



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Influência das Propriedades Plásticas na Maquinabilidade de Ligas de Alumínio

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

Influence of the Plastic Properties of the Machinability of Aluminium Alloys

Autor

Fernando Manuel Miranda Capelôa

Orientadores

Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues

Professor Doutor Fernando António Gaspar Simões

Júri

| | |
|------------|---|
| Presidente | Professor Doutor Carlos Miguel Almeida Leitão Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Coimbra |
| Orientador | Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra |
| Vogal | Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria |

Coimbra, Julho, 2018

“Eles não sabem, nem sonham,
que o sonho comanda a vida,
que sempre que um homem sonha
o mundo pula e avança!”

António Gedeão em "Movimento Perpétuo", 1956

Agradecimentos

O presente trabalho só foi possível concretizar graças à colaboração de algumas pessoas, às quais eu não posso deixar de agradecer.

À professora doutora Dulce Rodrigues e ao professor doutor Fernando Simões, responsáveis pela orientação da presente dissertação, agradeço a disponibilidade, o acompanhamento e a partilha de conhecimento, sem os quais não seria possível concretizar este trabalho.

Aos meus pais, Fernando e Graça, e aos meus irmãos, Ricardo e Tânia, por me terem ensinado, desde cedo, que tudo o que é conseguido com esforço sabe melhor. Pela forma como sempre me apoiaram e incentivaram a seguir os meus sonhos e por terem acreditado sempre em mim e no meu esforço.

Ao professor doutor Carlos Leitão agradeço o ânimo que sempre me transmitiu e a partilha de conhecimento laboratorial e informático.

A todos os meus colegas de laboratório de tecnologias mecânicas pela motivação ao longo de todo o trabalho.

À Raquel, quero agradecer toda a força que sempre me transmitiu, que me fez sentir capaz de cumprir todos os meus objetivos.

Aos meus dois amigos que considero família, João Ponte e Tomás, por terem sido os melhores companheiros que a vida académica me trouxe. Um muito obrigado por todo o apoio e por estes cinco anos sempre juntos, no bom e no mau. Levo-vos comigo para a vida!

À Espada, à Carmo, à Ângela, ao Crujo, à Mara, à Sofia, ao Nolasco, ao Silva, ao Rafael, ao Jacinto, ao Sébastien, ao Abílio e à Vânia, ao Marques, à Mariana e ao Loureiro por me terem surpreendido positivamente a cada dia que vos fui conhecendo.

Um forte agradecimento ao Engenheiro Paulo Amaro, ao Senhor Fernando Bernardes e ao pessoal do IPN pela ajuda na realização do trabalho experimental.

A todos
O meu obrigado

Resumo

A presente dissertação tem como objetivo analisar a influência das propriedades plásticas na maquinabilidade de duas ligas de alumínio com composição química e comportamento mecânico distintos. As ligas utilizadas no estudo são uma liga não-tratável termicamente, AA 5083 – H111, e uma liga tratável termicamente, AA 6082 – T6. Com o objetivo de analisar a maquinabilidade das duas ligas foram efetuados ensaios de corte por arranque de apra recorrendo aos processos de furação, fresagem e torneamento. Em cada tipo de ensaio fizeram-se variar os parâmetros do processo de modo a criar condições severas de corte e melhor poder avaliar a influência do comportamento plástico das ligas na maquinabilidade.

As diferenças na maquinabilidade das duas ligas foram avaliadas recorrendo a medições de temperatura e da rugosidade superficial, nos ensaios de torneamento, a medições de força, nos ensaios de furação, e à avaliação das aparas e da qualidade das superfícies maquinadas, nos ensaios de fresagem. A evolução do degaste das ferramentas foi analisada no final de todos os ensaios e relacionada com as condições de corte.

O estudo realizado permitiu concluir que as duas ligas apresentam diferenças acentuadas na sensibilidade aos parâmetros de corte. Ou seja, enquanto a temperatura e a força de corte, para a liga AA 5083, variam com a velocidade e a profundidade de corte, para a liga AA 6082, variam apenas em função da profundidade de corte. Este resultado foi atribuído à maior sensibilidade da liga AA 5083 ao encruamento e à velocidade de deformação. Observou-se também que o comportamento plástico das ligas apresenta uma forte influência sobre a degradação das ferramentas de corte. Enquanto para a liga AA 6082 foi observado formação de apra aderente, com forte impacto nas condições de maquinagem, para a liga AA 5083, quase não se observou dano significativo das ferramentas. O estudo mostrou também que, quer a dureza, quer o limite de elasticidade dos materiais a maquinar, podem não ser bons indicadores da propensão do material a formar apra aderente.

Palavras-chave: AA 5083 – H111, AA 6082 – T6, Encruamento, Maquinabilidade, Sensibilidade à velocidade de deformação.

Abstract

The main objective of the present dissertation is to analyze the influence of the plastic properties on the machinability of two aluminium alloys with different chemical composition and mechanical behavior. The alloys used in the study are a thermally non-treatable alloy, the AA 5083 – H111 and a thermally treatable alloy, the AA 6082 – T6. For this purpose were used cutting tests procedures such as turning, drilling and milling. In each type of test the process parameters were changed in order to create severe cutting conditions and to evaluate better the influence of the plastic behavior of the alloys in the machinability.

Differences in the machinability of the two alloys were evaluated using temperature and surface roughness measurements in turning tests, force measurements in drilling tests, and the evaluation of chips and the quality of machined surfaces in the milling tests. The evolution of the tool detrition was analyzed at the end of all the tests and related to the cutting conditions.

In conclusion, this study demonstrated that the two alloys showed marked differences in the sensivity to the cut parameters. While the temperature and shear force vary with the speed and depth of cut for alloy AA 5083, for alloy AA 6082, it only vary with depth of cut. This result was attributed to the higher strain rate and strain hardening sensivity of the AA 5083. It was also observed that the plastic behavior of the alloys has a strong influence on the degradation of the cutting tools. While for the alloy AA 6082 adherent chip formation was observed, with strong impact in the machining conditions, for the alloy AA 5083, no significant tool damage was observed. The study also showed that both the hardness and the elasticity limit of the materials to be machined may not be good indicators of the propensity of the material to form adherent chip.

Keywords AA 5083 – H111, AA 6082 – T6, Machinability, Strain hardening, Strain rate sensitivity.

Índice

| | |
|--|------|
| Índice de Figuras | ix |
| Índice de Tabelas | xiii |
| Simbologia e Siglas | xv |
| Simbologia..... | xv |
| Siglas | xvi |
| 1. Introdução..... | 1 |
| 2. Estado da arte..... | 3 |
| 2.1. Maquinabilidade | 3 |
| 2.2. Apara..... | 4 |
| 2.2.1. Formação da apara..... | 4 |
| 2.2.2. Tipos de apara..... | 5 |
| 2.2.3. Influência do comportamento mecânico do material na morfologia da apara | 6 |
| 2.3. Processos de maquinagem | 10 |
| 2.3.1. Torneamento..... | 10 |
| 2.3.2. Fresagem..... | 11 |
| 2.3.3. Furação | 12 |
| 2.4. Análise do esforço de corte..... | 13 |
| 2.5. Geração de calor na maquinagem | 15 |
| 2.6. Desgaste das ferramentas..... | 17 |
| 2.6.1. Colapso | 17 |
| 2.6.2. Desgaste..... | 18 |
| 3. Procedimento experimental | 21 |
| 3.1. Caracterização dos metais base..... | 21 |
| 3.1.1. Ensaios de tração | 21 |
| 3.1.2. Ensaios de dureza | 22 |
| 3.1.3. Ensaios metalográficos | 22 |
| 3.2. Ensaios de corte | 23 |
| 3.2.1. Corte por torneamento | 23 |
| 3.2.2. Furação | 26 |
| 3.2.3. Corte por Fresagem | 28 |
| 3.3. Análise do desgaste de ferramentas | 31 |
| 3.4. Análise da morfologia das aparas | 31 |
| 4. Análise de resultados | 33 |
| 4.1. Caracterização dos materiais a ensaiar | 33 |
| 4.2. Corte por Torneamento | 38 |
| 4.3. Corte por furação | 46 |
| 4.4. Corte por fresagem..... | 50 |
| 5. Conclusões e trabalhos futuros | 53 |

| | |
|---------------------------------|----|
| 5.1. Conclusões | 53 |
| 5.2. Trabalhos futuros | 54 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 55 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Regiões de deformação da apara, região de deformação primária (I) e região de deformação secundária (II) (a), ferramenta de corte e as suas faces (b) [4,5]..... | 5 |
| Figura 2.2 Apara contínua e as duas zonas de corte (a), apara descontínua (b) e apara aderente (c). [7] | 6 |
| Figura 2.3 Comparação da morfologia de aparas provenientes da furação de diferentes ligas a diferentes velocidades de corte, mantendo o avanço constante. [8] | 7 |
| Figura 2.4 Comportamento mecânico do material quando sujeito a diferentes condições de tensão/deformação, adaptado de Wang et al. [9]..... | 8 |
| Figura 2.5 Micrografia de aparas serradas obtidas após maquinagem a velocidade de corte de 2500 m/min. Micrografia da secção transversal da apara (a) e da superfície dos segmentos serrados (b). [9] | 9 |
| Figura 2.6 Micrografia de aparas fragmentadas obtidas após maquinagem a velocidade de corte de 7000 m/min. [9] | 10 |
| Figura 2.7 Micrografia da superfície de fratura da raiz da apara obtida para velocidade de corte de 2500 m/min. [9] | 10 |
| Figura 2.8 Micrografia da superfície de fratura da raiz da apara obtida para velocidade de corte de 7000 m/min. [9] | 10 |
| Figura 2.9 Parâmetros de torneamento. [10] | 11 |
| Figura 2.10 Apara proveniente do torneamento de alumínio AA 5083 – H111. | 11 |
| Figura 2.11 Ilustração do processo de fresagem. [10]..... | 12 |
| Figura 2.12 Parâmetros de corte na furação. [10]..... | 12 |
| Figura 2.13 Evolução comparativa do esforço de corte com o aumento da velocidade de corte para quatro diferentes ligas de alumínio. [8]..... | 13 |
| Figura 2.14 Variação da força com o avanço para: a liga 6061 – T6 (a) e a liga A319-T0 (b). [8]..... | 13 |
| Figura 2.15 Variação da tensão com o aumento da velocidade de deformação em regime quase estático para a liga AA 5083 – H111 (a) e para a liga AA 6082 – T6 (b). [13] | 14 |
| Figura 2.16 Variação da tensão com o aumento da velocidade de deformação em regime dinâmico para a) a liga AA 5083 – H111 e b) a liga AA 6082 – T6. [13]..... | 15 |
| Figura 2.17 Esquema da formação da apara, adaptado de Snahungshu Sikder [15] (a) e esquema das várias zonas de corte (b), adaptado de Abukhshim et al. [14]. | 15 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 2.18 | Variação da temperatura na interface ferramenta – apara em função do avanço por rotação para diferentes velocidades de corte. [16]..... | 16 |
| Figura 2.19 | Variação da temperatura na interface ferramenta – apara em função da profundidade de corte para diferentes velocidades de corte. [16]..... | 16 |
| Figura 2.20 | Variação da temperatura na interface ferramenta – apara em função da velocidade de corte para diferentes valores de avanço por rotação. [16]..... | 17 |
| Figura 2.21 | Representação das avarias possíveis de ocorrer em ferramentas de corte: quebra (a) e fissuras térmicas (b). [10]..... | 18 |
| Figura 2.22 | Esquema das principais áreas de desgaste na ferramenta de corte, adaptado de Machado et al.[5]..... | 19 |
| Figura 2.23 | Os três desgastes típicos de ferramentas de corte, a) Cratera, b) Flanco e c) Entalhe. [10]..... | 19 |
| Figura 3.1 | Máquina de tração uniaxial universal. | 22 |
| Figura 3.2 | Equipamento de microdurezas marca Struers Duramin. | 22 |
| Figura 3.3 | Microscópio ótico Leica DM 400 M LED. | 23 |
| Figura 3.4 | Montagem experimental dos ensaios de torneamento (a). Pormenor da fixação das chapas (b). | 24 |
| Figura 3.5 | Torno Convencional Pinacho. | 24 |
| Figura 3.6 | Montagem experimental para medição térmica. | 26 |
| Figura 3.7 | Fronteira definida para o primeiro estágio de tratamento dos dados termográficos..... | 26 |
| Figura 3.8 | Modo de fixação das chapas para a furação e montagem do dinamómetro (a) e CNC de três eixos usada no processo (b). | 27 |
| Figura 3.9 | Broca HSS usada no processo. | 27 |
| Figura 3.10 | Montagem experimental das chapas (a) e (c) e CNC de 5 eixos usada no processo (b). | 29 |
| Figura 3.11 | Montagem da roca e da fresa de pastilhas no porta – ferramentas (a), fresa e arestas de corte das pastilhas (b) e pastilha de corte (c). | 29 |
| Figura 3.12 | Rugosidade média em função do processo de maquinagem de acordo com a norma DIN 4766 [18]. | 30 |
| Figura 3.13 | Valor do Cutoff em função da rugosidade média de acordo com a norma DIN 4766 [18]. | 30 |
| Figura 3.14 | Montagem experimental para medição do desgaste da ferramenta. | 31 |
| Figura 3.15 | Lupa (a), máquina fotográfica digital (b) e disposição da máquina aquando do registo fotográfico das aparas de torneamento (c). | 32 |
| Figura 4.1 | Micrografia com luz polarizada da microestrutura de AA 5083 – H 111 (a) e micrografia com luz polarizada da microestrutura de AA 6082 – T6 (b). | 33 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 4.2 | Curvas tensão-deformação em tração em condições de solitação quase – estática à temperatura ambiente | 34 |
| Figura 4.3 | Propriedades mecânicas das ligas à temperatura ambiente..... | 35 |
| Figura 4.4 | Curvas tensão – deformação a temperatura variável para as ligas AA 5083 – H111 (a) e AA 6082 – T6 (b). | 36 |
| Figura 4.5 | Curvas tensão – deformação a temperatura constante e velocidade de deformação variável, para as ligas AA 5083 - H111 (a) e AA 6082 – T6 (b). | 37 |
| Figura 4.6 | Tensão normalizada em função da velocidade de deformação..... | 38 |
| Figura 4.7 | Evolução da temperatura de corte por torneamento para as ligas AA 5083 - H111 (a) e AA 6082 - T6 (b)..... | 39 |
| Figura 4.8 | Temperatura média de corte em função da profundidade de corte (ap) e da velocidade de rotação (w): liga AA 5083 – H111 (a) e liga AA 6082 – T6 (b). .. | 40 |
| Figura 4.9 | Temperatura máxima de corte em função da profundidade de corte (ap) e da velocidade de rotação (w): liga AA 5083 – H111 (a) e liga AA 6082 – T6 (b). .. | 41 |
| Figura 4.10 | Aparas obtidos após o torneamento da liga AA 5083 – H111 ((a),(b),(c),(d)) e da liga AA 6082 – T6 ((e), (f), (g), (h))..... | 42 |
| Figura 4.11 | a) Pastilhas utilizadas no corte por torneamento das ligas AA 5083 – H111 (a) e AA 6082 – T6 (b) e (c). | 43 |
| Figura 4.12 | Rugosidade média das superfícies torneadas da liga AA 5083 - H111 (a) e da liga AA 6082 – T6 (b). | 44 |
| Figura 4.13 | Registo das forças de corte na furação. a) Liga AA 5083 - H111 e b) Liga AA 6082 - T6. | 46 |
| Figura 4.14 | Força média de corte em função da velocidade de rotação e do avanço por rotação. a) Liga AA 5083 – H111 e b) Liga AA 6082 – T6. | 48 |
| Figura 4.15 | Razão de forças de corte na furação..... | 49 |
| Figura 4.16 | Ferramentas de corte usadas para furar a liga AA 6082 - T6. Furações até formação da apara aderente (a) e restantes(b). | 50 |
| Figura 4.17 | Apara formada após fresagem da liga AA 5083 - H111 (a)e (b). Apara formada após fresagem da liga AA 6082- T6 (c) e (d)..... | 51 |
| Figura 4.18 | Pastilha de corte usada na fresagem da liga AA 5083 – H111 (a) e pastilha de corte usada na fresagem da liga AA 6082 – T6 (b)..... | 51 |
| Figura 4.19 | Rugosidade Média em função da velocidade de corte e da liga, na fresagem. 52 | |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1 . Composição química (pd %) dos materiais base. | 21 |
| Tabela 3.2. Parâmetros de corte utilizados no torneamento. | 25 |
| Tabela 3.3 Parâmetros de corte utilizados na furação. | 27 |
| Tabela 3.4 Parâmetros de corte utilizados na fresagem..... | 28 |
| Tabela 4.1 Constantes da equação de Johnson – Cook. | 36 |

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

a_e – Profundidade de corte radial [mm]

a_p – Profundidade de corte axial [mm]

C_p – Calor específico [$J/(kg * K)$]

D – Diâmetro da ferramenta [mm]

ΔT – Aumento de temperatura [$^{\circ}C$]

ε – Deformação Real

$\bar{\varepsilon}$ – Deformação plástica equivalente

$\bar{\dot{\varepsilon}}$ – Taxa de deformação equivalente [s^{-1}]

$\bar{\dot{\varepsilon}}_o$ – Taxa de deformação referência [s^{-1}]

F_m – Força média de corte (furação) [N]

F_m^{5083} – Força média de corte (furação) da liga AA 5083 – H111 [N]

F_m^{6082} – Força média de corte (furação) da liga AA 6082 – T6 [N]

f_n – Avanço por rotação [$mm/rot.$]

f_z – Avanço por dente [$mm/dente$]

ρ – Densidade [kg/m^3]

Q_{F_m} – Quociente das forças médias de corte

R_a – Rugosidade média [μm]

T – Temperatura instantânea [$^{\circ}C$]

T_m – Temperatura de fusão do material [$^{\circ}C$]

T_r – Temperatura ambiente [$^{\circ}C$]

V_c – Velocidade de corte [$m/min.$]

V_f – Velocidade de avanço [$mm/min.$]

w – Velocidade de rotação [RPM]

$\bar{\sigma}$ – Tensão equivalente [MPa]

σ_o – Tensão limite de elasticidade [MPa]

Siglas

AA – *Aluminium alloy*

BUE – *Build up Edge*

CNC – *Comando numérico computacional*

FSW – *Friction Stir Welding*

HSS – *High Speed Steel*

ROI – *Region of Interest*

1. INTRODUÇÃO

Uma revisão aprofundada da literatura sobre maquinagem de ligas de alumínio revelou um défice de informação relativa à influência das propriedades plásticas destes materiais na maquinabilidade. De modo a colmatar esta falha, neste trabalho foram realizados estudos de maquinabilidade em duas ligas alvo de trabalho intensivo no âmbito da soldadura por *Friction Stir Welding* (FSW), a liga de alumínio não tratável termicamente, AA 5083 – H111, e a liga de alumínio tratável termicamente, AA 6082 – T6. Apesar destas ligas não serem típicas de maquinagem, a sua escolha para este estudo deve-se ao facto de haver um conhecimento profundo do seu comportamento plástico numa gama muito variada de temperaturas e velocidades de deformação.

Na presente dissertação foram maquinadas chapas destas duas ligas, recorrendo a processos de furação, fresagem e torneamento. O plano de trabalho foi delineado de modo a estudar, comparativamente, a influência das propriedades plásticas das ligas na maquinagem tendo em consideração a força de corte, a morfologia da apara, o desgaste da ferramenta, o calor gerado nos processos e a qualidade do acabamento das superfícies maquinadas. Mais precisamente, os testes de torneamento foram utilizados com o intuito de avaliar a influência das propriedades plásticas das duas ligas em função da temperatura de corte, os ensaios de furação foram realizados para avaliar essa influência na força de maquinagem e, por último, os ensaios de fresagem, para avaliar as diferenças na qualidade das superfícies maquinadas.

