressão
Figura 2.22- Curvas tensão-extensão obtidas
Figura 2.23- Geometria sugerida por Petersen et al. (1998)
Figura 2.24- Curvas de calibração considerando as diferentes leis de atrito
Figura 2.25- Geometrias sugeridas por Tan et al., (1998)
Figura 2.26- Geometria dos provetes de anel com bossa: a) exterior; b) interior
Figura 2.27-Resultados em termos de deformação para os ensaios propostos por Hu et al. (2015) e Hu et al. (2017) para um valor percentual de redução de altura, $Rh = 60\%$ para o RCT-B e 55 % para o RCT-IB: (a) RCT-B com $m = 0$; (b) RCT-B com $m = 0.3$; (c) RCT-IB com $m = 0$; (d) RCT-IB com $m = 0.5$
Figura 2.28- Mapas de calibração do atrito obtidos a partir do FEM; a) Curvas de calibração obtidas a partir de EABE; b) Curvas de calibração do EABI vs. EAC
Figura 2.29-Representação esquemática de ensaios simulativos de deformação plástica de chapa . 28
Figura 3.1 - Provete de compressão e respetivas dimensões 32
Figura 3.2 - Curvas tensão-extensão para as direções de compressão 32
Figura 3.3 – Geometria e dimensões dos provetes de anel, de 2 e 4 anéis empilhados 34
Figura 3.4-Metodologias utilizadas nos diferentes ensaios: (a) compressão cilíndrica com lubrificação única (azul) e periódica (cinzento); (b) EAC (cinzento) e EAE (azul)
Figura 3.5 - Equipamentos utilizados na preparação dos provetes: (a) serrote MAQFORTE; (b) Torno convencional QUANTUM
Figura 3.6-Provetes obtidos e utilizados para a realização dos ensaios: (a) Provete cilíndrico; (b) Provete em anel; (c) 2 Anéis empilhados; (d) 4 Anéis empilhados
Figura 3.7-Maquina de ensaios Instron, Modelo 1200kN Satec: (a) Imagem da Maquina de ensaios; (b) Tabela com as principais caraterísticas
Figura 3.8-Ferramenta utilizada nos ensaios de compressão
Figura 3.9-Pratos de compressão utilizados; (a) Pratos rugosos, com rugosidade media, $Ra = 0.533 \ \mu m$;

Figura 4.1- Modelos numéricos utilizados: (a) Compressão em anel convencional; (b) 2 anéis empilhados; (c) 4 anéis empilhados
Figura 4.2-Representação esquemática das diferentes regiões de atrito resultantes do ensaio de anéis empilhados
Figura 4.3-Evolução da força com a redução de altura para um valor de atrito na interface ferramenta- provete de $mf = 0.11$, tendo em conta diferentes valores de atrito entre os discos
Figura 4.4- Evolução da força com a redução de altura para um valor de atrito na interface ferramenta- provete de $mf = 0.20$, tendo em conta diferentes valores de atrito entre os discos
Figura 4.5- Evolução da força com a percentagem de redução de altura, para as diferentes velocidades de compressão
Figura 4.6-Evolução da força com a redução de altura, para cada tamanho de elemento
Figura 4.7-Evolução da força com a redução de altura, variando o tempo de incremento
Figura 4.8-Evolução da força com a redução de altura, variando a altura e o posicionamento do anel
Figura 4.9-Evolução da força com a redução de altura, variando diâmetro interno e o posicionamento de um anel
Figura 4.10-Evolução da força com a redução de altura, variando diâmetro externo e o posicionamento de um anel
Figura 4.11-Evolução da força com a redução de altura, variando diâmetro interno, diâmetro externo e o posicionamento de um anel dos anéis
Figura 4.12- Evolução da força com a redução de altura resultante do desfasamento de anéis e seu posicionamento
Figura 5.1- Exemplo de curvas tensão-extensão obtidas por lubrificação incremental; (a) Massa grafitada; (b) Teflon
Figura 5.2-Curvas tensão-extensão obtidas através da metodologia de lubrificação única com teflon e massa grafitada
Figura 5.3-Curvas tensão-extensão obtidas através da metodologia de lubrificação periódica com teflon e massa grafitada
Figura 5.4-Representação das diferenças entre as duas metodologias de carregamento para cada lubrificante; (a) massa grafitada; (b) teflon
Figura 5.5- Curvas de evolução da força com o deslocamento, através de ensaios de anel convencional, com massa grafitada e teflon
Figura 5.6- Validação numérico-experimental, através da analise da evolução da força com percentagem de redução de altura, com massa grafitada e teflon

Figura 5.7- Representação das curvas de calibração e mapeamento dos pontos de atrito experimentais obtidos através de ensaios de anel convencional, com massa grafitada e teflon
Figura 5.8-Fotografias dos provetes de anel com massa grafitada: (a) antes da compressão; (b) 1º ensaio; (c) 2º ensaio; (d) 3º ensaio
Figura 5.9-Fotografias dos provetes de anel com teflon: (a) antes da compressão; (b) 1º ensaio; (c) 2º ensaio; (d) 3º ensaio
Figura 5.10-Vista de topo de alguns provetes após compressão com teflon: (a) 1ºensaio; (b) 2º ensaio; (c) 3º ensaio
Figura 5.11- Curvas de evolução da força com a percentagem de redução de altura dos provetes com massa grafitada
Figura 5.12-Fotografias dos provetes de 2 anéis com massa grafitada: (a) antes da compressão; (b) 1º ensaio; (c) 2º ensaio; (d) 3º ensaio
Figura 5.13-Fotografias dos provetes de 4 anéis com massa grafitada: (a) antes da compressão; (b) 1º ensaio; (c) 2º ensaio; (d) 3º ensaio
Figura 5.14-Ilustração dos desfasamentos dos anéis empilhados com massa grafitada: (a) 2º ensaio de 2 anéis; (b) 2º ensaio de 4 anéis; (c) 3º ensaio de 4 anéis
Figura 5.15-Curvas de evolução da força com a percentagem de redução de altura dos provetes com teflon
Figura 5.16- Provetes de 2 anéis com massa grafitada: (a) antes da compressão; (b) 1º ensaio; (c) 2º ensaio; (d) 3º ensaio
Figura 5.17-Provetes de 4 anéis empilhados com teflon; (a) antes da compressão; (b) 1º ensaio; (c) 2º ensaio; (d) 3º ensaio
Figura 5.18- Validação numérico-experimental, através da analise da evolução da força com percentagem de redução de altura, para os ensaios de 2 e 4 anéis com massa grafitada 65
Figura 5.19- Validação numérico-experimental, através da analise da evolução da força com percentagem de redução de altura, para os ensaios de 2 e 4 anéis com teflon
Figura 5.20-Representação das curvas de calibração e mapeamento dos pontos de atrito experimentais obtidos através dos ensaios de 2 anéis e 4 anéis, com massa grafitada
Figura 5.21-Representação das curvas de calibração e mapeamento dos pontos de atrito experimentais obtidos através dos ensaios de 2 e 4 anéis empilhados, com teflon
Figura 5.22- ilustração dos diferentes eixos de orientações das elipses: (a) 2 anéis; (b) 4 anéis; (c) 4 anéis
Figura 5.23-Validação numérico-experimental, através da analise da evolução da força com

Abreviaturas

Ensaio de anel convencional
Ensaio de anel com bossa exterior
Ensaio de anel com bossa interior
Ensaio de anéis empilhados
Deformação plástica de chapa na massa
Instituto Superior Técnico

Nomenclatura

Símbolos latinos	Definição
Α	Área instantânea da secção transversal do provete
A_0	Área inicial da secção transversal do provete
A_a	Área aparente de contacto
A_r	Área real de contacto
A_{ri}	Área real de contacto entre dois picos em contacto
A_{hi}	Área de uma bolsa de lubrificante
d_{i_0}	Diâmetro interno inicial do anel
d_0	Diâmetro inicial do provete cilíndrico
d_{e_0}	Diâmetro externo inicial do anel
d_i	Diâmetro interno do anel medido
d_e	Diâmetro externo do anel medido
F	Força de corte
f	Fator de aspereza de Wanheim-Bay
h	Altura instantânea do provete
h_0	Altura inicial do provete
k	Tensão limite de elasticidade em corte puro
K	Coeficiente de resistência de Ludwik-Hollomon
l_e	Comprimento do elemento da malha
m	Fator de atrito de Prandtl
m_d	Valor de atrito entre os anéis
m_{f}	Valor de atrito na interface ferramenta-peça
n	Coeficiente de encruamento de Ludwik-Hollomon
Ν	Número de incrementos
p	Pressão normal aplicada
p_r	Pressão rela de contacto
Р	Força normal aplicada
q	Pressão hidrostática no interior das bolsas
r	Distância ao centro do provete cilíndrico
R	Raio do provete cilíndrico
R _e	Raio externo do anel
R_i	Raio interno do anel
R_n	Raio da linha neutra
T_c	Tempo de computação
ν	Velocidade do ensaio
v_r	Velocidade radial do anel
Ζ	Eixo de orientação das coordenadas cilíndricas

Símbolos gregos	Definição
α	Coeficiente de Wanheim-Bay
Δl	Deslocamento total do prato de compressão móvel
Δt	Incremento de tempo
ε	Extensão verdadeira
θ	Orientação considerada para as coordenadas cilíndricas
μ	Coeficiente de atrito de Coulomb
μ_{min}	Coeficiente de atrito de Coulomb mínimo
σ	Tensão verdadeira
σ_e	Tensão limite de escoamento do material
τ	Tensão de corte
$ au_r$	Tensão de corte real de contacto

1. Introdução

Atualmente, a maioria das operações de fabrico utilizam processos de deformação plástica na chapa e/ou processos de deformação plástica na massa com o objetivo de minimizar os custos de produção para grandes séries de fabrico.

A fim de possibilitar a produção de componentes com geometria complexa e precisa, possibilitando uma diminuição de custos relativos a operações de acabamentos (como por exemplo a maquinagem), Merklein et al. (2010) e Mori et al. (2011) identificaram uma nova classe de processos de deformação plástica. Esta classe é denominada por Deformação Plástica de Chapa na Massa (DPCM) ou por Sheet Bulk Forming (SBF), pela terminologia Portuguesa e Inglesa, respetivamente.

A DPCM combina a deformação plástica de chapa (condições de tensão plana) com carregamentos tridimensionais típicos de deformação plástica na massa (Merklein et al, 2010). Ao comparar esta nova tecnologia com processos de corte por arrombamento e de arranque de apara, verifica-se que a DPCM permite obter componentes com maior resistência mecânica devida a existência de deformação plástica do material.

A caraterização das condições de atrito na interface ferramenta-peça torna-se uma condição necessária em processos de deformação plástica que resultam do contacto direto entre a ferramenta e a peça.

Bay et al. (2008) apresentam diferentes metodos de avaliar as condições de lubrificação em chapa e divide-os em ensaios de processo e ensaios simulativos. Os ensaios de processo consistem na comparação de diferentes lubrificantes durante a operação de deformação plástica do material. Por outro lado, os ensaios simulativos simulam os estados de tensão típicos em deformação plástica de chapa que resultam numa expansão superficial da chapa.

O ensaio de anel convencional (EAC) é o ensaio mais utilizado para caraterizar o atrito entre a ferramenta e a peça em processos de deformação plástica na massa.

Uma vez que DPCM utiliza esforços típicos de deformação plástica na massa para deformar plasticamente a chapa, o EAC torna-se o ensaio mais indicado para caracterizar o atrito nestes processos. Por outro lado, não é possível aplicar o EAC para efetuar caraterização do atrito na interface ferramenta-peça em DPCM, porque a chapa possui espessura reduzida, o que impossibilita a obtenção de provetes em anel com uma relação geométrica inicial de diâmetro externo: diâmetro interno: altura de $(d_{e_0}: d_{i_0}: h = 6: 3: 2)$.

Nesta dissertação é apresentada uma variante ao EA com o objetivo de permitir caraterizar o atrito em processos que utilizam chapa com matéria prima, denominada por ensaio de anéis empilhados (EAE). Para a realização deste ensaio, considerou-se empilhar anéis com valor de altura igual até que se verifique a relação geométrica utilizada pelo EA (6: 3: 2).

EAC e EAE foram realizados para a mesma matéria prima (bloco de liga de alumínio AA6061-T651), utilizando Bi-sulfureto de Molibdénio (MoS2 mais conhecido por massa grafitada) e Politetrafluoretileno (PTE mais conhecido por teflon) como lubrificantes.

A caraterização do material é obtida por intermédio de ensaios de compressão cilíndrica. É apresentada a validação numérico-experimental dos EAC e EAE, por analise a evolução da força com a percentagem de redução de altura do provete. Apresenta-se a obtenção dos valores de atrito para os EAC e EAE para cada condição de lubrificação.

Esta dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos, sendo a presente introdução o primeiro.

O capítulo 2 – Estado da Arte inicia-se com uma descrição do ensaio de compressão cilíndrica, incluindo o atrito e algumas metodologias de obtenção da caraterização do material. Posteriormente, é apresentado o ensaio de anel através de uma breve revisão bibliográfica das metodologias utilizadas para a obtenção das curvas de atrito teóricas e as metodologias realizas para efetuar as medições dos provetes. De seguida, são apresentados estudos realizados sobre a influência da anisotropia, diferentes metodologias de carregamento nos ensaios de compressão cilíndrica e EAC. São apresentadas algumas variantes dos ensaios de compressão cilíndrica e do EAC e, finalmente, é efetuada uma breve descrição do trabalho realizado.

O capítulo 3 – Trabalho Experimental tem início com a apresentação do material utilizado para a realização dos ensaios experimentais, liga de alumínio AA6061-T651. De seguida, é apresentada uma analise feita a fim verificar a presença de anisotropia no material e também é identificada a caraterização do material. Posteriormente, apresenta-se a geometria e as dimensões dos provetes utilizados para o EAC e o EAE, bem como o plano de ensaios considerado. São apresentadas as metodologias de lubrificação e de ensaio escolhidas para a realização dos ensaios. Finalmente, é descrito como se procedeu a obtenção dos provetes e são apresentados os equipamentos utilizados.

O capítulo 4 – Trabalho Numérico inicia-se com a apresentação do software utilizado no trabalho numérico, o I-Form 2D. Posteriormente, descreve-se o modelo numérico adotado nas simulações numéricas do EAC, do EAE com 2 e 4 anéis empilhados. Apresentam-se de seguida as análises de sensibilidade dos resultados, realizadas para o ensaio de 4 anéis empilhados. São feitas análises à sensibilidade ao atrito entre os anéis, ao atrito na interface ferramenta-peça, à velocidade do ensaio, à dimensão da malha, ao incremento de tempo, e, finalmente, à geometria dos provetes.

O capítulo 5 – Resultados e Discussão inicia-se com a apresentação dos resultados obtidos nos ensaios de compressão cilíndrica. De seguida, apresentam-se os resultados obtidos experimentalmente e a sua respetiva validação numérico-experimental, através da evolução da força com a percentagem de redução de altura do provete, para os diferentes ensaios com massa grafitada e teflon. Também são obtidos os valores de atrito através do mapeamento dos pontos experimentais nas curvas de calibração de atrito teóricas obtidas através de simulações numéricas para os diferentes

valores de atrito. Finalmente, apresenta-se os resultados exploratórios para uma condição de atrito elevada utilizando a mesma metodologia.

