

**RICARDO AUGUSTO GONÇALVES**

**INFLUÊNCIA DO TEOR DE COBRE NA  
USINABILIDADE DA LIGA DE ALUMÍNIO 6351**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2016**

**RICARDO AUGUSTO GONÇALVES**

**INFLUÊNCIA DO TEOR DE COBRE NA USINABILIDADE DA  
LIGA DE ALUMÍNIO 6351**

**Tese** apresentada ao Programa de  
Pós-graduação em Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal de Uberlândia, como parte  
dos requisitos para a obtenção do título de  
**DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Materiais e Processos de  
Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

**UBERLÂNDIA – MG**

**2016**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

G635i Gonçalves, Ricardo Augusto, 1986  
2016 Influência do teor de cobre na usinabilidade da liga de alumínio  
6351 / Ricardo Augusto Gonçalves. - 2016.  
214 f. : il.

Orientador: Márcio Bacci da Silva.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Metais - Usinabilidade - Teses. 3.  
Cobre - Ligas - Teses. 4. Ligas de alumínio - Teses. I. Silva, Márcio  
Bacci da. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

---

CDU: 621

Folha de Aprovação

*“A usinabilidade de uma liga é semelhante à palatabilidade do vinho – facilmente apreciada, mas não prontamente medida em termos quantitativos.”*

*(traduzido)*

*Edward M. Trent*

*Paul K. Wright*

*À mulher da minha vida, minha esposa  
Daryane, pelo amor incondicional e  
incentivo em todos os momentos. Aos  
meus pais José Ricardo e Eudulemia por  
não medirem esforços para que eu  
pudesse conquistar meus objetivos. Ao  
meu irmão Reinaldo pela parceria e  
companheirismo.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por me guiar e dar forças para a realização este trabalho.

À minha esposa Daryane Cotrim Espíndola pelo apoio, carinho e incentivo durante todo o período de realização do trabalho.

Aos meus pais José Ricardo e Eudulemia Gonçalves e ao meu irmão Reinaldo Gonçalves por sempre acreditarem e apoiarem minha qualificação profissional.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar esta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo apoio financeiro.

À Companhia Brasileira do Alumínio (CBA) pelo fornecimento das ligas de alumínio.

À família de amigos Sr. Aldair e Sra. Vera, Geysa e Vanessa; como também à amiga Michele pela hospitalidade e atenção de sempre.

Aos técnicos Eurípedes Balssanufo Alves, Lázaro Henrique Alves Vieira, Thiago Menezes Prado, Thiago Pereira, Alcione dos Reis e Ângela Maria da Silva Andrade (todos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia) pela disposição e apoio na montagem e realização dos experimentos.

Ao técnico Américo José Avelar, do Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, pela disposição e auxílio.

Aos colegas do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio e contribuição direta no trabalho desenvolvido,

principalmente Prof. Daniel Fernandes, Maksim Ziberov, Prof. Ricardo Moura, Prof. Armando Marques, Prof. Cleudes Guimarães, Prof. Luciano Antônio Fernandes e Guilherme Piau Nigro.

Aos colegas do Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri pelo apoio e contribuição no trabalho desenvolvido, principalmente Prof. Elton Diêgo Bonifácio, Prof. Euler Guimarães Horta, Prof. Gustavo Molina, Prof. Thonson Ferreira Costa, Prof. Victor Augusto Nascimento Magalhães e Ana Clara.

Ao meu orientador Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva por ser a maior fonte de inspiração e por estar sempre à disposição e empenhado para que o trabalho fosse desenvolvido da melhor maneira.

Ao Prof. Dr. Álisson Rocha Machado do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem por ser uma grande fonte de inspiração e estar sempre disposto a ajudar.

Aos Prof. Marcos Antônio de Souza Barrozo e Prof. Dr. Éder Silva Costa da Universidade Federal de Uberlândia pela contribuição direta no trabalho, na realização dos experimentos e análise dos resultados.

Ao meu grande amigo e companheiro Djavan por estar sempre ao meu lado durante a realização deste trabalho.

GONÇALVES, R. A. **Influência do Teor de Cobre na Usinabilidade da Liga de Alumínio 6351.** 2016. 214 p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## Resumo

O objetivo principal deste trabalho é o estudo da influência do teor de cobre na usinabilidade da liga de alumínio 6351. A usinabilidade desta liga foi avaliada a partir dos resultados do torque e força na ferramenta de corte, rugosidade, desvios de forma (cilindricidade e circularidade) e rebarbas dos furos, forma dos cavacos e alterações subsuperficiais da peça durante os processos de furação, alargamento e rosqueamento. As amostras da liga de alumínio 6351 foram produzidas com diferentes teores de cobre (0,07%, 0,23%, 0,94%, 1,43% e 1,93%), e possuem composições químicas dos demais elementos de liga praticamente constantes dentro da faixa recomendada pela Associação do Alumínio para esta liga. As principais propriedades mecânicas das amostras da liga de alumínio 6351 foram obtidas a partir de análises microestruturais e ensaios de microdureza, dureza, tração e impacto. O aumento da quantidade de cobre adicionada à liga de alumínio 6351 resultou em significativos aumentos de microdureza, dureza e limite de resistência à tração; e ao mesmo tempo na diminuição do alongamento percentual após a ruptura. A partir de um planejamento fatorial 2<sup>3</sup>, foi verificado o efeito do teor de cobre e dos parâmetros de corte: velocidade de corte e avanço sobre as respostas de usinabilidade. Além disso, foi desenvolvido um modelo ajustado a fim de otimizar a seleção dos parâmetros de corte do melhor teor de cobre identificado para cada resposta. Os resultados mostraram influência significativa do teor de cobre sobre as respostas de usinabilidade medidas. Menores valores de torque e força de avanço, menores desvios de circularidade e cilindricidade, melhor acabamento superficial, além de menores cavacos e rebarbas foram obtidos a partir do aumento da quantidade de cobre presente na liga de alumínio 6351.

---

*Palavras-chave:* Teor de Cobre. Usinabilidade. Liga de Alumínio 6351. Furação. Alargamento. Rosqueamento

x

GONÇALVES, R. A. **Influence of Copper Content on 6351 Aluminum Alloy Machinability.** 2016. 214 p. Doctorate Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil.

## Abstract

The main purpose of this work is to study the influence of copper content on Al-Si-Mg aluminum alloy (6351) machinability. The machinability was evaluated through cutting tool torque and thrust force measurements, machined surface roughness, roundness, cylindricity and burrs formation, chip form and sub superficial modifications during drilling, reaming and tapping processes. The 6351 aluminum alloy samples were produced with five levels of copper (0.07%, 0.23%, 0.94%, 1.43% and 1.93%) with chemical composition of the other alloying elements practically constant within the recommended range by The Aluminum Association for this alloy. The main mechanical properties of the 6351 aluminum alloy samples were obtained by microstructural analysis and microhardness, hardness, tensile and impact tests. Major amounts of copper resulted in significant increase in microhardness, hardness and ultimate tensile strength of the aluminum alloy, while elongation after fracture decreased. A  $2^3$  factorial design was used to verify the effect of copper content and the cutting parameters, cutting speed and feed rate, in the machinability responses. Furthermore, an adjusted statistical model was developed to optimize the cutting parameters selection of the best copper content for each response. The results showed significant influence of copper content in machinability. Lower values of torque and thrust forces, lower roundness and cylindricity, better surface finish, besides smaller chips and burrs were obtained increasing copper content in Al-Si-Mg aluminum alloy (6351).

---

**Keywords:** *Machinability. Al-Si-Mg alloys. Drilling Process. Reaming Process. Tapping Process.*



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Cadeia produtiva da indústria do alumínio (ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2012) .....	6
Figura 2.2. Relação sucata recuperada e consumo doméstico em 2010 (ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2012) .....	7
Figura 2.3. Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio (ASM INTERNATIONAL, 1993) .....	9
Figura 2.4. Solubilidade sólida em função da temperatura para elementos de liga mais frequentemente adicionados ao alumínio (adaptado de ASM INTERNATIONAL, 1990a) .....	11
Figura 2.5. O efeito do teor de Mg e Si no limite de resistência à tração em ligas Al-Mg-Si (TIRYAKIOGLU; STALEY, 2003) .....	17
Figura 2.6. Dureza Vickers das ligas de alumínio da série 6XXX (GONÇALVES, 2012) .....	18
Figura 2.7. Diagrama tensão x deformação das ligas de alumínio da série 6XXX (GONÇALVES, 2012) .....	19
Figura 2.8. Principais operações de furação (MACHADO et al., 2011) .....	20
Figura 2.9. Direções dos movimentos de corte, avanço e efetivo na furação (MACHADO et al., 2011) .....	21
Figura 2.10. Elementos da cunha cortante e ângulos de uma broca helicoidal (a) superfícies e arestas de corte; (b) $\gamma$ -ângulo de saída, $\beta$ -ângulo de cunha e $\alpha$ -ângulo de folga; (c) $\delta$ -ângulo de hélice e (d) $\sigma$ -ângulo de ponta (modificada de MACHADO et al., 2011; DE SOUZA, 2011) .....	23
Figura 2.11. Classificação das brocas quanto ao ângulo de hélice (modificado de TELECURSO 2000 PROFISSIONALIZANTE, 1997) .....	24
Figura 2.12. Direções das componentes da força de usinagem durante o processo de furação (SCHROETER; STOETERAU; WEINGAERTNER, 2004) .....	26
Figura 2.13. Desgaste em brocas helicoidais (modificado de SCHROETER; STOETERAU; WEINGAERTNER, 2004) .....	28

Figura 2.14. Formação do cavaco na furação com diferentes velocidades de corte atuantes na aresta de corte (SANDVIK, 2013).....	29
Figura 2.15. Formas de cavacos gerados na furação e recomendações quanto à sua forma para melhor eficiência do processo (SANDVIK, 2013).....	30
Figura 2.16. Principais operações de alargamento (MACHADO et al., 2011) .....	32
Figura 2.17. Alargador para máquinas com haste cônica (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010b) .....	33
Figura 2.18. Termos e definições da geometria de um alargador para máquinas (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010b) .....	33
Figura 2.19. Principais operações de rosqueamento interno e externo (MACHADO et al., 2011).....	35
Figura 2.20. Principais etapas do processo de rosqueamento interno com macho de corte (DA MOTA, 2009) .....	36
Figura 2.21. Terminologia dos machos de corte (adaptado de ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010c).....	39
Figura 2.22. Características da parte de corte dos machos: a) machos com canais retos, b) machos com ponta helicoidal e c) machos com canais helicoidais (adaptado de ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010c).....	39
Figura 2.23. Tipos de canais em machos de corte: a) canais retos com ponta helicoidal, b) canais helicoidais e c) canais retos (RICHTE; SANDVIK COROMANT, 2014) .....	40
Figura 2.24. Chanfro na parte de corte de um macho (RICHTE; SANDVIK COROMANT, 2014) .....	41
Figura 2.25. Comportamento do torque no rosqueamento interno com macho de corte (DA MOTA, 2006) .....	43
Figura 2.26. Imagem da área de contato cavaco-ferramenta, mostrando as diferentes condições de atrito (KILIC; RAMAN, 2007) .....	47
Figura 2.27. Tipos de rebarbas na furação do aço AISI 4118: a) rebarba uniforme pequena, b) rebarba transiente e c) rebarba coroa; e do aço inoxidável AISI 304L: d) rebarba uniforme grande e e) rebarba coroa (KIM; MIN; DORNFELD, 2001) .....	49
Figura 2.28. Rebarbas formadas na furação da liga de alumínio 6061-T6 com diferentes métodos de lubrificação: a) corte à seco, b) corte com jorro e c) corte com MQL (ZEDAN et al., 2012) .....	49
Figura 2.29. Efeito do material da ferramenta nas componentes da força de usinagem (F <sub>t</sub> - Força de corte, F <sub>a</sub> - Força de avanço e F <sub>r</sub> - Força passiva) para v <sub>c</sub> = 260 m/min, f = 0,16 mm/rot e a <sub>p</sub> = 2 mm (adaptado de REIS; ABRÃO, 2005) .....	50

Figura 2.30. Efeito do material da ferramenta na rugosidade para $v_c = 260$ m/min, $f = 0,16$ mm/rot e $a_p = 2$ mm (adaptado de REIS; ABRÃO, 2005) .....	51
Figura 2.31. Rugosidade superficial versus velocidade de corte no torneamento à seco da liga de alumínio 6351 com diferentes quantidades de silício com $f = 0,2$ mm/rot e $a_p = 1,5$ mm (DA CUNHA; DA SILVA, 2012) .....	52
Figura 2.32. Força de corte versus velocidade de corte no torneamento à seco da liga de alumínio 6351 com diferentes quantidades de silício com $f = 0,2$ mm/rot e $a_p = 2$ mm .....	52
Figura 2.33. Força de corte (N) versus velocidade de corte (m/min) para diferentes ligas de alumínio da série 6XXX (GONÇALVES, 2012) .....	53
Figura 2.34. Rugosidade ( $\mu\text{m}$ ) versus velocidade de corte (m/min) para diferentes ligas de alumínio da série 6XXX (GONÇALVES, 2012) .....	53
Figura 2.35. Diagrama de linha de campos de fases de equilíbrio no sistema Al-Mg-Si-Cu à temperatura ambiente (adaptado de CHAKRABARTI; LAUGHLIN, 2004) .....	55
Figura 2.36. Ligas Al-Mg-Si-Cu agrupadas pela ocupação do campo de fase em uma projeção dos tetraedros de campo de quatro fases (CHAKRABARTI; LAUGHLIN, 2004) .....	55
Figura 2.37. Amostra de um lingote com Mg:Si>1 (Mg:1,15; Si:0,92; Cu:1,99) mostrando a fase com uma estrutura entrelaçada (CHAKRABARTI; LAUGHLIN, 2004) .....	56
Figura 2.38. O efeito do tempo de envelhecimento na dureza da liga após o endurecimento por precipitação a 125, 150, 175, 200 e 225 °C (adaptado de EIVANI; TAHERI, 2008) .....	57
Figura 2.39. Curvas de envelhecimento de ligas: a) Al-Si-Mg-xCu à 175 °C (adaptado de LI; BRUSETHAUG; OLSEN, 2006) e b) Al-Si-Mg-xCu à 160 °C (WANG et al., 2007) .....	58
Figura 2.40. Curvas de dureza em função do tempo de ligas Al-Mg-Si e Al-Mg-Si-0,6%Cu envelhecidas isotermicamente à 170°C (adaptado de MAN; JING; JIE, 2007) .....	59
Figura 2.41. Limite de resistência à tração de ligas Al-Si-Mg fundidas em diferentes moldes em função da quantidade de cobre (adaptado de SHABESTARI; MOEMENI, 2004) .....	60
Figura 2.42. Limite de resistência à tração, alongamento e fase Q em função do teor de cobre em uma liga Al-11Si-0,3Mg tratada termicamente por solução (adaptado de LU et al., 2015) .....	61

Figura 2.43. Mudanças no percentual em volume de porosidade com o teor de cobre em diferentes condições de solidificação de uma liga fundida Al-Si-Mg (adaptado de SHABESTARI; MOEMENI, 2004) .....	62
Figura 2.44. Força axial e torque na furação de ligas de alumínio (adaptado de FROEHLICH et al., 2007) .....	64
Figura 2.45. Comparação da vida da ferramenta das ligas de alumínio contendo diferentes adições de elementos de liga em termos do número de furos produzidos (adaptado de ZEDAN; ALKAHTANI, 2013) .....	64
Figura 2.46. Diferentes tipos de cavacos obtidos na furação das ligas de alumínio contendo diferentes adições de elementos de liga (adaptado de ZEDAN; ALKAHTANI, 2013) .....	65
Figura 3.1. Organograma contendo as amostras do material, processos de usinagem, ensaios de caracterização do material, parâmetros de corte e parâmetros de saída utilizados.....	67
Figura 3.2. Amostras embutidas e polidas para análise microestrutural e de alterações subsuperficiais durante os processos de furação, alargamento e rosqueamento.....	69
Figura 3.3. a) Microscópio ótico Olympus BX51M e b) Microscópio eletrônico de varredura TM3000 Hitashi equipado com sistema de espectroscopia de dispersão de raios-x (EDS) .....	70
Figura 3.4. Durômetro Universal Wolpert.....	70
Figura 3.5. Corpo de prova para os ensaios de dureza.....	71
Figura 3.6. Microdurômetro HMV Shimadzu utilizado nos ensaios de microdureza ....	71
Figura 3.7. Exemplos das etapas de medições de microdureza: a) indentação na fase da matriz de alumínio e b) indentação na partícula de segunda fase.....	72
Figura 3.8. Esquema de medição dos ensaios de microdureza realizados nas amostras das seções transversais dos furos obtidos nos processos de: a) alargamento e b) furação .....	72
Figura 3.9. Esquema de medição dos ensaios de microdureza realizados nas amostras das seções transversais das roscas medidas: a) no filete e b) entre dois filetes .....	73
Figura 3.10. Corpo de prova utilizado nos ensaios de tração.....	74
Figura 3.11. Máquina universal de ensaios de tração Shimadzu utilizada nos ensaios de tração.....	74
Figura 3.12. Corpo de prova utilizado nos ensaios de impacto Charpy.....	75
Figura 3.13. Máquina para teste de impacto Charpy Equilam EQIM-C-300 utilizada nos ensaios de impacto .....	75
Figura 3.14. Corpo de prova para os ensaios de furação.....	82
Figura 3.15. Corpo de prova para os ensaios de alargamento e rosqueamento .....	83

Figura 3.16. Corpo de prova após ensaios de furação para análise de rebarbas .....	84
Figura 3.17. Centro de Usinagem Romi Discovery .....	84
Figura 3.18. Broca A920 utilizada nos ensaios de furação (DORMER, 2015) .....	85
Figura 3.19. Alargador 5202 utilizado nos ensaios de alargamento (INDAÇO, 2015) ..	85
Figura 3.20. Macho máquina 169 SFT-AI utilizado nos ensaios de rosqueamento (OSG SULAMERICANA, 2012) .....	86
Figura 3.21. Broca A100 utilizada na pré-furação dos ensaios de alargamento e rosqueamento (DORMER, 2015) .....	88
Figura 3.22. Broca Corodrill 460-XM utilizada nos ensaios de furação para análise de rebarbas (SANDVIK, 2012) .....	89
Figura 3.23. Dinamômetro rotativo 9123C utilizado na aquisição do torque e força de avanço (KISTLER, 2009) .....	90
Figura 3.24. Desenho esquemático da montagem dos equipamentos utilizados nas medições de torque e força de avanço .....	91
Figura 3.25. Medição típica do torque e da força de avanço no alargamento e o intervalo do cálculo da média dos valores .....	93
Figura 3.26. Medição típica do torque no rosqueamento, os intervalos de corte e retorno do macho, torque máximo e pico de reversão .....	94
Figura 3.27. Equipamentos para a aquisição dos sinais de força e torque, ferramenta de corte, mangueira para a aplicação de fluido de corte e corpo de prova montados na máquina-ferramenta para o caso dos ensaios de furação .....	94
Figura 3.28. Perfilômetro Form Talysurf 50 utilizado nas medições de rugosidade .....	96
Figura 3.29. Circularímetro Talyrond 131 utilizado nas medições dos erros de forma de circularidade e cilindricidade .....	97
Figura 3.30. Representação dos planos de medição de circularidade e cilindricidade	97
Figura 3.31. Máquina de medir a três coordenadas (MM3) Mitutoyo BR-443 utilizada na medição do diâmetro dos furos obtidos nos ensaios de furação e alargamento .....	98
Figura 3.32. Esquema de pontos apalpados para as medições do diâmetro dos furos	98
Figura 3.33. Balança semi-analítica utilizada na medição da massa dos cavacos para obtenção do parâmetro cavacos por grama .....	101
Figura 3.34. Microscópio Olympus SZ61 e câmera PixeLINK PL-A662 utilizados na medição das rebarbas .....	101
Figura 3.35. Esquema de medição da altura das rebarbas de entrada e saída na furação .....	102
Figura 4.1. Micrografias obtidas por microscopia ótica das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre em aumentos de 50x, 100x e 200x ..	105

Figura 4.2. Análise de EDS realizada na partícula de segunda fase nas amostras 1 (0,07% Cu) e 5 (1,93% Cu) da liga de alumínio 6351 .....	107
Figura 4.3. Análise de EDS realizada na matriz de alumínio das amostras 1 (0,07% Cu) e 5 (1,93% Cu) .....	108
Figura 4.4. Dureza Vickers das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	109
Figura 4.5. Microdureza Vickers da matriz de alumínio das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	112
Figura 4.6. Microdureza Vickers da partícula de segunda fase encontrada nas amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	114
Figura 4.7. Curvas tensão (MPa) x alongamento percentual após a ruptura (%) de um corpo de prova de cada uma das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	117
Figura 4.8. Limite de resistência à tração das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	118
Figura 4.9. Alongamento percentual após a ruptura das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	120
Figura 4.10. Energia absorvida compensada das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	123
Figura 4.11. Torque em diferentes velocidades de corte na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	124
Figura 4.12. Torque em diferentes avanços na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	125
Figura 4.13. Superfície de resposta do torque (N.m) na furação da amostra 2 em função dos parâmetros velocidade de corte e avanço .....	128
Figura 4.14. Força de avanço em diferentes velocidades de corte na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	129
Figura 4.15. Força de avanço em diferentes avanços na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	130
Figura 4.16. Superfície de resposta da força de avanço (N) na furação da amostra 1 em função dos parâmetros velocidade de corte e avanço .....	132
Figura 4.17. Diâmetro médio dos furos obtidos no processo de furação das amostras da liga de alumínio com diferentes teores de cobre .....	133
Figura 4.18. Parâmetro de rugosidade $R_q$ em diferentes velocidades de corte na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	134
Figura 4.19. Parâmetro de rugosidade $R_q$ em diferentes avanços na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	136

Figura 4.20. Superfície de resposta do parâmetro de rugosidade $Rq$ ( $\mu m$ ) na furação da amostra 1 em função dos parâmetros velocidade de corte e avanço.....	139
Figura 4.21. Micrografias obtidas por microscopia ótica da seção transversal dos furos para análise de alterações subsuperficiais durante a furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre em aumentos de 100x, 200x e 500x .....	141
Figura 4.22. Microureza Vickers em função da distância a partir da superfície usinada no processo de furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	142
Figura 4.23. Cavacos formados na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre em profundidades de corte de $ap = 3,15$ mm e $ap = 4,90$ mm .....	143
Figura 4.24. Número de cavacos por grama em diferentes profundidades de corte na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	145
Figura 4.25. Imagens obtidas por MEV da superfície inferior dos cavacos formados na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	148
Figura 4.26. Detalhe da aresta de corte e da superfície de folga das duas arestas de corte da broca helicoidal utilizada nos ensaios de furação.....	149
Figura 4.27. Vistas frontal e lateral das rebarbas de entrada formadas na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	151
Figura 4.28. Altura da rebarba de entrada formada na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	152
Figura 4.29. Vistas frontal e lateral das rebarbas de saída formadas durante a furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	154
Figura 4.30. Altura da rebarba de saída formada na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	155
Figura 4.31. Torque em diferentes velocidades de corte no alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	158
Figura 4.32. Torque em diferentes avanços no alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	159
Figura 4.33. Superfície de resposta do torque (N.m) no alargamento da amostra 4 em função dos parâmetros velocidade de corte e avanço .....	162
Figura 4.34. Força de avanço em diferentes velocidades de corte no alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	163
Figura 4.35. Força de avanço em diferentes avanços no alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	164
Figura 4.36. Superfície de resposta da força de avanço (N) no alargamento da amostra 4 em função dos parâmetros velocidade de corte e avanço.....	167

Figura 4.37. Diâmetro médio dos furos obtidos no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	169
Figura 4.38. Desvio de circularidade dos furos obtidos em diferentes velocidades de corte no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	172
Figura 4.39. Desvio de circularidade dos furos obtidos em diferentes avanços no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	173
Figura 4.40. Representação gráfica de uma medição do desvio de circularidade no alargamento das amostras 2 e 4 da liga de alumínio 6351 – $v_c = 40$ m/min e $f = 0,25$ mm/rot .....	174
Figura 4.41. Desvio de cilindricidade dos furos obtidos em diferentes velocidades de corte no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	176
Figura 4.42. Desvio de cilindricidade dos furos obtidos em diferentes avanços no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	177
Figura 4.43. Representação gráfica de uma medição do desvio de cilindricidade no alargamento das amostras 3 e 4 da liga de alumínio 6351 – $v_c = 40$ m/min e $f = 0,25$ mm/rot .....	177
Figura 4.44. Parâmetro de rugosidade $Rq$ dos furos obtidos em diferentes velocidades de corte no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	179
Figura 4.45. Parâmetro de rugosidade $Rq$ dos furos obtidos em diferentes avanços no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	181
Figura 4.46. Perfis de rugosidade dos furos alargados com $v_c = 26$ m/min e $f = 0,20$ mm/rot realizados nas amostras 1 (0,07% Cu) e 4 (1,43% Cu) da liga de alumínio 6351 .....	182
Figura 4.47. Superfície de resposta do parâmetro de rugosidade $Rq$ ( $\mu m$ ) no alargamento da amostra 4 em função dos parâmetros velocidade de corte e avanço .....	184
Figura 4.48. Micrografias obtidas por microscopia ótica da seção transversal dos furos para análise de alterações superficiais durante o alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre em aumentos de 100x, 200x e 500x	187

Figura 4.49. Microdureza Vickers em função da distância a partir da superfície usinada no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	188
Figura 4.50. Torque em diferentes velocidades de corte no rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	189
Figura 4.51. Torque no rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	191
Figura 4.52. Imagens obtidas por MEV dos filetes das rosas produzidas no rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	193
Figura 4.53. Micrografias obtidas por microscopia ótica da seção transversal dos furos para análise de alterações superficiais durante o rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre em aumentos de 100x, 200x e 500x .....	195
Figura 4.54. Microdureza Vickers em diferentes pontos de um filete de rosca gerado no processo de rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	196
Figura 4.55. Usinabilidade e propriedades mecânicas das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	198



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Perfil da indústria brasileira do alumínio (adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2016) .....	4
Tabela 2.2. Propriedades físicas do alumínio e outros materiais (adaptado de CBA - COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO; VOTORANTIM METAIS, 2012).....	5
Tabela 2.3. Classificação das ligas de alumínio para conformação (ASM INTERNATIONAL, 1990a) .....	10
Tabela 2.4. Designações do tratamento para ligas de alumínio endurecidas por deformação e tratáveis termicamente (adaptado de KATGERMAN; ESKIN, 2003) ....	13
Tabela 2.5. Composição química de ligas de alumínio da série 6XXX (adaptado de THE ALUMINUM ASSOCIATION, 2015) .....	15
Tabela 2.6. Propriedades mecânicas de ligas de alumínio da série 6XXX (CBA - COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO; VOTORANTIM METAIS, 2012).....	18
Tabela 2.7. Tipos, características e aplicações de machos (adaptado de OSG SULAMERICANA, 2012) .....	38
Tabela 2.8. Elementos de liga e sua influência na usinabilidade das ligas de alumínio (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).....	46
Tabela 3.1. Composição química das amostras da liga de alumínio 6351 .....	68
Tabela 3.2. Planejamento fatorial $2^3$ utilizado na regressão múltipla dos resultados obtidos nos ensaios de furação .....	76
Tabela 3.3. Níveis das variáveis utilizadas na regressão múltipla de um lote comparando a amostra 1 com a amostra 2 nos ensaios de furação .....	76
Tabela 3.4. Planejamento utilizado na regressão múltipla com níveis centrais utilizados nos ensaios de furação.....	77
Tabela 3.5. Níveis das variáveis utilizadas na regressão múltipla com níveis centrais utilizados nos ensaios de furação .....	77
Tabela 3.6. Parâmetros de corte velocidade de corte e avanço utilizados nos ensaios de furação.....	78
Tabela 3.7. Planejamento fatorial $2^3$ utilizado na regressão múltipla dos resultados obtidos nos ensaios de alargamento.....	79

Tabela 3.8. Níveis das variáveis utilizadas na regressão múltipla de um lote comparando a amostra 1 com a amostra 2 nos ensaios de alargamento.....	79
Tabela 3.9. Planejamento utilizado na regressão múltipla com níveis centrais utilizados nos ensaios de alargamento .....	79
Tabela 3.10. Níveis das variáveis utilizadas na regressão múltipla com níveis centrais utilizados nos ensaios de alargamento .....	80
Tabela 3.11. Parâmetros de corte utilizados nos ensaios de rosqueamento.....	80
Tabela 3.12. Parâmetros de corte utilizados nos processos de usinagem para a análise de alterações subsuperficiais das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	81
Tabela 3.13. Dimensões e ângulos da broca A920 utilizada nos ensaios de furação (DORMER, 2015) .....	85
Tabela 3.14. Dimensões e especificações do alargador 5202 utilizado nos ensaios de alargamento (INDAÇO, 2015).....	86
Tabela 3.15. Dimensões e ângulos do macho máquina 169 STF-AI utilizado nos ensaios de rosqueamento (OSG SULAMERICANA, 2012) .....	86
Tabela 3.16. Sobremetal recomendado no furo para utilização do alargador (INDAÇO, 2015) .....	87
Tabela 3.17. Tolerância do diâmetro de furo para roscar (OSG SULAMERICANA, 2012) .....	87
Tabela 3.18. Dimensões e ângulos da broca A100 utilizada na pré-furação dos ensaios de alargamento e rosqueamento (DORMER, 2015) .....	88
Tabela 3.19. Dimensões e ângulos da broca Corodrill 460-XM utilizada nos ensaios de furação para análise de rebarbas (SANDVIK, 2012).....	89
Tabela 3.20. Dimensões e especificações do dinamômetro rotativo 9123C utilizado na aquisição do torque e força de avanço (KISTLER, 2009).....	91
Tabela 3.21. Seleção do cut-off e percurso de medição para a medição de rugosidade em superfícies com perfil periódico a partir da distância entre sulcos gerados pelo avanço da ferramenta de corte (NOVASKI, 1994) .....	95
Tabela 4.1. Dureza Vickers em diferentes regiões das barras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	110
Tabela 4.2. Quadro de Anova para os resultados de Dureza Vickers das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	110
Tabela 4.3. Valor p para a diferença entre as médias de dureza das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	111
Tabela 4.4. Quadro de ANOVA para a microdureza da matriz de alumínio das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	113

Tabela 4.5. Valor p para a diferença entre as médias de microdureza da matriz de alumínio das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	113
Tabela 4.6. Quadro de ANOVA para a microdureza da partícula de segunda fase das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	115
Tabela 4.7. Valor p para a diferença entre as médias de microdureza da partícula de segunda fase das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	116
Tabela 4.8. Valores médios das propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração das amostras da liga de alumínio 6351 .....	117
Tabela 4.9. Quadro de ANOVA para o limite de Resistência à Tração das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	118
Tabela 4.10. Valor p para a diferença entre as médias de limite de resistência à tração das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	119
Tabela 4.11. Quadro de ANOVA para o alongamento percentual após a ruptura das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	121
Tabela 4.12. Valor p para a diferença entre as médias de limite de alongamento percentual após a ruptura das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	122
Tabela 4.13. Quadro de ANOVA para a energia absorvida compensada das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	123
Tabela 4.14. Efeitos, coeficientes e valores p da regressão múltipla para o torque na furação comparando amostras 2 e 5 da liga de alumínio 6351 .....	126
Tabela 4.15. Efeitos, coeficientes e valores p da regressão múltipla para a força de avanço na furação comparando amostras 2 e 5 da liga de alumínio 6351 .....	131
Tabela 4.16. Quadro de ANOVA para o diâmetro médio dos furos obtidos na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	133
Tabela 4.17. Efeitos, coeficientes e valores p da regressão múltipla para o parâmetro de rugosidade Rq na furação comparando amostras 2 e 5 da liga de alumínio 6351	137
Tabela 4.18. Quadro de Anova para o número de cavacos por grama das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	145
Tabela 4.19. Valor p para a diferença entre as médias do número de cavacos por grama das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	146
Tabela 4.20. Quadro de ANOVA para a altura da rebarba de entrada na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	152
Tabela 4.21. Valor p para a diferença entre as médias da altura da rebarba de entrada na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .	153

Tabela 4.22. Quadro de ANOVA para a altura da rebarba de saída na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	156
Tabela 4.23. Valor p para a diferença entre as médias da altura da rebarba de saída na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .	157
Tabela 4.24. Efeitos, coeficientes e valores p da regressão múltipla para o torque no alargamento comparando as amostras 4 e 5 da liga de alumínio 6351.....	160
Tabela 4.25. Efeitos, coeficientes e valores p da regressão múltipla para a força de avanço no alargamento comparando as amostras 4 e 5 da liga de alumínio 6351 ...	165
Tabela 4.26. Quadro de ANOVA para o diâmetro médio dos furos obtidos no alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	170
Tabela 4.27. Valor p para a diferença entre as médias do diâmetro dos furos no alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre .....	171
Tabela 4.28. Efeitos, coeficientes e valores p da regressão múltipla para a circularidade no alargamento comparando as amostras 2 e 4 da liga de alumínio 6351 .....	174
Tabela 4.29. Efeitos, coeficientes e valores p da regressão múltipla para a cilindricidade no alargamento comparando as amostras 2 e 4 da liga de alumínio 6351 .....	178
Tabela 4.30. Efeitos, coeficientes e valores p da regressão múltipla para o parâmetro de rugosidade Rq no alargamento comparando as amostras 1 e 4 da liga de alumínio 6351 .....	182
Tabela 4.31. Quadro de Anova para o torque no rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	190
Tabela 4.32. Valor p para a diferença entre as médias do torque no rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.....	192
Tabela 4.33. Pontuação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre nos diversos parâmetros de usinabilidade avaliados.....	197

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

6XXX - Família de ligas de alumínio em que os principais elementos de liga são o magnésio e o silício

ABAL - Associação Brasileira do Alumínio

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI - Instituto Americano de Ferro e Aço (*American Iron and Steel Institute*)

$\text{Al}_2\text{O}_3$  - Óxido de Alumínio

ANOVA - Análise de Variância

$a_p$  - Profundidade de corte

APC - Aresta Postiça de Corte

ASM – Sociedade Americana de Metais (*American Society of Metals*).

CBA - Companhia Brasileira de Alumínio

CFC - Estrutura cristalina cúbica de face centrada

CVD - Processo de Deposição por Vapor Químico

d - diâmetro da ferramenta de corte (mm)

EAA – European Aluminium Association

EDS - Sistema de espectroscopia por dispersão de energia de raios-x

f - Avanço

$f_s$  - Frequência de amostragem

Fc - Força de corte

Ff - Força de avanço

$f_{máx}$  - Frequência máxima do sinal

Fp - Força passiva

Fu - Força de usinagem

HB - Dureza Brinell

HSS - Aço rápido (*High Speed Steel*)

HV - Dureza Vickers

ISO - International Standard Organization

Kc - Pressão específica de corte (N/mm<sup>2</sup>)

Kf - Pressão específica de corte na direção de avanço (N/mm<sup>2</sup>)

LRT - Limite de Resistência à Tração

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura

MQF - Mínima Quantidade de Fluido

MQL - Mínima Quantidade de Lubrificante

n - rotações por minuto (rpm)

PCBN - Nitreto Cúbico de Boro Policristalino

PCD - Diamante Policristalino

Q - fase  $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Cu}_2\text{Si}_6$

$R_a$  - Desvio médio aritmético

rot - Rotação

$R_q$  - Desvio médio quadrático

$R_t$  - Altura total do perfil

$R_z$  - Rugosidade média

s - desvio padrão amostral

T4 - Estado solubilizado e envelhecido naturalmente

T6 - Estado solubilizado e envelhecido artificialmente

T7 - Estado solubilizado e superenvelhecido

TiC - Carboneto de Titânio

TiN - Nitreto de Titânio

$v_c$  - Velocidade de corte

$v_e$  - Velocidade efetiva

$v_f$  - Velocidade de avanço

$\bar{x}$  - média aritmética amostral

$\alpha$  - Ângulo de folga

$\beta$  - Ângulo de cunha

$\beta'$  - fase  $\text{Mg}_2\text{Si}$  (Precipitado responsável pelo endurecimento das ligas da série 6XXX)

$\gamma$  - Ângulo de saída

$\delta$  - Ângulo de hélice

$\theta$  - fase  $\text{CuAl}_2$

$\sigma$  - Ângulo de ponta

## SUMÁRIO

<b>Resumo .....</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>xxiii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS .....</b>	<b>xxvii</b>
<b>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
2.1    O alumínio e suas ligas .....	3
2.1.1    Histórico e produção.....	3
2.1.2    Propriedades e aplicações.....	5
2.1.3    Classificação das ligas de alumínio .....	8
2.1.4    Mecanismos de endurecimento das ligas de alumínio .....	10
2.1.5    Tratamentos aplicados ao alumínio e suas ligas.....	13
2.2    As ligas de alumínio da série 6XXX .....	14
2.2.1    A liga de alumínio 6351 .....	17
2.3    Processos de usinagem convencional para abertura de furos e roscas.....	19
2.3.1    Furação .....	20
2.3.2    Alargamento .....	31
2.3.3    Rosqueamento .....	35
2.4    Usinabilidade .....	43

2.4.1	Usinabilidade das ligas de alumínio.....	44
2.4.2	Usinabilidade da liga de alumínio 6351.....	49
2.5	Efeito da adição de cobre nas ligas de alumínio .....	54
2.5.1	Influência na microestrutura e propriedades .....	54
2.5.2	Influência na usinabilidade.....	63
<b>CAPÍTULO III - METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>		67
3.1	Amostras da liga de alumínio 6351.....	68
3.2	Ensaios de caracterização do material .....	68
3.2.1	Análise da microestrutura .....	69
3.2.2	Ensaios de dureza e microdureza.....	70
3.2.3	Ensaios de tração.....	73
3.2.4	Ensaios de impacto .....	74
3.3	Planejamento experimental .....	75
3.4	Ensaios de usinagem .....	82
3.4.1	Corpos de prova .....	82
3.4.2	Equipamentos e ferramentas.....	84
3.4.3	Aquisição de força e torque .....	89
3.4.4	Medição de rugosidade .....	95
3.4.5	Medição de circularidade e cilindricidade.....	96
3.4.6	Medição do diâmetro dos furos.....	97
3.4.7	Avaliação dos filetes das rosas .....	100
3.4.8	Análise da formação dos cavacos .....	100
3.4.9	Análise da formação de rebarbas .....	101
<b>CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>		103
4.1	Caracterização das amostras da liga de alumínio 6351 .....	103
4.1.1	Análise da microestrutura .....	103
4.1.2	Resultados de dureza e microdureza .....	109

4.1.3	Resultados de resistência à tração .....	116
4.1.4	Resultados de resistência ao impacto .....	122
4.2	Resultados dos ensaios de furação .....	123
4.2.1	Torque .....	123
4.2.2	Força de avanço .....	128
4.2.3	Diâmetro do furo .....	132
4.2.4	Rugosidade .....	133
4.2.5	Alterações subsuperficiais .....	139
4.2.6	Formação de cavacos .....	142
4.2.7	Formação de rebarbas .....	150
4.3	Resultados dos ensaios de alargamento .....	157
4.3.1	Torque .....	157
4.3.2	Força de avanço .....	162
4.3.3	Diâmetro do furo alargado .....	168
4.3.4	Desvios de forma: circularidade e cilindricidade .....	171
4.3.5	Rugosidade .....	179
4.3.6	Alterações subsuperficiais .....	184
4.4	Resultados dos ensaios de rosqueamento .....	188
4.4.1	Torque .....	188
4.4.2	Análise dos filetes da rosca .....	192
4.4.3	Alterações subsuperficiais .....	194
4.5	Classificação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre quanto à usinabilidade .....	196
<b>CAPÍTULO V - CONCLUSÕES .....</b>		199
Propostas para trabalhos futuros .....		203
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		205



# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

O alumínio é o metal não ferroso com maior produção e maior utilização na indústria em todo o mundo. Somente no ano de 2015 foram produzidas mais de  $57 \times 10^3$  toneladas de alumínio primário em todo o mundo, representando um aumento de cerca de 7% na produção em relação ao ano anterior (INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE, 2016). Às vezes tratado como o “metal da vida moderna” ele tem tomado espaço em diversas aplicações devido à sua versatilidade e excelentes propriedades. A utilização de alumínio tem aumentado em diversos setores, como aeronáutico, automobilístico, transmissão de energia, construção civil e embalagens. Isso é devido ao fato deste material ter boa relação resistência/peso, condutividade elétrica e térmica, aparência e, principalmente, sua infinita capacidade de reciclagem.

