



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Análise experimental do ensaio de atrito com freio

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e projeto

Autor

João Ricardo Pleno Rascão de Barros

Orientadores

Marta Cristina Cardoso de Oliveira

Pedro Alexandre de Almeida do Vale Antunes

Júri

Presidente	Professor Doutor Diogo Mariano Simões Neto
	Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
	Professor Doutor Pedro Alexandre de Almeida do Vale
Orientador	Antunes
	Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogal	Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho
	Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2017

“I know that new situations can be intimidating. You’re looking around and it’s all scary and different. But you know, meeting them head on, charging right into them like a bull, that’s how we grow as people.”

Rick Sanchez

Agradecimentos

O trabalho que aqui se segue só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu sincero agradecimento.

Ao Professor Pedro Alexandre de Almeida do Vale Antunes, pelos conhecimentos transmitidos, pelo apoio, orientação, ajuda, disponibilidade e boa disposição durante a realização deste trabalho.

À Professora Marta Cristina Cardoso de Oliveira, pelo desafio e por todo o apoio ao longo da realização deste projeto. Um agradecimento especial pela motivação, disponibilidade e encorajamento, principalmente nesta reta final.

Aos membros do Grupo de Tecnologia, pelo ambiente de boa disposição e acolhimento durante a concretização deste trabalho.

Ao Instituto de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade do Porto, em particular ao Professor Abel Dias dos Santos e ao Mestre Rui Amaral, pela disponibilidade na realização dos ensaios, ao Professor Joaquim Gabriel Magalhães Mendes, por toda a ajuda dada na utilização das câmaras térmicas e ao Doutor António José Caetano Baptista, pela ajuda logística.

Um agradecimento muito especial aos meus pais por toda a paciência, apoio e motivação incondicional ao longo de todo o meu percurso académico, assim como o sacrifício feito para que tivesse esta oportunidade. Ao meu irmão, por todo o apoio, disponibilidade e inspiração. Sem vocês nunca teria chegado até aqui.

Aos meus amigos, sem precisar de mencionar nomes, o meu profundo agradecimento por me terem aturado nos meus bons e principalmente maus momentos. Pelo incentivo e pelas incontáveis memórias que levo comigo.

Por fim, deixo também o meu reconhecimento a todos os outros que direta ou indiretamente contribuíram para este trabalho, desde professores, alunos e funcionários.

A todos vocês, muito obrigado

Esta dissertação foi realizada no âmbito do projeto “Watch4ming: Monitorização da estampagem de aços de alta resistência” com referência P2020-PTDC/EMS-TEC/6400/2014 (POCI-01-0145-FEDER-016876), cofinanciado pela Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (FCT) e pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) e do projecto “MATIS: Materiais e Tecnologias Industriais Sustentáveis” (CENTRO-01-0145-FEDER-000014).



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional



Resumo

Os aços convencionais têm vindo a ser substituídos pelos de alta resistência na produção de componentes em chapa, em particular na indústria automóvel, devido à excelente relação entre resistência e peso. De facto, a elevada resistência específica permite garantir os requisitos de segurança e de redução de peso, *i.e.* redução de consumo. Contudo, os aços de alta resistência apresentam uma formabilidade imprevisível com base na curva limite de estampagem, retorno elástico elevado e suscetibilidade a danos de superfície como gripagem, uma vez que a deformação plástica envolve pressões de contacto mais elevadas do que as exigidas pelos aços convencionais.

De modo a compreender os mecanismos de contacto que ocorrem durante a estampagem foram propostos diferentes ensaios tribológicos, dos quais se destaca o ensaio de atrito com freio, uma vez que permite a avaliação do coeficiente de atrito e a reprodução de condições com inversão da trajetória de deformação.

O objetivo principal deste trabalho é explorar a potencialidade do ensaio de atrito com freio para estudar o comportamento mecânico e tribológico dos aços de alta resistência, incluindo a geração de calor por deformação plástica e/ou atrito. O equipamento utilizado foi projetado no âmbito do projeto PTDC/EME-TME/74152/2006, de modo a possibilitar a realização dos ensaios com recurso a uma máquina de ensaios de tração. O presente trabalho envolveu a elaboração de um guia para o procedimento experimental, de modo a garantir a reprodutibilidade dos ensaios, que inclui a definição dos métodos a utilizar na aquisição do campo de temperatura, bem como no tratamento e análise dos resultados. Os resultados analisados incluem a evolução com o tempo da força do punção e da amarra e da temperatura da chapa, o perfil após retorno elástico, a pressão de contacto e a análise dos perfis de rugosidade da superfície da chapa.

Os resultados mostram que o ensaio de atrito com freio permite evidenciar as variações de temperatura associadas ao processo de conformação, em particular para velocidades de escorregamento e pressões contacto elevadas. No entanto, o efeito da velocidade de escorregamento está associado aos fenómenos de transmissão de calor, o que requer uma melhor compreensão acerca dos parâmetros que influenciam estes fenómenos.

O facto de o ensaio reproduzir condições de flexão-deflexão, típicas dos processos de conformação, pode constituir uma ponte interessante para a melhoria dos modelos de comportamento mecânico e de contacto com atrito utilizados atualmente na simulação numérica do processo.

Palavras-chave: Aços de alta resistência, Estampagem, Ensaio de atrito com freio, Tribologia, Calor gerado por deformação e atrito, Campo térmico.

Abstract

Conventional steels have been replaced by Advanced High Strength Steels (AHSS) in the production of sheet components, particularly in the automotive industry, due to their excellent weight to strength ratio. In fact, the high specific strength guarantees the safety and weight reduction requirements, leading to consumption reduction. However, AHSS show unpredictable formability based on the forming limit curve, high yield strength and are susceptible to surface damage like adhesion, since their plastic deformation involves higher contact pressures than those required by conventional steels.

In order to understand the contact mechanisms that occur during sheet metal forming, different tribological tests were proposed, of which the drawbead test stands out, since it allows the evaluation of the coefficient of friction and the reproduction of forming conditions with inversion of the strain path.

The main objective of this work is to explore the potential of the drawbead friction test to evaluate the mechanical and tribological behavior of AHSS, including the heat generated by plastic deformation and/or friction. The equipment used was designed as part of the PTDC/EME-TME/74152/2006 project, in order to enable the tests to be performed in a tensile test machine. The present work involved the elaboration of a guide for the experimental procedure, in order to guarantee the test reproducibility, which includes the definition of the methods to be used for acquiring the temperature field, as well as for the treatment and analysis of the results. The analyzed results include the evolution with time of the punch and grip load and the specimen's temperature. The specimen's profile after springback as well as the sheet surface contact pressure and roughness profiles, were also studied.

The results show that the drawbead test allows measuring the temperature variations associated with the forming process, in particular for high sliding speeds and contact pressures. However, the sliding velocity effect is associated with heat transfer phenomena, which requires a better understanding of the parameters which influence these phenomena. The fact that the test reproduces bending-unbending conditions, typical of stamping processes, can be an interesting bridge for the improvement of the mechanical

behavior and friction contact models currently used in the numerical simulation of these processes.

Keywords Advanced High Strength Steels, Stamping, Drawbead test, Tribology, Heat generated by plastic deformation and friction, Thermal field.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xvi
1. Introdução	1
1.1. Ensaaios Tribológicos.....	3
1.1.1. Ensaio de atrito com freio.....	6
1.1.2. Análise da rugosidade das superfícies	9
1.2. Objetivos.....	13
1.3. Esquema da Dissertação	13
2. Procedimento experimental	15
2.1. Materiais	17
2.2. Procedimento de ensaio	18
2.3. Aquisição do campo de temperaturas	22
2.3.1. Parâmetros do equipamento	22
2.3.2. Montagem do equipamento	23
2.4. Análise dos perfis de rugosidade e configuração do perfilómetro.....	25
2.5. Aquisição do perfil de retorno elástico	28
2.6. Ensaaios realizados.....	29
3. Resultados e discussão	31
3.1. Evolução da força do punção e da amarra	31
3.2. Retorno elástico	34
3.3. Resultados tribológicos.....	35
3.4. Pressão de contacto	42
3.5. Evolução da temperatura	43
4. Conclusões e trabalhos futuros	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
APÊNDICE: Resultados tribológicos.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Representação esquemática das ferramentas num processo de estampagem (Oliveira, 2005).	1
Figura 1.2 - Ensaio tribológicos para avaliação de condições de lubrificação na estampagem: a imagem da esquerda ilustra um processo de estampagem profunda e a da direita de estiramento; Região 1, deformação da flange; Região 2, flexão e deflexão; Região 3, flexão e estiramento; Região 4, atrito predominante e deformação reduzida (Altan, T., Tekkaya, 2012).....	4
Figura 1.3 - Ensaio tribológicos para avaliação de condições de lubrificação e desgaste na estampagem: (a) ensaio de torção-compressão(Kim et al., 2008); (b) <i>Pending Tribo-tester</i> (Wang et al., 2015).....	4
Figura 1.4 - Representação esquemática do ensaio de atrito com freio: posição inicial a traço contínuo e posição estacionária a traço interrompido.	6
Figura 1.5 - Representação esquemática da curva de Stribeck (adaptado de (Sotres & Arnebrant, 2013)).	8
Figura 1.6 - Representação esquemática da textura de uma superfície e das suas componentes (Bhushan, 2001).	10
Figura 1.7 – À Esquerda: representação esquemática do perfil $z(x)$ de uma superfície; À Direita: perfis de superfícies com o mesmo valor de R_a (Adaptado de Bhushan, 2001).....	12
Figura 1.8 – Definição de <i>Skewness</i> (R_{sk}) e amplitude da curva de distribuição (adaptado de Gadelmawla <i>et al.</i> , 2002).	13
Figura 2.1 - Representação 3D do equipamento de ensaio.....	15
Figura 2.2 - Montagem do equipamento de ensaio de atrito com freio: À direita: máquina de ensaios de tração do DEM; À esquerda: máquina SIFAMA do IDMEC.....	16
Figura 2.3 - Provetes de ensaio de atrito com freio: (a) HSLA420 (b) DP500 e (c) DP780.	18
Figura 2.4 - Representação da compensação de altura dos rolos de conformação (a amarelo) e da altura da guia (a laranja).	20
Figura 2.5 - Distâncias auxiliares para a montagem dos rolos na direção XX (ver Figura 1.4).....	20
Figura 2.6 - Verificação do valor de penetração total, com auxílio de uma chapa plana. O elemento de suporte do rolo de conformação posicionado na placa superior for eliminado de modo a facilitar a visualização.	21
Figura 2.7 - À esquerda: campo térmico adquirido pela câmara FLIR One – ensaio realizado no DEM. À direita: campo térmico adquirido pela câmara FLIR A325 –	

ensaio realizado no IDMEC. As linhas a vermelho delimitam as extremidades da chapa e a seta indica o sentido do deslocamento.	24
Figura 2.8 - Montagem do equipamento com folhas de papel (à esquerda), de modo a reduzir a interferência no do campo térmico adquirido pela câmara FLIR A325 (à direita) – ensaio realizado no IDMEC.	24
Figura 2.9 - Representação da distorção do perfil da superfície (adaptado de Bhushan, 2001).	25
Figura 2.10 – À esquerda: Perfilómetro Mitutoyo SurfTest SJ-500 e à direita: posicionamento da amostra.	27
Figura 2.11 – Exemplo de aquisição do perfil de retorno elástico com o auxílio do <i>software Java Plot Digitizer</i>	28
Figura 3.1 – Evolução da força da amarra com o deslocamento para os ensaios realizados no DEM: (a) DP500; (b) DP780; (c) HSLA420.	32
Figura 3.2 – Evolução da força da amarra e do punção com o deslocamento para os ensaios realizados no DEM: (a) DP500; (b) DP780; (c) HSLA420.	33
Figura 3.3 – Evolução da força da amarra com o deslocamento para os ensaios realizados no DEM e no IDMEC: (a) DP780; (b) HSLA420.	34
Figura 3.4 – Perfis de retorno elástico.	35
Figura 3.5 - Representação esquemática das zonas analisadas.	36
Figura 3.6 - Amostras analisadas dos ensaios realizados no IDMEC.	37
Figura 3.7 - Amostras analisadas dos ensaios realizados no DEM.	37
Figura 3.8 – Exemplos de amostras onde é observável a existência de riscos contínuos. ...	38
Figura 3.9 – Parâmetros de rugosidade determinados para os ensaios realizados no IDMEC: (a) ensaio I.780_15 e (b) ensaio I.780_30.	39
Figura 3.10 – Análise espectral em bandas de dois terços de oitava para os ensaios realizados no IDMEC: (a) ensaio I.780_15 e (b) ensaio I.780_30.	41
Figura 3.11 – Construção do perfil de rugosidade com base na análise espectral em bandas de dois terços de oitava para o ensaio I.780_15.	42
Figura 3.12 – Filmes sensíveis à pressão (Fujifilm, 2017).	42
Figura 3.13 – Filme sensível à pressão: resultado adquirido para a fase de aperto do punção, num ensaio realizado com o DP780.	43
Figura 3.14 – Representação esquemática do tratamento de resultado no <i>software FLIR Tools</i> , com recurso à análise de: (a) um ponto; (b) uma linha.	44
Figura 3.15 – Evolução da temperatura ao longo do tempo para os ensaios realizado no IDMEC.	44
Figura A. 1 – Parâmetros de rugosidade determinados para o ensaio I.780_60+15.	51
Figura A. 2 – Parâmetros de rugosidade determinados para o ensaio I.420_30.	51

Figura A. 3 – Parâmetros de rugosidade determinados para o ensaio D.780_1.....	52
Figura A. 4 – Parâmetros de rugosidade determinados para o ensaio D.780_5.....	52
Figura A. 5 – Parâmetros de rugosidade determinados para o ensaio D.420_0.25(2).	53
Figura A. 6 – Análise espectral em bandas de dois terços de oitava para o ensaio I.780_60+15.	53
Figura A. 7 – Análise espectral em bandas de dois terços de oitava para o ensaio I.420_30.	54
Figura A. 8 – Análise espectral em bandas de dois terços de oitava para o ensaio D.780_1.	54
Figura A. 9 – Análise espectral em bandas de dois terços de oitava para o ensaio D.780_5.	55
Figura A. 10 – Análise espectral em bandas de dois terços de oitava para o ensaio D.420_0.25(2).	55

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 – Definição de parâmetros de rugosidade (2D).	12
Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas dos materiais e espessura inicial média. $R_{p0.2}$: tensão limite de elasticidade; R_m : Tensão de rotura; Eu [%]: percentagem de alongamento à carga máxima; Et [%]: percentagem de alongamento à rotura. Para o HSLA420 são indicadas as propriedades mecânicas do fornecedor, sendo que Eu [%]: percentagem mínima de alongamento A80.	17
Tabela 2.2 - Parâmetros de calibração das câmaras térmicas usadas.	23
Tabela 2.3 – Gama de frequências utilizada na análise espectral em bandas de dois terços de oitava.	26
Tabela 2.4 - Condições de medição determinadas de acordo com a norma ISO 4288 após realização de ensaios preliminares.	27
Tabela 2.5 - Parâmetros gerais de ensaio.	30
Tabela 2.6 - Parâmetros de ensaio específicos IDMEC.	30
Tabela 2.7 - Parâmetros de ensaio específicos DEM. O ensaio assinalado a cinzento foi realizado no modo de velocidade lenta.	30
Tabela 3.1 –Tabela de valores de média e desvio padrão para o fator de Skewness, R_{sk}	40

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

Δx – Deslocamento imposto pela amarra

Δx_{in} – Deslocamento de amarra imposto

Δx_{out} – Deslocamento de amarra calculado

ε – Emissividade

λ_c – *Cutoff*

μ – Valor de *Skewness* médio

σ – Desvio padrão

θ – Ângulo de contacto

a_i – Amplitude média

c – Folga entre rolos de conformação

d – Distância entre suporte dos rolos de conformação e suporte do punção

d' – Distância entre o suporte da guia ao suporte do primeiro rolo de conformação

D – Distância entre suportes dos rolos de conformação

Eu – Percentagem de alongamento à carga máxima

Et – Percentagem de alongamento à rotura

f_i – Frequência média

l_n – Comprimento de amostragem

m – Amplitude de rugosidade da linha média

n – Número total de pontos adquiridos

p – Penetração do punção

p_i – Altura de pico face à linha média

r – Raio dos rolos de conformação

R_a – Rugosidade média

Rm – Tensão de rotura

R_p – Rugosidade de pico máximo
 $Rp_{0.2}$ – Tensão de cedência
 R_{pm} – Rugosidade média de picos
 R_q – Rugosidade média Quadrática
 R_{sk} – Fator de assimetria (*Skewness*)
 R_t – Rugosidade total
 R_v – Rugosidade de vale mínimo
 R_z – Rugosidade média de picos para vales
 t – Espessura o provete de ensaio
 t_m – Espessura média
 v_i – Profundidade de vale face à linha média
 V_{in} – Velocidade de amarra imposta
 V_{out} – Velocidade a amarra calculada
 w – Largura do provete de ensaio

Siglas

2D – Bi-dimensional
3D – Tri-dimensional
AHSS – *Advanced High Strength Steel*
ANSI – *American National Standards Institute*
DEM – Departamento de Engenharia Mecânica
DL – Direção de laminagem
DP – *Dual-Phase*
DT – Direção transversa
FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
FOL – *Filter-on-Lens*
G – Rolo guia
HSLA – *High Strength Low Alloy*
ISO – *International Standardization Organization*

IDMEC – Instituto de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade do Porto

P – Punção

RC1 – Rolo de conformação de entrada

RC2 – Rolo de conformação de saída

Apesar de esta dissertação estar redigida em português para os valores numéricos foi adotada a nomenclatura inglesa, *i.e.* o símbolo decimal é o ponto.

1. INTRODUÇÃO

O processo de conformação de chapas metálicas consiste, de modo sucinto, em conferir através de deformação plástica, uma forma final que traduza a peça ou componente desejado, a partir de uma chapa metálica inicialmente plana. Para tal, são aplicados esforços externos de modo a induzir a deformação plástica do material, com o auxílio de ferramentas. Tipicamente são utilizados três tipos de ferramentas: o punção, a matriz e o cerra-chapas, como se mostra na Figura 1.1. A deformação induzida no material é controlada restringindo o fluxo de material, promovido pelo punção para a cavidade definida pela matriz, com o auxílio do cerra-chapas.

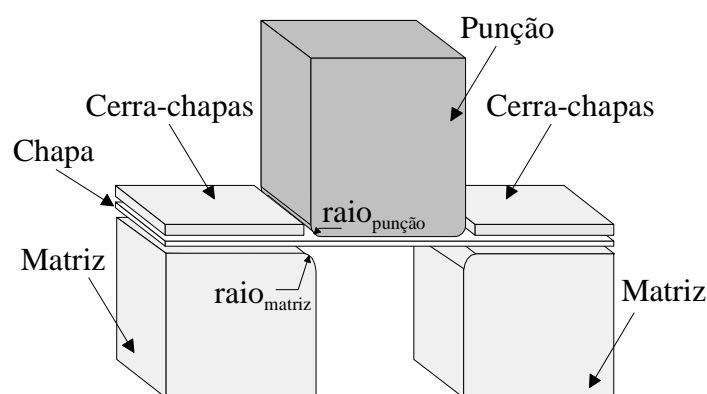


Figura 1.1 - Representação esquemática das ferramentas num processo de estampagem (Oliveira, 2005).

Este processo tecnológico é muito utilizado na produção de componentes metálicos, sobretudo na indústria automóvel, aeroespacial e de produção de embalagens (Hol, 2009), pois permite uma taxa de produção elevada a um custo reduzido. Com o objetivo de minimizar o tempo e custo associado ao projeto das ferramentas, com recurso a procedimentos clássicos de tentativa e erro, atualmente recorre-se a ferramentas de apoio à conceção do processo. De facto, a simulação numérica do processo de conformação com auxílio do método dos elementos finitos permite diminuir o tempo de desenvolvimento, tendo em conta a qualidade exigida para o produto final. No entanto, os resultados obtidos são função dos dados de entrada, em particular das propriedades mecânicas do material e dos parâmetros do processo tecnológico, em particular do coeficiente de atrito, o que torna

indispensável recorrer a uma abordagem experimental para permitir a sua correta definição.

Atualmente, os aços convencionais têm vindo a ser substituídos pelos aços de alta resistência na produção de componentes em chapa, devido à excelente relação entre resistência e peso, em particular na indústria automóvel. De facto, a elevada resistência específica permite garantir os requisitos de segurança e uma redução de peso, *i.e.* redução de consumo. Contudo, estes aços apresentam uma formabilidade imprevisível com base na curva limite de estampagem, retorno elástico elevado e suscetibilidade a danos de superfície como gripagem (*galling*), uma vez que a sua deformação plástica envolve pressões de contacto mais elevadas do que as exigidas pelos aços convencionais.