Finalmente, no Capítulo 6 – Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro, são identificadas as principais conclusões do trabalho realizado e apontadas algumas investigações que podem ser efetuadas em trabalhos futuros.

2. Estado da Arte

Do ponto de vista da deformação plástica de metais, a curva tensão-extensão é uma das informações mais importantes para a modelação do comportamento dos materiais, porque é utilizada para descrever o encruamento do material durante a deformação plástica (Christiansen et al., 2016).

O ensaio de tração uniaxial é o ensaio mais utilizado na caracterização mecânica dos materiais, mas, infelizmente, devido a ocorrência da instabilidade à estricção, apenas consegue caraterizar o material até aparecer a estricção (aproximadamente 0.35 de extensão efectiva, dependendo do material). Normalmente, os processos de deformação plástica alcançam valores de extensão muito superiores, o que acaba por limitar a aplicabilidade dos ensaios de tração (Martins e Rodrigues, 2010).

Os processos de fabrico por deformação plástica são divididos pelo tipo de matéria prima que utilizam: deformação plástica na massa e deformação plástica de chapa. Forjamento, laminagem, extrusão, trefilagem são processos de deformação plástica na massa e estes processos possuem estados de deformação da mesma natureza, ou seja, estados de natureza compressiva. Por outro lado, quinagem, calandragem, perfilagem, são processos de deformação plástica o plástica de chapa e estes possuem deformação devido a expansão (Martins e Rodrigues, 2010).

Os ensaios de enformabilidade Bulge (expansão biaxial) e Nakajima, são os mais utilizados para efetuar a caraterização mecânica em processos de deformação plástica de chapa. Por outro lado, os ensaios de compressão cilíndrica são efetuados de maneira a caraterizar os materiais utilizados em processos de deformação na massa (Martins e Rodrigues, 2010).

Uma vez que este trabalho se baseia na caraterização de materiais utilizados em processos de deformação plástica na massa aplicados na chapa, de seguida é apresentado o ensaio de compressão cilíndrica, que é um ensaio muito utilizado para obter a curva tensão-extensão do material.

Posteriormente, será abordada a temática do ensaio de compressão em anel, mais concretamente os principais parâmetros que influenciam os resultados obtidos após a realização deste ensaio, e também serão apresentadas algumas variantes aos ensaios de anel e ensaios de compressão cilíndrica.

Finalmente, apresentar-se-á uma breve discrição do trabalho que ira ser realizado.

2.1. Ensaio de compressão de um cilindro

O ensaio de compressão cilíndrica consiste em comprimir o provete entre pratos planos, lisos e paralelos. A Figura 2.1 representa esquematicamente este ensaio, em que h_0 corresponde à altura inicial do provete, *F* a força aplicada no prato móvel e *h* corresponde à altura final do provete (após deformação plástica).



Figura 2.1- Representação esquemática do ensaio de compressão uniaxial de um provete cilíndrico. Adaptado de Martins e Rodrigues (2010)

Durante o ensaio são registados valores de força e de deslocamento para cada instante, a fim de ser possível obter os respetivos valores de tensão-extensão. A equação (2.1) apresenta o modo como são calculados os valores de tensão verdadeira para cada instante, σ , onde *A* corresponde ao valor da área instantânea da secção transversal do provete.

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{2.1}$$

Os valores da extensão verdadeira para cada instante, ε , podem ser obtidos a partir da seguinte expressão:

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right) = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right)$$
 (2.2)

onde h_0 e h são, respetivamente, a altura inicial e a altura instantânea do provete, enquanto A_0 é a área inicial do provete.

A norma ASTM-E9-89a (1996) tem que ser respeitada de modo a que os resultados obtidos na realização de ensaios de compressão de um cilindro sejam fiáveis. Para tal, o ensaio deve ser realizado em condições quasi-estáticas e com uma velocidade de compressão máxima de 5 *mm/min*.

A aplicabilidade deste tipo de ensaios encontra-se limitada pelo rácio entre a altura inicial e o diâmetro inicial do provete, $\binom{h_0}{d_0}$, onde o limite mínimo é 1 e o máximo é 3 (Gunasekera et al., 1989). O limite superior esta associado à falha por instabilidade e o inferior esta associado à sensibilidade do atrito (Figura 2.2) (Alves et al., 2011).



Ao analisar uma curva tensão-extensão obtida pelo ensaio de compressão de um cilindro com uma obtida a partir do ensaio de tração, em que ambas as curvas foram obtidas nas mesmas condições e para o mesmo material, verifica-se que estas são semelhantes (Martins e Rodrigues, 2010).

Apesar do ensaio de compressão de um provete cilíndrico possuir uma grande vantagem, alcançar valores elevados de extensão, também possui uma grande desvantagem, de não ser possível garantir ausência de atrito na interface matriz-provete. A presença de atrito na interface faz com que a deformação plástica do provete deixe de ser homogênia.

Assim, torna-se necessário compreender melhor o fenómeno de existência de atrito que ocorre na interface ferramenta-peça, e para tal, de seguida é apresentada a definição de atrito e os tipos de atrito que existem.

2.2. Atrito

O atrito na interface ferramenta-peça influi significativamente na curva de escoamento do material, na carga necessária para haver deformação plástica, no acabamento superficial da peça e no tempo de vida da ferramenta (Hu et al., 2015).

Todas as superfícies são constituídas por picos e vales, e quando duas superfícies estão em contacto uma com a outra verifica-se que o contacto é maioritariamente realizado pelos picos mais elevados, através de microsoldaduras (Figura 2.3).



Figura 2.3- Representação esquemática do modo como é feita a interação entre duas superfícies, para valores de pressão normal baixos (Martins e Rodrigues, 2010)

A Figura 2.4 apresenta, esquematicamente, o modo como a tensão de corte, τ , varia em função do valor da pressão, p, aplicada entre duas superfícies, por exemplo a interface ferramenta-peça, com adição de um lubrificante.

Para valores baixos de pressão, a presença de lubrificante na interface não contribui para determinação do coeficiente de atrito. Nestas condições, a lei de atrito a ter em consideração é a lei de Amonton-Coulomb.



Figura 2.4-Representação esquemática da variação da tensão de corte em função da tensão normal de contacto aplicada (Martins e Rodrigues, 2010)

O valor do coeficiente de atrito de Coulomb, µ, pode ser obtido a partir da seguinte expressão:

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{\tau}{p} \tag{2.3}$$

onde $F \in P$ são, respetivamente, a força de corte necessária para que a ferramenta se desloque em relação a peça.

O modelo de atrito de Coulomb normalmente é utilizado em processos de deformação plástica que utilizam valores de pressão baixos, $\frac{p}{\sigma_e} < 1.5$, onde σ_e corresponde a tensão limite de elasticidade do material (Kačmarčik et al., 2011).

Para valores de pressão intermédios, $1.5 \le \frac{p}{\sigma_e} < 4$, a presença de lubrificante é relevante para obtenção do valor do atrito. Isto deve-se ao aumento do número de bolsas de lubrificação, o que origina um

aumento da pressão hidrostática no interior das bolsas. Nestas condições, é utilizado o modelo geral de atrito proposto por Wanheim–Bay, e o valor da tensão de corte pode ser calculado por intermédio da seguinte expressão:

$$\tau = f \alpha k \quad com \ 0 < f < 1 \ e \ \alpha < 1 \tag{2.4}$$

onde α é a razão entre a área real, A_r , e a área aparente de contacto, A_a , k é o valor da tensão limite de elasticidade em corte puro e f é o fator de aspereza na interface matriz-provete. A Figura 2.5 ilustra o modo como o fator de aspereza varia em função dos valores de pressão (adimensionalisada pelo valor de σ_e) e de tensão de corte (adimensionalisada pelo valor de k) aplicados na interface matrizprovete (Petersen et al., 1997)



Figura 2.5- Valores típicos do fator de aspereza f (Petersen et al., 1997)

Para valores de pressão elevados, $\frac{p}{\sigma_e} \ge 4$, a área real possui o mesmo valor que a área aparente e há formação de um filme lubrificante. Este fenómeno conduz a um valor da tensão de corte máximo e constante. Nesta região o atrito é caraterizado pelo modelo de atrito de Prandtl, e o valor da tensão de corte pode ser obtido através da equação (2.5), onde *m* corresponde ao fator de atrito.

$$\tau = mk, \ com \ m = 0 \ a \ 1 \tag{2.5}$$

A influência do atrito, no valor da pressão aplicada na realização do ensaio de compressão cilíndrica, pode ser expressa através de uma analise feita pelo método da fatia elementar. Desta análise obtémse a equação (2.6) considerando o modelo de atrito de Coulomb, ou a equação (2.7) alinhada com o modelo do fator de atrito de Prandtl. Onde *R* é o raio do cilindro, *h* é a altura do cilindro e *r* é a distância ao centro do provete.

$$\frac{p}{\sigma_e} = e^{\frac{2\mu}{\hbar}(R-r)} \tag{2.6}$$

$$\frac{p}{\sigma_e} = 1 + \frac{m}{h}(R - r) \tag{2.7}$$

Deste modo, as Figura 2.6 a) e b) apresentam a variação da pressão na superfície do provete em função de cada modelo de atrito.



Figura 2.6- Representação de como varia a pressão na compressão de um cilindro e qual a influência que o atrito apresenta no valor da tensão normal de compressão, P: (a) lei de Coulomb; (b) lei de Prandtl

Como mostra a Figura 2.6, existe um ponto neutro, que coincide com a linha de simetria do provete, onde não existe movimento relativo entre a ferramenta e a peça devido ao facto de as tensões de corte anularem-se. Também é possível verificar que facto de existir atrito na interface ferramenta-peça faz com que a pressão aumente significativamente para que ocorra deformação plástica do material.

Existe a necessidade de diminuir, quanto possível, a presença de atrito durante a realização do ensaio de compressão de um cilindro, e a utilização de lubrificação na interface matriz-provete é uma boa alternativa.

Existem vários tipos de lubrificação, estes dependem da sua composição e da maneira como atuam na interface ferramenta-peça. A Figura 2.7 apresenta a curva de Stribeck, que ilustra o modo como varia o coeficiente de atrito de Coulomb em função de cada regime de lubrificação. Os processos de deformação plástica são caraterizados por possuir uma lubrificação correspondente a região a tracejado.



Figura 2.7- Curva proposta por Stribeck de modo a assinalar os regimes de transição entre os diferentes tipos de Iubrificação (Martins e Rodrigues, 2010)

Nos processos de fabrico são utilizados vários lubrificantes, entre os quais distinguem-se: óleos minerais, óleos naturais (massas e derivados), fluidos sintéticos, lubrificantes compostos, lubrificantes aquosos e revestimentos.

Lubrificantes compostos de elevada pressão, como o bissulfito de molibdénio (MoS_2), permitem garantir a eficiência da lubrificação até valores de pressão elevados, ao mesmo tempo, a utilização de peliculas solidas, como a utilização de folhas de Teflon, revelam-se eficientes a altas velocidades e temperaturas.

Mesmo com a utilização de folhas de teflon ou lubrificantes com elevada viscosidade não é possível eliminar a presença de atrito na interface ferramenta-peça, o que origina uma deformação não homogenia do provete e o aparecimento do efeito de "barril".

Com o objetivo de obter uma caraterização homogénea do material, Cook e Larke (1945) propuseram um método de extrapolação. Após comprimir dois provetes cilíndricos, um entre pratos rugosos e outro entre pratos polidos, analisaram a secção transversal intermédia de ambos e verificaram que os pratos polidos proporcionam uma deformação mais homogénea do provete, como mostram as Figura 2.8 a) e b).

Após analisar a secção do provete comprimido entre pratos rugosos, Cook e Larke (1945) verificaram que a existência de atrito na interface matriz-provete impedia o movimento radial do material junto aos pratos de compressão, originando uma geometria cónica onde não existe praticamente deformação plástica (zonas mortas), assim ao longo do ensaio o material da região em deformação plástica (região clara) é forçado a deslocar- se radialmente para o exterior, fazendo com que o provete possua uma forma parecida a de um "barril".



Figura 2.8-Representação da influência do atrito na forma do provete; a) Secção transversal intermédia do provete comprimido entre pratos rugosos; b) Secção transversal intermédia do provete comprimido entre pratos lisos (Cook e Larke, 1945)

Cook e Larke (1945) aferiram que o aumento do rácio $\frac{h_0}{D_0}$, para o mesmo diâmetro, fazia diminuir a influência das zonas mortas ao longo do ensaio. Assumiram que no limite, ou seja, quando $\frac{h_0}{D_0}$ tende para o infinito, deixa de existir zonas mortas e a deformação plástica do material ocorre de maneira homogénea ao longo da realização do ensaio.



Figura 2.9- Método de Cook e Larke para obtenção da curva de escoamento homogenia (Martins e Rodrigues, 2010)

Posto isto, realizaram compressão de provetes com diâmetro constante, mas com valores de $\frac{h_0}{p_0}$ iguais a 2, 1, 1/2, e 1/3, até valores de redução percentual de altura pretendidos, *r*, utilizando uma metodologia de lubrificação periódica. Os resultados permitiram extrapolar para os valores da tensão media de escoamento (σ_e) para cada valor de *r*, como se encontra ilustrado na Figura 2.9 a) e b).

Mais tarde Watts e Ford (1955) tentaram aperfeiçoar este método e afirmaram que é mais preciso obter por iguais incrementos de força, mas sem ocorrência de paragens de modo a permitir a lubrificação da interface matriz-provete. Assim, realizaram a compressão dos provetes com valores de $\frac{h_0}{D_0}$ idênticos aos utilizados por Cook e Larke, e obtiveram a curva de escoamento do material (Figura 2.10).



Figura 2.10-Metodo de Watts e Ford para obtenção da curva de escoamento homogénea (Martins e Rodrigues, 2010)

Alexander e Brewer (1963), propuseram a mesma alteração que Watts e Ford ao método de Cook e Larke, más utilizando o método de lubrificação periódica para garantir que as condições de lubrificação se mantivessem constantes.

Com o objetivo de diminuir o número de provetes necessário a caraterização homogénea do material, Woodward (1977) propôs uma alteração da extrapolação de Cook e Larke para um método de interpolação. Para tal, utilizou uma função corretiva obtida por Avitzur (1968), que resulta de uma análise teórica onde aplica o método do limite superior ao ensaio de compressão uniaxial cilíndrico, tornando-se necessário comprimir apenas dois provetes com a utilização de folhas de teflon.

Christiansen et al., (2016) propuseram um método simples e eficaz para determinar a curva de escoamento do material a partir de resultados experimentais dos valores de força e deslocamento. Para tal, realizaram uma analise ao ensaio de compressão de um cilindro, alinhada com o método da fatia elementar, onde consideraram que nas extremidades o atrito era representado pelo modelo de Coulomb e no centro pelo atrito de Prandtl.

De seguida, Christiansen et al., (2016) criaram um código de programação, através do MATLAB, de modo a ser possível obter a verdadeira curva de escoamento do material. Este código necessita de parâmetros de entrada, tais como, os dados obtidos da caraterização experimental do material, e também, os valores de atrito de Prandtl e Coulomb. Estes valores de atrito foram obtidos através da realização de ensaios de anel, e as curvas de calibração foram obtidas a partir do software i-form com a lei do material obtida experimentalmente.