Para as diversas aplicações em engenharia, o alumínio normalmente é utilizado na forma de ligas com a adição de diversos elementos de liga para conferir propriedades específicas ao material. As ligas de alumínio Al-Si-Mg (série 6XXX) bastante utilizadas em estruturas soldadas, equipamentos rodoviários, arquitetura e decoração têm como principais elementos de liga o magnésio e o silício. A proporção de Mg e Si visa a formação da fase  $Mg_2Si$ , formando ligas tratáveis termicamente. O teor de silício normalmente aumenta a dureza, enquanto o magnésio aumenta consideravelmente a resistência mecânica da liga de alumínio sem diminuir a ductilidade (ASM INTERNATIONAL, 1990a). Além de magnésio e silício outros elementos, em menor quantidade, também são adicionados para modificar determinadas propriedades da liga como cobre, ferro, manganês, cromo, zinco, titânio, entre outros. Grandes aumentos em resistência mecânica podem ser obtidos adicionando cobre em ligas Al-Si-Mg, acompanhados de considerável refinamento na estrutura do precipitado (TIRYAKIOGLU; STALEY, 2003).

Apesar de existirem dados disponíveis acerca de como a adição de cobre influencia as propriedades mecânicas das ligas de alumínio Al-Si-Mg e a influência deste elemento químico na usinabilidade de outras ligas de alumínio, uma maior quantidade de pesquisa e conhecimento são necessários sobre como esta adição e consequente modificação causada na microestrutura e propriedades mecânicas podem influenciar o comportamento das ligas de alumínio Al-Si-Mg durante a usinagem.

O objetivo principal do trabalho é o estudo da influência do teor de cobre na usinabilidade da liga de alumínio 6351. A usinabilidade desta liga foi avaliada a partir de medições do torque e força na ferramenta de corte, rugosidade, desvios de forma (cilindricidade e circularidade) e rebarbas dos furos, forma dos cavacos e alterações subsuperficiais durante os processos de furação, alargamento e rosqueamento. As amostras da liga de alumínio 6351 foram produzidas com diferentes teores de cobre (0,07%, 0,23%, 0,94%, 1,43% e 1,93 %), e com composições químicas dos demais elementos de liga praticamente constantes dentro da faixa recomendada pela Associação do Alumínio para esta liga (THE ALUMINUM ASSOCIATION, 2015). As principais propriedades mecânicas das amostras da liga de alumínio 6351 foram obtidas a partir de análises microestruturais e ensaios de microdureza, dureza, tração e impacto.

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, incluindo este. No capítulo II é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema. No capítulo III é apresentada a metodologia e todos os equipamentos utilizados. No capítulo IV são apresentados os resultados e discussões. No capítulo V são apresentadas as conclusões e algumas propostas para trabalhos futuros. Por fim são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

Os resultados obtidos mostram diferenças na usinabilidade das cinco amostras da liga de alumínio 6351 em termos do torque, força de avanço, rugosidade, desvios de forma; e formação de cavacos e rebarbas nos processos de furação, alargamento e rosqueamento.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 O alumínio e suas ligas

Alumínio, o segundo elemento metálico mais abundante na terra, tornou-se um concorrente econômico em aplicações de engenharia recentemente no final do século XIX (METALS HANDBOOK, 1992). Segundo a ABAL – Associação Brasileira de Alumínio, apesar de sua recente utilização na forma isolada que conhecemos, existem relatos de que há sete milênios os persas e 30 séculos mais tarde os egípcios e babilônios utilizavam argila contendo óxido de alumínio (alumina) na produção de vasos, potes e artefatos variados.

##### 2.1.1 Histórico e produção

A primeira obtenção do que até então mais se aproximava do alumínio aconteceu em 1809. Humphrey Davy foi o mentor da descoberta, fundindo ferro na presença de alumina. Mais tarde em 1821 o francês P. Berthier descobriu um minério avermelhado, que contém 52% de óxido de alumínio, perto da aldeia de Lês Baux, no sul da França. Foi a descoberta da bauxita, o minério mais comum de alumínio. Já em 1825 o físico dinamarquês Hans Christian Oersted conseguiu isolar o alumínio de outra maneira, a partir do cloreto de alumínio na forma como é conhecido hoje. E em 1854 ocorreu a primeira obtenção do alumínio por via química, realizada por Henry Saint-Claire Deville. Finalmente em 1886 tornou-se público o processo de obtenção de alumínio por meio da redução eletrolítica da alumina dissolvida em banho fundido de criolita. Esse procedimento foi desenvolvido separadamente pelo norte-americano Charles Martin Hall e pelo francês Paul Louis Toussaint Héroult, que o descobriram e o

patentearam quase simultaneamente. Esse processo ficou conhecido como Hall-Heroult e foi o que permitiu o estabelecimento da indústria global do alumínio (ABAL).

Hoje em dia, o alumínio é o metal não ferroso mais fortemente consumido no mundo (TIRYAKIOGLU; STALEY, 2003). O Brasil é o nono maior produtor de alumínio primário, precedido pela China, Rússia, Canadá, Emirados Árabes, Austrália, Estados Unidos, Índia e Noruega; quarto produtor de bauxita, atrás da Austrália, Indonésia e China; e terceiro produtor de alumina, atrás de China e Austrália (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2016). Segundo a ABAL somente no Brasil no ano de 2014 (últimos dados disponíveis) foram produzidas 962 toneladas de alumínio primário, movimentando R\$ 54,6 bilhões, conforme mostrado na Tab. 2.1. A diminuição na produção do alumínio primário no Brasil em relação aos anos anteriores deve-se principalmente às questões relacionadas ao custo de energia que afeta a competitividade global da indústria nacional (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CNI; ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2012).

Tabela 2.1. Perfil da indústria brasileira do alumínio (adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2016)

Composição	2014	2015
Empregos (31/12)	501.469	494.708
- Diretos	122.839	114.072
- Indiretos	378.630	380.636
Faturamento (R\$ bilhões) <sup>(1)</sup>	56,3	56,4
- Participação no PIB (%)	1,1	1,1
- Participação no PIB Industrial (%)	4,8	4,9
Investimentos (R\$ bilhões) <sup>(1)</sup>	1,9	2,1
Impostos pagos (R\$ bilhões) <sup>(1)(2)</sup>	11,3	11,3
Produção de Alumínio Primário (1000 t)	962	772
Consumo Doméstico de Transformados de Alumínio (1000 t)	1.430	1.309
Consumo Per Capita (kg/hab./ano)	7,0	6,4
Exportação (1000 t) (peso alumínio)	457	453
Importação (1000 t) (peso alumínio)	636	618
Balança Comercial da Indústria do Alumínio (US\$ milhões FOB) <sup>(3)</sup>		
- Exportações	3.941	3.941
- Importações	2.009	1.764
- Saldo	1.932	2.177
Participação das Exportações de Alumínio nas Exportações Brasileiras (%)	1,8	2,1

Nota: (1) Estimativa com base em dados da ABAL e Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio.

(2) Inclui impostos sobre produção, consumo e propriedade.

(3) Inclui Bauxita e Alumina.

### 2.1.2 Propriedades e aplicações

Uma das principais características do alumínio é a sua versatilidade. As propriedades únicas do alumínio, como leveza, elevada resistência mecânica e resistência à corrosão, fazem dele um material ideal para uso convencional e novas aplicações (SVERDLIN, 2003). Na Tab. 2.2 são apresentadas algumas propriedades físicas do alumínio em comparação com outros materiais.

Tabela 2.2. Propriedades físicas do alumínio e outros materiais (adaptado de CBA - COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO; VOTORANTIM METAIS, 2012)

Propriedades físicas	Alumínio (1100)	Aço (1020)	Cobre (Puro)
<b>Peso específico (kg/m<sup>2</sup>) x 10<sup>3</sup></b>	2,71	7,86	8,96
<b>Temperatura de fusão (°C)</b>	657	1500	1083
<b>Módulo de elasticidade (kg/mm<sup>2</sup>)</b>	7000	21000	11250
<b>Coeficiente de dilatação térmica linear 20°C a 100°C (m/m.K)</b>	$23,6 \times 10^{-6}$	$11,7 \times 10^{-6}$	$16,5 \times 10^{-6}$
<b>Condutividade térmica a 25° (W/m.K)</b>	222	52	394
<b>Condutividade elétrica (%IACS) a 20° C</b>	59	14,5	100

Dentre as principais aplicações é possível citar os setores de construção civil, transportes, eletricidade, bens de consumo, embalagens, máquinas e equipamentos, entre outros. Na Fig. 2.1 é apresentada a cadeia produtiva do alumínio, bem como os principais produtos disponíveis e suas principais aplicações.

Para o seu uso no setor de construção civil, uma das características mais interessantes do alumínio é a leveza. A sua utilização permite o desenvolvimento de produtos e soluções que possibilitam reduzir o consumo de ar condicionado e de luz elétrica, ao mesmo tempo em que proporcionam maior segurança e conforto térmico e acústico aos usuários, fatores que contribuem para a sustentabilidade nas construções (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CNI; ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2012). Antes encontrado principalmente em esquadrias e telhas, o alumínio tornou-se uma tendência na arquitetura, como opção para revestimentos internos e de fachadas, estando presente em peças de acabamento e atendendo a nichos, como é o caso de molduras para pontos de eletricidade e mobiliário urbano (ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2012).

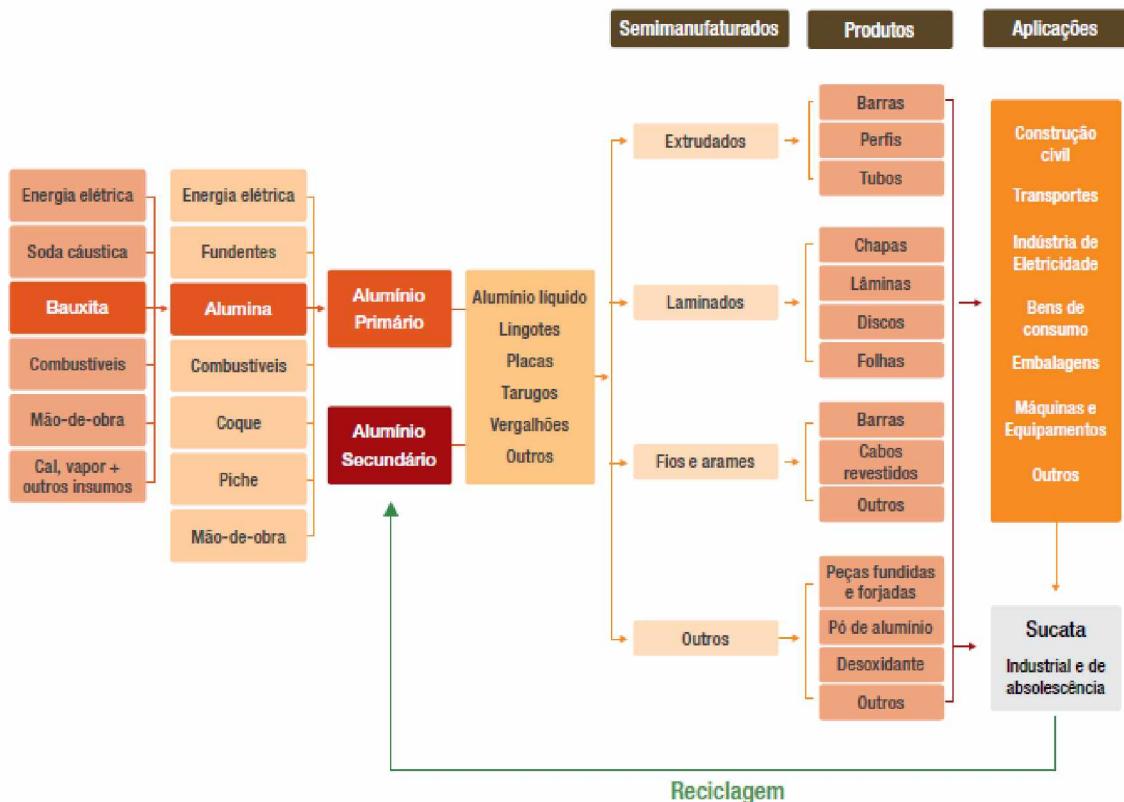


Figura 2.1. Cadeia produtiva da indústria do alumínio (ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2012)

Neste mesmo sentido, a leveza do alumínio e principalmente sua excelente relação resistência mecânica por peso o credencia a ser um ótimo material para utilização no setor de transportes. O alumínio permite a produção de modelos de bicicletas que combinam leveza e resistência, garantindo aos ciclistas lazer e saúde com conforto, segurança e melhor desempenho. O alumínio utilizado nos automóveis garante maior segurança por ser um material que absorve mais impacto em colisões. Além disso, sua maleabilidade favorece o design, permitindo o desenvolvimento de peças com formas inovadoras, modernas e com excepcional qualidade de acabamento superficial. E ao substituir materiais mais pesados como aço e ferro fundido, o uso do alumínio pode reduzir em mais de 400 kg o peso de um carro de tamanho médio (que pesa em torno de 1200 kg). Cada 10% de redução de peso nos automóveis representam um aumento de 5 a 10% em eficiência de combustível. Evitando assim a emissão de 20 kg de CO<sub>2</sub> durante a vida útil de um carro à cada quilograma de alumínio utilizado no lugar de um material mais pesado (ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2012).

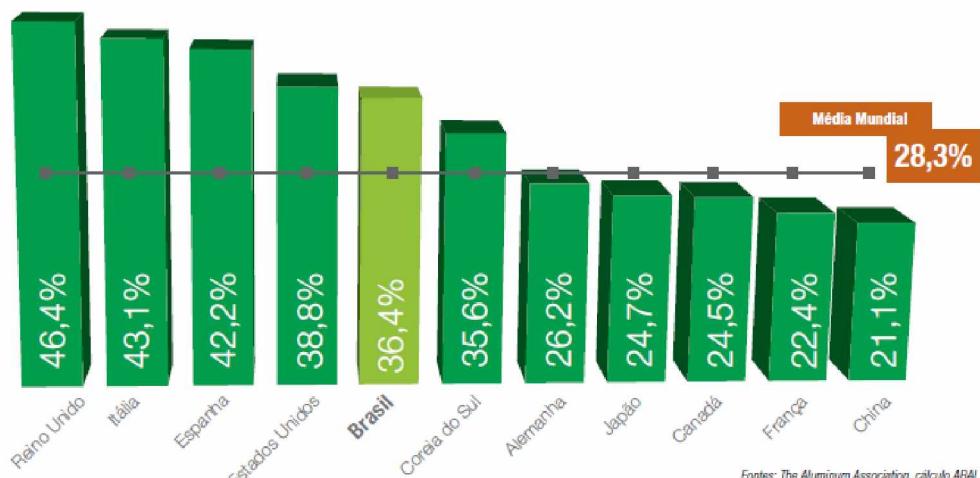
Outro grande setor que se beneficia com o uso do alumínio é o da transmissão de energia elétrica. Segundo a ABAL (2012), a alta condutividade elétrica do alumínio

favorece sua utilização em cabos e fios, na transmissão e distribuição de energia. A sua aplicação pode substituir, por exemplo, o cobre (de maior condutividade elétrica) proporcionando a fabricação de cabos e fios mais leves e consequentemente, facilitando a transmissão de energia em longas distâncias.

Devido à durabilidade e facilidade de manutenção, o alumínio também assume papel de destaque em ambientes domésticos. Vários bens de consumo podem ser fabricados como panelas, utensílios para cozinha e banheiro, objetos de decoração, luminárias, persianas e forros, antenas, escadas, entre outros (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CNI; ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2012).

O alumínio também tem grande aplicação na fabricação de embalagens. Por ser mais leve, durável e resistente à corrosão que outros materiais, pode garantir a integridade de alimentos, bebidas, medicamentos e cosméticos, durante seu transporte, armazenagem e consumo. E por ser atóxico funciona como uma excelente barreira contra luz, umidade e impureza, protegendo e aumentando a vida útil dos produtos embalados (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CNI; ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2012).

Além das características anteriormente apresentadas, que torna o alumínio um material bastante competitivo para diversas aplicações, um de seus melhores atributos é a sua capacidade infinita de reciclagem. Segundo a ABAL (2012), cerca de 75% de todo o alumínio que já foi produzido até hoje, ainda encontra-se em uso. O Brasil se destaca ficando acima da média mundial da relação entre a sucata recuperada e o total de consumo doméstico de produtos transformados de alumínio, como apresentado na Fig. 2.2.



Fonte: The Aluminum Association, cálculo ABAL.

Figura 2.2. Relação sucata recuperada e consumo doméstico em 2010 (ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2012)

### 2.1.3 Classificação das ligas de alumínio

O alumínio, como a maioria dos metais puros, apresenta baixa resistência mecânica e não pode ser facilmente utilizado em aplicações onde resistência à deformação e à fratura são essenciais (TIRYAKIOGLU; STALEY, 2003). Desta forma, para aplicações em engenharia, alguns elementos são adicionados ao alumínio durante sua fabricação, formando as ligas de alumínio, com o objetivo de conferir algumas propriedades específicas. As propriedades das ligas de alumínio dependem de uma complexa interação da composição química e das características microestruturais desenvolvidas durante a solidificação, tratamentos térmicos e deformação durante o processamento para produtos conformados (TIRYAKIOGLU; STALEY, 2003).

A norma técnica ABNT NBR ISO 209 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010a) que leva em consideração as designações da Associação do Alumínio (*The Aluminum Association Inc.*), define e classifica as várias composições químicas do alumínio e das ligas de alumínio, fixando um sistema de designação em função do seu processo e da sua aplicação.

De acordo com o produto, as ligas de alumínio podem ser divididas em dois grupos (ASM INTERNATIONAL, 1993):

- LIGAS CONFORMADAS OU TRABALHADAS (*wrought alloys*) – ligas destinadas à fabricação de produtos semiacabados, como laminados planos (placas, chapas e folhas), laminados não planos (tarugos, barras e arames) perfis extrudados e componentes forjados;
- LIGAS FUNDIDAS (*cast alloys*) – ligas destinadas à fabricação de componentes fundidos.

Somando-se as ligas conformadas e as ligas fundidas, existem mais de 600 ligas reconhecidas industrialmente.

De acordo com a Fig. 2.3 estes dois grupos se subdividem em:

- LIGAS NÃO TRATÁVEIS - Não são endurecidas por meio de tratamento térmico;
- LIGAS TRATÁVEIS TERMICAMENTE – São endurecidas por meio de tratamentos térmicos.

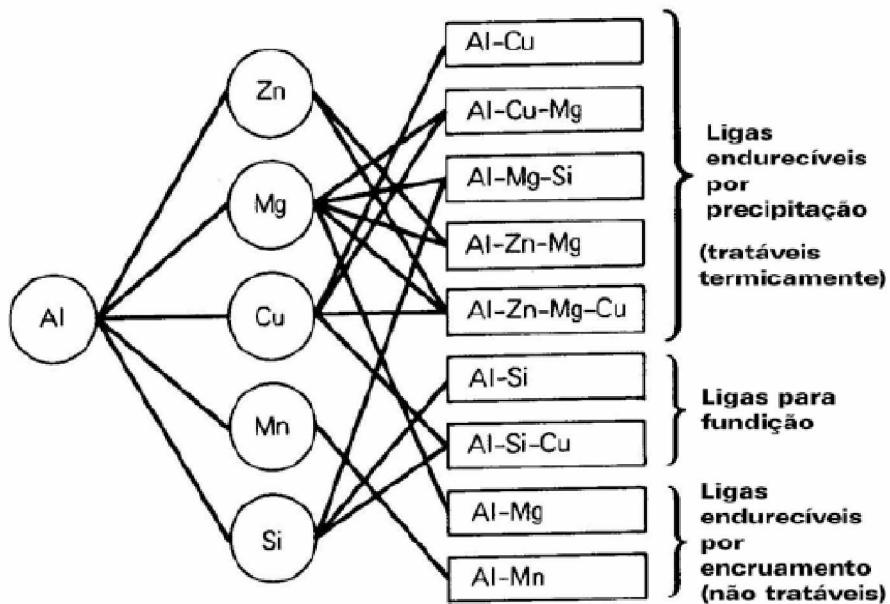


Figura 2.3. Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio (ASM INTERNATIONAL, 1993)

As ligas para conformação são classificadas segundo a Associação do Alumínio (*The Aluminum Association Inc*). Um sistema de designação numérico de quatro dígitos é utilizado para identificar o alumínio e as ligas de alumínio para conformação como apresentado na Tab. 2.3. A série 1XXX corresponde ao alumínio puro comercial  $Al \geq 99,00\%$ . As ligas das séries 2XXX a 7XXX são determinadas pelo elemento principal presente na liga. Na série 1XXX, as ligas 10XX são usadas para designar o alumínio sem elementos de liga que possui limites naturais de impureza. Os últimos dois dígitos indicam a porcentagem mínima de alumínio. Designações com o segundo dígito diferente de zero indicam um controle especial de uma ou mais impurezas individuais. Nas ligas das séries 2XXX a 7XXX o segundo dígito da designação indica modificação da liga. Se este segundo dígito é zero, indica a liga original, se varia de 1 a 9, indica modificações na liga original. Os últimos dois dígitos não possuem significância especial, mas servem para identificar as diferentes ligas dentro da série (ASM INTERNATIONAL, 1990a).

Tabela 2.3. Classificação das ligas de alumínio para conformação (ASM INTERNATIONAL, 1990a)

Série	Elementos de liga principais
1XXX	Alumínio ≥ 99,00%
2XXX	Cu
3XXX	Mn
4XXX	Si
5XXX	Mg
6XXX	Mg, Si
7XXX	Zn
8XXX	Sn, Li, Fe, Cu, Mg
9XXX	Reservado para uso futuro

#### 2.1.4 Mecanismos de endurecimento das ligas de alumínio

Um dos maiores objetivos na fabricação das ligas de alumínio é o aumento da resistência mecânica. Em geral, a resistência mecânica das ligas de alumínio pode ser aumentada por diversos métodos (KATGERMAN; ESKIN, 2003):

- Endurecimento por solução sólida;
- Endurecimento pelo tamanho do grão;
- Endurecimento por trabalho à frio ou deformação;
- Endurecimento por precipitação.

Endurecimento por solução sólida (solubilização): Segundo Katgerman e Eskin (2003), este tipo de endurecimento envolve aumento da resistência à tração e limite de escoamento produzido pelos elementos de liga em solução sólida. Os elementos em solução produzem distorções elásticas no reticulado, atuando assim, como uma barreira ao movimento de discordâncias.

Os elementos mais comumente adicionados às ligas de alumínio comerciais são cobre, magnésio, manganês, silício e zinco. Esses elementos apresentam solubilidade significante no alumínio, e em todos os casos a solubilidade aumenta com o aumento da temperatura, como mostrado na Fig. 2.4 (ASM INTERNATIONAL, 1990a).

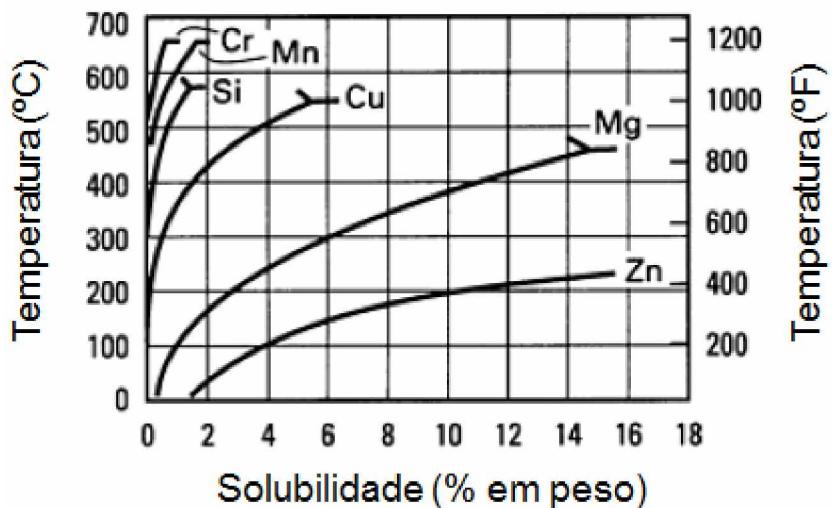


Figura 2.4. Solubilidade sólida em função da temperatura para elementos de liga mais frequentemente adicionados ao alumínio (adaptado de ASM INTERNATIONAL, 1990a)

**Endurecimento pelo tamanho do grão:** Segundo Callister Jr. (2002), o tamanho dos grãos em um metal policristalino influencia suas propriedades mecânicas. Isso se deve ao fato da presença dos contornos de grão agirem como uma barreira ao movimento da discordâncias. Uma vez que dois grãos são de diferentes orientações, uma discordância para passar de um grão para outro precisa alterar sua direção de movimento, isto se torna mais difícil quando a desorientação cristalográfica aumenta. Além disso, a desordem atômica dentro de uma região de contorno de grão resulta em descontinuidade de planos de escorregamento a partir de um grão para outro. Desta forma, microestruturas com grãos mais finos, e consequentemente maior densidade de contornos de grão, são mais resistentes que microestrutura mais grosseira. O efeito do tamanho de grão em ligas de alumínio não é tão forte quanto de ligas ferrosas, entretanto, considerável endurecimento tem sido alcançado com grãos finos (KATGERMAN; ESKIN, 2003).

**Endurecimento por trabalho à frio:** Segundo Katgerman e Eskin (2003), as propriedades dos metais podem ser modificadas pelo trabalho à frio. É um fenômeno pelo qual um metal dúctil se torna mais duro e mais forte quanto é deformado plasticamente. A densidade de discordâncias em um metal aumenta com a deformação à frio e o movimento de uma discordância é impedido pela presença de outras discordâncias. Assim, à medida que a densidade de discordâncias aumenta, esta resistência ao movimento de discordância por outras discordâncias se torna mais pronunciado. Desta forma, a tensão imposta necessária para deformar um metal aumenta com o aumento do trabalho à frio (CALLISTER JR., 2002). Este endurecimento por deformação à frio é chamado encruamento. A denominação

trabalho à frio se deve ao fato deste processo ocorrer abaixo da temperatura de recristalização do material deformado, o que impediria este endurecimento pelo surgimento de novos grãos não deformados.

Endurecimento por precipitação: Para obter este tipo de endurecimento são utilizados os tratamentos térmicos. Segundo Katgerman e Eskin (2003), o tratamento térmico incluindo têmpera e envelhecimento é o método mais utilizado para aumentar propriedades de resistência de ligas de alumínio. A têmpera pode ser entendida como a fixação do estado à alta temperatura de uma liga em baixas temperaturas. Ou seja, este procedimento produz a solução sólida de alumínio supersaturada. É importante ressaltar que esta supersaturação pode ser obtida durante a fundição, a partir do resfriamento de um lingote ou peça semiacabada ao ar, ou como resultado de resfriamento rápido após recozimento especial. O envelhecimento é um termo que abrange os processos de endurecimento por precipitação que ocorrem à temperatura ambiente (envelhecimento natural) ou à altas temperaturas exigindo aquecimento especial (envelhecimento artificial). Em estágios avançados de envelhecimento, o amolecimento do material pode ocorrer devido a mudança na estrutura e distribuição das fases endurecedoras formadas na liga anteriormente.

O efeito do endurecimento por precipitação (ou envelhecimento) é determinado por diversos parâmetros (KATGERMAN; ESKIN, 2003):

- A composição química da solução sólida supersaturada: esta composição é controlada pela temperatura inicial na qual a solução sólida é formada e pela taxa de resfriamento, possibilitando a fixação da composição em alta temperatura à baixas temperaturas.
- A composição da fase resultante formada no envelhecimento em consequência da decomposição da solução sólida supersaturada: estas fases são principalmente fases meta estáveis na forma de precipitados coerentes e semicoerentes. A composição da fase destes precipitados é, normalmente, diferente da prevista pelo diagrama de equilíbrio de fases.
- A cinética da precipitação: Este parâmetro é muito importante, principalmente em sistemas multifases. A sequência da precipitação da fase depende da temperatura e das propriedades da fase.
- Temperatura e tempo: Estes parâmetros tecnológicos afetam todos os fenômenos mencionados anteriormente e são extremamente importantes. A combinação das condições tempo-temperatura é denominada método do envelhecimento.
- As propriedades das fases precipitadas: Estas propriedades determinam diretamente o efeito do endurecimento e incluem o tipo de ligação com a

matriz, a forma, a composição e a estabilidade. Geralmente, precipitados semicoerentes são mais eficientes para o endurecimento que partículas coerentes. Quanto mais finos os precipitados e a maior densidade destes, maior será a resistência da liga após o envelhecimento.

### 2.1.5 Tratamentos aplicados ao alumínio e suas ligas

O sistema para designação dos tratamentos do alumínio e suas ligas é utilizada para todas as formas de produtos, sejam para conformação ou para fundição. O sistema é baseado na sequência de tratamentos mecânicos ou térmicos usados na fabricação da liga de alumínio. As designações do tratamento básico consistem em letras maiúsculas. As subdivisões dentro de um tratamento básico são indicadas por um ou mais dígitos depois da letra maiúscula. Estes dígitos indicam a sequência específica dos tratamentos que produzem uma combinação específica de características ao produto (ASM INTERNATIONAL, 1990a). A Tab. 2.4 apresenta a designação dos tratamentos para as ligas de alumínio endurecidas por tratamento térmico e por deformação.

Tabela 2.4. Designações do tratamento para ligas de alumínio endurecidas por deformação e tratáveis termicamente (adaptado de KATGERMAN; ESKIN, 2003)

Designação	Tratamento	Ligas endurecidas por deformação	Ligas tratáveis termicamente
F	Como fabricado. Sem controle sobre a quantidade de endurecimento por precipitação. Sem limites de propriedades mecânicas.	X	X
O	Recozido, recristalizado. Tratamento que obtém a menor resistência mecânica e maior ductilidade.	X	X
H1	Endurecido por deformação.	X	
H2	Endurecido por deformação e parcialmente recozido.	X	
H3	Endurecido por deformação e estabilizado.	X	
H112	Endurecido por deformação durante a fabricação. Sem controle especial da quantidade de endurecimento por deformação, mas requer teste mecânico e atende limite mínimo de propriedades mecânicas.	X	
H321	Endurecido por deformação durante a fabricação. Quantidade de endurecimento por deformação controlada durante trabalho a quente e a frio.	X	
H116	Especialmente endurecido por deformação, tratamento para resistência à corrosão de ligas alumínio-magnésio.	X	
W	Tratado termicamente por solubilização seguido de envelhecimento natural.		X
T1	Resfriado após processamento à alta temperatura e envelhecido naturalmente à condição estável.		X
T2	Resfriado após processamento à alta temperatura, trabalhado a frio e		X

	naturalmente envelhecido à condição estável.		
T3	Tratado termicamente por solubilização, trabalhado a frio e envelhecido naturalmente à condição estável.		X
T4	Tratado termicamente por solubilização e envelhecido naturalmente à condição estável.		X
T5	Resfriado após processamento à alta temperatura e envelhecido artificialmente.		X
T6	Tratado termicamente por solubilização e envelhecido artificialmente, normalmente até a máxima resistência mecânica.		X
T7	Tratado termicamente por solubilização e estabilizado ou superenvelhecido.		X
T8	Tratado termicamente por solubilização, trabalhado a frio e envelhecido artificialmente.		X
T9	Tratado termicamente por solubilização, envelhecido artificialmente e trabalhado a frio.		X
T10	Resfriado após processamento à alta temperatura, trabalhado a frio e envelhecido artificialmente.		X

## 2.2 As ligas de alumínio da série 6XXX

As ligas de alumínio da série 6XXX contêm silício e magnésio aproximadamente na proporção requerida para formar o intermetálico siliceto de magnésio ( $Mg_2Si$ ), assim tornando-as tratáveis termicamente.

Na Tab. 2.5 é apresentada a composição química de algumas ligas de alumínio da série 6XXX segundo as designações da Associação do Alumínio (*The Aluminum Association Inc.*). Apesar de não serem tão resistentes quanto às ligas das séries 2XXX e 7XXX, as ligas de alumínio da série 6XXX apresentam boa conformabilidade, soldabilidade, usinabilidade e resistência à corrosão, associadas à média resistência mecânica. Estas ligas podem passar pelo tratamento T4 (tratamento térmico de solubilização) e endurecidas no tratamento T6 por tratamento térmico de precipitação. As principais utilizações incluem aplicações arquitetônicas, quadros de bicicleta, equipamento de transporte, pontes, estruturas soldadas, entre outras (ASM INTERNATIONAL, 1990a).

Tabela 2.5. Composição química de ligas de alumínio da série 6XXX (adaptado de THE ALUMINUM ASSOCIATION, 2015)

Designação Internacional Registrada			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros		Alumínio (mínimo)
Nº	Data	País									Cada	Total	
6005A	1972	França	0,50-0,90	0,35	0,30	0,50	0,40-0,70	0,30	0,20	0,10	0,05	0,15	Restante
6061	1954	EUA	0,40-0,80	0,70	0,15-0,40	0,15	0,80-1,20	0,04-0,35	0,25	0,15	0,05	0,15	Restante
6063	1954	EUA	0,20-0,60	0,35	0,10	0,10	0,45-0,90	0,10	0,10	0,10	0,05	0,15	Restante
6082	1972	EAA	0,70-1,30	0,50	0,10	0,40-1,00	0,60-1,20	0,25	0,20	0,10	0,05	0,15	Restante
6351	1958	EUA	0,70-1,30	0,50	0,10	0,40-0,80	0,40-0,80	...	0,20	0,20	0,05	0,15	Restante

A função dos principais elementos de liga presentes na liga de alumínio 6351 é apresentada a seguir por ordem alfabética. É importante ressaltar que é difícil precisar a influência de cada elemento de liga em separado, pois a interação dos mesmos causa diferentes modificações nas propriedades do alumínio. Os principais elementos de liga adicionados às ligas de alumínio da série 6XXX e seus maiores efeitos são (ASM INTERNATIONAL, 1990a):

Magnésio (Mg): é o principal elemento de liga da série 5xxx. Sua solubilidade sólida máxima é 17,4%, mas o teor de magnésio nas ligas conformadas atuais não excede 5,5%. O magnésio precipita preferencialmente nos contornos de grão como uma fase altamente anódica ( $Mg_5Al_3$  ou  $Mg_5Al_8$ ), a qual produz suscetibilidade à fratura intergranular e corrosão sob tensão. Ligas conformadas contendo até 5% de Mg adequadamente fabricadas são estáveis sob condições normais de utilização. A adição de magnésio marcadamente aumenta a resistência do alumínio sem diminuir a ductilidade. Resistência à corrosão e soldabilidade são boas.

Silício (Si): depois do ferro, é a impureza em maior nível no alumínio comercial eletrolítico (0,01 a 0,15%). Em ligas conformadas, o silício é usado com o magnésio em níveis até 1,5% para produzir  $Mg_2Si$  em ligas tratáveis termicamente da série 6XXX. Ligas de alumínio-silício de alta pureza possuem até 3% de Si, sendo a faixa mais crítica de 0,17 a 0,8%. Adições de silício (0,5 a 4,0%) reduzem a tendência de fratura em ligas alumínio-cobre-magnésio. Pequenas quantidades de magnésio adicionadas a qualquer liga contendo silício a tornará tratável termicamente, mas o inverso não é verdadeiro, pois o excesso de magnésio acima do requerido para formar  $Mg_2Si$  nitidamente reduz a solubilidade sólida deste composto. Modificação do silício pode ser alcançada através da adição de sódio em ligas eutéticas e hipoeutéticas e

pelo fósforo em ligas hipereutéticas. Até 12% de Si é adicionado em ligas conformadas usadas como revestimento para chapas de brazagem. Ligas contendo cerca de 5% de Si adquirem uma cor preta quando anodizadas e são usadas para propósitos ornamentais

**Magnésio-Silício (Mg-Si):** Ligas conformadas do grupo 6xxx contém até 1,5% de magnésio e silício numa taxa aproximada para formar  $Mg_2Si$ , que é, 1,73:1. A máxima solubilidade do  $Mg_2Si$  é 1,85%, e ela diminui com a temperatura. Precipitação sobre envelhecimento ocorre pela formação de zonas Guinier-Preston (devido à descoberta destas zonas por dois cientistas, Guinier e Preston, em 1938) e uma precipitação muito fina. Ambos conferem um aumento na resistência dessas ligas, embora não tão grande como no caso das ligas 2xxx ou 7xxx.

Segundo Tiryakioglu e Staley (2003), as ligas de alumínio Al-Mg-Si (série 6XXX) podem ser divididas em três grupos. Ligas no primeiro e segundo grupo possuem quantidades balanceadas de Mg e Si.

No primeiro grupo, Mg e Si são adicionados entre 0,8% e 1,2%. Estas ligas, representadas pela liga 6063, podem ser facilmente extrudadas e podem ser temperadas ao ar na prensa de extrusão, eliminando a necessidade de uma operação separada de tratamento térmico de solubilização.

As ligas no segundo grupo contêm Mg mais Si em excesso de cerca de 1,4%. Consequentemente, estas ligas desenvolvem maior resistência mecânica durante o envelhecimento. Devido à sua maior temperabilidade, os produtos destas ligas são usualmente tanto temperados em água após a extrusão ou tratado por solubilização e temperado à agua em operações separadas. A liga 6061 é um exemplo deste grupo.

As ligas no terceiro grupo contêm Si em excesso na quantidade necessária para formar  $Mg_2Si$ , e a presença deste excesso de Si promove uma resposta adicional ao endurecimento por envelhecimento tanto pelo refinamento do tamanho das partículas  $Mg_2Si$  e pela precipitação do Si. Na Fig. 2.5 é apresentado o efeito do teor de Mg e Si no limite de resistência à tração em ligas Al-Mg-Si. O silício pode também reduzir a ductilidade e causar fragilidade intergranular, a qual é atribuída em parte à tendência do Si de seregar-se nos contornos de grão. As ligas 6082 e 6351 são exemplos deste grupo.

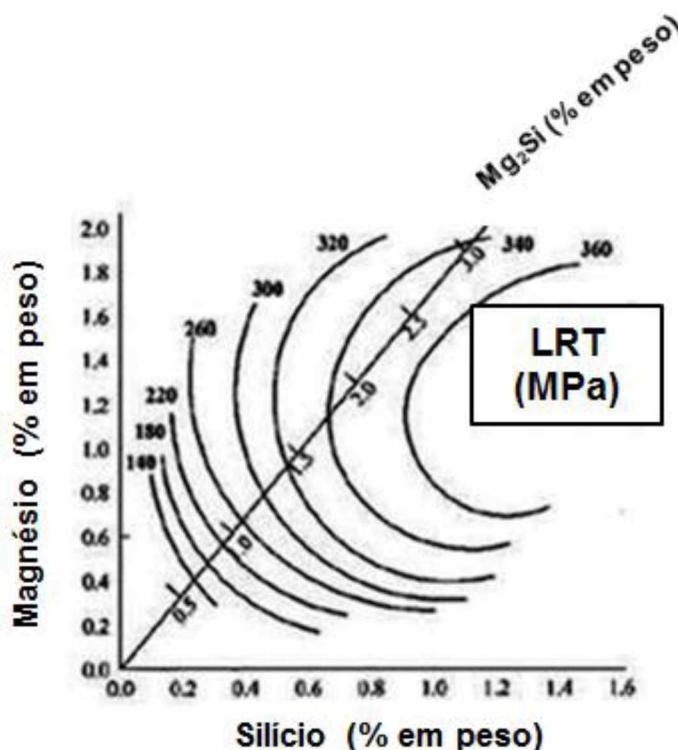


Figura 2.5. O efeito do teor de Mg e Si no limite de resistência à tração em ligas Al-Mg-Si (TIRYAKIOGLU; STALEY, 2003)

### 2.2.1 A liga de alumínio 6351

A liga de alumínio 6351 é geralmente utilizada em aplicações estruturais, onde média a alta resistência é exigida. Comercialmente está disponível nas formas de barras, tubo e perfis estruturais. Esta liga oferece média à alta resistência mecânica quando submetida ao tratamento T6, alta resistência à corrosão, boa conformabilidade em tratamentos O e T4, boa soldabilidade e média usinabilidade. É tratável termicamente e suscetível a anodização para fins de proteção (ALCOA; ALUMÍNIO & CIA, 2010). Dentre as principais aplicações pode-se citar a engenharia estrutural, construção de navios, veículos e equipamentos, acessórios para cabos, entre outras (CBA - COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO; VOTORANTIM METAIS, 2012). Na Tab. 2.6 são apresentadas as principais propriedades mecânicas de algumas ligas de alumínio da série 6XXX, incluindo a liga de alumínio 6351.

A liga de alumínio 6351, assim como as ligas 6082 e 6005A também da série 6XXX, contém uma quantidade de  $Mg_2Si$  superior às ligas 6063 e 6061, mas com um substancial excesso de silício. Um excesso de 0,2% de Si aumenta a resistência de uma liga contendo 0,8% de  $Mg_2Si$  em cerca de 70 MPa (TIRYAKIOGLU; STALEY, 2003).