É comum recorrer a lubrificantes no processo de estampagem. Estes são particularmente importantes na conformação de aços de alta resistência, constituindo uma barreira à transferência de calor entre a chapa e as ferramentas, mas também reduzindo o efeito do calor gerado pela deformação e pelo atrito, em particular quando são utilizadas velocidades de conformação elevadas. De modo a manter a eficácia dos lubrificantes em condições de temperatura e pressão elevadas, é comum recorrer a aditivos de pressão elevada. Outra alternativa que tem sido explorada é o revestimento das ferramentas com filmes finos, em particular na conformação de aços de alta resistência galvanizados, aços inoxidáveis e ligas de alumínio, uma vez que estes materiais são propensos à ocorrência de gripagem (Kim, Sung, Goodwin, & Altan, 2008). De facto, os principais obstáculos a uma substituição mais generalizada dos aços macios por aços de alta resistência são a menor formabilidade, o maior retorno elástico e a maior suscetibilidade à ocorrência de danos superficiais. Este último resulta dos níveis de pressão e de temperatura na interface chapa-ferramenta serem mais elevados no caso dos aços de alta resistência. Neste contexto, foram realizados estudos de comportamento ao desgaste, com medição contínua das forças e da temperatura, que mostram que o dano nas ferramentas ocorre em zonas sujeitas a pressões de contacto elevadas (Groche & Christiany, 2013). Por outro lado, observaram-se temperaturas da ordem de 180 °C na zona de interface, em condições normais de estampagem à temperatura ambiente (Pereira & Rolfe, 2014). Estes fatores são desfavoráveis ao desempenho tribológico dos aços de alta resistência e à falha no desempenho dos lubrificantes comumente utilizados. Por outro lado, a ocorrência de gripagem pode reduzir significativamente a vida da ferramenta e gerar componentes de

baixa qualidade superficial, *i.e.* contribuir para o aumento da taxa de rejeição (Wang, Wang, Zhao, Hua, & Wei, 2015).

1.1. Ensaios Tribológicos

Durante a estampagem de uma chapa metálica a deformação plástica é induzida pelo escoamento da chapa imposto pelo contacto com as ferramentas. No entanto, o contacto ocorre ao nível das superfícies, *i.e.* entre os picos das asperezas das superfícies da ferramenta e da chapa. O movimento relativo entre estas superfícies faz com que seja essencial ter em conta o fenómeno de contacto por atrito, uma vez que este influencia o fluxo de material para a cavidade da matriz (Trzepieciński & Fejkiel, 2017).

De modo a compreender os mecanismos de contacto que ocorrem durante a estampagem, foram propostos diferentes ensaios tribológicos, por forma a representar os vários tipos de contacto existentes. De facto, como se exemplifica na Figura 1.2, mesmo para componentes de geometria simples existem sempre zonas com condições de contacto distintas. Assim, surgiram diferentes ensaios como o: *strip drawing*, *strip reduction*, *drawbead* e *limiting dome height*. Todos estes ensaios permitem a avaliação dos esforços envolvido e, consequentemente, a avaliação de condições de lubrificação, *i.e.* a comparação entre diferentes lubrificantes e/ou quantidades de lubrificante. Alguns permitem também a avaliação do coeficiente de atrito, como por exemplo o *Strip Drawing* e o *Drawbead test*. O ensaio de atrito com freio (*Drawbead test*) destaca-se também por permitir reproduzir condições com inversão da trajetória de deformação.

A ocorrência de zonas com condições de contacto distintas contribui para a diversidade de ensaios tribológicos, para os quais não existem, em geral, normas. A título de exemplo, Kim *et al.*, 2008 recorreram ao ensaio de torção-compressão para estudar o efeito de gripagem em aços de alta resistência, o que permitiu evidenciar a influência da pressão de contacto e das condições de lubrificação na ocorrência deste fenómeno. Por outro lado, Wang *et al.*, 2015 desenvolveram um equipamento específico para estudar este tipo de materiais, designado por *Pending Tribo-tester*, com o objetivo de simular o atrito por escorregamento entre a chapa e a matriz em condições de deformação-flexão. Deste modo, foi possível observar que a deformação plástica piora a eficiência do lubrificante, quando comparada com uma situação de deslizamento puro, uma vez que ativa a formação de microfissuras intermitentes, como por exemplo no caso de superfícies revestidas com

zinco. A Figura 1.3 apresenta o esquema destes ensaios, de modo a evidenciar as diferenças entre eles.

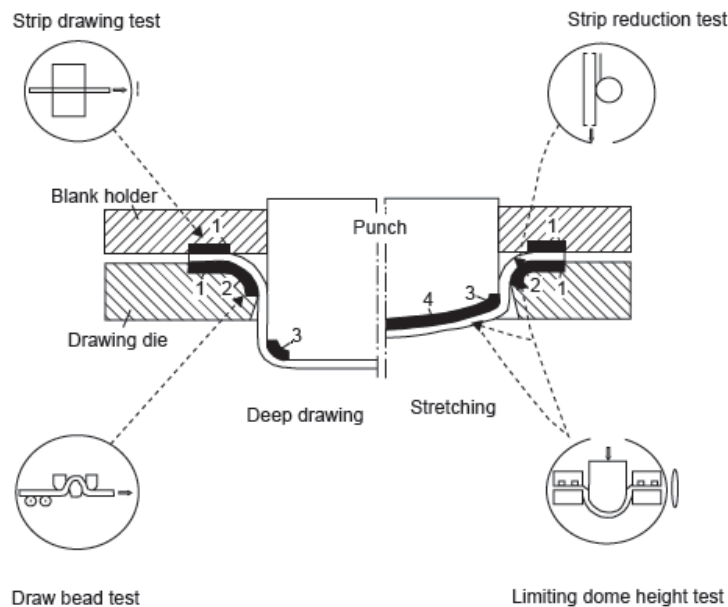


Figura 1.2 - Ensaio tribológicos para avaliação de condições de lubrificação na estampagem: a imagem da esquerda ilustra um processo de estampagem profunda e a da direita de estiramento; Região 1, deformação da flange; Região 2, flexão e deflexão; Região 3, flexão e estiramento; Região 4, atrito predominante e deformação reduzida (Altan, T., Tekkaya, 2012).

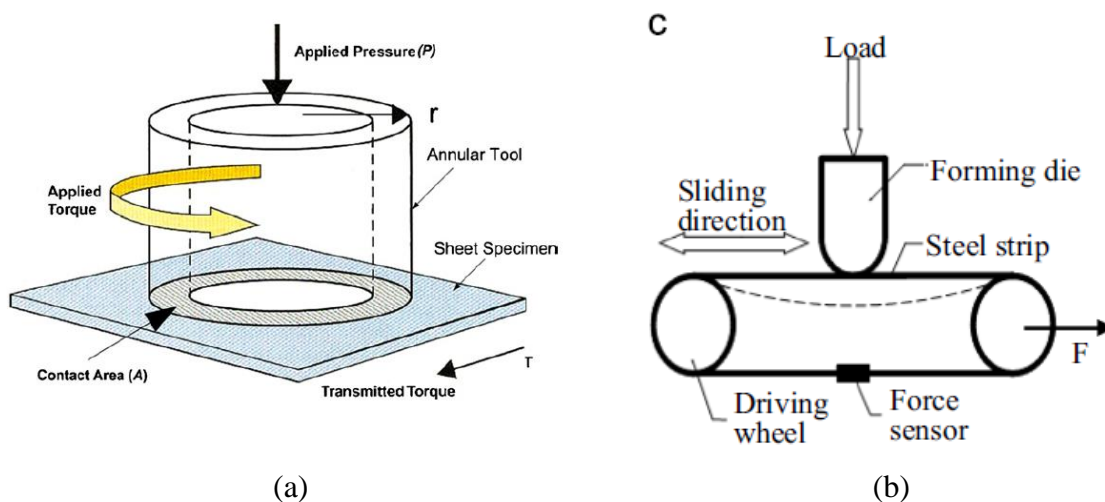


Figura 1.3 - Ensaio tribológicos para avaliação de condições de lubrificação e desgaste na estampagem: (a) ensaio de torção-compressão (Kim et al., 2008); (b) Pending Tribo-tester (Wang et al., 2015).

Como mencionado anteriormente, durante o processo de conformação de chapas metálicas, o cerra-chapas tem como função o controlo do fluxo de material para a cavidade da matriz, prevenindo defeitos como rugas e roturas. No entanto, a força passível de ser induzida pelo cerra-chapas pode ser insuficiente para prevenir a ocorrência de defeitos. Nesse caso, recorre-se ao uso de freios ou de juntas de retenção, apenas limitando ou mesmo eliminando o escoamento do material, respetivamente. A geometria destes elementos induz deformação plástica do material de forma que, em conjunto com as forças geradas pelo contacto com atrito, a força de restrição de fluxo de material aumenta, o que reduz a força necessária para o cerra-chapas (Sinha, 1999). Contudo, o uso de freios apresenta desvantagens, uma vez que a geometria da chapa é alterada, sendo que em geral é colocada em zonas que não fazem parte do componente final, que serão cortadas em etapas subsequentes. O recurso a freios também influencia o retorno elástico do componente (Naukowe & Rzeszowskiej, 2012). A força de restrição gerada pelo freio ou junta depende de fatores associados à sua geometria, mas também das propriedades mecânicas e tribológicas dos materiais em contacto. A utilização de freios coloca desafios à simulação numérica do processo, uma vez que o recurso à geometria real requer tempos de computação muito elevados. Neste contexto, foram desenvolvidos modelos equivalentes, que exigem a determinação da força de restrição, redução de espessura e deformação plástica induzida por uma determinada geometria do freio. Por esse motivo, este tipo de geometria tem sido muito estudada, com recurso a diferentes tipos de modelos. A título de exemplo, (Firat, 2008) desenvolveu um modelo analítico para a previsão da força de restrição e da redução de espessura da chapa, durante a passagem por um freio, específico para aços de alta resistência utilizados na indústria automóvel. O recurso a ensaios experimentais permite analisar a influência das propriedades mecânicas. Neste contexto, Livatyali, Firat, Gurler, & Ozsoy, 2010 recorreram ao *Drawbead test* comparar um aço *Dual-Phase* (DP) face com um aço macio, de modo a evidenciar a influência da tensão de escoamento e do coeficiente de encruamento na força de restrição e na redução de espessura do material. Este estudo destaca também a importância da penetração do punção nestas variáveis.

1.1.1. Ensaio de atrito com freio

O ensaio de atrito com freio foi inicialmente proposto por Nine, em 1978, com o objetivo de determinar o coeficiente de atrito que ocorre entre a chapa metálica e as ferramentas, assim como as alterações induzidas nas superfícies e, consequentemente, determinar as condições de lubrificação ideais (Nine, 1982). A Figura 1.4 apresenta as características geométricas deste ensaio, que se baseia na utilização de ferramentas cilíndricas. O ensaio é constituído por quatro componentes: o punção (P), os cilindros/rolos de conformação (RC1 e 2) e um ou mais cilindros guias (G). O ensaio é composto por três fases distintas: 1 – fase de avanço do punção; 2 – fase de avanço da amarra; 3 – fase de retorno elástico. Na primeira fase o punção desloca-se de modo a promover o avanço do material para a cavidade definida pelos cilindros de conformação, até atingir a profundidade de penetração pretendida. Posteriormente, a amarra de fixação desloca-se, promovendo o escoamento de material. Por fim, removem-se as ferramentas de modo a libertar a chapa. O ensaio pode ser realizado com rolos fixos ou móveis. Os rolos fixos permitem quantificar as forças geradas por atrito e por deformação plástica, enquanto a utilização de rolos móveis elimina os efeitos associados ao contacto com atrito, pelo que são quantificadas apenas as forças associadas à deformação plástica. A realização do ensaio com rolos fixos e móveis permite, deste modo, determinar o coeficiente de atrito (Nine, 1982).

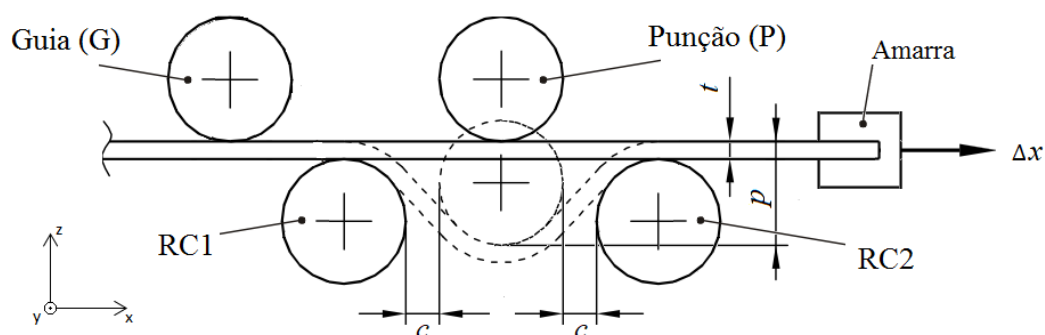


Figura 1.4 - Representação esquemática do ensaio de atrito com freio: posição inicial a traço contínuo e posição estacionária a traço interrompido.

Como se ilustra na Figura 1.4 os parâmetros geométrico do ensaio são: a profundidade de penetração (p) do punção (P), a folga entre rolos (c) e o deslocamento

imposto pela amarra (Δx), que deve ser suficiente para permitir atingir condições de estacionariedade. A distância horizontal entre RC1 e G não é relevante desde que se garanta que a chapa se encontra corretamente alinhada antes de entrar na zona de conformação.

No ensaio de atrito com freio existem vários parâmetros que podem ser alterados: (i) o diâmetro dos rolos de conformação, (ii) a profundidade de penetração do punção, (iii) o deslocamento da amarra de fixação e a sua (iv) velocidade, (v) a folga entre os rolos e (vi) o tipo de rolos e as (vii) condições de lubrificação.

O diâmetro dos cilindros de conformação determina o esforço necessário para deformar o material. Quanto maior for este diâmetro menor será o esforço necessário e *vice-versa*. A profundidade de penetração do punção influencia a área de contacto entre o material e as ferramentas, assim como a deformação induzida. Quanto maior for a penetração maior será o raio de conformação, *i.e.* a área de contacto aumenta e, consequentemente, a força da amarra aumenta. De facto, o valor máximo para esta força é obtido para condições de penetração total, não sendo observados aumentos para penetrações superiores (Nine, 1982).

A velocidade de deslocamento da amarra tem uma grande influência no coeficiente de atrito. No regime de lubrificação mista o aumento da velocidade de deslizamento resulta na redução do coeficiente de atrito e na diminuição da área de contacto real. Contudo, se a velocidade for suficientemente elevada pode, ocorrer um regime de lubrificação hidrodinâmico, no qual pode ocorrer o aumento do coeficiente de atrito (Schey, 1996). Estes regimes de lubrificação são normalmente identificado com o auxílio da curva de *Stribeck*, como se exemplifica na Figura 1.5. Quanto maior for o deslocamento imposto à amarra maior será a zona deformada, *i.e.* a zona com tensões residuais que contribuem para o retorno elástico.

A folga entre rolos influencia o raio de conformação. Quanto maior for a folga, maior será o ângulo de conformação e menor a área de contacto, o que reduz a força da amarra. Contudo, durante o ensaio pode ocorrer o desalinhamento dos cilindros de conformação, quer na direção horizontal (segundo XX) quer angular (segundo o plano XY) (ver Figura 1.4). Estes desvios são usualmente mínimos e não causam alterações significativas, desde que não ocorra interferência entre cilindros e a chapa metálica (Sanchez, 1999).

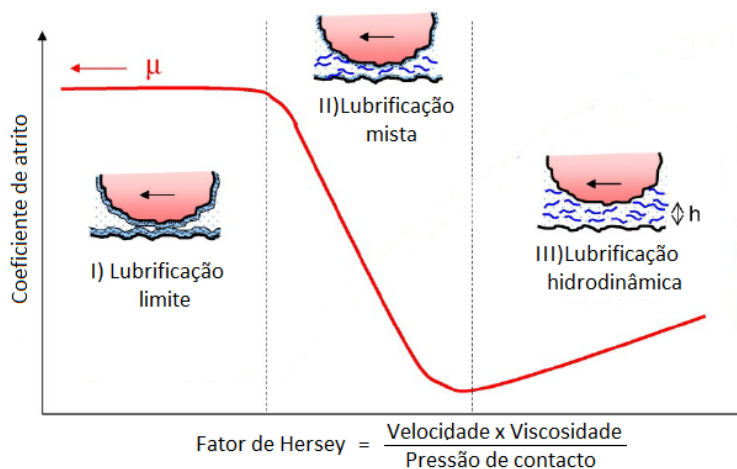


Figura 1.5 - Representação esquemática da curva de Stribeck (adaptado de (Sotres & Arnebrant, 2013)).

O ensaio de atrito com freio foi estudado em trabalhos anteriores, desenvolvidos no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra. Destes destaca-se o estudo do fenómeno de atrito, durante o processo de conformação plástica, com recurso ao ensaio de *Load-scanning* e o ensaio de atrito com freio, que permitiu evidenciar que: (i) no ensaio de *Load-scanning* observam-se valores inferiores para o coeficiente de atrito, que podem estar associados às pressões de contacto mais elevadas; (ii) a rugosidade da superfície das ferramentas tem um efeito significativo no coeficiente de atrito; e (iii) ocorre uma redução do atrito quando se realizam várias passagens (*multi-pass*), associada à atenuação das componentes de rugosidades com comprimentos de onda mais altos (Figueiredo, Ramalho, Oliveira, & Menezes, 2011). O ensaio de atrito com freio foi também analisado, com recurso a simulação numérica, de modo a estudar a evolução da temperatura, das forças, do ângulo de contacto e do retorno elástico, para um aço DP780 (Costa, 2017). Este estudo permitiu evidenciar que a evolução da temperatura é predominantemente influenciada pelos fenómenos de transmissão de calor, entre a chapa e as ferramentas, sendo que a velocidade de deslocamento da amarra apresenta uma grande influência na temperatura máxima observada. Pelo contrário, o coeficiente de atrito e as propriedades mecânicas do material apresentaram uma menor influência na temperatura máxima observada. Também se observou que as forças são influenciadas pelo coeficiente de atrito e pela penetração do punção, o que está de acordo com os resultados experimentais obtidos por Livatyali *et al.*, 2010.

1.1.2. Análise da rugosidade das superfícies

Tal como mencionado anteriormente, nos processos de estampagem as condições de atrito são influenciadas por vários parâmetros como o tipo de materiais, a temperatura, a pressão de contato, a velocidade de deslizamento, as condições de lubrificação e a rugosidade da superfície da chapa e da ferramenta. Neste contexto, estudos anteriores mostram que a deformação plástica, induzida com recurso a ensaios de tração uniaxial, conduz a alterações da rugosidade da chapa, com uma tendência para o aumento dos parâmetros de rugosidade, que influencia o comportamento tribológico do material (Trzepieciński & Fejkiel, 2017). Neste contexto, foi considerado relevante proceder à análise da rugosidade da superfície das chapas analisada com o ensaio de atrito com freio.

Uma superfície apresenta uma estrutura e propriedades complexas dependendo da natureza do sólido, da preparação da superfície e da interação com o ambiente. As propriedades inerentes a uma superfície sólida desempenham um papel crucial na sua interação com outras superfícies, uma vez que influencia a área de contacto real, as condições de atrito, o desgaste e a lubrificação. Em geral, as superfícies apresentam irregularidades geométricas, independentemente do tratamento a que tenham sido sujeitas, com escalas muito distintas, que vão desde desvios de forma a irregularidades com uma ordem de grandeza da distância interatômica.

A textura de uma superfície consiste num desvio, repetitivo ou aleatório, em relação à superfície nominal que forma a sua topografia tridimensional. A textura de uma superfície inclui componentes associados à: (i) rugosidade (*roughness*), nas escalas nano e micro; (ii) ondulação (*waviness*), (iii) existência de falhas (*flaws*) e (iv) orientação preferencial numa direção (*lay*). A Figura 1.6 ilustra estas componentes.

A rugosidade representa as flutuações da superfície para comprimentos de onda pequenos, caracterizados numa abordagem 2D, por picos (valores máximos) e vales (valores mínimos). A ondulação representa as irregularidades observadas para comprimentos de onda mais elevados, *i.e.* para um comprimento de onda superior ao de análise de rugosidade. Esta ondulação pode resultar de fatores como deflexões, trepidações e deformações, que podem ser induzidas pelos equipamentos utilizados na preparação das superfícies. A orientação preferencial representa a direção principal do padrão

predominante na superfície, geralmente determinado pela tecnologia de produção. As falhas são interrupções indesejadas na textura de uma superfície.