Christiansen et al., (2016) realizaram esta metodologia para três casos: (1) Provete cilíndrico lubrificado com folhas de teflon; (2) Provete cilíndrico lubrificado com massa grafitada; (3) Provete com a geometria proposta por Rastegaev, utilizando a massa grafitada como lubrificante. As dimensões dos provetes encontram-se representadas na Figura 2.11.



Figura 2.11-Geometria dos provetes utilizados (Christiansen et al., 2016): (a) Cilíndrico; (b) Provete proposto por Rastegaev; (c) Provete em anel

Após analisar os resultados, Christiansen et al., (2016) verificaram que as curvas de escoamento experimentais eram diferentes umas das outras (dependendo do tipo de provete e as condições de lubrificação), mas as curvas obtidas a partir do código de programação eram semelhantes.

Após a obtenção de uma boa caraterização, torna-se necessário avaliar e quantificar o atrito nos processos de deformação plástica na massa, e para tal, é apresentado o ensaio de compressão de anel.

2.3. Ensaio de anel

(mm)

Este ensaio consiste na compressão axial de um provete em anel entre pratos planos paralelos, com ou sem lubrificação, e é dos ensaios mais utilizados para caraterizar o atrito nos processos de deformação plástica na massa, apesar de ainda não estar normalizado (Avitzur, 1965).

A aplicabilidade deste ensaio está no facto de o diâmetro interno, d_i , do anel ser sensível ao atrito. Caso o diâmetro interno do provete aumente após a sua compressão, a influência do atrito na interface é pouco significativa, como ilustra a Figura 2.12 a). Caso o diâmetro interno diminua durante a compressão do provete, então a presença de atrito é significativa (Figura 2.12 b)) (Martins e Rodrigues, 2010).

14


Figura 2.12-Representação esquemática da geometria do anel antes e depois de ser comprimido: a) sob condições de atrito baixas; b) sob condições de atrito elevadas (Martins e Rodrigues, 2010)

A Figura 2.13 demonstra o resultado da análise feita ao ensaio de anel por Abdul e Alexander (1981) alinhada com método da fatia elementar e o modelo de atrito de Prandtl.



Figura 2.13- Esquema da deformação do anel para os vários níveis de atrito, m: a) m = 0 e $R_n = 0$; b) m baixo e $0 < R_n < R_i$; c) m intermédio ou elevado e $0 < R_n < R_i$ (adaptado de Abdul and Alexander, 1981)

O facto de não existir atrito, m = 0, faz com que o raio da linha neutra, R_n , seja zero e o material escoe, radialmente, para o exterior (Figura 2.13 a)). Quando o m é baixo, o R_n deixa de ser zero, mas, ao mesmo tempo, é inferior a R_i e o material desloca-se, com menor velocidade, para o exterior (Figura 2.13 b)). Valor de atrito médio ou elevado implica que $R_i < R_n < R_e$, ou seja, a linha neutra determina a quantidade de material que escoa para o interior e para o exterior (Figura 2.13 c)) (Abdul and Alexander, 1981).

Kunogi (1956) foi o primeiro a aplicar esta técnica do EA com o objetivo de comparar vários lubrificantes e, ao mesmo tempo, escolher o que apresenta melhores propriedades de modo a ser utilizado no processo de deformação plástica por extrusão a frio.

Mais tarde, Male e Cockcroft (1964) adaptaram a técnica proposta por Kunogi (1956) de modo a permitir a determinação do atrito através da obtenção de curvas experimentais de calibração de atrito. Para tal, assumiram o modelo de atrito de Coulomb e consideraram a relação geométrica inicial de diâmetro externo, diâmetro interno e altura igual a 6:3:2 (d_{e_0} : d_{i_0} : h_0).

Desde Kunogi (1956), a relação de dimensões, 6:3:2, tem sido utilizada como se fosse normalizada (Danckert, 1988).

A Tabela 2.1 apresenta as diferentes metodologias consideradas para obter das curvas de calibração.

	Modelo de Coulomb (µ)	Modelo de Prandtl (m)	Modelo de atrito de Wanheim-Bay (f)
Método do limite superior		(Kudo, 1960) (Avitzur, 1964)	(Hansen and Bay, 1988)
Material rígido- plástico (FEM)	(Christiansen et al., 2016) (Valero et al., 2015)	(Tan <i>et al</i> ., 1998) (Hu et al., 2015) (Hu <i>et al.</i> , 2017) (Christiansen et al., 2016)	(Petersen et al., 1998)
Método da fatia elementar	(Burgdorf, 1967)	(Danckert, 1988) (Abdul and Alexander, 1981)	(Danckert, 1988)

Tabela 2.1- Diferentes tipos de analise considerados para obtenção das curvas de calibração. Adaptado de Tan *et al.*, (1998)

A Figura 2.14 apresenta exemplos de curvas de calibração alinhadas com o modelo de atrito de Coulomb (Figura 2.14 a)), e curvas obtidas através do fator de atrito de Prandtl (Figura 2.14 b)).



Figura 2.14- Exemplo de curvas de calibração (Martins e Rodrigues, 2010): (a) Lei de Coulomb; (b) Lei do fator de atrito de Prandtl

As curvas de calibração representam, para um determinado valor de atrito, a variação percentual do diâmetro interno em função da diminuição percentual do valor da altura do anel.

A Tabela 2.2 apresenta algumas das metodologias de medição mais utilizadas para efetuar as medições dos provetes.

Doguímetro	Projetor de perfil com	Microscópio equipado	
Faquinetto	planímetro	com mesa micrométrica	
(Wang and Lenard, 1992) (X.Tan et al., 1999) (Hu et al., 2015) (Christiansen et al., 2016) (Hu <i>et al.</i> , 2017)	(Male e Cockroft, 1964) (Valero et al., 2015)	(Petersen et al., 1998) (Valero et al., 2015)	

Tabela 2.2-Metodologias utilizadas na obtenção das curvas de atrito experimentais.

Hartley et al. (2007) propuseram um método de medição que consiste em colocar uma esfera com um diâmetro conhecido no orifício do anel. Efetuaram as medições representadas na Figura 2.15, com auxilio de um paquímetro, e aplicaram a equação (2.8) a fim de obter o valor do diâmetro interno.



Figura 2.15- Diagrama ilustrativo da técnica de medição proposta por Hartley et al., (2007)

$$d_i = 2\sqrt{\frac{D^2}{4} - \left(OH - h - \frac{D}{2}\right)^2}$$
(2.8)

Mesmo sabendo como obter curvas de calibração com algum rigor e compreender como efetuar as medições experimentais, ainda assim, existe dificuldades na quantificação do atrito. Han (2002) afirma que o valor de atrito estimado pelo ensaio de anel é superior quando comparado com outros métodos. Bhattacharya (1981) mostrou que se o material possuir anisotropia (propriedades mecânicas diferentes em cada direção), então a geometria final do provete é influenciada pela a orientação de compressão. Dado que a presença de anisotropia pode influenciar a geometria do provete, de seguida é feito um levantamento da influência da anisotropia em ensaios de compressão cilíndrica e EAC.

2.4. Influência da anisotropia

A presença de anisotropia nos materiais deve-se à estrutura metalográfica, ao teor em elementos em liga e à natureza dos tratamentos térmicos e mecânicos a que o material foi previamente submetido (Martins e Rodrigues, 2010).

Hill (1948) foi o primeiro a propor um critério de plasticidade, que considera estados de anisotropia ortotrópicos. Desde então, a anisotropia tem sido considerada um fator importante no estudo dos processos de deformação plástica na chapa, pelo qual foram estabelecidos conceitos de anisotropia planar e normal.

As chapas apresentam dois tipos de anisotropia; a anisotropia planar e a normal. A anisotropia planar resulta de as propriedades mecânicas no plano da chapa variarem com a direção em que são medidas, enquanto que a anisotropia normal surge quando as propriedades segundo a espessura são diferentes das que se obtêm no plano da chapa (Martins e Rodrigues, 2010).

De modo a calcular a anisotropia nos materiais são realizadas medições dos valores de tensão em dois eixos diferentes ou medições da combinação da tensão com a extensão. Estes métodos são aplicados para processos de deformação plástica na chapa com a condição de que os valores de extensão alcançáveis são inferiores a 0.1 Han (2002).

De acordo com a definição de anisotropia normal, Pöhlandt (1992, 1998, 1999) definiu vários conceitos de anisotropia para materiais obtidos a partir da extrusão e estabeleceu um método de rácios de extensão para estimar a anisotropia.

Ultimamente têm sido publicados trabalhos com o objetivo de caraterizar a anisotropia nos processos de deformação plástica na massa. Han, (2002) realizou um trabalho com o objetivo de avaliar os diferentes métodos: análise à cedência; análise aos rácios de extensão; análise das curvas tensão verdadeira-extensão verdadeira.

Após efetuar a seu estudo, Han (2002) concluiu que a análise à cedência não consegue prever a anisotropia por completo porque os primeiros pontos de cedência podem não representar toda a anisotropia durante grandes deformações.

Em relação ao método de analise aos rácios de extensão à tração, afirmou que este era um método fraco para a determinação da anisotropia, uma vez que, para além de os rácios de extensão estarem dependentes da anisotropia, também estão restringidos pela instabilidade originada durante o ensaio de tração.

Finalmente, inferiu que o método de analise das curvas de tensão-extensão obtidas através de ensaios de compressão cilíndrica é o método que consegue estimar a anisotropia nos processos de deformação plástica na massa.

Mais tarde, Han (2002) verificou a influência da anisotropia através de ensaios de compressão cilíndrica da liga de alumínio AA6082, para as diferentes direções, e realizou todos os ensaios nas mesmas condições.

Esta liga sofreu uma deformação por extrusão, foi aquecida até 410°C, permaneceu a esta temperatura durante 3 horas, foi arrefecida até aos 250°C com uma taxa de arrefecimento de 30°C/h, e finalmente, é esfriada a temperatura ambiente.

De seguida realizou ensaios de compressão e tração, para as respetivas direções (Figura 2.16), de modo a poder comparar as respetivas curvas de escoamento.



Figura 2.16- Provetes utilizados para a obtenção dos rácios de tensão para o critério de Hill. Adaptado de Han (2002)

Após realizar os ensaios apresentados na Figura 2.16, obteve as curvas que estão ilustradas na Figura 2.17 e verificou que os valores de tensão na direção z, são 7% superiores aos valores correspondentes as direções $r \in \Theta$, que acabam por estar muito próximos um do outro.



Figura 2.17- Curvas tensão-extensão obtidas (através de ensaios de compressão e de tração) para a liga de alumínio AA6082 em diferentes orientações do material (Han 2002)

Ao analisar a Figura 2.17, Han (2002) afirma que o facto de o critério de plasticidade de Hill (1948) possuir parâmetros iniciais constantes, faz com que falhe ao ter em conta a evolução da anisotropia durante grandes deformações. Como exemplo, Han (2002) afirma que a diferença de tensão à cedência entre z e r é de apenas 2MPa, mas para um valor de extensão de 0.2 é de 13MPa.

De seguida, Han (2002) estudou a influência da anisotropia e do atrito nos ensaios de anel, associando a curva de escoamento do material ao critério de Plasticidade de von Mises e de Hill. Para descrever o critério de plasticidade de Hill, adicionou a media dos rácios de tensão obtidos ao longo dos ensaios de compressão.

Han (2002) estudou três casos pelo método de elementos finitos: (1) Anel anisotrópico com uma orientação de 90° em relação ao eixo z (Figura 2.18 a)); (2) Anel com valores de atrito diferentes em cada direção com o objetivo de simular a existência de anisotropia (esta situação só é possível obter a partir das simulações); (3) Anel com anisotropia simétrica orientado com o eixo z (Figura 2.18 b)).



(a) orientação a 900 (b) orientação a 00

Figura 2.18- Imagem com a orientação dos provetes utilizados (Han, 2002)

Através das simulações feitas para o primeiro caso, Han (2002) aferiu que para um valor de atrito significativamente baixo, por exemplo $\mu = 0.027$, o material se desloca melhor para as direções que oferecem menor resistência ($\theta = 90^{\circ}$), formando uma elipse ((Figura 2.19 (a) e (b)). Para valores de coeficiente de atrito superiores, por exemplo μ = 0.20, o anel anisotrópico assume uma forma circular (Figura 2.19 (c) e (d)).



Figura 2.19- Distribuição da tensão radial para o caso (1) (Han, 2002); a) Resultados numéricos para o caso (1) com μ = 0.027; b) Ensaio experimental com teflon; c) Resultados numéricos para o caso (1) com μ = 0.20;
d) Ensaio experimental sem lubrificação

Após confirmar experimentalmente os resultados obtidos, Han (2002) afirma que para valores baixos de atrito, a anisotropia possui alguma influência na geometria do anel, mas para o valor de atrito elevado, a geometria do anel deixa de ser influenciada pela anisotropia.

Os resultados do segundo caso de estudo, anel com caraterísticas anisotrópicas obtidas através da atribuição de valores de atrito diferentes em cada direção, mostram que a geometria final do provete é idêntica a do primeiro caso e os valores de tensão normal são similares, mas os valores de tensão de corte são cerca de 100% superiores para o segundo caso.

Han (2002) analisou o terceiro e último caso, que corresponde a compressão de anel que possui isotropia planar, e constatou que a geometria do disco permanecia circular. Este fenómeno é muito semelhante ao comportamento de um material isotrópico e muito facilmente pode ser confundido. Após comparar os valores de pressão para ambos os casos, anisotropia planar e isotropia, verificou que existiam diferenças nos valores de tensão de corte, podendo levar a alterações nos valores de diâmetro interno, e assim, originar um valor de atrito mal estimado ao utilizar curvas de calibração convencionais (curvas que não têm em conta a anisotropia planar).

2.5. Influência do tipo de carregamento

Valero et al., (2015) obtiveram uma curva de calibração experimental através da realização de ensaios de anel sem efetuar paragens (metodologia de carregamento contínuo), ou seja, o ensaio é realizado com uma metodologia de lubrificação única e é comprimido até alcançar a percentagem de redução de altura desejada. De seguida, traçaram outra curva a partir da compressão, por incrementos de força (metodologia de carregamento incremental), de um anel até atingir o mesmo valor de percentagem de redução que a obtida anteriormente.

A compressão do anel por incrementos de força permite a lubrificação periódica da interface ferramenta-peça e, ao mesmo tempo, torna possível medir as dimensões do provete apos cada paragem.

Com o objetivo de comparar as diferentes curvas, Valero et al., (2015) representaram-nas no mapa de calibração de atrito, como apresenta a Figura 2.20. Estas curvas de calibração do atrito foram obtidas por intermédio de simulações realizadas através do programa de elementos finitos, ABAQUS.



Figura 2.20- Gráfico com as curvas de atrito obtidas pelo método dos elementos finitos e as obtidas através dos ensaios experimentais (Valero et al., 2015)

Ao analisar as curvas representadas na Figura 2.20, Valero et al., (2015) verificaram que as curvas experimentais coincidem até um valor de redução de altura de 10%. A partir dos 10% as curvas experimentais diferem, e a curva corresponde a metodologia de carregamento incremental permanece próxima da curva de calibração do atrito. Apenas faz sentido analisar as curvas até uma percentagem de redução de altura de 40%, uma vez que devido ao aumento da pressão o lubrificante é expelido, originado diferentes condições de atrito.