Tabela 2.6. Propriedades mecânicas de ligas de alumínio da série 6XXX (CBA - COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO; VOTORANTIM METAIS, 2012)

Liga	Tratamento	Limite de resistência à tração mín. (MPa)	Limite de escoamento mín. (MPa)	Alongamento mín. (%)	Coeficiente de expansão linear (L/°C)	Dureza Brinell
6005A	T5	260	215	8	$23 \times 10^{-6}$	-
	T6	270	225	6		82
6061	T4	180	110	16	$24 \times 10^{-6}$	62
	T6	260	240	8		82
6063	T4	130	70	14	$23 \times 10^{-6}$	42
	T5	150	110	9		54
	T6	205	170	8		68
6082	T4	205	110	12	$24 \times 10^{-6}$	62
	T6	300	255	6		90
6351	T4	220	130	16	$24 \times 10^{-6}$	62
	T6	290	225	8		90

Esta maior resistência alcançada por esta liga pode ser comprovada por meio dos valores de dureza da liga 6351 que ficam em torno de 90 HV (Fig. 2.6) e do limite de resistência à tração de 287,50 MPa (Fig. 2.7). Outra observação importante é que além da boa resistência mecânica, a liga 6351 apresenta a maior capacidade de deformação dentre às ligas mais resistentes (6082 e 6005A), alcançando níveis de deformação próximos de 6%.

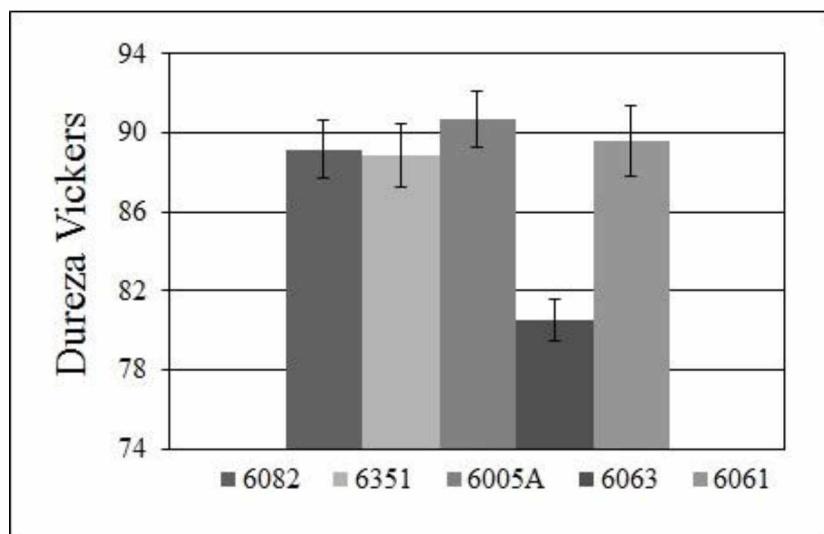


Figura 2.6. Dureza Vickers das ligas de alumínio da série 6XXX (GONÇALVES, 2012)

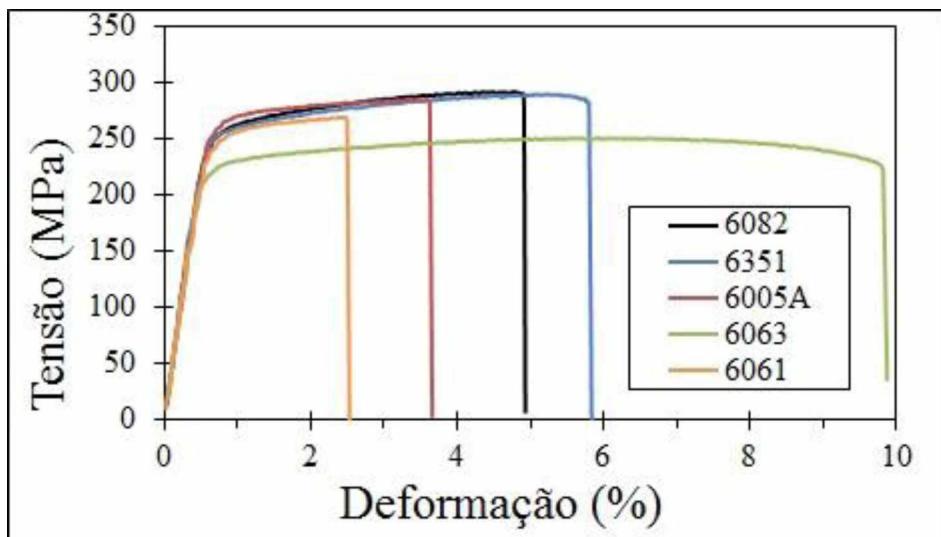


Figura 2.7. Diagrama tensão x deformação das ligas de alumínio da série 6XXX (GONÇALVES, 2012)

### 2.3 Processos de usinagem convencional para abertura de furos e roscas

A usinagem é um processo de fabricação que tem por objetivo conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer desses três itens, por meio da retirada de material. Este material retirado pela ferramenta durante o processo de usinagem é denominado cavaco e caracteriza-se por apresentar forma geométrica irregular (FERRARESI, 1970). E no âmbito da indústria metal mecânica, os processos de usinagem são um dos mais utilizados, movimentando bilhões de dólares todos os anos e agregando bastante valor às peças produzidas por estes processos. Em termos econômicos, o custo da usinagem corresponde a mais de 15% do valor de todos os produtos fabricados em todos os países industrializados (MERCHANT, 1998 apud TRENT; WRIGHT, 2000).

Os processos de usinagem convencionais são assim denominados por se tratarem de processos que utilizam energia mecânica como energia predominante para a retirada de material. Dentro dos processos de usinagem convencional podem ser citados os processos de furação, alargamento e rosqueamento utilizados para a abertura de furos e roscas internas. Existem outras formas de se obterem furos como por meio da fundição, puncionamento, eletroerosão, laser, etc. Porém, os processos de usinagem convencionais anteriormente citados são os mais utilizados na indústria, devido à sua versatilidade, baixo custo envolvido e também a simplicidade de operação (DE SOUZA, 2011). A furação com brocas está incluída no grupo de

processos de fabricação por usinagem com ferramenta de geometria definida. Sendo um dos processos mais utilizados. Junto com o torneamento, é uma das operações mais importantes, envolvendo aproximadamente 30% de todas as operações de usinagem de metal (TONSHOFF, 1994 apud CASTILLO, 2005).

### 2.3.1 Furação

Segundo Ferraresi (1970) a furação é um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de um furo geralmente cilíndrico numa peça, com auxílio de uma ferramenta geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça giram e simultaneamente a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina. Existem diversas variações do processo de furação, sendo algumas das principais apresentadas na Fig. 2.8.

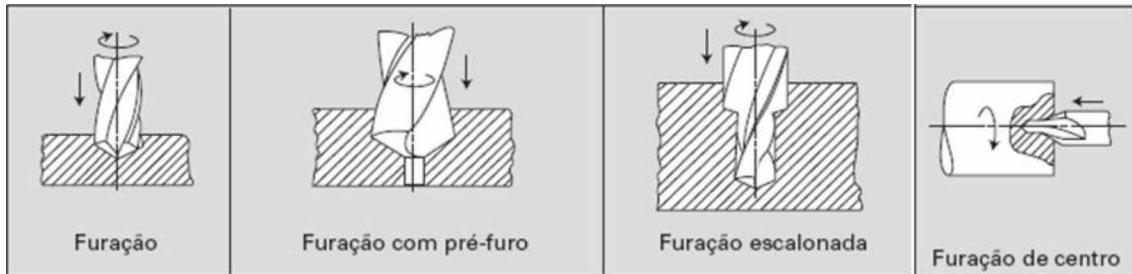


Figura 2.8. Principais operações de furação (MACHADO et al., 2011)

No processo de furação a retirada de material e a consequente produção do furo são realizadas pelo movimento relativo entre a ferramenta (broca) e a peça. Desta forma, a superfície gerada é decorrente da ação dos movimentos de corte (movimento relativo entre as arestas de corte e a peça) e movimento de avanço (realizado na direção de avanço provocando a retirada contínua de material). O movimento efetivo é o movimento resultante dos movimentos de corte e avanço, realizados ao mesmo tempo (MACHADO et al., 2011). As direções dos movimentos de corte, avanço e efetivo na furação são apresentados na Fig. 2.9.

Os principais parâmetros de corte em um processo de usinagem são velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ).

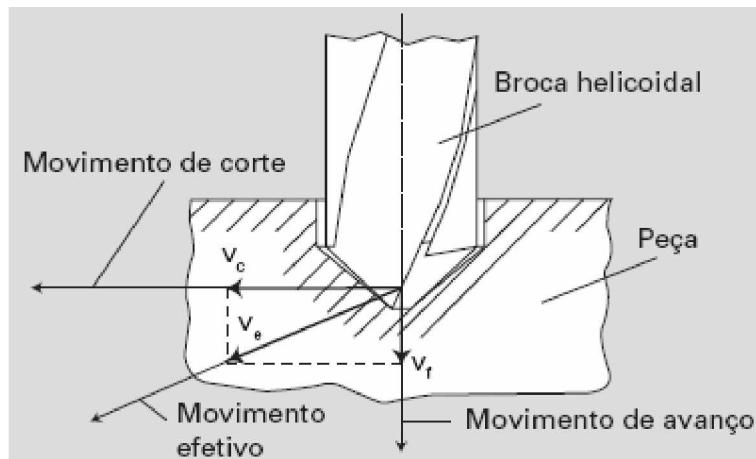


Figura 2.9. Direções dos movimentos de corte, avanço e efetivo na furação (MACHADO et al., 2011)

A velocidade de corte ( $v_c$ ) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de corte (MACHADO et al., 2011). No processo de furação diminui à medida que se caminha da periferia para o centro da broca, uma vez que ela depende do diâmetro (d) e da rotação (n) da broca, como é apresentado na Eq. 2.1.

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (2.1)$$

Onde:

$v_c$ : Velocidade de corte (m/min);

d: Diâmetro da broca (mm);

n: Rotação (rpm).

Segundo De Souza (2011) quando materiais dúcteis são furados em cheio, caso das ligas de alumínio, a formação da aresta postiça de corte (APC) próximo ao centro da broca é inevitável, pois este fenômeno ocorre em baixas velocidades de corte. Segundo Trent e Wright (2000) ao se usinar ligas com mais de uma fase em sua estrutura e em temperaturas moderadas, proporcionando o encruamento, certa quantidade do material da peça pode se aderir na superfície de saída da ferramenta, próximo à aresta de corte, deslocando a formação do cavaco para longe do contato da ferramenta. Esta porção de material solidária à peça e aderida à superfície de saída da ferramenta é denominada aresta postiça de corte (APC). Este fenômeno modifica drasticamente a formação do cavaco e, por consequência, exerce grande influência na força de usinagem, geração de calor e acabamento das peças usinadas. A utilização

de baixas velocidades de corte pode gerar APC numa porção maior do diâmetro da broca. Já a furação em altas velocidades de corte, apesar de minimizar a formação da APC, pode acelerar o desgaste sofrido pela ferramenta de corte.

Em processos de usinagem que utilizam ferramentas rotativas, caso da furação, o avanço ( $f$ ) pode ser definido como o avanço da ferramenta de corte em cada rotação da mesma, medida em (mm/rot). De acordo com De Souza (2011), o crescimento do avanço facilita a quebra do cavaco, e consequentemente, sua remoção de dentro do furo. Porém, o aumento do avanço é limitado, pois valores muito elevados podem causar a quebra da broca ou a paralisação do avanço da máquina.

Já a profundidade de corte ( $a_p$ ) é definida como a profundidade de penetração da ferramenta de corte na peça, medida em uma direção perpendicular ao plano de trabalho (MACHADO et al., 2011). O plano de trabalho é o plano que passa pelo ponto de referência da ferramenta e contém as direções de corte e avanço. No processo de furação a profundidade de corte é representada pelo raio da broca. Em operações de desbaste, nas quais o objetivo é retirar a maior quantidade de material sem preocupação com o acabamento superficial, a profundidade de corte é limitada pela força de corte e sobremetal da peça a ser retirado (diâmetro do furo a ser realizado).

Além dos parâmetros de corte, a geometria da ferramenta de corte exerce grande influência no desempenho da usinagem. A geometria da ferramenta influencia na formação e saída dos cavacos, força de usinagem e, consequentemente, o desgaste da ferramenta, além da qualidade da superfície gerada. Por melhor que seja o material da ferramenta, se a sua geometria não for preparada adequadamente, não haverá êxito na operação. Cada par material de ferramenta/material de peça tem uma geometria de corte apropriada ou ótima (MACHADO et al., 2011). Assim, para o processo de furação, é importante conhecer as principais superfícies e ângulos da broca que muito influenciam durante o processo de usinagem. Na Fig. 2.10 são apresentados os principais elementos, superfícies e ângulos presentes nas brocas helicoidais.

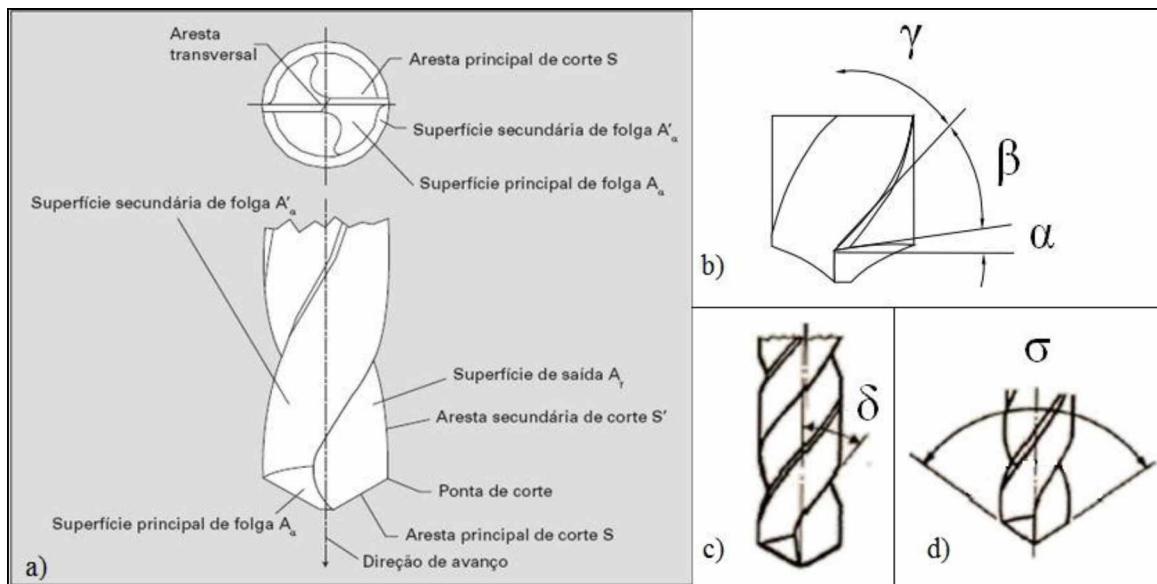


Figura 2.10. Elementos da cunha cortante e ângulos de uma broca helicoidal (a) superfícies e arestas de corte; (b)  $\gamma$ -ângulo de saída,  $\beta$ -ângulo de cunha e  $\alpha$ -ângulo de folga; (c)  $\delta$ -ângulo de hélice e (d)  $\sigma$ -ângulo de ponta (modificada de MACHADO et al., 2011; DE SOUZA, 2011)

Uma característica essencial do processo de furação é a variação da velocidade ao longo da aresta de corte principal. A velocidade é máxima na periferia, que gera a superfície cilíndrica, e se aproxima de zero próximo ao centro da broca, na aresta transversal. O ângulo de saída também diminui partindo da periferia; e a aresta de corte transversal, atua como uma ferramenta com um ângulo de saída negativo muito grande (TRENT; WRIGHT, 2000). Com isso, haverá mais um esmagamento do material do que um corte propriamente dito.

A variação da velocidade e do ângulo de saída ao longo da aresta de corte é responsável por diversos aspectos da furação que são peculiares a esta operação. As brocas são ferramentas esbeltas e submetidas a grandes esforços. Sendo assim, os canais helicoidais devem ser cuidadosamente projetados para permitir o fluxo do cavaco enquanto ao mesmo tempo garante resistência mecânica adequada à ferramenta. Os ângulos da cunha cortante, em especial o ângulo de hélice, são adaptados para a furação de classes específicas de materiais (TRENT; WRIGHT, 2000). Na Fig. 2.11 é apresentada uma classificação de brocas helicoidais segundo o ângulo de saída ( $\gamma$ ) ou ângulo de hélice ( $\delta$ ) e a sua respectiva aplicação.

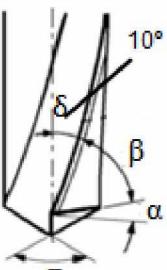
Ângulo da broca	Classificação quanto ao ângulo de hélice	Ângulo da ponta ( $\sigma$ )	Aplicação
 $10^\circ \text{ a } 15^\circ$	Tipo H - para materiais duros, tenazes e/ou que produzem cavaco curto (descontínuo).	80°	Materiais prensados, ebonite, náilon, PVC, mármore, granito.
		118°	Ferro fundido duro, latão, bronze, celeron, baquelite.
		140°	Aço de alta liga.
 $20^\circ \text{ a } 30^\circ$	Tipo N - para materiais de tenacidade e dureza normais.	130°	Aço alto carbono.
		118°	Aço macio, ferro fundido, latão e níquel.
 $35^\circ \text{ a } 40^\circ$	Tipo W - para materiais macios e/ou que produzem cavaco longo.	130°	Alumínio, zinco, cobre, madeira, plástico.

Figura 2.11. Classificação das brocas quanto ao ângulo de hélice (modificado de TELECURSO 2000 PROFISSIONALIZANTE, 1997)

Além de sua geometria também é de grande importância a correta seleção do material da ferramenta de corte para garantir a maior eficiência do processo. Entre os principais materiais utilizados para a fabricação de brocas para aplicações industriais pode-se citar:

- Brocas de aço-rápido (HSS): as brocas de aço rápido são as mais utilizadas no mercado e possuem como principais elementos de liga o tungstênio, cromo, vanádio e manganês. Com o tratamento térmico adequado estas brocas proporcionam a utilização de maiores velocidades em relação às ferramentas de aço carbono. Além disso, estas ferramentas podem ser revestidas, garantindo maior resistência ao desgaste e possibilitando a utilização de maiores velocidades de corte. Os revestimentos mais comuns são nitreto de titânio (TiN), carboneto de titânio (TiC) e óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ).
- Brocas inteiriças de metal duro: as brocas de metal duro são basicamente compostas de carboneto de tungstênio e cobalto. São mais resistentes que as de aço rápido e consequentemente conseguem usinar com maiores velocidades de corte. Normalmente aplicadas para furos de diâmetro pequeno

(<20 mm) e exigem máquinas-ferramentas com rotação, rigidez e potência suficientes.

- Brocas com insertos intercambiáveis: são brocas para a produção de furos de tamanho médio e grande (>20 mm) e também exigem máquinas-ferramentas com rotação, rigidez e potência suficientes. O material mais comum utilizado em pastilhas intercambiáveis para a furação é o metal duro. As cerâmicas também são amplamente utilizadas em furação na forma de insertos intercambiáveis em ferramentas para furos de grande diâmetro. Para diâmetros menores, têm sido realizados testes em furação com cerâmicas à base de nitreto de silício, apresentando um bom desempenho na usinagem de ferro fundido. Além do metal duro e das cerâmicas, os materiais superduros, como o diamante policristalino (PCD) e o nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN) também podem ser utilizados na forma de insertos intercambiáveis para ferramentas de grande diâmetro. Em ligas de alumínio, é possível a utilização de brocas helicoidais com insertos de materiais superduros, devido às características de menores esforços na usinagem destas ligas. A vida da ferramenta, nesse caso, supera o tempo de vida de ferramentas convencionais (TONSHOFF, 1994 apud CASTILLO, 2005).

Para a correta seleção do material e geometria mais adequados da broca é necessário conhecer os esforços aos quais a ferramenta de corte é submetida durante o processo de furação. O conhecimento da força de usinagem que age sobre a cunha cortante e o estudo de seus componentes são de grande importância, porque possibilitam estimar a potência necessária para o corte, bem como as forças atuantes nos elementos da máquina-ferramenta, além de manter relação com o desgaste das ferramentas de corte, influenciando a viabilidade econômica do processo (MACHADO et al., 2011).

A força durante a usinagem é influenciada principalmente por dois fatores: (i) a resistência ao cisalhamento do material da peça sob condições de corte e (ii) a área do plano de cisalhamento (TRENT; WRIGHT, 2000). Além destes, outros fatores como o material e geometria da ferramenta de corte, condições de corte, atmosfera de usinagem, vibrações, presença de aresta postiça de corte, entre outros, também influenciam a força durante a remoção dos cavacos.

Durante a furação, a resistência à penetração da broca é devida principalmente (DE SOUZA, 2011):

- ao corte do material nas duas arestas principais;
- ao corte e esmagamento do material na aresta transversal;

- ao atrito das guias com a parede do furo e entre a superfície de saída da broca e o cavaco.

A força de usinagem atuante sobre a cunha cortante durante o processo de furação pode ser decomposta em três componentes principais: força de corte ( $F_c$ ), força de avanço ( $F_f$ ) e força passiva ( $F_p$ ). As direções destas componentes são apresentadas na Fig. 2.12 (DE SOUZA, 2011).

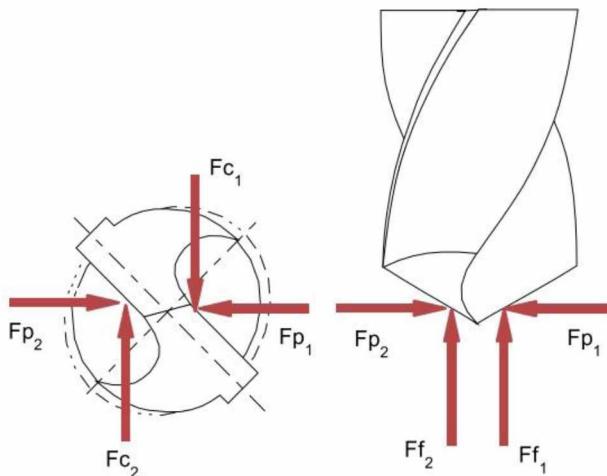


Figura 2.12. Direções das componentes da força de usinagem durante o processo de furação (SCHROETER; STOETERAU; WEINGAERTNER, 2004).

Segundo De Souza (2011) e Schroeter; Stoeterau; Weingaertner (2004), algumas considerações sobre as componentes da força de usinagem e momento torsor na furação podem ser feitas:

- Força de corte ( $F_c$ ): predominantemente responsável pelo Momento Torsor ou Torque ( $M_t$ ) que atua na ferramenta durante a furação. É decorrente da resistência ao corte do material usinado. O atrito das guias da broca e dos cavacos na parede do furo também contribui para o aumento desta componente. A força de corte pode ser calculada a partir da Eq. 2.2.

$$F_c = K_c \frac{f \cdot d}{4} \quad (2.2)$$

Onde:

$F_c$  = Força de corte (N);

$K_c$  = Pressão específica de corte ( $N/mm^2$ );

$f$  = Avanço ( $mm/rot$ );

$d$  = Diâmetro da broca (mm).

- Força de avanço ( $F_f$ ): decorrente da atuação da aresta transversal (corte deficiente e esmagamento de material) e da resistência ao corte (penetração) do material usinado. A força de avanço pode ser calculada a partir da Eq. 2.3.

$$F_f = K_f \frac{f \cdot d \cdot \operatorname{sen}(\frac{\sigma}{2})}{2} \quad (2.3)$$

Onde:

$F_f$  = Força de avanço (N);

$K_f$  = Pressão específica de corte na direção de avanço ( $\text{N/mm}^2$ );

$f$  = Avanço (mm/rot);

$d$  = Diâmetro da broca (mm);

$\sigma$  = Ângulo de ponta da ferramenta (graus).

- Força passiva ( $F_p$ ): admitindo que a broca seja simétrica, a força passiva atuando em uma aresta de corte anula a força passiva atuante na outra. Ela é desprezível quando comparada com a força de corte ( $F_c$ ) e a força de avanço ( $F_f$ );
- Momento Torsor ou Torque ( $M_t$ ): momento resultante das componentes que atuam nas arestas de corte devido ao movimento de rotação da broca.

Devido aos esforços anteriormente citados as brocas estarão sujeitas às avarias (lascamentos, trincas), desgaste e também colapso (quebra da ferramenta). A quebra da ferramenta implica em imediata troca da ferramenta e pode causar danos importantes à máquina-ferramenta e a peça a ser usinada. Portanto, deve ser cuidadosamente evitada. Já o desgaste, que pode ocorrer de diversas formas como mostrado na Fig. 2.13, deve ser controlado, pois causa a perda da capacidade de corte da ferramenta. A perda da capacidade de corte é avaliada geralmente através de um valor limite de uma grandeza de desgaste medida na ferramenta ou através da rugosidade ou variação de diâmetro do furo. Somente em processos de acabamento justifica-se um monitoramento da peça. Em geral, nos processos de desbaste (nos quais se inclui a furação) as tolerâncias dimensionais e rugosidade têm menor importância, sendo os limites de desgaste definidos pela solicitação térmica e/ou mecânica máxima da ferramenta (DE SOUZA, 2011). A evolução do desgaste determinará o momento da afiação da broca ou de sua substituição.

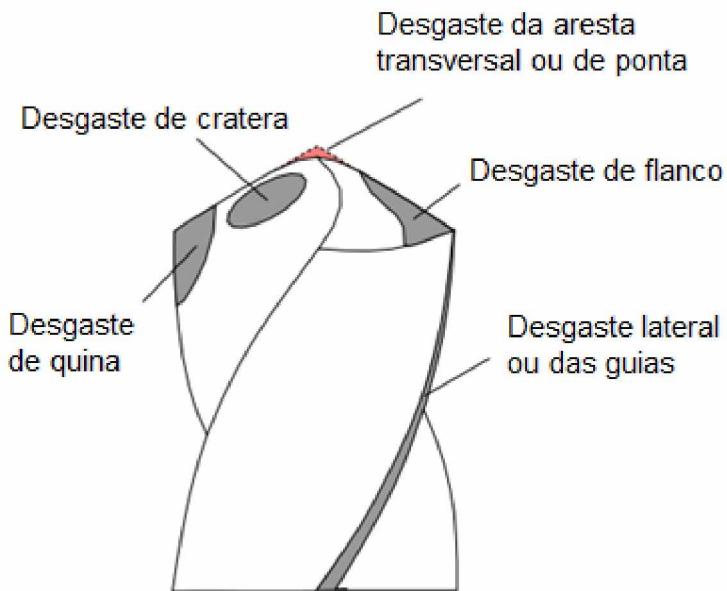


Figura 2.13. Desgaste em brocas helicoidais (modificado de SCHROETER; STOETERAU; WEINGAERTNER, 2004)

Como definido anteriormente, a usinagem é um processo de fabricação com remoção de cavaco. Segundo Ferraresi (1970) o cavaco é a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular.

A formação do cavaco é um processo periódico, com cada ciclo dividido em quatro eventos distintos, sendo o último o movimento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta. As condições nas quais esse escorregamento acontece têm influências marcantes em todo o processo, particularmente no mecanismo de formação do cavaco, na força de usinagem, no calor gerado durante o corte e, consequentemente, na temperatura de corte e nos mecanismos e taxa de desgaste das ferramentas, afetando assim seu tempo de vida (MACHADO et al., 2011).

Os cavacos na furação são inicialmente gerados no centro da broca. O movimento do centro da broca é mais lento na face de corte em relação à sua extremidade. Em virtude da variação dos ângulos de inclinação ( $\lambda$ ) e de saída ( $\gamma$ ) com o raio da broca, tem-se que o cavaco formado na região mais próxima do centro da ferramenta é mais curto do que aquele formado na região externa da broca. Essa diferença no comprimento do cavaco força o seu fluxo para o centro da ferramenta em vez de ser perpendicular à face de corte (BORBA, 2013). Além disso, a parte central da hélice da broca força o enrolamento do cavaco, como mostrado na Fig. 2.14.

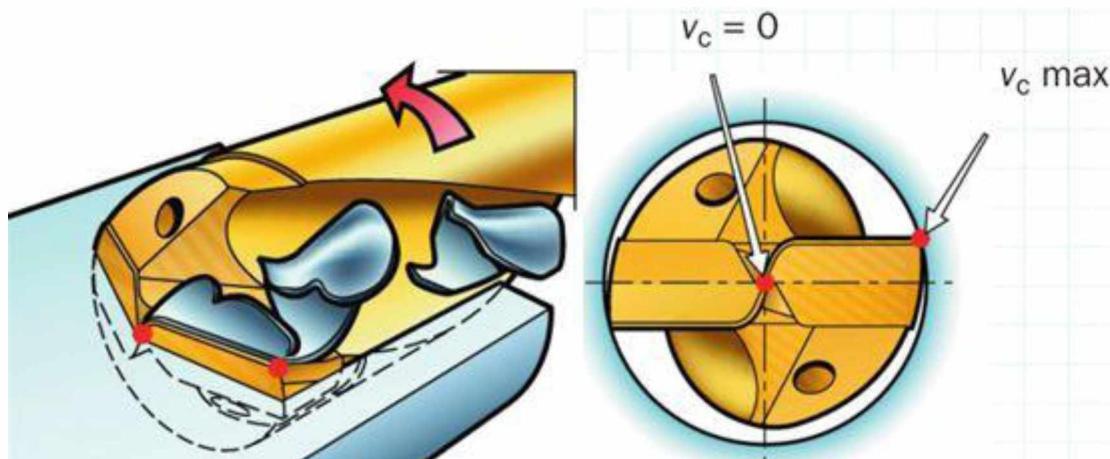


Figura 2.14. Formação do cavaco na furação com diferentes velocidades de corte atuantes na aresta de corte (SANDVIK, 2013)

Um dos maiores problemas do processo de furação é a saída (expulsão) dos cavacos de dentro do furo. Se os cavacos não forem formados de maneira tal que propiciem sua fácil retirada eles podem provocar o entupimento do furo, aumento do momento torsor (torque) necessário e a consequente quebra da broca. A quebra de uma broca dentro do furo é um problema grave, pois além da perda da ferramenta, a retirada da ferramenta do interior do furo é, em geral, uma tarefa cara e demorada que, muitas vezes, ocasiona a rejeição da peça. Se for levado em conta que um furo é normalmente um pequeno detalhe de uma peça bem maior, tal rejeição pode representar perda substancial (DE SOUZA, 2011).

Além dos problemas anteriormente citados, a formação e evacuação do cavaco é um fator dominante na furação, pois afeta diretamente a qualidade do furo (SANDVIK, 2013). Desta forma, é fundamental induzir a geração de cavacos que tenham uma forma tal que sejam de fácil remoção do furo (BORBA, 2013). O cavaco em fita ocupa muito espaço e pode entupir os canais helicoidais da broca. Geralmente a forma de cavaco mais conveniente é a helicoidal, e o cavaco em lascas é preferível quando houver pouco espaço disponível, ou quando o cavaco deve ser removido por fluido refrigerante, como no caso da furação profunda (FERRARESI, 1970). Assim, uma das formas de evitar os problemas com os cavacos na furação e promover sua retirada da zona de corte é a aplicação dos fluidos de corte. A capacidade do fluido de corte em remover os cavacos da zona de corte depende da sua viscosidade e vazão, além, é claro, da natureza da operação de usinagem e do tipo de cavaco que está sendo formado (MACHADO et al., 2011). Na Fig. 2.15 são apresentadas algumas formas de cavacos gerados na furação e recomendações quanto à sua forma para melhor eficiência do processo segundo a Sandvik (2013).

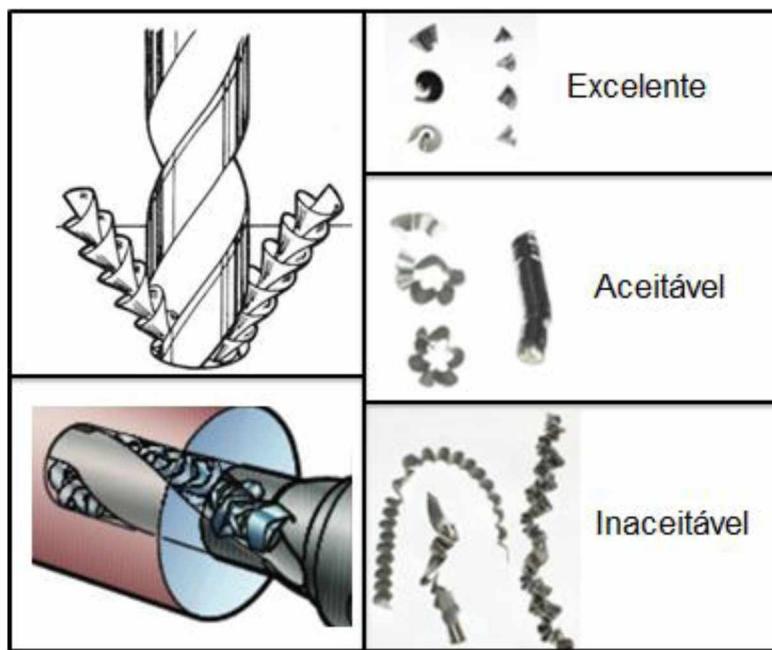


Figura 2.15. Formas de cavacos gerados na furação e recomendações quanto à sua forma para melhor eficiência do processo (SANDVIK, 2013)

O conhecimento detalhado do processo de formação do cavaco é também requerido para o entendimento da exatidão e condição da superfície usinada do componente desejado. Superfícies usinadas são inevitavelmente danificadas a certo grau, desde que o cavaco é formado pela ruptura por cisalhamento à altas taxas de deformação (TRENT; WRIGHT, 2000).

Além disso, segundo Novaski (1994) durante a execução de peças pelas máquinas-ferramenta, surgem desvios de fabricação nas peças, provocadas pelas inexatidões das máquinas, tais como aqueles ocorridos devido à falta de rigidez, dispositivo de fixação, desgaste da ferramenta, etc. Tais desvios devem ser limitados e enquadrados em tolerâncias, de tal forma a não prejudicar o funcionamento do conjunto.

Como discutido anteriormente, o processo de furação é um processo de usinagem essencialmente de desbaste. Sendo assim, quando é necessário melhor acabamento dos furos geralmente este processo é seguido do processo de alargamento. Desta forma, a questão dos desvios e erros envolvidos na fabricação de furos será discutida para o processo de alargamento.

### 2.3.2 Alargamento

O Alargamento é uma operação de usinagem na qual uma ferramenta rotativa realiza um leve corte para aperfeiçoar a exatidão de um furo e diminuir a rugosidade da superfície (ASM INTERNATIONAL, 1990b).

O processo de furação com brocas helicoidais é o mais comum para a obtenção de furos. Porém, devido à diversos fatores, os furos obtidos pela furação não atendem os requisitos de exatidão e acabamento superficial exigidos atualmente em peças e componentes que serão utilizados em montagens mecânicas. Segundo Tonshoff et al. (1994) apud Bezerra et al. (2001) estes requisitos não são frequentemente cumpridos utilizando brocas helicoidais convencionais, pois elas precisam executar diversas tarefas: as arestas de corte precisam gerar cavacos idênticos, os cavacos precisam ser transportados pelos canais helicoidais para fora do furo, o torque e a força necessários ao processo precisam ser transmitidos pelo corpo da broca, o calor gerado precisa ser dissipado parcialmente pelo corpo da broca, entre outros. Desta forma, por um lado os canais helicoidais precisam prover espaço suficiente para o transporte dos cavacos, e por outro lado, o corpo da broca precisa apresentar resistência e rigidez adequada para transmitir torque e força de avanço sem quebrar e com mínima deformação e vibração.

Assim, quando as especificações de projeto exigem estreitos valores de tolerâncias dimensionais, geométricas e de rugosidade, deve-se empregar uma operação de acabamento no furo originado pela furação com broca helicoidal, o alargamento (ROSA, 2012). As principais operações de alargamento são basicamente o alargamento cilíndrico e o alargamento côncico, apresentadas na Fig. 2.16.

A ferramenta de corte utilizada no processo de alargamento é denominada alargador. Segundo (STEMMER, 1995) os alargadores são ferramentas multicortantes, de forma cilíndrica ou côncica que, através dos movimentos de corte (rotativo) e avanço (axial), servem para alargar e acabar furos, deixando-os com dimensões mais precisas. Os alargadores apresentam uma sequência de arestas de corte e canais, alternados na periferia do cilindro ou cone. As arestas podem ser paralelas ao eixo do alargador ou então helicoidais, com hélice à direita ou à esquerda. Vários tipos de alargadores estão disponíveis comercialmente para diversas finalidades. Podem ser classificados quanto ao tipo de operação, tipo de haste, etc.

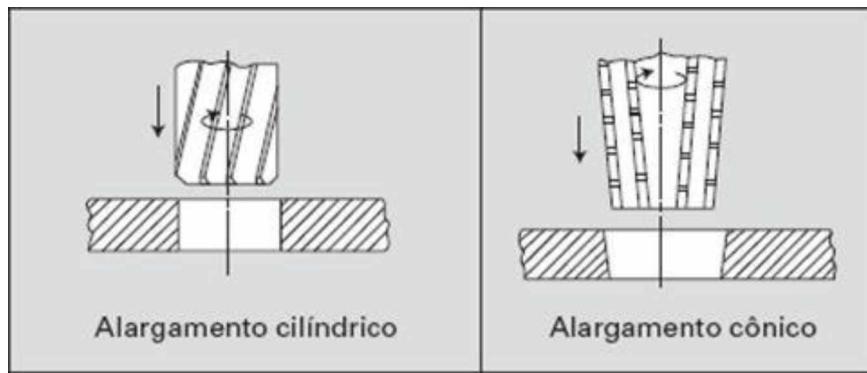


Figura 2.16. Principais operações de alargamento (MACHADO et al., 2011)

Segundo a norma NBR ISO 5420 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010b) os principais tipos de alargadores são:

- Alargador manual;
- Alargador para máquinas com haste cone Morse e canais longos;
- Alargador para máquinas com haste cilíndrica;
- Alargador para máquinas com haste cone Morse;
- Alargador manual para pinos cônicos;
- Alargador para máquinas com haste cone Morse para furos cônicos;
- Alargador para máquinas com haste cilíndrica para furos cônicos;
- Alargador de furos para rebites;
- Alargador de acabamento da conicidade para cones Morse e métricos com haste cilíndrica;
- Alargador de acabamento da conicidade para cones Morse e métricos com haste cone Morse;
- Alargador desbastador para cones Morse e métricos com haste cone Morse
- Alargador sem haste com furo cônicos.

A seleção do alargador mais adequado a ser utilizado para determinada operação depende de diversos fatores. Entre eles é possível citar a composição e dureza da peça, diâmetro, configuração e comprimento do furo, quantidade de material a ser removido, requisitos de acabamento e precisão do furo, quantidade a ser produzida, custo, entre outros (ASM INTERNATIONAL, 1990b).

Na Fig. 2.17 é apresentado um desenho esquemático de um alargador para máquinas com haste cônica identificando seus principais elementos. Já na Fig. 2.18 são apresentados termos e definições da geometria para este mesmo tipo de alargador.