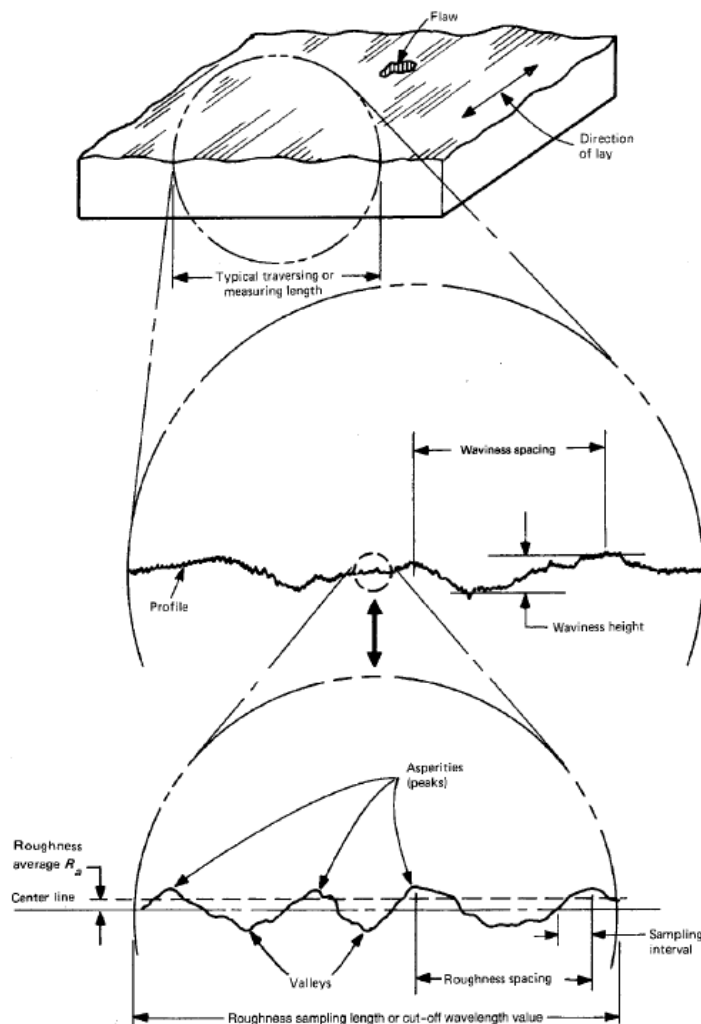


Figura 1.6 - Representação esquemática da textura de uma superfície e das suas componentes (Bhushan, 2001).

A generalidade das superfícies apresentam uma textura homogênea ou não-homogênea. Dentro das homogêneas é comum distinguir superfícies determinísticas das aleatórias. A maioria das superfícies de engenharia apresentam uma textura com propriedades aleatórias. Estas podem ainda ser divididas em superfícies isotrópicas ou anisotrópicas, sendo que as isotrópicas podem ser divididas em superfícies Gaussianas ou não-Gaussianas. A distribuição Gaussiana tornou-se a principal abordagem para a classificação das superfícies de engenharia.

A rugosidade indica, relativamente a um plano de referência, as variações de altura de uma superfície. Esta pode ser medida ao longo de um perfil linear ou através de um conjunto de perfis lineares paralelos. Usualmente a rugosidade é caracterizada por dois parâmetros de altura estatística, de acordo com as normas ISO e ANSI. Estes parâmetros são a rugosidade média, R_a e a rugosidade média quadrática, R_q . No entanto, é possível obter, para superfícies com propriedades diferentes, o mesmo valor de R_a e R_q , sendo estes parâmetros úteis para classificar superfícies do mesmo tipo ou que foram produzidas pelo mesmo método. A Figura 1.7 apresenta um perfil de rugosidades genérico $z(x)$, assim como várias tipologias de perfis com o mesmo valor de rugosidade média, R_a . A altura do perfil em cada ponto de coordenada x , ao longo do comprimento de medição l_n , é obtida com base numa linha de referência. A medição destas alturas permite a definição da linha média, de modo a que a área compreendida entre o perfil medido e a linha média seja igual tanto acima como abaixo desta. A altura da linha média é designada por m . O valor de rugosidade média aritmética, R_a , representa a média aritmética dos valores absolutos dos desvios face à linha média. O valor da rugosidade média quadrática, R_q , representa a raiz quadrada da média aritmética do quadrado dos desvios face à linha de referência. Outro parâmetro estatístico utilizado é a *Skewness*, R_{sk} , uma vez que permite avaliar a simetria do perfil em relação à linha média. A Figura 1.8 apresenta a comparação entre dois perfis de modo a evidenciar as diferenças neste parâmetro. O seu cálculo baseia-se na análise estatística do perfil de modo a avaliar o desvio padrão σ , definido como a raiz quadrada da média aritmética do quadrado do desvio vertical em relação à linha média. Uma distribuição positiva do valor de *Skewness* indica a concentração de material perto da base do perfil, enquanto um valor negativo indica uma concentração de material perto do topo (ver Figura 1.8), o que pode corresponder a vales mais profundos, o que se reflete em menores coeficientes de atrito (Sedlaček, Vilhena, Podgornik, & Vižintin, 2011).

Para caracterizar os valores de desvio extremos são utilizados cinco parâmetros: R_t é a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo do perfil; R_p representa o valor máximo de pico face à linha média; R_v representa o valor máximo de vale face à linha média; R_z define a distância entre as médias dos 5 picos mais altos (p_i) e dos 5 vales mais profundos (v_i), com base no número total de pontos (n) adquiridos ao longo do comprimento l_n ; R_{pm} define a distância da média dos cinco picos mais elevados face à linha média. A utilização de valores médios tem como objetivo a redução do efeito

de picos ou vales pontuais não representativos do perfil analisado. Os valores de R_z e de R_{pm} apresentam melhor reprodutibilidade, sendo a sua utilização recomendada pelas normas *International Organization for Standardization* (ISO). Em várias aplicações do ramo da tribologia, os valores dos picos mais altos face à linha média do perfil são importantes devido aos danos causados por estas asperidades na interface. Por outro lado, os vales podem afetar a retenção de lubrificante e o seu fluxo. A Tabela 1.1 apresenta um resumo das expressões utilizadas para o cálculo de alguns destes parâmetros e que serão utilizados no decurso deste trabalho. Para mais detalhes acerca de parâmetros de rugosidade recomenda-se a consulta de Bhushan, 2001 e Gadelmawla, Koura, Maksoud, Elewa, & Soliman, 2002.

Tabela 1.1 – Definição de parâmetros de rugosidade (2D).

R_a	$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L z - m dx$
R_q	$R_q^2 = \frac{1}{L} \int_0^L (z^2) dx$
Skewness	$R_{sk} = \frac{1}{\sigma^3 L} \int_0^L (z - m)^3 dx$
R_z	$R_z = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^n v_i \right)$

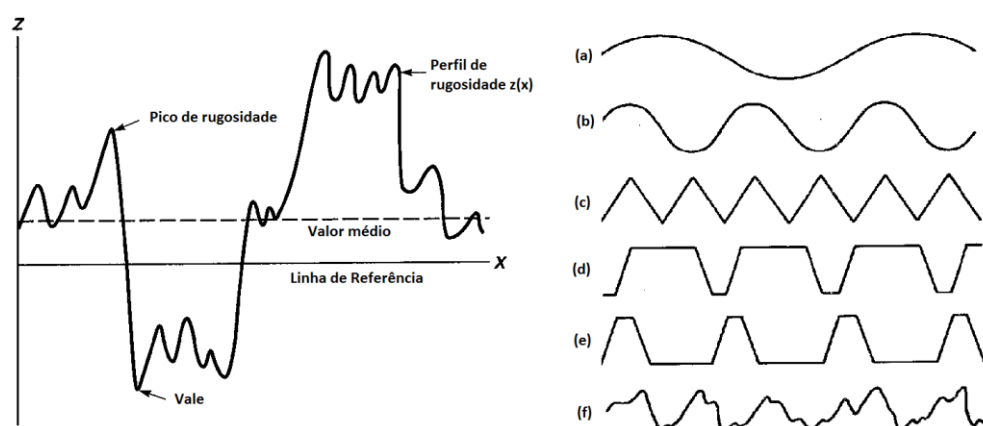


Figura 1.7 – À Esquerda: representação esquemática do perfil $z(x)$ de uma superfície; À Direita: perfis de superfícies com o mesmo valor de R_a (Adaptado de Bhushan, 2001).

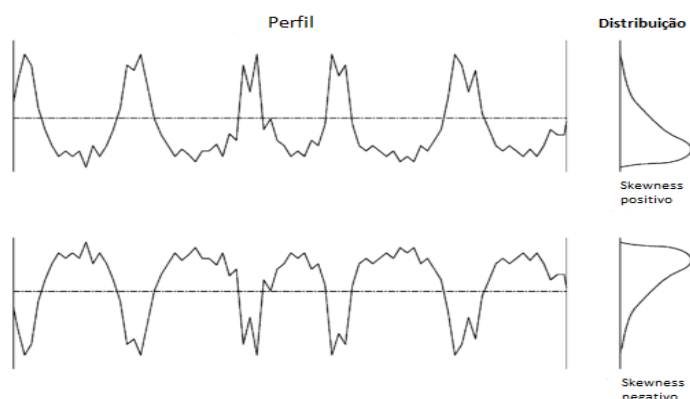


Figura 1.8 – Definição de *Skewness* (R_{sk}) e amplitude da curva de distribuição (adaptado de Gadelmawla *et al.*, 2002).

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é explorar a potencialidade do ensaio de atrito com freio (*Drawbead test*) para estudar o comportamento mecânico e tribológico dos aços de alta resistência, incluindo a geração de calor por deformação plástica e/ou atrito. O equipamento de ensaio utilizado foi desenvolvido no âmbito de um projeto cujo objetivo era estabelecer a ponte de conhecimento entre a modelação dos problemas de conformação e a determinação experimental dos parâmetros de contacto com atrito mais adaptados à modelação do fenómeno. Neste contexto, esse projeto não contemplou a necessidade de medir campos de temperatura, pelo que no trabalho atual foi necessário explorar diferentes estratégias, de modo a ultrapassar os constrangimentos de posicionamento dos equipamentos. O trabalho envolveu, também, a elaboração de um guia com o procedimento experimental, de modo a garantir a reprodutibilidade dos ensaios, que inclui a definição dos métodos a utilizar no tratamento e análise dos resultados. Os resultados analisados incluem a evolução com o tempo da força do punção e da amarra e da temperatura da amostra, o perfil após retorno elástico, a pressão de contacto e a análise dos perfis de rugosidade da superfície da chapa.

1.3. Esquema da Dissertação

Esta dissertação está organizada em quatro capítulos. No presente capítulo enquadra-se o trabalho, no contexto da estampagem de aços de alta resistência, que envolvem forças de contacto mais elevadas, pelo que é importante analisar a influência das

condições do processo no aquecimento induzido quer por deformação quer por atrito e nas condições de contacto. Neste contexto, é apresentado o ensaio selecionado para a realização deste trabalho: o ensaio de atrito com freio e uma breve revisão bibliográfica acerca da sua utilização. Este primeiro capítulo termina com a definição dos objetivos do trabalho. No segundo capítulo descreve-se o procedimento experimental recomendado para a realização dos ensaios, bem como alguns detalhes acerca da análise dos perfis de rugosidade e de retorno elástico. No terceiro capítulo são apresentados alguns resultados de modo a evidenciar as potencialidades do ensaio de atrito com freio, bem como algumas dificuldades. No quarto e último capítulo são apresentadas as conclusões finais e algumas propostas para trabalhos futuros.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O equipamento utilizado foi projetado no âmbito do projeto PTDC/EME-TME/74152/2006: “Estudos de atrito em processos de conformação de chapa metálica: ponte para o conhecimento entre a análise experimental e a modelação numérica”, de modo a possibilitar a realização dos ensaios de atrito com freio com recurso a uma máquina de ensaios de tração (Fernandes, 2008). O equipamento foi projetado de modo a permitir a fácil alteração dos parâmetros geométricos do ensaio, garantindo sempre um correto alinhamento dos vários elementos em relação à amarra. Na Figura 2.1 representa-se um esquema do equipamento de ensaio de atrito com freio, evidenciando os vários elementos constituintes.

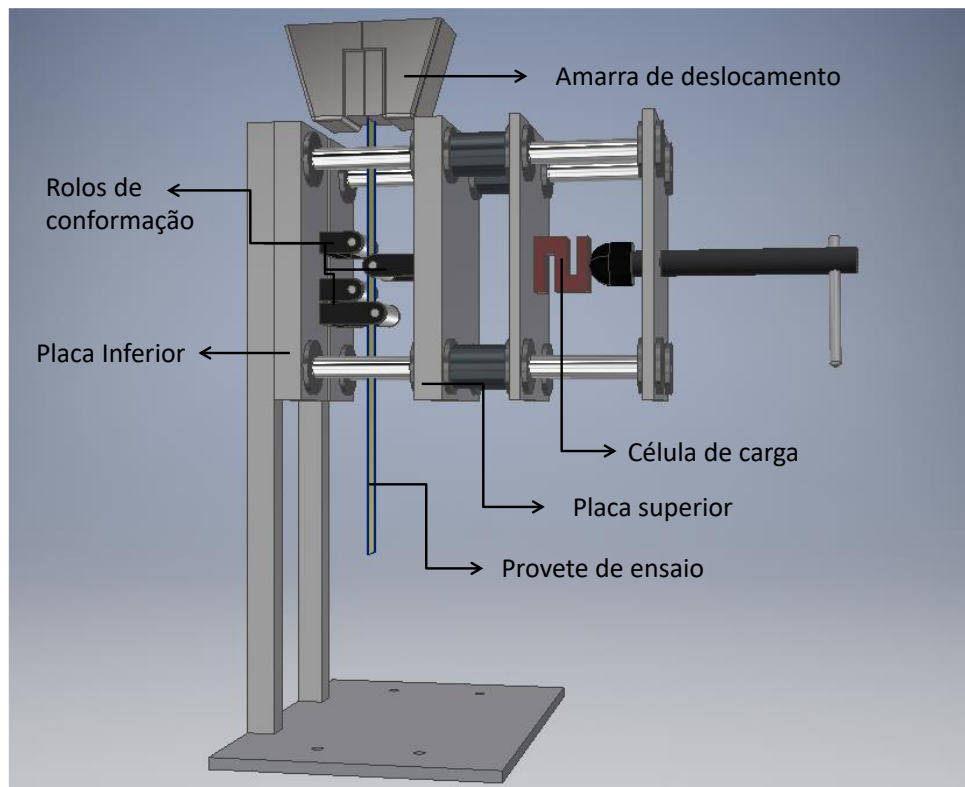


Figura 2.1 - Representação 3D do equipamento de ensaio.

No decurso deste trabalho, o equipamento de ensaio de atrito com freio foi testado em duas máquinas distintas: uma máquina INSTRON de ensaios de tração pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) e uma máquina SIFAMA do Instituto de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade do Porto (IDMEC), como se mostra na Figura 2.2 a) e b), respetivamente.



Figura 2.2 - Montagem do equipamento de ensaio de atrito com freio: À direita: máquina SIFAMA do IDMEC; À esquerda: máquina de ensaios de tração do DEM.

Como referido anteriormente, um dos objetivos deste trabalho consiste em avaliar a potencialidade deste ensaio para analisar o calor gerado por deformação e/ou atrito. Deste modo, alguns dos parâmetros de processo foram pré-definidos, numa tentativa de gerar a maior quantidade de calor possível. Como foi referido, os parâmetros que podem ser alterados são o diâmetro dos rolos de conformação, a profundidade de penetração do punção, o deslocamento e a velocidade da amarra de fixação, a folga entre os rolos e as condições de lubrificação. Os rolos de conformação disponíveis apresentam um diâmetro de 21 mm. De modo a maximizar a deformação plástica e, consequentemente, o calor gerado por deformação, foi selecionado um valor de penetração total para o punção, *i.e.* igual à soma do diâmetro dos rolos com a espessura inicial da chapa. Assim, o valor considerado foi de 21.8 mm para os aços DP500 e DP780 e de 22.5 mm para o aço HSLA420. A folga c inicialmente selecionada corresponde a $t + 0.1t$, sendo t a espessura do

provete. De modo a maximizar o calor gerado pelo contacto com atrito entre a chapa e os rolos de conformação, os ensaios foram realizados sem lubrificação.

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados nos testes e é descrito o procedimento de ensaio recomendado, de modo a garantir a sua reprodutibilidade. Por último, é apresentado um resumo das condições de ensaio analisadas.

2.1. Materiais

Os materiais selecionados para este estudo são dois aços *dual-phase*: DP500 e DP780, com uma espessura inicial de 0.8 mm; e um aço de alta resistência HSLA420, com uma espessura inicial de 1.5 mm. Estes materiais não apresentam nenhum tipo de revestimento. As propriedades mecânicas destes materiais são apresentadas na Tabela 2.1. Foram realizadas 5 medições de espessura ao longo do comprimento das chapas de modo a aferir a espessura inicial indicada pelo fornecedor. A espessura inicial média determinada para cada material é também apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas dos materiais e espessura inicial média. $R_{p0.2}$: tensão limite de elasticidade; R_m : Tensão de rotura; Eu [%]: percentagem de alongamento à carga máxima; Et [%]: percentagem de alongamento à rotura. Para o HSLA420 são indicadas as propriedades mecânicas do fornecedor, sendo que Eu [%]: percentagem mínima de alongamento A80.

Material	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	Eu [%]	Et [%]	Espessura média t_m [mm]
DP500	356	544	18.18	29.52	0.83
DP780	526	843	12.53	17.96	0.81
HSLA420*	420-520	470-800	$\geq 17\%$	-	1.56

* O ensaio de tração realizado para este material indica um valor de $R_{p0.2}$ de 475 MPa e de R_m 520 MPa.

A largura dos provetes, w , foi definida com base em resultados anteriores (Vilela, 2007), que mostram que um valor superior a 25 mm permite obter condições próximas de deformação plana. Estas condições facilitam a comparação entre resultados experimentais e numéricos. Assim, com base também nas limitações do equipamento, foi selecionada uma largura de 25 mm.

O comprimento do provete foi definido tendo em conta não só as limitações impostas pelo equipamento e a sua montagem na máquina de ensaios de tração do DEM, mas também um valor de deslocamento da amarra que permita atingir o regime

estacionário. O comprimento selecionado para o provete é de $L = 450$ mm de modo a possibilitar a sua montagem e ensaio, para diferentes velocidades da amarra.

Os provetes foram obtidos através de corte por guilhotina. O comprimento do provete corresponde sempre à direção de laminagem. No caso dos aços DP500 e DP780, estes foram fornecidos no formato de chapa plana. No entanto, o HSLA420 é fornecido em rolo, pelo que é possível observar uma curvatura nos provetes, após corte. Nos ensaios realizados na máquina de tração do DEM, a superfície convexa foi colocada em contacto com os dois rolos de conformação.

O processo de corte adotado tem como consequência a formação de rebarbas, as quais têm de ser eliminadas antes do ensaio de modo a não causar danos no equipamento, em particular nos rolos de conformação. A eliminação das rebarbas foi realizada com o auxílio de uma lima, sendo posteriormente utilizada uma lixa fina P1000, de modo a suavizar a zona tratada. Após este procedimento, procedeu-se à proteção dos provetes com um lubrificante fino (WD40) de modo a evitar a oxidação da superfície antes da realização dos ensaios. A Figura 2.3 apresenta exemplos de provetes de ensaio.

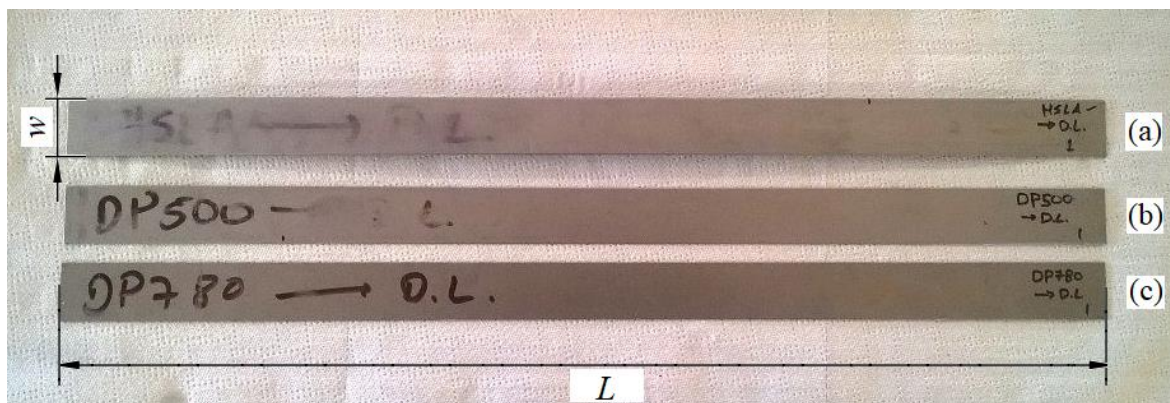


Figura 2.3 - Provetes de ensaio de atrito com freio: (a) HSLA420 (b) DP500 e (c) DP780.

2.2. Procedimento de ensaio

Antes de se proceder à realização de cada ensaio, o provete deve ser limpo com álcool etílico de forma a remover o lubrificante de conservação e possíveis óxidos formados, assim como qualquer sujidade superficial. Os provetes devem ser identificados consoante o material e os parâmetros de ensaio utilizados. Posteriormente, procede-se à realização do ensaio, de acordo com os passos seguintes:

i. Montagem dos rolos de conformação e guia:

Em primeiro lugar procede-se à montagem do punção, de modo a que este fique centrado na placa superior do equipamento (ver Figura 2.1).