De modo a expor de forma clara o assunto em análise, o presente documento está dividido em 5 capítulos. No capítulo 2 é analisada a literatura relativamente ao mecanismo de formação da apara, ao comportamento das ligas quando sujeitas a solicitações dinâmicas, à força de corte e à geração de calor na maquinagem e aos tipos de desgaste da ferramenta. Em cada uma das secções do capítulo tenta-se conjugar a informação disponibilizada com dados sobre a sua relação com o comportamento plástico do material. O capítulo 3 descreve o procedimento experimental, assim como os equipamentos e materiais utilizados neste trabalho. No capítulo 4 é feita a análise e discussão dos resultados obtidos. No capítulo 5 são

apresentadas as conclusões do estudo efetuado e apresentam-se sugestões para trabalhos futuros.

2. ESTADO DA ARTE

O presente estado da arte encontra-se dividido em sete secções. Na primeira secção é definido o conceito de maquinabilidade e são identificados os fatores que a influenciam. Posteriormente são introduzidos os processos de maquinagem utilizados na presente investigação, os parâmetros associados a cada um deles e as ferramentas utilizadas. Na terceira secção são definidos os mecanismos de formação da apara, são classificadas as aparas e é explicada a influência das propriedades mecânicas dos materiais na sua morfologia. Na quarta secção é apresentado um estudo relativo ao comportamento sob solicitações dinâmicas, dos materiais metálicos. Na quinta secção faz-se uma breve análise dos esforços de corte na maquinagem, enquanto que na sexta secção é explicada a geração de calor na interface ferramenta/apara. Por fim, a sétima secção é dedicada à análise e identificação dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte.

2.1. Maquinabilidade

De acordo com Mills [1], a maquinabilidade avalia a aptidão de um material para ser conformado por corte, ou seja, a capacidade de retirar porções desse material, obtendo um acabamento satisfatório e sem custos elevados. Esta grandeza pode ser medida considerando a facilidade de corte, usando os valores da força de corte, considerando o custo final do processo, que compreende o custo das ferramentas e a energia gasta ao longo do processo e, finalmente, considerando o acabamento superficial, ou seja, medindo, por exemplo, a rugosidade das superfícies maquinadas ou avaliando o toleranciamento geométrico.

A maquinabilidade pode ser influenciada pela composição química e pela estrutura dos materiais, pelas suas propriedades mecânicas, condutividade térmica do material e ou pelo atrito na interface ferramenta/apara. Materiais com elevada resistência mecânica e/ou encruamento, requerem maiores forças e potências de corte e conduzem a maior geração de calor, na interface ferramenta/apara. Os materiais macios, por outro lado, apesar de requererem menor força de corte, são suscetíveis à formação de apara aderente, reduzindo a vida das ferramentas e a qualidade do acabamento superficial [2].

Relativamente às propriedades físicas dos materiais, é possível afirmar que materiais dotados de boa condutibilidade térmica, quando sujeitos ao corte, têm uma maior taxa de dissipação de calor na zona e corte. [2].

O atrito ferramenta/peça influencia a geração de calor na maquinagem. Coeficientes de atrito elevados levam ao aparecimento de micro soldaduras na interface apara/ferramenta e maior geração de calor na zona de escorregamento da apara, promovendo o aparecimento de apara aderente [3].

A composição química influencia a microestrutura do material e, conseqüentemente, a maquinabilidade. O silício aumenta a abrasividade do material, aumentando o desgaste da ferramenta.

2.2. Apara

A maquinagem é um processo onde existe corte por arranque de apara. Portanto a maquinabilidade depende da formação da apara e da forma como esta se separa das ferramentas de corte. Interessa, portanto, entender o seu mecanismo de formação, assim como a sua morfologia e a forma como os parâmetros de corte condicionam quer a formação, quer a morfologia.

2.2.1. Formação da apara

A formação da apara é um mecanismo complexo que ocorre nas zonas de deformação adjacentes ao gume de corte da ferramenta e que depende do material que está a ser maquinado e da ferramenta de corte. Numa primeira fase, a aresta de corte, como se mostra na figura 2.1, penetra a peça provocando uma concentração de tensões elevada sobre o material em contacto com a face de ataque. As forças aplicadas pela ferramenta aumentam progressivamente, até que as tensões de corte instaladas ultrapassam a tensão de rotura do material a maquinar e promovem o escorregamento da porção de material removido em contacto com a face de ataque da ferramenta. A rotura do material, na região do plano de corte, pode ser parcial ou total, originando, respetivamente, apara continua ou descontinua. A continuidade do movimento relativo peça/ferramenta, promove o escorregamento contínuo da apara sobre a face de ataque da ferramenta e a continuação da remoção de material. Pode-se portanto afirmar que a formação da apara é um fenómeno cíclico onde há

alternância entre uma primeira fase, durante a qual a força de corte é máxima, designada por fase de encalce, e uma segunda fase, designada por fase de corte.

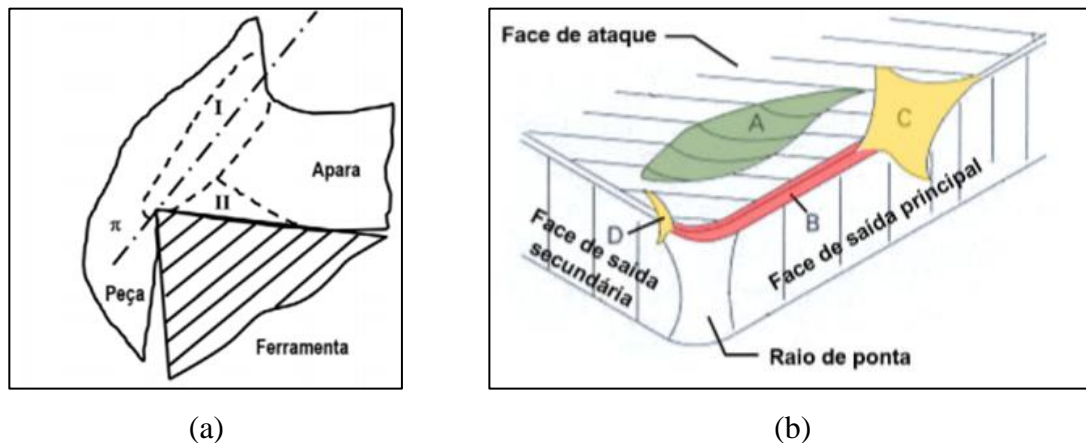


Figura 2.1 Regiões de deformação da avara, região de deformação primária (I) e região de deformação secundária (II) (a), ferramenta de corte e as suas faces (b) [4,5].

2.2.2. Tipos de avara

A tipologia da avara depende, além das condições de maquinagem, das características do material a cortar. De um modo geral, as aparas podem ser classificadas como contínua e descontínua (figura 2.2). Segundo Diniz et al. [6], a avara contínua (figura 2.2a) é típica de corte em materiais dúcteis, avanços pequenos e velocidades de corte elevadas enquanto a avara descontínua (figura 2.2b) é típica do corte de materiais frágeis ou condições de corte em que a zona de deformação primária se estende para ângulos de corte reduzidos os quais facilitam a propagação de fissuras ao longo do plano de corte.

Além dos tipos de aparas descritos anteriormente existe o fenómeno pontual e nefasto da avara aderente ou *Build up Edge* (BUE), representada na figura 2.2c. É uma avara que resulta da adesão do material à superfície da ferramenta, contribuindo para um insatisfatório acabamento superficial e para a diminuição da vida útil da ferramenta de corte.

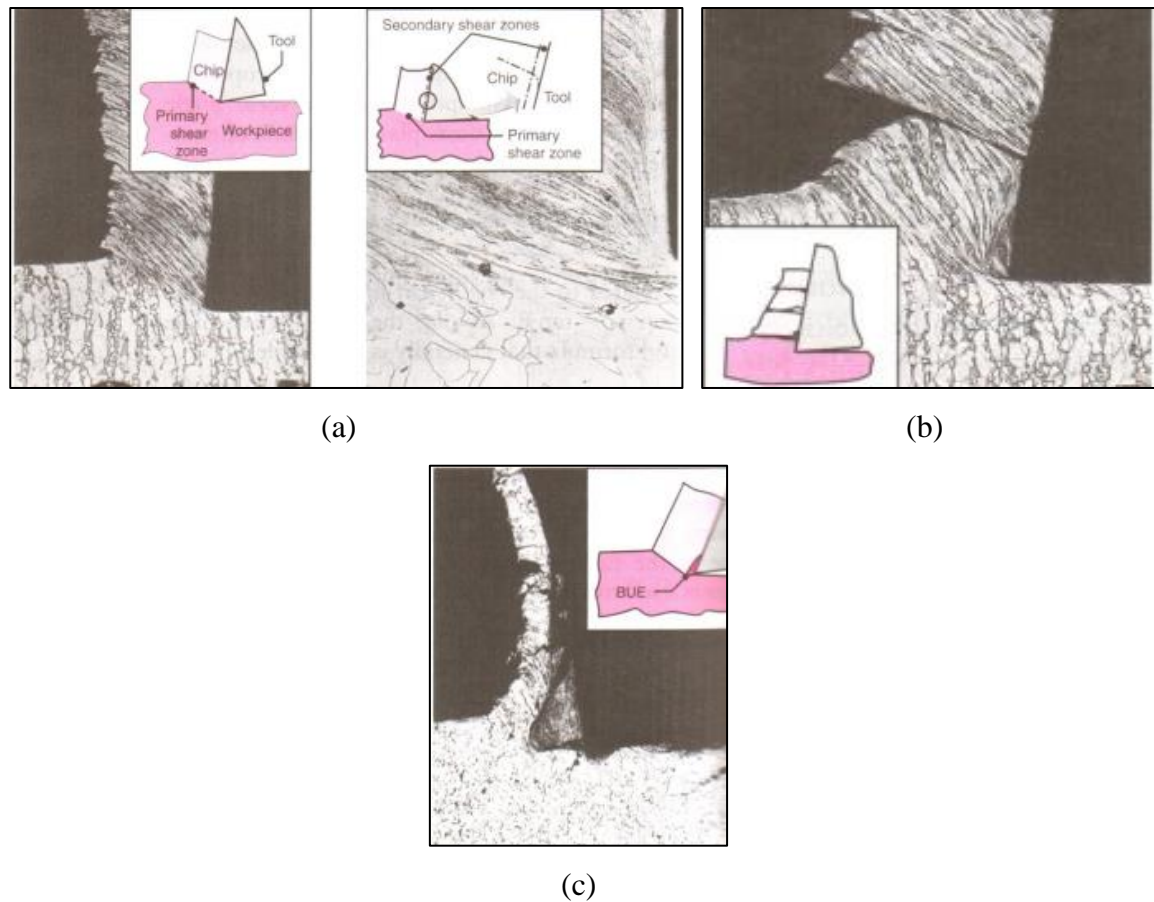


Figura 2.2 Apara contínua e as duas zonas de corte (a), apara descontínua (b) e apara aderente (c). [7]

2.2.3. Influência do comportamento mecânico do material na morfologia da apara

De acordo com a literatura, a forma e microestrutura das aparas são um bom indicador da deformação ocorrida durante o processo de maquinagem. Vários foram os autores que, na tentativa de aprofundar esta relação, estudaram os mecanismos de formação da apara em vários processos de maquinagem. Songmene et al. [8], por exemplo, analisaram a morfologia de aparas provenientes de furação a velocidades de corte distintas e avanço por rotação constante, em quatro ligas de alumínio, duas envelhecidas artificialmente (6061 – T6 e 7075 – T6) e duas forjadas (A356 – T0 e A319 – T0). Estes autores constataram, conforme se pode observar na figura 2.3, que o tipo de apara variava com a velocidade de corte.

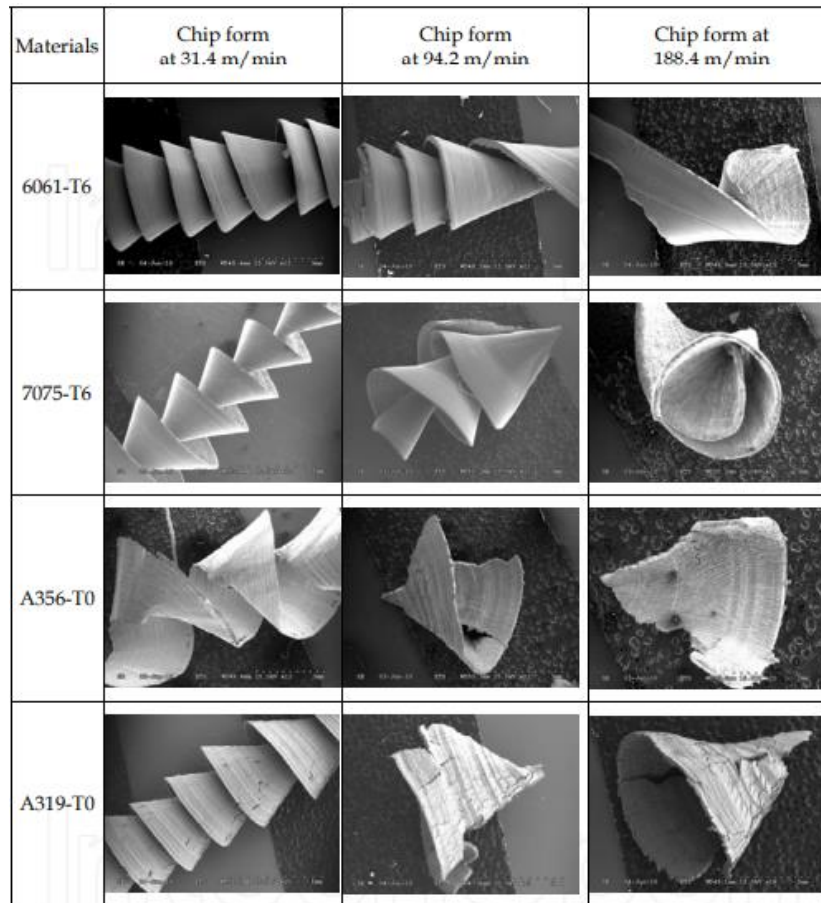


Figura 2.3 Comparação da morfologia de aparas provenientes da furação de diferentes ligas a diferentes velocidades de corte, mantendo o avanço constante. [8]

Wang et al. [9], por outro lado, estudaram a influência do comportamento mecânico dos materiais, quando sujeitos a diferentes condições de solicitação, na maquinagem. Para descrever o comportamento dos materiais durante a maquinagem, estes autores utilizaram a lei de Johnson – Cook

$$\bar{\sigma} = [A + B * \bar{\epsilon}^n] * \left[1 + C * \ln\left(\frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_0}\right) \right] * \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m \right]. \quad (2.1)$$

onde T é a temperatura instantânea, T_m a temperatura de fusão do material, T_r a temperatura ambiente, $\bar{\sigma}$ a tensão equivalente, $\bar{\epsilon}$ a deformação plástica equivalente, $\bar{\epsilon}$ a taxa de deformação equivalente e $\bar{\epsilon}_0$ a taxa de deformação de referência. Na figura 2.4 exemplificam-se as curvas tensão – deformação para velocidades de corte crescentes, ($V_{c1} > V_{c2} > V_{c3} > V_{c4}$), às quais correspondem taxas de deformação crescentes, ($\epsilon_4 > \epsilon_3 > \epsilon_2 > \epsilon_1$)

e temperaturas crescentes, ($T_1 > T_2 > T_3 > T_4$). A curva a traço interrompido, que une os pontos E-C-B-A, representa a condição crítica de tensão/deformação para que ocorra a rotura da avara. O ponto E, que define a transição entre o comportamento dúctil e frágil, separa a curva em duas partes. A parte representada pela secção F-E corresponde ao comportamento frágil do material, devido a não haver deformação plástica significativa da avara até à rotura, e a secção E-D-C-B-A, corresponde ao comportamento dúctil do material, havendo deformação plástica significativa da avara até à rotura. Em suma, a figura evidencia que o comportamento do material durante o corte evolui no sentido de um comportamento frágil à medida que a velocidade de corte aumenta e, conseqüentemente, a taxa de deformação imposta ao material aumenta. Isto leva a que a rotura da avara ocorra para tensões elevadas e mais reduzidas, o que influencia a forma da avara.

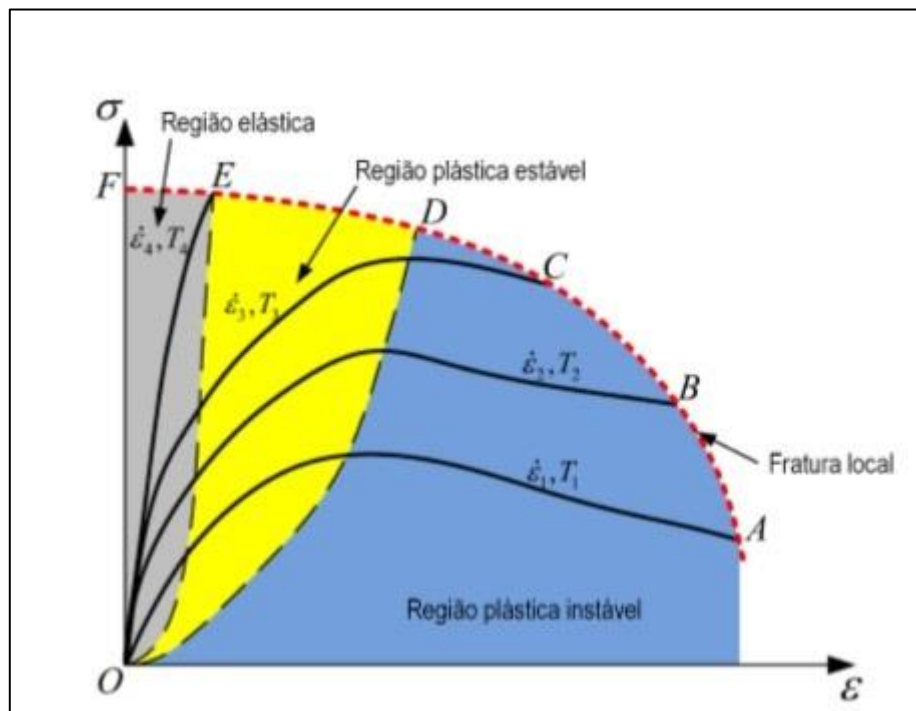


Figura 2.4 Comportamento mecânico do material quando sujeito a diferentes condições de tensão/deformação, adaptado de Wang et al. [9]

Wang et al. [9] identificaram, recorrendo à análise das aparas e da superfície maquinada, o regime de transição dúctil-frágil em maquinagem a ultra alta velocidade de uma liga de alumínio. Para tal maquinaram chapas, por fresagem, numa gama de velocidades entre 50 e 8000 m/min. Constataram que a morfologia da avara se alterava em função da velocidade de corte. Maquinando o material com velocidade de corte igual a 2500 m/min,

observaram apanha serrilhada continua, como se mostra na figura 2.5. A figura permite distinguir de forma clara duas zonas, de fronteira bem definida, na apanha: uma zona de fratura dúctil e uma zona de fratura frágil. Para velocidades de corte entre 4200 m/min e 5000 m/min, observou-se que a morfologia da apanha se tornava dupla, podendo observar-se apanha típica de deformação plástica e apanha típica de fratura frágil. Os autores consideraram esta gama de velocidades de corte como gama de velocidades de transição. Com efeito, aumentando a velocidade de corte para 7000 m/min, os autores observaram que as apanhas passaram a ser fragmentadas, como se mostra na figura 2.6. Os autores analisaram, ainda, as superfícies maquinadas, encontrando diferenças entre as superfícies maquinadas em regime dúctil e em regime frágil. Como se pode observar na figura 2.7, na superfície maquinada a 2500 m/min observam-se fraturas do tipo dúctil, induzidas pela deformação plástica, e a presença de apanha residual, ainda ligada à superfície maquinada. Já a superfície fresada a 7000 m/min., apresenta, como se vê na figura 2.8, degraus de clivagem e *brittle tearing*, característicos da fratura frágil. A rugosidade da superfície maquinada a 7000 m/min foi superior à maquinada a 2500 m/min, o que foi atribuído à rotura frágil do material, ou seja, ao fenómeno de *brittle tearing*.