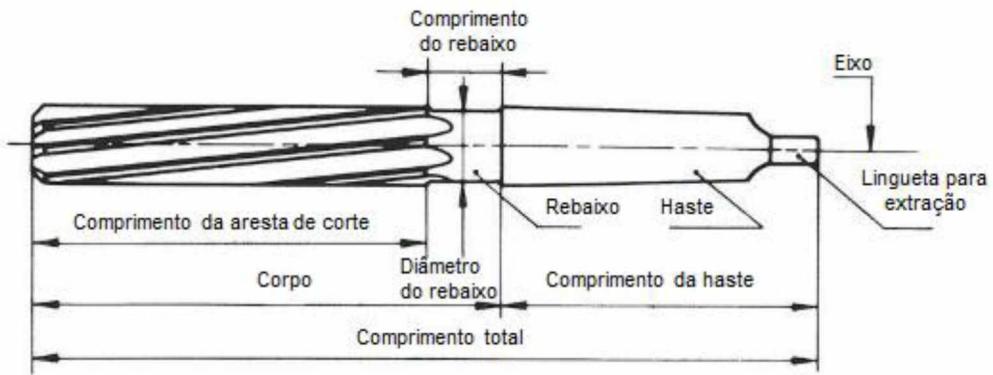


Figura 2.17. Alargador para máquinas com haste cônica (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010b)

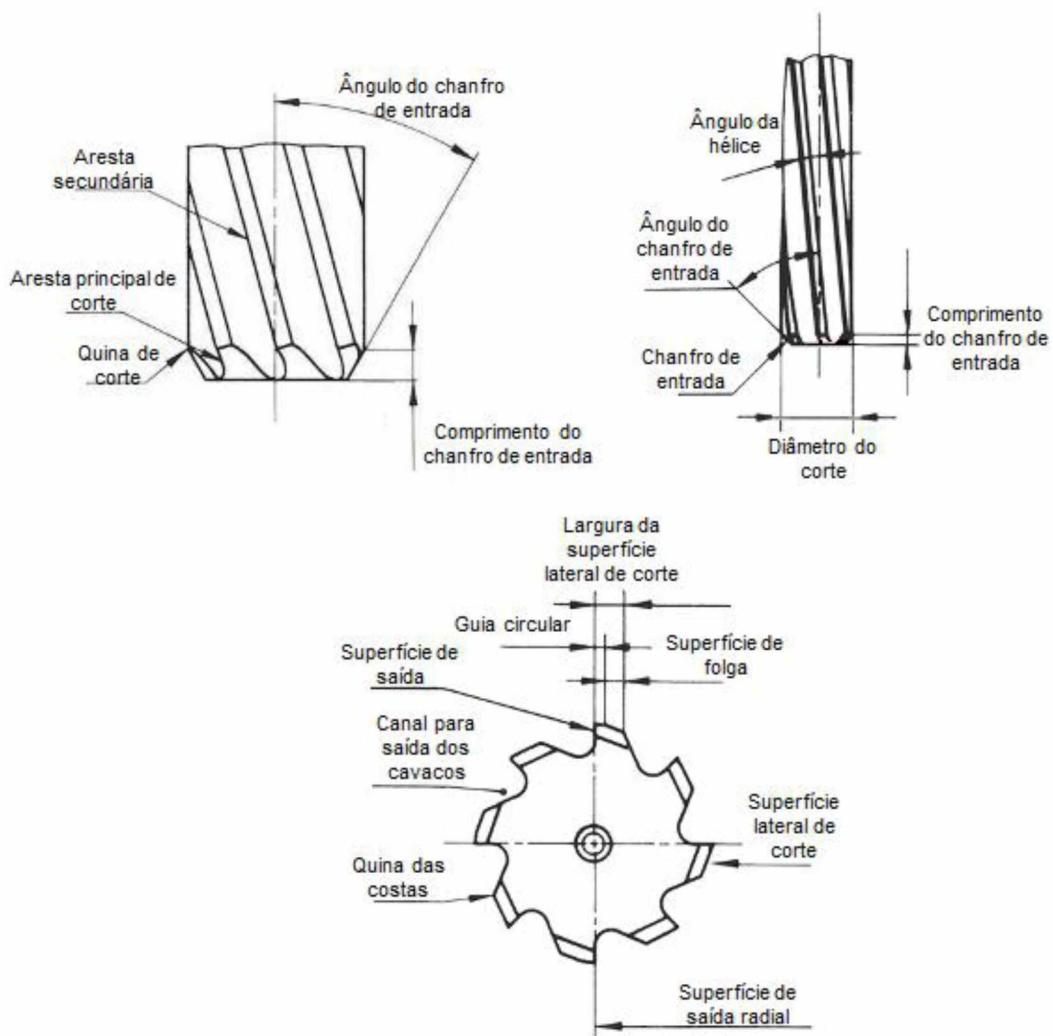


Figura 2.18. Termos e definições da geometria de um alargador para máquinas (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010b)

O sentido de corte se verifica olhando o alargador de topo. Segundo (STEMMER, 1995) os alargadores em geral são de corte à direita. Usando-se, então,

hélice à esquerda, o cavaco é empurrado para frente, evitando que prejudique a superfície já usinada. Além disto, ocorre um empuxo axial que fixa melhor a ferramenta no cone e elimina eventuais folgas da máquina.

Em relação aos materiais utilizados para a fabricação dos alargadores, os alargadores manuais são usualmente produzidos em aço carbono ou baixa liga. Já os alargadores para máquinas são feitos tanto de aço rápido ou com insertos de metal duro montados em suportes de aço baixa liga. Devido ao esforço imposto sobre a ferramenta durante o processo de alargamento ser geralmente bem menor que na furação, consequência principalmente da menor quantidade de material removido no processo de alargamento, os alargadores requerem menor tenacidade que as brocas. Em contrapartida, os alargadores devem possuir máxima dureza a fim de se obter máximo acabamento superficial e vida da ferramenta (ASM INTERNATIONAL, 1990b). Encontram-se também disponíveis ferramentas inteiriças para alargamento produzidas em metal duro. Apesar de mais caras que as ferramentas de aço rápido, as ferramentas de metal duro duram cerca de 10 vezes mais. Por possuir vida mais longa, são preferivelmente utilizadas no alargamento de aços com dureza superior à 40 HRC. Além disso, para o uso eficiente destas ferramentas, máxima rigidez da máquina-ferramenta, alargador e peça é essencial (ASM INTERNATIONAL, 1990b).

Além do material da ferramenta de corte, os parâmetros de corte, velocidade de corte e avanço, tem efeito importante sobre o acabamento superficial do furo e a vida da ferramenta, e também o custo envolvido no processo. De acordo com Asm International (1990b), devido ao projeto dos alargadores, estes são mais facilmente danificados (desgastados) que as brocas. Assim, geralmente na prática, durante o alargamento são utilizadas velocidades de corte de cerca de dois terços das utilizadas na furação. Já o avanço é determinado pelo grau de qualidade da superfície desejada e geralmente obtêm-se superfícies melhores com avanços menores (STEMMER, 1995). Ainda acerca das condições de corte, a definição do sobremetal a ser retirado durante o processo de alargamento é de grande importância. Segundo Stemmer (1995) a qualidade e a exatidão da medida de furos alargados dependem principalmente da diferença entre o diâmetro do furo aberto por uma operação preliminar e o diâmetro do furo alargado.

Segundo Santos e Costa (2005) a precisão e acabamento do furo alargado dependem da fixação da peça, rigidez da máquina-ferramenta, parâmetros de corte, aplicação de fluido de corte e principalmente da condição do pré-furo. Além disso, a condição inicial do pré-furo, como cilindricidade, retilineidade e regularidade da superfície são de fundamental importância para o acabamento do furo alargado. Segundo (BEZERRA et al., 2001) a determinação correta de parâmetros de usinagem

para garantir a fabricação de furos de boa qualidade em ligas de alumínio é difícil devido à maleabilidade das ligas de alumínio e, em menor grau, à presença de partículas endurecidas que tendem a aderir na face da ferramenta resultando na formação de aresta postiça de corte (APC) e na produção associada de cavacos irregulares e pobre acabamento superficial.

### 2.3.3 Rosqueamento

O rosqueamento, segundo Ferraresi (1970), é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de filetes, por meio da abertura de um ou vários sulcos helicoidais de passo uniforme, em superfícies cilíndricas ou cônicas de revolução. Para tanto, a peça ou a ferramenta gira e uma delas se desloca simultaneamente segundo uma trajetória retilínea paralela ou inclinada ao eixo de rotação. O rosqueamento pode ser interno ou externo, manual ou realizado em máquinas-ferramentas como torno, rosqueadeiras, fresadoras, centros de usinagem, etc.. Além disso, esse processo pode ser realizado utilizando ferramentas de aresta única ou multiarestas no torno ou utilizando ferramentas especiais como cossinetes e machos de corte, para roscas externas e internas, respectivamente. Na Fig. 2.19 são apresentadas as principais operações de rosqueamento interno e externo.

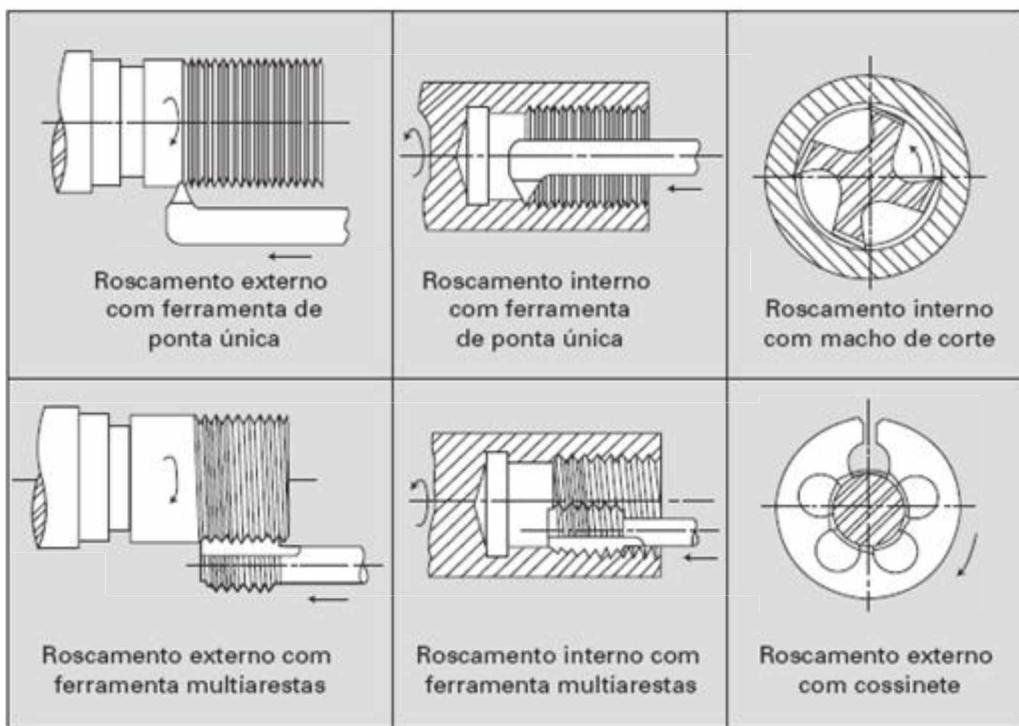


Figura 2.19. Principais operações de rosqueamento interno e externo (MACHADO et al., 2011)

O rosqueamento interno com macho de corte utiliza como ferramenta o macho, que é uma ferramenta cilíndrica ou cônicas. Este possui arestas de corte no formato de filetes dispostas em sua periferia. Por meio da combinação de movimento de rotação e movimento axial, o macho corta e consequentemente forma a rosca interna (ASM INTERNATIONAL, 1990b).

Segundo Pereira, Da Silva e Guimarães (2010) o macho de corte é atualmente a ferramenta de corte mais utilizada para a fabricação de roscas internas devido à sua alta produtividade e sua maior precisão, seja em pequenos ou grandes diâmetros. A usinagem de rosca com macho segue um procedimento padrão que irá se repetir principalmente em operações automatizadas. As principais etapas do processo com machos de corte para máquinas, apresentadas na Fig. 2.20 são: entrada, corte, parada, retorno e saída. Estas etapas e sua correta execução tornam o processo de rosqueamento um dos mais complexos processos de usinagem. Para sua correta execução é essencial uma perfeita sincronia entre os movimentos de corte (rotação) e avanço realizados pela ferramenta durante a usinagem.

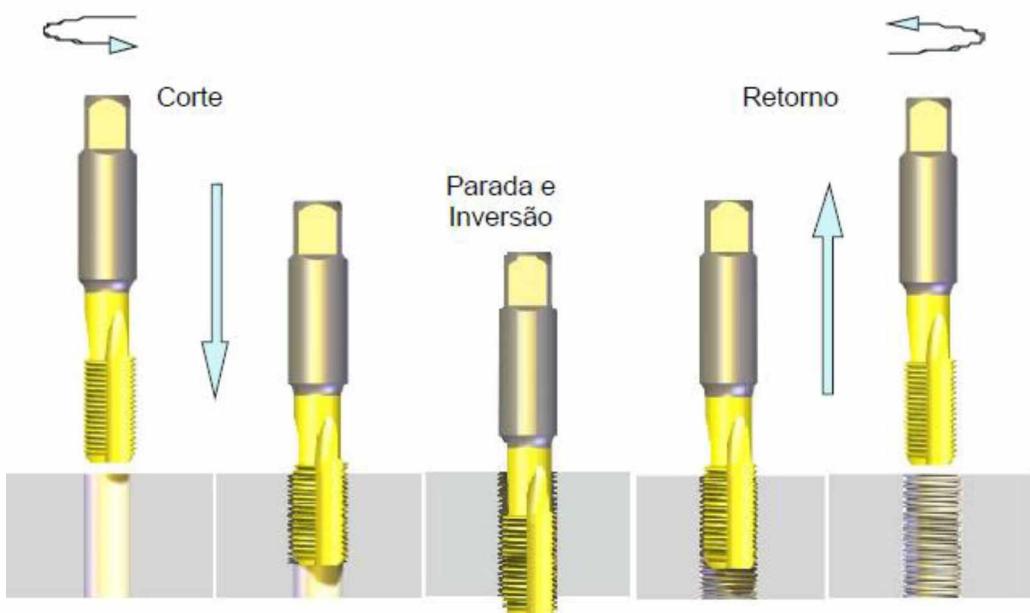


Figura 2.20. Principais etapas do processo de rosqueamento interno com macho de corte (DA MOTA, 2009)

No início do rosqueamento a ferramenta aproxima-se da peça que será rosqueada, com velocidade de corte e avanço pré-definidos. Ao tocar a peça, os dentes cónicos iniciam o desbaste e os dentes finais do macho dão a forma à rosca. Após o corte, a ferramenta interrompe sua rotação (parada), inverte o sentido de giro e

o avanço, de forma que o macho deixa a peça sem danificar a rosca previamente produzida (DA MOTA, 2009).

Além da complexidade em relação aos movimentos também é preciso ressaltar outras características do processo como a dificuldade da saída do cavaco, principalmente em furos cegos usinando materiais que provocam a formação de cavacos curtos, a dificuldade de lubrificação e refrigeração quando necessário, grandes profundidades roscadas e sistemas de fixação da ferramenta. Todos estes fatores são muito importantes em aplicações industriais, pelo fato do processo de rosqueamento normalmente ser uma das últimas operações em uma peça. Nesta etapa, a peça já possui alto valor agregado, e assim qualquer erro ou falha pode gerar retrabalho e consequentemente altos custos (PEREIRA; DA SILVA; GUIMARÃES, 2010).

Existem vários tipos de machos de corte. Segundo a norma NBR ISO 5967 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010c), que trata da nomenclatura e terminologia aplicadas aos machos para roscar, os principais tipos de machos são:

- Machos curtos para roscar em máquinas e manualmente;
- Machos para roscar em máquinas com haste longa;
- Machos para roscar porcas em máquinas automáticas;
- Machos sem haste para roscar;
- Machos cônicos para roscar.

Já em relação às características da parte de corte dos machos de roscar, os principais tipos são (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010c):

- Machos para roscar com entrada curta, média ou longa;
- Machos para roscar porcas com entrada extralonga;
- Macho laminador;
- Macho para roscar com entrada helicoidal com ou sem canais de lubrificação;
- Macho para roscar com canais retos;
- Macho para roscar com canais retos e entrada helicoidal;
- Macho para roscar com canais helicoidais à direita e à esquerda;
- Macho para roscar com filetes intercalados;
- Macho escalonado para roscar.

Na Tab. 2.7 são apresentados alguns tipos de machos e suas respectivas características e aplicações.

Tabela 2.7. Tipos, características e aplicações de machos (adaptado de OSG SULAMERICANA, 2012)

Tipos	Características	Aplicações
 Macho com canais retos e ponta helicoidal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ponta helicoidal (direciona o cavaco).</li> <li>• Empurra o cavaco para frente com baixo torque de corte.</li> <li>• Canal raso de formato único proporciona uma estrutura resistente.</li> <li>• Boa ação de corte.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para furos passantes.</li> <li>• Para materiais em que o cavaco gerado é de forma espiral contínua.</li> <li>• Alta velocidade de rosqueamento.</li> </ul>
 Macho com canais helicoidais	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Canal helicoidal.</li> <li>• Saída do cavaco em direção à haste.</li> <li>• Torque de rosqueamento baixo e aplicável para rosqueamento até o fundo do furo.</li> <li>• Boa ação de corte.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para furos cegos.</li> <li>• Para materiais em que o cavaco gerado é de forma espiral contínua.</li> </ul>
 Macho com canais retos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Canal reto.</li> <li>• Areostas de corte resistentes.</li> <li>• Fácil de reafiar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para ambos os tipos de furo: cego e passante.</li> <li>• Para materiais onde o cavaco é gerado na forma de pó.</li> <li>• Para materiais duros.</li> </ul>

A geometria do macho de corte é um fator determinante na qualidade final da rosca produzida. Desta forma, a seleção do macho para determinada operação deve levar em conta diversos fatores como o material a ser usinado, o tipo de furo (cego ou passante), o comprimento rosqueado, o volume de furos a ser rosqueado, entre outros. Na Fig. 2.21 são apresentados os principais elementos que compõem os machos e na Fig. 2.22 são apresentadas as principais características da parte do corte destas ferramentas.

Para o êxito das operações de rosqueamento os machos possuem em sua geometria canais e chanfro.

Os machos de corte possuem canais por três razões (ASM INTERNATIONAL, 1990b):

- Fornecer arestas de corte;
- Fornecer a remoção dos cavacos e meios para o seu controle;
- Conduzir fluido de corte para as seções de corte do macho.

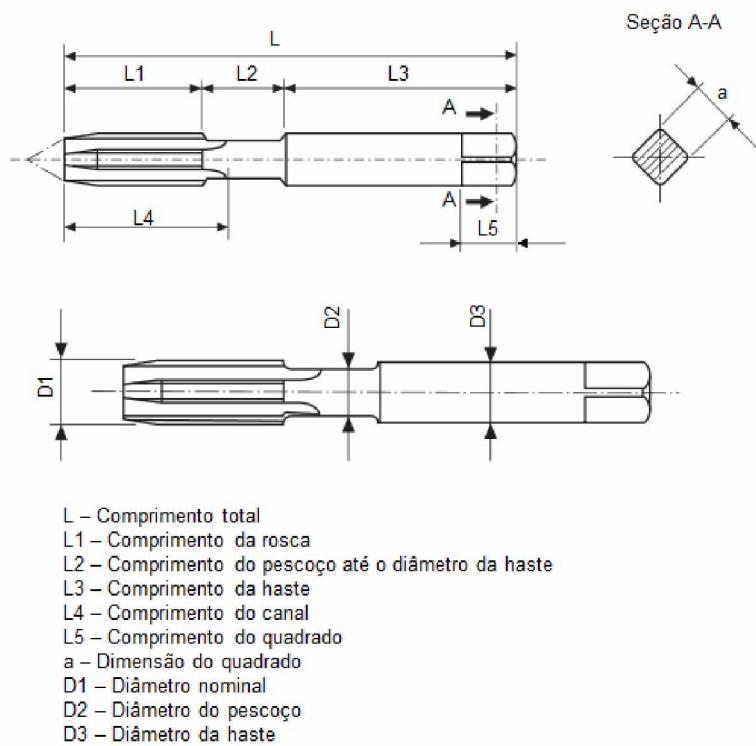


Figura 2.21. Terminologia dos machos de corte (adaptado de ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010c)

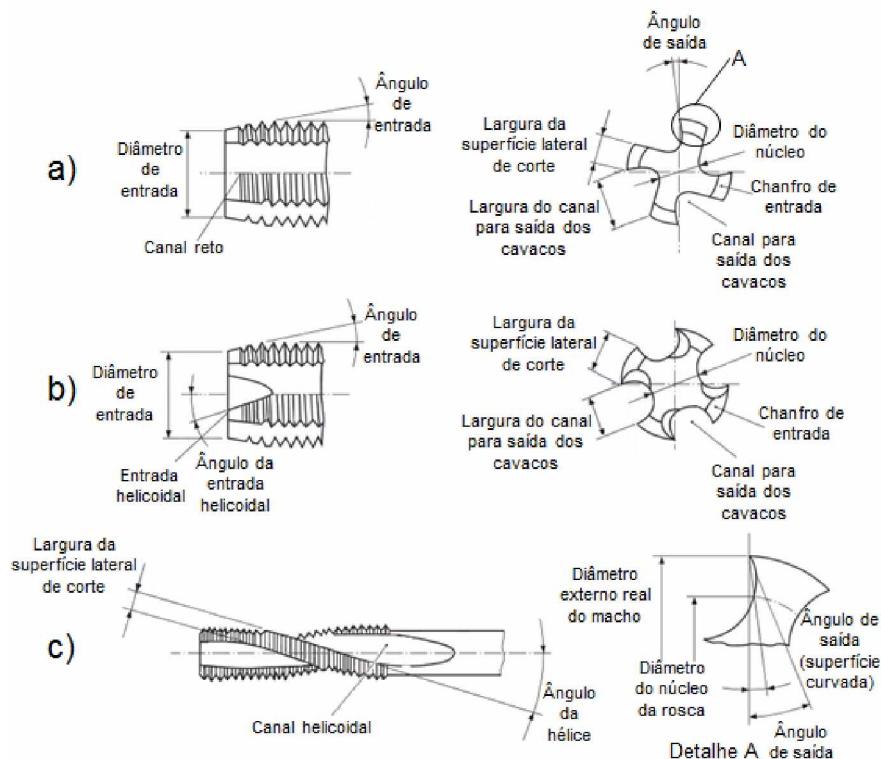


Figura 2.22. Características da parte de corte dos machos: a) machos com canais retos, b) machos com ponta helicoidal e c) machos com canais helicoidais (adaptado de ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010c)

Os machos podem ter canais retos, helicoidais ou a combinação dos dois. Os machos com canais retos são mais comumente utilizados, pois são mais fáceis de serem fabricados que os de canais helicoidais e por apresentarem desempenho satisfatório sob várias condições (ASM INTERNATIONAL, 1990b). Segundo Richt e Sandvik Coromant (2014) o desenho do canal exerce um grande papel no desempenho do macho, na confiabilidade do processo e na qualidade das rosas. Para furos passantes emprega-se macho com ponta helicoidal para que os cavacos sejam empurrados para frente, para fora do furo e de maneira eficaz. O resto do canal pode então ser mais raso para uma melhor entrada de líquido refrigerante, proporcionando uma seção transversal do macho relativamente robusta. Para furos cegos, emprega-se macho com canais helicoidais, para que os cavacos sejam removidos do furo. Os canais precisam então ser projetados para garantir o melhor equilíbrio quanto ao transporte de cavacos, fornecimento de refrigeração e resistência do macho e, naturalmente, considerando o tipo de material da peça, para que os cavacos tenham espaço para sair. Na Fig. 2.23 são apresentados machos com diferentes configurações dos canais e o provável comportamento da formação dos cavacos.

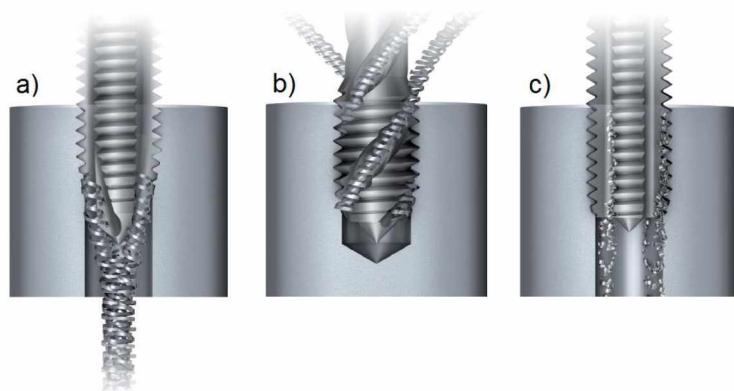


Figura 2.23. Tipos de canais em machos de corte: a) canais retos com ponta helicoidal, b) canais helicoidais e c) canais retos (RICHT; SANDVIK COROMANT, 2014)

O chanfro é um fator importante e influencia a vida do macho. Existem três tipos de chanfros que podem ser aplicados aos machos de corte: chanfro longo (que se estende por 3,5 a 5 filetes), médio (que se estende por 2 a 3 filetes) e curto (que se estende por 1 a 2 filetes) (RICHT; SANDVIK COROMANT, 2014). O chanfro distribui o esforço do corte sobre o maior número de filetes e permite um início mais fácil da rosca na peça. Assim, machos de corte com chanfro longo são especialmente adequados para o rosqueamento em materiais de difícil usinagem. Entretanto, os machos com chanfro longo são raramente adequados para rosqueamento em furos

cegos, pois grande parte do furo não é rosqueado. Além disso, os machos com chanfro longo requerem um movimento maior para produzir roscas completas nos furos (ASM INTERNATIONAL, 1990b). Na Fig. 2.24 é apresentada a geometria de um chanfro utilizado em machos.

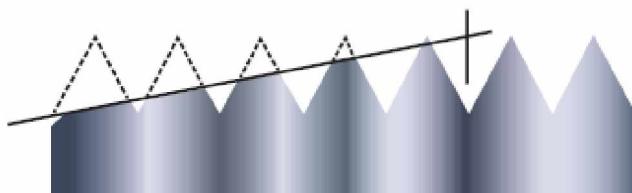


Figura 2.24. Chanfro na parte de corte de um macho (RICHT; SANDVIK COROMANT, 2014)

Além dos canais e do chanfro outro fator importante na geometria dos machos com canais helicoidais é o ângulo de hélice. Este ângulo situa-se normalmente entre 15° e 48°, geralmente ângulos mais elevados são utilizados para o rosqueamento de materiais de cavacos longos e para furos mais profundos (RICHT; SANDVIK COROMANT, 2014).

Ao longo do tempo, diversos materiais têm sido utilizados na fabricação de machos de corte. Os mais utilizados, atualmente, são os machos feitos de aço rápido e metal duro. Porém, o uso dos machos de metal duro é em grande parte restrito à aplicações especiais. Por exemplo, rosqueamento de classes abrasivas de ferros fundidos ou metais não ferrosos abrasivos como fibra de vidro e plásticos reforçados (ASM INTERNATIONAL, 1990b). Já o aço rápido, segundo Richt e Sandvik Coromant (2014), tem sido o material tradicional para machos por ter a tenacidade como propriedade dominante. O avanço no desenvolvimento dos materiais utilizados para a fabricação de machos têm otimizado o equilíbrio entre tenacidade e resistência ao desgaste, e consequentemente, aumentando seu desempenho. Estas características têm sido alcançadas combinando as propriedades do material base da ferramenta com as de revestimentos. Os novos revestimentos garantem melhor adesão ao substrato, maior resistência ao desgaste e também menor atrito entre a ferramenta e a peça. Desta forma, aprimorando o desempenho da ferramenta e também aumentando sua vida.

Para obter roscas de qualidade, além da correta seleção do material e geometria do macho, também é necessária a correta seleção dos parâmetros de corte. No rosqueamento, o avanço é determinado pelo passo da rosca. Desta forma, apenas a velocidade de corte pode ser ajustada. A otimização da velocidade de corte no

rosqueamento se baseia no menor custo por furo e também que proporcione maior vida do macho e máxima produtividade. Uma ampla faixa de velocidades de corte pode ser utilizada com sucesso no rosqueamento de muitos materiais. Entretanto, no rosqueamento de materiais endurecidos ou ligas difíceis de usinhar, é especialmente importante selecionar cuidadosamente a velocidade de corte para obter resultados ótimos (ASM INTERNATIONAL, 1990b). De uma maneira geral, quanto maior a dureza do material a ser rosqueado menor deve ser a velocidade corte utilizada. Além do material da peça, o comprimento do furo também influencia na velocidade de corte a ser utilizada. Quanto maior o comprimento a ser rosqueado, menor deve ser a velocidade de corte, devido à acumulação dos cavacos.

A vida do macho e a produtividade no rosqueamento podem ser elevadas pela utilização de fluidos de corte. O fluido de corte é muito importante em operações de usinagem, pois eles atuam lubrificando e refrigerante a zona de corte, além de auxiliar a remoção dos cavacos e proteger a máquina-ferramenta contra oxidação. Porém, em alguns processos, devido às suas características, a utilização dos fluidos de corte é mais importante que em outros processos de usinagem. O rosqueamento é um destes processos. De acordo com a Asm International (1990b) isso acontece devido à dois fatores. O primeiro fator é que os dentes do macho de corte são mais suscetíveis à sofrerem danos pela geração de calor que outras superfícies de ferramentas de corte. O segundo fator determinante são os cavacos formados no rosqueamento, que são mais propensos a se congestionar no rosqueamento do que em operações nas quais as ferramentas de corte não são rodeadas pelo material da peça. Assim, os fluidos de corte são geralmente utilizados no rosqueamento de todos os metais, exceto ferros fundidos cinzentos. Para o rosqueamento de ligas de cobre e alumínio são indicadas emulsões de óleo solúvel. Estes fluidos garantem adequada refrigeração e remoção dos cavacos.

Como já comentado anteriormente, o macho de corte é bastante exigido durante o processo de rosqueamento, devido ao atrito e também possível acúmulo dos cavacos, principalmente em furos cegos. Assim, o conhecimento das forças envolvidas no processo é de extrema importância (DA MOTA, 2006). O torque na ferramenta é um dos parâmetros mais estudados em processos de rosqueamento. Segundo Da Mota (2006) o sinal representativo do torque na operação de rosqueamento é composto por diferentes fases, como apresentado na Fig. 2.25. A região 1 corresponde ao período de usinagem propriamente dito durante o processo de rosqueamento, no qual é possível identificar os valores médio e máximo do sinal de torque. A análise do torque na região 1 permite otimizar as condições de corte e controlar o desgaste da ferramenta. Já a região 2 indica o momento da reversão do

sentido de rotação do macho e seu respectivo retorno. Nesta região, o pico no valor do torque na reversão do macho, acontece devido ao atrito do macho com os filetes da rosca durante seu retorno. Portanto, pode indicar modificações na qualidade da rosca realizada.

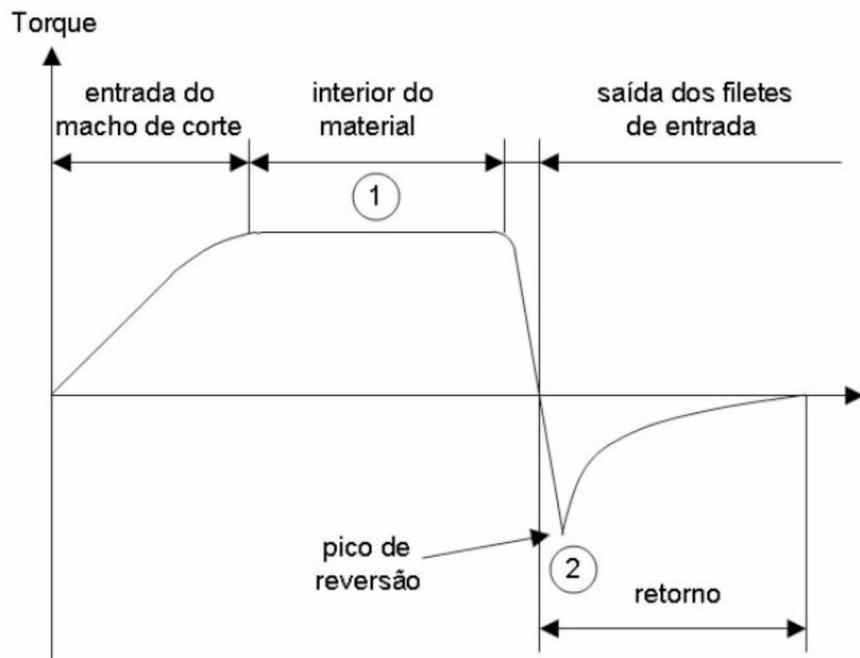


Figura 2.25. Comportamento do torque no rosqueamento interno com macho de corte (DA MOTA, 2006)

## 2.4 Usinabilidade

O termo usinabilidade não é fácil de ser definido, e às vezes é erroneamente interpretado e utilizado como sendo puramente uma propriedade de um material ao ser usinado. Porém, existem diversas variáveis envolvidas durante um processo de usinagem. Entre elas estão, o material da ferramenta utilizado, a geometria da mesma, as condições de corte, a atmosfera do processo de usinagem (uso ou não de fluido de corte), o processo de usinagem em questão, etc. Desta forma, Trent e Wright (2000) sugerem que a usinabilidade não é uma propriedade, mas o modo do material se comportar durante a usinagem. Em termos gerais a usinabilidade pode ser definida como sendo uma grandeza que indica a facilidade ou dificuldade de se usinar um material. A usinabilidade pode ser avaliada através de um ou mais critérios como os citados a seguir:

- Vida da ferramenta;
- Taxa de metal removido;
- Forças de corte
- Qualidade superficial;
- Forma do cavaco;
- Temperatura, etc.

#### 2.4.1 Usinabilidade das ligas de alumínio

Comparado a outros materiais, o alumínio é fácil de usinar. Entretanto, considerando a ampla faixa de ligas disponíveis, é necessário entrar em detalhes acerca das características da usinagem das ligas de alumínio (JOHNE, 1994). Alguns comentários acerca dos principais critérios que podem ser considerados medidas de usinabilidade na usinagem das ligas de alumínio serão apresentados a seguir.

Mesmo na usinagem de materiais considerados de boa usinabilidade, como algumas ligas de alumínio, a ferramenta de corte sofrerá um desgaste que vai determinar o momento de sua troca. Quanto à forma, normalmente o desgaste encontrado nas ferramentas durante a usinagem do alumínio é o desgaste de flanco. Entre os principais mecanismos de desgaste atuantes nas ferramentas de corte estão a abrasão, adesão, difusão e oxidação. No caso do alumínio e suas ligas que têm ponto de fusão de 659°C a temperatura não deve ser um grande problema para a ferramenta de corte. Desta forma, mecanismos de desgaste diretamente ativados pela temperatura não devem estar presentes (exceto talvez em algumas ligas Al-Si), portanto adesão e abrasão devem ser os mais prováveis mecanismos de desgaste presentes.

Em relação à força e potência requeridas durante a usinagem das ligas de alumínio pode-se afirmar que as ligas de alumínio comparadas a outros materiais (ferros fundidos, aços, ligas de titânio, ligas de níquel) apresentam menor potência requerida, necessitando maior potência apenas que a usinagem do magnésio. Neste caso o fator mais influente é a dureza e também a resistência do material. Porém, é preciso ressaltar que quando se fala em usinabilidade outro fator como a ductilidade do material pode ser determinante (MACHADO et al., 2011). Assim, ligas de alumínio com maior capacidade de deformação podem implicar em maiores áreas de contato cavaco-ferramenta e consequentemente, maiores força e potência durante a usinagem.

Sobre o acabamento da superfície de peças usinadas de ligas de alumínio, Johne (1994) afirma que em geral, quanto maior a resistência e a dureza da liga

conformada a ser usinada, mais lisa é a superfície produzida. Além do próprio material a ser usinado, as condições de corte tem grande influência na rugosidade. A velocidade de corte, por exemplo, é um parâmetro de usinagem importante o qual influencia a qualidade superficial. Em geral, a rugosidade é inversamente proporcional à velocidade de corte. À baixas velocidades de corte a rugosidade produzida aumenta drasticamente, devido à formação de aresta postiça de corte. A região de baixas velocidades de corte deve, como uma regra, ser evitada (JOHNE, 1994).

Um dos maiores problemas na usinagem do alumínio é o controle do cavaco. Por ser um material dúctil, normalmente os cavacos obtidos são contínuos, de grande espessura, resistentes e difíceis de serem controlados. Devido à sua estrutura CFC, ocorrem maiores deformações antes da ruptura do metal.

Em operações de usinagem como furação, alargamento ou rosqueamento, um projeto especial da ferramenta se torna necessário a fim de facilitar a remoção dos cavacos, minimizar rebarbas e evitar o entupimento dos canais. Normalmente são utilizados maiores ângulos de saída e quebra-cavacos.

Características da usinagem do alumínio e suas ligas podem ser afetadas pela variação de fatores como elementos de liga, impurezas, processos de fundição e tratamentos aplicados ao metal (DINIZ; MARCONDÉS; COPPINI, 2013). Alguns elementos como chumbo (Pb), bismuto (Bi), estanho (Sn) e antimônio (Sb) podem ser adicionados a algumas ligas de alumínio para promover a quebra do cavaco. Dasch et al. (2009), em seus estudos, introduziram pequenas quantidades de Pb, Bi, In e Sn em uma liga Al-Si hipoeutética e por meio de microscopia eletrônica verificaram que uma pequena camada de alumínio enriquecida por estes aditivos cobriram a broca, a qual acreditam ser a principal fonte de redução do atrito e melhora na evacuação do cavaco. Porém, devido ao impacto adverso ao meio-ambiente, a adição de Pb têm sido restrita devido à sua toxicidade. Na Tab. 2.8 são apresentados alguns elementos utilizados na formação de ligas de alumínio e sua respectiva influência na sua usinabilidade.

A forma do cavaco e sua capacidade de quebra são grandemente influenciadas pelo tipo da liga de alumínio utilizado e suas propriedades. A liga de alumínio 2011 é uma liga de alta resistência e de corte fácil a qual apresenta excelente usinabilidade. Os cavacos formados são quebrados mais facilmente permitindo, portanto, um excelente controle do cavaco, em adição à uma excelente qualidade superficial e baixas taxas de desgaste da ferramenta. Ligas como a 2024-T4 e 2017-T4 tendem a produzir cavacos contínuos, assim necessitando do uso de quebra cavaco na ferramenta de corte. Insertos com revestimento de diamante por CVD com quebra cavaco são ideais para garantir um alto grau de controle de cavaco nestes materiais.

Ligas como a 6061-T6 e 5056-H38 são comparativamente mais difíceis de usinrar e produzem cavacos resistentes que são difíceis de quebrar. Ligas mais dúcteis como a 5052, 3003 e 1100 tendem a produzir cavacos mais moles, necessitando assim, de seleção cuidadosa de quebra-cavacos e revestimentos de ferramenta (HANDBOOK OF ALUMINUM, 1996).

Tabela 2.8. Elementos de liga e sua influência na usinabilidade das ligas de alumínio (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013)

Elementos de liga	Influência na usinabilidade
Sn, Bi e Pb	Atuam como lubrificantes e como fragilizadores do cavaco
Fe, Mn, Cr e Ni	Combinam entre si, com o alumínio e/ou com o silício, formando partículas duras, que favorecem a quebra do cavaco e que, em grande quantidade, têm efeito abrasivo sobre a ferramenta
Mg	Em teores baixos (cerca de 0,3%) aumenta a dureza do cavaco e diminui o coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta
Si	Aumenta a abrasividade da peça – a vida da ferramenta diminui com o aumento da fase primária do silício
Cu	Forma o intermetálico CuAl <sub>2</sub> , que fragiliza o cavaco
Zn	Não exerce influência na usinabilidade

Kamiya e Yakou (2008) avaliaram a capacidade de quebra do cavaco em várias ligas de alumínio conformadas. Nas ligas, Cu<sub>2</sub>Al, Al<sub>6</sub>Mn, Mg<sub>2</sub>Si, compostos do sistema Al-Fe-Si e Si eutético foram observados como partículas de segunda fase. A capacidade de quebra do cavaco das ligas contendo Cu<sub>2</sub>Al ou Si foi superior daquelas contendo Mg<sub>2</sub>Si ou Al-Fe-Si. Esta tendência foi mais proeminente na usinagem a seco do que na usinagem utilizando fluido de corte. As partículas de segunda fase de Cu<sub>2</sub>Al e Si nestas ligas fraturaram durante o processo de usinagem, supostamente atuando como a causa da quebra do cavaco.

Para entender melhor as condições da formação do cavaco é preciso conhecer as condições de contato entre cavaco e ferramenta (KILIC; RAMAN, 2007). Na interface cavaco-ferramenta as altas tensões de compressão e altas taxas de deformação provocam situações de aderência. Além das condições de aderência, pode também ocorrer o escorregamento na periferia do contato entre cavaco e ferramenta ou então na usinagem de materiais com a adição de elementos de livre corte (MACHADO et al., 2011). E por fim, pode também ocorrer a formação da Aresta Postiça de Corte, camada encruada de material na superfície de saída da ferramenta

que surge quando se usina materiais com mais de uma fase na microestrutura em baixas velocidades de corte e consequentemente, baixas temperaturas na zona de corte.

Kilic e Raman (2007) em seus estudos investigaram as condições na interface cavaco-ferramenta na usinagem de ligas de alumínio. Segundo suas investigações a dinâmica do atrito é diferente em diferentes condições de corte. Aresta postiça de corte (APC), zonas de aderência e de escorregamento diferem de acordo com as variáveis de corte, material da peça e geometria de corte. Mesmo materiais idênticos usinados com diferentes condições de corte apresentam diferentes condições de contato na interface. Nas baixas velocidades de corte, a zona total de contato pode ser tratada como aderência. Com o aumento da velocidade de corte, a região de contato mostra três zonas separadas para as ligas de alumínio conforme a Fig. 2.26. A zona de aderência I é próxima à aresta de corte. Ela é seguida por uma zona de escorregamento, e o restante da região é descrita por uma zona de aderência II.