A posição relativa do equipamento em relação à amarra da máquina de tração utilizada obriga a que, de forma a alinhar o provete com os rolos de conformação localizados na placa inferior (ver Figura 2.1), seja necessário proceder à compensação de altura dos rolos de conformação em função da espessura do provete a ensaiar. Para tal são utilizados calços, obtidos da chapa do material a ensaiar através de corte. A largura recomendada para os calços é de 25 mm e o comprimento deve ser tal que permita a sua colocação, como exemplificado na Figura 2.4. De notar que o ajuste da posição do rolo guia envolve a colocação de 2 calços, de menor comprimento. A folga entre os rolos de conformação é ajustada com recurso a um paquímetro através da medição da distância entre os suportes dos rolos, d . Cada um destes suportes tem uma largura de 20 mm pelo que, para um diâmetro dos rolos de 21 mm, estes estão colocados exteriormente ao suporte, como se mostra na Figura 2.5. Sendo assim, para garantir uma folga c , a distância entre os suportes de dois rolos de conformação consecutivos é dada por $d = c + l$ [mm]. A distância do rolo guia ao primeiro rolo de conformação, d' , não é relevante, desde que seja garantido o alinhamento da chapa ao entrar na zona de conformação (ver Figura 2.5). Por fim, deve ser verificada a distância D entre os suportes dos rolos de conformação montados na placa inferior, para verificar se estes se encontram alinhados paralelamente (Figura 2.5). Esta distância D é função do raio dos cilindros de conformação r e da folga c . No final deste procedimento, os rolos devem ser limpos com álcool para remover qualquer sujidade superficial.

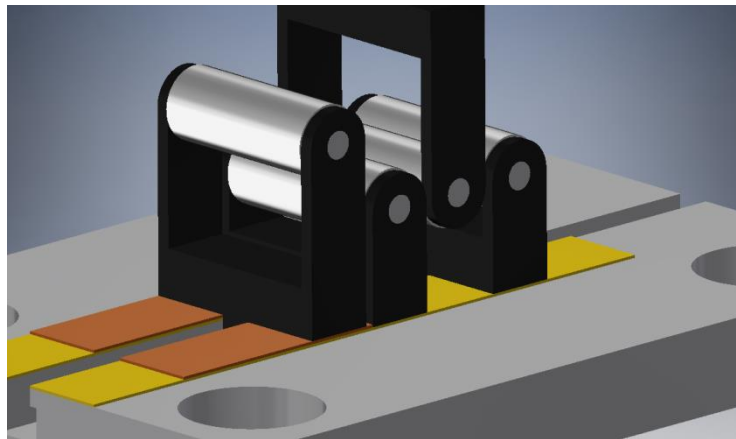


Figura 2.4 - Representação da compensação de altura dos rolos de conformação (a amarelo) e da altura da guia (a laranja).

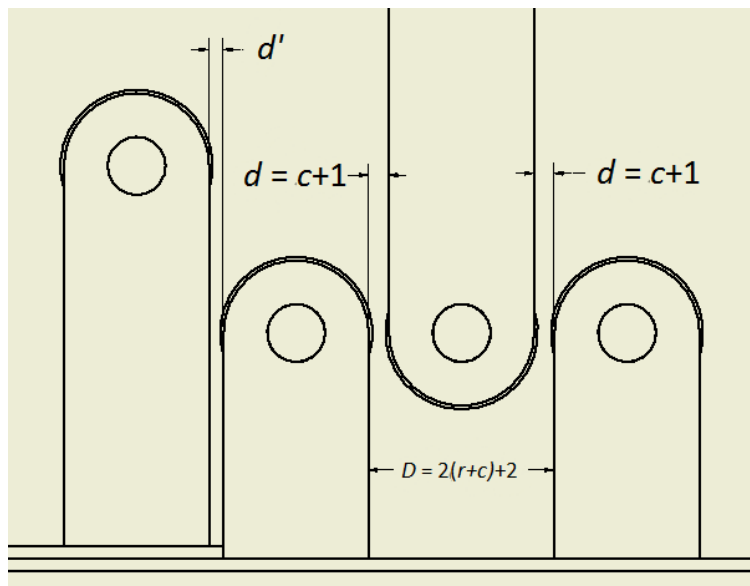


Figura 2.5 - Distâncias auxiliares para a montagem dos rolos na direção XX (ver Figura 1.4).

ii. Aperto da amarra de deslocamento:

O provete deve ser posicionado de forma a ficar apoiado nos rolos de conformação localizados na placa inferior e sob o rolo guia. De seguida procede-se ao aperto da amarra, com o cuidado de garantir que o provete está devidamente centrado em relação aos rolos. Na amarra devem estar compreendidos, pelo menos, 40 mm do comprimento do provete, de modo a garantir que posteriormente não há escorregamento de material relativamente à amarra.

iii. Deslocamento do punção:

O deslocamento do punção (direção ZZ) é feito manualmente através de um parafuso (ver Figura 1.4). Para a condição de penetração total é necessário garantir o alinhamento dos centros dos três rolos de conformação. Este alinhamento pode ser verificado com o auxílio de uma chapa plana retificada, que deve ser colocada sobre o punção, como se mostra na Figura 2.6. De salientar que a penetração não influencia o valor máximo da força do punção e da amarra, para valores superiores à penetração total, pelo que é preferível proceder ao ajuste da posição por excesso, de modo a garantir a condição de penetração total (Nine, 1982).

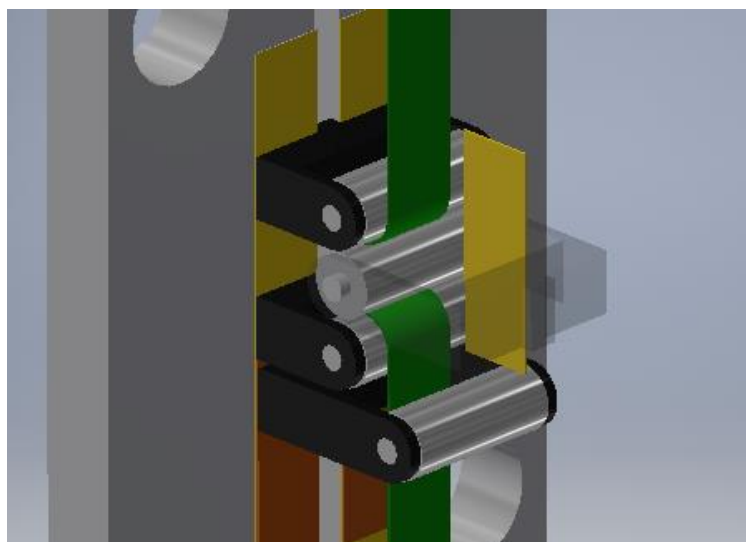


Figura 2.6 - Verificação do valor de penetração total, com auxílio de uma chapa plana. O elemento de suporte do rolo de conformação posicionado na placa superior foi eliminado de modo a facilitar a visualização.

iv. Deslocamento da amarra de fixação:

Esta etapa é ditada pelas características da máquina utilizada. No caso dos ensaios realizados na máquina de tração do DEM, recorre-se ao *software* de controlo para definir a velocidade do ensaio (em mm/min) e o deslocamento total da amarra (em mm). Uma vez definidos estes parâmetros e verificadas todas as condições de ensaio, procede-se à sua realização.

v. Remoção do provete:

Em primeiro lugar procede-se ao desaperto da amarra, seguido do desaperto do punção. De seguida, desloca-se a amarra de fixação de modo a libertar a extremidade da chapa. Este procedimento deve ser realizado com precaução devido ao retorno elástico do provete. Devido às dimensões do equipamento, é necessário proceder em seguida à remoção do rolo guia para retirar o provete sem comprometer a análise do retorno elástico. Após a remoção do rolo guia, retira-se o provete pela parte lateral.

Importa realçar que o passo **i.** só é necessário caso se pretenda alterar os parâmetros geométricos do ensaio ou utilizar um material de espessura inicial diferente.

O equipamento prevê a aquisição da evolução da força do punção com recurso a um osciloscópio *PicoScope* ADC-216 (Largura de banda de 166kHz, Taxa de aquisição de 333kS/s), e processamento de sinal, com auxílio do *Software PicoScope*®6.

2.3. Aquisição do campo de temperaturas

A aquisição da evolução do campo de temperaturas do provete foi realizada com o auxílio de câmaras térmicas (infravermelhos). No DEM, foram realizados ensaios preliminares com uma câmara FLIR One e com uma câmara FLIR A325 30Hz 30fps com uma lente FOL 18 mm. Esta última foi a utilizada nos ensaios realizados no IDMEC. De modo a captar com rigor a informação relativa à evolução da temperatura durante o ensaio foi necessário estudar a posição de colocação da câmara térmica, assim como os parâmetros de calibração dos equipamentos.

2.3.1. Parâmetros do equipamento

A aquisição do campo de temperaturas de forma precisa requer a definição prévia de cinco parâmetros (FLIR Systems, 2014): a emissividade, a temperatura refletida aparente, a distância de aquisição, a humidade relativa e a temperatura atmosférica.

A emissividade, ϵ , é o parâmetro mais importante pois mede a quantidade de radiação emitida pelo objeto em análise, quando comparada com um corpo negro à mesma temperatura. O valor selecionado neste trabalho é de 0.85, o que corresponde a um aço

laminado a frio ($\varepsilon \in [0.75 - 0.85]$). A temperatura refletida aparente é o parâmetro de compensação da radiação refletida no objeto. Para objetos com um valor de emissividade baixo e diferenças de temperatura significativas, face à refletida, este parâmetro é importante. No caso em estudo, os ensaios foram realizados num ambiente em que este parâmetro não é relevante, pelo que o valor selecionado correspondeu ao mesmo valor da temperatura atmosférica de 28 °C. A distância de aquisição é medida entre a superfície do objeto em estudo e a lente da câmara. Este parâmetro tem como objetivo compensar a radiação absorvida pela atmosfera, assim como a radiação proveniente da própria atmosfera. Todos os ensaios foram realizados com uma distância de aproximadamente de 0.2 m. O equipamento permite compensar a influência da humidade relativa da atmosfera. Contudo, para distâncias reduzidas, é recomendada a adoção do valor *standard* de 50%. A temperatura atmosférica corresponde à temperatura entre o objeto e a lente, pelo que neste caso foi considerada a temperatura do ambiente envolvente. Na Tabela 2.2 apresenta-se um resumo dos valores adotados para a realização dos ensaios.

Tabela 2.2 - Parâmetros de calibração das câmaras térmicas usadas.

Parâmetro	Valor
Emissividade, ε	0.85
Temperatura Refletida Aparente [°C]	28
Distância [m]	0.2
Humidade relativa [%]	50
Temperatura Atmosférica [°C]	28

2.3.2. Montagem do equipamento

Tal como referido anteriormente, foi necessário estudar a melhor posição para a montagem da câmara, tendo em consideração todas as limitações dimensionais impostas pelos vários equipamentos. Optou-se por captar a zona de saída do provete dos rolos de conformação, onde se prevê a temperatura mais elevada. A Figura 2.7 apresenta exemplos de campos térmicos adquiridos com as duas câmaras FLIR, para a posição definida. É possível observar a influência da reflexão nas superfícies do equipamento no campo térmico, em particular na figura à esquerda. Devido à reflexão das várias superfícies do

equipamento no provete de ensaio, foi necessário cobrir estas superfícies, com folhas de papel, como se mostra na Figura 2.8. O efeito destes elementos é evidente na redução das interferências no campo de temperaturas obtido, como se exemplifica na Figura 2.7.

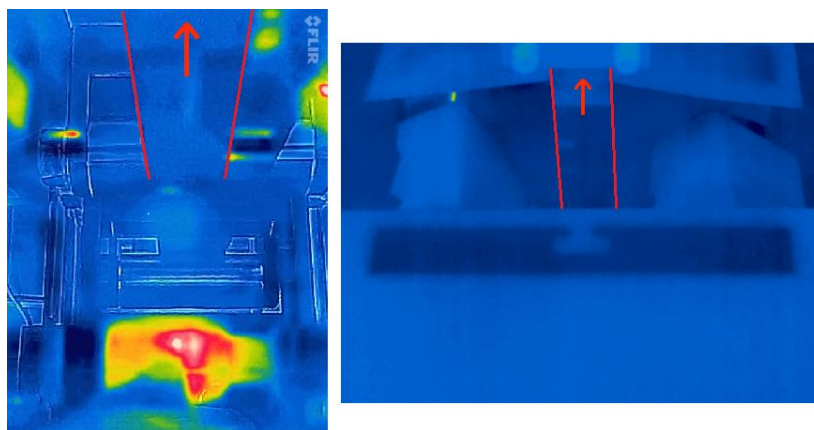


Figura 2.7 - À esquerda: campo térmico adquirido pela câmara FLIR One – ensaio realizado no DEM. À direita: campo térmico adquirido pela câmara FLIR A325 – ensaio realizado no IDMEC. As linhas a vermelho delimitam as extremidades da chapa e a seta indica o sentido do deslocamento.

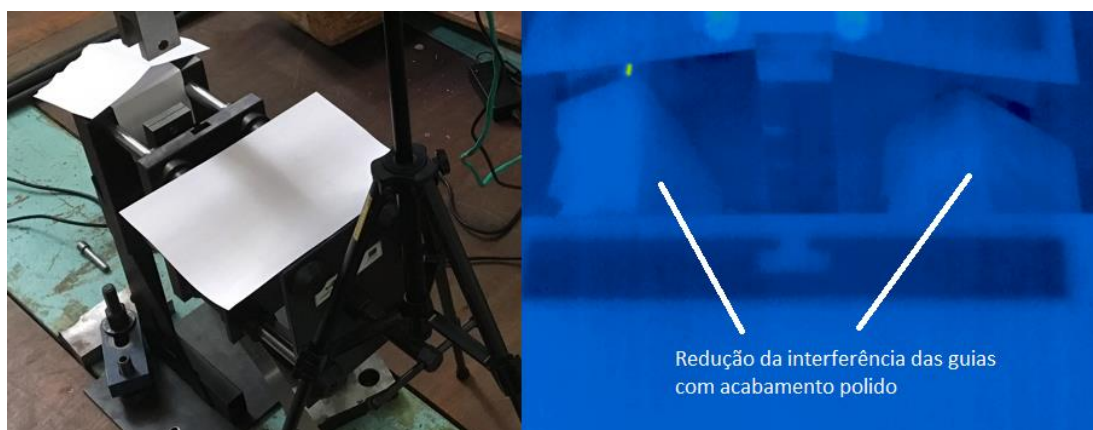


Figura 2.8 - Montagem do equipamento com folhas de papel (à esquerda), de modo a reduzir a interferência no do campo térmico adquirido pela câmara FLIR A325 (à direita) – ensaio realizado no IDMEC.

2.4. Análise dos perfis de rugosidade e configuração do perfilômetro

A análise do perfil de rugosidade foi realizada com perfilometria 2D. O equipamento utilizado foi um perfilômetro Mitutoyo Surftest SJ-500 e o tratamento de dados foi realizado com o *software* de processamento FORMTRACEPACK. Este método mecânico de medição regista os movimentos verticais do apalpador, com ponta de diamante, à medida que este se desloca a uma velocidade constante sobre a superfície a ser estudada. Associado ao perfilômetro 2D podem surgir erros resultantes de distorção, cinemática e de carga. O diâmetro da ponta do apalpador distorce o perfil nos raios de curvatura dos picos e dos vales, como exemplificado na Figura 2.9. A cinemática associada à massa do perfilômetro pode não conseguir manter contacto com a superfície. Este erro depende da geometria da superfície, da velocidade de medição e das propriedades do equipamento. Por fim, mesmo que com um valor baixo de carga, esta pode causar pressões locais suficientes para induzir deformação elástica na superfície em análise.

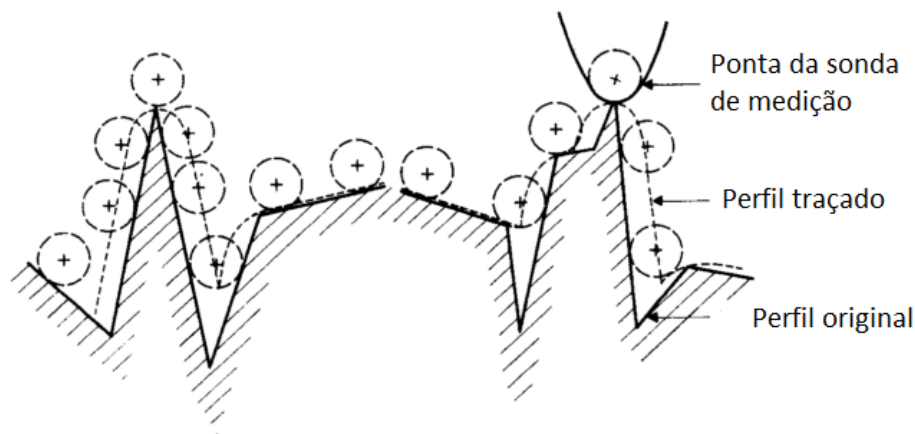


Figura 2.9 - Representação da distorção do perfil da superfície (adaptado de Bhushan, 2001).

O perfil adquirido $z(x)$ foi também analisado com auxílio do *Software* OriginPro, de modo a proceder a uma análise espectral em bandas de dois terços de oitava, como complemento à análise de parâmetros de rugosidade. A análise espectral em bandas de dois terços de oitava faz a análise em frequência do perfil e avalia as amplitudes das frequências que constituem o perfil de rugosidade. A análise espectral em bandas de dois

terços de oitava baseou-se na análise das gamas de frequências apresentadas na Tabela 2.3. Não foram analisadas frequências inferiores a 0.3 Hz uma vez que o comprimento total de medida utilizado foi de 4 mm, pelo que não é possível analisar períodos superiores a este valor. Por outro lado, não foram analisadas frequências superiores a 99.213 Hz, uma vez não é viável analisar períodos inferiores a 0.01 mm. Esta análise permite determinar a amplitude média, a_i , associada a cada uma das gamas de frequência, que podem ser representadas pelo seu valor médio, f_i , também apresentado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Gama de frequências utilizada na análise espectral em bandas de dois terços de oitava.

i	Gama de frequência em análise [Hz]	Valor central da frequência [Hz], f_i
0	<0.3	-
1	0.3 – 0.48	0.39
2	0.48 – 0.76	0.61
3	0.76 – 1.20	0.98
4	1.20 – 1.90	1.55
5	1.90 – 3.02	2.46
6	3.02 – 4.80	3.91
7	4.80 – 7.61	6.20
8	7.61 – 12.08	9.84
9	12.08 – 19.17	15.63
10	19.17 – 30.43	24.80
11	30.43 – 48.31	39.37
12	48.31 – 76.69	62.50
13	76.69 – 121.73	99.21
14	>121.73	-

Assumindo que o perfil em análise é isotrópico e Gaussiano, este pode ser representado por uma série sinusoidal, tal que

$$z(x) \approx y = \sum_{i=1}^{13} a_i \sin(2\pi f_i x). \quad (2.1)$$

Para realizar as medições é necessário definir as condições de ensaio no *Software* FORMTRACEPAK. De modo a definir estas condições é necessário proceder à realização de testes preliminares para determinar os parâmetros de ensaio, conforme a norma ISO 4288:1996 (ISO, 1996). A Tabela 2.4 apresenta os parâmetros seleccionados no estudo. A velocidade de medição foi seleccionada, dentro da gama de velocidade lentas, de

modo a reduzir erros associados à cinemática. A escala vertical (gama) foi selecionada de modo a evitar a situação de *Over-Range*.

Os ensaios foram realizados segundo duas direções: de laminagem (DL – 0°) e a direção transversa (DT – 90°), para as condições de material não deformado e deformado. Para cada orientação foram realizadas 10 medições, em cada uma das chapas, com uma orientação o mais próxima possível da DL e da DT, garantindo estabilidade da posição inicial. Todas as medições foram realizadas com um espaçamento mínimo de 1 mm entre elas. Para determinadas zonas foi verificada a existência de riscos visíveis, que poderiam alterar os resultados, tendo sido evitados. A Figura 2.10 representa o equipamento de medição, assim como o posicionamento da amostra em relação ao apalpador.

Tabela 2.4 - Condições de medição determinadas de acordo com a norma ISO 4288 após realização de ensaios preliminares.

Parâmetro	Valor
Comprimento de amostra, l_n [mm]	4
Passo [μm]	1
Cutoff, λ_c [mm]	0.8
Velocidade medição [mm/s]	0.05
Gama [μm]	800.0 [-400; 400]

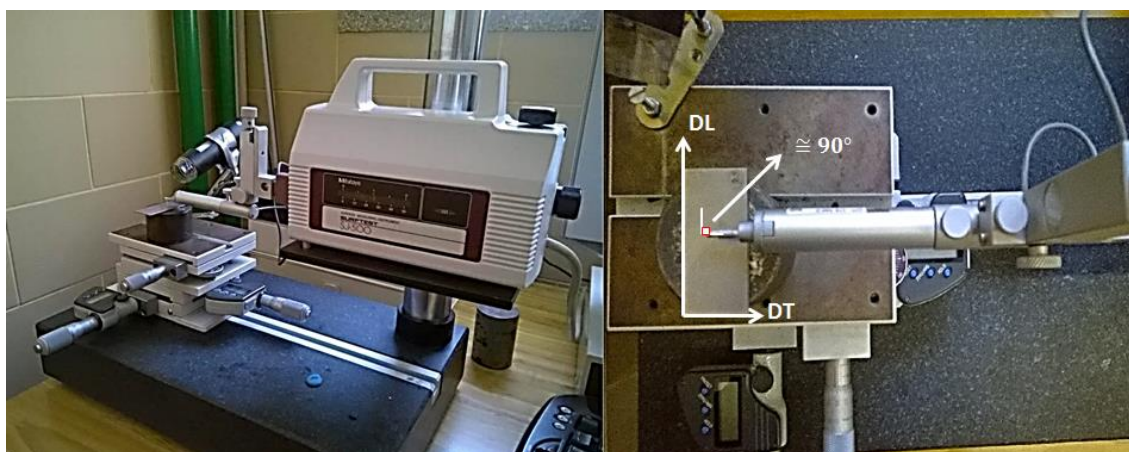


Figura 2.10 – À esquerda: Perfilómetro Mitutoyo Surftest SJ-500 e à direita: posicionamento da amostra.