Valero et al. (2015) finalizaram afirmando que a utilização de uma metodologia de carregamento incremental proporciona condições de atrito ideais, e na pratica a camada do lubrificante não permanece constante, como por exemplo em forjamento em matriz aberta. Nestes casos a metodologia de carregamento contínuo deve ser considerada de maneira a obter uma melhor aproximação ao problema real.

2.6. Variantes

Ao longo dos anos têm sido apresentadas variantes ao ensaio de compressão cilíndrica com o objetivo de minimizar a presença do atrito na realização dos ensaios e assim conseguir obter uma boa caraterização do material.

De modo a tornar possível a caraterização do material fornecido em forma de chapa, Pawelski (1967) propõe, pela primeira vez, o ensaio de compressão de discos empilhados. Mais tarde, Merklein e Kuppert (2009), discutiram a utilização do ensaio de compressão de discos empilhados para a obtenção da curva de escoamento do material para materiais anisotrópicos.

O ensaio consiste na utilização de discos circulares que são cortados de blocos e são empilhados de modo a formar um provete cilíndrico com um valor de relação de dimensões coincidentes aos valores utilizados na compressão cilíndrica convencional, ver Figura 2.21 (Alves et al., 2011).



Figura 2.21- Imagem dos provetes utilizados em ensaios de compressão (Alves et al., 2011)

O método de lubrificação utilizado por Alves et al. (2011) é similar ao ensaio de compressão cilíndrica convencional, ou seja, deve-se lubrificar a interface entre os discos exteriores e os pratos de compressão, que necessitam de ser previamente desengordurados.

De modo a assegurar que a deformação do provete de discos empilhados se processe de maneria homogénea, Alves et al. (2011) posicionaram os discos o mais alinhados possível de modo a atingir a altura desejada, utilizando, por vezes, pingo de cola lateral. Caso tal não se verifique, é provável que ocorra deslocamento entre os discos e consequente fluxo não homogéneo do material.

Posto isto, Alves et al. (2011) realizaram a compressão dos provetes representados na Figura 2.21 e, como mostra a Figura 2.22, chegaram a resultados que apresentam semelhanças significativas entre os ensaios de compressão cilíndrica, de compressão de 2,4 e 8 discos empilhados.



Figura 2.22- Curvas tensão-extensão obtidas (Alves et al., 2011)

Posto isto, Alves et al. (2011) concluíram que este tipo de ensaio permite, de uma forma precisa e fiável, determinar as curvas tensão-extensão para materiais em chapa, superiorizando-se às técnicas comuns de ensaio de material fornecido nesta forma.

Desde Kunogi (1956), foram realizados trabalhos com o objetivo de propor um método alternativo de quantificação de atrito na interface matriz-provete.

Petersen et al. (1998) publicaram um trabalho onde apresentaram uma alternativa a geometria do provete em anel (Figura 2.23) para a realização do ensaio de anel, afirmando que esta geometria permitia a determinação de valores de atrito em processos de deformação plástica onde prevalecem baixos valores da pressão normal ($p \le \sigma_e$).



Figura 2.23- Geometria sugerida por Petersen et al. (1998)

Petersen et al., (1998) obtiveram curvas de calibração teóricas considerando os modelos de atrito de Wanheim e Bay, e de Prandtl. De seguida, comprimiram o provete em condições de lubrificação secas e marcaram os pontos experimentais no mapa composto pelas curvas de calibração teóricas. Assim, obtiveram o valor de 0.86 para o modelo de Prandtl e um valor de fator de aspereza de de Wanheim e Bay igual a 1, como ilustra a Figura 2.24.



Figura 2.24- Curvas de calibração considerando as diferentes leis de atrito (Petersen et al., 1998)

Como esperado, as curvas obtidas através da lei do fator de atrito de Wanheim e Bay conseguem prever melhor o comportamento da curva experimental devido ao facto de prevalecerem valores de pressão baixos.

Posteriormente, Tan *et al.*, (1998) publicaram um trabalho de modo a permitir o calculo do valor de atrito em processos de deformação plástica onde prevalecem diferentes valores de pressão normal. Para tal, sugeriram as geometrias apresentadas nas Figura 2.25 a), b) e c), para caraterizar o atrito em processos onde prevalecem pressões baixas, intermédias e elevadas.



Figura 2.25- Geometrias sugeridas por Tan et al., (1998)

Tan *et al.*, (1998), optaram pelo Alumio AA6082 com dois tratamentos diferentes (recozimento e encruamento por extrusão direta) para a realização dos ensaios experimentais. De seguida, obtiveram curvas de calibração teóricas para cada geometria sugerida, considerando o modelo de atrito constante. Finalmente, compararam as curvas de atrito e os valores de pressão normal obtidos experimentalmente com os valores das simulações.

Ao analisar os resultados obtidos, Tan *et al.*, (1998) verificaram que as curvas de atrito teóricas possuem maior abertura para o material que foi endurecido. Também aferiram que, para o mesmo material e lubrificante, os anéis com geometria concava (Figura 2.25 a)) apresentavam menor valor de atrito, os anéis com secção retangular (Figura 2.25 b)) apresentam um valor intermédio e os anéis com a forma convexa (Figura 2.25 c)) apresentam valor superior.

Através dos resultados de pressão normal obtidos, Tan *et al.*, (1998) confirmam o facto de cada provete permitir caraterizar o atrito a diferentes gamas de pressão. Posto isto, aferiram que os valores da pressão são superiores para o material encruado, e que este facto pode influenciar significativamente o valor do atrito.

Recentemente, com o objetivo de superar as dificuldades na medição do diâmetro interno, Hu et al., (2015) e Hu *et al.*, (2017) propuseram dois métodos designados por ensaio de anel com bossa exterior (EABE) e anel com bossa interior (EABI), respetivamente. Consideraram as figuras 2.26 (a) e (b) para a realização do EABE e EABI.

Os autores afirmaram que estes métodos permitem obter uma medição mais precisa do diâmetro da bossa, uma vez que não esta em contacto direto com os pratos de compressão (não é deformado ao longo do ensaio).

(mm)

Hu et al., (2015) afirma que a geometria do provete utilizada para o anel com bossa externa foi escolhida com base na geometria do ensaio de compressão em anel (6: 3: 2), afirmando que a altura e largura do boss possuem o mesmo valor (6: 3: 2: 0.4).

Por outro lado, Hu *et al.*, (2017) utilizou uma relação de dimensões para o anel com bossa interior igual a 7: 4: 2, com o valor da altura da bossa igual a 16 % do valor da altura do provete.

(mm)



Figura 2.26- Geometria dos provetes de anel com bossa: a) exterior (Hu et al., 2015); b) interior (Hu et al., 2017)

As propriedades do material foram obtidas através da realização do ensaio de tração e utilizaram a equação de Ludwik-Hollomon para descrever o comportamento do material. A Figura 2.27 ilustra os níveis de deformação do provete para diferentes valores de atrito.



Figura 2.27-Resultados em termos de deformação para os ensaios propostos por Hu et al., (2015) e (Hu *et al.*, 2017) para um valor percentual de redução de altura, $R_h = 60\%$ para o RCT-B e 55 % para o RCT-IB: (a) RCT-B com m = 0; (b) RCT-B com m = 0.3; (c) RCT-IB com m = 0; (d) RCT-IB com m = 0.5

Após analisar a figura 2.27, Hu et al., (2015) e Hu *et al.*, (2017) aferem que os fenómenos que acontecem ao diâmetro interno são os mesmos que os que acontecem ao ensaio de compressão de anel convencional e constatam que para ambos os casos as bossas sofrem muito pouca deformação.

As figuras 2.28 (a) e (b) apresentam, respetivamente, as curvas de calibração obtidas pelo método da bossa interior, anel convencional e bossa interior. As curvas de calibração do EABE foram obtidas por monitorização do diâmetro da bossa exterior e a percentagem de redução de altura. Por outro lado, as curvas de calibração obtidas para o EABI resultam da monitorização do diâmetro da bossa interior durante em função da percentagem de redução de altura do provete.



Figura 2.28- Mapas de calibração do atrito obtidos a partir do FEM; a) Curvas de calibração obtidas a partir de EABE (Hu *et al.*, 2015); b) Curvas de calibração do EABI vs. EAC (Hu *et al.*, 2017)

Hu et al. (2015) e Hu *et al.* (2017) realizaram os ensaios experimentais para várias condições de lubrificação, utilizando provetes em anel, provetes com bossa exterior e provetes com bossa interior. Confirmaram que a bossa exterior do ensaio EABE e a bossa interior do ensaio EABI mantinham a sua geometria circular e o diâmetro interno do anel possuía uma geometria elíptica. Apos obter os respetivos valores de atrito, verificou que, para as mesmas condições de atrito, os ensaios que utilizam bossas apresentavam valores diferentes ao ensaios em anel (os valores obtidos pelo ensaio de anel são no máximo 15% superiores aos obtidos pelo método EABE) (Hu et al., 2015; Hu *et al.*, 2017).

Após analisar a figura 2.28 (a), Hu et al., (2015) afirmou que a bossa interior perde a sua sensibilidade para valores de atrito superiores a 0.5.

Ao analisar a figura 2.28 (b), Hu *et al.*, (2017) afirmou que as curvas de atrito obtidas através do método da bossa interior coincidem com as curvas do ensaio de anel convencional, ate um valor de atrito de 0.5.

Como foi possível verificar, o EAC é o ensaio mais utilizado para caracterizar o atrito na inerfaçe ferramenta-peça em processos que possuem um estado de tensão compressivo, nomeadamente processos de deformação plástica na massa.

Recentemente, Bay et al. (2008) apresentaram um trabalho com o objetivo de divulgar as metodologias mais utilizadas para caracterizar as condições de atrito em processos de deformação plástica de chapa (material que sofre expansão superficial).

Deste modo, Bay et al. (2008) organizaram os ensaios em dois grandes grupos:

- Ensaios de processos, que consistem em aplicar processos típicos de deformação plástica de chapa com o objetivo de avaliar a performance do lubrificante.
- Ensaios simulativos, que são ensaios que simulam as condições de tensão típicas dos processos de deformação plástica de chapa com o objetivo de estudar as condições de lubrificação de modo controlado.

Bay et al. (2008) apresenta a Figura 2.29 com o objetivo de apresentar os diferentes ensaios simulativos.



7. Dobragem sobre tensão com uma extremidade fixa

Figura 2.29-Representação esquemática de ensaios simulativos de deformação plástica de chapa

Assim, Bay et al. (2008) realizaram os ensaios simulativos 2,3 e 6, para diferentes lubrificantes. De seguida, comparam as curvas de evolução da tensão de corte com o alongamento obtidas para os diferentes lubrificantes, permitindo selecionar qual o melhor lubrificante para cada ensaio simulativo. Finalmente, realizaram ensaios de processos de corte por arrombamento para os mesmos lubrificantes,

permitindo comparar, através de curvas de tensão de corte, as características lubrificantes dos lubrificantes.

De modo a concluir, Bay et al. (2008) afirma que os ensaios simulativos apresentados mostraram-se eficientes na avaliação de diferentes lubrificantes, permitindo selecionar os lubrificantes mais apropriados para cada processo de produção. Também afirma que os ensaios de processo de corte por arrombamento mostraram que os ensaios simulativos funcionaram com sucesso.

Uma vez que os processos DPCM deformam chapa através da aplicação de esforços tridimensionais, típicos dos processos de deformação na massa, não é possível aplicar nenhum destes ensaios simulativos (deformação de chapa).

Esta dissertação é apresenta uma variante do EAC com o objetivo de tornar possível a caraterização do atrito em processos de DPCM. Normalmente as chapas possuem espessuras baixas, o que impossibilita a aplicação do EAC pelo facto de não ser possível obter provetes em anel com uma relação de dimensões (6: 3: 2).

De modo a tornar possível a caraterização do atrito nestes processos, é proposto o EAE. Os anéis, com um valor de altura semelhante às espessuras obtidas em chapa, são sobrepostos até obter provetes com uma relação geométrica igual a do EAC (6:3:2). Após a compressão do provete, é possível obter o valor de atrito por intermédio de curvas de calibração obtidas pelo método de elementos finitos.

3. Trabalho Experimental

O material utilizado no trabalho experimental provém de um único bloco de liga de alumínio AA6061-T651, possuindo um teor em alumínio superior a 61%. Este bloco foi obtido por fundição, de seguida sofreu um tratamento térmico e foi arrefecido artificialmente.

A liga de alumínio AA6061-T652 é considerada uma liga de resistência média e é usada sobretudo em aplicações que combinam uma boa resistência mecânica com elevada resistência à corrosão. Esta liga é utilizada no fabrico de componentes da indústria automóvel, peças para máquinas, entre outros.

Este capítulo iniciar-se-á com a caraterização mecânica do material através do ensaio de compressão cilíndrica, seguindo-se o EAC e o EAE. Posteriormente, serão abordadas as metodologias de lubrificação e de ensaio utilizadas na realização dos ensaios. Finalmente, será apresentado o modo como todos os provetes foram obtidos e os equipamentos utilizados.

3.1. Caraterização mecânica do material

A fim de garantir a credibilidade dos resultados obtidos através da realização de simulações numéricas, torna-se necessário efetuar a caraterização mecânica do material.

Neste trabalho optou-se por utilizar o ensaio de compressão cilíndrica para efetuar a caraterização mecânica da liga de alumínio AA6061-T651.

Como visto anteriormente (pagina 18), Han (2002) afirma que a existência de anisotropia possui alguma influência na geometria do anel, quando o atrito na interface ferramenta-peça é baixo, proporcionando uma estimação errada dos valores de atrito. Deste modo, torna-se necessário efetuar uma caraterização da anisotropia, através da realização de ensaios de compressão cilíndrica, a fim de garantir que o material irá comportar-se do mesmo modo para cada direção do material (x: y: z).

3.1.1. Ensaio de compressão de um cilindro

A norma utilizada nos ensaios de compressão cilíndrica é a E9–89a (2000), e esta tem de ser respeitada de modo a assegurar que os resultados são confiáveis. Para tal, como visto anteriormente (pagina 5), o ensaio de compressão de um cilindro deve ser efetuado em condições quasi-estáticas e a velocidade de compressão máxima deve ser igual a 5 *mm/min*.

O ensaio de compressão cilíndrica encontra-se limitado pela relação de dimensões do provete, $1 \le \left(\frac{h_0}{d_0}\right) \le 3$, e assumiu-se que os provetes utilizados devem possuir um valor de $\left(\frac{h_0}{d_0}\right) = 1,5$. Na Figura 3.1 encontra-se representada a geometria do provete, bem como as dimensões escolhidas.



(mm)

Figura 3.1 - Provete de compressão e respetivas dimensões

De modo a poder visualizar a presença de anisotropia através da comparação das curvas de tensãoextensão, foram realizados ensaios de compressão de provetes provenientes de três direções diferentes do material (Figura 2.16). O plano dos ensaios realizados encontra-se apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Plano de ensaios para compressão de provetes nas direções x, y e z

Orientação do provete	Prato	Número de provetes	Tipo de lubrificação	Lubrificante
х		3		
У	Polido	3	Única	Massa grafitada
Z		3		
Número total de provetes		9		

A Figura 3.2 apresenta as curvas de tensão-extensão obtidas para cada direção de compressão.