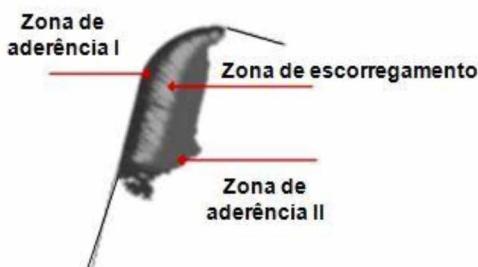


Figura 2.26. Imagem da área de contato cavaco-ferramenta, mostrando as diferentes condições de atrito (KILIC; RAMAN, 2007)

Em operações de corte, numa condição ideal espera-se de um processo a geração de superfícies com dimensões e acabamentos especificados no projeto. Porém, devido a diversos fatores, na prática as dimensões e acabamento obtidos em praticamente todos os processos de fabricação apresentarão desvios. E quando se trata do acabamento de arestas de peças de utilização em engenharia grande parte desses desvios pode ser representada pela formação de rebarbas. Porém, não existe um consenso sobre a identificação do que pode ser considerada rebarba.

Segundo Gillespie (1999), um dos maiores pesquisadores da área, o que constitui uma peça “livre de rebarbas” varia de acordo com companhias e departamentos de qualidade. Para alguns, significa não haver materiais soltos em uma aresta. Para outros significa não haver nada visível a olho a nu ou uma condição de aresta que não cause nenhum problema no próximo processo de montagem. Material residual em uma aresta pode ou não ser chamado de rebarba. Em muitos casos, as

rebarbas são definidas como projeções indesejadas de material, formados como resultado de fluxo plástico em operações de corte e cisalhamento (AURICH et al., 2009). Além disso, não existe uma padronização de medição e dimensões de rebarbas.

As rebarbas são indesejáveis em diversos aspectos, como perigo às mãos do operador em montagens e desmontagens, aumento ou modificação do atrito (não permitido em algumas montagens), aumento do desgaste em peças solicitadas ou em movimento, concentração de tensões e aceleração do processo de corrosão, entre outros. Significando assim, altos custos relacionados aos processos de rebarbação (GILLESPIE, 1999)

Segundo Aurich et al. (2009), estudos têm mostrado um grande impacto econômico das rebarbas e seus efeitos. A rebarbação é não apenas um processo que não agrega valor ao produto, mas também, em muitos casos o aumento da formação de rebarbas é um fator chave no desgaste das ferramentas de corte. A formação de rebarbas pode resultar na substituição de ferramentas que caso contrário ainda estariam operando sem problemas. Controle e remoção de rebarbas são algumas das questões econômicas mais importantes em várias operações de usinagem e tem sido foco de pesquisa em operações de corte pelos últimos 50 anos (AURICH et al., 2009).

Kim, Min e Dornfeld (2001) investigaram as rebarbas formadas na furação do aço AISI inoxidável 304L e do aço AISI 4118. Segundo os autores foram encontrados três tipos principais de rebarbas para os dois materiais: rebarba uniforme pequena, rebarba uniforme grande e rebarba coroa, além de rebarba transiente formada no aço AISI 4118, como apresentado na Fig. 2.27. Ainda segundo eles, as propriedades destes materiais, relativamente alto coeficiente de endurecimento por deformação e ductilidade, são as maiores razões deste fenômeno.

Já Biermann e Hartmann (2012) utilizaram um processo de refrigeração criogênica com jatos gelados de CO<sub>2</sub> na furação de uma liga AlMgSi. Foi observado que a altura da rebarba pôde ser reduzida como consequência do impacto em materiais dúcteis pela refrigeração criogênica. Além disso, segundo os autores a qualidade superficial também pôde ser significativamente melhorada. Em contrapartida, este método de refrigeração não levou à melhora em relação aos desvios no diâmetro e circularidade dos furos.

Zedan et al. (2012) investigaram o efeito do método de lubrificação (jorro, mínima quantidade de lubrificação - MQL e à seco) na altura da rebarba formada durante a furação da liga de alumínio 6061-T6. De acordo com os autores, como mostrado na Fig. 2.28, o uso de fluidos de corte permitiu a minimização ou eliminação da formação de rebarbas.

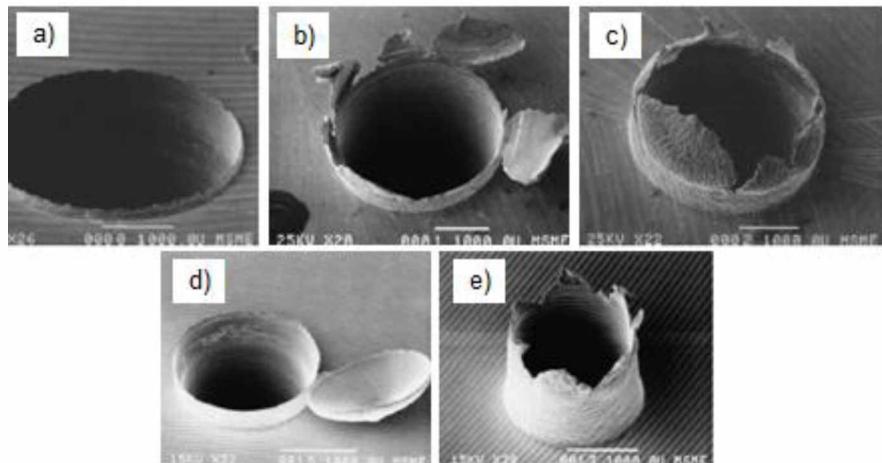


Figura 2.27. Tipos de rebarbas na furação do aço AISI 4118: a) rebarba uniforme pequena, b) rebarba transiente e c) rebarba coroa; e do aço inoxidável AISI 304L: d) rebarba uniforme grande e e) rebarba coroa (KIM; MIN; DORNFELD, 2001)

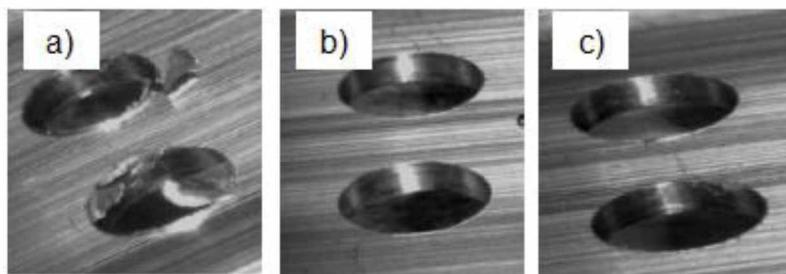


Figura 2.28. Rebarbas formadas na furação da liga de alumínio 6061-T6 com diferentes métodos de lubrificação: a) corte à seco, b) corte com jorro e c) corte com MQL (ZEDAN et al., 2012)

Por fim, Pilnny et al. (2012) conseguiram reduzir as rebarbas por meio do aumento da velocidade de corte e aumento do avanço durante a furação de chapas de uma liga de alumínio Al99,7Mg0,5Cu-H24. Além disso, houve redução significativa da rebarba de saída do furo com o uso de um sistema de fixação da peça corretamente construído.

#### 2.4.2 Usinabilidade da liga de alumínio 6351

Reis e Abrão (2005) investigaram a usinabilidade da liga 6351 (T6) solubilizada e envelhecida artificialmente em um processo de torneamento utilizando ferramentas de metal duro não revestido, metal duro revestido e PCD (diamante policristalino). Os resultados mostraram que a ferramenta de PCD apresentaram menores forças de avanço e de corte. Segundo os autores, estes resultados podem ser explicados pelo fato do diamante possuir um coeficiente de atrito menor que o do metal duro, assim

melhorando o deslizamento do cavaco e consequentemente reduzindo as forças. Entretanto, maior força passiva foi obtida na usinagem com a ferramenta de PCD (Fig. 2.29), devido ao seu menor ângulo de saída ( $\gamma_0 = 0^\circ$ ) em comparação às ferramentas de metal duro ( $\gamma_0 = 25^\circ$ ), o qual é responsável pelo aumento da deformação do cavaco durante o corte.

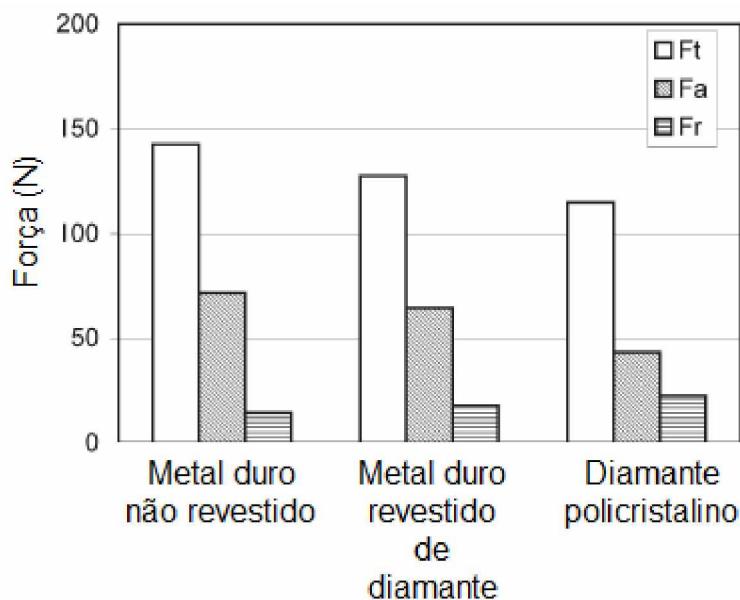


Figura 2.29. Efeito do material da ferramenta nas componentes da força de usinagem (F<sub>t</sub> - Força de corte, F<sub>a</sub> - Força de avanço e F<sub>r</sub> - Força passiva) para  $v_c = 260$  m/min,  $f = 0,16$  mm/rot e  $a_p = 2$  mm (adaptado de REIS; ABRÃO, 2005)

Quanto à influência dos parâmetros de corte, o aumento da velocidade de corte reduziu a força de corte; entretanto, já as forças passiva e de avanço não foram significativamente afetadas dentro do intervalo testado. Quando o avanço foi aumentado, o mesmo comportamento foi observado. Um aumento na profundidade de corte causou aumento nas forças de corte e avanço, mas a força passiva manteve-se inalterada.

O melhor acabamento também foi obtido com a ferramenta de PCD (Fig. 2.30), com valores de  $R_a = 1,03$   $\mu\text{m}$  e  $R_t = 4$   $\mu\text{m}$ . Segundo os autores, o menor ângulo de saída da ferramenta de PCD contribuiu para a geração de cavacos mais curtos, assim melhorando o acabamento superficial da peça usinada. Os valores dos parâmetros de rugosidade superficial  $R_a$  e  $R_t$  não foram drasticamente afetados pela velocidade de corte e profundidade de corte mas aumentaram com o aumento do avanço.

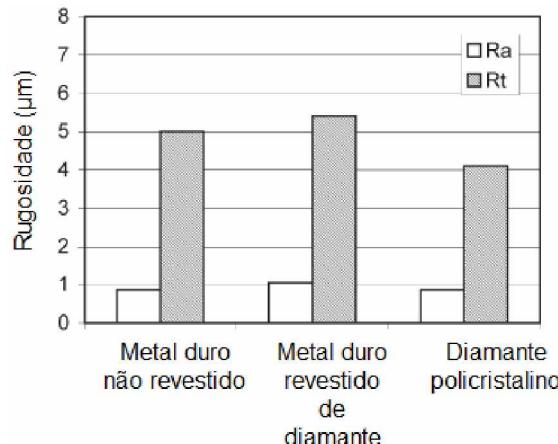


Figura 2.30. Efeito do material da ferramenta na rugosidade para  $v_c = 260$  m/min,  $f = 0,16$  mm/rot e  $a_p = 2$  mm (adaptado de REIS; ABRÃO, 2005)

A temperatura na interface cavaco/ferramenta foi medida utilizando o método termopar ferramenta-peça com a ferramenta de metal duro não revestida e verificada a influência dos parâmetros de corte. A temperatura da interface cavaco-ferramenta aumentou linearmente com o aumento da velocidade de corte. O efeito do avanço foi menos pronunciado e um aumento na profundidade de corte resultou em um leve aumento da temperatura. A maior temperatura registrada foi de 269 °C para  $v_c = 260$  m/min,  $f = 0,32$  mm/rot e  $a_p = 1$  mm.

Da Cunha e Da Silva (2012) avaliaram a influência do teor de silício no torneamento cilíndrico externo da liga de alumínio 6351 em diferentes atmosferas de usinagem (seco, MQF, jorro). Segundo o autor, o teor de silício tem influência significativa na rugosidade superficial em comparação aos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) apenas no corte a seco. Quanto maior a quantidade de silício na liga de alumínio melhor a qualidade superficial da peça usinada, como se pode observar na Fig. 2.31.

Já na Fig. 2.32 são apresentadas curvas da força de corte em função da velocidade de corte no torneamento da liga de alumínio 6351 com diferentes quantidades de silício. Nos ensaios foram utilizados avanço de 0,2 mm/rot e profundidade de corte de 2 mm. Os menores valores de força de corte foram obtidos na usinagem da liga com 1,2 % de silício. Entretanto, não foi possível comprovar estatisticamente que a força de corte é influenciada pela variação do silício.

Gonçalves (2012) investigou a usinabilidade no torneamento de cinco ligas de alumínio da série 6XXX (6082, 6351, 6005A, 6063 e 6061). Na Fig. 2.33 são apresentadas curvas da força de corte em diversas velocidades de corte para as cinco ligas de alumínio da série 6XXX. Não é possível perceber diferença pronunciada na

força de corte das diferentes ligas, apenas em baixas velocidades de corte ( $v_c < 200$  m/min) a liga 6082 apresenta maior força de corte.

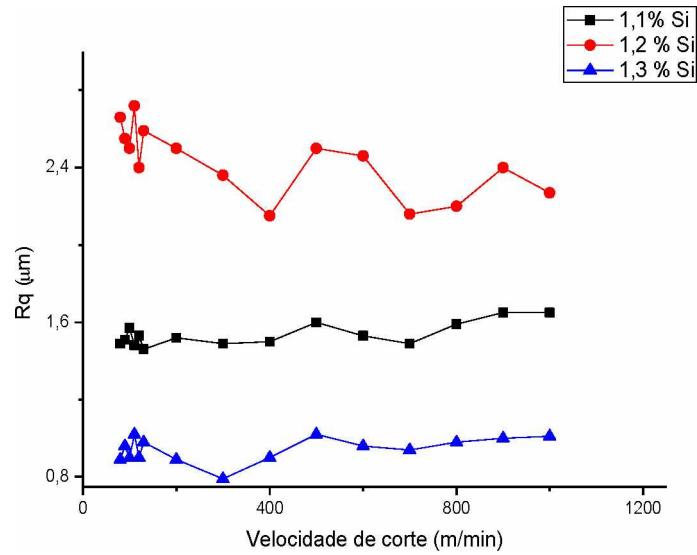


Figura 2.31. Rugosidade superficial versus velocidade de corte no torneamento à seco da liga de alumínio 6351 com diferentes quantidades de silício com  $f = 0,2$  mm/rot e  $a_p = 1,5$  mm (DA CUNHA; DA SILVA, 2012)

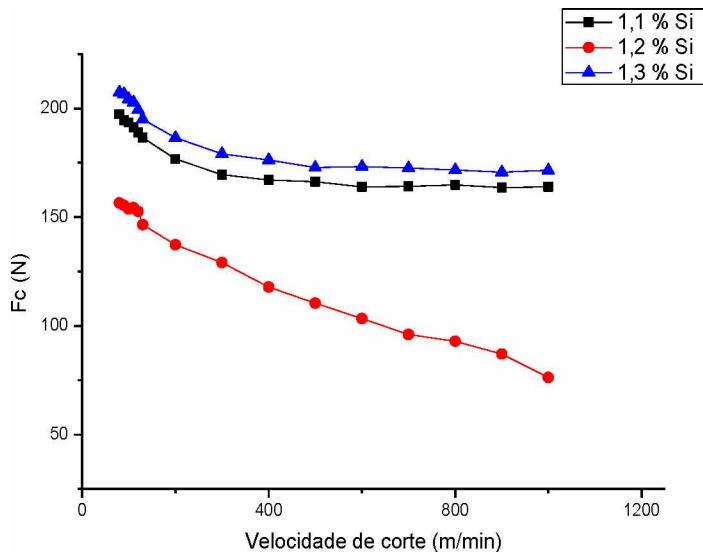


Figura 2.32. Força de corte versus velocidade de corte no torneamento à seco da liga de alumínio 6351 com diferentes quantidades de silício com  $f = 0,2$  mm/rot e  $a_p = 2$  mm

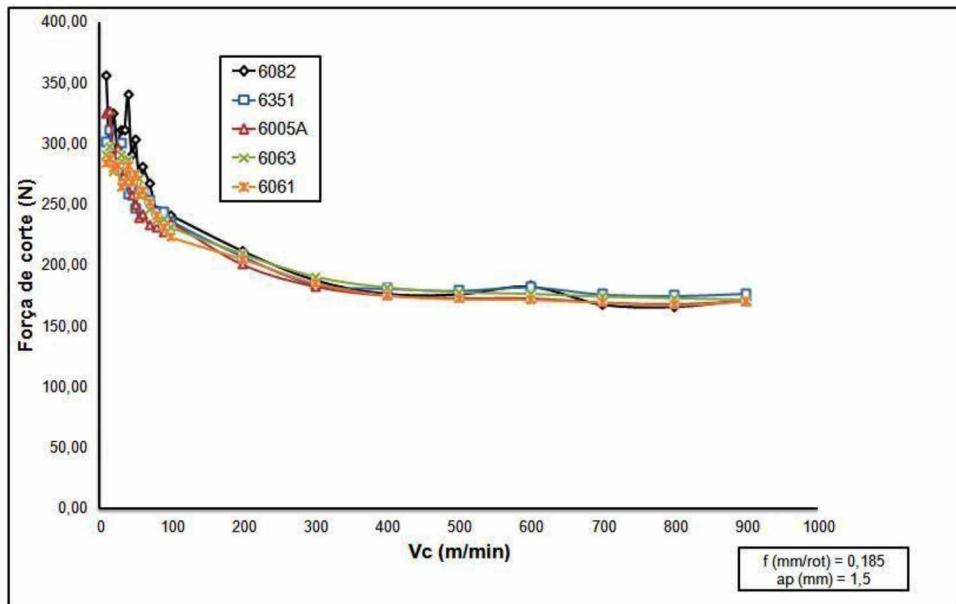


Figura 2.33. Força de corte (N) versus velocidade de corte (m/min) para diferentes ligas de alumínio da série 6XXX (GONÇALVES, 2012)

Na Fig. 2.34 são apresentados os valores de rugosidade  $R_q$  para as cinco ligas de alumínio da série 6XXX. A rugosidade  $R_q$  para a liga 6351 fica entre 3 e 4  $\mu\text{m}$  no intervalo de velocidades de corte ensaiados, avanço  $f = 0,185 \text{ mm/rot}$  e profundidade de corte  $a_p = 1,5 \text{ mm}$ . É possível perceber que a liga 6063 que apesar de ser a liga mais dúctil foi a que proporcionou melhor acabamento superficial.

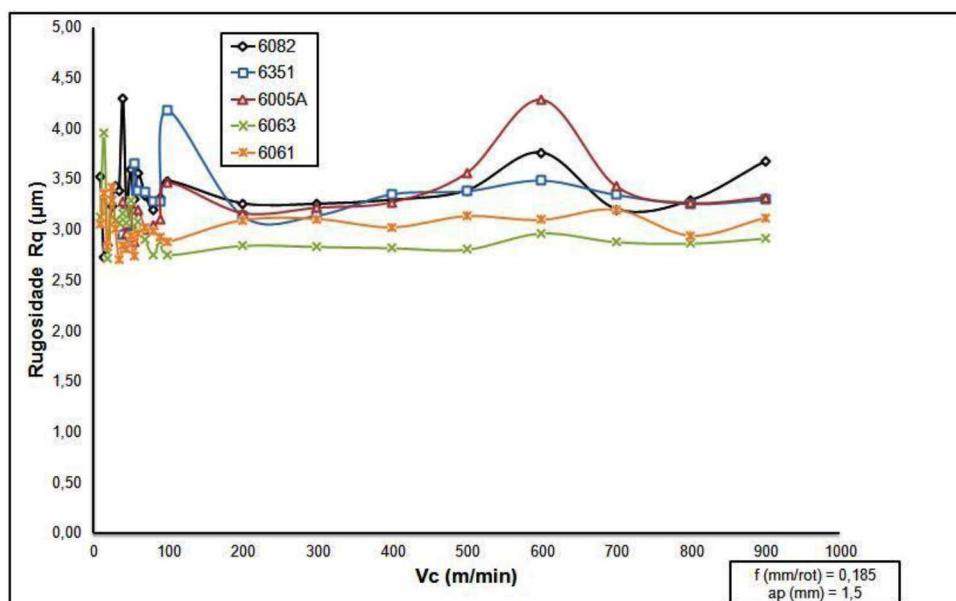


Figura 2.34. Rugosidade ( $\mu\text{m}$ ) versus velocidade de corte (m/min) para diferentes ligas de alumínio da série 6XXX (GONÇALVES, 2012)

## 2.5 Efeito da adição de cobre nas ligas de alumínio

Como visto anteriormente, para aplicações em engenharia o alumínio é preferencialmente utilizado na forma de ligas. Foram apresentadas ao longo do texto as principais funções dos principais elementos de liga adicionados às ligas de alumínio da série 6XXX: magnésio e silício. Porém, outros elementos em menor quantidade, são adicionados à estas ligas para conferir propriedades específicas, como ferro, cobre, manganês, cobre, zinco, titânio, entre outros. Como o objetivo principal deste trabalho é investigar a influência do teor de cobre na usinabilidade da liga de alumínio 6351, nos próximos tópicos serão apresentados os trabalhos relevantes que investigaram a influência do cobre nas propriedades das ligas de alumínio, bem como a influência desta adição durante a usinagem das mesmas.

### 2.5.1 Influência na microestrutura e propriedades

Quando cobre é adicionado às ligas de alumínio da série 6XXX, ou silício é adicionado às ligas da série 2XXX, a família de ligas Al-Mg-Si-Cu é formada com propriedades e aplicações variadas. A resposta ao envelhecimento nestas ligas geralmente parece ser um pouco complexa devido à ocorrência de muitas fases intermediárias (TIRYAKIOGLU; STALEY, 2003). O conjunto de ligas extrudadas Al-Mg-Si-Cu são largamente utilizadas nas indústrias automotiva, aeronáutica e ferroviária devido às suas atrativas propriedades mecânicas após o tratamento de envelhecimento artificial (YIN et al., 2016).

Muitas ligas ternárias comerciais Al-Mg-Si possuem suas composições em um campo de três fases (à temperaturas de envelhecimento normais) consistindo no equilíbrio das seguintes fases: alumínio primário (Al),  $Mg_2Si$  ( $\beta'$ ) e silício primário (Si). Com a adição do cobre, os campos de três fases de equilíbrio coexistentes expandem para três espaços de composição na forma de tetraedros. Um equilíbrio de quatro fases está presente dentro de cada um destes espaços consistindo em duas fases comuns, alumínio primário (Al) e a fase intermediária quaternária  $Al_5Mg_8Cu_2Si_6$  (Q), e duas das outras três fases,  $CuAl_2$  ( $\theta$ ),  $Mg_2Si$  ( $\beta'$ ) e silício primário (Si) (CHAKRABARTI; LAUGHLIN, 2004). Isto pode ser visto na representação do diagrama de fases apresentado na Fig. 2.35.

De acordo com Chakrabarti Laughlin (2004), uma vista mais clara dos campos de fases nos tetraedros é mostrada de maneira simplificada do canto do alumínio (Al) no canto da fase Q, assim os tetraedros são projetados em duas dimensões, como campos triangulares, segundo a Fig. 2.36.

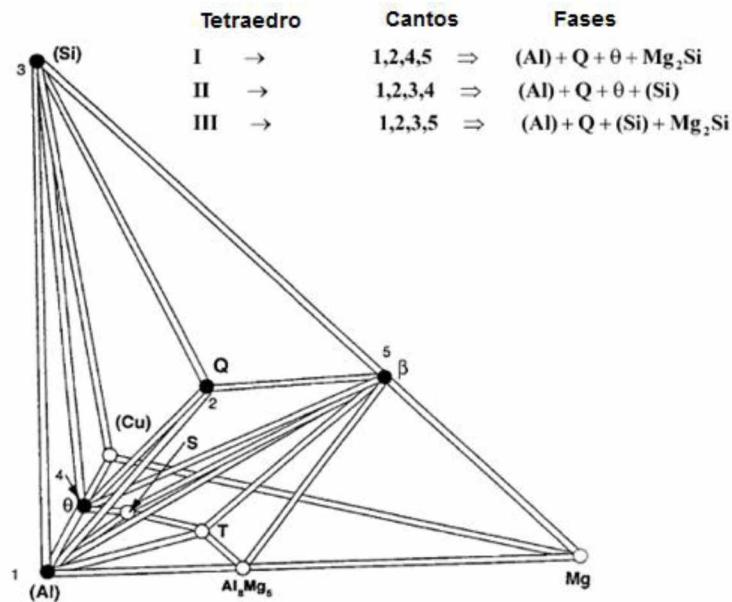


Figura 2.35. Diagrama de linha de campos de fases de equilíbrio no sistema Al-Mg-Si-Cu à temperatura ambiente (adaptado de CHAKRABARTI; LAUGHLIN, 2004)

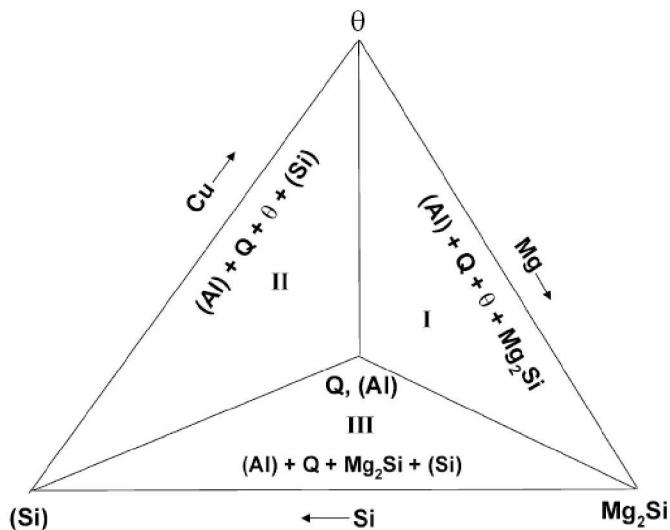


Figura 2.36. Ligas Al-Mg-Si-Cu agrupadas pela ocupação do campo de fase em uma projeção dos tetraedros de campo de quatro fases (CHAKRABARTI; LAUGHLIN, 2004)

Em relação ao efeito da composição química na estabilidade relativa da fase, segundo cálculos e experimentos dos autores no diagrama, indicam certas tendências definidas. Em ambos os tetraedros I e II, o cobre tem efeito forte de estabilização na quantidade da fase  $\theta$  e bem menos nas outras fases coexistentes. Aumentando a quantidade de silício aumenta-se fortemente a quantidade da fase Q no tetraedro I e a quantidade de silício (Si) no tetraedro II. Aumentando o magnésio, aumenta-se a fase  $Mg_2Si$  no tetraedro I e a fase Q no tetraedro II. É importante notar que apesar da

adição de cobre nas ligas Al-Mg-Si introduzir a fase Q, também introduz a fase  $\theta$  e modifica as quantidades relativas de silício (Si) e  $Mg_2Si$  devido à uma modificação nos campos das fases de equilíbrio coexistentes. Entretanto, o impacto da adição de cobre nas frações de volume relativo é bem mais forte na fase  $\theta$  que na fase Q (CHAKRABARTI; LAUGHLIN, 2004).

Segundo Tiryakioglu e Staley (2003) a característica mais comum destas ligas é a ocorrência da fase Q. A fase Q existe como uma fase quaternária e está presente como uma fase de equilíbrio na maioria das composições nas ligas Al-Mg-Si-Cu. A exata composição da fase Q é desconhecida, porém tem sido apresentada como  $Al_4Cu_2Mg_8Si_7$ ,  $Al_5Cu_2Mg_8Si_6$  e  $Al_4CuMg_5Si_4$ . Oticamente sua estrutura aparece entrelaçada, como apresentado na Fig. 2.37.

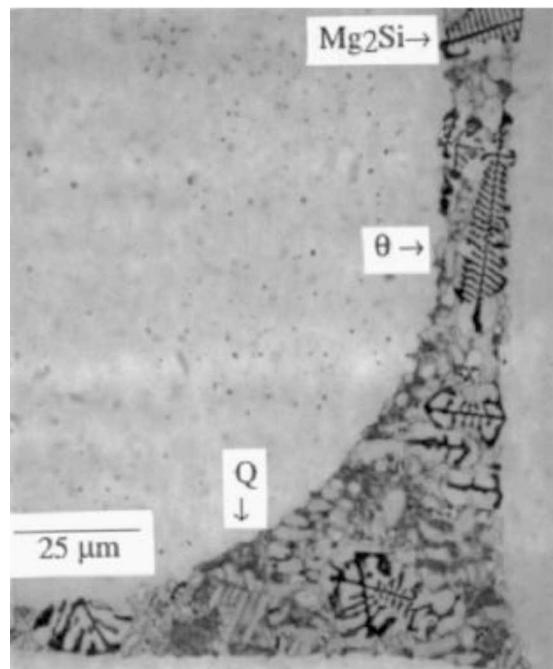


Figura 2.37. Amostra de um lingote com  $Mg:Si > 1$  ( $Mg:1,15$ ;  $Si:0,92$ ;  $Cu:1,99$ ) mostrando a fase com uma estrutura entrelaçada (CHAKRABARTI; LAUGHLIN, 2004)

A morfologia da fase Q obtida durante a solidificação da liga modifica com uma exposição longa à temperatura durante a homogeneização. Assim, a fase Q pode também precipitar em estado sólido durante altas temperaturas de recozimento. Nestes casos, o agora precipitado, denominado Q' é formado normalmente como partículas redondas ou ovais nos contornos de grão. Devido ao formato do precipitado Q', existe um total de 12 variantes dentro da matriz de alumínio. Uma discordância em movimento, portanto, vê uma configuração diferente dos campos de deformação e morfologias do precipitado à sua frente. Esta pode ser uma das causas do aumento da

resistência de ligas Al-Mg-Si com adições de cobre. Grandes aumentos de resistência mecânica podem ser obtidos adicionando Cu às ligas Al-Mg-Si, acompanhados de considerável refinamento na estrutura do precipitado (TIRYAKIOGLU; STALEY, 2003).

O endurecimento das ligas Al-Mg-Si com adições de cobre é principalmente conseguido através dos tratamentos térmicos. Eivani e Taheri (2008) submeteram uma liga de alumínio Al-Mg-Si-Cu à vários processos de tratamentos térmicos utilizando diferentes tempos e temperaturas e investigaram o efeito da precipitação na dureza do material. Segundo os autores, esta variação no tempo e temperatura pode aumentar a dureza da liga. A investigação revelou que o tempo e a temperatura desenvolvem um papel importante no processo de endurecimento por precipitação da liga. Para se atingir uma dureza máxima, um ciclo ótimo de envelhecimento pode ser usado, o qual é aquecer a liga a 180-190 °C por 15-18 h como mostrado na Fig. 2.38.

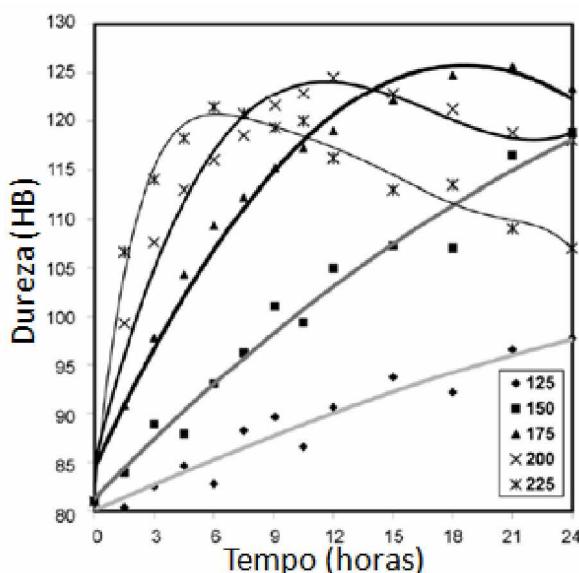


Figura 2.38. O efeito do tempo de envelhecimento na dureza da liga após o endurecimento por precipitação a 125, 150, 175, 200 e 225 °C (adaptado de EIVANI; TAHERI, 2008)

Segundo Li, Brusethaug e Olsen (2006), o pico de endurecimento no envelhecimento de uma liga fundida Al-Si7Mg aumenta com o aumento do teor de cobre, como apresentado na Fig. 2.39(a). A melhora das propriedades mecânicas da liga fundida AlSi7Mg pela adição de cobre é devido ao aumento da densidade de precipitados  $\beta'$  ( $Mg_2Si$ ), precipitação de precursores da fase Q e precipitação da fase  $\theta$  ( $CuAl_2$ ) (para ligas com alto teor de cobre). O forte aumento da dureza máxima durante o envelhecimento com o aumento do teor de cobre, mostrado na Fig. 2.39(b), também é resultado do endurecimento promovido pelo cobre por solução sólida na matriz de

alumínio (WANG et al., 2007)(IBRAHIM et al., 2011a)(HAN et al., 2014). De acordo com Yang et al. (2011) se dissolvidos na matriz Al ou precipitados como nanopartículas, os elementos de liga incluindo Cu, Mg e Ni apresentam leve diferença aumentando a microdureza de uma liga Al-Si-Cu-Ni-Mg.

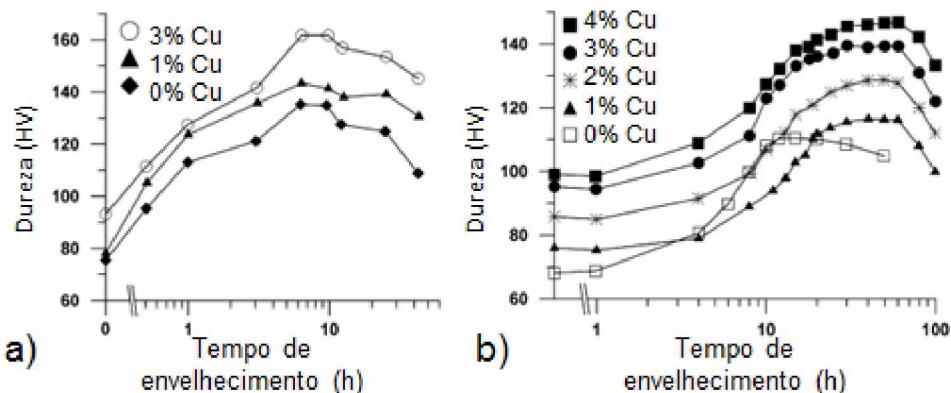


Figura 2.39. Curvas de envelhecimento de ligas: a) Al-Si-Mg-xCu à 175 °C (adaptado de LI; BRUSETHAUG; OLSEN, 2006) e b) Al-Si-Mg-xCu à 160 °C (WANG et al., 2007)

Jaafar et al. (2011) concluíram que os precipitados formados em ligas Al-Mg-Si envelhecidas artificialmente foram principalmente na forma de agulha. A adição de cobre (1% em peso) resultou no refinamento dos precipitados na forma de agulha e pode também ter aumentado a densidade de precipitados. A maior densidade de precipitados finos em ligas Al-Mg-Si-Cu ricas em magnésio com alto teor de cobre durante superenvelhecimento garantem à estas ligas uma estabilidade térmica maior que as ligas ricas em silício equivalentes (DING et al., 2015).

Segundo Kim et al. (2013), pequenas adições de cobre e prata aumentam a dureza e cineticamente acelera a formação do precipitado  $Mg_2Si$ , o qual é a fase endurecedora principal das ligas Al-Mg-Si. Liu et al. (2014) também verificaram que a adição de cobre acelera a precipitação por envelhecimento em ligas Al-Mg-Si acima da temperatura ambiente e retarda o envelhecimento natural à temperatura ambiente. A pré-deformação por 5% de alongamento antes do envelhecimento aumenta o valor de pico de dureza no envelhecimento de uma liga Al-0,42Mg-0,5Si-1,0Cu de 132 HV para 167 HV. A pré-deformação induz discordâncias antes do envelhecimento contribuindo para o endurecimento da liga (YIN et al., 2016).

Man, Jing e Jie (2007) observaram que uma liga Al-Mg-Si (6082) com adição de 0,6% de cobre apresentou grande aceleração da taxa de endurecimento por envelhecimento, o qual se desenvolveu imediatamente a partir do início do envelhecimento, como pode ser visto na Fig. 2.40. O pico de dureza é atingido apó

aproximadamente 4h para a liga com adição de cobre. Após este período a dureza atinge certo valor estável com o prosseguimento do envelhecimento. A curva da dureza para a liga de alumínio 6082 sem adição de cobre atinge o pico de dureza após 8h de envelhecimento. Assim, fica claro que a adição de cobre aumenta o pico de dureza e reduz o tempo para atingir este pico de dureza. Zeren, Karakulak e Gümüs (2011) também verificaram que aumentando o teor de cobre em ligas Al-Si-Cu, aumenta-se a dureza devido o endurecimento por precipitação. Aumentando o teor de cobre de 3% para 5% a dureza aumenta de 55 para 118 HB. E mais recentemente, Saito et al. (2014) observaram que a adição de cobre (0,093 % em peso) aumentou a dureza das ligas Al-Mg-Si com maior densidade de precipitados curtos. Segundo os autores o efeito da adição de cobre foi independente da taxa de resfriamento durante a têmpera.

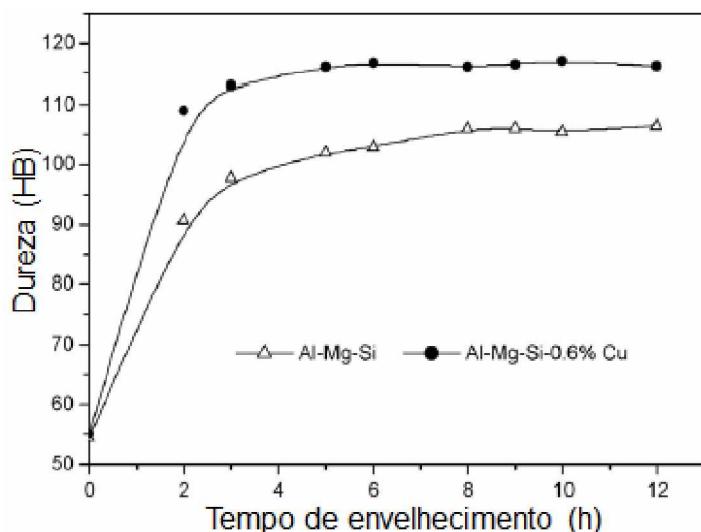


Figura 2.40. Curvas de dureza em função do tempo de ligas Al-Mg-Si e Al-Mg-Si-0,6%Cu envelhecidas isotermicamente à 170°C (adaptado de MAN; JING; JIE, 2007)

De acordo com Shabestari e Moemeni (2004) as propriedades de resistência à tração de ligas Al-Si-Mg aumentam devido à precipitação de fases ricas em cobre. O limite de resistência à tração das ligas fundidas em diferentes moldes aumentou de 10 a 25% com o aumento do teor de cobre nas ligas de até 1,5% em peso, como apresentado na Fig. 2.41. Já Zeren (2005) verificou que aumentando o teor de cobre de 1 para 6% em ligas Al-Cu-Si-Mg, a resistência à tração aumentou de 152 para 402 MPa e o alongamento diminui de 12,7 para 2,5% devido ao endurecimento por precipitação. Segundo Bogdanoff e Dahlstrom (2009) o módulo de escoamento de uma liga Al-Mg-Si aumenta com o aumento de cobre em uma faixa entre 1 e 1,6% em

peso. Adicionando mais que 1,6% em peso não proporciona aumento no módulo de elasticidade.