Previamente à realização das medições do perfil de rugosidade devem ser considerados vários aspetos relevantes na preparação e manuseamento para uma aquisição de dados o mais precisa possível. Sem um cuidado adequado, várias informações acerca do perfil podem ser perdidas ou adulteradas, com o consequente aumento do erro associado ao(s) parâmetro(s) em análise. Desses cuidados destaca-se evitar o contacto da superfície com as mãos ou com superfícies duras, de modo a evitar adesão de partículas ou danos superficiais. Convém também garantir a devida proteção da atmosfera envolvente, que pode originar a formação de óxidos e acumulação de sujidade. Para limpeza das amostras foi utilizado álcool etílico.

A rugosidade da superfície foi caracterizada com o auxílio de quatro parâmetros: a rugosidade média aritmética (R_a), a rugosidade média quadrática (R_q), a rugosidade média de picos para vales (R_z) e o fator de *Skewness* (R_{sk}).

2.5. Aquisição do perfil de retorno elástico

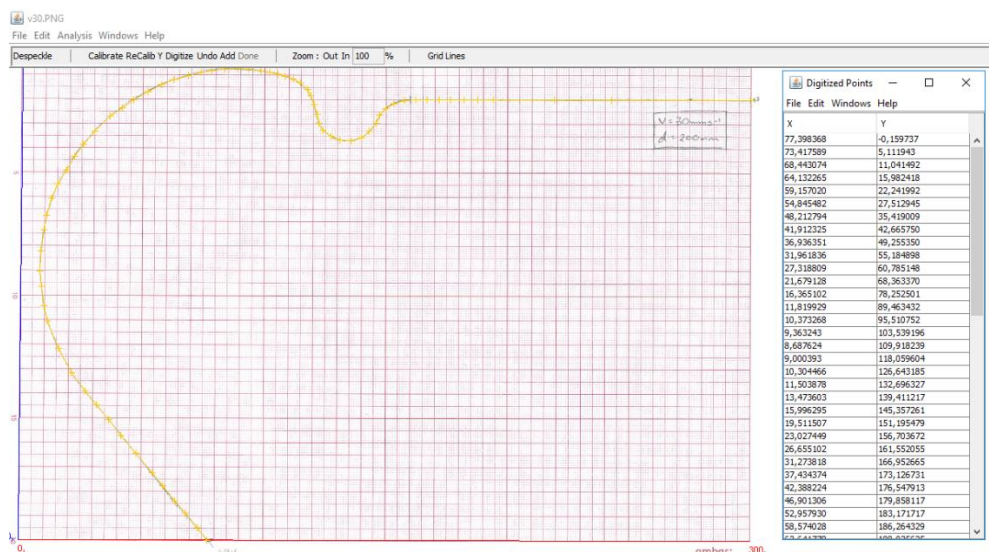


Figura 2.11 – Exemplo de aquisição do perfil de retorno elástico com o auxílio do software Java Plot Digitizer.

A análise do retorno elástico requer a aquisição do perfil lateral da chapa deformada, sendo este traçado numa folha milimétrica. De modo a minimizar a distorção do perfil, a superfície lateral do provete deformado foi revestida com grafite de modo a reproduzir o perfil no papel, exercendo pressão. O perfil foi posteriormente digitalizado via *scanner* e tratado com o auxílio do software Java Plot Digitizer, de modo a adquirir um conjunto de coordenadas representativas do perfil. A Figura 2.11 exemplifica este

procedimento para um dos ensaios. De notar que a seleção dos pontos é feita manualmente, sendo necessário rigor na sua escolha de modo a reproduzir corretamente o perfil.

2.6. Ensaios realizados

Tal como mencionado anteriormente, foram realizados ensaios no DEM e no IDMEC. Na Tabela 2.5 encontra-se um resumo dos parâmetros de processo utilizados para a realização dos ensaios. Importa realçar que este conjunto de ensaios preliminares foram realizados com o objetivo de avaliar as potencialidades de aquisição do campo térmico e identificar possíveis dificuldades. Inicialmente foram realizados os ensaios no DEM. Aquando da realização dos ensaios no IDMEC, optou-se por utilizar um valor de folga c superior, de modo a reduzir o ângulo de contacto entre a chapa e os rolos de conformação, *i.e.* reduzir a condução de calor para as ferramentas (Costa, 2017).

No equipamento do DEM foram realizados os ensaios com uma velocidade de avanço da amarra menor do que a utilizada nos ensaios do IDMEC. Também o deslocamento total imposto à amarra é diferente, devido a limitações dimensionais da máquina de ensaios de tração. Na Tabela 2.6 e Tabela 2.7 encontram-se os parâmetros de cada ensaio realizado. O ensaio **I.780_60+15** consiste em eliminar a deformação imposta num provete obtido nas condições do ensaio **I.780_60** e realizar outra passagem com uma velocidade de 15 mm/s. Importa ainda referir que nas tabelas são indicados os valores calculados para a velocidade média, V_{out} , com base nos dados adquiridos ao longo do ensaio e o deslocamento total registado para a amarra, Δx_{out} . O subscrito “*in*” é utilizado para definir os mesmos parâmetros de entrada. Opta-se por apresentar estes dados uma vez que a máquina de ensaios de tração do DEM não permitiu cumprir o deslocamento total imposto, em particular quando selecionado o modo de velocidade rápida. No entanto, só foi possível detetar este problema com base na medição local do deslocamento total da amarra, que não foi suficientemente rigorosa para permitir uma discussão dos resultados. Este comportamento indicia problemas no sistema de controlo de movimento da máquina, razão pela qual alguns dos ensaios não foram realizados na totalidade.

Tabela 2.5 - Parâmetros gerais de ensaio.

Parâmetro	Dp500/780	HSLA420
Penetração (p) [mm]	21.8	22.5
Folga (c) [mm]	DEM: 0.88; IDMEC: 1.55	DEM: 1.65; IDMEC: 1.55
Lubrificação	Sem Lubrificação	

Tabela 2.6 - Parâmetros de ensaio específicos IDMEC.

Ensaio	Material	V_{in} [mm/s]	Δx_{in} [mm]	V_{out}	Δx_{out}
I.780_15	DP780	15	200	14.97	199.56
I.780_30	DP780	30	200	29.89	199.07
I.780_60	DP780	60	200	56.05	186.66
I.780_60+15	DP780	15	200	14.97	199.59
I.420_30	HSLA 420	30	200	29.87	198

Tabela 2.7 - Parâmetros de ensaio específicos DEM. O ensaio assinalado a cinzento foi realizado no modo de velocidade lenta.

Ensaio	Material	V_{in} [mm/s]	Δx_{in} [mm]	V_{out}	Δx_{out}
D.500_0.25(1)	DP500	0.25	60	0.25	51.4
D.500_0.25(2)	DP500	0.25	60	0.25	19.3
D.500_0.25(3)	DP500	0.25	60	0.25	31.4
D.500_5	DP500	5.00	250	4.98	242.4
D.780_0.25(1)	DP780	0.25	60	0.25	56.9
D.780_0.25(2)	DP780	0.25	60	0.25	60.1
D.780_1	DP780	1.00	120	0.8	~120
D.780_5	DP780	5	250	0.77	131.3
D.420_0.25(1)	HSLA420	0.25	120	0.25	64.4
D.420_0.25(2)	HSLA420	0.25	120	0.25	60.1

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de atrito com freio, mencionados na Tabela 2.6 e Tabela 2.7, de modo a evidenciar as potencialidades do ensaio e algumas dificuldades na análise e tratamento de resultados. As variáveis analisadas correspondem à evolução, com o tempo, da força da amarra, da força do punção e da temperatura, o retorno elástico e as características de rugosidade da superfície.

3.1. Evolução da força do punção e da amarra

A Figura 3.1 apresenta as curvas de evolução de força da amarra com o deslocamento, para os ensaios realizados no DEM. Durante a realização destes ensaios verificou-se a existência de problemas associados ao controlo da máquina de tração, em particular no modo de velocidade rápida, o que dificultou a imposição do deslocamento da amarra (ver seção 2.6). Para além disso, este problema de controlo do deslocamento parece também justificar as fortes oscilações observadas para a força da amarra, mesmo em condições para as quais era expectável observar o regime estacionário, qualquer que seja o material ensaiado. No entanto, a tendência global prevista é a expectável, *i.e.* a força máxima prevista é maior para o aço HSLA420, uma vez que a espessura desta chapa é maior, e a mínima corresponde ao DP500, uma vez que este material apresenta uma tensão limite de elasticidade e uma taxa de encruamento inferior ao DP780 (ver Tabela 2.1). O recurso ao modo de velocidade mais lento minimiza o efeito das oscilações, como se pode observar para o ensaio **D.780_1**, na Figura 3.1 (b). Nessas circunstâncias, o valor previsto para a força da amarra no regime estacionário é idêntico ao determinado na simulação numérica do processo, *i.e.* aproximadamente 3.0 kN (Costa, 2017).

A Figura 3.2 apresenta as curvas de evolução de força da amarra com o deslocamento, para os ensaios realizados no DEM. Estes resultados evidenciam a correlação entre a evolução destas duas componentes de força, sendo que a força do punção apresenta sempre uma evolução mais estável, o que parece corroborar os problemas de controlo do deslocamento da amarra. Apesar de todos estes ensaios terem sido realizados em modo de velocidade rápida, a sua análise confirma a capacidade de

aquisição da evolução com o tempo das duas forças. De salientar que, apesar das dificuldades, o valor previsto para a força da amarra no regime estacionário é sempre superior ao da força do punção, tal como previsto na simulação numérica do processo (Costa, 2017).

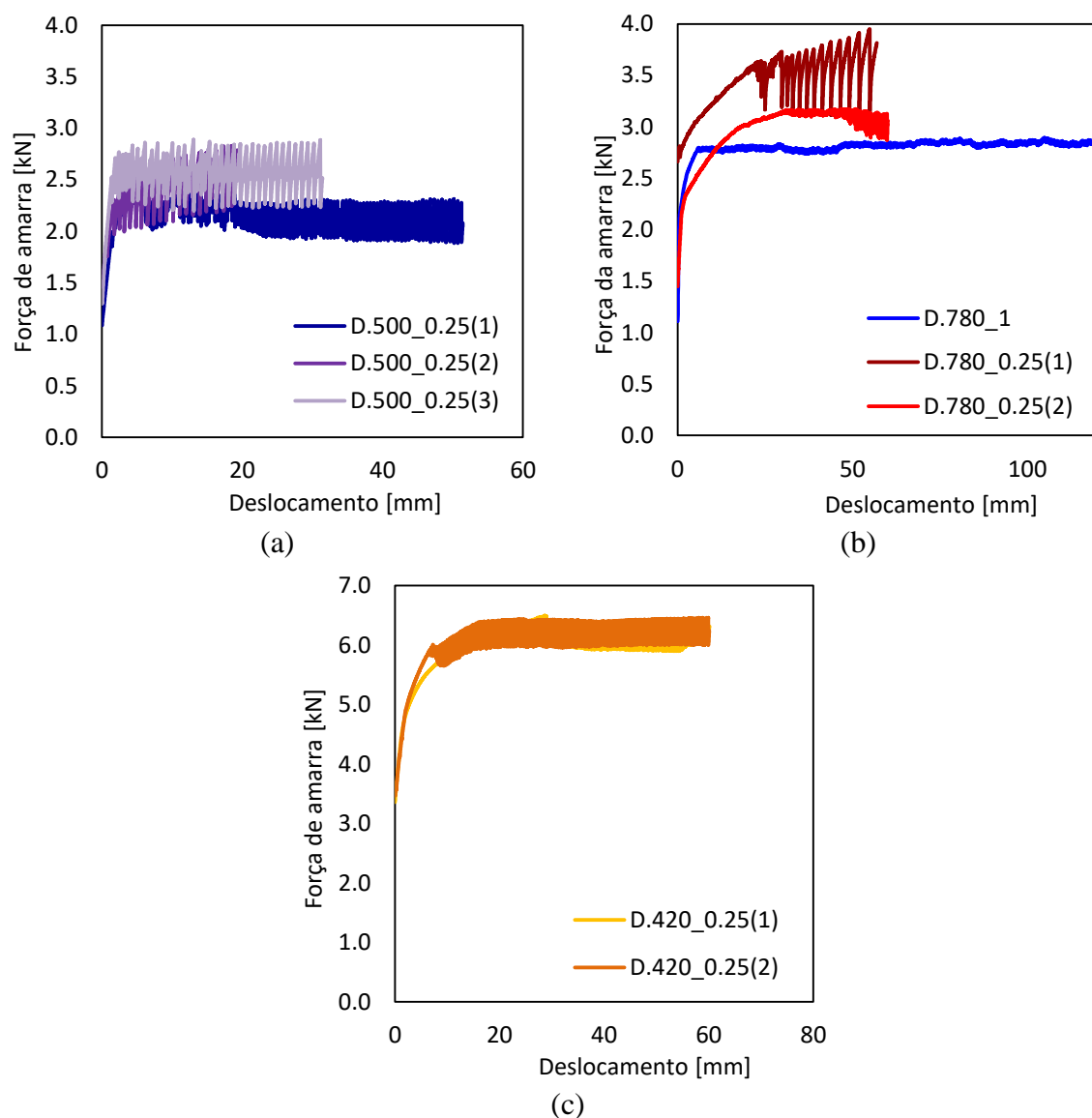


Figura 3.1 – Evolução da força da amarra com o deslocamento para os ensaios realizados no DEM: (a) DP500; (b) DP780; (c) HSLA420.

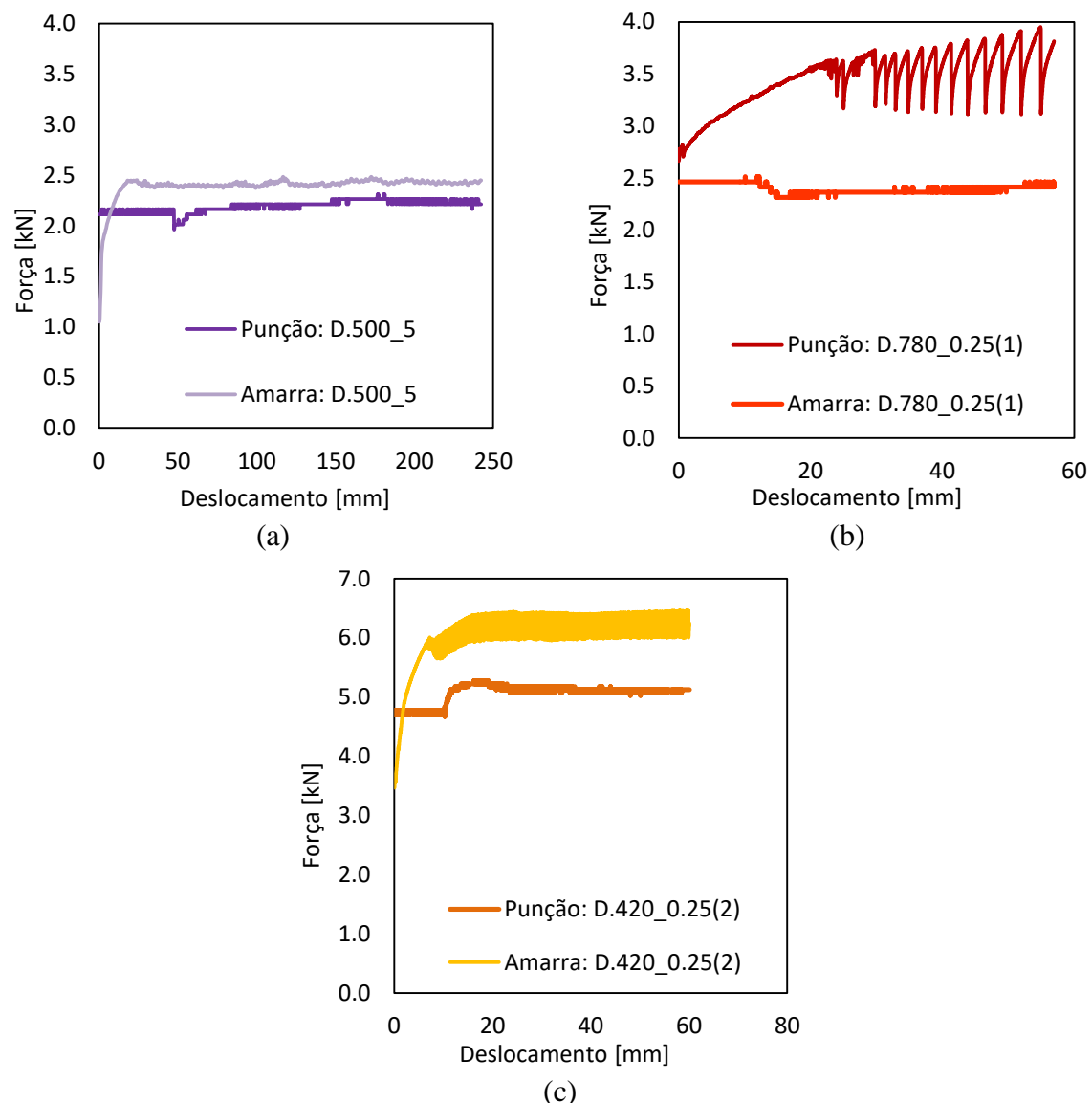


Figura 3.2 – Evolução da força da amarra e do punção com o deslocamento para os ensaios realizados no DEM: (a) DP500; (b) DP780; (c) HSLA420.

A Figura 3.3 apresenta a comparação das curvas de evolução de força da amarra com o deslocamento, para os ensaios realizados no DEM e no IDMEC. A força da amarra apresenta valores da mesma ordem de grandeza para todos os ensaios realizados nos dois equipamentos, para o mesmo material, o que permite validar a realização de ensaios no equipamento SIFAMA, desde que devidamente calibrado. Em geral, as forças obtidas nos ensaios realizados no IDMEC para o DP780 são inferiores. Pelo contrário, para o HSLA420 a força obtida no equipamento SIFAMA é superior. Estes resultados podem

estar associados ao facto de ter sido utilizado o mesmo valor de folga para os dois materiais (ver Tabela 2.5).

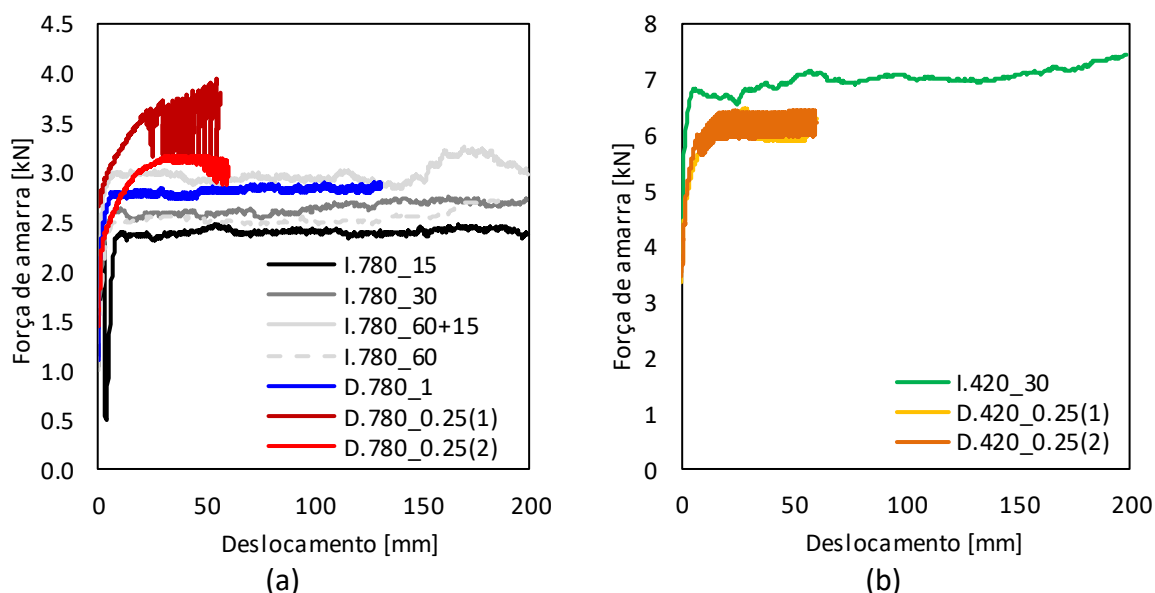


Figura 3.3 – Evolução da força da amarra com o deslocamento para os ensaios realizados no DEM e no IDMEC: (a) DP780; (b) HSLA420.

3.2. Retorno elástico

O procedimento descrito na seção 2.5 foi aplicado a alguns dos provetes ensaiados de modo a avaliar a sua aplicabilidade na medição das variáveis associadas ao retorno elástico. Importa realçar que o retorno elástico é fortemente influenciado pelo deslocamento total da amarra, uma vez que é ditado pelo gradiente de tensões residuais, ao longo da espessura, e da sua integração ao longo do comprimento total deformado. Como durante a realização dos ensaios no DEM se verificou a existência de problemas no controlo do deslocamento, não é possível garantir o valor total. Tal impede uma comparação direta dos resultados.