Figura 3.2 - Curvas tensão-extensão para as direções de compressão

Ao analisar as curvas de tensão-extensão apresentadas na Figura 3.2, verifica-se que estas são muito semelhantes entre si, independentemente a orientação do provete. Assim, podemos afirmar que o material possui um valor de anisotropia muito baixo e, ao mesmo tempo, podemos assumir que esta terá um efeito desprezável nos resultados obtidos experimentalmente (Han, 2002).

Após confirmar que o efeito da anisotropia é desprezável, optou-se por apenas produzir provetes com a orientação em *z*.

Optou-se por realizar ensaios de compressão cilíndrica com metodologias de lubrificação única e periódica. Assim, realizaram-se os ensaios apresentados na Tabela 3.2 com o objetivo de obter a caraterização da liga de alumínio AA6061-T651.

Orientação do provete	Prato	Lubrificante	Tipo de carregamento	Número de provetes
Z		Magaa grafitada	Contínuo	3
	Polido	Massa grantada	Incremental	3
		Toffen	Contínuo	3
		renon	Incremental	3
	12			

Tabela 3.2 - Plano de ensaios para compressão cilíndrica

Para a realização dos ensaios com lubrificação periódica considerou-se que o ensaio fosse interrompido após o prato de compressão móvel deslocar, no máximo, 5% do valor da altura do provete, de modo a obter um valor de atrito constante na interface ferramenta-peça.

A escolha deste valor deve-se ao facto de Martins e Rodrigues (2010) sugerirem que para a realização do ensaio de compressão em estado de deformação plana fosse feita uma lubrificação periódica da interface ferramenta-peça, e que esta fosse feita após o prato móvel deslocar no máximo 5% do valor da altura do provete.

Após realização dos ensaios apresentados na Tabela 3.2, foi possível obter a curva tensão-extensão da liga de alumínio AA6061-T651. Esta curva foi obtida através da realização de ensaios cilíndricos com uma metodologia de lubrificação periódica e com a utilização de teflon.

A equação (3.1) apresenta a curva proposta por Ludwik-Hollomon a fim de representar a caraterização o material, com os respetivos valores obtidos de k e de n.

$$\sigma = 431.7. \, \varepsilon^{0.068} \, (MPa) \tag{3.1}$$

3.2. Ensaio de anel convencional e de anéis empilhados

O EAC é muito utilizado para caraterizar o atrito na interface ferramenta-peça, com ou sem lubrificação. Este ensaio não é um ensaio normalizado, mas a relação geométrica de dimensões, 6: 3: 2, é utilizada como se fosse apresentada por uma norma.

O EAE é proposto como uma variante do ensaio em anel com o objetivo de tornar possível a caraterização do atrito em processos de DPCM. É muito pouco comum que a chapa possua um valor de espessura suficiente a fim de possibilitar a aplicabilidade do EAC (6:3:2). Neste ensaio é proposto

que sejam empilhados anéis com mesmo valor de espessura até obter provetes com relação geométrica idêntica a utilizada no ensaio em anel.

De modo a manter os anéis alinhados utilizou-se, por vezes, um pingo de cola aplicado na zona lateral sem influenciar a altura do provete. A Figura 3.3 ilustra a geometria e as dimensões dos provetes utilizados para a realização dos EAC, EAE com 2 e 4 anéis. As dimensões utilizadas para os provetes em anel convencional são semelhantes as utilizadas por Martins e Cristino (2010).

(mm)



Figura 3.3 - Geometria e dimensões dos provetes de anel, de 2 e 4 anéis empilhados

Realizaram-se estes ensaios de modo a quantificar o atrito na interface ferramenta-peça para três condições de lubrificação. A Tabela 3.3 apresenta o plano de ensaios considerado para a realização dos ensaios de caraterização do atrito. Assim como na caraterização da liga de alumínio AA6061-T651, foi considerada a utilização da metodologia de lubrificação periódica para a realização dos EAC e EAE.

Como se pode verificar na Tabela 3.3, realizaram-se ensaios com pratos de compressão polidos (Figura 3.9 a)), utilizando folhas de teflon com uma espessura de 1 *mm* e massa grafitada como lubrificante, de modo a obter baixos valores de atrito. Finalmente, realizaram-se ensaios sem a utilização de lubrificante e com pratos de compressão rugosos (Figura 3.9 b)) para simular uma condição de atrito elevada.

Tipo de ensaio	Orientação do provete	Prato	Lubrificante	Número de ensaios
		Polido	Massa grafitada	3
EAC		rondo	Teflon	3
		Rugoso	Seco	1
EAE com 2 anéis	z	Polido	Massa grafitada	3
			Teflon	3
		Rugoso	Seco	1
			Massa grafitada	3
EAE com 4 anéis		Polido	Teflon	3
		Rugoso	Seco	1
	21			

Tabela 3.3 - Plano de ensaios para realização dos ensaios em anel

3.3. Metodologia utilizada para a realização dos ensaios

Neste subcapítulo são apresentadas todas as metodologias utilizadas para realização dos ensaios, sendo construídas com o auxilio do livro de Técnicas de Laboratório, publicado por Martins e Cristino (2010).

A figura 3.4 (a) ilustra a metodologia utilizada na realização dos ensaios de compressão de um cilindro com lubrificação única (azul) e periódica (cinzento). A figura 3.4 (b) apresenta as metodologias utilizadas na realização dos EAC (cinzento) e EAE (azul).



Figura 3.4-Metodologias utilizadas nos diferentes ensaios: (a) compressão cilíndrica com lubrificação única (azul) e periódica (cinzento); (b) EAC (cinzento) e EAE (azul)

3.4. Preparação dos provetes e equipamentos utilizados

A fim de obter os provetes necessários para a realização dos ensaios descritos, procedeu-se ao corte do bloco de alumínio AA6061-T651 em paralelepípedos mais pequenos, com o objetivo de minimizar o desperdício de material, e ao mesmo tempo, facilitar o processo de maquinagem. Os cortes foram realizados na maquina de serra MAQFORT (Figura 3.5 (a)), modelo WE 210 S, com descida hidráulica. Posteriormente, realizou-se a maquinagem dos paralelepípedos até se obter a geometria dos provetes com as respetivas dimensões. A máquina-ferramenta utilizada foi o torno convencional da marca QUANTUM (Figura 3.5 (b)), modelo D320x920SG.



(a)
 (b)
 Figura 3.5 - Equipamentos utilizados na preparação dos provetes: (a) serrote MAQFORTE; (b) Torno convencional QUANTUM

Após obtenção dos provetes foi realizado o polimento das superfícies planas em lixa P800 de modo a obter um bom acabamento superficial, e assim, eliminar a presença de rebarbas. As Figura 3.6 (a), (b), (c) e (d) apresentam os provetes obtidos.



Figura 3.6-Provetes obtidos e utilizados para a realização dos ensaios: (a) Provete cilíndrico; (b) Provete em anel; (c) 2 Anéis empilhados; (d) 4 Anéis empilhados

Todos os ensaios de compressão apresentados foram realizados através da Maquina de ensaios Instron, Modelo 1200kN Satec, que se encontra localizada no laboratório de tecnologia mecânica do IST, pode ser visualizada na Figura 3.7 (a). A Figura 3.7 (b) apresenta as principais caraterísticas desta maquina.

A escolha dos parâmetros de compressão e a aquisição dos dados utilizados foi feita a partir do software informático Bluehill, com a segunda versão.



Controlo numérico	Instron 5500
Capacidade máxima	1200 (kN)
Capacidade máxima de	
medição da célula de	1200 (kN)
carga	
Velocidade	0-200 (<i>mm/min</i>)
Resolução do transdutor	0.001 (mm)
de deslocamento	0.001 (11111)
Dimensões gerais	4636 × 1500 × 940 (<i>mm</i>)
Abertura máxima vertical	2311 (<i>mm</i>)
Número de colunas	2
Peso aproximado	6600 (kg)
Tipos de ensaios	Tração e compressão

(a)

(b)

Figura 3.7-Maquina de ensaios Instron, Modelo 1200kN Satec: (a) Imagem da Maquina de ensaios; (b) Tabela com as principais caraterísticas

A ferramenta utilizada na compressão dos provetes encontra-se apresentada na Figura 3.8, onde é possível distinguir os pratos de compressão e o provete. Esta ferramenta possibilita a mudança dos pratos de compressão, permitindo utilizar pratos de compressão adequados a cada tipo de analise.



Figura 3.8-Ferramenta utilizada nos ensaios de compressão

Para a realização dos ensaios propostos foram considerados dois tipos de pratos, como ilustra a Figura 3.9. Os pratos com maior valor de rugosidade media (Figura 3.9 (a)) foram utilizados com o objetivo de obter um valor de atrito elevado, permitindo simular condições extremas de atrito. Os pratos com menor valor de rugosidade media (Figura 3.9 (b)) foram considerados para obter o menor valor de atrito possível.



Figura 3.9-Pratos de compressão utilizados; (a) Pratos rugosos, com rugosidade media, $R_a = 0.533 \ \mu m$;

(b) Pratos polidos, com rugosidade media, $R_a = 0.1 \ \mu m$

4. Trabalho Numérico

Este capítulo terá inicio com a apresentação do software utilizado para a realização do trabalho numérico, designado por I-Form 2D. Posteriormente, será abordado o modelo numérico adotado nas simulações numéricas dos EAC e EAE.

Finalmente, é apresentado um conjunto de analises de sensibilidade com o objetivo de compreender a influência do atrito na ferramenta, do atrito entre os anéis, da velocidade de compressão, da dimensão da malha, do incremento de tempo, e da existência de defeitos geométricos, sobre os resultados obtidos.

4.1. Simulação numérica

O programa I-Form 2D (Nielsen et al., 2013) foi o programa de método de elementos finitos utilizado para efetuar as simulações numéricas necessárias para a validação dos resultados experimentais.

O I-Form 2D tem por base uma formulação de elementos finitos de escoamento plástico quási-estático. Este tipo de formulação apresenta um algoritmo de integração temporal implícito, o qual nem sempre consegue assegurar a convergência do processo iterativo. A principal vantagem que se obtém a partir da utilização deste programa está associada a uma garantia de equilíbrio no final de cada incremento, o que é possível por minimização do resíduo de forças (Rodrigues e Martins, 2010).

A Tabela 4.1 apresenta as principais caraterísticas seguidas pelo programa de elementos finitos I- Form 2D.

Formulação de elementos finitos	Formulação de escoamento
Equações de equilíbrio	Quasi-estáticas
Equações constitutivas	Rígido-plásticas, Rígido-viscoelásticas
Estrutura base	Matriz de rigidez
Minimização do resíduo de forças em cada incremento	Sim
Algoritmo de integração temporal	Implícito*
Dimensão relativa dos incrementos	Media
Tempo de CPU relativa por incremento	Médio
Qualidade relativa dos resultados obtidos	Media
Aplicações típicas	Deformação plástica na massa

Tabela 4.1- Principais caraterísticas e aplicações da formulação do escoamento utilizada pelo I- FORM2 (adaptado de Rodrigues e Martins, 2010)

*implícito na perspetiva de verificação do equilíbrio de forças entre duas iterações sucessivas.

4.2. Modelos numéricos

Neste subcapítulo são apresentados os modelos numéricos considerados para a realização das simulações necessárias para que, posteriormente, seja possível validar os resultados experimentais obtidos.

De seguida, são apresentados os modelos numéricos e os parâmetros escolhidos para os EAC e os EAE.

4.2.1. Modelo numérico dos ensaios em anel e anéis empilhados

Os modelos utilizados para as simulações dos EAC, EAE de 2 e de 4 anéis, são representados por uma estrutura de malha de elementos quadrangulares com um tamanho de elemento de 1 *mm*. A figura 4.1 apresenta, esquematicamente, os modelos numéricos utilizados para os EAC, EAE de 2 e de 4 anéis.



Figura 4.1- Modelos numéricos utilizados: (a) Compressão em anel convencional; (b) 2 anéis empilhados; (c) 4 anéis empilhados

Para a realização de compressão de anéis empilhados torna-se necessário referir a existência de diferentes regiões de atrito. Estas regiões de atrito resultam da interação ferramenta-peça (m_f) , e do contacto entre os anéis empilhados (m_d) , como apresenta a Figura 4.2.



Figura 4.2-Representação esquemática das diferentes regiões de atrito resultantes do ensaio de anéis empilhados

A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros considerados para a realização das simulações numéricas do ensaio de anel convencional, de 2 e 4 anéis empilhados. Estes parâmetros foram obtidos através de realização de analises de sensibilidade, e estas serão apresentadas de seguida.

Simetria	У
Tipo de malha	Quadrangular
Tamanho de elemento	1 <i>mm</i>
Tempo de incremento	0.1 seg
Numero de steps	720
Tipo de geometria	Axi simétrica
Tipo de material	Rígido-plástico
Valor de k	431.7
Valor de n	0.068
Critério de plasticidade	Von Mises
Velocidade do prato superior	5 mm/min
Tipo de atrito	Prandtl
Valor de atrito m_d^*	0.65
Tempo de computação médio	30 seg

Tabela 4.2-Parâmetros utilizados na realização dos ensaios em anel e de discos empilhados

*Este valor de atrito apenas é aplicado para os ensaios de discos empilhados.

4.3. Análises de sensibilidade

Antes de se proceder a realização do modelo numérico para cada caso, torna-se necessário efetuar analises de sensibilidade afim de compreender a influência de cada parâmetro nos resultados obtidos (curvas de evolução da força com a percentagem de redução da altura e geometria final do provete ensaiado). Estas analises foram feitas para o caso com maior complexidade, compressão de 4 anéis empilhados (Figura 4.1 c)), uma vez que possui um maior numero de parâmetros.

As analises de sensibilidade têm como principal objetivo perceber qual a influência, nos resultados, do valor de atrito na interface ferramenta-provete, do valor de atrito entre anéis, da velocidade do ensaio, da dimensão da malha, do incremento de tempo, e de alguns defeitos geométricos. Deve ser realçado que estas analises mostram-se importantes para a perceção de quais os parâmetros a utilizar na validação numérica dos resultados obtidos experimentalmente.

4.3.1. Coeficiente de atrito

Para a realização do estudo de sensibilidade do atrito consideraram-se os casos apresentados na Tabela 4.3. Foram escolhidos estes casos a fim de compreender a influência que o atrito entre os anéis, m_d , possui sobre as curvas de evolução de força com a percentagem de redução de altura e sobre a geometria final do provete. Deve ser referido que valores de atrito entre a pratos e o provete foram escolhidos com o objetivo de coincidir com os valores típicos de atrito obtidos experimentalmente para os lubrificantes utilizados na realização dos ensaios experimentais.

Tabela 4.3- Parâmetros de simulação utilizados para a analise de sensibilidade do atrito e respetivos tempos de computação

Velocidade v (mm/min)	Compr do ele l _e (1	imento mento mm)	Incremento de tempo Δt (seg)	Numero de incrementos N	Atrito na interface pratos-provete <i>m_f</i>	Atrito entre os discos m _d	Tempo de computação T (seg)
						0.20	60
	0.1	0.1	720	0.11	0.40	38	
					0.60	30	
5					1.00	32	
5					0.20	180	
					0.20	0.40	68
					0.20	0.60	44
						1.00	35
Número de r	nós	5124		•		•	•
Número de elen	nentos	4800					

A Figura 4.3 apresenta a evolução da força com a percentagem de redução de altura do provete para diferentes valores de atrito entre os anéis, para o caso em que o atrito entre os pratos e o provete é 0.11. Nesta figura também se encontra ilustrada a imagem do provete quando os valores de força tendem a instabilizar.