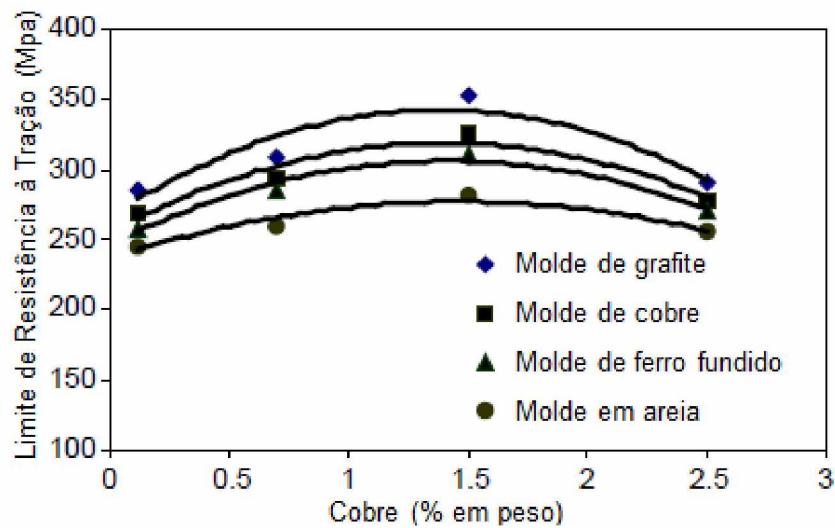


Figura 2.41. Limite de resistência à tração de ligas Al-Si-Mg fundidas em diferentes moldes em função da quantidade de cobre (adaptado de SHABESTARI; MOEMENI, 2004)

Segundo Wang et al. (2010) existem correlações óbvias entre as propriedades e as estruturas, morfologias e quantidade de fases ricas em ferro e cobre. Em ligas Al-Si-Cu-Mg o módulo de elasticidade é melhorado pelo tratamento térmico T7 devido à precipitação das fases endurecedoras  $Mg_2Si$  e  $CuAl_2$ . O endurecimento é também elevado pelo crescimento do teor de cobre. O limite de resistência à tração depende do espaçamento dendrítico, do tratamento térmico T7 e do teor de cobre devido à sua influência na morfologia das partículas de silício e à precipitação das fases endurecedoras. Além disso, a ductilidade destas ligas diminui à medida que o teor de cobre e o tempo de solidificação aumentam (GROSSELLE; TIMELLI; BONOLLO, 2010).

Yang et al. (2012) concluíram que o aumento do teor de cobre em uma liga Al-Si-Cu-Ni-Mg, em altas temperaturas provoca aumento da resistência à tração de 78,1 para 93,5 MPa. Porém, à temperatura ambiente a resistência a tração diminui de 263,8 para 229,6 MPa e depois aumenta para 278,9 MPa. Segundo Lu et al. (2015) o efeito de endurecimento de ligas Al-Si-Mg depende das fases precipitadas que mudam do  $Mg_2Si$  em ligas sem cobre para  $Mg_2Si+Q$  e  $\theta+Q$  correspondendo à relação de peso de Cu/Mg na liga. Na condição de tratada por solubilização, uma alta e uniforme concentração de cobre referente à dissolução de fases  $\theta$  pode promover a resistência à tração em detrimento do alongamento, como mostrado na Fig. 2.42. Entretanto,

fases Q exibem insignificante aumento no limite de resistência à tração, desde que é difícil de dissolver sob temperatura de 500°C.

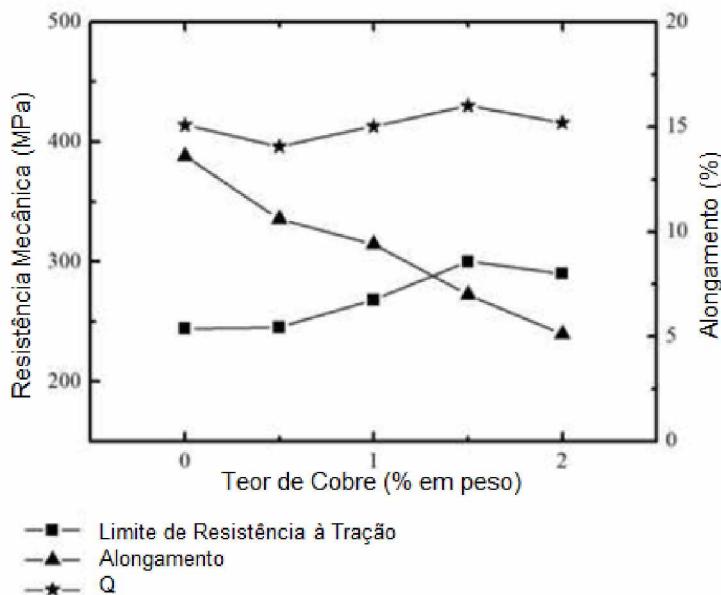


Figura 2.42. Limite de resistência à tração, alongamento e fase Q em função do teor de cobre em uma liga Al-11Si-0,3Mg tratada termicamente por solução (adaptado de LU et al., 2015)

A microestrutura da liga Al-Si-Cu-Mg fundida consiste da matriz  $\alpha$ -Al, Si eutético,  $Mg_2Si$  e das fases  $\theta$  e Q, a qual é determinada pelo teor de Cu e pela razão Cu/Mg. Geralmente, a fase  $Mg_2Si$  se forma em baixas razões Cu/Mg da liga. Alta razão Cu/Mg promove a formação das fases  $\theta$  e Q, enquanto sob a mesma razão Cu/Mg, o aumento de cobre e magnésio simultaneamente aumenta ambas as fases  $\theta$  e Q. O teor de cobre e a razão Cu/Mg influenciam a dissolução de fases intermetálicas primárias e a formação de precipitados durante o tratamento térmico, assim evidentemente influenciando a resistência mecânica e a ductilidade. Baixos valores do teor de cobre e da razão Cu/Mg tendem a formar precursores do precipitado  $\beta$ , enquanto alta razão Cu/Mg preferivelmente forma precursores dos precipitados Q e  $\theta$ . Entretanto, o alto teor de cobre e magnésio forma grande número de precipitados  $\theta$  e leva ao engrossamento da fase Q (ZHENG et al., 2015).

Além da composição química e das fases endurecedoras presentes nas ligas de alumínio fundidas, outro fator importante que influencia suas propriedades é a presença de porosidade na estrutura. Segundo Shabestari e Moemeni (2004) a fração de volume de porosidade das ligas Al-Si-Mg aumenta com o aumento do teor de cobre (Fig. 2.43), o que pode causar perda de resistência mecânica. Segundo Ma et al.

(2008) a porosidade é sempre prejudicial à ductilidade e resistência à tração de ligas de alumínio. Estes autores concluíram que apesar da máxima área de poros ser o parâmetro que melhor caracteriza as relações de propriedade porosidade-resistência à tração, os coeficientes obtidos por regressão indicaram que este não é o fator principal controlando a ductilidade e resistência à tração das ligas Al-Si-Cu e Al-Si-Mg.

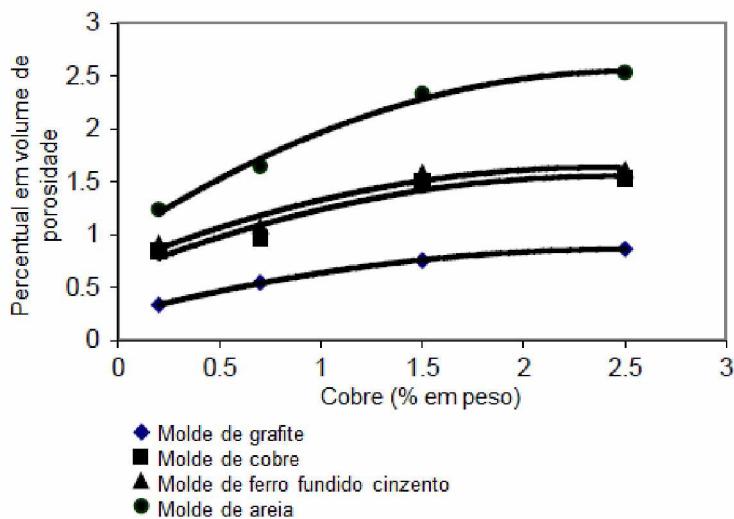


Figura 2.43. Mudanças no percentual em volume de porosidade com o teor de cobre em diferentes condições de solidificação de uma liga fundida Al-Si-Mg (adaptado de SHABESTARI; MOEMENI, 2004)

Já Samuel et al. (2013) verificaram que o aumento na temperatura do tratamento por solução resultou em um aumento nos parâmetros de porosidade medidos em ligas Al-Si-Cu-Mg. Amostras submetidas a tratamento por solução em dois estágios, diferentemente das submetidas à tratamento de único estágio, exibiram valores menores de porosidade, devido à melhor dissolução da fase de cobre e melhora relativa na homogeneidade. Por fim, Lu et al. (2015) observaram que nível de cobre excessivo de 2% em peso pode introduzir aumento na microporosidade, resultando em redução da resistência à tração de ligas Al-11Si-0,3Mg.

Além da influência do cobre na dureza e resistência da tração, alguns pesquisadores investigaram a sua influência na resistência ao impacto e à fratura. De acordo com García-García, Espinoza-Cuadra e Mancha-Molinar (2007), o comportamento de fratura das partículas ricas em cobre depende principalmente da sua composição química. Ibrahim et al. (2011b) verificaram que o magnésio e cobre diminuem a tenacidade ao impacto de ligas fundidas Al-Si-Cu-Mg, especialmente sob condições do tratamento térmico T6. As propriedades de resistência ao impacto destas ligas são influenciadas pela microestrutura, a qual, por sua vez, depende fortemente

das condições de solidificação e da composição da liga. A presença do cobre significativamente diminui as propriedades ao impacto, as quais são determinadas pela fase  $\text{CuAl}_2$  e não pelas partículas eutéticas de Si. E mais recentemente, Elsebaie et al. (2014) observaram que a presença de fases intermetálicas contendo Fe e Cu aumenta a fragilidade de ligas Al-Si-Cu-Mg-Fe e assim reduzem a sua tenacidade à fratura.

Finalmente, a adição de cobre tem um impacto negativo na corrosão de ligas Al-Mg-Si-Cu e esta suscetibilidade à corrosão é principalmente dominada pelo teor de cobre. O efeito dos teores de magnésio e silício e a taxa Mg/Si (em amostras sem cobre) sobre a corrosão é relativamente pequeno em contraste com o efeito da variação do teor de cobre (LIANG et al., 2013).

### 2.5.2 Influência na usinabilidade

Apesar do grande número de trabalhos que investigaram a influência nas propriedades mecânicas de ligas de alumínio com a adição de cobre, existe pouca informação disponível acerca da influência do cobre na usinabilidade das ligas de alumínio. Froehlich et al. (2007) investigaram a correlação entre as características de três ligas de alumínio extrudadas e sua usinabilidade na operação de furação. As ligas de alumínio estudadas foram a 6061 (0,135% Cu) com adição de Pb; e as ligas 6351 (sem Cu) e 2217 (2,74% Cu) trabalhadas à frio. Segundo os autores, o precipitado  $\text{CuAl}_2$  proporcionou efeitos benéficos à usinabilidade da liga de alumínio 2117. Assim, esta liga mesmo trabalhada à frio e com maior dureza comparada com as outras, apresentou a segunda menor força axial e torque, perdendo apenas para a liga 6061 com adição de Pb, como apresentado na Fig. 2.44. Aparentemente o trabalho à frio associado à presença do precipitado  $\text{CuAl}_2$  tem a tendência de favorecer a fragilidade dos cavacos e resultando em menor tendência de adesão do material da peça sobre a ferramenta de corte, assim melhorando a usinabilidade da liga de alumínio.

Já Zedan e Alkahtani (2013) investigaram as modificações nas propriedades mecânicas e usinabilidade de uma liga fundida Al-10,8%Si resultantes do efeito da adição de dois níveis de cobre (2,25% e 3,5%) e dois níveis de magnésio (0,3% e 0,6%). Segundo os autores a liga contendo altos níveis de cobre e magnésio tem um efeito prejudicial na vida da broca e nas forças de corte, como apresentado na Fig. 2.45. Este comportamento pode ser atribuído à formação de grandes quantidades da fase grossa na forma de bloco  $\text{CuAl}_2$ , juntamente com a formação de placas finas da fase Al-Si-Cu-Mg na liga. Além disso, a facilidade de quebra dos cavacos nas ligas contendo a fase  $\text{CuAl}_2$  é superior à das ligas contendo  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Assim, combinando

adições de cobre e magnésio espera-se maior refinamento do tamanho dos cavacos produzidos, como mostrado na Fig. 2.46.

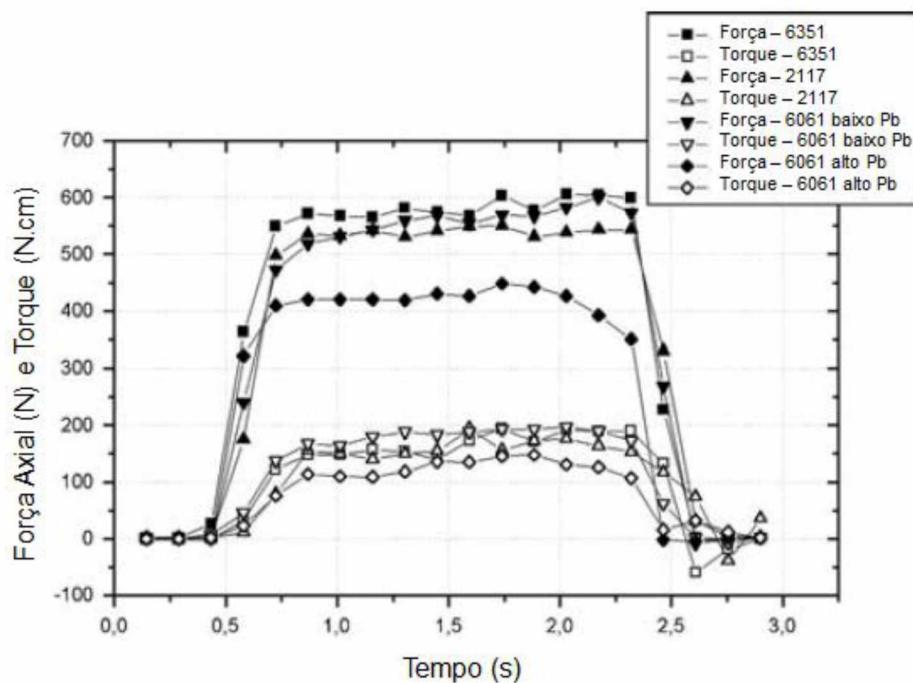


Figura 2.44. Força axial e torque na furação de ligas de alumínio (adaptado de FROEHLICH et al., 2007)

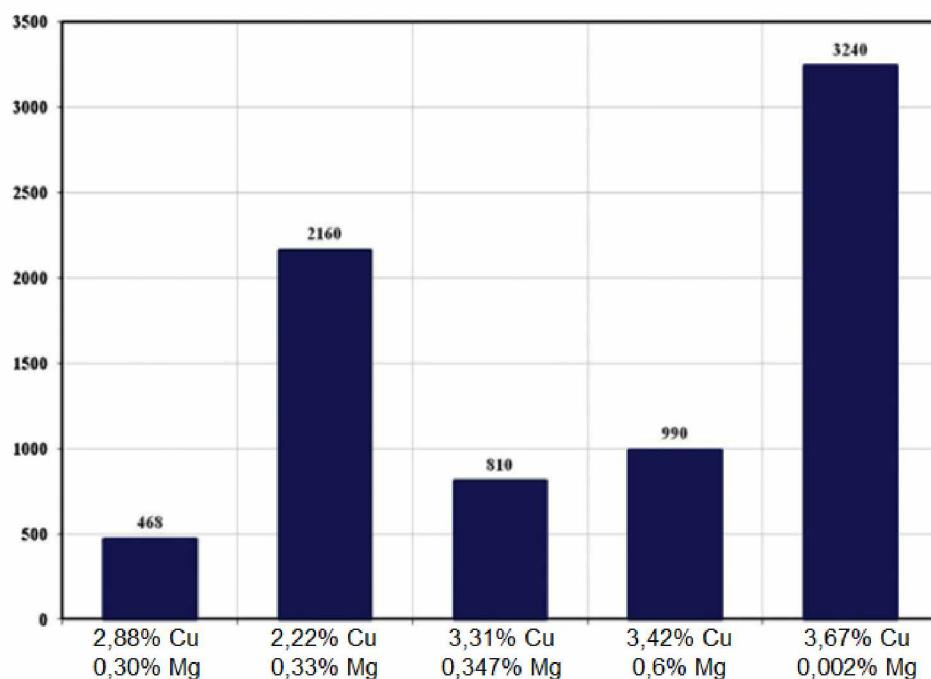


Figura 2.45. Comparação da vida da ferramenta das ligas de alumínio contendo diferentes adições de elementos de liga em termos do número de furos produzidos (adaptado de ZEDAN; ALKAHTANI, 2013)

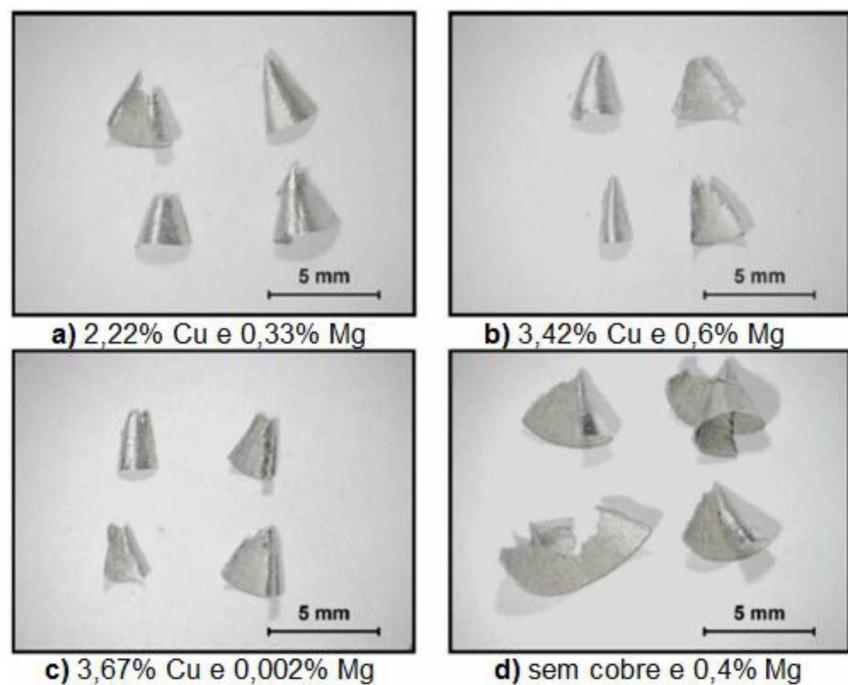


Figura 2.46. Diferentes tipos de cavacos obtidos na furação das ligas de alumínio contendo diferentes adições de elementos de liga (adaptado de ZEDAN; ALKAHTANI, 2013)



## CAPÍTULO III

### METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A usinabilidade da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre foi investigada nos processos de furação, alargamento e rosqueamento. Na Fig. 3.1 é apresentado um organograma contendo os ensaios realizados para a caracterização das amostras da liga de alumínio 6351, processos de usinagem utilizados, bem como parâmetros de corte variados e parâmetros de saída analisados para cada processo.

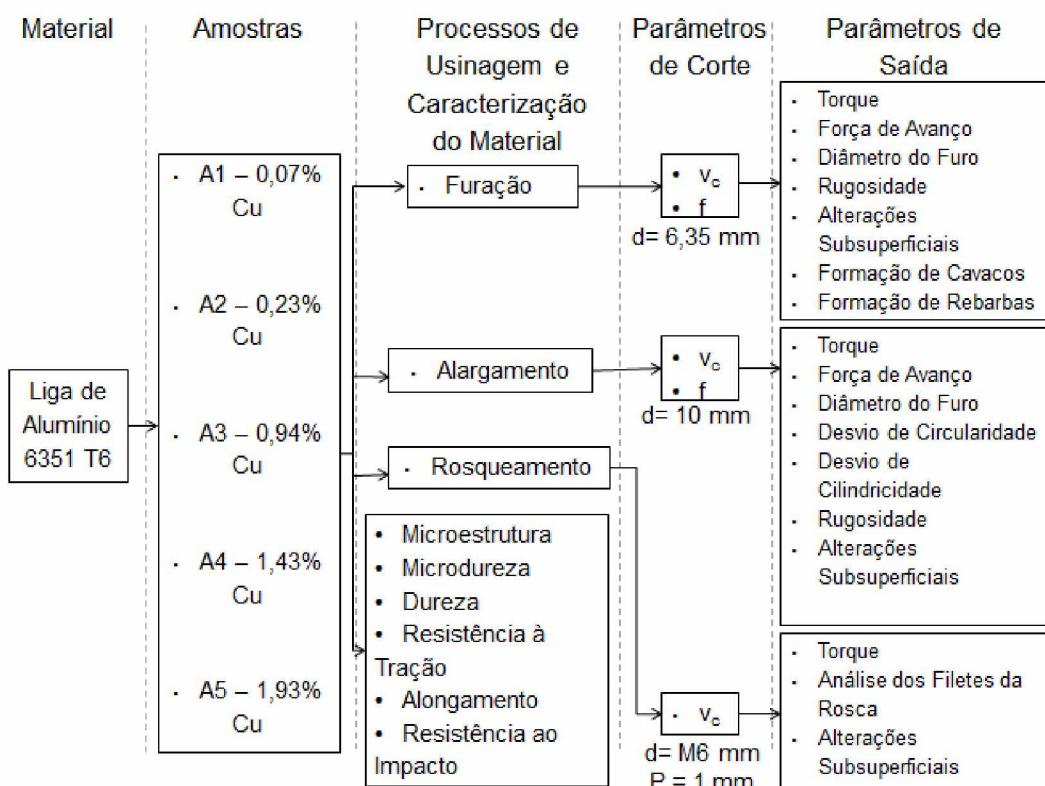


Figura 3.1. Organograma contendo as amostras do material, processos de usinagem, ensaios de caracterização do material, parâmetros de corte e parâmetros de saída utilizados

### 3.1 Amostras da liga de alumínio 6351

Foram utilizadas cinco barras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre e tratamento térmico T6 (solubilizada e envelhecida artificialmente) especialmente fabricadas pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) para este trabalho (não são ligas comerciais). As amostras da liga de alumínio 6351 foram produzidas com diferentes teores de cobre (Cu) (0,07%, 0,23%, 0,94%, 1,43% e 1,93%), e possuem composições químicas dos demais elementos de liga praticamente constantes dentro da faixa recomendada pela *Aluminum Association* para esta liga (THE ALUMINUM ASSOCIATION, 2015). Esta recomendação da composição química das ligas de alumínio trabalháveis possui o acordo das principais associações de alumínio do mundo, inclusive a Associação Brasileira do Alumínio – ABAL. O intervalo de variação da composição química de cobre adicionada à liga de alumínio 6351 foi proposto pelo fabricante. A composição química das amostras é apresentada na Tab. 3.1.

Tabela 3.1. Composição química das amostras da liga de alumínio 6351

Amostras	Liga	Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Cr (%)	Zn (%)	Ti (%)
1	6351	98,06	0,80	0,19	0,07	0,44	0,40	0,003	0,006	0,026
2		97,92	0,77	0,17	0,23	0,48	0,41	0,003	0,006	0,030
3		97,02	0,88	0,21	0,94	0,50	0,41	0,003	0,006	0,026
4		96,54	0,88	0,21	1,43	0,49	0,41	0,003	0,005	0,030
5		96,06	0,87	0,21	1,93	0,49	0,40	0,003	0,005	0,027
(*) TAA		-	0,7-1,3	0,5	0,10	0,4-0,8	0,4-0,8	-	0,2	0,2

(\*) *limites de composição química registrados pela Aluminum Association (THE ALUMINUM ASSOCIATION, 2015)*

### 3.2 Ensaios de caracterização do material

Antes dos ensaios de usinagem foram realizados ensaios de dureza, tração e impacto, bem como análises da microestrutura e microdureza para a caracterização das propriedades mecânicas das cinco amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes quantidades de cobre. Para assim, obter subsídios para a discussão sobre o comportamento do material durante a usinagem.

### 3.2.1 Análise da microestrutura

As amostras da liga de alumínio 6351 foram preparadas para a obtenção de micrografias para análise microestrutural. Além destas, foram também preparadas amostras das seções transversais dos furos obtidos nos processos de furação, alargamento e rosqueamento a fim de verificar as alterações subsuperficiais próximas às paredes dos furos e das roscas após a usinagem. Todas estas amostras foram embutidas em uma embutidora Tempopress 2, lixadas e polidas utilizando óxido de cromo e sílica coloidal. Posteriormente foram submetidas à ataque químico utilizando o reagente Kellers (2 ml HF, 3 ml HCl, 5 ml HNO<sub>3</sub> e 190 ml H<sub>2</sub>O). A preparação das amostras foi realizada no Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Na Fig. 3.2 são apresentadas as amostras embutidas e polidas para análise microestrutural e de alterações subsuperficiais. A análise da microestrutura e das alterações subsuperficiais após a usinagem das amostras da liga de alumínio 6351 foi realizada em um microscópio ótico Olympus BX51M do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) com o auxílio do software Olympus Stream Essentials. Além disso, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura TM3000 Hitashi equipado com sistema de espectroscopia por dispersão de energia de raios-x (EDS) do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) para a análise dos cavacos, filetes das roscas e análise da composição química das amostras da liga de alumínio 6351 estudadas. Os microscópios utilizados são apresentados na Fig. 3.3.

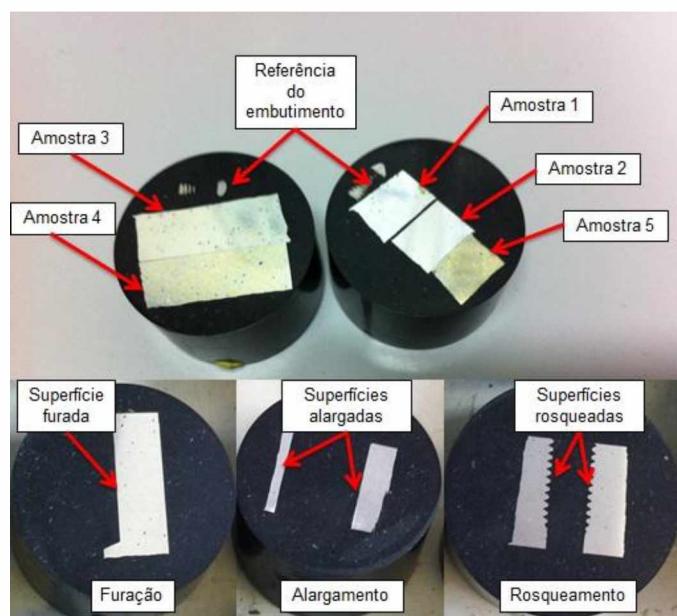


Figura 3.2. Amostras embutidas e polidas para análise microestrutural e de alterações subsuperficiais durante os processos de furação, alargamento e rosqueamento

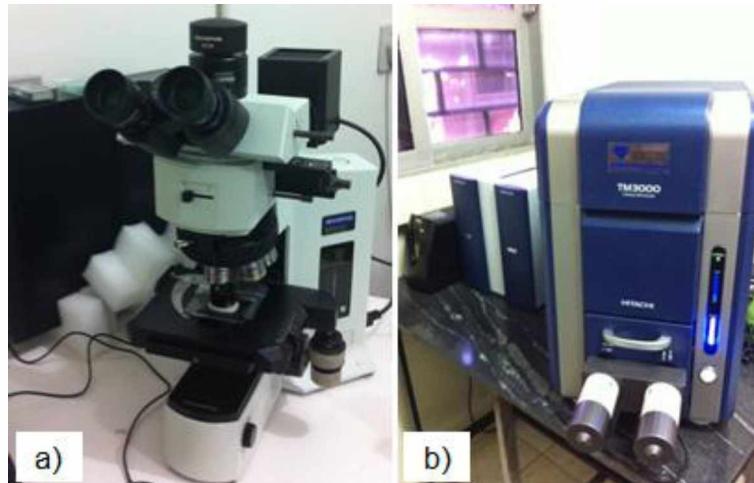


Figura 3.3. a) Microscópio ótico Olympus BX51M e b) Microscópio eletrônico de varredura TM3000 Hitashi equipado com sistema de espectroscopia de dispersão de raios-x (EDS)

### 3.2.2 Ensaios de dureza e microdureza

A dureza Vickers foi obtida utilizando o durômetro Universal Wolpert, mostrado na Fig. 3.4, do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). As indentações foram realizadas com um penetrador piramidal de diamante de base quadrada. A carga utilizada foi de 20 kg e o tempo de indentaçõa foi de 30 s. Para cada amostra foram realizadas vinte indentações e calculada a dureza média. Dez indentações foram realizadas próximas à periferia da peça e as outras dez próximas ao centro da mesma.



Figura 3.4. Durômetro Universal Wolpert

Na Fig. 3.5 é apresentado o corpo de prova utilizado nos ensaios de dureza, com suas principais dimensões (mm) e a localização das indentações realizadas em cada amostra. Neste mesmo corpo de prova foram realizados os ensaios de furação para a análise de rebarbas. Além disso, foram também retirados os corpos de prova para os ensaios de impacto. Os ensaios de microdureza foram realizados em um microdurômetro HMV Shimadzu Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), mostrado na Fig. 3.6. Os ensaios foram realizados com carga de 25 g. As indentações foram realizadas com tempo de 15 s.

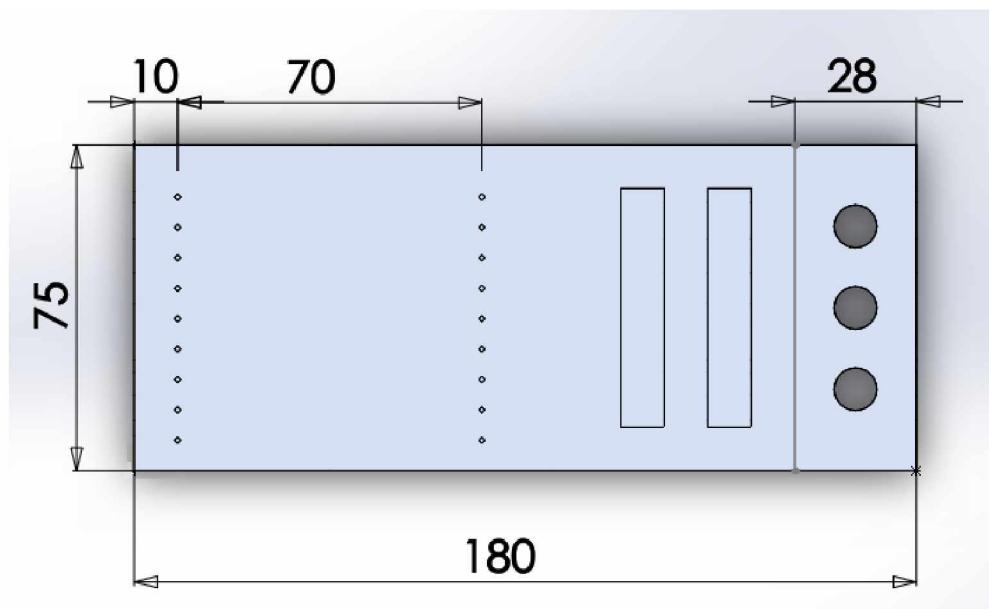


Figura 3.5. Corpo de prova para os ensaios de dureza



Figura 3.6. Microdurômetro HMV Shimadzu utilizado nos ensaios de microdureza

A análise de microdureza das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre foi realizada em duas etapas. Na primeira foram realizadas cinco indentações na fase da matriz de alumínio. Já na segunda etapa foram realizadas cinco indentações na partícula de segunda fase encontrada nas amostras utilizadas. Na Fig. 3.7 são apresentados exemplos das duas etapas de medições de microdureza realizadas com aumento de 400x.

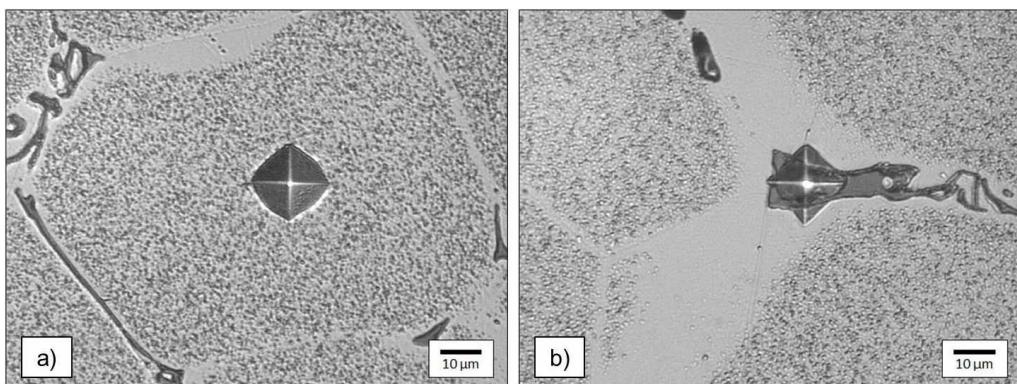


Figura 3.7. Exemplos das etapas de medições de microdureza: a) indentação na fase da matriz de alumínio e b) indentação na partícula de segunda fase

Também foram realizados ensaios de microdureza nas amostras das seções transversais dos furos obtidos nos processos de furação, alargamento e rosqueamento a fim de verificar as alterações subsuperficiais próximas às paredes dos furos e das roscas após a usinagem. Nas amostras dos furos obtidos pelos processos de furação e alargamento foram realizadas cinco indentações partindo da superfície usinada em direção ao centro do material, como mostrado na Fig. 3.8 com aumento de 100x.

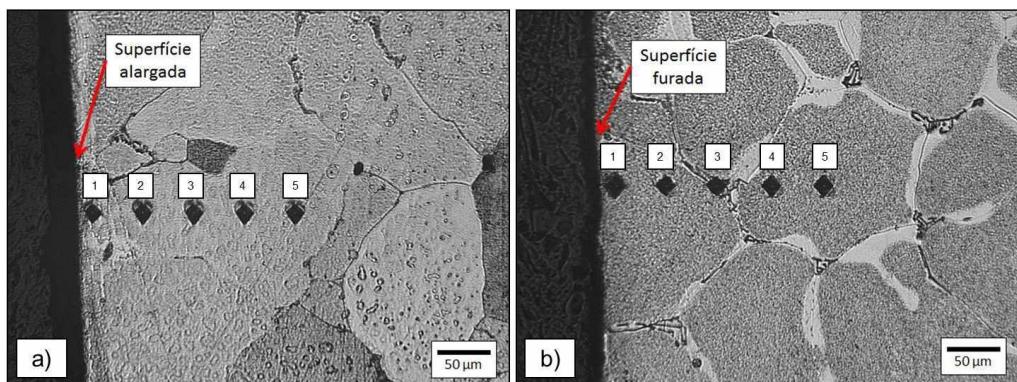


Figura 3.8. Esquema de medição dos ensaios de microdureza realizados nas amostras das seções transversais dos furos obtidos nos processos de: a) alargamento e b) furação

Já nas rosas foram realizadas quinze indentações. Doze indentações foram realizadas na seção de um filete e mais três indentações entre dois filetes partindo da superfície usinada em direção ao centro do material, como apresentado na Fig. 3.9 com aumento de 100x.

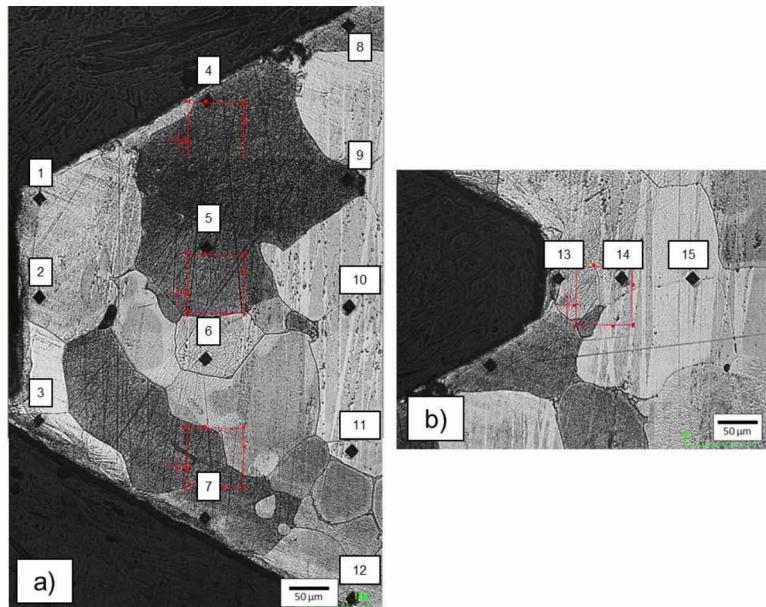


Figura 3.9. Esquema de medição dos ensaios de microdureza realizados nas amostras das seções transversais das rosas medidas: a) no filete e b) entre dois filetes

### 3.2.3 Ensaios de tração

Para os ensaios de tração foram confeccionados três corpos de prova para cada amostra da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. Os corpos de prova foram usinados com as dimensões (mm) especificadas pela norma 6152 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002) apresentadas na Fig. 3.10 a fim de caracterizar os materiais quanto ao limite de resistência à tração e alongamento. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios Shimadzu com 300 kN de capacidade do Laboratório de Usinagem Convencional (LUC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) apresentada na Fig. 3.11.

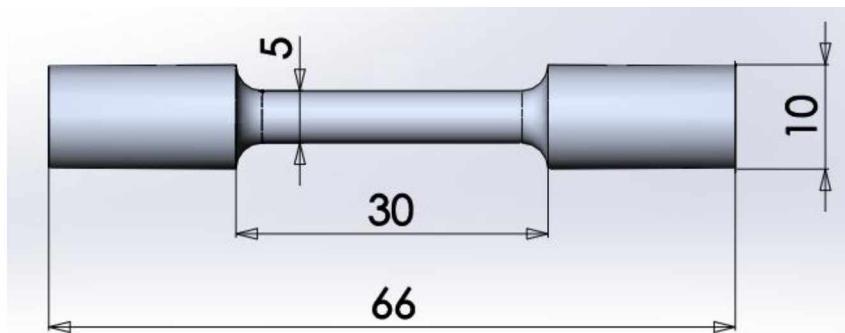


Figura 3.10. Corpo de prova utilizado nos ensaios de tração



Figura 3.11. Máquina universal de ensaios de tração Shimadzu utilizada nos ensaios de tração

### 3.2.4 Ensaios de impacto

Foram realizados dois ensaios de impacto para cada amostra da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. Os corpos de prova foram usinados com as dimensões (mm) especificadas pela norma 148-1 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) apresentadas na Fig. 3.12. Os ensaios de impacto foram realizados a fim de caracterizar os materiais quanto à resistência ao impacto. Para tanto foi utilizada uma máquina para teste de impacto Charpy Equilam EQIM-C-300, equipada com um pêndulo de 150 J e 0,75 m de comprimento do Laboratório de Engenharia Mecânica do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT) da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) apresentada na Fig. 3.13. O parâmetro obtido por estes ensaios foi a energia absorvida compensada

(J). Esta é a energia real absorvida no teste, levando em conta as energias de atrito do equipamento e a de gravidade (EQUILAM). Para os ensaios realizados a aceleração da gravidade foi considerada de  $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ .

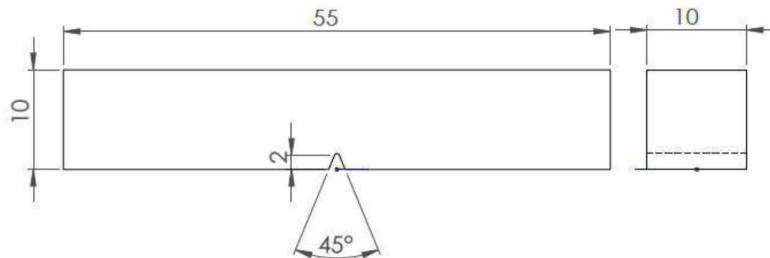


Figura 3.12. Corpo de prova utilizado nos ensaios de impacto Charpy



Figura 3.13. Máquina para teste de impacto Charpy Equilam EQIM-C-300 utilizada nos ensaios de impacto

### 3.3 Planejamento experimental

Com base nas amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre cedidas pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) foram realizados planejamentos experimentais para analisar a influência dos parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço) e do teor de cobre (Cu) sobre a usinabilidade de cada uma das cinco amostras da liga de alumínio 6351 propostas.

Para os ensaios de furação, foi utilizado um planejamento fatorial  $2^3$  a fim de verificar a influência dos parâmetros velocidade de corte (variável  $x_1$ ), avanço (variável  $x_2$ ) e do teor de cobre (variável  $x_3$ ), variando então cada um destes parâmetros em

dois níveis. Assim, os resultados obtidos para cada parâmetro de saída estudado no processo de furação foram analisados por meio de uma regressão múltipla. Esta regressão, por sua vez, gerou um modelo ajustado, evidenciando quais variáveis foram mais influentes e ao mesmo tempo a sensibilidade de cada resposta em função das variáveis em questão. Para a análise estatística foi utilizado o software Statistica 7. Como neste trabalho foram investigadas cinco amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes quantidades de cobre, esta análise inicial foi realizada utilizando as amostras da liga de alumínio duas a duas, resultando em uma análise de 10 lotes para cada parâmetro de saída. Os parâmetros de saída analisados estatisticamente na furação foram o torque e força de avanço na ferramenta de corte e também a rugosidade dos furos. Na Tab. 3.2 é apresentado o planejamento utilizado nesta etapa. Já na Tab. 3.3 são apresentados os níveis das variáveis utilizadas na regressão múltipla de um lote comparando a amostra 1 (0,07% Cu) com a amostra 2 (0,23% Cu). Os parâmetros de corte ( $v_c, f$ ) foram selecionados dentro do intervalo sugerido pelos fabricantes das ferramentas de corte.