A Figura 3.4 apresenta os perfis de retorno elástico medidos. De modo a facilitar a sua comparação foi definido um sistema de eixos local, cuja origem corresponde à coordenada inferior da zona localizada entre os rolos de conformação. Um dos parâmetros comumente utilizados na análise do retorno elástico é o ângulo em relação à horizontal, na zona não deformada mais próxima da amarra. A influência do deslocamento total pode ser confirmada nos resultados obtidos no DEM para o DP780, uma vez que o

deslocamento total para o ensaio **D.780_1** foi inferior à do ensaio **D.780_5**, o que conduz a um menor ângulo de retorno elástico. Para os resultados obtidos no IDMEC, observa-se uma diminuição do ângulo de retorno elástico com o aumento da velocidade de deformação. Em geral, o retorno elástico é proporcional à razão entre a tensão limite de elasticidade e o módulo de Young do material. Assim, a diminuição do retorno elástico com o aumento da velocidade indicia uma redução da tensão de escoamento, o que estaria associado a uma sensibilidade negativa à velocidade de deformação. O HSLA420 apresenta o menor ângulo de retorno elástico e curvatura, o que confirma a influência da espessura inicial. Na análise do perfil é ainda observável a curvatura inicial do provete, uma vez que este material é fornecido em rolo.

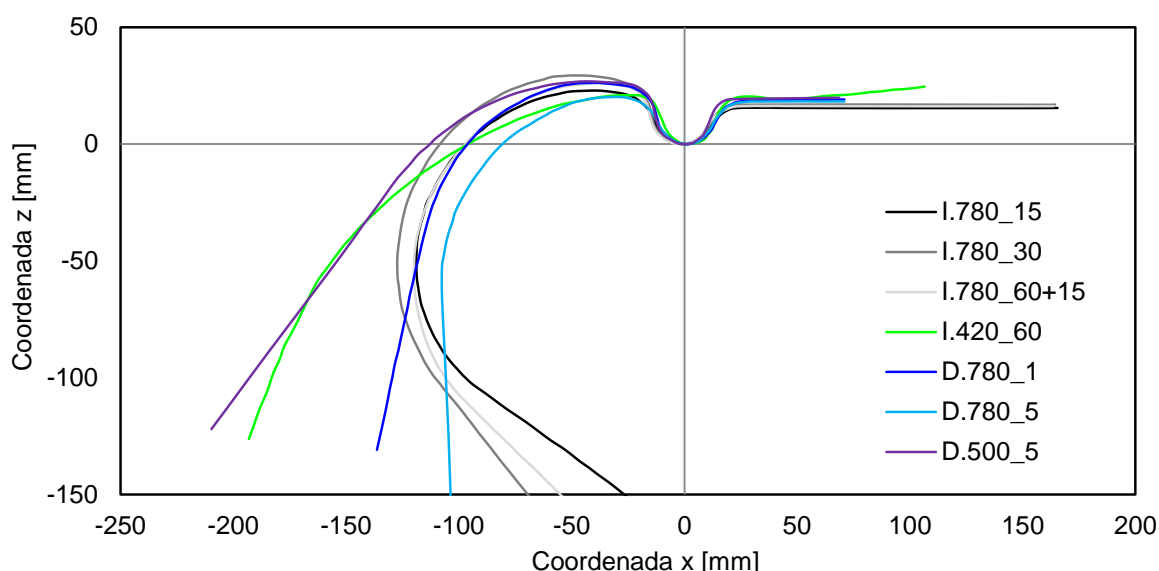


Figura 3.4 – Perfis de retorno elástico.

3.3. Resultados tribológicos

As amostras utilizadas na análise da superfície não deformada foram retiradas da extremidade do provete que não teve contacto com outra superfície. Para a análise da superfície deformada considerou-se a zona localizada após o freio, pois apresenta um raio de curvatura menor, o que facilita a aquisição de dados de acordo com as limitações da escala vertical do perfilómetro. Existem duas superfícies sujeitas a movimento relativo entre interfaces, durante a realização do ensaio de atrito com freio: uma entre o provete e o punção e outra entre o provete e os rolos de conformação. No âmbito desta dissertação foi

analisada a superfície de contacto entre o material e o punção. Na Figura 3.5 representam-se esquematicamente as regiões do provete analisadas. O corte de amostras para análise, com um comprimento aproximado de 50 mm, foi realizado com recurso a uma guilhotina. Na Figura 3.6 e na Figura 3.7 são apresentadas as amostras para os ensaios realizados no IDMEC e no DEM, respetivamente.

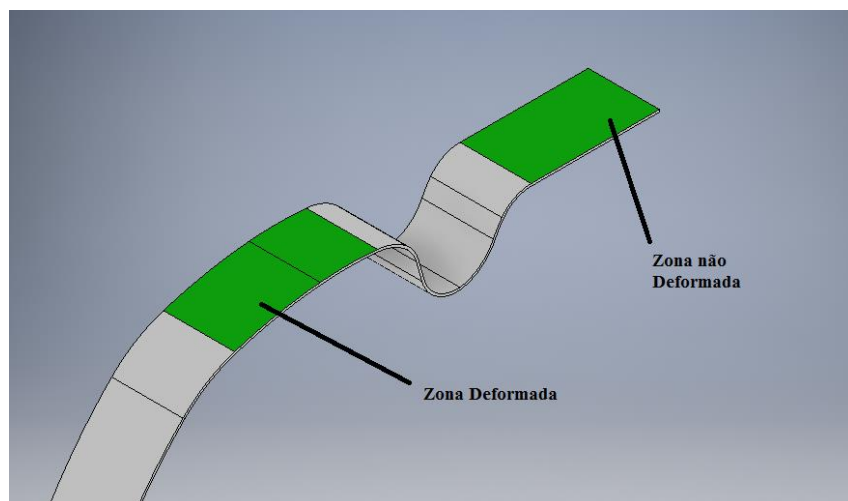


Figura 3.5 - Representação esquemática das zonas analisadas.

Foi observada a ocorrência de riscos nas zonas de contacto entre a chapa e os rolos de conformação, contínuos e ao longo do comprimento do provete, comportamento que se foi agravando com a realização de mais ensaios. Esta ocorrência remete para danos na superfície dos rolos de conformação que são sistematicamente transmitidos para os provetes, como se mostra na Figura 3.8. Tal como foi mencionado na seção 2.4, estas zonas foram evitadas na análise dos perfis de rugosidade.

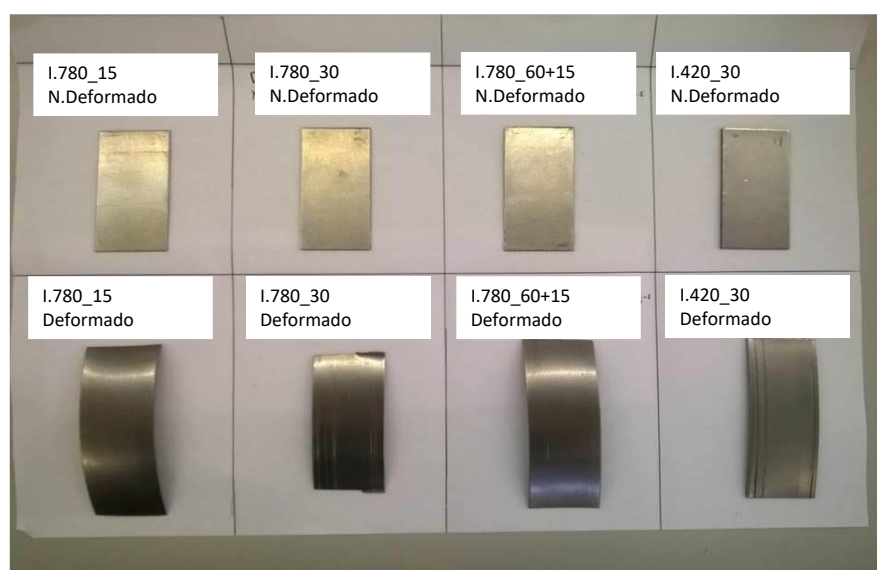


Figura 3.6 - Amostras analisadas dos ensaios realizados no IDMEC.

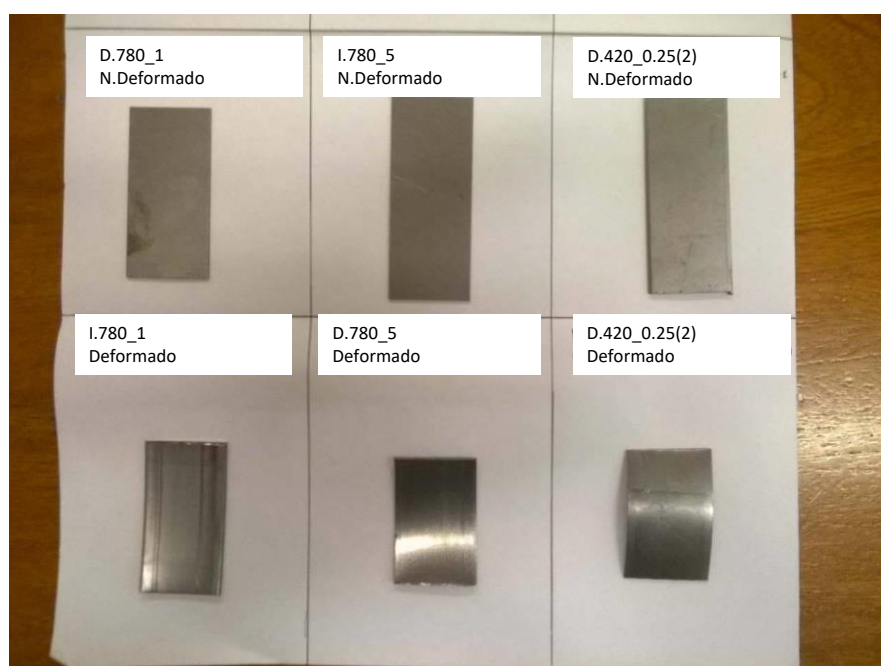


Figura 3.7 - Amostras analisadas dos ensaios realizados no DEM.

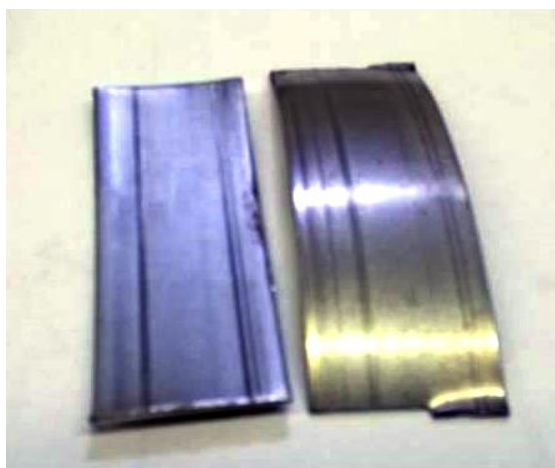


Figura 3.8 – Exemplos de amostras onde é observável a existência de riscos contínuos.

A Figura 3.9 apresenta o resumo dos resultados obtidos para os parâmetros de rugosidade 2D analisados (R_a , R_q e R_z), para dois dos ensaios realizados no IDMEC. A figura apresenta ainda os valores médios e a respetiva banda de erro, sendo observável uma diminuição do parâmetro R_z , em particular na DT. No entanto, a análise da banda de erro permite concluir que esta diminuição não é estatisticamente significativa. A pré-deformação com auxílio do ensaio de tração gera um aumento destes parâmetros de rugosidade (Trzepieciński & Fejkiel, 2017). No entanto, no caso em análise, a deformação plástica não é uniforme ao longo da espessura e é sobretudo induzida por flexão promovida pelo contacto com as ferramentas, pelo que não induz os mesmos efeitos. No APÊNDICE: Resultados tribológicos são apresentados os resultados obtidos para as restantes amostras, sendo possível observar que no caso do HSLA420 parece existir uma tendência para a redução dos três parâmetros de rugosidade com a deformação plástica do material (ver Figura A. 2 e Figura A. 5). Este efeito pode estar relacionado com as pressões de contacto mais elevadas (ver Figura 3.2). Para os ensaios realizados, o valor de *Skewness* apresentou, de modo geral, um comportamento irregular (ver Tabela 3.1), o que não permite determinar a influência das condições de contacto entre o material e as ferramentas.

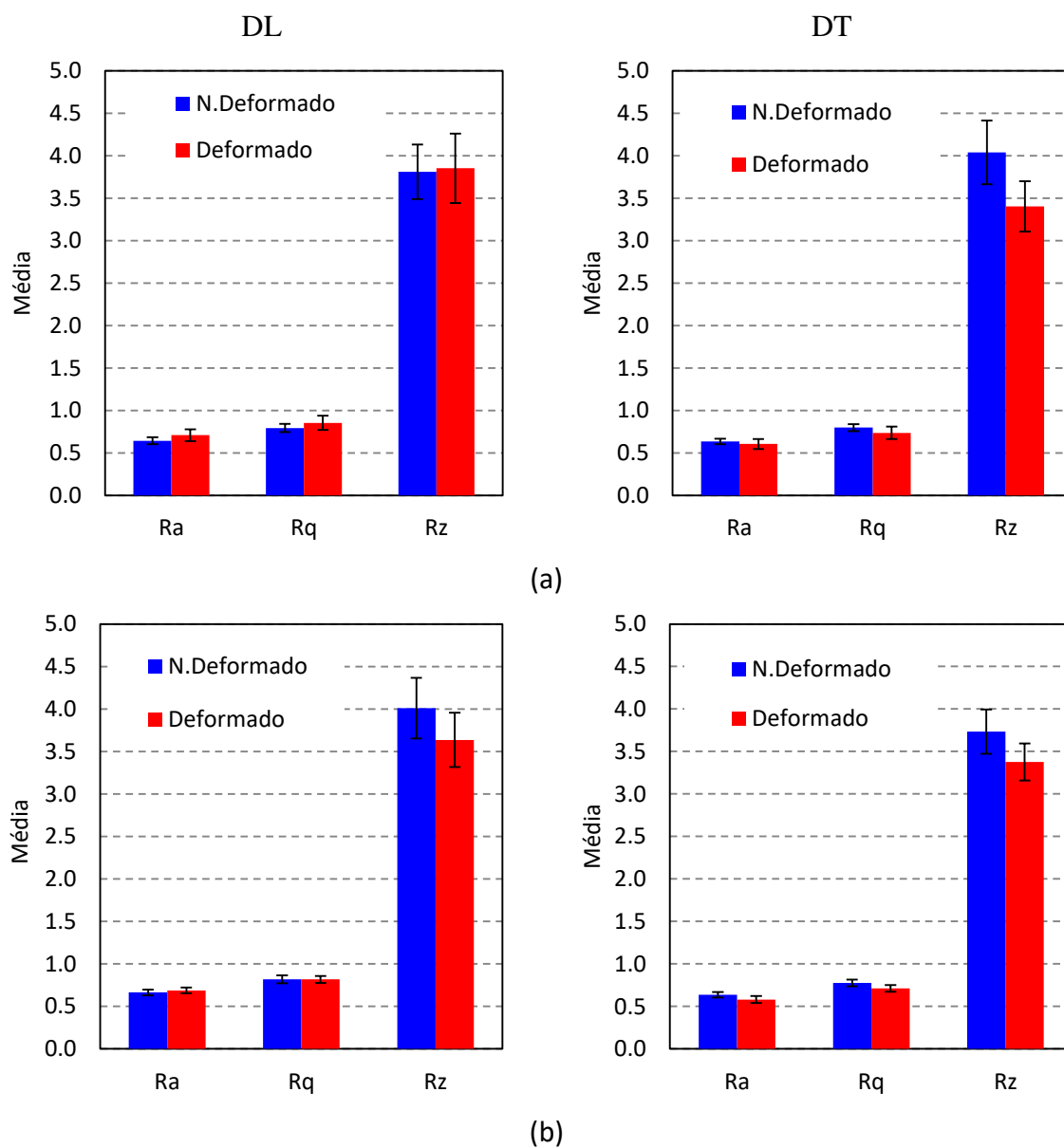


Figura 3.9 – Parâmetros de rugosidade determinados para os ensaios realizados no IDMEC: (a) ensaio I.780_15 e (b) ensaio I.780_30.

Tabela 3.1 –Tabela de valores de média e desvio padrão para o fator de Skewness, R_{sk} .

Ensaio	DL		DT	
	N.Deformado $\mu (\sigma)^*$	Deformado $\mu (\sigma)^*$	N.Deformado $\mu (\sigma)^*$	Deformado $\mu (\sigma)^*$
I.780_15	-0.34 (0.23)	0.10 (0.19)	-0.46 (0.32)	-0.41 (0.14)
I.780_30	-0.22 (0.18)	0.02 (0.15)	-0.28 (0.18)	-0.34 (0.37)
I.780_60+15	-0.29 (0.22)	-0.11 (0.22)	-0.27 (0.11)	-0.42 (0.39)
I.420_30	0 (0.14)	-0.12 (0.15)	-0.05 (0.16)	-0.2 (0.11)
D.780_1	-0.28 (0.22)	-0.93 (0.32)	-0.43 (0.32)	-0.64 (0.25)
D.780_5	-0.36 (0.28)	-1.14 (0.26)	-0.37 (0.2)	-0.66 (0.26)
D.420_0.25(2)	0.12 (0.12)	-0.82 (0.31)	-0.09 (0.08)	-0.54 (0.2)

* μ – Valor de *Skewness* médio; σ – Desvio padrão.

Como referido na seção 2.4, o estudo dos perfis de rugosidade foi complementado com uma análise espectral em bandas de dois terços de oitava, através de um banco de filtros. A Figura 3.10 apresenta o resumo dos resultados obtidos para os dois ensaios realizados no IDMEC, analisados na Figura 3.9. Na figura opta-se por apresentar as frequências de acordo com referência indicada na Tabela 2.3. Globalmente, observa-se que esta análise permite identificar as frequências para as quais ocorrem os maiores valores de amplitude média, tal como era pretendido. Os materiais em análise apresentam maiores amplitudes médias para os valores centrais da gama de frequências analisada. Em geral, observam-se maiores amplitudes para a DL, em particular para a gama de frequências centrais. Não existem diferenças relevantes entre os dois ensaios. No APÊNDICE: Resultados tribológicos são apresentados os resultados obtidos para as restantes amostras. A comparação dos resultados obtidos para o material deformado e não deformado conduz a conclusões idênticas às obtidas com os parâmetros de rugosidade, *i.e.* as amplitudes tendem a diminuir para o material deformado, para a generalidade das amplitudes, apesar de este resultado não ser estatisticamente relevante. Para o HSLA420 é observada uma redução global dos valores de amplitude média mais acentuada para o material deformado (ver Figura A. 7 e Figura A. 10).

A análise espectral em bandas de dois terços de oitava permite construir um perfil equivalente, com base na equação (2.1). A título de exemplo, a Figura 3.11 apresenta a comparação entre os perfis obtidos considerando todas as frequências (Total) e as que apresentam uma amplitude média superior a: 0.2 ($i = 4, \dots, 9$), 0.3 ($i = 5, \dots, 8$) e 0.35

($i = 5$). Esta análise permite evidenciar que o comportamento global de um perfil pode ser representado com base numa gama mais reduzida de frequências.

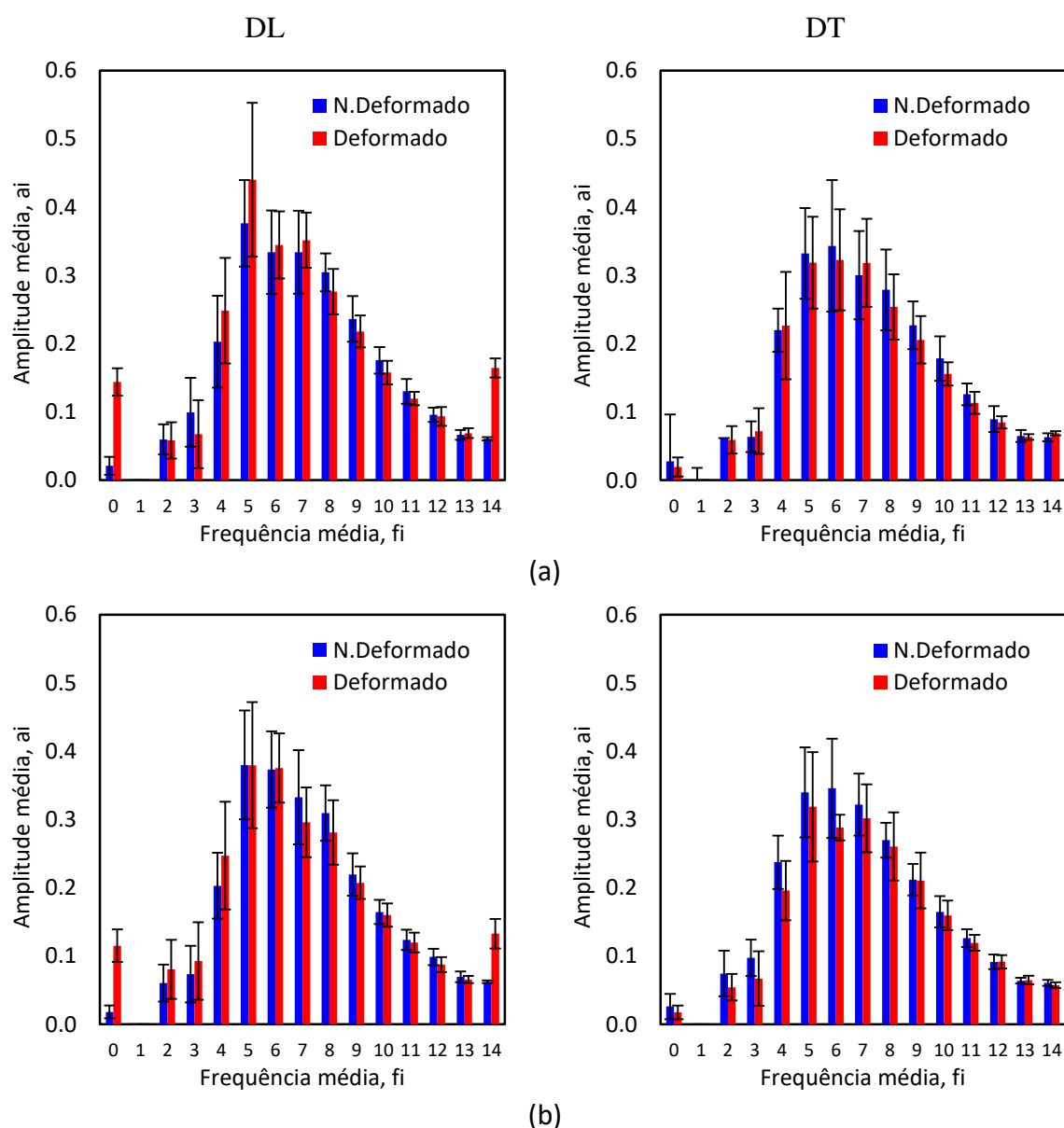


Figura 3.10 – Análise espectral em bandas de dois terços de oitava para os ensaios realizados no IDMEC:
(a) ensaio I.780_15 e (b) ensaio I.780_30.