Figura 4.3-Evolução da força com a redução de altura para um valor de atrito na interface ferramenta-provete de $m_f = 0.11$, tendo em conta diferentes valores de atrito entre os discos

Ao analisar o gráfico e a imagem ilustrativa do provete correspondentes a Figura 4.3, verifica-se que os anéis tendem a deslizar entre si, originando instabilidade do ensaio e discordância entre os resultados obtidos, quando o valor de atrito entre os anéis é baixo ($m_d = 0.20$), apesar de os resultados coincidirem até, aproximadamente, 40 % de redução de altura.

Como apresentado pela Tabela 4.3, também foi realizado o mesmo estudo para um valor de atrito de 0.20 na interface ferramenta-peça, e os resultados encontram-se ilustrados na Figura 4.4.



Figura 4.4- Evolução da força com a redução de altura para um valor de atrito na interface ferramenta-provete de $m_f = 0.20$, tendo em conta diferentes valores de atrito entre os discos

Ao observarmos a Figura 4.4 podemos confirmar que quando o atrito entre os anéis é baixo, o ensaio tende a instabilizar e a curva de evolução da força deixa de coincidir com as restantes curvas. Neste caso, o valor de atrito na ferramenta é semelhante ao atrito entre os anéis, esta instabilidade tende a surgir mais cedo (aproximadamente 10 % de redução de altura), tornando-se visível a instabilidade dos valores de força devido ao deslizamento dos anéis.

4.3.2. Velocidade de ensaio

A realização desta analise trona-se importante para compreender a influência do valor da velocidade do ensaio nos resultados obtidos. Foram feitos estudos para vários valores de velocidade de ensaio, os parâmetros considerados encontram-se apresentados na Tabela 4.4.

Segundo a norma ASTM-E9-89a (1996) para a realização dos ensaios de compressão de um cilindro, para que o ensaio seja realizado em condições quasi-estáticas, a velocidade do prato deve ser igual ou inferior a 5 *mm/min*.

Tabela 4.4- Parâmetros de simulação utilizados para a analise de sensibilidade da velocidade e respetivo tempo de computação

	Comprime	nto	Incremento	Numero de	Atrito na interface	Atrito entre	Tempo de
	do elemer	nto	de tempo	incrementos	pratos-provete	os discos	computação
(mm/min)	l _e (mm))	$\Delta t \ (seg)$	Ν	m_{f}	m_d	T (seg)
3				1200			64
5				720			40
30	1		0.1	120	0.10	0.65	8
60				60			4
120				30			3
Número de	e nós	84					

Número de elementos 48

Deve ser realçado que o comprimento do elemento (l_e) e o incremento de tempo (Δt) , entre avanços, do prato foram mantidos constantes. O número de incrementos de deslocamento do prato foi alterado com o objetivo de se poder alcançar o mesmo valor de deslocamento do prato (Δl correspondente a 55 % de redução de altura), como mostra a equação (4.1),

$$N = \frac{\Delta l \ (mm)}{v \ (mm/min) \ \times \Delta t \ (min)} \tag{4.1}$$

onde *N* é número de incrementos, v é a velocidade de realização do ensaio e Δl é o deslocamento total do prato de compressão móvel.

A Figura 4.5 apresenta as curvas de evolução da força com a percentagem de redução de altura para os diferentes valores de velocidade considerados na Tabela 4.4.



Figura 4.5- Evolução da força com a percentagem de redução de altura, para as diferentes velocidades de compressão

Ao analisar a Figura 4.5 verifica-se que apenas a curva de força referente a uma velocidade de compressão de 120 mm/min difere ligeiramente das restantes, atingindo uma diferença percentual de cerca de 7 % (para 55 % de redução de altura) em relação a curva obtida por intermédio da velocidade de 5 mm/min. Isto comprova que, mesmo que haja uma variação no valor da velocidade, não há qualquer efeito significativo nos resultados obtidos numericamente.

Para a realização das simulações utilizou-se a velocidade de 5 *mm/min* de modo a coincidir com a velocidade de compressão proposta pela norma ASTM-E9-89a (1996).

4.3.3. Dimensão da malha

Para a analise de sensibilidade da dimensão da malha com elementos quadrangulares, foi analisado três tamanhos do elemento diferentes. Os parâmetros utilizados para efetuar as simulações referentes a este estudo e os respetivos tempos de computação encontram-se apresentados na Tabela 4.5. Deve ser salientado que anel possui 2 mm de altura e, por isso, não foi possível estudar tamanhos de elemento superior a 1 mm.

Tabela 4.5- Parâmetros de simulação utilizados para a analise de sensibilidade da malha e respetivo tempo de
computação

Velocidade v (mm/min)	Comprimento do elemento $l_e (mm)$	Número de nós	Número de elementos	Atrito na interface pratos- provete <i>m_f</i>	Atrito entre os anéis <i>m_d</i>	Tempo de computação T (min)
	0.06	13736	13200			83
5	0.10	5124	4800	0.10	0.65	25
	1	84	48			1
Incremento de tempo $\Delta t \ (seg)$		0.1				
Numero de incrementos N		720				

Ao analisar os tempos de computação destaca-se a malha com um comprimento de elemento igual a 1 *mm*. A Figura 4.6 apresenta as curvas de força resultantes das simulações realizadas através da utilização dos parâmetros apresentados na Tabela 4.5.



Figura 4.6-Evolução da força com a redução de altura, para cada tamanho de elemento

Ao analisar a Figura 4.6 verifica-se que, independentemente do comprimento do elemento, as curvas de evolução de força coincidem entre si.

Para a realização das simulações necessárias foi escolhido um tamanho de malha de 1 *mm*, uma vez que permite obter resultados validos e apresenta um tempo de computação muito inferior.

4.3.4. Incremento de tempo

Foi feita uma analise de sensibilidade para diferentes valores de incrementos de tempo, e a Tabela 4.6 apresenta os parâmetros considerados e os respetivos tempos de computação.

Velocidade	Comprimento	Incremento	Numero de	Atrito na interface	Atrito entre	Tempo de
v	do elemento	de tempo	incrementos	pratos-provete	os anéis	computação
(mm/min)	l _e (mm)	∆t (seg)	Ν	m_{f}	m_d	T_c (seg)
5	1	0.1	720	0.10	0.65	60
		0.6				6
		1				3
		1.20				3

Tabela 4.6- Parâmetros de simulação utilizados para a analise de sensibilidade do incremento de tempo e respetivo tempo de computação

A partir dos valores do tempo de computação, facilmente concluímos que, para valores de incremento de tempo a partir dos 0.6 segundos os tempos de computação são semelhantes, apenas 6 segundos. Contudo, o tempo de computação máximo obtido é de 60 segundos, o que também é um valor satisfatório.

A Figura 4.7 apresenta os resultados obtidos através da utilização dos parâmetros apresentados pela Tabela 4.6, em termos da evolução da força com a redução de altura do provete.



Figura 4.7-Evolução da força com a redução de altura, variando o tempo de incremento

Após analisar a Figura 4.7, verifica-se um ligeiro aumento da força para valores maiores de redução de altura, quando se reduz o incremento de tempo. Contudo, apesar desta diferença ser muito reduzida, também é percetível que a estabilidade da evolução da curva aumenta para valores menores de incremento de tempo. Assim, pode afirmar- se que um menor incremento de tempo, implica melhores resultados das simulações numéricas devido ao algoritmo de contacto.

Para a realização dos ensaios foi escolhido um incremento de tempo de 0.1 segundos de modo a obter melhor estabilidade das curvas de força, com um tempo de computação satisfatório.

4.3.5. Geometria

Nesta secção foram realizadas analises aos possíveis defeitos geométricos que podem advir da realização dos ensaios experimentais. Deste modo, foram realizadas simulações que têm em conta defeitos geométricos de altura, de diâmetro interno, de diâmetro externo, de diâmetro interno e externo, e de desfasamento entre os anéis. A Tabela 4.7 apresenta os parâmetros utilizados para a realização das analises de sensibilidade aos defeitos geométricos apresentados.

Velocidade v	Comprimento do	Incremento de	Numero de	Atrito na interface	Atrito entre
(mm/min)	elemento l_e (mm)	tempo $\Delta t \ (seg)$	incrementos	pratos-provete	os anéis
			Ν	m_{f}	m_d
5	1	0.1	720	0.10	0.65

Tabela 4.7- Parâmetros de simulação utilizados para a analise de geometria

A Figura 4.8 apresenta as curvas de força resultantes do estudo de sensibilidade feito para o valor de altura dos anéis e respetivo posicionamento. Nesta analise considerou-se que a altura de um dos anéis varia, mais ou menos 0.1 *mm*, e que este pode situar-se junto do prato superior (móvel) ou numa posição intermedia, como apresentado pela a imagem ilustrativa da Figura 4.8.



Figura 4.8-Evolução da força com a redução de altura, variando a altura e o posicionamento do anel

Ao analisar a Figura 4.8, verificou-se que, mesmo variando a posição e a altura de um dos anéis, os resultados obtidos, em termos da evolução da força, mantêm-se idênticos. Isto permite concluir que quando os discos possuem diferenças ligeiras de altura, independentemente da sua localização, não resulta em qualquer efeito nos resultados obtidos.

Foi realizado o estudo de sensibilidade aos valores de diâmetro interno dos anéis, e a Figura 4.9 apresenta os resultados obtidos. Neste estudo foi considerado que um dos anéis possui um valor de diâmetro interno com mais ou menos 0.2 *mm* do valor nominal e que a posição deste pode variar, estando localizado junto ao prato superior ou numa posição intermedia. Estas situações encontram-se representadas pelas imagens ilustrativas da Figura 4.9.



Figura 4.9-Evolução da força com a redução de altura, variando diâmetro interno e o posicionamento de um anel

Após analisar a Figura 4.9, verifica-se que as curvas obtidas são coincidentes, apesar de haver diferenças nos valores de diâmetro interno e no posicionamento de um dos anéis.

Utilizando uma metodologia semelhante a analise de sensibilidade dos valores de diâmetro interno, também foram realizados estudos de sensibilidade ao diâmetro externo (Figura 4.10) e aos valores de diâmetro externo e interno (Figura 4.11).



Figura 4.10-Evolução da força com a redução de altura, variando diâmetro externo e o posicionamento de um anel

Nas Figura 4.10 e Figura 4.11 também se encontram apresentadas esquemas correspondentes a cada caso considerado, de modo a facilitar a perceção destas analises.



Figura 4.11-Evolução da força com a redução de altura, variando diâmetro interno, diâmetro externo e o posicionamento de um anel dos anéis

Após analisar as Figura 4.10 e Figura 4.11, confirma-se que as curvas de evolução da força com a percentagem de redução de altura permanecem semelhantes, independentemente o facto de existir anéis com valores de diâmetro ligeiramente diferentes. Posto isto, é possível afirmar que a existência de diferenças nas dimensões dos provetes não influência os valores obtidos em termos de curvas de evolução da força com a percentagem de redução de altura do provete.

Para finalizar este capitulo, realizou-se um estudo de analise de sensibilidade ao alinhamento dos anéis empilhados, como apresenta a Figura 4.12. Para este estudo consideraram-se quatro situações com um desfasamento de 0.1 *mm*, ou seja, desfasamento do anel superior, do anel intermédio, do anel superior e intermédio para o mesmo lado, e do anel superior e intermédio para lados opostos.


Figura 4.12- Evolução da força com a redução de altura resultante do desfasamento de anéis e seu posicionamento

Ao analisar a Figura 4.12, verificou-se que, mesmo variando a posição de um ou de dois anéis desfasados, os resultados obtidos, em termos da evolução da força, mantêm-se idênticos.

5. Resultados e Discussão

Este capítulo terá inicio com a apresentação dos resultados obtidos através de ensaios de compressão cilíndrica e obtenção da caraterização do Alumínio AA6061-T651.

De seguida, apresenta-se os resultados experimentais dos EAC com a utilização de massa grafitada e teflon. Realiza-se a validação numérico-experimental através de analise a curvas de evolução da força com a percentagem de redução de altura do provete e obtém-se os respetivos valores de atrito através das curvas de calibração do atrito.

Posteriormente, apresenta-se os resultados experimentais dos EAE com a utilização de massa grafitada e teflon. Realiza-se a validação numérico-experimental através de analise a curvas de evolução da força com a percentagem de redução de altura do provete e obtém-se os respetivos valores de atrito através das curvas de calibração do atrito.

Por último, apresenta-se os resultados experimentais obtidos através do trabalho realizado com o objetivo de explorar uma condição de atrito elevada.

5.1.1. Propriedades do material

Com o objetivo de alcançar uma boa concordância entre as simulações numéricas e os ensaios experimentais, torna-se crucial a obtenção da curva de evolução da tensão com a extensão da Liga de Alumínio da serie 6061-T651. Assim, realizaram-se os ensaios de compressão de provetes cilíndricos apresentados na Tabela 3.2.

As Figura 5.1 a) e b) apresentam a metodologia utilizada na obtenção das curvas de escoamento do material, através da realização de ensaios com lubrificação periódica. A curva de tensão-extensão do material resulta numa curva que apenas descreve a zona elástica do primeiro incremento de deslocamento e, de seguida, descreve as zonas plásticas de cada incremento de deslocamento.



Figura 5.1- Exemplo de curvas tensão-extensão com utilização de lubrificação periódica; (a) Massa grafitada; (b) Teflon

Na Figura 5.2 encontram-se representadas as curvas tensão-extensão obtidas, através do ensaio de compressão cilíndrica com a metodologia de lubrificação única, para a massa grafitada e teflon. Verifica-se que existe repetibilidade dos resultados obtidos para cada lubrificante. Nesta figura incluem-se fotografias dos provetes antes e após o ensaio.



Figura 5.2-Curvas tensão-extensão obtidas através da metodologia de lubrificação única com teflon e massa grafitada

Ao analisar a Figura 5.2 verifica-se que, inicialmente (até um valor de extensão de 0.2) as curvas correspondentes ao teflon apresentam menores valores de tensão, e, de seguida, estas tendem a coincidir as curvas obtidas para massa grafitada. Isto é explicado por não existir teflon na periferia do provete ao longo da realização do ensaio, e a medida que o ensaio decorre a área sem lubrificante aumenta (originando o efeito de barril). Apesar de não ser tão acentuado, este fenómeno também acontece com a utilização de massa grafitada, mas é compensado por existir sempre alguma quantidade de lubrificante na periferia).

Na Figura 5.3 encontram-se representadas as curvas de escoamento obtidas, através do ensaio de compressão cilíndrica com lubrificação periódica, para a massa grafitada e teflon. Ao analisar os resultados obtidos para cada lubrificante, é possível garantir a repetibilidade dos ensaios.



Figura 5.3-Curvas tensão-extensão obtidas através da metodologia de lubrificação periódica com teflon e massa grafitada

Após analisar a Figura 5.3 verifica-se que a utilização de lubrificação periódica com teflon torna-se mais eficiente, garantindo pouca influência do atrito nos valores obtidos. Pelas imagens dos provetes verifica-se que o ensaio realizado com teflon origina menor efeito de barril que o de massa grafitada.