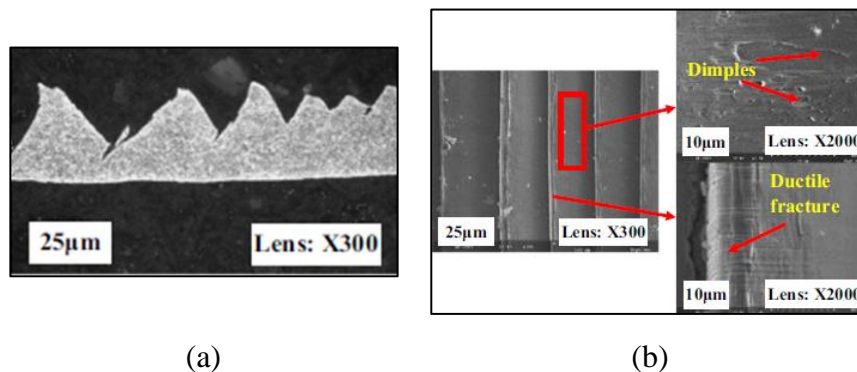


Figura 2.5 Micrografia de apanhas serradas obtidas após maquinagem a velocidade de corte de 2500 m/min. Micrografia da secção transversal da apanha (a) e da superfície dos segmentos serrados (b). [9]

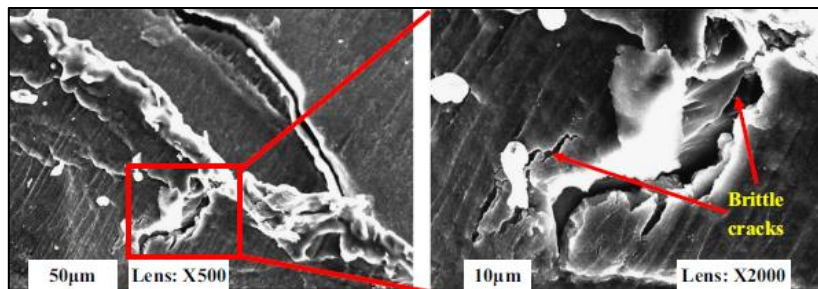


Figura 2.6 Micrografia de aparas fragmentadas obtidas após maquinagem a velocidade de corte de 7000 m/min. [9]

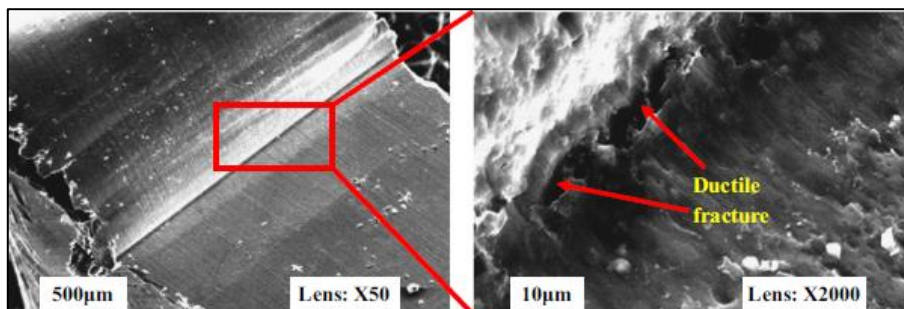


Figura 2.7 Micrografia da superfície de fratura da raiz da apara obtida para velocidade de corte de 2500 m/min. [9]

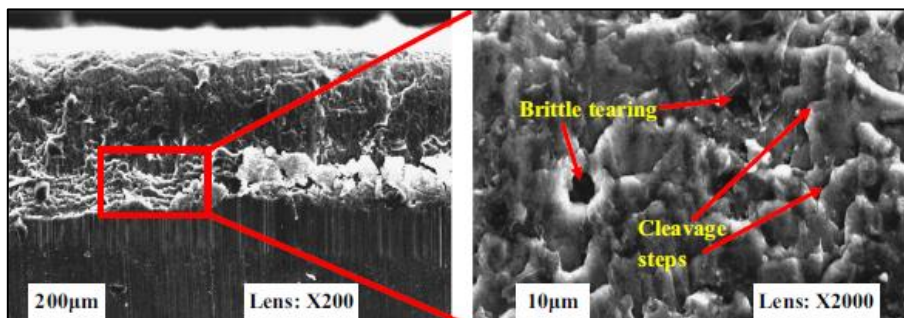


Figura 2.8 Micrografia da superfície de fratura da raiz da apara obtida para velocidade de corte de 7000 m/min. [9]

2.3. Processos de maquinagem

Neste trabalho, para analisar a influência das propriedades plásticas na maquinabilidade das duas ligas de alumínio, foram realizados lotes variados de ensaios de corte. De modo a diversificar as condições de corte e a tipologia dos resultados a analisar, realizaram-se ensaios de furação, fresagem e torneamento.

2.3.1. Torneamento

O torneamento é um processo de corte por arranque de apara que permite obter peças de revolução com recurso a uma ferramenta de corte com aresta única de corte. Durante a

operação de corte, a peça a maquinar encontra-se animada de movimento de rotação, enquanto a ferramenta é animada de movimento de translação linear. Como se exemplifica na figura 2.9, neste processo, os parâmetros de corte são a velocidade de rotação da árvore (w), a velocidade de corte (V_c), o avanço por rotação (f_n), a profundidade de corte axial (a_p) e o ângulo de posição (K_r). Regra geral, neste processo, formam-se aparas contínuas de grande comprimento, como ilustrado na figura 2.10. No entanto, alguns parâmetros de corte, como o ângulo de posição, o raio da ponta da ferramenta, a velocidade de rotação e a profundidade de corte, podem alterar a dimensão e a forma da apara [7].

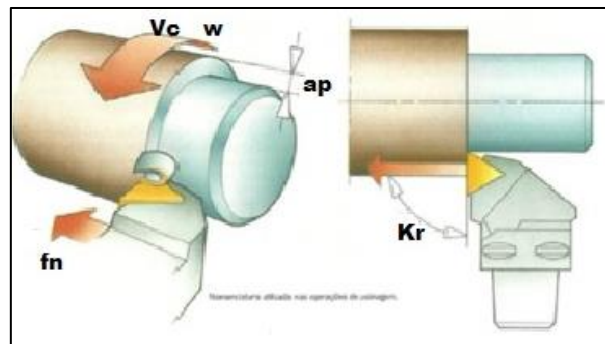


Figura 2.9 Parâmetros de torneamento. [10]



Figura 2.10 Aparas provenientes do torneamento de alumínio AA 5083 – H111.

2.3.2. Fresagem

A fresagem utiliza ferramentas rotativas, de múltiplas arestas (fresas), para remover o material, (figura 2.11). Cada aresta de corte remove uma quantidade de material, o que condiciona quer a saída, quer a formação da aparas. Neste processo, devido ao corte ser realizado por uma ferramenta de múltiplas arestas, não existe formação de aparas contínuas.

Os parâmetros de corte neste processo são a velocidade de corte (V_c), a profundidade de corte axial (a_p), a profundidade de corte radial (a_e) e o avanço por dente (f_z) [7].

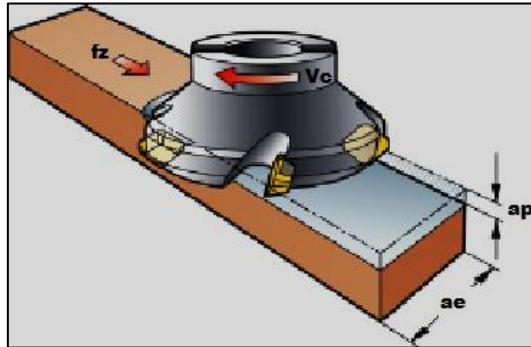


Figura 2.11 Ilustração do processo de fresagem. [10]

2.3.3. Furação

A furação é um processo que se serve de uma ferramenta helicoidal, com dois gumes de corte (broca) para remover o material. A furação é caracterizada por dois movimentos, o movimento de corte rotativo e o movimento de avanço linear na direção do eixo da broca. Tal como no torneamento, na furação também pode ocorrer a formação de apara contínua. De acordo com James Brown [11], as ferramentas de corte devem ser projetadas de modo a remover a apara do interior do furo, evitando danos na ferramenta. Os parâmetros do processo são, como se pode observar na figura 2.12, o avanço por rotação (f_n), a velocidade de rotação (w), a velocidade de corte (V_c) e a velocidade de avanço (V_f). [7]

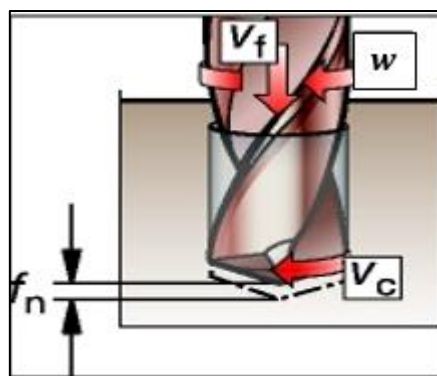


Figura 2.12 Parâmetros de corte na furação. [10]

2.4. Análise do esforço de corte

Os estudos realizados até à data, sendo o de Songmene et al. [8] um exemplo, permitiram concluir que a variação do esforço de corte com a velocidade de corte depende do tipo de liga a maquinar, como se pode constatar ao observar a figura 2.13. A variação do esforço de corte com o avanço é independente das propriedades da liga, como se pode observar por análise das figuras 2.14a e 2.14b. Com efeito, a figura permite concluir que o esforço de corte aumenta com o avanço, independentemente do material e da velocidade de corte. [12]

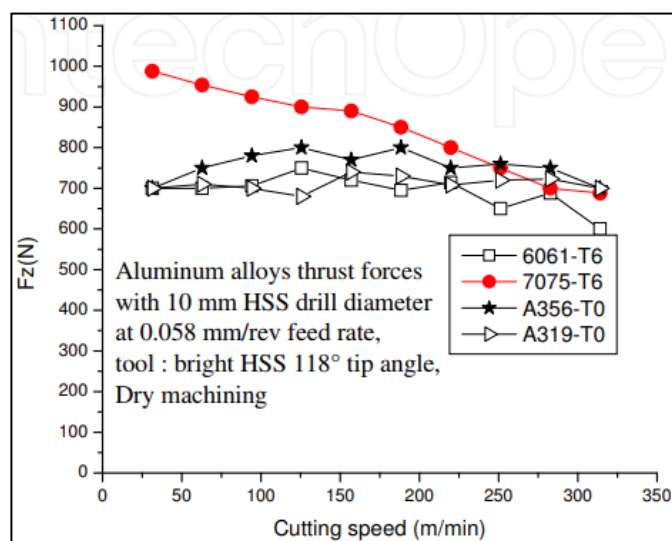


Figura 2.13 Evolução comparativa do esforço de corte com o aumento da velocidade de corte para quatro diferentes ligas de alumínio. [8]

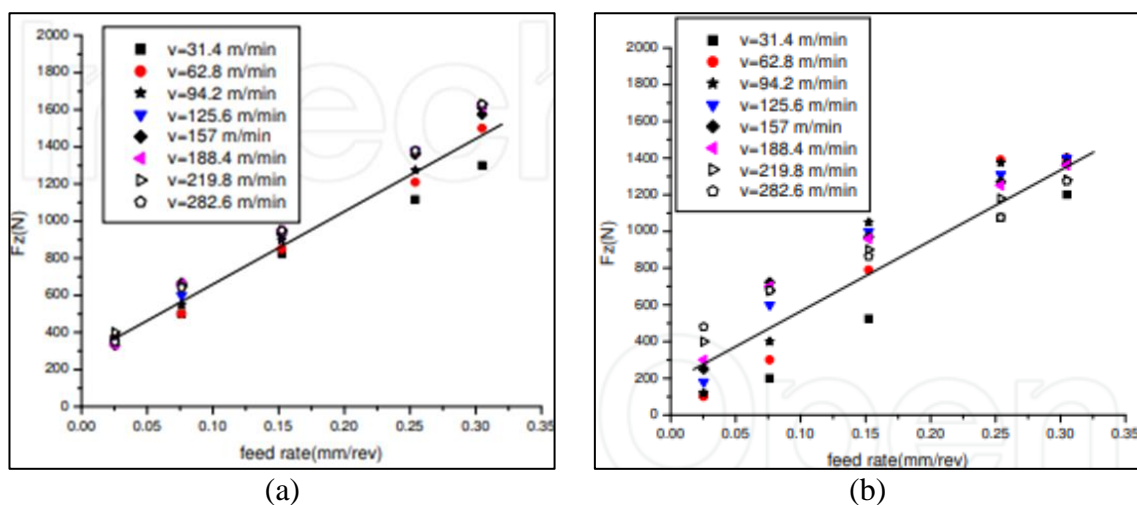


Figura 2.14 Variação da força com o avanço para: a) a liga 6061 – T6 (a) e a liga A319-T0 (b). [8]

A avaliação da força de corte em função das propriedades dos materiais pode ser atribuída ao comportamento plástico dos materiais a maquinar. Seguindo este pressuposto, Winzer e Glinicka [13] estudaram o comportamento mecânico, sob solicitações estáticas e dinâmicas, de duas ligas de alumínio (AA 5083 – H111 e AA 6082 – T6). Os ensaios quase estáticos foram realizados usando valores de velocidades de deformação entre 10^{-4} e 1 s^{-1} e foram os resultados que se mostram na figura 2.15. Os autores concluíram que a liga AA 5083 – H111 apresentou sensibilidade negativa à velocidade de deformação e a liga AA 6082 – T6 sensibilidade positiva. Numa segunda fase, os autores decidiram testar as ligas em regime dinâmico, usando velocidades de deformação superiores. A liga AA 5083 – H111 foi ensaiada a 900, 1450, 3000 e 5500 s^{-1} e a liga AA 6082 – T6 foi testada a 500, 950 e 3400 s^{-1} . Com base nos gráficos da figura 2.16, onde se mostram as curvas tensão – deformação obtidas nos ensaios dinâmicos, os autores concluíram que para a liga AA 5083 – H111 havia um aumento de tensão substancial (25%) com o aumento da velocidade de deformação, enquanto para a liga AA 6082 – T6, o aumento de tensão com o aumento da velocidade de deformação era muito baixo (8%). Com base nos resultados obtidos os autores concluíram que a liga AA 5083 apresenta elevada sensibilidade à velocidade de deformação, enquanto a liga AA 6082 é praticamente insensível.

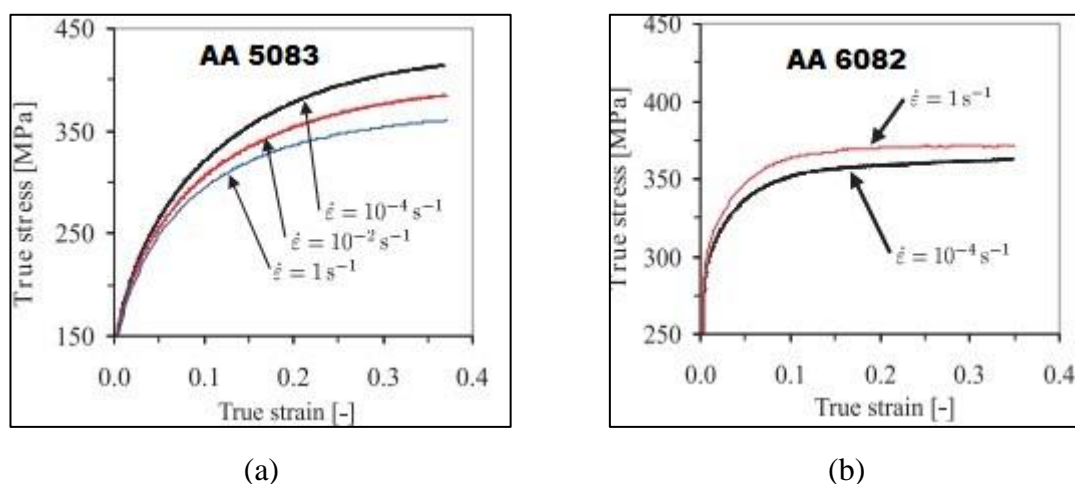


Figura 2.15 Variação da tensão com o aumento da velocidade de deformação em regime quase estático para a liga AA 5083 – H111 (a) e para a liga AA 6082 – T6 (b). [13]

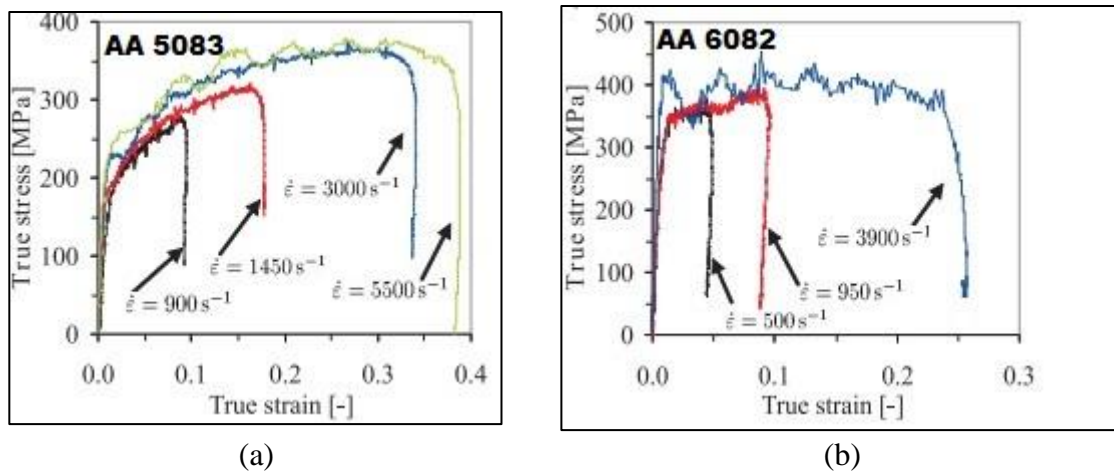


Figura 2.16 Variação da tensão com o aumento da velocidade de deformação em regime dinâmico para a) a liga AA 5083 – H111 e b) a liga AA 6082 – T6. [13]

2.5. Geração de calor na maquinagem

A geração de calor na maquinagem deve-se, segundo Abukhshim et al. [14], ao trabalho de deformação plástica e ao trabalho do atrito entre a peça e a ferramenta. De modo a melhor explicar a relação entre a formação de calor e estes dois fenómenos, na figura 2.17a representa-se o esquema da formação da apara e na figura 2.17b representam-se as zonas de corte. A geração de calor por deformação plástica ocorre preferencialmente na zona de corte primária e é responsável pelo amaciamento do material junto ao gume de corte da ferramenta. A geração de calor por atrito, por sua vez, ocorre na zona de corte secundária, devido ao atrito na interface ferramenta/apara, e é responsável pelo aumento da temperatura na ferramenta. Não será ainda de excluir a geração de calor entre a superfície maquinada e a ferramenta, na zona de corte terciária, que contribuirá, também, para o aumento da temperatura da peça e da ferramenta. Todo o calor gerado nas três zonas de corte fluí, por condução, para a apara e, posteriormente, para a zona de interface ferramenta/peça.

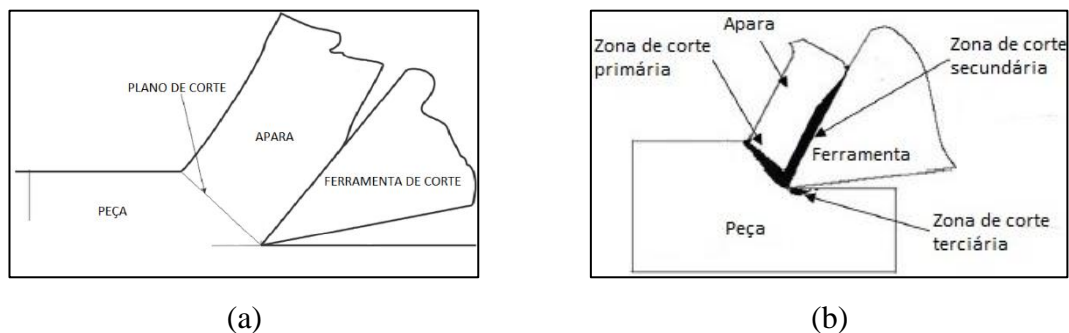


Figura 2.17 Esquema da formação da apara, adaptado de Snahungshu Sikder [15] (a) e esquema das várias zonas de corte (b), adaptado de Abukhshim et al. [14].