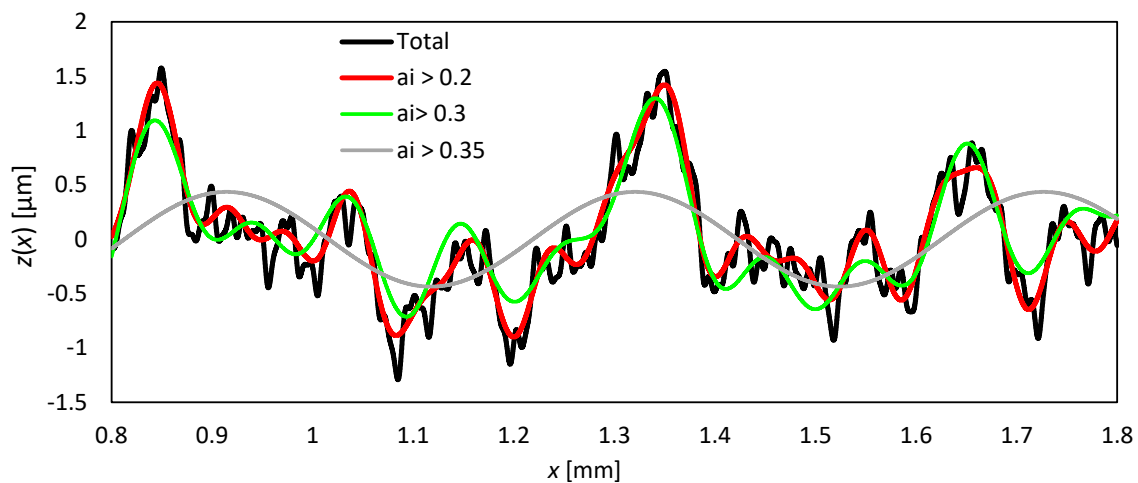


Figura 3.11 – Construção do perfil de rugosidade com base na análise espectral em bandas de dois terços de oitava para o ensaio I.780_15.

3.4. Pressão de contacto

Um dos parâmetros mais relevantes para a análise do comportamento tribológico é a pressão de contacto entre os corpos. No entanto, a sua avaliação não é fácil. Uma alternativa é recorrer a filmes sensíveis à pressão de modo a avaliar também a sua distribuição. No âmbito deste trabalho foi testada a utilização de um filme, fornecido pela FujiFilm, com a designação High Pressure (HS), indicado para uma gama de pressões de 50-130 MPa, como se mostra na Figura 3.12.

Types	Measurable pressure range [MPa] 1MPa≐ 10.2kgf/cm²	Prescale	Prescale Sheets	Classification
		Product size width(mm) x length(m)	Product size width(mm) x length(mm)	
Super Extreme Low Pressure (SLW)	0.006 0.05 0.2 0.5 0.6 2.5 10 50 130 300	310 x 2	—	Two-Sheet Type
Extreme Low Pressure (ELW)		310 x 3	—	Two-Sheet Type
Ultra Super Low Pressure (ULLW)		270 x 4	270X200 (5 Sheets)	Two-Sheet Type
Super Low Pressure (LLW)		270 x 5	270X200 (5 Sheets)	Two-Sheet Type
Low Pressure (LW)		270 x 10	270X200 (5 Sheets)	Two-Sheet Type
Medium Pressure (MW)		270 x 10	—	Two-Sheet Type
Medium Pressure (MS)		270 x 10	270X200 (5 Sheets)	Mono-Sheet Type
High Pressure (HS)		270 x 10	270X200 (5 Sheets)	Mono-Sheet Type
Super High Pressure (HHS)		270 x 10	270X200 (5 Sheets)	Mono-Sheet Type

Figura 3.12 – Filmes sensíveis à pressão (Fujifilm, 2017).

De modo a avaliar a potencialidade da utilização deste tipo de filmes, foi colocada uma amostra na zona de conformação, entre a chapa e o punção. De seguida procedeu-se ao avanço do punção até à penetração máxima. Uma vez atingido o valor máximo pretendido, o aperto foi aliviado de modo a retirar o filme antes de proceder à fase de deslocamento da amarra. A Figura 3.13 apresenta o resultado obtido neste teste, sendo possível observar que a pressão de contacto apresenta uma evolução crescente desde o eixo de simetria do punção até à zona limite de contacto com a chapa. Na simulação numérica o valor máximo de força é também previsto para esta zona (Costa, 2017). Com base no resultado apresentado na Figura 3.13 é possível avaliar a distância total (θr) onde ocorre contacto entre os dois corpos, durante a fase de aperto, o que permite estimar o ângulo de contacto θ .

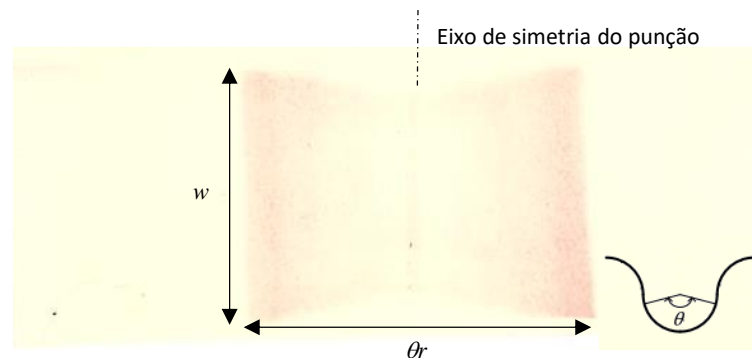


Figura 3.13 – Filme sensível à pressão: resultado adquirido para a fase de aperto do punção, num ensaio realizado com o DP780.

3.5. Evolução da temperatura

Os ensaios realizados no DEM com a câmara FLIR One apenas permitiram observar a evolução da temperatura, não sendo possível adquirir a informação para posterior tratamento (vídeo em formato mp4). Os ensaios realizados no DEM com a câmara FLIR A325 30Hz 30fps conduziram à definição da localização mais conveniente.

Para os testes realizados no IDMEC, com a câmara FLIR A325 30Hz 30fps na localização pré-definida e com os cuidados descritos na seção 2.3.2, foi possível adquirir a evolução da temperatura, para posterior tratamento no *software* FLIR Tools. Este tratamento pode ser realizado com base num ponto de referência, ou numa linha, como se mostra na Figura 3.14. A utilização da linha permite o cálculo do valor médio. Esta figura mostra a influência dos riscos na distribuição da temperatura na chapa, pelo que é recomendado algum cuidado na seleção da zona de análise. A utilização do vídeo permite

identificar o instante de tempo em que a amarra inicia o seu deslocamento, de modo a sincronizar o instante de tempo de início desta fase.

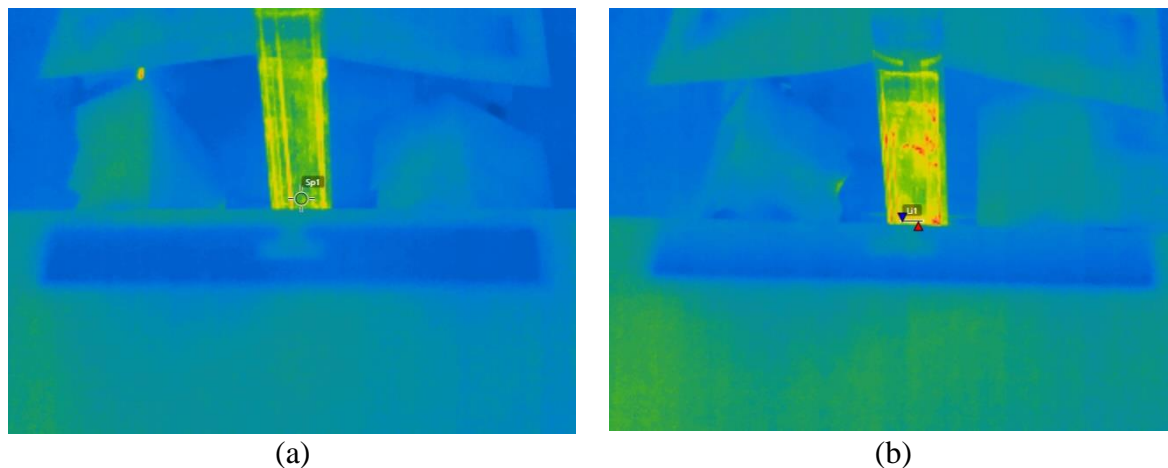


Figura 3.14 – Representação esquemática do tratamento de resultado no *software* FLIR Tools, com recurso à análise de: (a) um ponto; (b) uma linha.

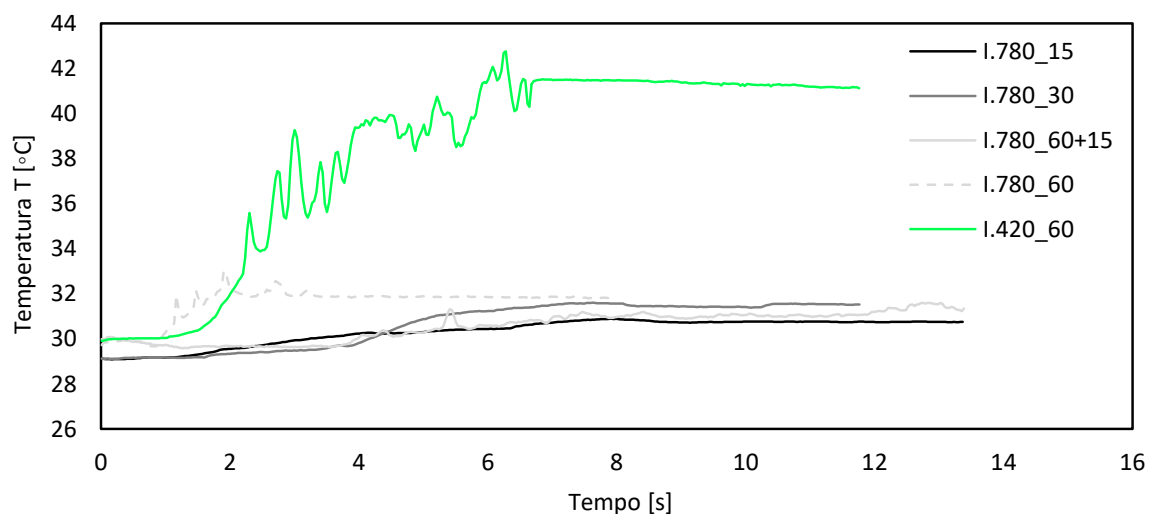


Figura 3.15 – Evolução da temperatura ao longo do tempo para os ensaios realizado no IDMEC.

A Figura 3.15 apresenta a evolução da temperatura ao longo do tempo para os ensaios realizados no IDMEC. É possível observar que existe um aumento da temperatura na fase inicial do ensaio, que tem tendência a estabilizar quando se atinge o regime estacionário. Este comportamento corresponde ao previsto na simulação numérica do ensaio (Costa, 2017). Também é possível observar que a temperatura aumenta com o aumento da velocidade, o que de acordo com a simulação numérica se deve sobretudo à

redução do período de tempo disponível para que ocorra transmissão de calor entre a chapa e as ferramentas (Costa, 2017). Também se observa uma variação de temperatura idêntica para os ensaios realizados para a mesma velocidade da amarra (**I.780_15** e **I.780_60+15**). A diferença de temperatura observada para o aço HSLA 420 é superior o que pode estar relacionado com as maiores pressões de contacto, associadas à maior espessura.

4. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O objetivo principal deste trabalho foi explorar a potencialidade do ensaio de atrito com freio para estudar o comportamento mecânico e tribológico dos aços de alta resistência, incluindo a geração de calor por deformação plástica e/ou atrito. Neste contexto, foi realizada a análise de algumas variáveis relevantes do ensaio. Nesta seção procura-se resumir as principais conclusões e sugerir algumas propostas de trabalhos futuros.

O equipamento permite a aquisição da força da amarra e do punção, sendo no entanto necessário minimizar erros na sincronização entre estas duas forças, caso se pretenda analisar o período transitório para além do estacionário. Para velocidades de deslocamento da amarra mais elevadas é necessário ter atenção à frequência de aquisição de dados.

A análise do perfil após retorno elástico pode ser utilizada para validação dos modelos utilizados na simulação numérica, para descrever o comportamento mecânico dos materiais e as condições de contacto com atrito. Neste contexto, é fundamental seguir o procedimento de ensaio descrito neste trabalho para garantir a reprodutibilidade dos resultados.

A aquisição de informação acerca da superfície do material com recurso a perfilometria 2D permitiu observar, em alguns provetes, uma diminuição global do parâmetro R_z , quer para a DL quer para a DT. Contudo, a influência da deformação plástica e das condições de contacto nas características da superfície não permite tirar conclusões que sejam estatisticamente significativas. Como complemento à análise dos parâmetros de rugosidade, o perfil de rugosidade foi também analisado com auxílio de uma análise espectral em bandas de dois terços de oitava. Foi possível observar maiores amplitudes médias para os valores centrais da gama de frequências analisada. Esta análise pode constituir uma base para o desenvolvimento de modelos multi-escala para a análise das condições tribológicas. Este último estudo poderá ser ainda complementado através de uma análise estatística de distribuição probabilística de amplitudes e funções de densidade. Uma outra abordagem para análise dos parâmetros de rugosidade da superfície é o recurso a

perfilometria óptica 3D, que pode possibilitar uma aquisição de dados mais precisa, diminuindo a banda de erro associada.

A aquisição de informação relativa à pressão de contacto entre a chapa e as ferramentas foi realizada com o auxílio de um filme sensível à pressão. Em concreto, obteve-se a distribuição de pressão para a superfície de contacto entre o punção e a chapa até ao final da fase de aperto. Esta análise pode possibilitar a validação de modelos de contacto com atrito, utilizados na simulação numérica do processo. No entanto, a utilização do filme sensível à pressão permite apenas avaliar a pressão máxima a que um determinado ponto esteve sujeito, pelo que a análise dos resultados deve ser feita de forma criteriosa.

A aquisição do campo térmico foi realizada com o auxílio de câmaras de infravermelhos, o que permitiu a análise da evolução da temperatura com o tempo, fundamental para determinar a variação de temperatura associada à geração de calor por deformação plástica e/ou atrito. Para velocidades de deslocamento da amarra mais elevadas é necessário ter atenção à frequência de aquisição de dados. Para a gama de temperatura em análise, os parâmetros de calibração, em particular a emissividade, bem como: (i) o controlo da posição da câmara e das superfícies refletoras envolventes; e (ii) a metodologia adotada na análise dos dados, são fundamentais para garantir a precisão dos resultados. Os resultados obtidos evidenciam a influência da velocidade da amarra e da pressão de contacto na variação da temperatura. Para velocidades mais lentas a transmissão de calor para as ferramentas é superior, pelo que as variações de temperatura são menos perceptíveis. Contudo, o facto de o ensaio envolver contacto entre a chapa e as ferramentas torna-o muito sensível aos fenómenos de transferência de calor, pelo que a quantificação do calor gerado por deformação plástica e/ou atrito exige a necessidade de uma melhor compreensão destes fenómenos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altan, T., Tekkaya, A. E. (2012). Sheet metal forming : process and applications. *ASM International*.
- Bhushan, B. (2001). Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques. *Modern Tribology Handbook: Principles of Tribology*, 71.
- Costa, M. P. (2017). *Numerical Modelling of the Draw Bead test de retenção*. Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra.
- Fernandes, V. M. (2008). *Estudo do coeficiente de atrito durante o processo de Estampagem Engenharia Mecânica*. Tese de mestrado, Universidade de Coimbra.
- Figueiredo, L., Ramalho, A., Oliveira, M. C., & Menezes, L. F. (2011). Experimental study of friction in sheet metal forming. *Wear*, 271(9–10), 1651–1657. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.02.020>
- Firat, M. (2008). An analysis of sheet drawing characteristics with drawbead elements. *Computational Materials Science*, 41(3), 266–274. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2007.04.014>
- FLIR Systems. (2014). User's Manual: Flir Axx pt series. Intertek.
- Fujifilm. (2017). Fujifilm's measurement fill solution. Retrieved September 1, 2017, from http://www.fujifilm.com/products/measurement_film/en/prescale/product/
- Gadelmawla, E. S., Koura, M. M., Maksoud, T. M. A., Elewa, I. M., & Soliman, H. H. (2002). Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 123(1), 133–145. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00060-2)
- Groche, P., & Christiany, M. (2013). Evaluation of the potential of tool materials for the cold forming of advanced high strength steels. *Wear*, 302(1–2), 1279–1285. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.001>
- Hol, J. (2009). *Multiscale Friction Modeling for Sheet Metal Forming*. University of Twente.
- ISO. (1996). Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture: Profile method. Rules and procedures for the assessment of surface texture.
- Kim, H., Sung, J., Goodwin, F. E., & Altan, T. (2008). Investigation of galling in forming galvanized advanced high strength steels (AHSSs) using the twist compression test (TCT). *Journal of Materials Processing Technology*, 205(1–3), 459–468. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.281>
- Livatyali, H., Firat, M., Gurler, B., & Ozsoy, M. (2010). An experimental analysis of drawing characteristics of a dual-phase steel through a round drawbead. *Materials and Design*, 31(3), 1639–1643. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.030>
- Naukowe, Z., & Rzeszowskiej, P. (2012). Numerical modeling of the drawbead

- simulator test, 84(284).
- Nine, H. D. (1982). The applicability of Coulomb's friction law to drawbeads in sheet metal forming. *Journal of Applied Metalworking*, 2(3), 200–210. <https://doi.org/10.1007/BF02834038>
- Oliveira, M. C. (2005). *Algoritmos e Estratégias de Gestão do Problema de Contacto com Atrito em Grandes Deformações - Aplicação à Estampagem de Chapas Metálicas*. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra.
- Pereira, M. P., & Rolfe, B. F. (2014). Temperature conditions during “cold” sheet metal stamping. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(8), 1749–1758. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.03.020>
- Sanchez, L. R. (1999). Characterization of a measurement system for reproducible friction testing on sheet metal under plane strain. *Tribology International*, 32(10), 575–586. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(99\)00098-5](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(99)00098-5)
- Schey, J. A. (1996). Processing Technology Speed effects in drawbead simulation. *Journal of Materials Processing Technology*, 57, 146–154.
- Sedlaček, M., Vilhena, L. M. S., Podgornik, B., & Vižintin, J. (2011). Surface topography modelling for reduced friction. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 57(9), 674–680. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.140>
- Sinha, A. K. (1999). *Handbook of Metalforming*. (H. Theis, Ed.). Marcel Dekker, Inc.
- Sotres, J., & Arnebrant, T. (2013). Experimental Investigations of Biological Lubrication at the Nanoscale: The Cases of Synovial Joints and the Oral Cavity. *Lubricants*, 1(4), 102–131. <https://doi.org/10.3390/lubricants1040102>
- Trzepieciński, T., & Fejkiel, R. (2017). On the influence of deformation of deep drawing quality steel sheet on surface topography and friction. *Tribology International*, 115, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.007>
- Vilela, C. (2007). *SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO DE ATRITO COM JUNTA Análise de variáveis geométricas Análise de variáveis geométricas*. Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra.
- Wang, W., Wang, K., Zhao, Y., Hua, M., & Wei, X. (2015). A study on galling initiation in friction coupling stretch bending with advanced high strength hot-dip galvanized sheet. *Wear*, 328–329, 286–294. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.058>

APÊNDICE: RESULTADOS TRIBOLÓGICOS

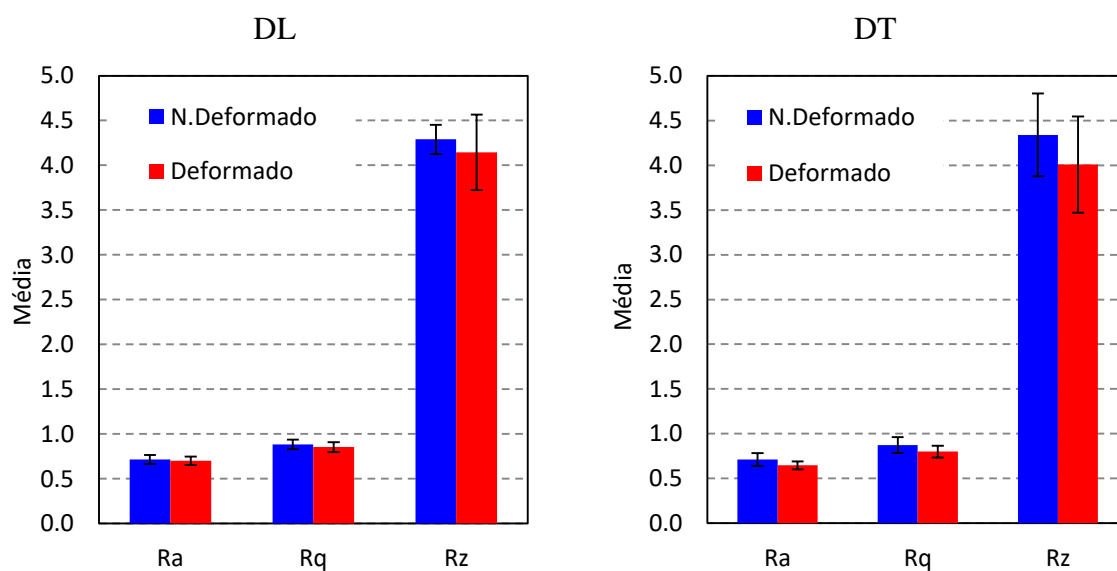


Figura A. 1 – Parâmetros de rugosidade determinados para o ensaio I.780_60+15.