A fim de verificar quais as diferenças entre as curvas obtidas por intermédio de cada metodologia de lubrificação, é apresentada a Figura 5.4 (a) para a utilização de teflon e a Figura 5.4 (b) para a massa grafitada.





Ao analisar a Figura 5.4 (a) confirma-se que a lubrificação periódica com teflon apresenta valores de tensão inferiores, o que também é visível pela aparência dos provetes.

A utilização de massa grafitada proporciona valores de tensão semelhantes, independentemente da metodologia utilizada, como é possível verificar através da Figura 5.4 b). Pela aparência dos provetes é possível notar que a utilização de lubrificação periódica proporciona menor efeito de barril.

Após analisar as Figura 5.4 a) e b) verifica-se que a combinação de uma metodologia de lubrificação periódica com a utilização de teflon proporciona menores valores de tensão.

A Tabela 5.1 apresenta os valores médios de K e n obtidos por intermédio de linhas de tendência a fim de caraterizar o escoamento através da função proposta por Ludwik-Hollomon, equação (5.1).

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad MPa \tag{5.1}$$

Tabela 5.1-Valores médios de K e n para cada condição de realização do ensaio de compressão de um cilindro

	Massa grafitada		Teflon	
	Lubrificação	Lubrificação	Lubrificação	Lubrificação
	única	periódica	única	periódica
Valores de K	454.33	451.24	453.99	431.72
Valores de n	0.077	0.074	0.089	0.068

A curva de tensão-extensão obtida da utilização de teflon com lubrificação periódica, foi a escolhida para caraterizar a liga de Alumínio 6061- T651 e a equação (5.2) descreve o seu comportamento.

$$\sigma = 431.7.\varepsilon^{0.068} \quad MPa \tag{5.2}$$

5.2. Ensaio de anel

Os EAC realizaram-se com o objetivo de obter o valor de atrito na interface entre o material e a ferramenta. De seguida são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios experimentais. Posteriormente, é feita a validação numérico-experimental através da evolução da força com a percentagem de redução de altura do provete. Finalmente, serão apresentadas as respetivas curvas de atrito teóricas e os valores de atrito obtidos para a massa grafitada e o teflon.

5.2.1. Resultados experimentais

A apresentação e análise dos resultados obtidos experimentalmente terá início com o estudo da evolução da força com o deslocamento. De realçar que as dimensões dos provetes de anel encontramse apresentadas na Figura 3.3, e o plano de ensaios pode ser consultado na Tabela 3.3. Todos os ensaios de caraterização de atrito foram realizados utilizando uma metodologia de lubrificação periódica (Figura 3.4).

A metodologia utilizada na obtenção das curvas de força é semelhante a apresentada para obtenção das curvas de tensão-extensão nos ensaios de compressão cilíndrica com metodologia de lubrificação periódica (Figura 5.1).

A Figura 5.5 apresenta as curvas de evolução da força com a percentagem de redução de altura dos provetes com massa grafitada e teflon.



Figura 5.5- Curvas de evolução da força com o deslocamento, através de ensaios de anel convencional, com massa grafitada e teflon

Ao analisar a figura 5.5 confirma-se a repetibilidade dos ensaios para ambas as condições de lubrificação. Também se verifica que utilizar folhas de teflon leva a obtenção de menores valores de força necessárias à deformação plástica do provete (o que é refletido pelo menor aparecimento do efeito de barril) devido a existência de um valor de atrito inferior.

Para a representação das curvas de força obtidas por intermédio da utilização de folhas de teflon (Figura 5.5) houve a necessidade de não ter em conta valores de força e deslocamento iniciais pelo facto de estes corresponderem a deformação do teflon.

5.2.2. Validação numérico-experimental

O processo de validação numérico-experimental é fundamental para efetuar a validação dos resultados experimentais. Este processo é realizado através da análise da evolução da força com a percentagem de redução de altura do provete, que se apresenta de seguida. A validação numérico-experimental foi realizada a partir de simulações obtidas para o EAC.

Após analisar os resultados obtidos através das simulações realizadas com os parâmetros obtidos por intermédio das análises de sensibilidades efetuadas (Tabela 4.2), tornou-se possível encontrar a curva que melhor acompanha o comportamento da força ao longo do ensaio para a massa grafitada e o teflon. Para tal, tornou-se necessário variar o valor de atrito na interface ferramenta-peça até obter uma curva que melhor descreve as condições do ensaio.

A Figura 5.6 apresenta as curvas de força experimentais obtidas, para cada lubrificante, com a curva de evolução da força numérica. Foi obtido m = 0.20 para a massa grafitada e m = 0.10 para o teflon,

como era de esperar a massa grafita alcança maiores valores de força e apresenta um efeito em barril mais notável.



Figura 5.6- Validação numérico-experimental, através da analise da evolução da força com percentagem de redução de altura, com massa grafitada e teflon

Ao analisar a Figura 5.6 verifica-se que os resultados obtidos a partir das simulações numéricas conseguem prever o comportamento dos ensaios até, aproximadamente, 25 % de redução de altura, para qualquer um dos lubrificantes. Após os 25 % de redução de altura, os valores de força experimentais assumem valores superiores aos numéricos. Isto acontece porque o valor da pressão é suficiente para expulsar quase todo o lubrificante, originando escassez de lubrificante na interface ferramenta-peça e consequente alteração do valor de atrito.

5.2.3. Obtenção dos valores de atrito através da utilização de curvas de calibração teóricas

Com o objetivo de calcular os valores de atrito através da realização de ensaios de anel é necessário obter previamente as curvas de calibração teóricas. Estas curvas foram obtidas por intermédio da realização de simulações feitas ao EAC para os diferentes valores de atrito, tendo em conta a curva de caraterização do material.

A Figura 5.7 apresenta o mapeamento dos pontos obtidos experimentalmente em termos de variação percentual do diâmetro interno, com a percentagem de diminuição de altura do provete e as curvas obtidas numericamente.



Figura 5.7- Representação das curvas de calibração e mapeamento dos pontos de atrito experimentais obtidos através de ensaios de anel convencional, com massa grafitada e teflon

As Figura 5.8 (a), (b), (c), (d) e as Figura 5.9 (a), (b), (c), (d) apresentam os provetes antes e após a realização dos ensaios, com massa grafitada e teflon, respetivamente.



Figura 5.8-Fotografias dos provetes de anel com massa grafitada: (a) antes da compressão; (b) 1º ensaio; (c) 2º ensaio; (d) 3º ensaio

Ao analisar os valores de atrito obtidos para a massa grafitada, através da Figura 5.7, verifica-se que os dois primeiros ensaios apresentam um valor de atrito semelhante, $0.18 \le m \le 0.20$. Inicialmente, até 20 % de redução de altura, o atrito é igual a 0.18, e a seguir aos 20 % os pontos experimentais são melhor acompanhados pela curva de m = 0.20, confirmando-se o aumento do valor de atrito devido a problemas de lubrificação.

O 3º ensaio apresenta valores de atrito diferentes aos dois primeiros, $0.15 \le m \le 0.18$. Por análise ao provete, verificou-se que existia alguma anomalia geométrica, o que resulta do facto de o diâmetro interno não ser constante ao longo da altura do provete.



Figura 5.9-Fotografias dos provetes de anel com teflon: (a) antes da compressão; (b) 1º ensaio; (c) 2º ensaio; (d) 3º ensaio

Na Figura 5.10 estão apresentadas, em vista de topo, os provetes com o objetivo de mostrar as irregularidades do diâmetro interno.



Figura 5.10-Vista de topo de alguns provetes após compressão com teflon: (a) 1ºensaio; (b) 2º ensaio; (c) 3º ensaio

Como ilustra a Figura 5.7, utilizar teflon permite obter valores de atrito entre $0.12 \le m \le 0.15$. Inicialmente, até 20 % de redução de altura, o atrito é igual a 0.12, e a seguir aos 20 % os pontos experimentais são melhor acompanhados pela curva de m = 0.13, confirmando-se o aumento do valor de atrito devido ao aumento da pressão.

O valor de atrito obtido por intermédio do ensaio de anel é superior ao obtido através da validação numérica pela análise das curvas de força. Este facto é explicado por Han (2002) quando afirma que para valores baixos de atrito a presença de anisotropia acaba por influenciar a geometria final do anel (originando uma geometria elíptica) podendo afetar as medições experimentais obtidas, como é possível verificar através das Figura 5.10 a), b) e c).

5.3. Ensaio de anéis empilhados

O EAE é apresentado como uma variante do ensaio de anel com o objetivo de permitir a caraterização de atrito em DPCM. Posto isto, apresentar-se-á de seguida os resultados obtidos através dos ensaios experimentais. Posteriormente, é feita a validação numérico-experimental através da evolução da força com a percentagem de redução de altura. Finalmente, serão apresentadas as respetivas curvas de atrito e os valores de atrito obtidos para cada condição de atrito.

5.3.1. Resultados experimentais

A apresentação e análise dos resultados obtidos experimentalmente terá inicio com o estudo da evolução da força com a percentagem de redução de altura do provete. De realçar que as dimensões dos provetes de EAE com 2 e 4 anéis encontram-se apresentadas na Figura 3.3, e o plano de ensaios encontra-se apresentado na Tabela 3.3.

A Figura 5.11 apresenta as curvas de força correspondentes aos ensaios de 2 e 4 anéis empilhados com massa grafitada.



Figura 5.11- Curvas de evolução da força com a percentagem de redução de altura dos provetes com massa grafitada

As curvas de força obtidas através dos EAE de 2 e 4 anéis (Figura 5.11) apresentam semelhanças entre si, o que confirma a existência de repetibilidade dos resultados obtidos.

A Figura 5.12 apresenta os provetes de 2 e 4 anéis, antes e depois de serem comprimidos com massa grafitada. Ao analisar a aparência dos provetes antes e depois da sua compressão, verifica-se que os provetes referentes aos 1º e 3º ensaios apresentam um bom alinhamento dos anéis, e o provete resultante do 2º ensaio apresenta um ligeiro desalinhamento entre os dois anéis (apesar de não ser notável através dos valores de força obtidos). O facto de haver um desalinhamento dos anéis, proporciona condições para que ocorram erros na medição dos valores de diâmetro interno, originando uma estimação ligeiramente superior do valor do atrito.



Figura 5.12-Fotografias dos provetes de 2 anéis com massa grafitada: (a) antes da compressão; (b) 1º ensaio; (c) 2º ensaio; (d) 3º ensaio

Por outro lado, as curvas de 4 anéis empilhados (Figura 5.11) são semelhantes as de 2 anéis empilhados até, aproximadamente, 20% de redução de altura, e, posteriormente, o valor de força tende a manter-se constante. Após analise destes resultados, concluiu-se que existem duas possíveis explicações para estes resultados, a primeira deve-se ao vácuo criado pela massa grafitada a fim de separar o provete apos cada compressão (permitindo a diminuição do atrito entre os anéis e consequente desalinhamento dos anéis) e a segunda devesse a existência de lubrificação circunferencial não homogenia.

A Figura 5.13 apresenta a aparência dos provetes de 4 anéis empilhados, antes e depois de serem comprimidos com massa grafitada. Através destas figuras é possível notar algum desalinhamento entre os anéis, especialmente no provete referente ao 3º ensaio.



Figura 5.13-Fotografias dos provetes de 4 anéis com massa grafitada: (a) antes da compressão; (b) 1º ensaio; (c) 2º ensaio; (d) 3º ensaio

A Figura 5.14 é apresentada com a finalidade de representar melhor o desfasamento dos anéis na realização dos ensaios de 4 anéis empilhados com massa grafitada.



Figura 5.14-Ilustração dos desfasamentos dos anéis empilhados com massa grafitada: (a) 2º ensaio de 2 anéis; (b) 2º ensaio de 4 anéis; (c) 3º ensaio de 4 anéis

Ao analisar a Figura 5.14 (a) verifica-se que a existência de ligeiro desalinhamento dos anéis no ensaio de 2 anéis empilhados (que corresponde ao 2º ensaio), afeta a forma do diâmetro interno.

Por outro lado, através das Figura 5.14 (b) e (c) é evidente que ocorreu a deformação localizada na realização dos ensaios de 4 anéis empilhados, porque os anéis superiores sofreram pouca deformação (possuem valores dos diâmetros interno e externo significativamente inferiores) em relação aos restantes. Por intermédio da Figura 5.14 (b) é claro que o anel superior se encontra localizado no interior do 2º anel.

Para o caso de compressão de 2 e 4 anéis empilhados com a utilização de teflon, é apresentada a Figura 5.15 que descreve o comportamento da força ao longo dos ensaios com a redução de altura.



Figura 5.15-Curvas de evolução da força com a percentagem de redução de altura dos provetes com teflon

Ao analisar a Figura 5.15 verifica-se que a maior parte das curvas obtidas para cada tipo de provete são semelhantes, garantindo a repetibilidade dos resultados obtidos. Umas das curvas pertencente aos ensaios de 2 anéis empilhados (2º ensaio) apresenta um comportamento semelhante à maioria das outras curvas até, aproximadamente, 15 % de redução de altura. Posteriormente, o declive da curva tende a aumentar. A figura 5.16 apresenta os provetes antes e depois de serem comprimidos, e através da figura 5.16 (c) é possível verificar que o facto de o teflon romper muito cedo devido a rebarbas nas arestas do provete (pode advir do polimento ineficiente do provete), origina maior quantidade de da superfície do provete em contacto direto com a ferramenta (o que aumenta o valor de atrito).



Figura 5.16- Provetes de 2 anéis com massa grafitada: (a) antes da compressão; (b) 1º ensaio; (c) 2º ensaio; (d) 3º ensaio

A Figura 5.17 apresenta os provetes de 4 anéis empilhados, antes e depois de serem comprimidos com massa grafitada.



Figura 5.17-Provetes de 4 anéis empilhados com teflon; (a) antes da compressão; (b) 1º ensaio; (c) 2º ensaio; (d) 3º ensaio

Através da analise as curvas de força pertencentes aos ensaios de 4 anéis empilhados com teflon (Figura 5.15), verifica-se que a curva pertencente ao 1º ensaio apenas é semelhante as restantes até, aproximadamente, 17 % de redução de altura. De seguida, a força continua a aumentar com menor declive, o que pode ser explicado pela existência de um erro geométrico, pois os anéis podiam não ser exatamente idênticos, originando uma diminuição da força.

5.3.2. Validação numérica-experimentalmente

Nesta secção procedeu-se à validação dos ensaios de anéis empilhados através da realização de análises numéricas ao EAC, uma vez que quando o atrito entre os anéis é superior ao atrito na interface ferramenta-peça o EAC apresenta resultados idênticos ao EAE. Uma vez que foi garantida a repetibilidade dos resultados para as condições estudadas, apenas é apresentada uma curva para cada situação com o objetivo de validar os resultados experimentais através dos numéricos, e, ao mesmo tempo, validar por comparação ao ensaio de anel convencional.

Com este objetivo, é apresentada a Figura 5.18 que compara as curvas de evolução da força com a percentagem de redução de altura do provete para os diferentes casos (EAC, EAE de 2 e 4 anéis) com massa grafitada e a respetiva evolução da força obtida numericamente.