De acordo com Abhang et al. [16], a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte são os parâmetros que influenciam a formação de calor em maquinagem por torneamento. Como se pode constatar pela observação das figuras 2.18, 2.19 e 2.20, o aumento do avanço leva a um aumento da espessura da apra e o aumento da profundidade de corte leva a um aumento da largura da apra, aumentando a geração de calor, por atrito, na zona de corte. O aumento da velocidade de corte leva ao aumento da geração de calor, também por atrito, na zona de corte. Ao variar o raio de corte da ferramenta, estes autores concluíram ainda que o seu aumento leva a uma maior área disponível para a condução de calor entre a ferramenta e a peça, promovendo a dissipação do calor gerado, diminuindo a temperatura de corte.

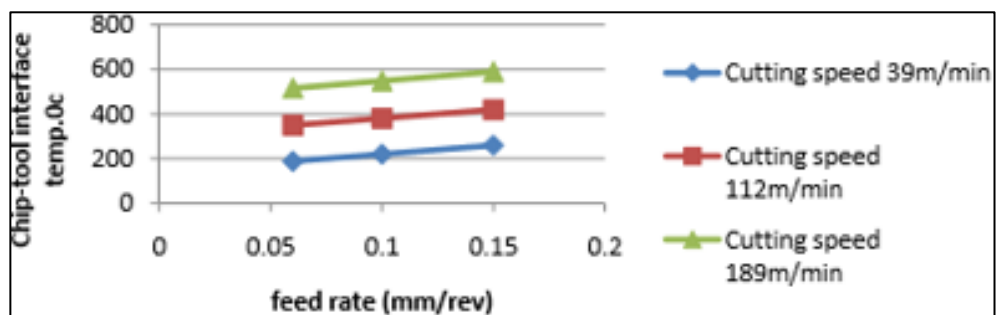


Figura 2.18 Variação da temperatura na interface ferramenta – apra em função do avanço por rotação para diferentes velocidades de corte. [16]

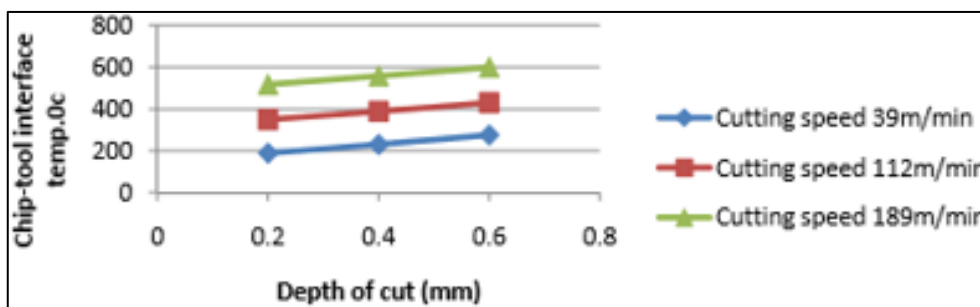


Figura 2.19 Variação da temperatura na interface ferramenta – apra em função da profundidade de corte para diferentes velocidades de corte. [16]

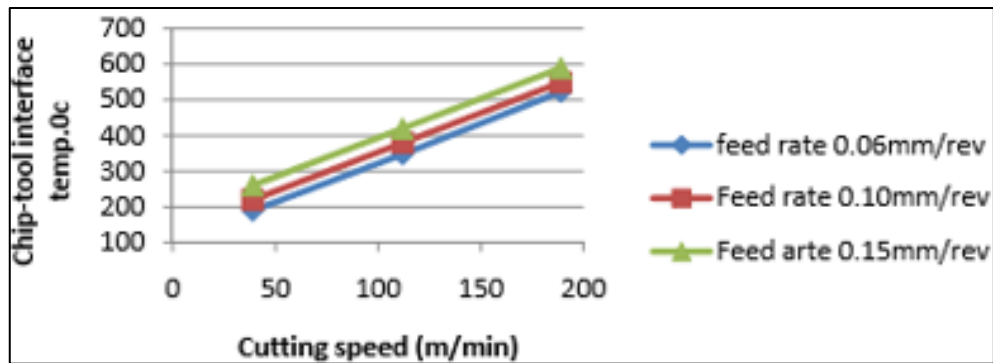


Figura 2.20 Variação da temperatura na interface ferramenta – aparta em função da velocidade de corte para diferentes valores de avanço por rotação. [16]

2.6. Desgaste das ferramentas

De acordo com Machado et al. [5] podem-se considerar dois fenômenos responsáveis pela inutilização das ferramentas de maquinagem, o colapso e o desgaste. Em geral, enquanto o colapso é um fenômeno que acontece de uma forma repentina e imprevisível, originando a perda de uma quantidade considerável de material da ferramenta, o desgaste é um fenômeno contínuo e previsível que pode causar mudança na forma original da ferramenta por perda contínua e progressiva de pequenas quantidades de material nas faces de ataque ou de saída da ferramenta.

2.6.1. Colapso

Tal como representado na figura 2.21, a remoção de material da ferramenta aquando do colapso pode ser por quebra ou fissuração de origem térmica. De acordo com Diniz et al. [6], os fenômenos de quebra resultam de cargas dinâmicas associadas ao impacto da ferramenta com a peça. Já as fissuras térmicas, que surgem perpendicularmente à aresta de corte, acontecem quando a temperatura na aresta de corte muda rapidamente de quente para frio.

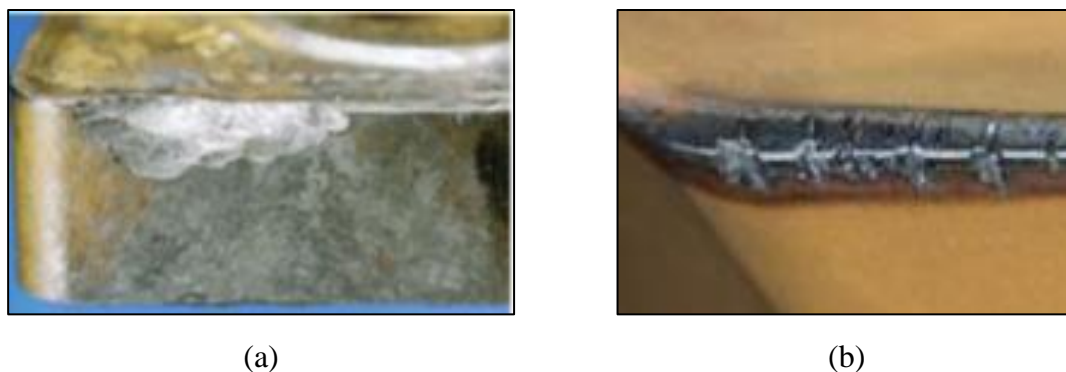


Figura 2.21 Representação das avarias possíveis de ocorrer em ferramentas de corte: quebra (a) e fissuras térmicas (b). [10]

2.6.2. Desgaste

De acordo com Souza [17], uma ferramenta de corte, por muito resistente e tenaz que seja, está sempre sujeita a desgaste. Durante a maquinagem a ação do corte altera a forma geométrica original da ferramenta, verificando-se, normalmente, desgastes contínuos e progressivos em duas regiões adjacentes à aresta de corte, a face de ataque e a face de saída. A figura 2.22 apresenta as principais áreas de desgaste na ferramenta de corte.

A ocorrência de desgaste nas ferramentas pode ser associada a mecanismos como a abrasão, a adesão e a difusão. A abrasão, ou atrito mecânico, deve-se à presença de inclusões duras no material da peça a maquinar, ou de partículas provenientes do desgaste da ferramenta, e ao aumento da temperatura de corte que reduz a dureza da ferramenta. A apra aderente também é responsável por este tipo de desgaste, uma vez que a sua destruição cíclica produz fragmentos de material endurecido por encruamento, os quais, durante o seu trajeto de saída, potenciam a abrasão nas superfícies de contacto. Por fim, o desgaste por difusão ocorre na face de ataque e deve-se à reação química entre o material da peça e a ferramenta de corte, aumentado pela velocidade de corte [6].

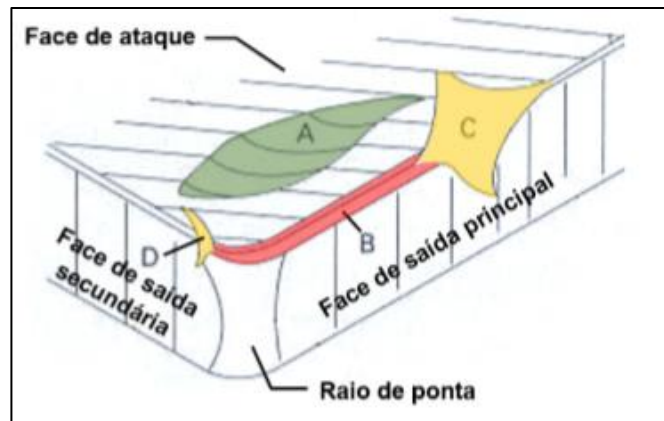


Figura 2.22 Esquema das principais áreas de desgaste na ferramenta de corte, adaptado de Machado et al.[5]

Tal como se mostra na figura 2.23, o desgaste das ferramentas de corte pode ser classificado como desgaste frontal ou de flanco, desgaste de cratera e desgaste de entalhe. O desgaste frontal ou de flanco é aquele que ocorre na face da saída da ferramenta de corte e é causado pela abrasão, dependendo da existência de partículas duras incrustadas no material da peça. Este tipo de desgaste provoca a deterioração do acabamento superficial da peça, ao modificar, totalmente, a forma da aresta de corte [6]. O desgaste de cratera acontece na superfície da face de ataque da ferramenta e é provocado pelo atrito entre esta e a apra. Quando a cratera atinge um tamanho excessivo e se encontra com o desgaste frontal, há colapso da ferramenta [10]. Finalmente, o desgaste de entalhe é caracterizado por um dano excessivo e localizado nas faces de ataque e de saída da ferramenta, ou seja, nas áreas C e D representadas na figura 2.22. Segundo a Sandvik [10], este tipo de desgaste é causado pela adesão da apra. Porém, ainda não existe consenso na literatura sobre o mecanismo que o provoca.

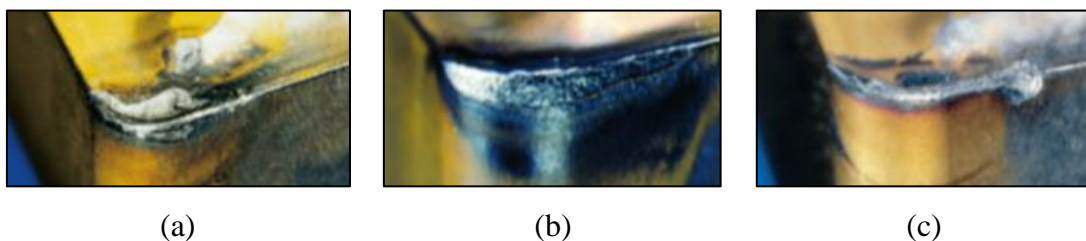


Figura 2.23 Os três desgastes típicos de ferramentas de corte, a) Cratera, b) Flanco e c) Entalhe. [10]

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Caracterização dos metais base

No presente trabalho foram utilizadas chapas com 8 mm de espessura de duas ligas de alumínio: uma liga de alumínio não tratável termicamente (AA 5083 – H111) e uma liga de alumínio tratável termicamente (AA 6082 – T6). A tabela 3.1, onde se mostra a composição química das duas ligas, permite concluir que enquanto a liga AA 5083 é uma liga rica em magnésio, a liga AA 6082 é uma liga rica em magnésio e silício.

Tabela 3.1 . Composição química (pd %) dos materiais base.

| Material | <i>Si</i> | <i>Mg</i> | <i>Mn</i> | <i>Fe</i> | <i>Cr</i> | <i>Zn</i> | <i>Ti</i> | <i>Cu</i> | <i>Al</i> |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| AA 5083 – H111 | 0,40 | 4,45 | 0,70 | 0,40 | 0,15 | 0,25 | 0,15 | 0,10 | Restante |
| AA 6082 – T6 | 1,00 | 0,90 | 0,70 | 0,25 | 0,125 | 0,10 | 0,05 | 0,05 | Restante |

3.1.1. Ensaio de tração

De modo a analisar o comportamento plástico das duas ligas foram realizados ensaios de tração uniaxial, numa máquina de testes universal da marca *Instron 5584* (figura 3.1), conforme as práticas recomendadas pela norma E8M.



Figura 3.1 Máquina de tração uniaxial universal.

3.1.2. Ensaios de dureza

Para a execução dos ensaios de dureza utilizou-se a máquina da marca *Struers Duramin* que se mostra na figura 3.2. As medições foram feitas com uma carga de 100g (equivalente a uma força de 980,7 mN), e aplicada durante 15 s, utilizou-se um espaçamento entre medições de 500 μm .



Figura 3.2 Equipamento de microdurezas marca *Struers Duramin*.

3.1.3. Ensaios metalográficos

De modo a observar a microestrutura inicial do material base, realizou-se o polimento com posterior ataque químico, usando o reagente *Poultons Modificado* (12 ml HCl + 31 ml HNO_3 + 1 ml HF + 1g H_2CrO_4 + 11 ml H_2O). A microestrutura dos metais base foi examinada com recurso ao microscópio ótico *Leica DM 400 M LED* (figura 3.3), com ampliações de 12,5x e 100x.



Figura 3.3 Microscópio óptico *Leica DM 400 M LED*.

3.2. Ensaaios de corte

3.2.1. Corte por torneamento

3.2.1.1. Parâmetros e procedimentos de ensaio

A montagem experimental para a realização dos ensaios de corte por torneamento mostra-se na figura 3.4. Tal como se mostra na figura 3.4b foram utilizadas, nestes ensaios, chapas de com dimensão 60x60x8 mm fixas por meio de uma bucha de quatro grampos. Devido às chapas serem de pouca espessura e não apresentarem forma circular, houve a necessidade de torneá-las, em primeiro lugar, a área junto aos vértices (zona cinza clara da figura 3.4c), não havendo recolha de dados nesse período, de modo a criar uma espécie de bolacha de espessura igual à profundidade de corte que se pretendia. Esta última zona foi a usada para recolha de dados (zona cinza escura da figura 3.4c). Durante as operações de corte por facejamento não foi utilizado qualquer tipo de fluido de corte ou de refrigeração, de forma a evitar a dissipação do calor gerado no corte e assim evidenciar as diferenças de maquinabilidade entre os dois materiais. Neste trabalho recorreu-se a um torno convencional da marca *Pinacho* (figura 3.5) capaz de atingir velocidade de rotação de 2000 RPM e usou-se uma ferramenta com pastilha de corte de carboneto de tungstênio polida. Nos ensaios foram utilizadas as velocidades de rotação (w), de avanço por rotação (f_n), de profundidade de corte axial (a_p) e de diâmetro da ferramenta (D) que se mostram na tabela 3.2. Durante as operações de corte foi monitorizada a evolução da temperatura do processo recorrendo a

uma câmara termográfica. No final de cada teste de torneamento foram recolhidas aparas para caracterização morfológica, fotografadas as ferramentas de corte e analisada a rugosidade das superfícies maquinadas.

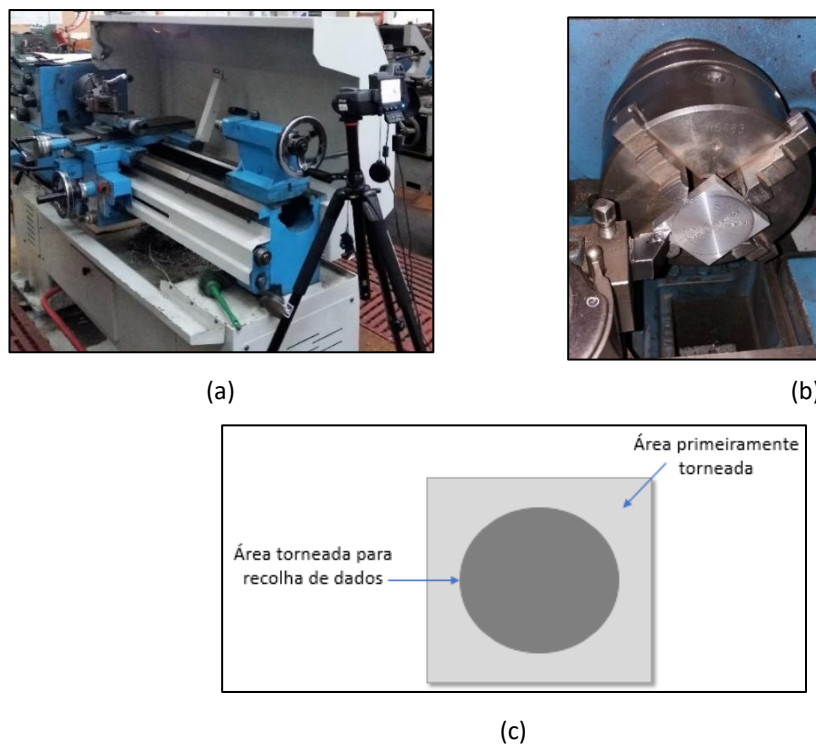


Figura 3.4 Montagem experimental dos ensaios de torneamento (a). Pormenor da fixação das chapas (b).



Figura 3.5 Torno Convencional *Pinacho*.

Tabela 3.2. Parâmetros de corte utilizados no torneamento.

| Material | ω (RPM) | f_n (mm/rot.) | a_p (mm) |
|----------|----------------|-----------------|------------|
| 5083 | 700 | 0,2 | 1 |
| 6082 | | | |
| 5083 | 700 | 0,2 | 3 |
| 6082 | | | |
| 5083 | 1400 | 0,2 | 1 |
| 6082 | | | |
| 5083 | 1400 | 0,2 | 3 |
| 6082 | | | |

3.2.1.2. Medição das temperaturas de corte

As temperaturas alcançadas durante o processo de torneamento foram adquiridas com recurso a uma câmara termográfica da marca *FLIR A655sc*, posicionada de acordo com o esquema da figura 3.6, de modo a permitir uma visualização perfeita da área de medição. Os dados recolhidos foram tratados com recurso ao software *ResearchIR*, colocando, na zona de interface ferramenta-peça, uma região fronteira (*ROI*) de três pixéis, como se observa na figura 3.7. De realçar ainda que foi utilizado um valor de emissividade igual a 0,9 para as medições de temperatura na zona de corte. A câmara foi posicionada a uma distância de 1,5m da interface ferramenta-peça para diminuir o efeito nocivo dos reflexos sobre a aquisição.

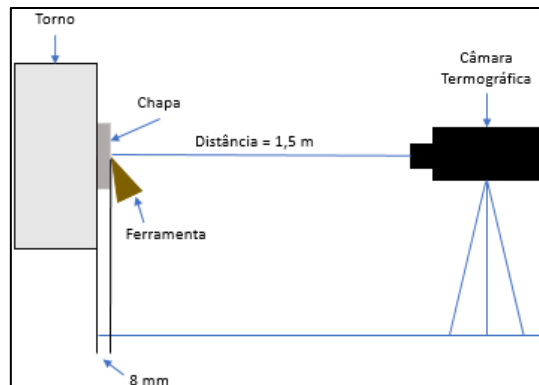


Figura 3.6 Montagem experimental para medição térmica.

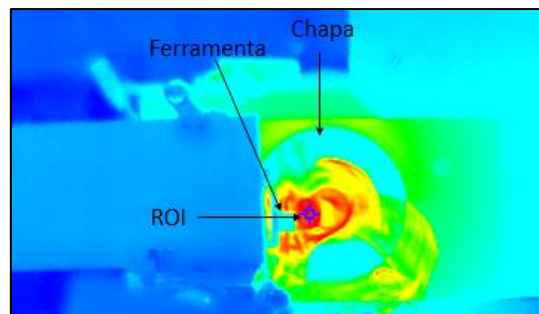


Figura 3.7 Fronteira definida para o primeiro estágio de tratamento dos dados termográficos.