Tabela 3.2. Planejamento fatorial  $2^3$  utilizado na regressão múltipla dos resultados obtidos nos ensaios de furação

Ensaios	x1	x2	x3
	$v_c$	f	Teor de Cobre
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1

Tabela 3.3. Níveis das variáveis utilizadas na regressão múltipla de um lote comparando a amostra 1 com a amostra 2 nos ensaios de furação

	-1	1
$v_c$ (m/min)	60	100
f (mm/rot)	0,1	0,3
Teor de Cobre	1	2

Posteriormente, foi possível identificar qual a melhor amostra da liga de alumínio em relação a cada parâmetro de saída. Para esta determinada amostra foi realizada uma nova regressão múltipla. Agora, adicionando níveis centrais dos parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço). A partir desta regressão foi possível obter para esta amostra de interesse uma superfície de resposta em função dos parâmetros velocidade de corte e avanço, bem como a equação do modelo obtido. Na Tab. 3.4 é apresentado o planejamento utilizado nesta etapa. Já na Tab. 3.5 são apresentados os níveis de variação dos parâmetros utilizados para o planejamento apresentado na Tab. 3.4.

Além dos ensaios previstos no planejamento para a análise estatística, uma maior variação dos parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço) foi realizada a fim de verificar a tendência da variação dos parâmetros de saída estudados. Para cada condição de corte utilizada no processo de furação foram realizadas duas réplicas, totalizando 195 ensaios. Na Tab. 3.6 são apresentadas as condições de corte utilizadas em todos os ensaios de furação.

Tabela 3.4. Planejamento utilizado na regressão múltipla com níveis centrais utilizados nos ensaios de furação

Ensaio	x1	x2
	$V_c$	f
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	0	1
6	0	-1
7	1	0
8	-1	0
9	0	0

Tabela 3.5. Níveis das variáveis utilizadas na regressão múltipla com níveis centrais utilizados nos ensaios de furação

	-1	0	1
$v_c$ (m/min)	60	80	100
f (mm/rot)	0,1	0,2	0,3

Tabela 3.6. Parâmetros de corte velocidade de corte e avanço utilizados nos ensaios de furação

Ensaio	$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/rot)
1	60	0,1
2	100	0,1
3	60	0,3
4	100	0,3
5	80	0,1
6	80	0,15
7	80	0,2
8	80	0,25
9	80	0,3
10	60	0,2
11	70	0,2
12	90	0,2
13	100	0,2

Para os ensaios de alargamento foi utilizado o mesmo planejamento experimental realizado nos ensaios de furação. No processo de alargamento os parâmetros de saída analisados estatisticamente foram o torque e a força de avanço na ferramenta de corte, rugosidade e desvios de circularidade e cilindricidade dos furos alargados. Na Tab. 3.7 é apresentado o planejamento fatorial  $2^3$  utilizado para a realização da regressão múltipla dos dados obtidos nos ensaios de alargamento. Já na Tab. 3.8 são apresentados os níveis variados dos parâmetros utilizados para o planejamento apresentado na Tab. 3.8 em um lote no qual foi comparada a amostra 1 (0,07% Cu) com a amostra 2 (0,23% Cu) para os ensaios de alargamento.

Posteriormente, como realizado para os ensaios de furação, foi possível identificar qual a melhor amostra da liga de alumínio em relação a cada parâmetro de saída no processo de alargamento. Para esta determinada amostra foi realizada uma nova regressão múltipla. Agora, adicionando níveis centrais dos parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço). Na Tab. 3.9 é apresentado o planejamento utilizado nesta etapa, os quais correspondem a todos os ensaios de alargamento realizados para cada amostra. Já os níveis dos parâmetros utilizados nesta regressão são apresentados na Tab. 3.10. Para cada condição de corte utilizada no processo de alargamento foram realizadas duas réplicas, totalizando 135 ensaios.

Tabela 3.7. Planejamento fatorial  $2^3$  utilizado na regressão múltipla dos resultados obtidos nos ensaios de alargamento

Ensaios	x1	x2	x3
	$v_c$	f	Teor de Cobre
1	-1	-1	-1
2	-1	1	-1
3	1	-1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	-1	1	1
7	1	-1	1
8	1	1	1

Tabela 3.8. Níveis das variáveis utilizadas na regressão múltipla de um lote comparando a amostra 1 com a amostra 2 nos ensaios de alargamento

	-1	1
$v_c$	12	40
f	0,2	0,3
Teor de Cobre	1	2

Tabela 3.9. Planejamento utilizado na regressão múltipla com níveis centrais utilizados nos ensaios de alargamento

Ensaio	x1	x2
	$v_c$	f
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	0	1
6	0	-1
7	1	0
8	-1	0
9	0	0

Tabela 3.10. Níveis das variáveis utilizadas na regressão múltipla com níveis centrais utilizados nos ensaios de alargamento

	-1	0	1
$v_c$ (m/min)	12	26	40
$f$ (mm/rot)	0,20	0,25	0,30

O pré-furo para os ensaios de alargamento foi realizado utilizando  $v_c = 50$  m/min e  $f = 0,25$  mm/min. Estes parâmetros de corte estão dentro da faixa recomendada para a ferramenta de corte utilizada.

Já para os ensaios de rosqueamento foram utilizados seis níveis de velocidades de corte, mostrados na Tab. 3.11. O avanço da ferramenta neste processo é determinado pelo passo da rosca (constante  $f = 1$  mm/rot). Foi realizada uma análise de variância (ANOVA) para investigar a influência da velocidade de corte e também do teor de cobre (Cu) sobre cada uma das amostras da liga de alumínio neste processo. O parâmetro de saída analisado estatisticamente no processo de rosqueamento foi o torque na ferramenta de corte. Para cada condição de corte utilizada no processo de rosqueamento foram realizadas duas réplicas, totalizando 90 ensaios.

Tabela 3.11. Parâmetros de corte utilizados nos ensaios de rosqueamento

Ensaio	$v_c$ (m/min)
1	8
2	10
3	12
4	14
5	16
6	18

O pré-furo para os ensaios de rosqueamento foi realizado utilizando  $v_c = 30$  m/min e  $f = 0,25$  mm/min, parâmetros de corte dentro da faixa recomendada para a ferramenta de corte utilizada.

Para todos os processos de furação, alargamento e rosqueamento foram realizados um ensaio e duas réplicas, totalizando três ensaios para cada condição de corte. Assim, os valores apresentados e utilizados nas análises estatísticas são as médias dos valores obtidos nos três ensaios.

Para os ensaios de furação realizados para a análise de rebarbas foram utilizados os seguintes parâmetros de corte:  $v_c = 50$  m/min e  $f = 0,25$  mm/rot. Foram

realizados três furos para cada uma das cinco amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes quantidades de cobre.

Os cavacos analisados neste trabalho foram coletados da pré-furação para os ensaios de alargamento e também na furação para análise de rebarbas. Assim, os cavacos foram obtidos usinando com  $v_c = 50$  m/min,  $f = 0,25$  mm/rot e com duas profundidades de corte de 3,15 mm e 4,90 mm.

As amostras utilizadas para análise de alterações subsuperficiais das amostras da liga de alumínio 6351 foram obtidas com os parâmetros de corte mostrados na Tab. 3.12.

Tabela 3.12. Parâmetros de corte utilizados nos processos de usinagem para a análise de alterações subsuperficiais das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

	$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/rot)
<b>Furação</b>	80	0,20
<b>Alargamento</b>	40	0,30
<b>Rosqueamento</b>	18	1

Finalmente, os resultados apresentados na forma de gráficos neste trabalho foram apresentados com um intervalo de confiança de 95% (nível de significância  $\alpha = 0,05$ ). Segundo Montgomery e Runger (2003), se  $\bar{x}$  e  $s$  são a média e o desvio padrão de uma amostra aleatória de uma distribuição normal com variância desconhecida, um intervalo de confiança com percentual  $\alpha$  de significância de um valor estimado é dado pela Eq. 3.1. Os intervalos de confiança foram calculados a partir do software Statistica 7.0 StatSoft. Já para a construção dos gráficos apresentados nos resultados foi utilizado o software Microsoft Excel 2010.

$$\bar{x} - t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.1)$$

Onde:

- $\bar{x}$  – média amostral;
- $s$  – desvio padrão amostral;
- $\mu$  – média populacional;
- $t$  – ponto superior para um nível percentual de significância  $\alpha$  de uma distribuição t de student com  $n - 1$  graus de liberdade;
- $\alpha$  – nível de significância;
- $n$  – tamanho da amostra.

### 3.4 Ensaios de usinagem

Nesta seção serão apresentados os corpos de prova, equipamentos e ferramentas utilizados nos ensaios de furação, alargamento e rosqueamento.

#### 3.4.1 Corpos de prova

Os corpos de prova utilizados para os ensaios de furação foram confeccionados com as dimensões 150 mm x 40 mm x 25 mm. Já os corpos de prova para os ensaios de alargamento e rosqueamento foram preparados com as dimensões 129 mm x 78 mm x 13 mm. Nas Fig. 3.14 e Fig. 3.15 são apresentados desenhos esquemáticos destes corpos de prova em perspectiva e em suas vistas principais com as respectivas dimensões (mm).

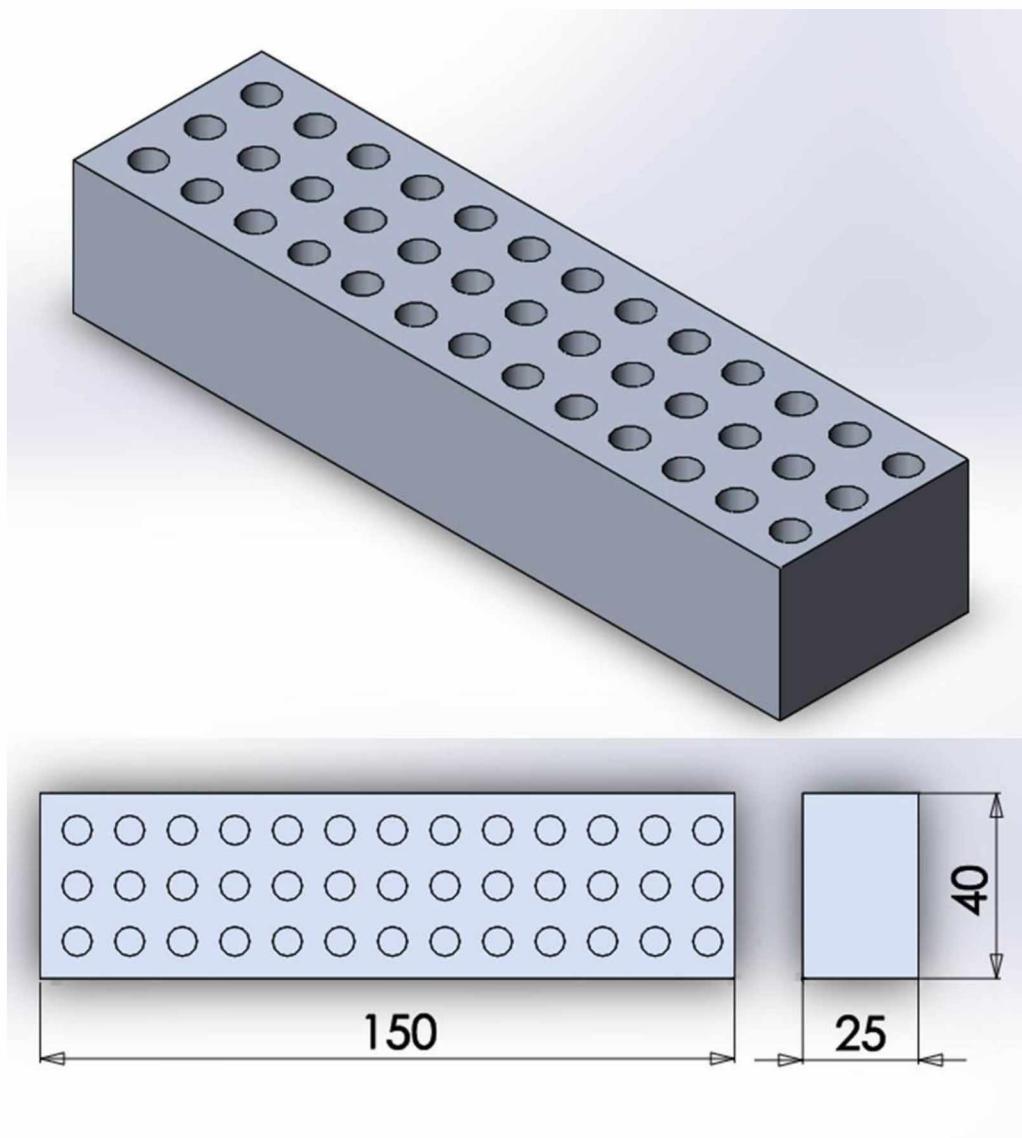


Figura 3.14. Corpo de prova para os ensaios de furação

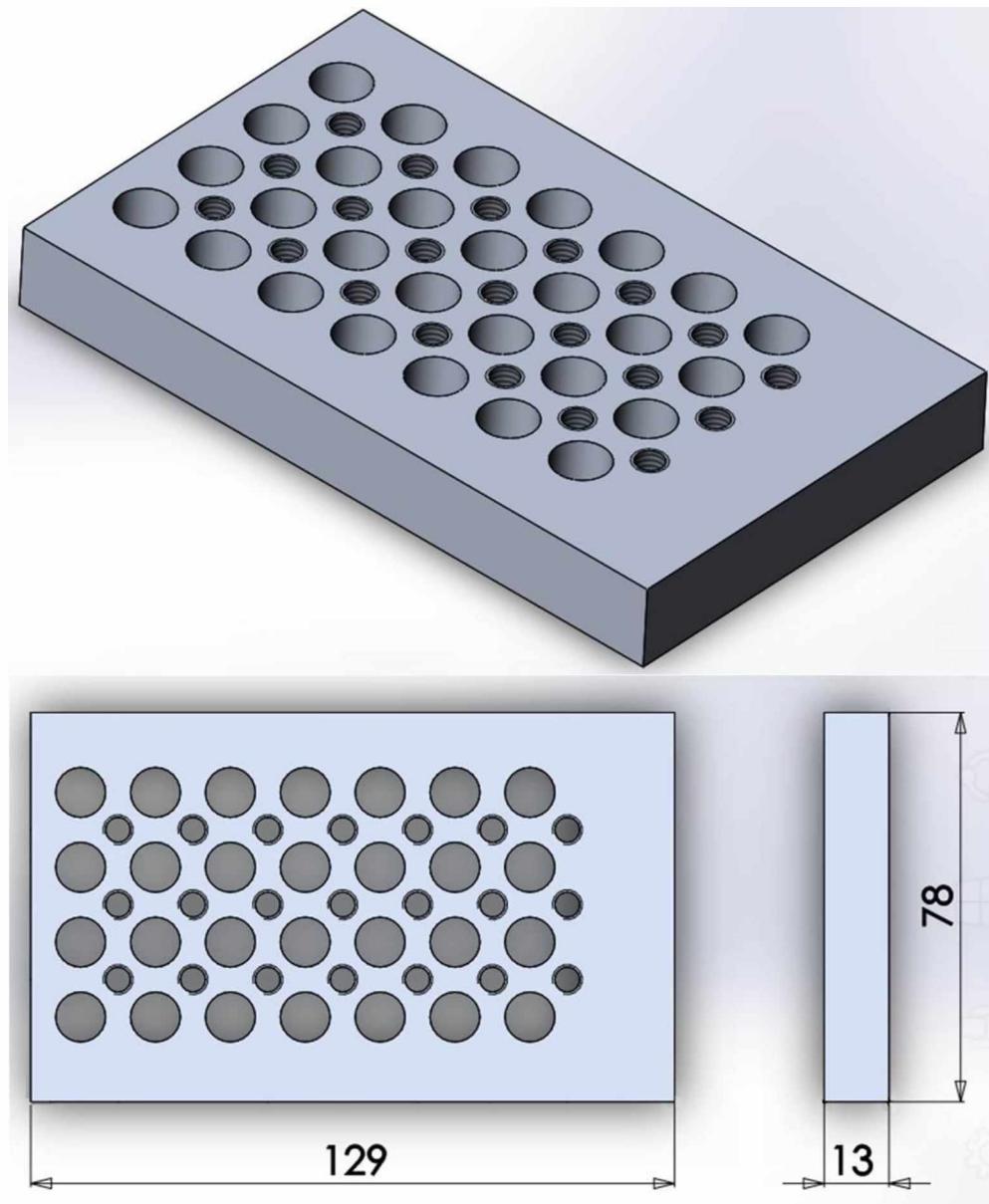


Figura 3.15. Corpo de prova para os ensaios de alargamento e rosqueamento

Para a análise das rebarbas formadas durante a furação foram utilizados corpos de prova com as mesmas dimensões dos utilizados para os ensaios de alargamento e rosqueamento. Após a usinagem, os corpos de prova foram cortados com aproximadamente as dimensões 75 mm x 28 mm x 13 mm, conforme apresentado na Fig. 3.16.



Figura 3.16. Corpo de prova após ensaios de furação para análise de rebarbas

### 3.4.2 Equipamentos e ferramentas

Os ensaios de usinagem foram realizados em um Centro de Usinagem Vertical Romi Discovery 760 (Fig. 3.17), de rotação máxima de 10.000 rpm do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).



Figura 3.17. Centro de Usinagem Romi Discovery

Para os ensaios de furação, a ferramenta de corte utilizada foi uma broca Dormer A9201/4, apresentada na Fig. 3.18, com as suas principais características e dimensões especificadas na Tab. 3.13. Trata-se de uma broca de aço-rápido com adição de cobalto (HSS-E), sem revestimento, que possui  $\frac{1}{4}$ " ou 6,35 mm de diâmetro e  $130^\circ$  de ângulo de ponta. Indicada para a usinagem de furos com o comprimento de até três vezes o seu diâmetro, corte à direita, possui haste cilíndrica e canais helicoidais tipo W, com ângulo de hélice na faixa de  $35^\circ$  a  $40^\circ$ , apropriada para a usinagem de alumínio e suas ligas (STEMMER, 1995).

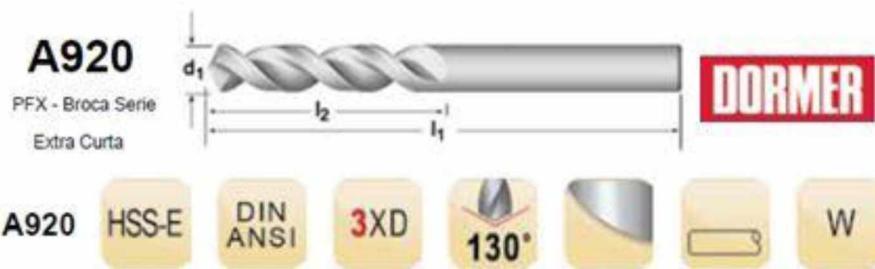


Figura 3.18. Broca A920 utilizada nos ensaios de furação (DORMER, 2015)

Tabela 3.13. Dimensões e ângulos da broca A920 utilizada nos ensaios de furação (DORMER, 2015)

Dimensão/Ângulo	
Diâmetro $d_1$	6,35 mm ou 1/4"
Comprimento $l_1$	64 mm
Comprimento $l_2$	35 mm
Ângulo de ponta	130°
Ângulo de hélice	35° - 40°

Os ensaios de alargamento foram realizados por um alargador máquina 5202 Indaço de aço-rápido para furo com tolerância H7 e 10 mm de diâmetro. Possui haste cilíndrica, 6 dentes helicoidais e 8° de ângulo de hélice à esquerda para corte à direita, apresentado na Fig. 3.19, com suas respectivas dimensões na Tab. 3.14. O comprimento alargado foi de 16 mm (furo vazado). Além disso, o avanço de retorno do alargador foi mantido igual ao avanço de entrada do mesmo.

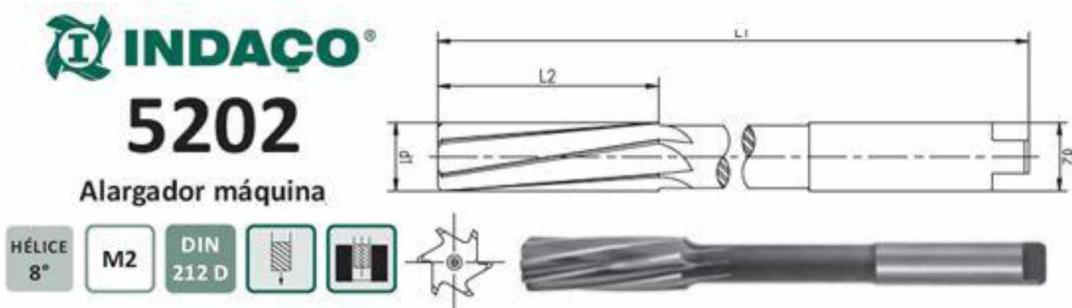


Figura 3.19. Alargador 5202 utilizado nos ensaios de alargamento (INDAÇO, 2015)

Tabela 3.14. Dimensões e especificações do alargador 5202 utilizado nos ensaios de alargamento (INDAÇO, 2015)

Dimensão/Ângulo	
Diâmetro d1 H7	10 mm
Diâmetro d2 h9	10 mm
Comprimento L1	133 mm
Comprimento L2	38 mm
Z (nº de dentes)	6
Ângulo de hélice	8°

Já os ensaios de rosqueamento foram realizados por um macho máquina 169 STF-AL OSG (Fig. 3.20) em aço-rápido para furo com tolerância 6H. Possui diâmetro M6 mm, passo de 1 mm e 2 canais helicoidais com 45° de ângulo de hélice. Suas dimensões e ângulos são mostrados na Tab. 3.15. O comprimento de rosqueamento utilizado foi de 13 mm e foi utilizada a mesma rotação de entrada e saída do macho.

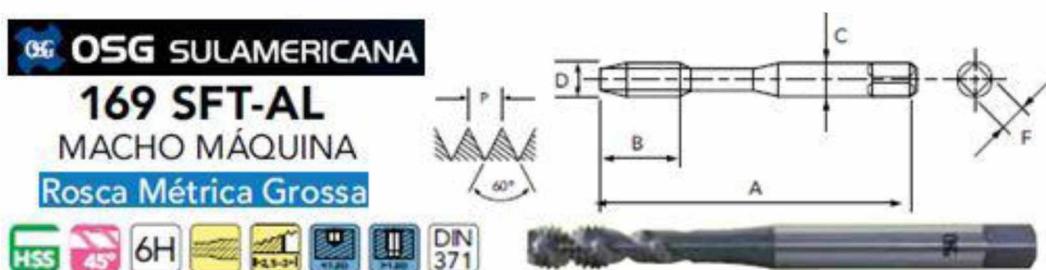


Figura 3.20. Macho máquina 169 SFT-AL utilizado nos ensaios de rosqueamento (OSG SULAMERICANA, 2012)

Tabela 3.15. Dimensões e ângulos do macho máquina 169 STF-AL utilizado nos ensaios de rosqueamento (OSG SULAMERICANA, 2012)

Dimensão/Ângulo	
Diâmetro D	M6 mm
Diâmetro C	6 mm
Largura F	4,9 mm
Comprimento B	10 mm
Comprimento A	80 mm
Passo P	1 mm
Nº de canais	2
Ângulo de hélice	45°

A escolha do diâmetro do pré-furo para os ensaios de alargamento foi realizada com base no sobremetal recomendado no furo para a utilização do alargador, segundo o fabricante do mesmo. Na Tab. 3.16 é apresentado o sobremetal recomendado no furo para utilização do alargador. Assim, para o diâmetro do furo alargado de 10 mm, o pré-furo foi realizado com uma broca de 9,8 mm.

Tabela 3.16. Sobremetal recomendado no furo para utilização do alargador (INDAÇO, 2015)

Diâmetro do Furo	Sobremetal no Diâmetro
Até 10 mm	0,2 mm
De 10 a 18 mm	0,25 mm
De 18 a 30 mm	0,3 mm
De 30 a 50 mm	0,4 mm
De 50 a 100 mm	0,5 mm

Exemplo: Alargador ø15mm - furar com broca ø14,75mm

Já na seleção da broca para realizar o furo antes do rosqueamento foram considerados o tipo, diâmetro e passo da rosca. Na Tab. 3.17 é apresentada a tolerância do diâmetro de furo para rosca e o diâmetro da broca segundo o fabricante do macho de corte. Desta forma, para a rosca de diâmetro M6 mm e passo 1 mm, foi selecionada a broca de 5 mm.

Tabela 3.17. Tolerância do diâmetro de furo para rosca (OSG SULAMERICANA, 2012)

### Roscas Métricas Roscas Métricas DIN 13. ISO 724/965.1

Unid.:mm

Tamanho da Rosca Tamaño de la Rosca	Diâm. da Broca Diám. de la Broca	Tolerância da Rosca Interna 6H (Classe 2) Tolerancia de la Rosca Interna 6H (Clase 2)	
		Mín.	Máx.
M 6 X 1	5,0	4,917	5,153

A partir das duas seleções realizadas anteriormente, para os ensaios de alargamento e rosqueamento, a pré-furação foi realizada utilizando brocas Dormer A100 com diâmetros de 9,8 mm e 5,0 mm respectivamente, apresentadas na Fig. 3.21, com as suas principais características e dimensões especificadas na Tab. 3.18. A broca A100 é feita de aço rápido (HSS), sem revestimento e com 118° de

ângulo de ponta. É indicada para a usinagem de furos com o comprimento de até quatro vezes o seu diâmetro e corte à direita. Possui haste cilíndrica e canais helicoidais tipo N, com ângulo de hélice na faixa de 20° a 30°.

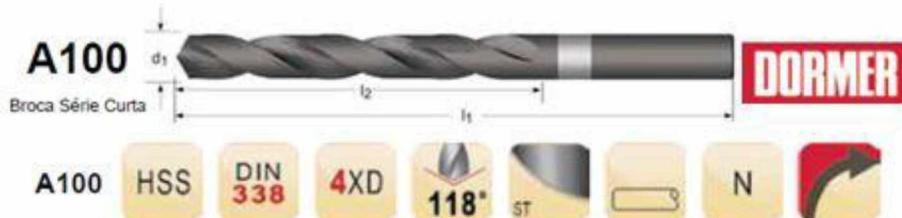


Figura 3.21. Broca A100 utilizada na pré-furação dos ensaios de alargamento e rosqueamento (DORMER, 2015)

Tabela 3.18. Dimensões e ângulos da broca A100 utilizada na pré-furação dos ensaios de alargamento e rosqueamento (DORMER, 2015)

Dimensão/Ângulo		
Diâmetro $d_1$	5,00 mm	9,80 mm
Comprimento $l_1$	86 mm	133 mm
Comprimento $l_2$	52 mm	87 mm
Ângulo de ponta	118°	118°
Ângulo de hélice	20° - 30°	20° - 30°

Por fim, para a análise de rebarbas foram realizados ensaios de furação, nos quais a ferramenta utilizada foi uma broca CoroDrill 460-XM Sandvik Coromant, apresentada na Fig. 3.22. Trata-se de uma broca inteiriça de metal duro e sem revestimento. Possui diâmetro de 6,30 mm, ângulo de ponta de 140° e é indicada para furos com comprimento de até três vezes o seu diâmetro. Pode ser aplicada em uma ampla gama de materiais, incluindo a categoria ISO dos materiais não ferrosos (N), que contempla o alumínio e suas ligas. As dimensões e ângulos estão apresentados na Tab. 3.19.

Os ensaios de furação foram realizados utilizando como fluido de corte uma emulsão à base de óleo vegetal Vasco 1000 com 7% de concentração e aplicado na forma de jorro. Já os ensaios de alargamento, rosqueamento, bem como a pré-furação para estes dois processos, foram realizados utilizando como fluido de corte uma emulsão à base de óleo vegetal Vasco 1000 Blaser Swisslube. A emulsão foi preparada com 9% de concentração. O fluido de corte foi aplicado na forma de jorro.

Por fim, para os ensaios de furação para a análise de rebarbas foi utilizado como fluido de corte uma emulsão à base de óleo mineral Blasocut 40 NF Blaser. Esta

emulsão foi preparada com concentração de 7%. O fluido de corte novamente foi aplicado na forma de jorro. A variação dos fluidos utilizados nos ensaios de usinagem se explica pela logística do laboratório no qual foram realizados os ensaios. E também, devido aos ensaios terem sido realizados em períodos diferentes e não em apenas uma bateria de testes. Desta forma, sempre foi utilizado o fluido disponível na máquina-ferramenta no momento do ensaio. Levando sempre em consideração a correta adequação do uso deste determinado fluido na usinagem da liga de alumínio 6351 estudada neste trabalho. É importante ressaltar que, para um mesmo processo sempre foi utilizado o mesmo fluido. Assim, não tornando o fluido uma variável do processo e, consequentemente, não afetando as respostas de saída avaliadas.

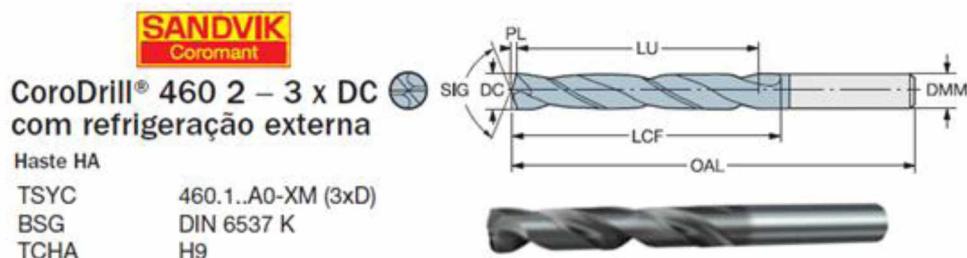


Figura 3.22. Broca Corodrill 460-XM utilizada nos ensaios de furação para análise de rebarbas (SANDVIK, 2012)

Tabela 3.19. Dimensões e ângulos da broca Corodrill 460-XM utilizada nos ensaios de furação para análise de rebarbas (SANDVIK, 2012)

Dimensão/Ângulo	
Diâmetro de corte (DC)	6,30 mm
Comprimento útil (LU)	19 mm
Diâmetro da haste (DMM)	8 mm
Comprimento total (OAL)	79 mm
Comprimento do canal para cavacos (LCF)	34 mm
Comprimento da ponta (PL)	1,15 mm
Ângulo de ponta (SIG)	140°

### 3.4.3 Aquisição de força e torque

Para a aquisição dos sinais de torque e força de avanço durante os ensaios de furação, alargamento e rosqueamento foi utilizado um dinamômetro rotativo 9123C1211 Kistler, mostrado na Fig. 3.23, com suas dimensões e especificações apresentadas na Tab. 3.20. O dinamômetro é munido de células de carga, que por sua vez, possuem cristais piezoelétricos. À medida que uma força é aplicada, o cristal se

deforma e gera um sinal elétrico (pC). No caso de dinamômetros rotativos este sinal é captado por um estator sem contato e através de um cabo de transmissão é enviado a um amplificador e condicionador de sinais 5223 Kistler, que transforma este sinal elétrico em uma diferença de potencial (mV). Posteriormente, o sinal proveniente do amplificador passa por um bloco de conectores BNC-2110 National Instruments e por fim, através de um cartão DAQCard-6024E, chega ao computador, no qual o sinal foi capturado pelo software LabView 7.6 National Instruments à uma taxa de 1 kHz. Na Fig. 3.24 é apresentado um desenho esquemático da montagem dos equipamentos utilizados nas medições de torque e força de avanço.



Figura 3.23. Dinamômetro rotativo 9123C utilizado na aquisição do torque e força de avanço (KISTLER, 2009)

A seleção da taxa de aquisição utilizada para a aquisição dos sinais de força e torque durante os processos de furação, alargamento e rosqueamento realizados neste trabalho foi feita levando em consideração o teorema da amostragem ou teorema de Nyquist-Shannon. Segundo este teorema, um sinal analógico limitado em banda, pode ser perfeitamente recuperado a partir de uma sequência infinita de amostras, se a taxa de amostragem for maior que duas vezes a maior frequência do sinal original (OGATA, 1995).

Para os processos de usinagem, a maior frequência do sinal depende do movimento de corte. No caso dos processos utilizados neste trabalho, o movimento de corte é resultado da rotação da ferramenta de corte e da quantidade de arestas de corte atuando simultaneamente. Desta forma, a maior frequência do sinal, cortes por segundo, dependerá destes dois fatores.

Tabela 3.20. Dimensões e especificações do dinamômetro rotativo 9123C utilizado na aquisição do torque e força de avanço (KISTLER, 2009)

Especificações	Unidade	Tipo 9123C
Faixa de Medição $F_x, F_y$	kN	-5 ... 5
$F_z$	kN	-20 ... 20
$M_z$	N.m	-200 ... 200
Rotação	rpm	10 000 máx.
Sensibilidade $F_x, F_y$	mV/N	$\approx 2$
$F_z$	mV/N	$\approx 0,5$
$M_z$	mV/N.m	$\approx 50$
Frequência natural $f_{n_x}, f_{n_y}, f_{n_z}$ e $f_n (M_z)$	kHz	$\approx 2$
Faixa de temperatura de operação	°C	0 ... 60
DxH	mm	115x52
Peso	kg	3
Transmissão de sinal		Sem contato

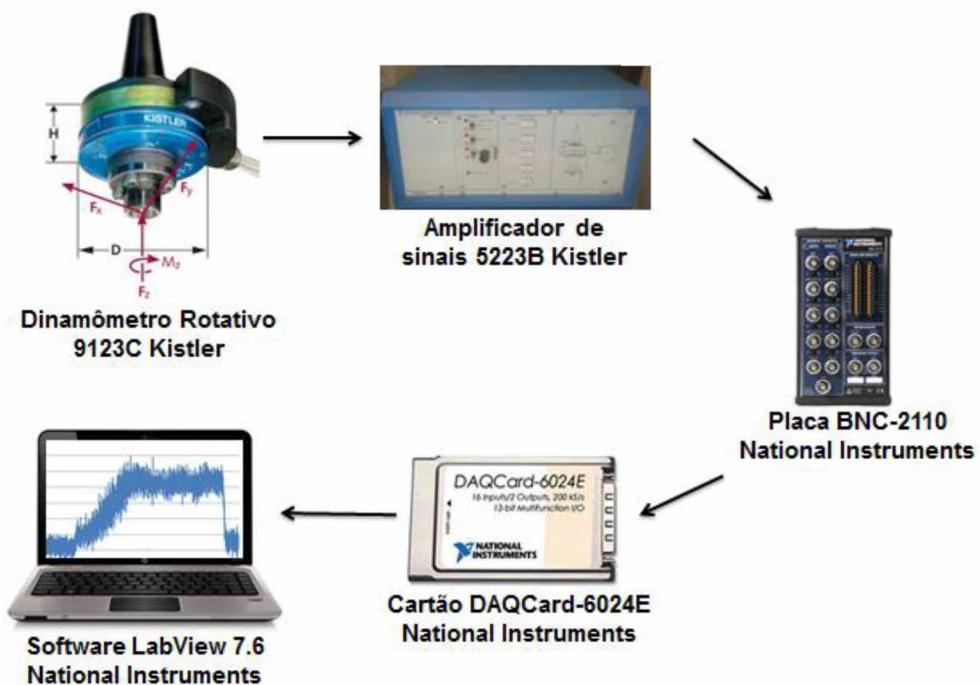


Figura 3.24. Desenho esquemático da montagem dos equipamentos utilizados nas medições de torque e força de avanço

Nos ensaios de furação a maior rotação da ferramenta de corte utilizada foi 5015 rpm, ou 83,58 ciclos por segundo (Hz). Como a broca utilizada no processo de furação possui duas arestas de corte, têm-se  $83,58 \times 2 = 167,16$  cortes por segundo. Assim, a maior frequência do sinal ( $f_{máx}$ ) durante o processo de furação é 167,16 cortes por segundo. Utilizando o teorema de amostragem, a frequência de amostragem ( $f_s$ ) deve ser maior que  $2 \times 167,16 = 334,33$  Hz.

Já para os ensaios de alargamento a maior rotação da ferramenta de corte utilizada foi 1274 rpm, ou 21,23 ciclos por segundo (Hz). Como o alargador utilizado no processo de alargamento possui 6 arestas de corte, resulta em  $21,23 \times 6 = 127,38$  cortes por segundo. Assim, a maior frequência do sinal ( $f_{máx}$ ) durante o processo de alargamento é 127,38 cortes por segundo. A partir do teorema de amostragem a frequência de amostragem ( $f_s$ ) deve ser maior que  $2 \times 127,38 = 254,76$  Hz.

Por fim, para o processo de rosqueamento a maior rotação da ferramenta de corte utilizada foi 955 rpm, ou 15,92 ciclos por segundo (Hz). Como o macho de corte utilizado no processo de rosqueamento possui 8 filetes, quando todos estiverem cortando ao mesmo tempo, têm-se  $15,92 \times 8 = 127,36$  cortes por segundo. Assim, a maior frequência do sinal ( $f_{máx}$ ) durante o processo de rosqueamento é 127,36 cortes por segundo. A partir do teorema de amostragem a frequência de amostragem ( $f_s$ ) deve ser maior que  $2 \times 127,36 = 254,72$  Hz.

Portanto, a taxa de aquisição selecionada (1 KHz), satisfaz com boa margem de folga o limite inferior estabelecido pelo teorema de amostragem. Garantindo assim, satisfatória reconstrução dos sinais de força e torque obtidos durante os processos de usinagem estudados.

A formação dos cavacos em processos de usinagem é um fenômeno cíclico. Desta forma, durante a usinagem existe certa oscilação característica das forças impostas à ferramenta de corte. Na Fig. 3.25 é apresentado um gráfico com as medições de torque e força de avanço no processo de alargamento da amostra 5 (1,93% Cu) da liga de alumínio 6351 com  $v_c = 40$  m/min e  $f = 0,3$  mm/rot. A partir do gráfico é possível observar que no início da usinagem o sinal do torque e da força se elevam do zero até um determinado valor. A partir deste momento ele oscila em torno de um valor e depois decresce até o zero ao final do processo de usinagem. Desta forma, para os ensaios de furação e alargamento, o intervalo utilizado para o cálculo do torque e força de avanço médios compreende cerca de  $\frac{1}{4}$  à  $\frac{3}{4}$  do tempo de corte propriamente dito.

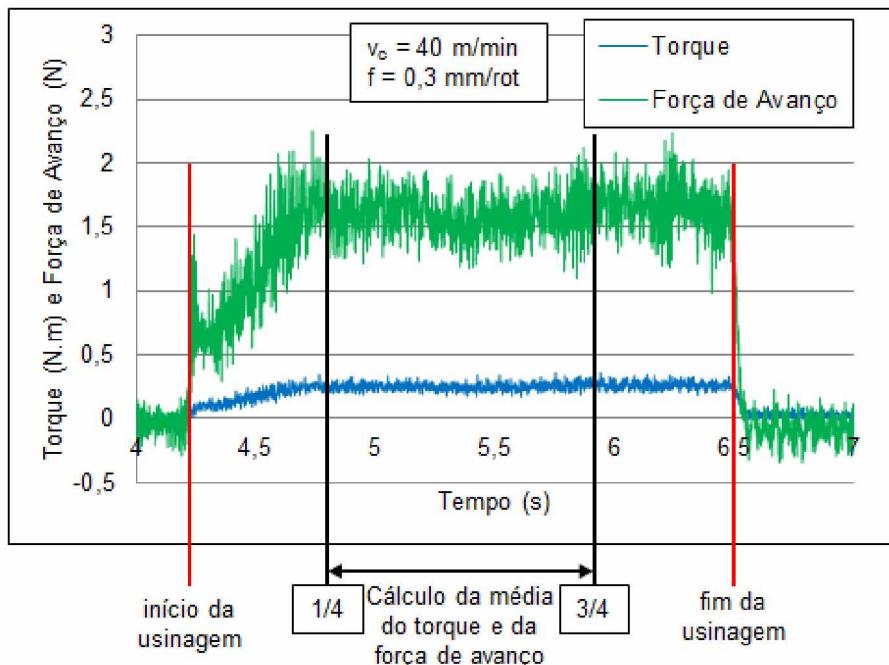


Figura 3.25. Medição típica do torque e da força de avanço no alargamento e o intervalo do cálculo da média dos valores

Devido às peculiaridades do processo de rosqueamento, as forças geradas durante esse processo possuem características distintas em relação aos processos de furação e alargamento. Na Fig. 3.26 é mostrada uma curva do sinal de torque imposto ao macho de corte durante o rosqueamento da amostra 5 (1,93% Cu) da liga de alumínio 6351 usinando com  $v_c = 18$  m/min e  $f = 1$  mm/rot (passo da rosca). Analisando este gráfico é possível verificar o período de corte no rosqueamento que engloba a entrada do macho de corte e o rosqueamento com o macho dentro do furo. O torque máximo no rosqueamento foi obtido coletando o maior valor do torque no intervalo de corte durante o processo. Após a usinagem, acontece a parada do eixo árvore e, posteriormente, o sentido de rotação da ferramenta de corte é invertido. Resultando assim, no pico de torque na reversão do sentido de rotação e o intervalo do retorno do macho de corte.