Figura 5.18- Validação numérico-experimental, através da analise da evolução da força com percentagem de redução de altura, para os ensaios de 2 e 4 anéis com massa grafitada

As curvas de força que caraterizam o ensaio de 2 anéis empilhados apresentam um comportamento semelhante as obtidas pelo ensaio de anel convencional (apresentam a evolução do encruamento do material).

Ao analisar a Figura 5.18 verifica-se que a curva do ensaio de 2 anéis empilhados é semelhante a obtida a partir das simulações numéricas. Tal como no EAC, a massa grafitada também é expelida, mas existe uma compensação pela existência de um ligeiro desalinhamento dos anéis, originando a diminuição da área de contacto e consequente diminuição do valor da força, compensando este facto ao anterior. De salientar que este fenómeno apenas é visível com algum rigor, pois as suas influências são quase desprezadas para gamas de redução adaptadas.

Também foi possível validar o EAE de 4 anéis até, aproximadamente, 20% de redução de altura do provete.

Também foi realizado os mesmos ensaios com a utilização de teflon, e as curvas de evolução da força com a percentagem de redução de altura dos provetes obtidas encontram-se apresentadas na Figura 5.19.



Figura 5.19- Validação numérico-experimental, através da analise da evolução da força com percentagem de redução de altura, para os ensaios de 2 e 4 anéis com teflon

Ao analisar a figura 5.19, verifica-se que as curvas experimentais apresentam grande semelhança entre si até, aproximadamente, 30% de redução de altura. Após este valor nota-se uma ligeira diferença nos valores de força, que advêm da existência de um ligeiro desfasamento entre os anéis.

Por comparação entre as curvas experimentais com a curva numérica (FEM), verifica-se que todos os ensaios foram validados até aproximadamente, 25% de redução de altura.

5.3.3. Obtenção dos valores de atrito através da utilização de curvas de calibração teóricas

Com o objetivo de obter os valores de atrito através da monotorização da variação do diâmetro interno em função da redução de altura do provete, procedeu-se a representação dos pontos experimentais nas curvas de calibração do atrito.

Assim como validação numérico-experimental dos EAE, realizaram-se simulações numéricas do EAC a fim de obter as curvas de calibração do atrito.



Figura 5.20-Representação das curvas de calibração e mapeamento dos pontos de atrito experimentais obtidos através dos ensaios de 2 anéis e 4 anéis, com massa grafitada

Através da Figura 5.20 é possível verificar a que gamas de atrito pertencem os provetes empilhados para a massa grafitada. Como esperado, a compressão de 2 e 4 anéis empilhados, na maior parte dos provetes, apresentam valores de atrito muito semelhantes aos obtidos através do ensaio em anel.

O provete correspondente ao 2º ensaio de 2 anéis empilhados e o pertencente ao 4º ensaio de 4 anéis empilhados apresentam valores de atrito semelhantes entre si, mas superiores aos restantes casos. A explicação para estes acontecimentos é semelhante a apresentada pela analise feita a Figura 5.14.

A Figura 5.21 apresenta o mapeamento dos pontos obtidos experimentalmente através da compressão de 2 e 4 anéis empilhados com a utilização de teflon.



Figura 5.21-Representação das curvas de calibração e mapeamento dos pontos de atrito experimentais obtidos através dos ensaios de 2 e 4 anéis empilhados, com teflon

Ao analisar os valores de atrito obtidos para os ensaios de 2 e 4 anéis empilhados (Figura 5.21) verificase que a gama de valores de atrito $(0.12 \le m \le 0.18)$ é superior a obtida por intermédio do ensaio em anel, o que é justificável pelo facto de os anéis deformarem-se elipticamente com eixos de orientação diferentes, e assim, as medições efetuadas ficam limitadas pelo menor valor de cada elipse. Este fenómeno pode ser visualizado pela Figura 2.24.



Figura 5.22- ilustração dos diferentes eixos de orientações das elipses: (a) 2 anéis; (b) 4 anéis; (c) 4 anéis

5.4. Condições extremas de atrito

Com o objetivo de abranger diferentes gamas de atrito, foram realizados ensaios exploratórios para condições que proporcionassem um valor de atrito elevado. Para tal, considerou-se que os ensaios fossem realizados entre pratos de compressão mais rugosos (Figura 3.9 a)) sem lubrificação. Os ensaios foram realizados com uma metodologia incremental com o objetivo de obter uma curva experimental que carateriza o atrito ao longo de todo o ensaio.

A Figura 5.23 apresenta as curvas de força obtidas experimentalmente e a curva que melhor se assemelha aos resultados, obtida por intermédio das simulações com um valor de atrito, m = 0.50.



Figura 5.23- Validação numérico-experimental, através da analise da evolução da força com percentagem de redução de altura, para os EAC, EAE de 2 e 4 anéis

Ao analisar a figura 5.25, confirma-se que a medida que o número de anéis aumenta, os valores de força tendem a diminuir (o que pode ser justificado pela dificuldade do alinhamento dos anéis) e, como era esperado, a curva do EAC coincide perfeitamente com a curva numérica.

Por último, é apresentada a Figura 5.24 que corresponde a obtenção do valor de atrito para os diferentes provetes através de curvas de calibração teóricas.



Figura 5.24- Representação das curvas de calibração e mapeamento dos pontos de atrito experimentais obtidos através dos ensaios de anel, de 2 e de 4 anéis empilhados, sem lubrificante

Ao analisar a Figura 5.24 verifica-se que os pontos experimentais estão muito próximos uns dos outros, e valor de atrito varia entre $0.50 \le m \le 0.65$.

Deve ser referido, como verificado anteriormente (Figura 2.28 b)), que para valores de atrito superiores a 0.50 as curvas de atrito perdem alguma sensibilidade e qualquer erro de medição pode por em causa a obtenção do valor de atrito.

A Figura 5.25 (a) é apresentada com o objetivo de representar a maior parte dos pontos experimentais numa escala semelhante as curvas de atrito apresentadas para a massa grafitada e o teflon. As figuras 5.27 (b), (c) e (d) apresentam os provetes após a sua compressão.



Figura 5.25-Curvas de calibração do atrito e imagem dos provetes após a sua compressão: (a) curvas de calibração do atrito; (b) EAC; (c) EAE com 2 anéis; (d) EAE cos 4 anéis

Após analisar a Figura 5.25 (a) confirma-se que os pontos experimentais coincidem uns com os outros e o valor de atrito varia entre $0.50 \le m \le 0.65$. Para o EAC e de 2 anéis empilhados, nota-se que a maior parte dos pontos encontram-se mais próximos da curva de atrito igual a 0.50.

Através da figura 5.28 (d) verifica-se um ligeiro desfasamento dos anéis pertencentes ao provete constituído por de 4 anéis.

6. Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões do trabalho efetuado, bem como perspetivas de trabalho que possa ser desenvolvido no futuro.

Esta dissertação propõe a realização de ensaios de anéis empilhados (EAE) como uma alternativa ao ensaio de anel convencional (EAC) para efetuar a caracterização de atrito em processos de deformação plástica que utilizam chapa como matéria prima. Foram realizados EAC e de EAE com massa grafitada e teflon.

A partir de ensaios de compressão cilíndrica, considerando provetes obtidos a partir de diferentes direções do material, foi possível verificar que a liga de Alumínio AA6061-T651 não possui anisotropia.

As analises de sensibilidade permitiram concluir que os resultados obtidos para o EAC são semelhantes aos obtidos para EAE, quando o valor de atrito entre os anéis é superior ao atrito na interface ferramenta-peca.

Foi possível garantir a repetibilidade dos resultados para os ensaios de compressão cilíndrica, os EAC e os EAE.

Realizou-se a validação numérico-experimental e confirmou-se a semelhança dos resultados obtidos para os EAE e os EAC.

Através do mapeamento dos pontos de atrito experimentais nas curvas de calibração de atrito, foi possível obter os valores de atrito para os EAC e os EAE. Após comparar o valor de atrito de cada condição de lubrificação, foi possível confirmar a aplicabilidade dos EAE para a caracterização do atrito em chapa.

A partir dos resultados obtidos para o EAE, verifica-se que existe um nível de deformação limitado devido à deformação não uniforme dos anéis.

Como proposta de trabalhos futuros, é sugerido:

- Confirmar o valor do coeficiente de atrito obtido através do EAE com o obtido por validação numérica dos valores de força em DPCM, para a mesma condição de lubrificação.
- Realizar o mesmo trabalho para outros materiais, metálicos ou poliméricos.
- Estudar o número máximo de anéis empilhados a qual o ensaio é aplicável.
- Efetuar o mesmo estudo para um material com características anisotrópicas mais evidentes.
- Melhorar as condições de ensaio a fim de garantir o alinhamento dos anéis para elevadas pressões.

7. Referências

Abdul, N. A. and Alexander, J. M. (1981) "Friction Determination During Bulk Plastic Deformation of Metals," CIRP Annals - Manufacturing Technology, 30(1), pp. 143–146. doi: 10.1016/S0007-8506(07)60912-3.

Alves, L. M., Nielsen, C. V. and Martins, P. A. F. (2011) "Revisiting the Fundamentals and Capabilities of the Stack Compression Test," Experimental Mechanics, 51(9), pp. 1565–1572. doi: 10.1007/s11340-011-9480-5.

ASTM-E9-89a (1996) "Standard test methods of compression testing of metallic materials at room temperature," Annual Book of ASTM Standards, 03.01(Reapproved).

B. Avitzur, Isr. J. Techno!. 2 (1964) 295.

Bay N, Olsson DD, Andreasen JL (2008) Lubricant Test Methods for Sheet

M. Burgdorf, Industri-Anzeiger 89 (39) (1967) 15.

Metal Forming. Tribology International 41(9):844-853.

Bhattacharyya, D., 1981, Annals of the CIRP, Vol. 30/1, pp. 139.

Cristino V.A.M., Martins P.A.F (2013), Tecnologia Mecânica, Escolar editora.

Christiansen, P., Martins, P. A. F. and Bay, N. (2016) "Friction Compensation in the Upsetting of Cylindrical Test Specimens," Experimental Mechanics. Experimental Mechanics, 56(7), pp. 1271–1279. doi: 10.1007/s11340-016-0164-z.

"Cook M, Larke EC (1945) Resistance of copper and copper alloys to homogeneous deformation in compression. J Inst Met 71:371–390

Dancltert, J. (1988) "5) (7)," 37(1), pp. 19-22.

H. Kudo, Int. J. Mech. Sci. Part I 2 (1960) 102; Part II 3 (1960) 91.

Han, H. (2002) "Determination of Flow Stress and Coefficient of Friction for Extruded Anisotropic Materials under Cold Forming Conditions Han Han Determination of Flow Stress and Coefficient of Friction for Extruded Anisotropic Materials under Cold Forming Conditions by," Production Engineering, (January).

P.H. Hansen, N. Bay, P. Christensen, Proc. XVIth NAMRC,

Urbana Champaign, IL, USA, 1988, p. 41.

Hartley, R.S., Cloete, T.J., Nurick, G.N., 2007. An experimental assessment of frictioneffects in the split Hopkinson pressure bar using the ring compression test. Int.J. Impact Eng. 34 (10), 1705–1728.

Hill, R., 1948, A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals, Proc. Roy. Soc., Vol. A193, pp. 281-297.

Hu, C., Ou, H. and Zhao, Z. (2015) "An alternative evaluation method for friction condition in cold forging by ring with boss compression test," Journal of Materials Processing Technology. Elsevier B.V., 224, pp. 18–25. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.04.010.

Hu, C., Yin, Q., Zhao, Z. and Ou, H. (2017) "A new measuring method for friction factor by using ring with inner boss compression test," International Journal of Mechanical Sciences. Elsevier Ltd, 123(November 2016), pp. 133–140. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2017.01.042.

Kačmarčik, I., Movrin, D. and Ivanišević, A. (2011) "One Contribution to the Friction Investigation in Bulk Metal Forming," Journal for Technology of Plasticity, 36(1), pp. 35–48. doi: 10.2478/v10211-011-0001-4.

M. KUNOGI, Journal Of Science Research Institute (Tokyo), 1956. Vol. 50, p. 215.

Nielsen, C. V., Zhang, W., Alves, L. M., Bay, N., Martins, P. A. F. (2013). Modeling of Thermo-Electro-Mechanical Manufacturing Processes with Applications in Metal Forming and Resistance Welding. London, UK: Springer-Verlag.

A. T. MALE and M. C. COCKCROFT, Journal Of The Institute Of Metals, 1964-65, Vol. 93. p. 38.

Merklein, M. and Kuppert, A. (2009) "A method for the layer compression test considering the anisotropic material behavior," International Journal of Material Forming, 2(SUPPL. 1), pp. 483–486. doi: 10.1007/s12289-009-0592-8.

Merklein M, Allwood JM, Behrens BA, Brosius A, Hagenah H, Kuzman K, Mori K, Tekkaya AE, Weckenmann A (2012) Bulk forming of sheet metal. CIRP Ann: Manuf Techn 61: 725–745.

Mori K, Maeno T, Fukui Y (2011) Spline forming of ultra-high strength gear drum using resistance heating of side wall of cup. CIRP Ann Manuf Technol 60(1): 299–302.

Pawelski, O. (1967). Über das stauchen von holzylindern und seine eignung zur bestimmung der formänderungsfestigkeit dünner bleche. Arch Eisenhüttenwes, 38, 437-442.

Petersen, S. B., Martins, P. A. F. and Bay, N. (1997) "Friction in bulk metal forming: a general friction mo law of constant friction," 66, pp. 186–194.

Petersen, S. B., Martins, P. A. F. and Bay, N. (1998) "An alternative ring-test geometry for the evaluation of friction under low normal pressure," Journal of Materials Processing Technology, 79(1–3), pp. 14–24. doi: 10.1016/S0924-0136(97)00448-2.

Pöhlandt, K. and Oberländer, T., 1992. Concepts for the description of plastic anisotropy in cold bulk metal forming, J. Mat. Proc. Tech., Vol. 34, pp.187.

Pöhlandt, K., Lange, K. and Zucko, M., 1998, Steel Research, Vol. 69, No. 4+5, pp. 171.

Pöhlandt, K., Lange, K. and Zucko, M., 1999, Effects of anisotropy parameters in cold bulk metal forming, Wire, Vol. 4, pp. 33.

Rodrigues, J. M. C., Martins, P. A. F. (2010). Tecnologia Mecânica. Lisboa, Portugal: Escolar Editora.

Tan, X., Martins, P. a. F., Bay, N. and Zhang, W. (1998) "Friction studies at different normal pressures with alternative ring-compression tests," Journal of Materials Processing Technology, 80–81(1), pp. 292–297. doi: 10.1016/S0924-0136(98)00113-7.

Valero, J., Marín, M. M. and Camacho, A. M. (2015) "Influence of Load Application Methodology in the Performance of Ring Compression Tests," Procedia Engineering. Elsevier B.V., 132, pp. 306–312. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.499.

Wang, F. and Lenard, J. G. (2015) "An Experimental Study of Interfacial Friction-Hot Ring," 114(January 1992), pp. 13–18.

X.Tan, W.Zhang and N.BAY (1999) "a New Friction Test Using Simple Upsetting and Flow Analysis," Proceedings of the 6th ICTP, 1, pp. 364–370.