3.2.1.3. Análise da rugosidade

As rugosidades das superfícies torneadas foram obtidas através de um perfilômetro óptico tridimensional da marca *Alicona*, utilizando uma ampliação de 5x.

3.2.2. Furação

3.2.2.1. Parâmetros e procedimentos de ensaio

Na figura 3.8a mostra-se a montagem utilizada para os ensaios de furação com medição da força de corte. Esta tarefa foi realizada com o auxílio de uma central CNC da marca *Leadwell V40* (figura 3.8b) de 3 eixos, capaz de atingir 8000 RPM, e uma broca de aço rápido (HSS) de diâmetro $D = 8$ mm (figura 3.9). Mais uma vez, e pelos motivos já mencionados, não foi usado qualquer tipo de refrigeração ou fluido de corte durante o processo. Os parâmetros de corte, que consistiram na velocidade de rotação (w), no avanço por rotação (f_n) e no diâmetro da ferramenta (D), são os que se mostram na tabela 3.3. No final do processo foram, mais uma vez, fotografadas as ferramentas de corte para posterior análise do desgaste da sua superfície.



(a)



(b)

Figura 3.8 Modo de fixação das chapas para a furação e montagem do dinamómetro (a) e CNC de três eixos usada no processo (b).



Figura 3.9 Broca HSS usada no processo.

Tabela 3.3 Parâmetros de corte utilizados na furação.

| Material | ω (rpm) | D (mm) | f_n (mm/rot.) |
|----------|----------------|--------|-----------------|
| 5083 | 1120 | 8 | 0,10 |
| | 2500 | | 0,15 |
| | 3800 | | 0,20 |
| | 5500 | | 0,30 |
| | 7600 | | |
| 6082 | 1120 | 8 | 0,10 |
| | 2500 | | 0,15 |
| | 3800 | | 0,20 |
| | 5500 | | 0,30 |
| | 7600 | | |

3.2.2.2. Medição das forças de corte

A recolha dos dados relativos à força de corte foi feita com recurso a um dinamómetro *Kistler*. Para aumentar o tempo de aquisição de dados e assegurar maior

precisão nas medições efetuadas, optou-se por aglomerar, em altura, três chapas de dimensão 136x112x8 mm.

3.2.3. Corte por Fresagem

3.2.3.1. Parâmetros e procedimentos de ensaio

Na figura 3.10 mostra-se a montagem utilizada para a maquinagem usando o processo de fresagem em chapas de dimensão 50x100x8mm. O corte foi realizado numa central CNC de 5 eixos capaz de atingir 15 000 RPM designada por *HAAS 750 SS* (figura 3.10b). Como se mostra nas figuras 3.11a, 3.11b e 3.11c, os testes foram realizados utilizando uma fresa de pastilhas de carboneto de tungsténio polida com 3 gumes/dentes de corte e diâmetro $D = 50$ mm. O uso de fluido de corte ou de algum tipo de refrigeração foi totalmente dispensado, pelos motivos anteriormente mencionados. Na tabela 3.4 mostram-se os parâmetros do processo utilizados nos ensaios: a velocidade de corte (V_c), o avanço por dente (f_z), a profundidade de corte radial (a_e), o diâmetro da ferramenta (D) e da profundidade de corte axial (a_p). Após cada um dos ensaios foi recolhida a apara fotografaram-se as ferramentas de corte.

Tabela 3.4 Parâmetros de corte utilizados na fresagem.

| Material | D (mm) | V_c (m/min.) | w (RPM) | f_z (mm/dente) | a_e (mm) | a_p (mm) |
|----------|--------|----------------|-----------|------------------|------------|------------|
| 5083 | 50 | 20 | 127 | 0,2 | 20 | 2 |
| 6082 | | | | | | |
| 5083 | 50 | 100 | 637 | 0,2 | 20 | 2 |
| 6082 | | | | | | |
| 5083 | 50 | 500 | 3183 | 0,2 | 20 | 2 |
| 6082 | | | | | | |
| 5083 | 50 | 1000 | 6366 | 0,2 | 20 | 2 |
| 6082 | | | | | | |
| 5083 | 50 | 1400 | 8913 | 0,2 | 20 | 2 |
| 6082 | | | | | | |
| 5083 | 50 | 1600 | 10186 | 0,2 | 20 | 2 |
| 6082 | | | | | | |
| 5083 | 50 | 1800 | 11459 | 0,2 | 20 | 2 |
| 6082 | | | | | | |
| 5083 | 50 | 2000 | 12732 | 0,2 | 20 | 2 |
| 6082 | | | | | | |
| 5083 | 50 | 2200 | 14006 | 0,2 | 20 | 2 |
| 6082 | | | | | | |

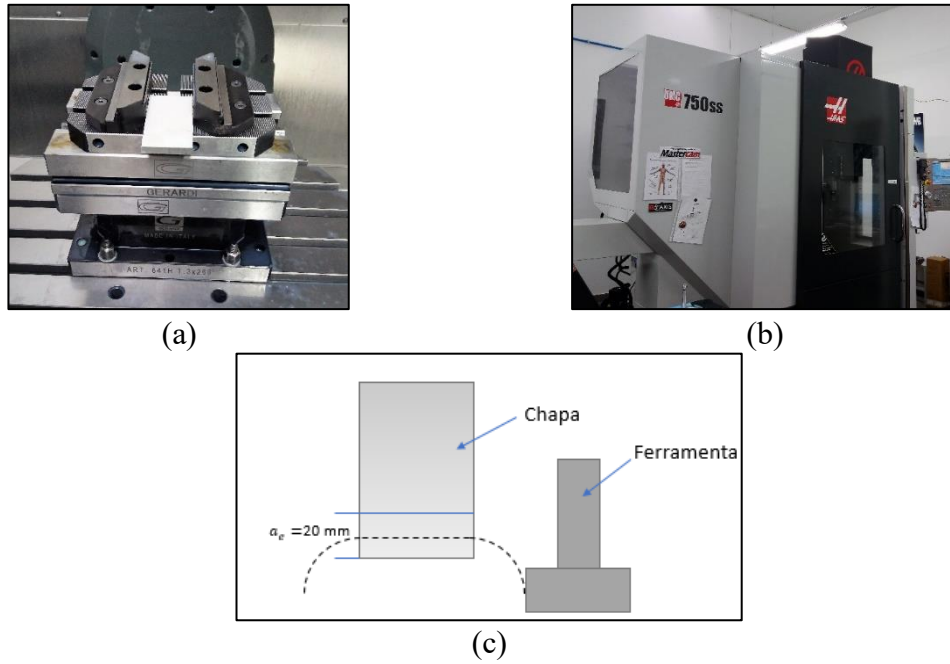


Figura 3.10 Montagem experimental das chapas (a) e (c) e CNC de 5 eixos usada no processo (b).

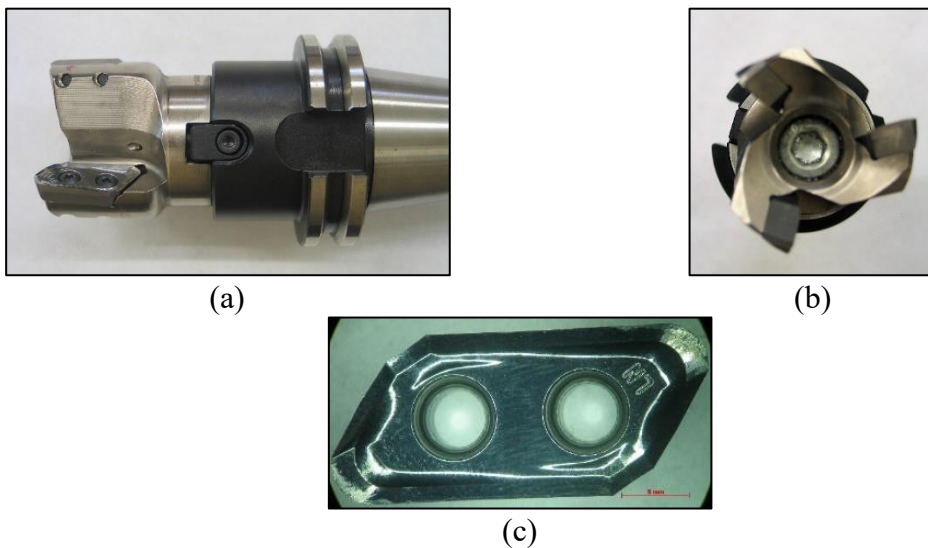


Figura 3.11 Montagem da roca e da fresa de pastilhas no porta – ferramentas (a), fresa e arestas de corte das pastilhas (b) e pastilha de corte (c).

3.2.3.2. Medição de rugosidades

Após cada ensaio de fresagem efetuou-se a medição da rugosidade média (R_a) das superfícies maquinadas, recorrendo a um rugosímetro da marca *Mitutoyo 178-923-2A, SJ-201 Surftest*. Realizaram-se duas medições por cada ensaio. As medições foram realizadas usando um filtro **2CR75** e cinco *Cutoff's*, ou intervalos de comprimento, de 2,5 mm cada, totalizando um comprimento medido de 12,5 mm. O valor do intervalo de comprimento foi escolhido com base na tabela da figura 3.12, onde se indica que a rugosidade típica de fresagem se situa entre 1,6 e 12,5 μm , exigindo-se, de acordo com a figura 3.13, um *Cutoff* de 2,5 mm.

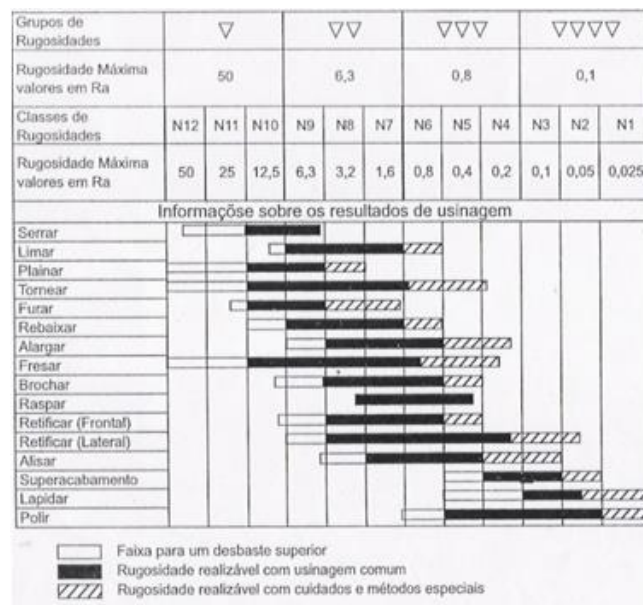


Figura 3.12 Rugosidade média em função do processo de maquinagem de acordo com a norma DIN 4766 [18].

| Rugosidade Ra | <i>Cutoff</i> |
|------------------------------------|---------------|
| Menor ou igual a 0,1 μm | 0,25 mm |
| Maior que 0,1 a 2 μm | 0,8 mm |
| Maior que 2 a 10 μm | 2,5 mm |
| Maior que 10 μm | 8,0 mm |

Figura 3.13 Valor do *Cutoff* em função da rugosidade média de acordo com a norma DIN 4766 [18].

3.3. Análise do desgaste de ferramentas

Para monitorizar o desgaste das ferramentas de corte foi utilizada a lupa digital com ampliação entre 20 e 50x, *Dino-lite Basic*, representada na figura 3.14, integrada com o software de aquisição de imagem, *Dino Capture 2.0*.

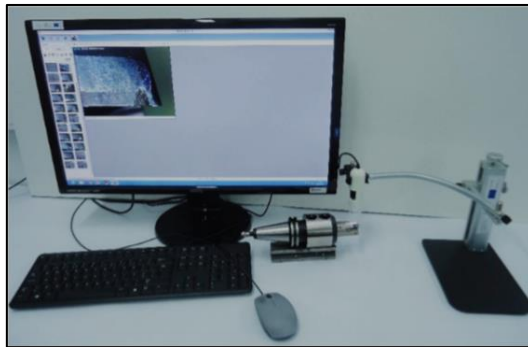


Figura 3.14 Montagem experimental para medição do desgaste da ferramenta.

Com base nas fotografias obtidas e recorrendo ao software *Axio Vision LE*, foi comparado o desgaste das ferramentas de corte.

3.4. Análise da morfologia das aparas

As aparas recolhidas de fresagem foram observadas usando uma lupa *ZEISS Stemi 2000 – C* (figura 3.15a) e fotografadas recorrendo a uma máquina fotográfica digital da marca *Canon*, modelo *PowerShot G5* (figura 3.15b). Por outro lado, devido ao seu tamanho, as aparas de torneamento foram observadas a olho nu e fotografadas recorrendo à mesma máquina fotográfica utilizada no registo fotográfico das aparas de fresagem. A figura 3.15c mostra a forma como a máquina fotográfica foi disposta para o registo fotográfico das aparas de torneamento.

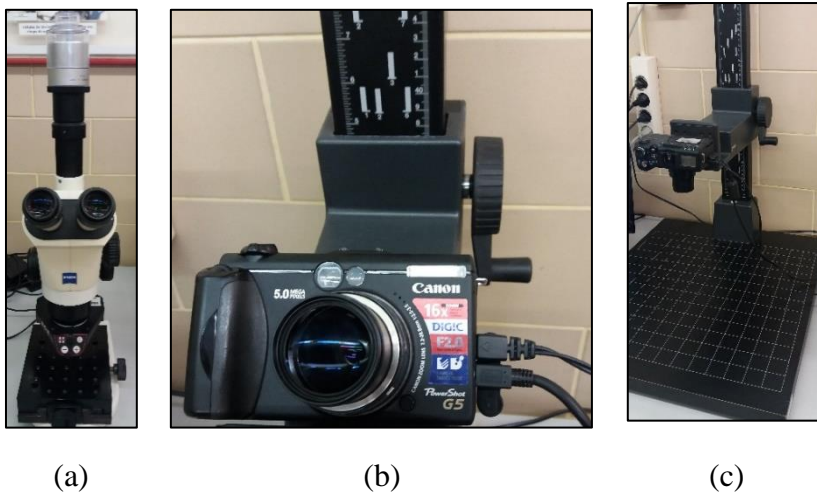


Figura 3.15 Lupa (a), máquina fotográfica digital (b) e disposição da máquina aquando do registo fotográfico das aparas de torneamento (c).

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Caracterização dos materiais a ensaiar

Na figura 4.1 mostram-se micrografias dos materiais a ensaiar: as ligas AA 5083 e AA 6082. A figura permite concluir que a liga AA 5083 apresenta menor tamanho de grão do que a liga AA 6082. Em nenhuma das micrografias se podem observar macro precipitados ou outro tipo de inclusões não metálicas passíveis de danificarem a ferramenta durante as operações de corte.

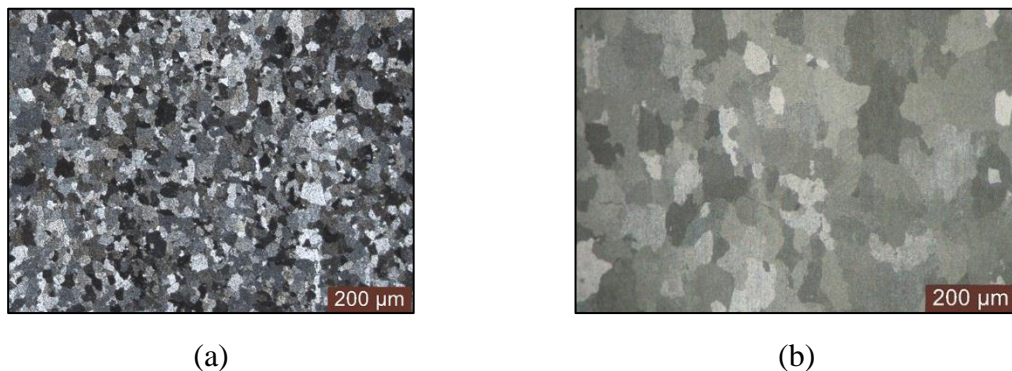


Figura 4.1 Micrografia com luz polarizada da microestrutura de AA 5083 – H 111 (a) e micrografia com luz polarizada da microestrutura de AA 6082 – T6 (b).

Na figura 4.2 comparam-se agora as curvas tensão-deformação em tração das duas ligas, quando submetidas a condições de solicitação quase – estáticas. As curvas na figura permitem concluir que a liga AA 5083, bastante encruável, apresenta uma tensão limite de elasticidade muito inferior à da liga AA 6082, mas tensão na carga máxima bastante superior. A liga AA 5083 apresenta ainda valores de deformação até à carga máxima bastante superiores aos da liga AA 6082 e um serrilhado característico do efeito de *Portevin - Le Chatelier*. Este efeito é usual nas ligas endurecidas em solução sólida, como é o caso da liga AA 5083.

Com base nas curvas tensão – deformação da figura 4.2 foi estimado, para cada material, o aumento de temperatura (ΔT) associado à deformação plástica em tração até à carga máxima, utilizando a equação

$$\Delta T = \frac{0,9}{\rho * C_p} \int_0^\epsilon \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}. \quad (4.1)$$

em que σ é a tensão, ϵ é a deformação, C_p é o calor específico e ρ é a densidade do material. Foram calculados valores de ΔT iguais a 26 e 11 °C para as ligas AA 5083 e AA 6082, respetivamente. Estes resultados mostram que a geração de calor adiabático em deformação plástica é superior para a liga AA 5083, a qual apresenta valores elevados de deformação plástica até à carga máxima.

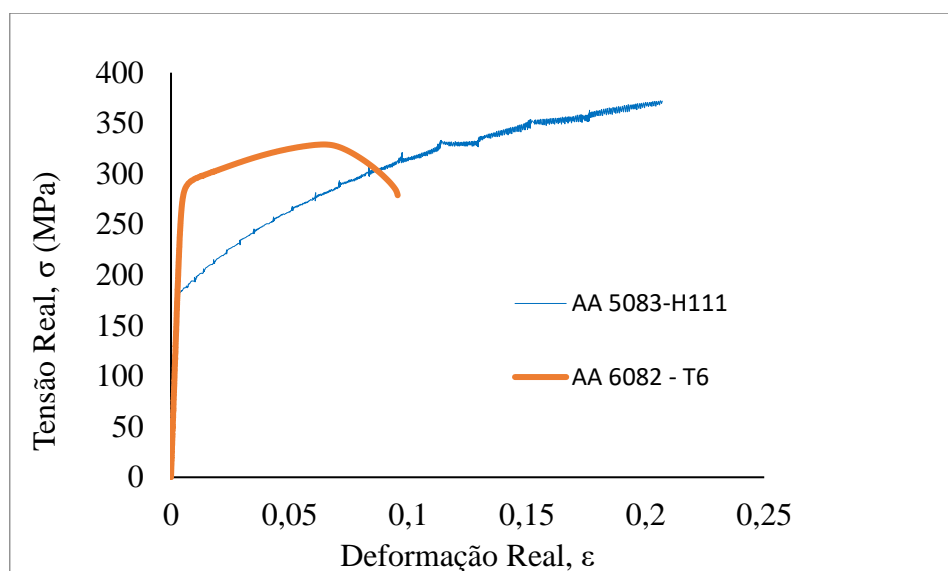


Figura 4.2 Curvas tensão-deformação em tração em condições de solitação quase – estática à temperatura ambiente

De modo a melhor entender as diferenças de propriedades mecânicas entre as duas ligas, na figura 4.3 comparam-se as tensões limite de elasticidade e a taxa de encruamento, obtidas para as duas ligas com base nas curvas da figura 4.2. A taxa de encruamento foi calculada dividindo, para cada liga, a tensão na carga máxima pela tensão limite de elasticidade. Na figura comparam-se também as durezas médias das duas ligas. É possível concluir que apesar de a liga AA 6082 apresentar dureza e tensão limite de elasticidade muito superiores às da liga AA 5083, apresenta uma taxa de encruamento muito inferior. A elevada taxa de encruamento da liga AA 5083 é a responsável pelos elevados

valores de deformação plástica que este material suporta até à rotura. No entanto, o forte encruamento apresentado pela liga requer um aumento contínuo da carga aplicada para a continuação da deformação plástica. Contrariamente à liga AA 5083, a liga AA 6082, com uma taxa de encruamento próxima da unidade, apresenta um comportamento quase perfeitamente plástico, deformando a tensão aproximadamente constante. Sendo assim, nas operações de corte por arranque de apara, em que a ferramenta aplica um esforço de corte constante, a liga AA 6082 será aquela que apresentará maiores valores de deformação durante a formação da apara.