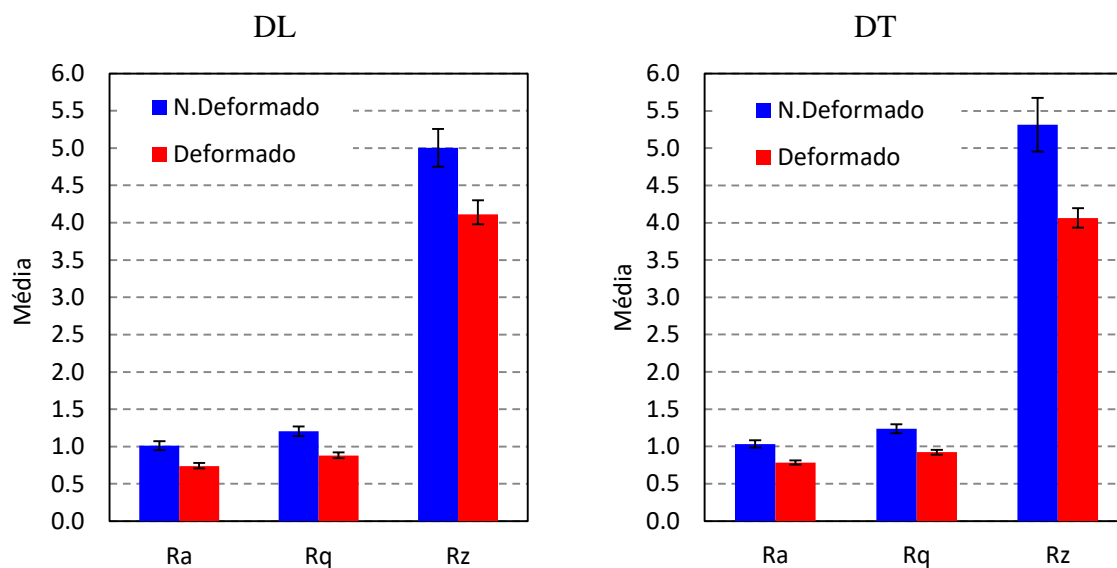


Figura A. 2 – Parâmetros de rugosidade determinados para o ensaio I.420_30.

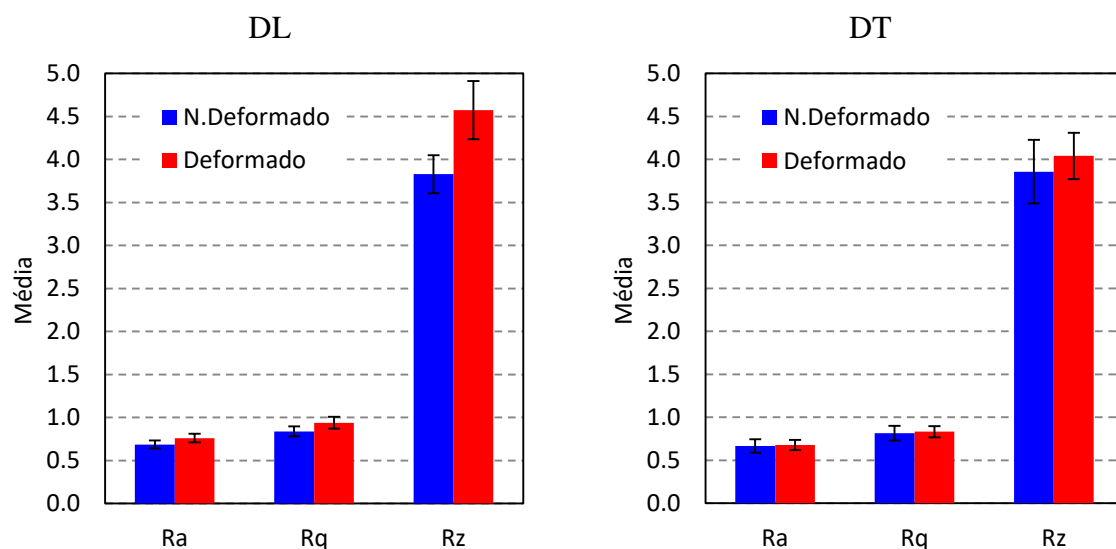


Figura A. 3 – Parâmetros de rugosidade determinados para o ensaio D.780_1.

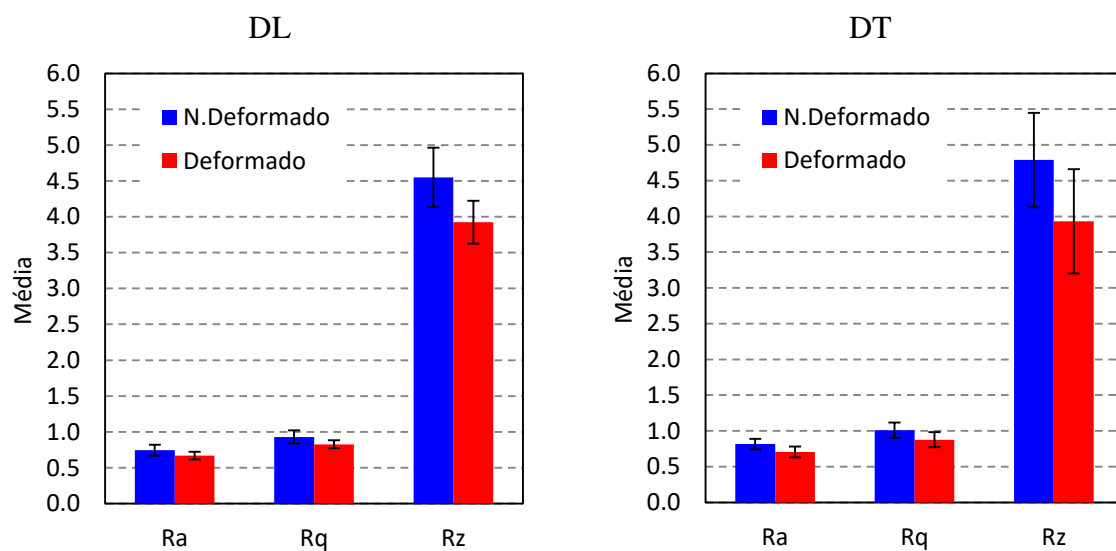


Figura A. 4 – Parâmetros de rugosidade determinados para o ensaio D.780_5.

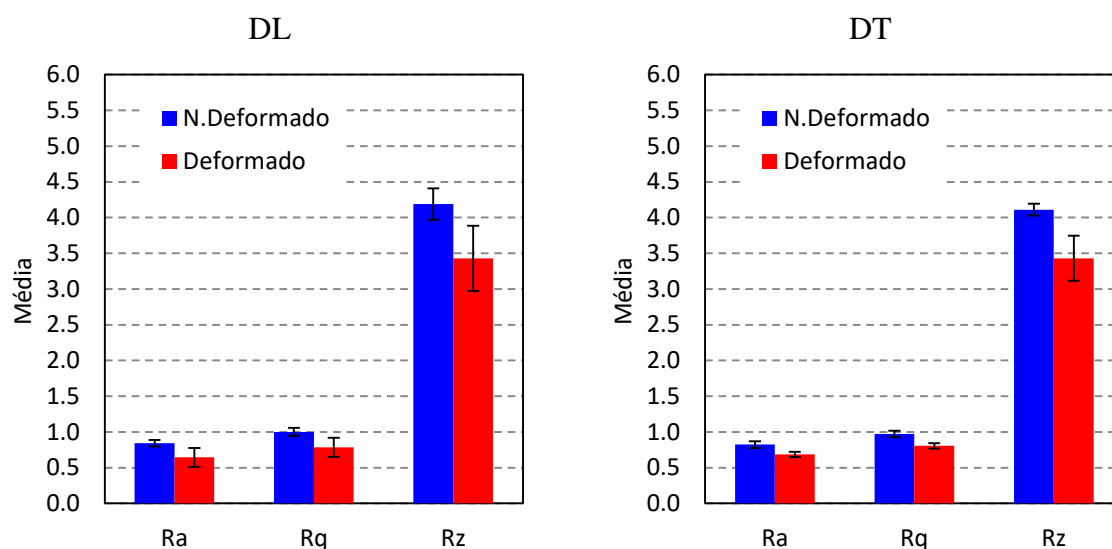


Figura A. 5 – Parâmetros de rugosidade determinados para o ensaio D.420_0.25(2).

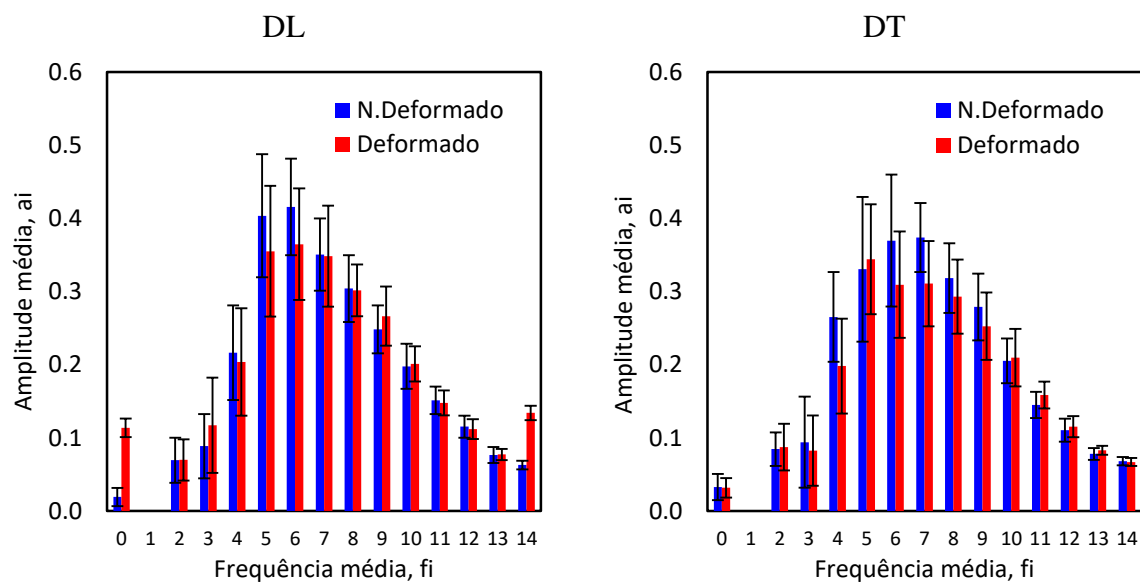


Figura A. 6 – Análise espectral em bandas de dois terços de oitava para o ensaio I.780_60+15.

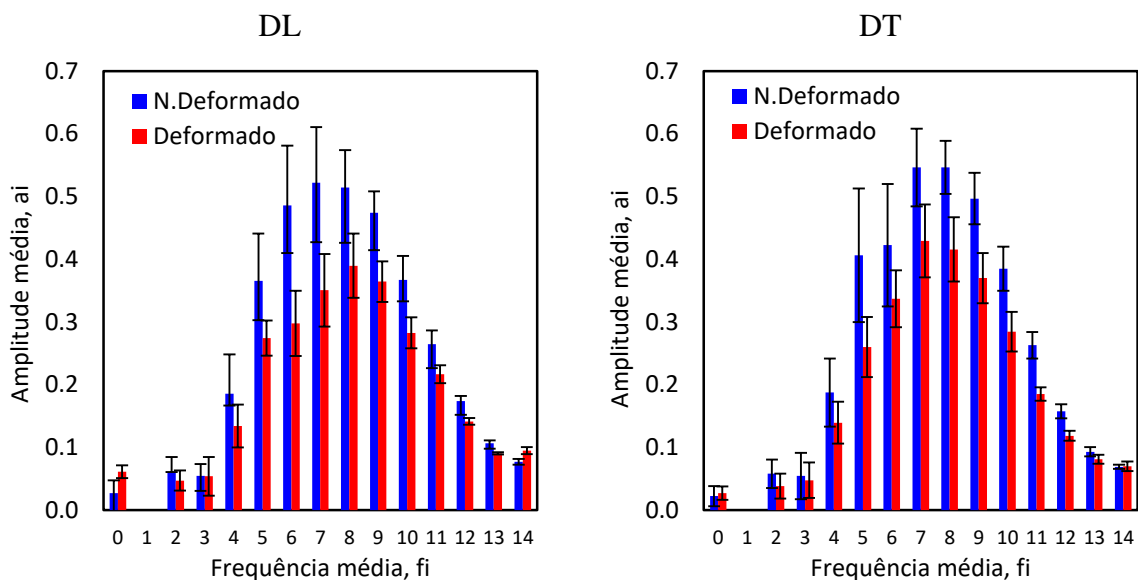


Figura A. 7 – Análise espectral em bandas de dois terços de oitava para o ensaio I.420_30.

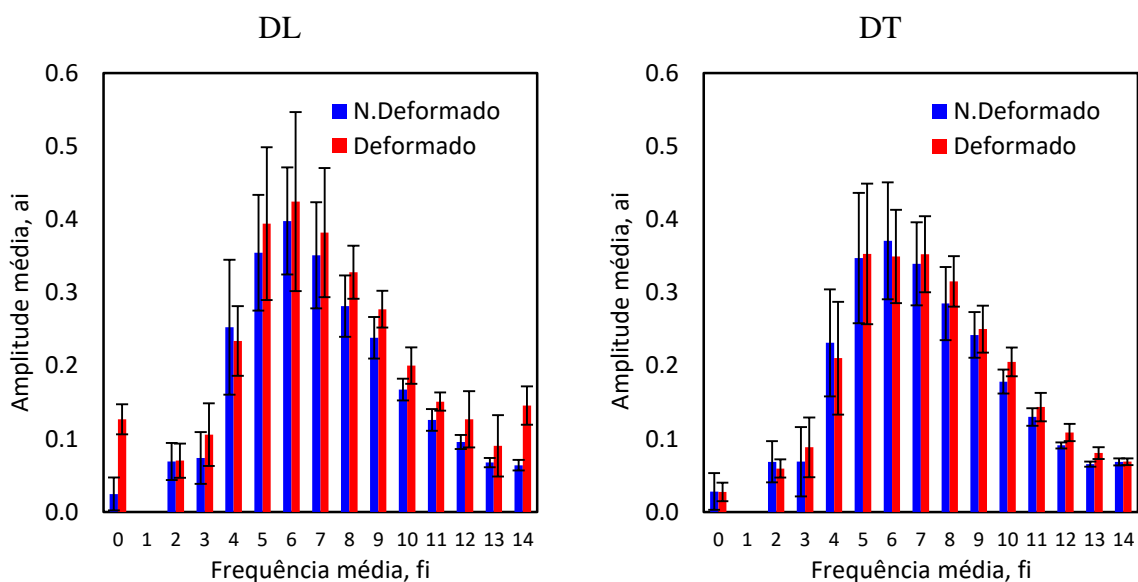


Figura A. 8 – Análise espectral em bandas de dois terços de oitava para o ensaio D.780_1.

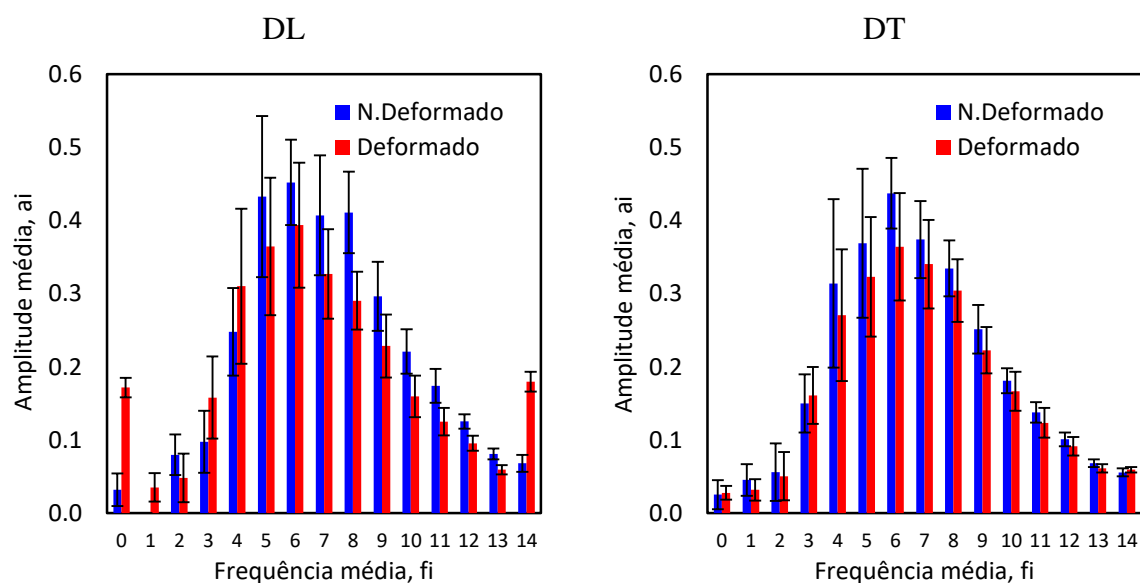


Figura A. 9 – Análise espectral em bandas de dois terços de oitava para o ensaio D.780_5.

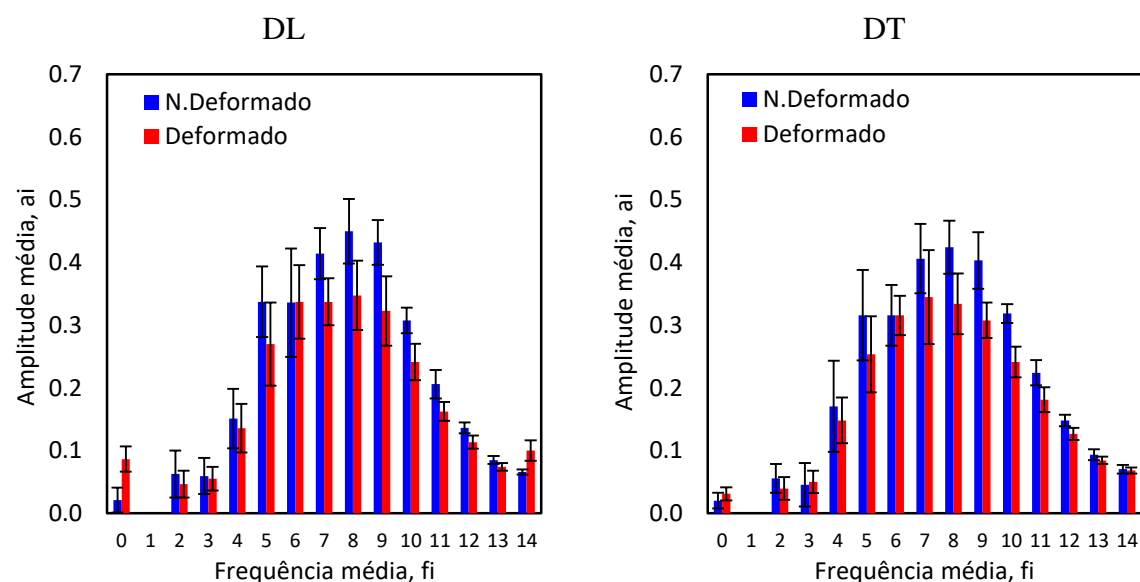


Figura A. 10 – Análise espectral em bandas de dois terços de oitava para o ensaio D.420_0.25(2).