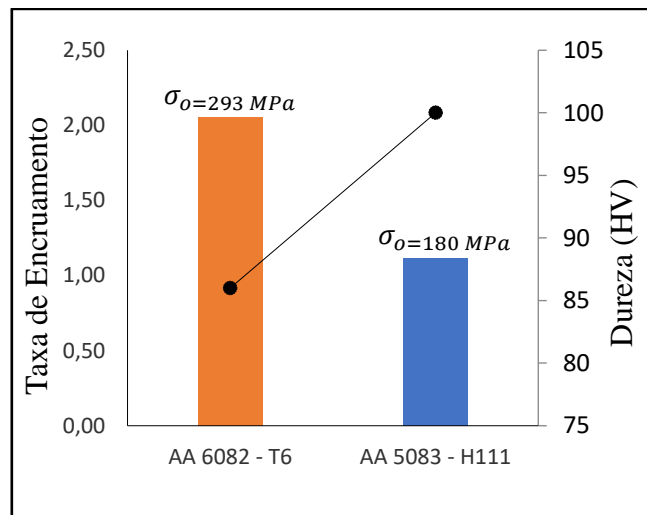


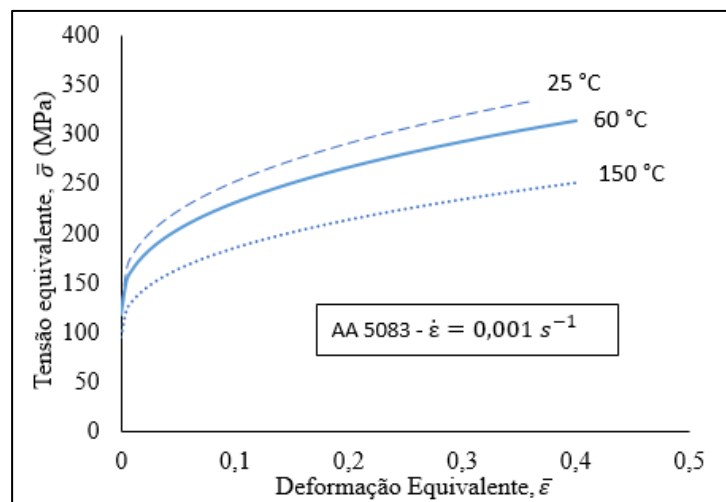
Figura 4.3 Propriedades mecânicas das ligas à temperatura ambiente.

O comportamento mecânico das duas ligas quando submetidas a condições de solitação dinâmicas e a temperaturas superiores à temperatura ambiente foi analisado traçando curvas tensão - deformação teóricas com base na lei de Johnson – Cook (eq.2.1). Os parâmetros utilizados no cálculo das curvas teóricas, obtidos com base na literatura [11, 19, 20], são os apresentados na tabela 4.1. Na figura 4.4a e 4.4b, mostram-se as curvas tensão - deformação a 25, 60 e 150 ° C para a liga AA 5083 e AA 6082, respetivamente. Para o cálculo das curvas assumiram-se condições de solitação quase – estáticas, isto é, $\dot{\epsilon}$ constante e igual a $0,001s^{-1}$. A figura permite observar uma diminuição da resistência mecânica com o aumento da temperatura para as duas ligas. Esta diminuição é mais acentuada a 150° C do que a 60° C, sendo que para esta última temperatura a tensão limite de elasticidade é semelhante à corresponde ao comportamento das duas ligas à temperatura ambiente. A figura permite ainda observar que, na gama de temperaturas considerada para o

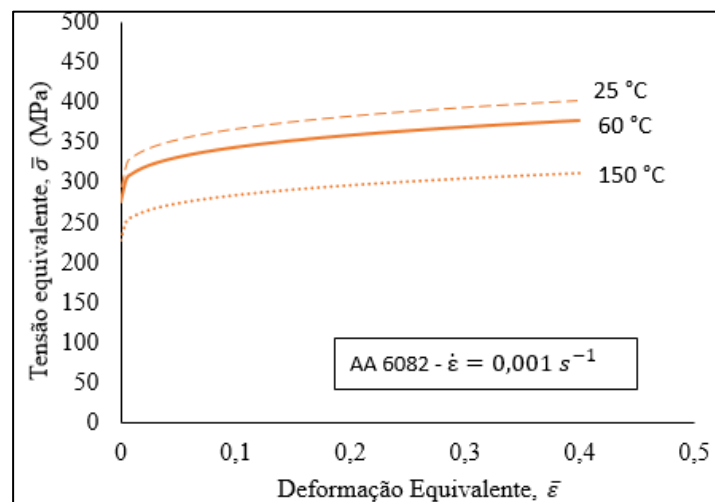
cálculo das curvas, a liga AA 5083 apresenta encruamento, independentemente da temperatura, e a liga AA 6082 apresenta um comportamento perfeitamente plástico.

Tabela 4.1 Constantes da equação de Johnson – Cook.

| Liga | A (MPa) | σ_c (MPa) | B (MPa) | N | C | M | $\dot{\epsilon}_0$ | T_m (°C) |
|------|---------|------------------|---------|-------|---------|-------|--------------------|------------|
| 5083 | 147 | 147 | 349 | 0,396 | 0,104 | 0,859 | 0,00277 | 591 |
| 6082 | 308 | 308 | 147 | 0,288 | 0,02519 | 1,033 | 0,00419 | 555 |



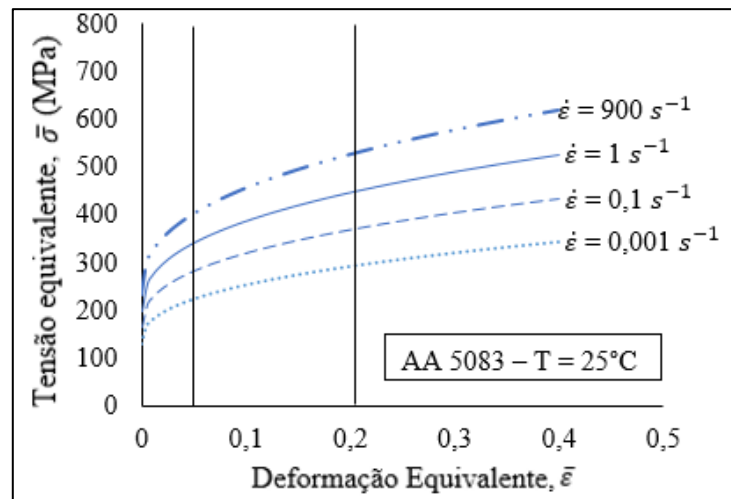
(a)



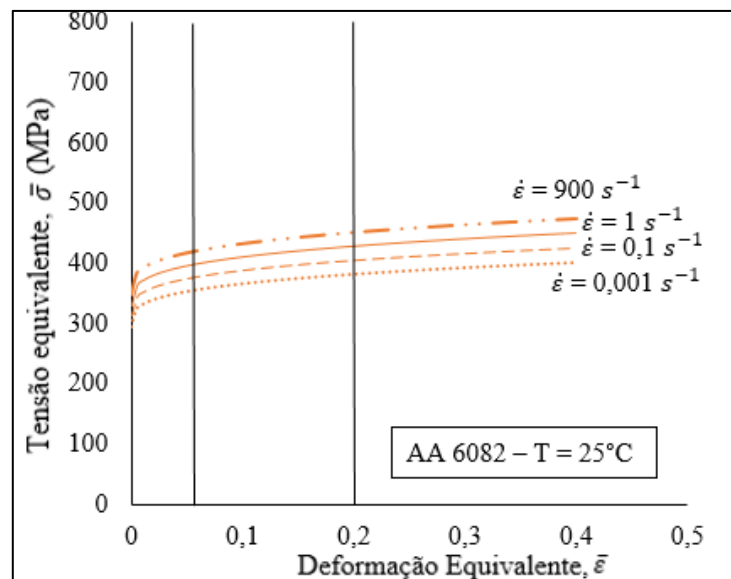
(b)

Figura 4.4 Curvas tensão – deformação a temperatura variável para as ligas AA 5083 – H111 (a) e AA 6082 – T6 (b).

Nas figuras 4.5a e 4.5b comparam-se agora as curvas teóricas tensão – deformação calculadas considerando velocidades de deformação a variar entre $0,001$ e 900 s^{-1} e uma temperatura constante e igual a 25°C . Com base nas curvas apresentadas foram registados os valores da tensão correspondentes a deformações plásticas iguais a $0,05$ e $0,2$.



(a)



(b)

Figura 4.5 Curvas tensão – deformação a temperatura constante e velocidade de deformação variável, para as ligas AA 5083 - H111 (a) e AA 6082 – T6 (b).

Na figura 4.6 traçam-se os valores dessas tensões, normalizados relativamente à tensão limite de elasticidade de cada material base, em função da velocidade de deformação, num gráfico em escala logarítmica. A figura permite concluir que a liga AA 5083 apresenta sensibilidade à velocidade de deformação muito superior à da liga AA 6082, ou seja, para a

liga AA 5083 os valores de tensão necessários para obter uma determinada deformação aumentam com o aumento da velocidade de deformação. A sensibilidade à velocidade de deformação não se altera com a deformação plástica para nenhuma das ligas. No entanto, para a liga AA 5083, a taxa de deformação da liga aumenta com o aumento da velocidade de deformação. O mesmo não se observa para a liga AA 6082, para a qual a tensão normalizada praticamente não evolui, quer em função da deformação plástica, quer da velocidade de deformação. Para velocidades de deformação muito elevadas, a liga AA 5083 apresenta valores de resistência muito superiores aos da liga AA 6082. Sendo assim, é previsível que para velocidades de corte elevadas, o arranque da apana na liga AA 5083 exija maior esforço de corte do que para a liga AA 6082.

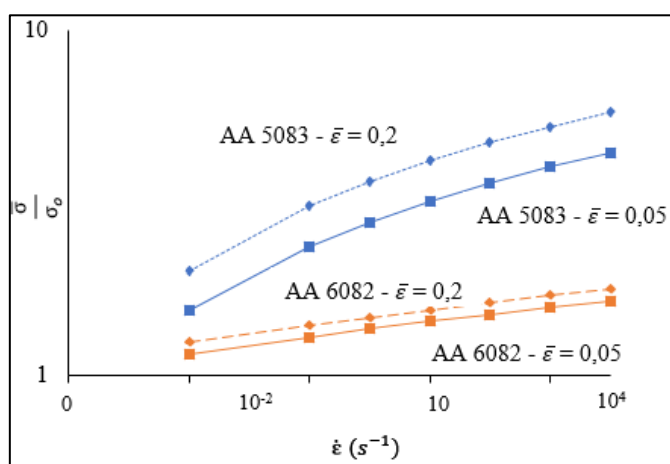


Figura 4.6 Tensão normalizada em função da velocidade de deformação.

4.2. Corte por Torneamento

Tal como explicado no procedimento experimental, nos testes de corte por torneamento, foi registada a evolução da temperatura durante as operações de corte, foram recolhidas apanas para análise morfológica e foi analisada a evolução do desgaste das ferramentas para cada uma das ligas estudadas.

Na figura 4.7 mostram-se, a título de exemplo, os registos da câmara termográfica, para cada uma das ligas, correspondentes às operações de torneamento realizadas com $a_p = 1$ mm e $w = 700$ RPM. Os gráficos mostram que apesar de a temperatura apresentar oscilações significativas para ambas as ligas, as variações de temperatura foram mais acentuadas para a liga AA 5083. Atendendo a estas oscilações, foi determinada uma

temperatura média de corte, para cada liga, correspondente à média dos valores de temperatura na zona sombreada de cada gráfico. Tal como se mostra na figura, foi também registada a temperatura máxima em cada operação de maquinagem.

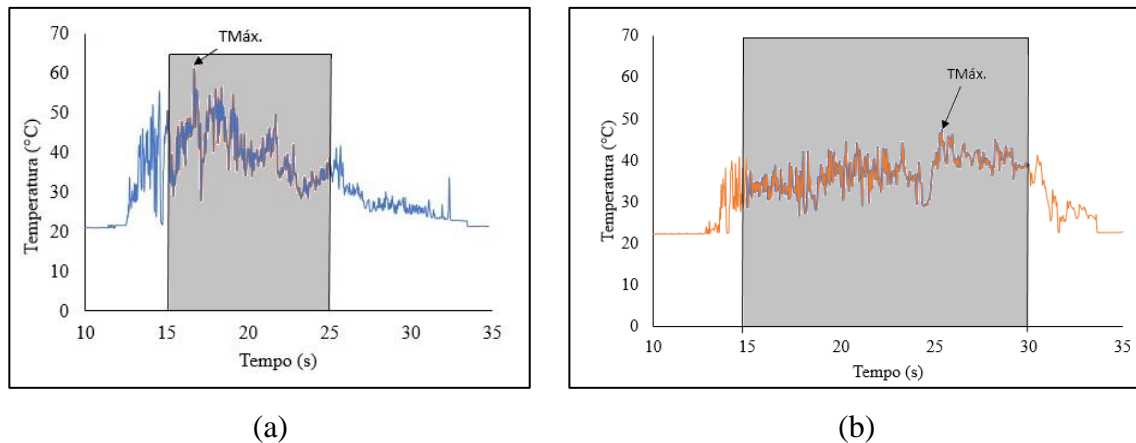
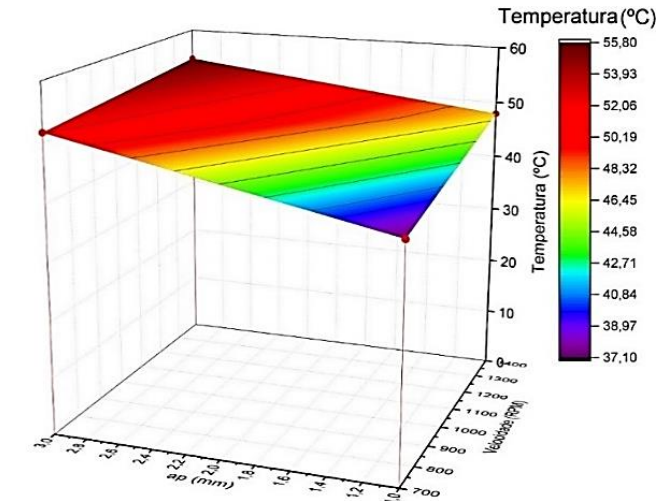


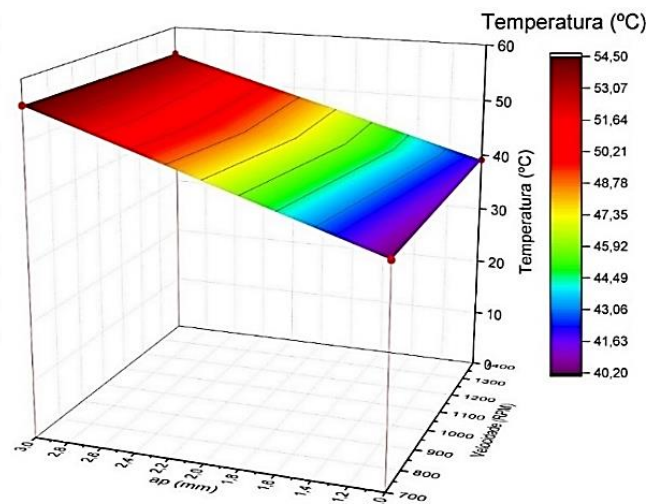
Figura 4.7 Evolução da temperatura de corte por torneamento para as ligas AA 5083 - H111 (a) e AA 6082 - T6 (b).

Nas figuras 4.8a e 4.8 b mostra-se a evolução das temperaturas médias de corte em função da profundidade de corte e da velocidade de rotação para as ligas AA 5083 e AA 6082, respetivamente. A figura permite concluir que a forma como a temperatura média evolui em função dos parâmetros de corte é distinta para as duas ligas. Com efeito, enquanto para a liga AA 5083 se pode observar que a temperatura média de corte aumenta, quer em função do aumento da velocidade de rotação, quer em função do aumento da profundidade de corte, para a liga AA 6082 a temperatura média de corte varia apenas em função da profundidade de corte, sendo independente da velocidade de rotação. As diferenças na evolução da temperatura média de corte em função da velocidade de rotação, para as duas ligas, poderão ser atribuídas à sua diferente sensibilidade à velocidade de deformação, reportada a quando da análise da figura 4.6. Ou seja, a liga AA 5083 apresenta variações da temperatura média de corte em função da velocidade de rotação devido à sua maior sensibilidade à velocidade de deformação, a qual aumentará com a velocidade de rotação da ferramenta. Sendo menos sensível à velocidade de deformação, a liga AA 6082, não apresenta variações da temperatura média de corte com o aumento da velocidade de rotação. O aumento da temperatura média de corte, com o aumento da profundidade de corte, para as

duas ligas, é justificado na literatura [16] pelo aumento da geração de calor por atrito associado ao aumento da largura da apara em contacto com a face de ataque da ferramenta.



(a)

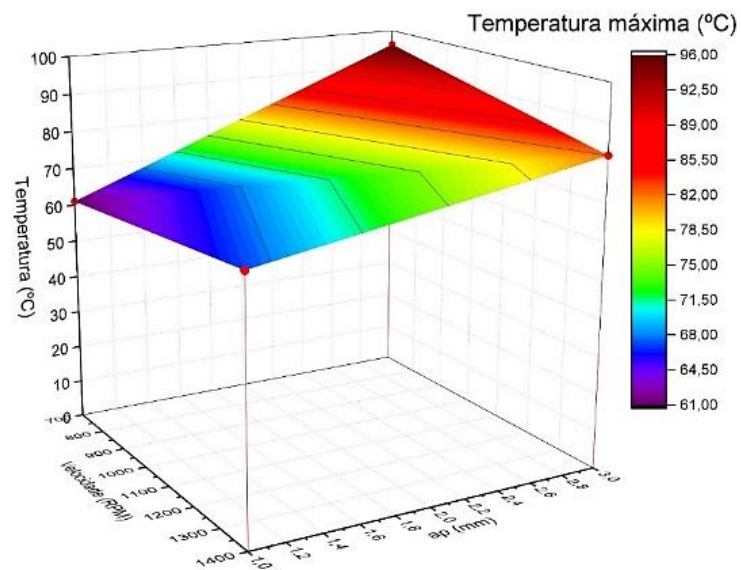


(b)

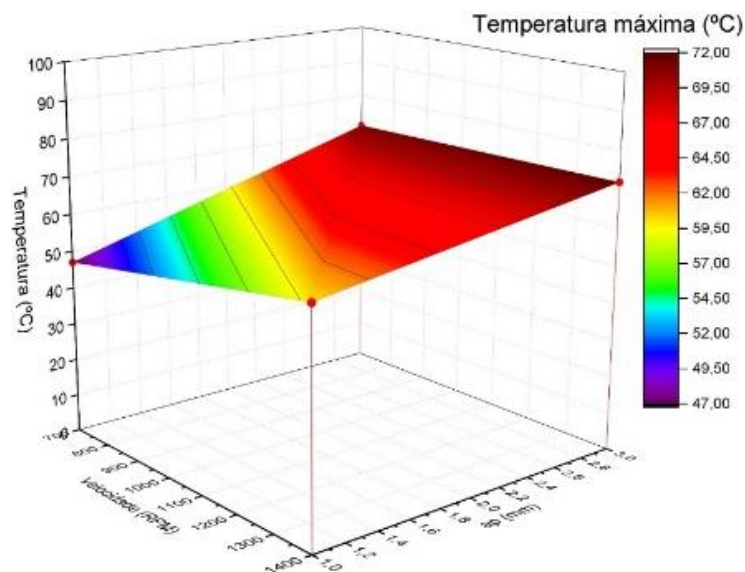
Figura 4.8 Temperatura média de corte em função da profundidade de corte (a_p) e da velocidade de rotação (w): liga AA 5083 – H111 (a) e liga AA 6082 – T6 (b).

A figura 4.8 permite ainda concluir que apesar das diferenças na sensibilidade da temperatura de corte aos parâmetros de corte, a gama de temperaturas médias foi semelhante para as duas ligas, variando entre 40 e 60°C. Apesar disso, e como se mostra na figura 4.9, os valores da temperatura máxima registada durante o corte foram sempre superiores para a liga AA 5083, a qual de acordo com os resultados da caracterização mecânica apresenta encruamento durante a deformação plástica e maior geração de calor adiabático. Os resultados apresentados na figura permitem ainda concluir que a evolução das

temperaturas máximas em função dos parâmetros de processo não segue exatamente a mesma tendência observada para a evolução das temperaturas médias de corte, o que poderá ser atribuído às limitações da técnica de medição de temperatura. É ainda de referir que, atendendo ao facto de as temperaturas registadas não serem muito elevadas, as diferenças das temperaturas médias de corte em função dos parâmetros do processo, poderão ser atribuídas às diferenças no comportamento mecânico das duas ligas à temperatura ambiente ou temperaturas ligeiramente superiores a esta.



(a)



(b)

Figura 4.9 Temperatura máxima de corte em função da profundidade de corte (a_p) e da velocidade de rotação (w): liga AA 5083 – H111 (a) e liga AA 6082 – T6 (b).

Na figura 4.10 compara-se agora a morfologia das aparas obtidas para as duas ligas, nas diferentes condições de corte. A figura permite observar que em todas as situações foi obtida apra contínuas, com morfologia variável em função da profundidade de corte e independente da velocidade de rotação. De notar que, para cada condição de corte, a morfologia das aparas é semelhante para as duas ligas, não permitindo evidenciar qualquer relação entre a morfologia da apra e as diferenças nas propriedades plásticas das duas ligas.

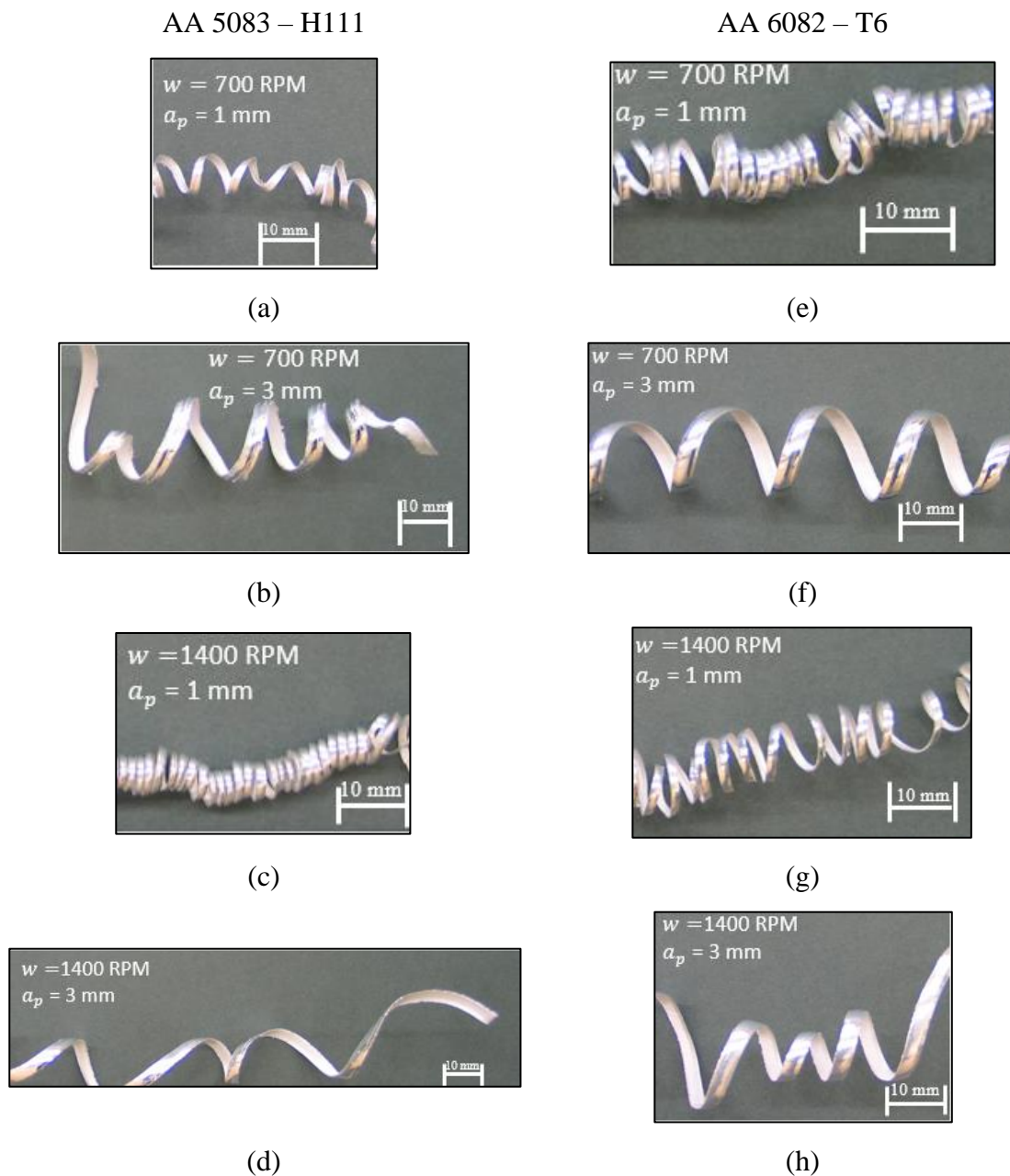


Figura 4.10 Aparas obtidos após o torneamento da liga AA 5083 – H111 ((a),(b),(c),(d)) e da liga AA 6082 – T6 ((e), (f), (g), (h)).

Apesar das semelhanças na morfologia da avara, a análise das superfícies das ferramentas de corte permitiu evidenciar diferenças significativas nos mecanismos de dano a que cada ferramenta esteve sujeita. Mais precisamente, na figura 4.11a, onde se mostra a pastilha de corte usada no torneamento da liga AA 5083, é possível observar não só uma zona de desgaste por abrasão, mas também irregularidades acentuadas no gume de corte que aparentam ser pequenas deteriorações típicas de desgaste por entalhe, semelhantes às apresentadas na figura 2.23c. Já na figura 4.11b, onde se mostra a pastilha de corte usada no torneamento da liga AA 6082, é possível observar apenas zonas de desgaste por abrasão, não se notando qualquer irregularidade no gume de corte. Para esta liga foi, no entanto, observada aderência da avara à pastilha de corte, tal como se mostra na figura 4.11c. Não se observou qualquer avara aderente para a liga AA 5083.

Enquanto as irregularidades no gume de corte, para a ferramenta utilizada no torneamento da liga AA 5083, poderão ser atribuídos ao aumento da resistência do material por encruamento durante o corte, a ocorrência de avara aderente, para a liga AA 6082 poderá ser relacionada com o facto desta liga apresentar um comportamento perfeitamente plástico, ou seja, deformar de forma contínua quando sujeita a esforços de corte constantes.

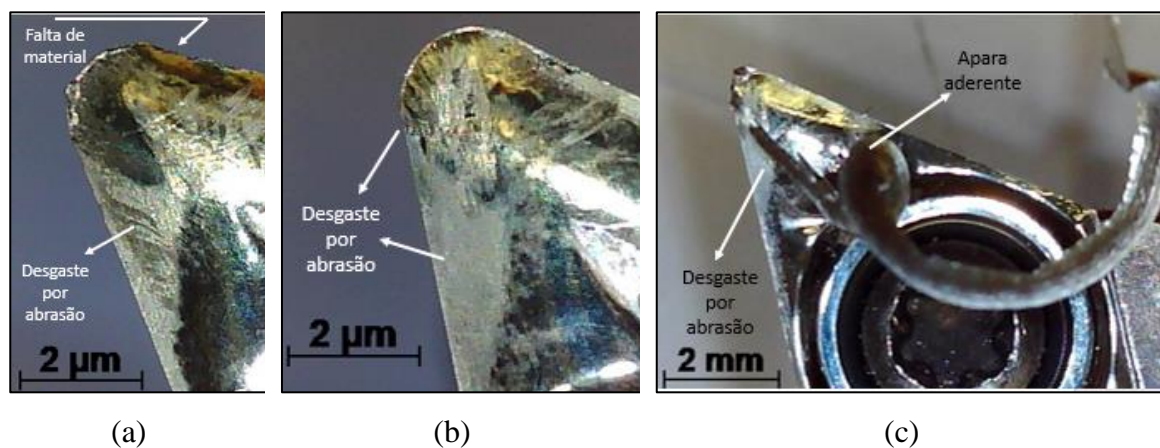


Figura 4.11 a) Pastilhas utilizadas no corte por torneamento das ligas AA 5083 – H111 (a) e AA 6082 – T6 (b) e (c).

Nas figuras 4.12a e 4.12b mostra-se a rugosidade das superfícies obtidas por torneamento em função da profundidade de corte e da velocidade de rotação para as ligas AA 5083 e AA 6082, respetivamente. A figura 4.12a a permite concluir que para a liga AA 5083 a rugosidade diminui com o aumento da velocidade de rotação e aumenta com o aumento da profundidade de corte. Por outro lado, observando a figura 4.12b, conclui-se que

para a liga AA 6082 a rugosidade varia somente com a profundidade de corte, incrementando com o seu aumento. A análise comparativa das duas ligas permite ainda constatar que os valores de rugosidade superficial são superiores para a liga AA 5083 – H111, facto que se pode atribuir à detioração do gume de corte da ferramenta usada na maquinagem desta liga. Para finalizar, é importante realçar que todos os valores de rugosidade registados se encontram de acordo com os estabelecidos pela norma DIN 4766 [18].

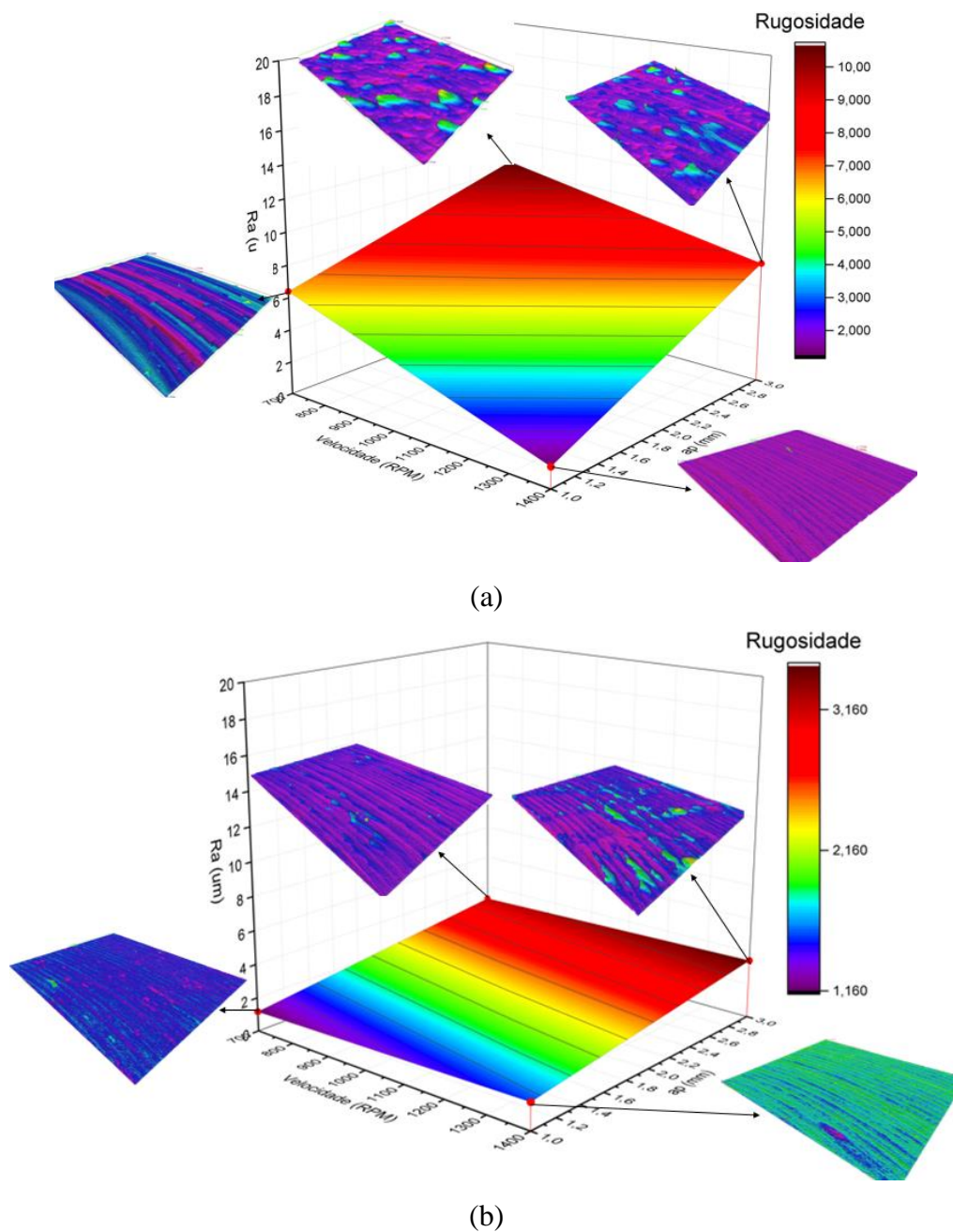


Figura 4.12 Rugosidade média das superfícies torneadas da liga AA 5083 - H111 (a) e da liga AA 6082 – T6 (b).

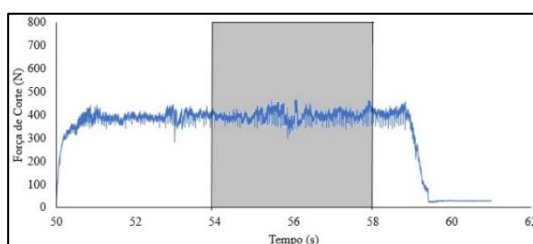
Os resultados obtidos neste subcapítulo podem ser justificados com base nas diferenças no comportamento mecânico das duas ligas à temperatura ambiente, uma vez que as temperaturas médias de corte nunca excederam 60°C, e ainda, pelo facto da geração de calor durante o processo de corte ser governada pela fricção entre a apara e a ferramenta e pela deformação plástica. No caso da liga AA 6082, a contribuição da fricção para a geração de calor terá sido preponderante pois a temperatura média de corte depende fortemente da profundidade de corte e é independente da velocidade de rotação. A acumulação de material, fortemente deformado, na face de ataque, terá contribuído também para o aumento do atrito na interface de contacto ferramenta-apara e para a formação da apara aderente observada na pastilha de corte. No caso da liga AA 5083, a contribuição da deformação plástica para a geração de calor terá sido preponderante. Esta é a explicação para o facto de a temperatura média de corte variar quer em função da profundidade de corte, quer em função da velocidade de rotação da ferramenta. A elevada sensibilidade deste material à velocidade de deformação contribuirá para aumentar o calor adiabático, relativamente à liga AA 6082, resultando em temperaturas máximas superiores, e ainda, para o endurecimento do material da apara, sob deformação plástica. O endurecimento da apara justifica também a deterioração do gume de corte em contacto com a zona de deformação primária.

O facto de a temperatura média de corte ser semelhante para as duas ligas demonstra que as componentes de deformação plástica e fricção se compensam. Do mesmo modo, o valor reduzido das temperaturas médias de corte pode ser explicado pelo pequeno volume de material a ser deformado, pela área extremamente reduzida da interface de contacto ferramenta/apara, e ainda, pelo facto de as ligas de alumínio apresentarem elevada condutividade térmica, o que facilita a dissipação do calor gerado durante o corte. Os resultados obtidos indicam ainda que a propensão dos materiais a formarem apara aderente durante as operações de corte por arranque de apara não pode ser avaliada com base em propriedades como a dureza ou a tensão limite de elasticidade, mas sim com base em grandezas como a taxa de encruamento, que reflete as propriedades plásticas dos materiais.

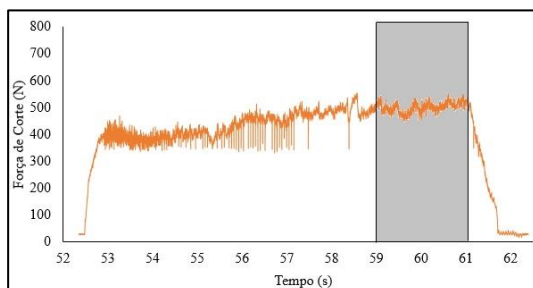
4.3. Corte por furação

Tal como explicado no procedimento experimental, nos testes de corte por furação, foi registada a evolução da força de corte durante a furação e foram analisadas as superfícies das ferramentas utilizadas para cada uma das ligas.

Nas figuras 4.13a e 4.13b mostram-se, a título de exemplo, os registos da evolução da força de corte durante a furação para as ligas AA 5083 e AA 6082, respetivamente. Estes resultados referem-se a operações de furação realizadas com uma velocidade de rotação igual a 1120 RPM e avanço por rotação igual a 0,1 mm/rot. A análise dos gráficos permite constatar que a evolução da força ao longo do tempo é semelhante para as duas ligas. No início do processo, durante um período relativamente curto podem observar-se valores de força muito variáveis, para as duas ligas. A força cresce de seguida, mantendo-se num valor praticamente constante até ao final da operação de corte. No final do corte a força decresce para valores muito reduzidos. Utilizando estes registos foram calculados os valores da força média (F_m), para cada operação de corte, utilizando os valores de força na zona sombreada dos gráficos. Os valores de força muito variáveis registados no início e no final da medição, foram atribuídos ao ruído do sensor, e, por isso, foram excluídos do cálculo da força média.



(a)



(b)

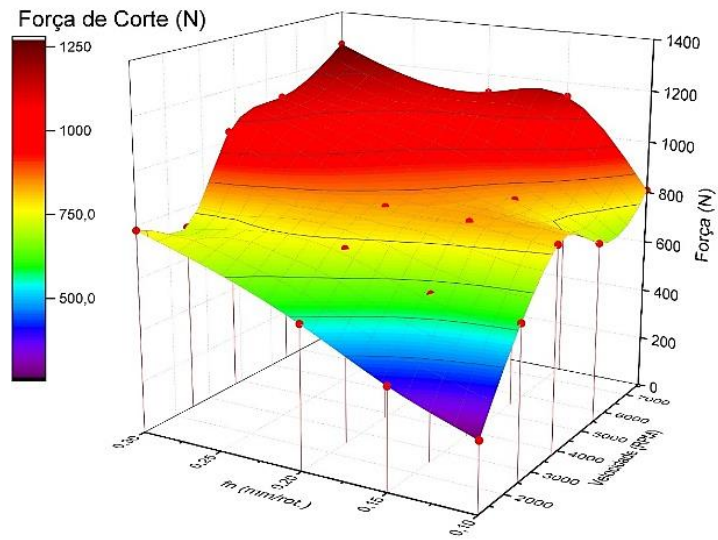
Figura 4.13 Registo das forças de corte na furação. a) Liga AA 5083 - H111 e b) Liga AA 6082 - T6.

Nas figuras 4.14a e 4.14b mostra-se a evolução da força média de corte em função dos parâmetros de corte para as ligas AA 5083 e AA 6082, respetivamente. Os gráficos permitem observar que, independentemente da liga, as forças de corte mais elevadas foram registadas quando se utilizaram os valores mais elevados de avanço por rotação. No entanto, enquanto para a liga AA 5083 os valores máximos da força foram registados quando se utilizaram as velocidades de rotação mais elevadas, para a liga AA 6082 os valores de força mais elevados foram registados quando se utilizaram os valores de velocidade de rotação mais baixos. De modo a melhor aferir as diferenças de comportamento entre as duas ligas, foi calculado o quociente das forças médias (Q_{F_m}) de corte das ligas AA 5083 e AA 6082, de acordo com a relação:

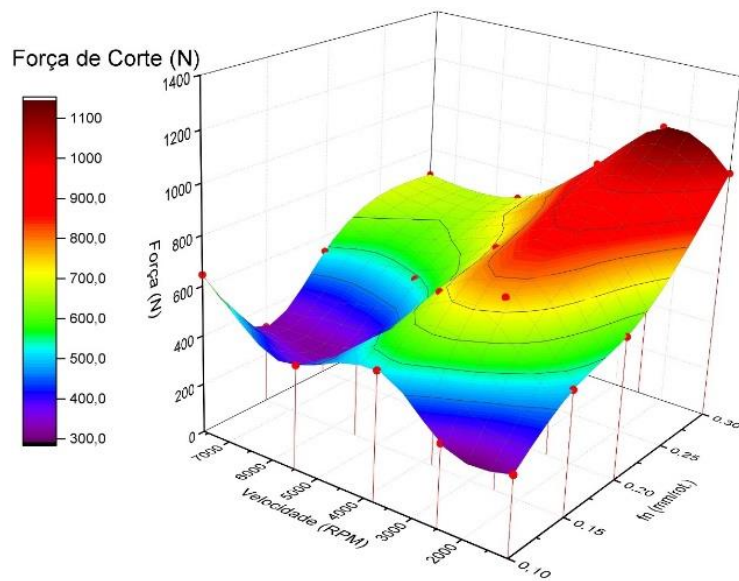
$$Q_{F_m} = \frac{F_m^{5083}}{F_m^{6082}} \quad (4.2)$$

Na figura 4.15 mostram-se os valores de Q_{F_m} para as operações de furação realizadas combinando valores extremos de velocidade de rotação ($w = 1120$ e 7600 RPM) e de avanço ($f_n = 0,1$ e $0,3$ mm/rot.). A figura permite concluir que enquanto nas operações onde foi usada velocidade de rotação igual a 1120 RPM, as forças medias de corte foram superiores para a liga AA 6082, nas operações onde foi usada velocidade de rotação igual a 7600 RPM, as forças médias de corte foram superiores para a liga AA 5083. Estes resultados são independentes do avanço da ferramenta por rotação.

O aumento brusco das forças médias de corte, para a liga AA 5083, quando foram utilizadas as velocidades de rotação mais elevadas, pode ser associado à elevada sensibilidade deste material à velocidade de deformação. É de recordar que também nas operações de torneamento se observou uma forte variação das temperaturas de corte em função da velocidade de rotação, para esta liga. O gráfico da figura 4.14a também mostra que enquanto para velocidades de rotação reduzidas a força média de corte cresce de forma significativa com o aumento do avanço por rotação, para velocidades de rotação elevadas a força média de corte mantém-se em valores elevados independentemente do avanço por rotação.



(a)



(b)

Figura 4.14 Força média de corte em função da velocidade de rotação e do avanço por rotação. a) Liga AA 5083 – H111 e b) Liga AA 6082 – T6.

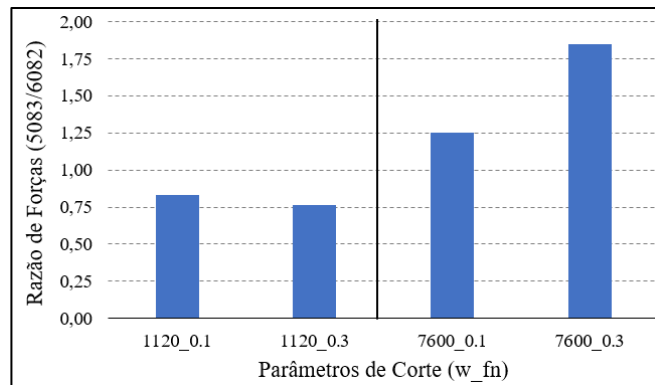


Figura 4.15 Razão de forças de corte na furação.

A figura 4.14b permite concluir que, contrariamente ao observado para a liga AA 5083, os valores da força média de corte para a liga AA 6082, não variam de forma acentuada com o avanço por rotação da ferramenta, exceto quando foram utilizadas as velocidades de rotação mais reduzidas. A análise da ferramenta de corte utilizada na furação desta liga permitiu observar a adesão do material à ferramenta durante a operação de corte. Isto é ilustrado na figura 4.16a, onde se mostra a ferramenta inutilizada pela adesão da liga AA 6082. Na figura 4.16b mostram-se também irregularidades no gume de corte de uma outra ferramenta utilizada na furação desta liga. Contrariamente a isto, para a liga AA 5083, não foi detetada qualquer adesão de material ou irregularidades no gume de corte após terem sido finalizados todos os testes de maquinagem. Estes resultados confirmam que a liga AA 6082 apresenta menor maquinabilidade do que a liga AA 5083, pois apesar de requerer esforços médios de corte inferiores, conduz a uma maior deterioração da ferramenta. Para esta liga, o dano da ferramenta ocorrerá preferencialmente para velocidades de rotação reduzidas, para as quais foram registados valores maiores do esforço de corte.

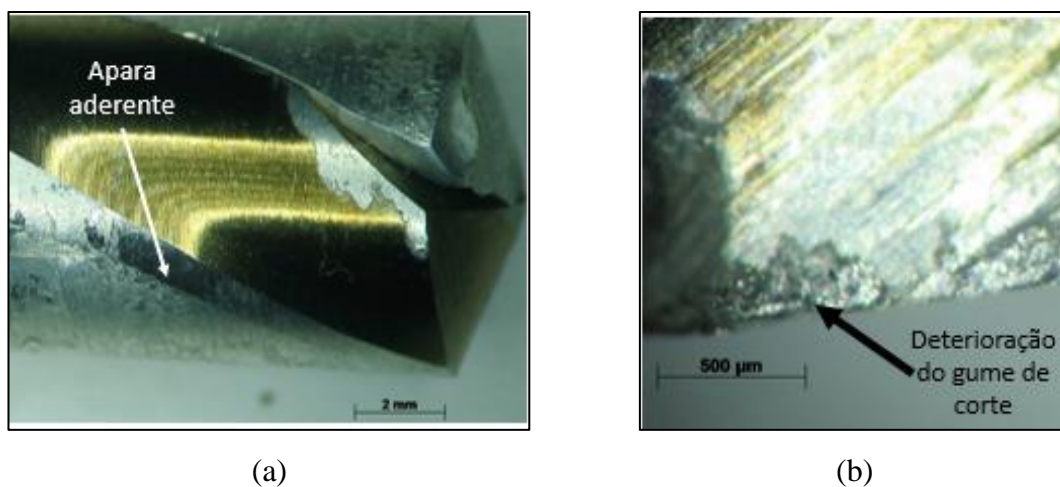


Figura 4.16 Ferramentas de corte usadas para furar a liga AA 6082 - T6. Furações até formação da apara aderente (a) e restantes(b).

4.4. Corte por fresagem

Tal como explicado no procedimento experimental, nos testes de corte por fresagem, foi recolhida a apara, foram analisadas as superfícies maquinadas e ainda o estado de degradação das pastilhas de corte.

Na figura 4.17 comparam-se as aparas recolhidas para as operações de fresagem realizadas com velocidade de corte de 20 e 1800 m/min. A figura permite observar que, tal como seria de esperar devido às características do processo, todas as aparas recolhidas são descontínuas. Apesar de se poderem observar diferenças significativas de morfologia entre as aparas obtidas para as duas velocidades de corte, não se observam diferenças significativas entre as aparas das duas ligas, quando obtidas nas mesmas condições de corte. Contrariamente ao que foi observado aquando da análise das ferramentas de torneamento e furação, a análise das pastilhas de corte utilizadas na fresagem não permitiu identificar diferenças significativas nos modos de ruína das ferramentas utilizadas para maquinar as ligas AA 5083 e AA 6082. Isto é demonstrado na figura 4.18 onde se comparam as ferramentas de corte.

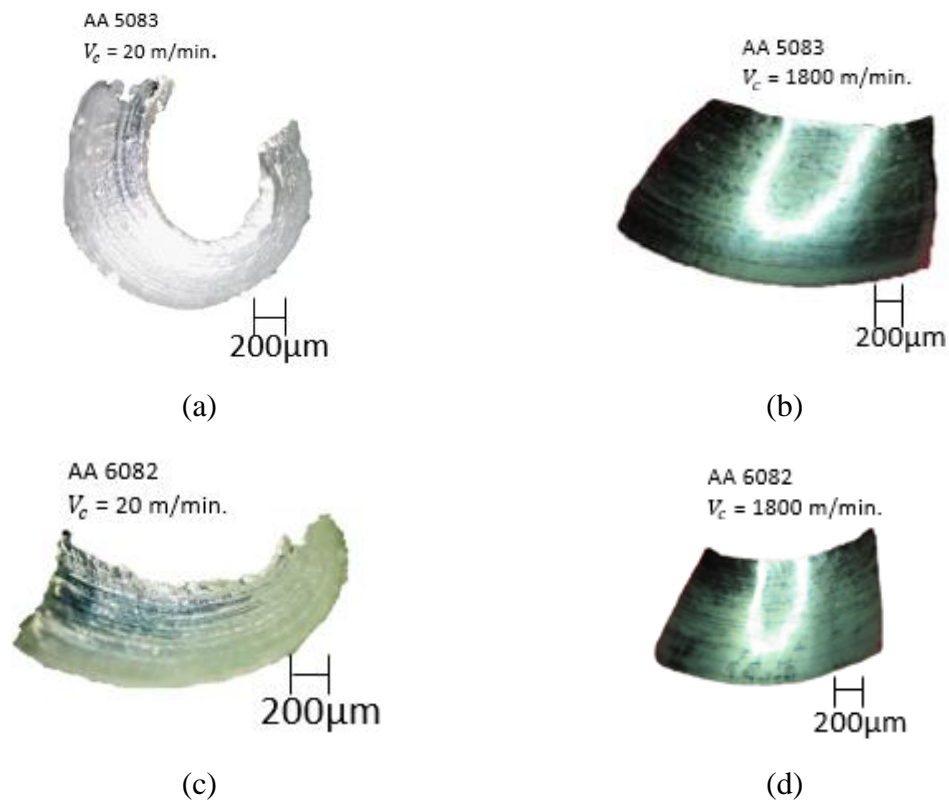


Figura 4.17 Apara formada após fresagem da liga AA 5083 - H111 (a) e (b). Apara formada após fresagem da liga AA 6082- T6 (c) e (d).

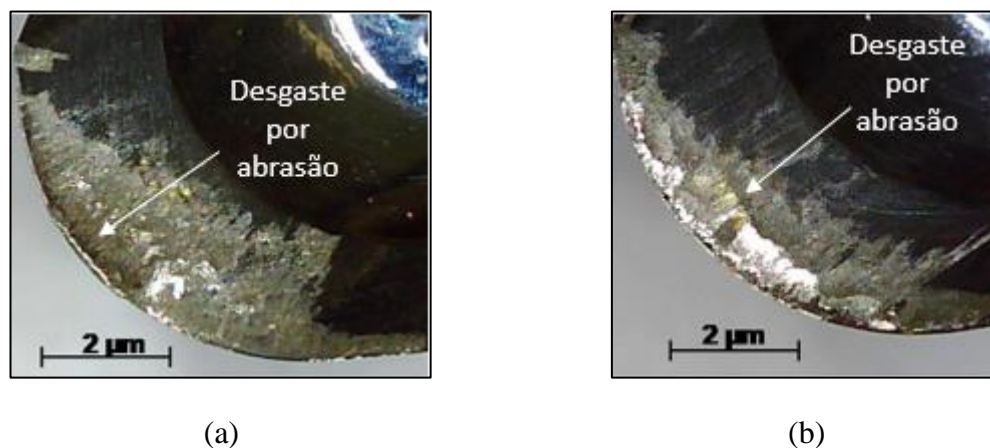


Figura 4.18 Pastilha de corte usada na fresagem da liga AA 5083 – H111 (a) e pastilha de corte usada na fresagem da liga AA 6082 – T6 (b).

Na figura 4.19 mostram-se os resultados da avaliação da rugosidade das superfícies maquinadas. Como se pode ver, não foram registadas diferenças significativas nas rugosidades das superfícies obtidas para as duas ligas, nas diferentes condições de corte. Os valores de rugosidade se encontram dentro dos limites de qualidade das superfícies maquinadas por fresagem estabelecidos na norma DIN 4766 [18].

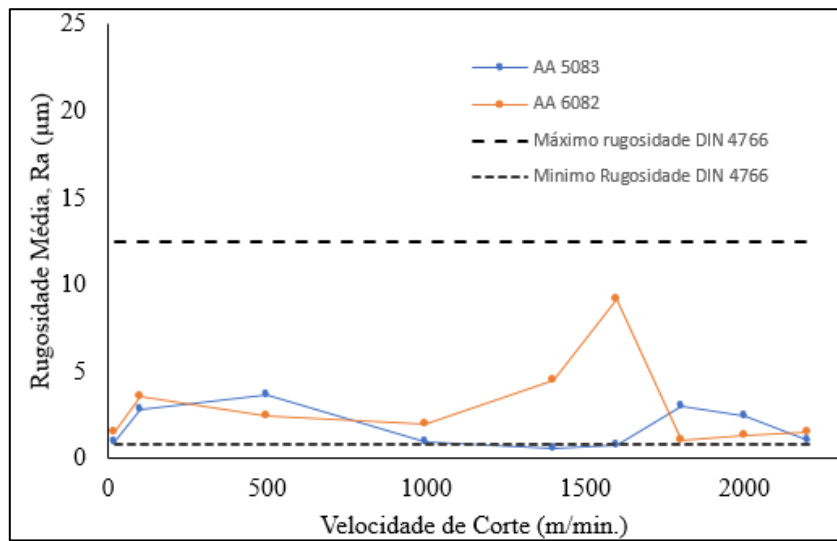


Figura 4.19 Rugosidade Média em função da velocidade de corte e da liga, na fresagem.

A análise das aparas de corte por fresagem, assim como da qualidade das superfícies maquinadas, permite concluir que a influencia das propriedades plásticas das ligas sobre a sua maquinabilidade é mais acentuada para operações de corte por arranque de apara onde o contacto entre a ferramenta e o material é permanente e existe a possibilidade de formação de apara continua.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

A investigação desenvolvida na presente dissertação de mestrado teve como objetivo analisar a influência das propriedades plásticas de duas ligas de alumínio na sua maquinabilidade. Com este objetivo foram testados vários parâmetros e métodos de corte por arranque de apra, tendo sido possível concluir que:

- A liga AA 5083, apesar de apresentar tensão limite de elasticidade inferior à liga AA 6082, apresenta uma taxa de encruamento bastante superior, sendo necessário um aumento contínuo da carga aplicada para haver um aumento na deformação plástica. Por outro lado, a liga AA 6082 apresenta uma taxa de encruamento próxima da unidade e um comportamento quase perfeitamente plástico, deformando a tensão aproximadamente constante.

- Para temperaturas de 25, 60 e 150 ° C e a uma taxa de deformação constante, a liga AA 5083 apresenta encruamento, independentemente da temperatura, contrariamente à liga AA 6082 que apresenta comportamento perfeitamente plástico;

- O registo termográfico aquando do torneamento das ligas permitiu concluir que a temperatura média de corte é superior para a liga AA 5083 e que, para esta liga, a temperatura aumenta tanto com aumento da profundidade de corte, como com o aumento da velocidade de rotação. Por outro lado, a temperatura média de corte, para a liga AA 6082, só aumenta com o aumento da profundidade de corte;

- A liga AA 6082 apresenta tendência a formar apra aderente à superfície das ferramentas, contrariamente à liga AA 5083;

- O registo das forças de corte aquando da furação das ligas permitiu concluir que a liga AA 6082 apresenta valores mais elevados de força quando se utilizam valores mais baixos de velocidade de rotação, contrariamente à liga AA 5083 que, devido à sua elevada taxa de encruamento, apresenta maiores valores de força de corte para maiores velocidades de rotação da ferramenta;

- Por fim, conclui-se que em fresagem, por ser um processo de corte onde não existe contacto permanente entre a ferramenta e o material, as propriedades plásticas das ligas não influenciam a sua maquinabilidade.

5.2. Trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, seria interessante:

- Investigar as variações das forças de corte, para a liga AA 6082 – T6, utilizando os mesmos valores de velocidade de rotação, mas uma gama de avanços por rotação entre 0,10 e 0,15 mm/rot;

- Estudar as forças de corte no torneamento, na tentativa de uma melhor explicação para as diferenças no desgaste das ferramentas;

- Realizar o estudo das forças de corte na fresagem de modo a melhor apurar a existência de alguma influencia das propriedades plásticas dos materiais na maquinabilidade em fresagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. Mills, *Machinability of Engineering Materials*. Springer Netherlands, 2012.
- [2] CENTIMFE, “Materiais para moldes,” in *Manual do projectista para moldes de injeção de plástico*, 2003.
- [3] V. A. M. Cristino, P. A. R. Rosa, and P. A. F. Martins, “AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONDIÇÃO TRIBOLÓGICA NO CORTE ORTOGONAL,” vol. 17, pp. 57–63, 2009.
- [4] J. P. Davim, *Machining: Fundamentals and recent advances*. 2008.
- [5] Á. R. Machado, A. M. Abrão, R. T. Coelho, and M. B. da Silva, “Teoria da usinagem dos materiais,” *São Paulo Blucher*, vol. 2, 2009.
- [6] A. E. Diniz, F. C. Marcondes, and N. L. Coppini, “Tecnologia da usinagem dos metais,” *Ed. Artliber, 4ª ed., São Paulo, Bras.*, 2003.
- [7] J. T. Black and Asm, *ASM Handbook Vol. 16: Machining*. 1989.
- [8] V. Songmene, R. Khettabi, I. Zaghbani, J. Kouam, and A. Djebara, “Machining and machinability of aluminum alloys,” in *aluminium alloys, theory and applications*, InTech, 2011.
- [9] B. Wang, Z. Liu, G. Su, Q. Song, and X. Ai, “Investigations of critical cutting speed and ductile-to-brittle transition mechanism for workpiece material in ultra-high speed machining,” *Int. J. Mech. Sci.*, 2015.
- [10] C. SANDVIK, “Manual técnico de usinagem,” *São Paulo*, 2012.
- [11] J. Brown, *Advanced Machining Technology Handbook*. McGraw-Hill, 1998.
- [12] B. Balout, V. Songmene, and J. Masounave, “Usinabilité des alliages de magnésium et d’aluminium Partie I: Forces de coupe,” in *Proc. of the International Symposium on Enabling Technologies for Light Metal and Composite Materials and Their End-Products, 41th Conf. of Metallurgists of CIM*, 2002, pp. 223–242.
- [13] R. Winzer and a. Glinicka, “The static and dynamic compressive behaviour of selected aluminium alloys,” *Eng. Trans.*, vol. 59, no. 2, pp. 85–100, 2011.
- [14] N. A. Abukhshim, P. T. Mativenga, and M. A. Sheikh, “Heat generation and

- temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2006.
- [15] S. Sikder, “Analytical model for force prediction when machining metal matrix composites.” 2010.
- [16] L. B. Abhang and M. Hameedullah, “The Measurement of chip-tool interface Temperature in the Turning of steel,” *Int. J. Comput. Commun. Inf. Syst.*, 2010.
- [17] A. J. Souza, “ENG 03343-Processos de Fabricação por Usinagem, Parte 1- Fundamentos da Usinagem dos Materiais.” Rio Grande do Sul: DEM-UFRGS, 2011.
- [18] D. J. Whitehouse, *Handbook of Surface Metrology*. Taylor & Francis, 1994.
- [19] T. Børvik, M. J. Forrestal, O. S. Hopperstad, T. L. Warren, and M. Langseth, “Perforation of AA5083-H116 aluminium plates with conical-nose steel projectiles - Calculations,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 36, no. 3, pp. 426–437, 2009.
- [20] J. Zhou, M. Hayden, and X. Gao, “An investigation of the strain rate and temperature effects on the plastic flow stress and ductile failure strain of aluminum alloys 5083-H116, 6082-T6 and a 5183 weld metal,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, 2013.