Na Fig. 3.27 é apresentada a montagem utilizada durante os ensaios de usinagem, apresentando os equipamentos para a aquisição dos sinais de força e torque, ferramenta de corte, mangueira para a aplicação de fluido de corte e corpo de prova montados na máquina-ferramenta para o caso dos ensaios de furação.

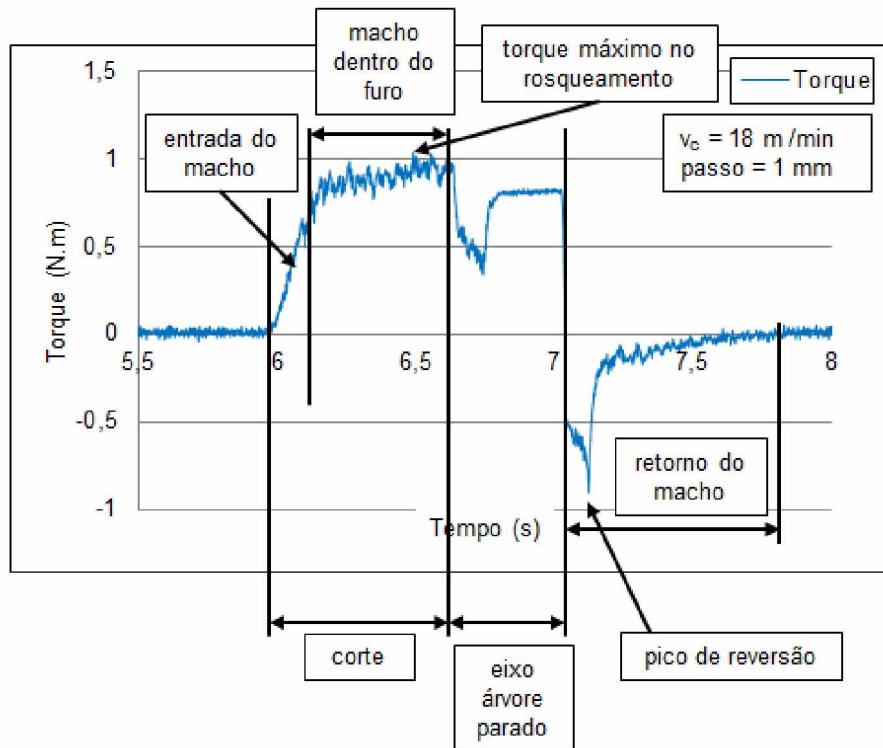


Figura 3.26. Medição típica do torque no rosqueamento, os intervalos de corte e retorno do macho, torque máximo e pico de reversão

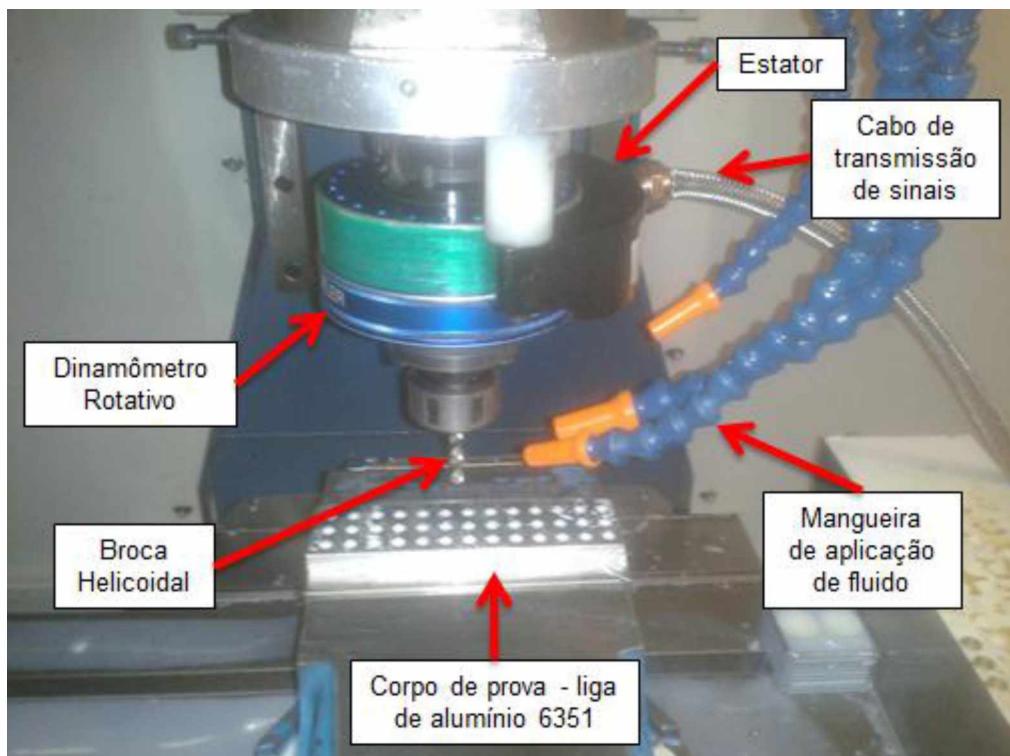


Figura 3.27. Equipamentos para a aquisição dos sinais de força e torque, ferramenta de corte, mangueira para a aplicação de fluido de corte e corpo de prova montados na máquina-ferramenta para o caso dos ensaios de furação

### 3.4.4 Medição de rugosidade

Os valores do parâmetro de rugosidade  $Rq$  (desvio médio quadrático) da parede dos furos gerados nos ensaios de furação e alargamento foram obtidos utilizando um perfilômetro Form Talysurf 50 do fabricante Taylor Hobson Precision, com 16 nm de resolução, mostrado na Fig. 3.28. Em processos de usinagem que geram perfis de rugosidade periódicos, o cut-off a ser utilizado depende dos sulcos deixados pelo avanço da ferramenta de corte (NOVASKI, 1994), como mostrado na Tab. 3.21. Assim, como os avanços utilizados variam de 0,1 mm/rot a 0,3 mm/rot foi selecionado o cut-off de 0,8 mm para um percurso de medição de 4 mm. Para cada condição de corte foram realizadas três medições, sendo apresentada nos resultados a média dos valores de rugosidade. Na medição da rugosidade dos furos obtidos na furação foi necessário realizar um corte transversal nos furos a fim de obter acesso do apalpador do perfilômetro devido ao diâmetro reduzido destes furos  $d = 6,35$  mm (Fig. 3.28). Já para a medição dos furos alargados ( $d = 10$  mm) este procedimento não foi necessário.

Tabela 3.21. Seleção do cut-off e percurso de medição para a medição de rugosidade em superfícies com perfil periódico a partir da distância entre sulcos gerados pelo avanço da ferramenta de corte (NOVASKI, 1994)

Distância entre sulcos (mm)	Cut-off (mm)	Percorso de medição (mm)
De 0,01 a 0,032	0,08	0,4
De 0,032 a 0,1	0,25	1,25
De 0,1 a 0,32	0,8	4
De 0,32 a 1	2,5	12,5
De 1 a 3,2	8,0	40

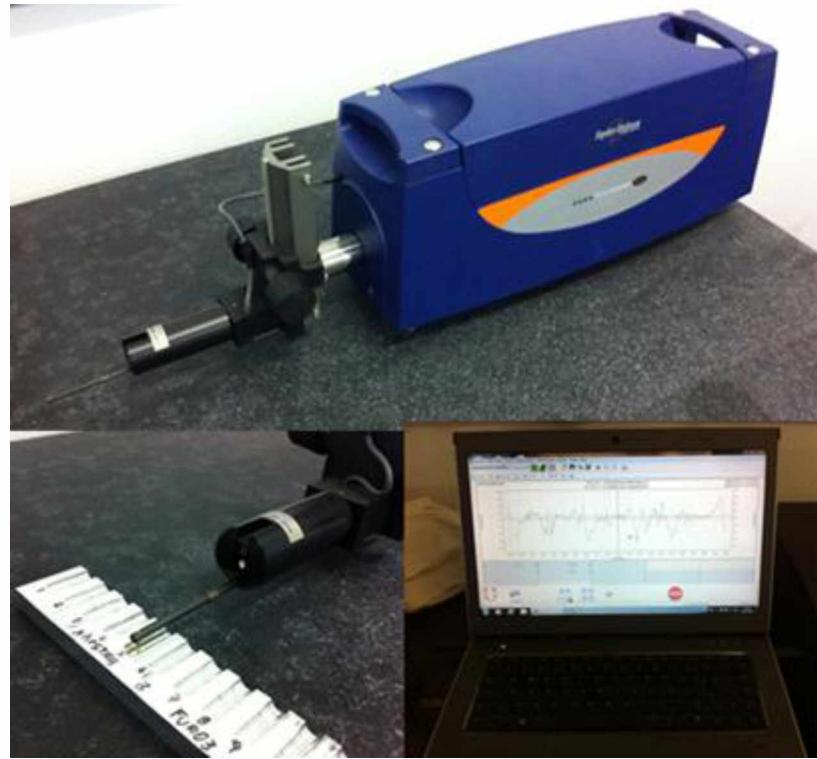


Figura 3.28. Perfilômetro Form Talysurf 50 utilizado nas medições de rugosidade

### 3.4.5 Medição de circularidade e cilindricidade

As medições dos erros de forma de circularidade e cilindricidade dos furos alargados foram realizadas em um Circularímetro Talyrond 131 Taylor Hobson, apresentado na Fig. 3.29. A máquina possui uma mesa com mecanismo manual de nivelamento e centragem de peças e as medições são gerenciadas pelo software Ultra Roundness. Possui resolução de 6 nm, precisão de 0,025  $\mu\text{m}$ , suporta peso máximo de 20 kg, altura máxima de 225 mm e diâmetro máximo de 370 mm. A circularidade foi obtida em três planos espaçados de 3 mm entre si e iniciando à 3 mm da superfície da peça como mostrado na Fig. 3.30. As circularidades obtidas nestes três planos compõem juntamente a cilindricidade do furo alargado. Para cada condição de corte foram realizadas três medições, o que corresponde a nove medições de circularidade e três de cilindricidade. Como foram realizados um ensaio e duas réplicas para cada condição de corte, as médias dos valores de circularidade apresentados nos resultados correspondem à média de 27 medições. Já as médias dos valores de cilindricidade correspondem à média de 9 medições.



Figura 3.29. Circularímetro Talyrond 131 utilizado nas medições dos erros de forma de circularidade e cilindricidade

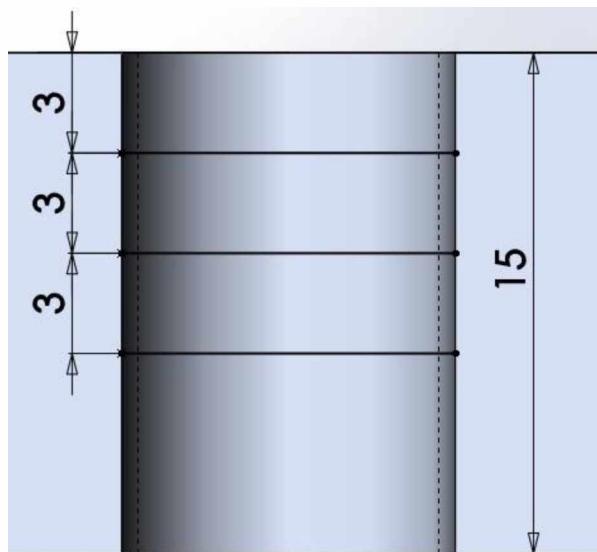


Figura 3.30. Representação dos planos de medição de circularidade e cilindricidade

### 3.4.6 Medição do diâmetro dos furos

Segundo Nouari et al. (2005), na indústria, o desvio do diâmetro mínimo e máximo de furos é uma importante informação frequentemente utilizada para avaliar a qualidade e exatidão dimensional de furos obtidos pelo processo de furação.

A medição do diâmetro dos furos obtidos nos processos de furação e alargamento foi realizada em uma máquina de medir a três coordenadas (MM3) Mitutoyo BR-M443 do Laboratório de Metrologia da Universidade Federal de Uberlândia, com resolução de 0,001 mm, mostrada na Fig. 3.31. As medições foram realizadas apalpando oito pontos igualmente espaçados de 45 graus ao longo do

diâmetro dos furos, como mostrado na Fig. 3.32. Os pontos foram apalpados aleatoriamente distribuídos ao longo da altura do cilindro.



Figura 3.31. Máquina de medir a três coordenadas (MM3) Mitutoyo BR-443 utilizada na medição do diâmetro dos furos obtidos nos ensaios de furação e alargamento

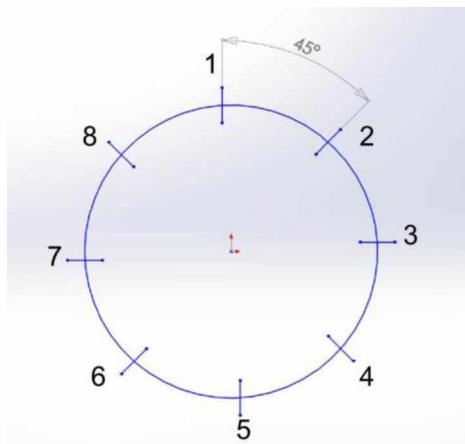


Figura 3.32. Esquema de pontos apalpados para as medições do diâmetro dos furos

Na apresentação dos resultados obtidos na medição dos diâmetros dos furos também é apresentado o diâmetro máximo para o campo de tolerância H.

Segundo Novaski (1994) no sistema furo-base, a linha zero constitui o limite inferior da tolerância do furo, ou seja, é o sistema em que o afastamento inferior do furo é igual à zero, portanto a dimensão mínima do furo é igual à zero. Os furos H são os elementos básicos do sistema, ou seja, em um acoplamento, sempre que a posição do campo de tolerância do furo for representada pela letra H, tem-se um acoplamento no sistema furo-base. Neste sistema, independente se o ajuste é com folga, incerto ou com interferência, sempre o afastamento inferior do furo será zero e o afastamento

superior será maior do que zero, sendo que o ajuste será dado pela posição do campo de tolerância do eixo.

A qualidade de trabalho indica o grau de precisão fixado pela norma de tolerâncias e ajustes. O sistema de tolerâncias prevê 18 qualidades de trabalho, designadas pelas letras IT, onde I = ISO e T = tolerância. Para furos, as qualidades de IT1 à IT4 são recomendadas para calibradores. Já as qualidades de IT5 à IT11 são recomendadas para peças que formam conjuntos. E por fim, as qualidades com designação superiores à IT11 são recomendadas para a execução mais grosseira de peças que não farão parte de um conjunto (NOVASKI, 1994).

A tolerância normal de superfícies furadas é da ordem de IT11. Para obter furos mais precisos, o alargamento pode ser utilizado para a obtenção de tolerância na faixa de IT7 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Para este trabalho foi selecionado o campo de tolerância H e as qualidades de trabalho IT11 e IT7 para os furos obtidos nos processo de furação e alargamento, respectivamente.

De acordo com Novaski (1994) para dimensões superiores a 3 mm, para os furos com campo de tolerância de J à N até a qualidade de trabalho 8, o afastamento superior pode ser obtido a partir da Eq. 3.2.

$$A_{s(n)} = a_{i(n-1)} + [IT_{(n)} - IT_{(n-1)}] \quad (3.2)$$

onde:

- $A_{s(n)}$  = afastamento superior do furo para a qualidade de trabalho n;
- $a_{i(n-1)}$  = afastamento inferior do eixo para a qualidade de trabalho n-1;
- $IT_{(n)}$  = tolerância para a qualidade de trabalho n;
- $IT_{(n-1)}$  = tolerância para a qualidade de trabalho n-1.

Assim, como o diâmetro nominal dos furos obtidos na furação é 6,35 mm e 10 mm para os furos obtidos no alargamento, utilizando a Eq. 3.2 foram obtidos os afastamentos superiores de 32  $\mu\text{m}$  para H11 na furação e 6  $\mu\text{m}$  para H7 no alargamento. Desta forma, o diâmetro máximo dos furos obtidos na furação para H11 é 6,382 mm e o diâmetro máximo dos furos obtidos no alargamento para H7 é 10,006 mm.

Na análise do diâmetro dos furos obtidos nos processos de furação e alargamento foi avaliada apenas a influência do teor de cobre adicionado na liga de alumínio 6351. Não foi levada em consideração a influência dos parâmetros de corte velocidade de corte e avanço. Para cada amostra da liga de alumínio, o diâmetro dos

furos obtidos pelo processo de furação foi medido em 4 furos com duas velocidades de corte (60 m/min e 100 m/min) e dois avanços (0,1 mm/rot e 0,3 mm/rot). Para cada furo foram realizadas três medições. Assim, os resultados apresentam o diâmetro médio de 12 medições. Já para os furos alargados, o diâmetro dos furos obtidos em cada amostra da liga de alumínio foi medido em 4 furos com duas velocidades de corte (12 m/min e 40 m/min) e dois avanços (0,2 mm/rot e 0,3 mm/rot). Para cada furo foram realizadas cinco medições. Assim, os resultados apresentam o diâmetro médio de 20 medições.

#### 3.4.7 Avaliação dos filetes das roscas

Foi feita uma análise visual. A avaliação do filete das roscas geradas nas diferentes amostras da liga de alumínio 6351 foi realizada utilizando os microscópios ótico e de varredura eletrônica anteriormente apresentados. Foi analisada a morfologia e integridade dos filetes.

#### 3.4.8 Análise da formação dos cavacos

Na operação de furação são desejáveis cavacos pequenos e satisfatoriamente quebrados. Pois, quanto maiores são os cavacos formados, estes não se movem facilmente pelos canais helicoidais. Isto pode provocar aumentos no torque aplicado na ferramenta de corte e porventura causar a quebra da broca (BATZER et al., 1998).

A análise dos cavacos formados durante o processo de furação das cinco amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre foi realizada primeiramente com base em sua morfologia e tamanho.

Além desta análise, foi realizada uma estimativa do número de cavacos por grama, proposto por Zedan e Alkahtani (2013), para cada amostra da liga utilizada. Este procedimento permitiu a avaliação da influência do teor de cobre na capacidade de quebra dos cavacos durante a usinagem das diferentes amostras da liga de alumínio. O parâmetro número de cavacos por grama foi estimado a partir da medição da massa de dez unidades de cavacos escolhidos aleatoriamente para cada uma das amostras. Após a medição, o cálculo foi realizado dividindo a massa mensurada por dez (unidades de cavacos). A medição da massa dos cavacos foi realizada a partir de uma balança semi-analítica Shimadzu BL 3200 H, com resolução de 0,01 g e capacidade de medição de 3200 g, do Laboratório de Metrologia do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT) da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), apresentada na Fig. 3.33.

Como citado anteriormente, os cavacos foram coletados para duas profundidades de corte ( $a_p = 3,15$  mm e 4,90 mm). Para cada amostra da liga de

alumínio foram realizadas dez medições da massa de dez unidades de cavacos. Desta forma, o valor médio do parâmetro número de cavacos por grama apresentado nos resultados corresponde a uma média de dez medições.



Figura 3.33. Balança semi-analítica utilizada na medição da massa dos cavacos para obtenção do parâmetro cavacos por grama

### 3.4.9 Análise da formação de rebarbas

A análise das rebarbas obtidas no processo de furação foi realizada utilizando um microscópio Olympus SZ61, com um aumento de 12x. As imagens foram capturadas por uma câmera PixelLINK PL-A662 e as medições realizadas a partir do software Image-Pro Express MediaCybernetics. Na Fig. 3.34 são apresentados microscópio e câmera utilizados na medição das rebarbas.



Figura 3.34. Microscópio Olympus SZ61 e câmera PixelLINK PL-A662 utilizados na medição das rebarbas

Foi adotado como critério para a determinação das rebarbas que qualquer material aderido à peça após a usinagem foi considerado a rebarba. O parâmetro utilizado foi a altura da rebarba, tanto de entrada como de saída. A altura da rebarba corresponde à distância da superfície da peça até o ponto mais alto da rebarba, medida perpendicularmente à superfície da peça que foi submetida ao processo de furação, como mostrado na Fig. 3.35. A maior altura da rebarba foi coletada para cada furo analisando o mesmo por duas vistas laterais diferentes. Como para cada amostra da liga de alumínio 6351 foram realizados três furos, os resultados apresentados correspondem à média dos seis valores obtidos da máxima altura das rebarbas de cada furo. As rebarbas foram avaliadas tanto em função da máxima altura como também da sua morfologia. A forma da rebarba é importante por causa do seu tamanho. Consequentemente, o custo da rebarbação é grandemente dependente de sua forma (KIM; MIN; DORNFELD, 2001).

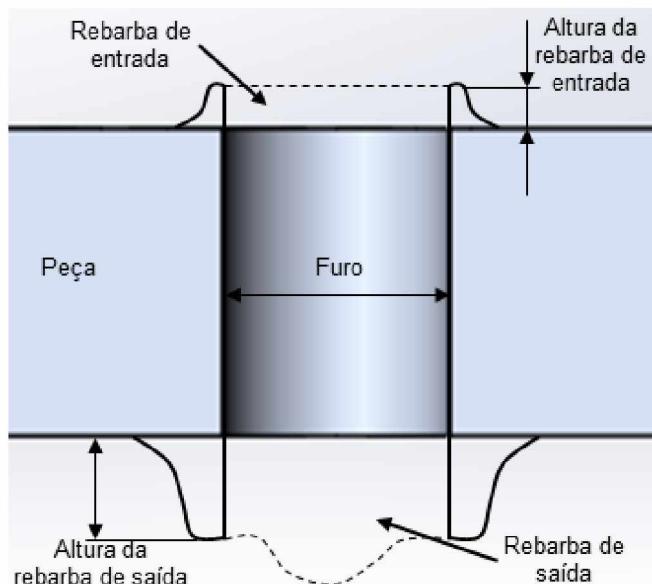


Figura 3.35. Esquema de medição da altura das rebarbas de entrada e saída na furação

# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das propriedades das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. Além disso, também serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de furação, alargamento e rosqueamento.

### 4.1 Caracterização das amostras da liga de alumínio 6351

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para a caracterização das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. Foi realizada a análise da microestrutura, ensaios de dureza, microdureza, tração e impacto.

#### 4.1.1 Análise da microestrutura

Na Fig. 4.1 são apresentadas as micrografias obtidas por microscopia ótica das cinco diferentes amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. Foram utilizados três aumentos diferentes, 50x, 100x e 200x.

Porosidade foi observada em todas as amostras, destacadas pelas setas presentes na Fig. 4.1. Segundo Tiryakioglu e Staley (2003) a porosidade em ligas de alumínio pode surgir tanto pela contração durante a solidificação como por hidrogênio em solução no metal. Os poros de hidrogênio são geralmente de formato esférico, enquanto a porosidade devida à contração é mais alongada. Consequentemente, o último tipo de porosidade afeta mais negativamente as propriedades mecânicas da liga do que os poros de hidrogênio. As duas formas de porosidade foram observadas nas

amostras ensaiadas. A densidade média de porosidade presente nas amostras não foi mensurada neste trabalho. Entretanto, é preciso ressaltar que a partir de observação visual à olho nu das amostras embutidas (Fig. 3.2) pode ser observada uma tendência de aumento da porosidade nas amostras com maior quantidade de cobre.

De acordo com Shabestari e Moemeni (2004), a porosidade de ligas Al-Si-Mg aumenta com o aumento do teor de cobre. Segundo os autores este aumento de porosidade pode ser explicado por dois motivos. O primeiro motivo é o fato que o teor de cobre causa reação eutética ternária em cerca de 525 °C. O teor de cobre no metal fundido eutético é maior, o qual aumenta a contração volumétrica devido à solidificação, e consequentemente, a porosidade da liga. O segundo motivo se deve à diminuição do coeficiente de atividade do hidrogênio com o aumento do teor de cobre, resultando na diminuição da solubilidade do hidrogênio na liga.

Além da porosidade, a presença de partículas de segunda fase é outro fator determinante que influencia as propriedades das ligas de alumínio. Como visto anteriormente, com a adição de cobre em ligas Al-Si-Mg, as seguintes fases podem estar presentes: alumínio primário (Al); a fase intermediária quaternária  $Al_5Mg_8Cu_2Si_6$  (Q);  $Cu_2Al$  ( $\theta$ ),  $Mg_2Si$  ( $\beta'$ ) e silício primário (Si) (CHAKRABARTI; LAUGHLIN, 2004). Outras fases também podem estar presentes nas ligas Al-Mg-Si-Cu, por exemplo,  $Al_5FeSi$  e  $Al(MnFeCr)Si$  (JI; GUO; PAN, 2008).

A presença destas fases pode ser modificada pela composição química da liga e pelo tratamento térmico a qual ela foi submetida. Apenas um tipo de partícula foi encontrado nas amostras da liga de alumínio 6351 estudadas. Esta partícula se localiza preferencialmente nos contornos de grão. A partir da análise de EDS nesta partícula foram identificados os elementos químicos: Al, Cu, Fe, Mn e Si. Além disso, também foi percebido o aumento do teor de cobre nesta partícula à medida que foi aumentada a quantidade de cobre adicionada à liga de alumínio. De acordo com a literatura, esta partícula pode conter o constituinte  $Al(MnFeCr)Si$  e também o  $Cu_2Al$  ( $\theta$ ), pela maior composição apresentada pelos dois últimos elementos químicos. Na Fig. 4.2 é apresentada, em detalhe, a microestrutura obtida por microscopia eletrônica de varredura, juntamente com a análise de EDS, da partícula de segunda fase encontrada nas amostras 1 (0,07% Cu) e 5 (1,93% Cu) da liga de alumínio 6351. A partícula, destacada pelas setas, se apresentou na forma de escrita chinesa de cor cinza claro.

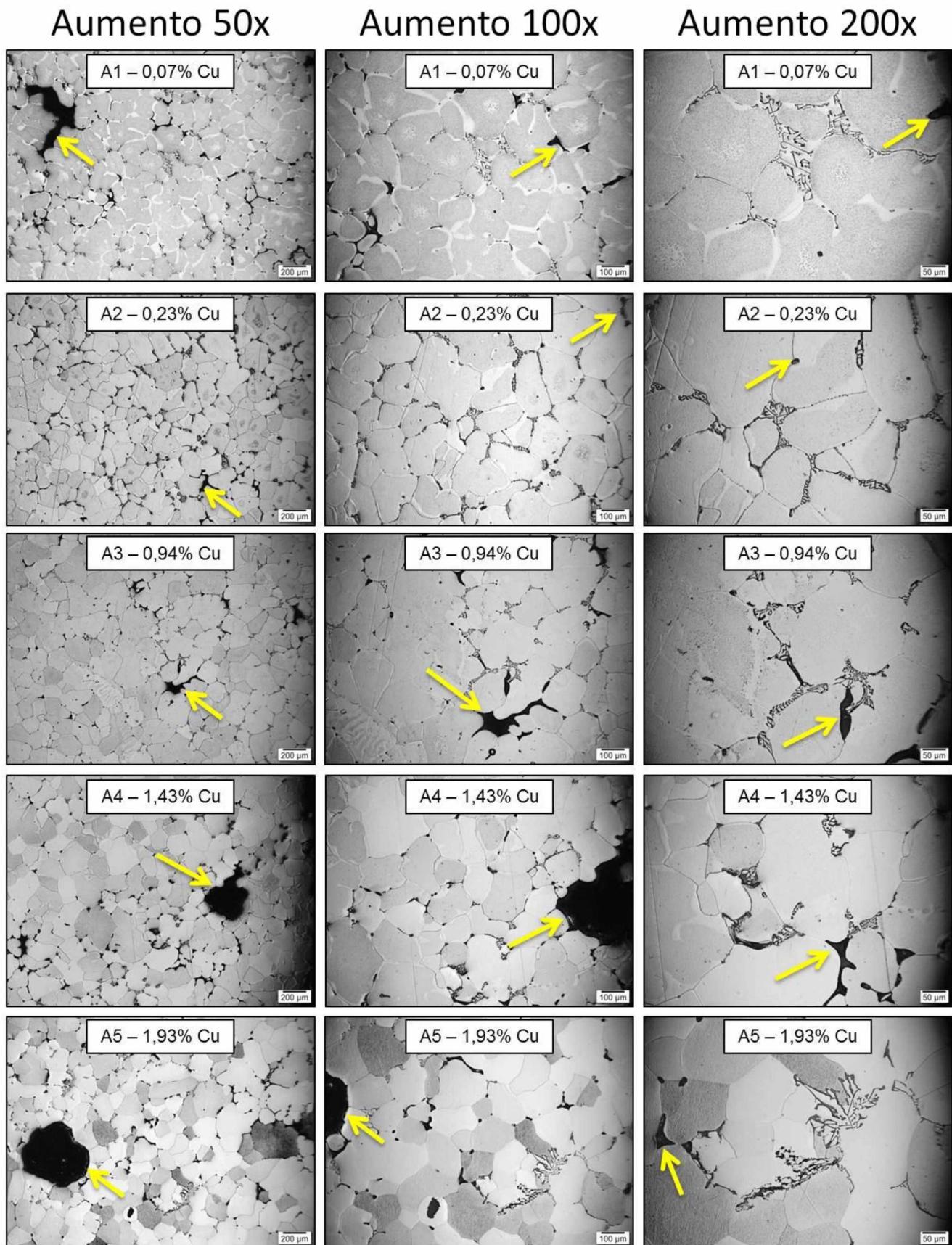


Figura 4.1. Micrografias obtidas por microscopia ótica das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre em aumentos de 50x, 100x e 200x

Já o magnésio, presente na liga 6351, não foi identificado nesta partícula. Assim, o magnésio pode estar combinado com o Si para formar o constituinte  $Mg_2Si$  ( $\beta'$ ), partícula endurecedora das ligas de alumínio da série 6000. Porém, esta partícula não foi encontrada nas análises realizadas neste trabalho.

Portanto, a análise mostrou que o aumento da quantidade de cobre adicionada na liga 6351, aumenta a presença de cobre na partícula endurecedora. Este fato provavelmente aumenta a quantidade do constituinte  $CuAl_2$  ( $\theta$ ), que atua como endurecedor desta liga após o tratamento de precipitação. Além disso, também foi observado o aumento da quantidade de cobre dissolvido na matriz de alumínio à medida que se aumentou a quantidade de cobre adicionada à liga de alumínio 6351. Isto, provavelmente, contribuiu para o aumento de dureza e resistência da liga por endurecimento por solução sólida. Na Fig. 4.3 é apresentada a análise de EDS realizada na matriz de alumínio das amostras 1 (0,07% Cu) e 5 (1,93% Cu).

Finalmente, o refinamento na estrutura dos precipitados devido à adição de cobre, que segundo Tiryakioglu e Staley (2003) é uma das principais fontes do endurecimento das ligas Al-Si-Mg-Cu, não pôde ser percebido pelas técnicas microscópicas utilizadas (ótica e por varredura eletrônica). Esta verificação provavelmente poderia ser obtida utilizando microscopia de transmissão, a qual não foi realizada neste trabalho.

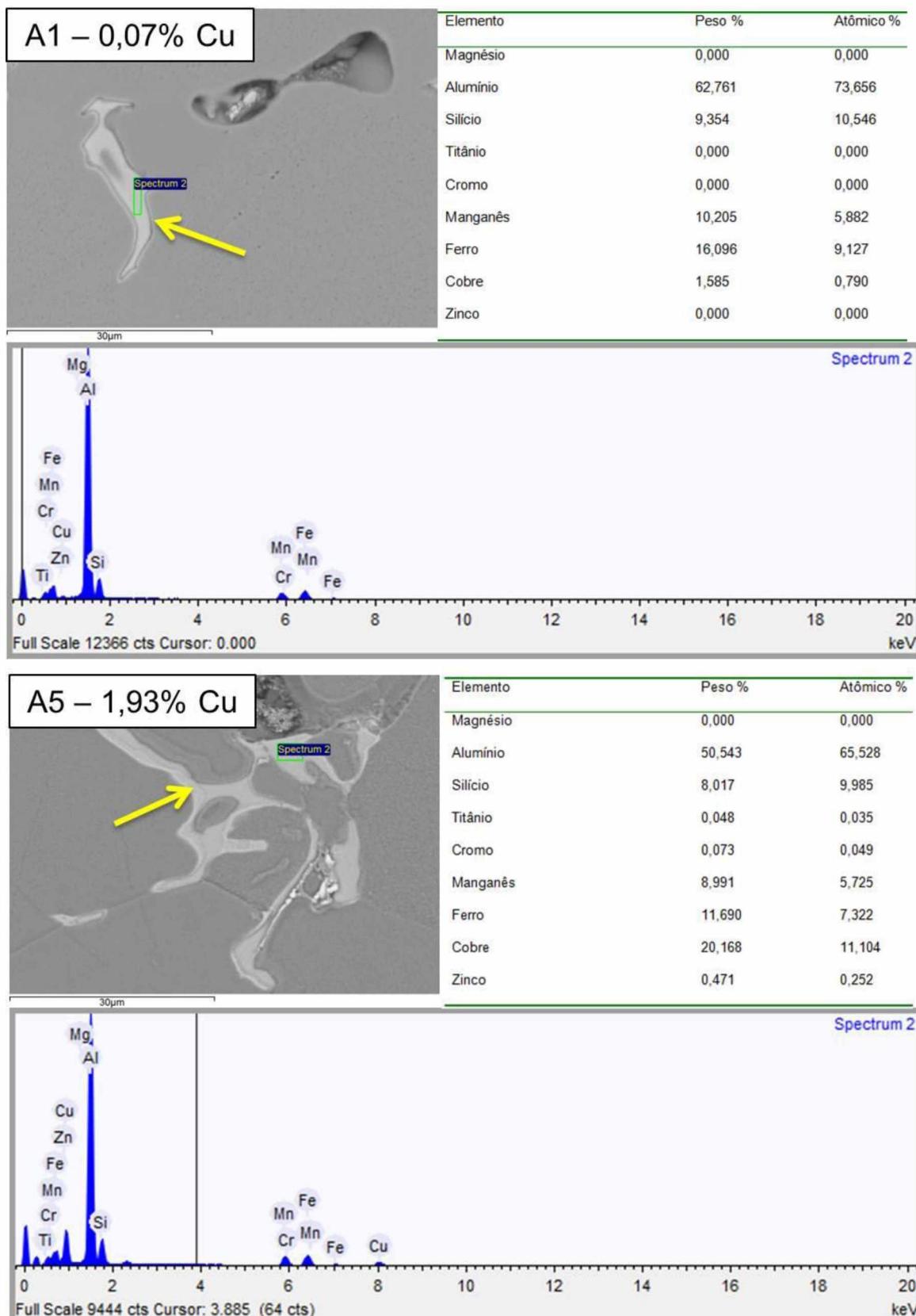


Figura 4.2. Análise de EDS realizada na partícula de segunda fase nas amostras (0,07% Cu) e 5 (1,93% Cu) da liga de alumínio 6351

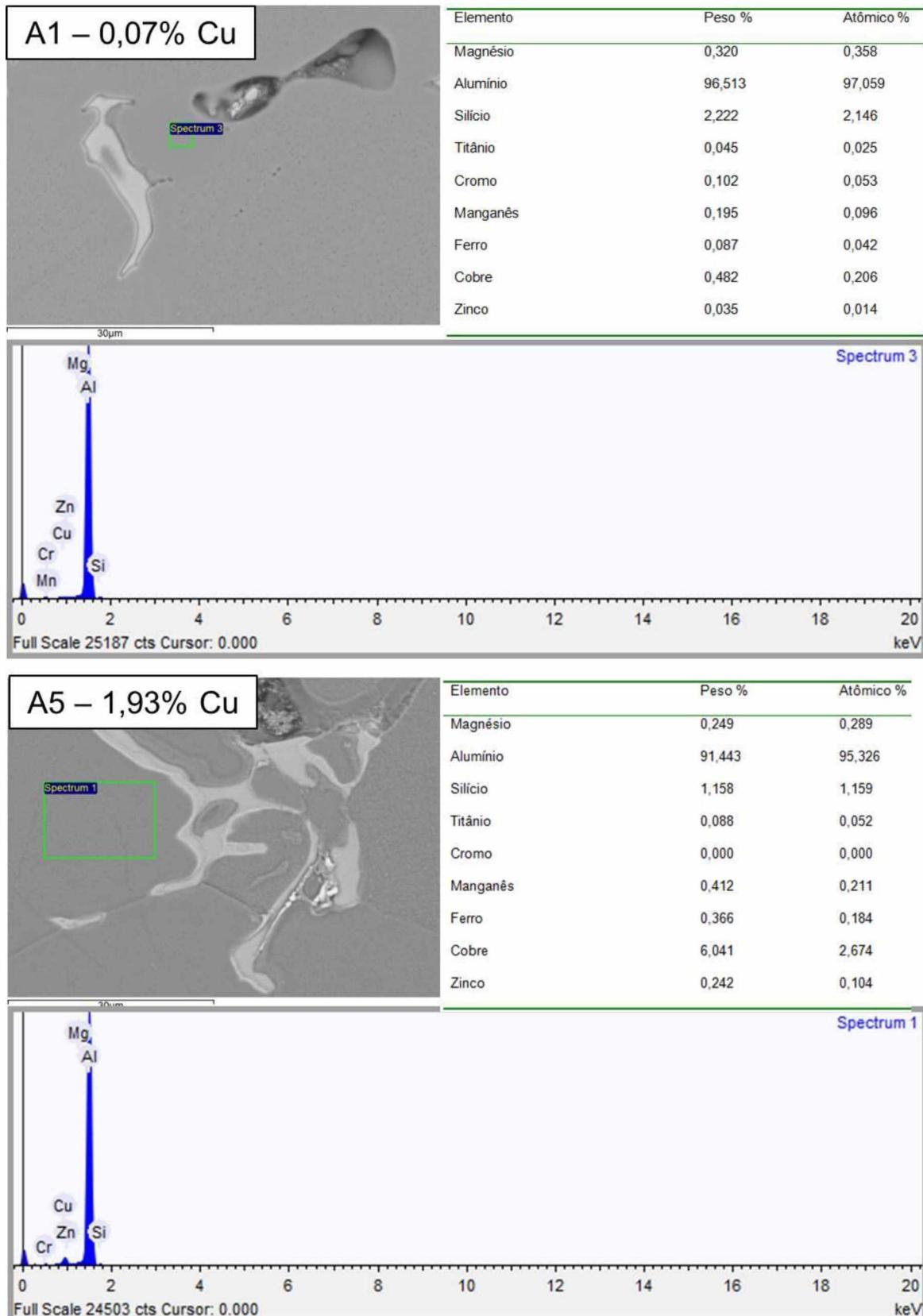


Figura 4.3. Análise de EDS realizada na matriz de alumínio das amostras 1 (0,07% Cu) e 5 (1,93% Cu)

#### 4.1.2 Resultados de dureza e microdureza

As médias gerais de dureza Vickers com um intervalo de confiança de 95% para as cinco amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre são apresentadas na Fig. 4.4.

É possível perceber que em média as amostras 1 e 2 que contém teor de cobre até 0,23% apresentaram os menores valores de dureza dentre as cinco amostras, 100,4 HV e 107,2 HV respectivamente. Aumentando o teor de cobre para 0,94% e 1,43% (amostras 3 e 4), em média a dureza tende a aumentar para 114 HV e 116,8 HV, respectivamente. Já a amostra 5 com o maior teor de cobre (1,93%) não seguiu a tendência de aumento na dureza. Esta amostra apresentou um valor intermediário de dureza entre as cinco amostras da liga de alumínio 6351 com 107,4 HV.

Desta forma, de uma maneira geral é possível dizer que a dureza média da liga de alumínio aumentou com o aumento do teor de cobre, até 1,43% de cobre. Para o maior nível de cobre utilizado (1,93%) a dureza não seguiu a tendência de aumento. Um aumento neste teor de 0,07% a 1,43% provocou um aumento de 16% na dureza média da liga de alumínio 6351 (100,4 HV para 116,8 HV).

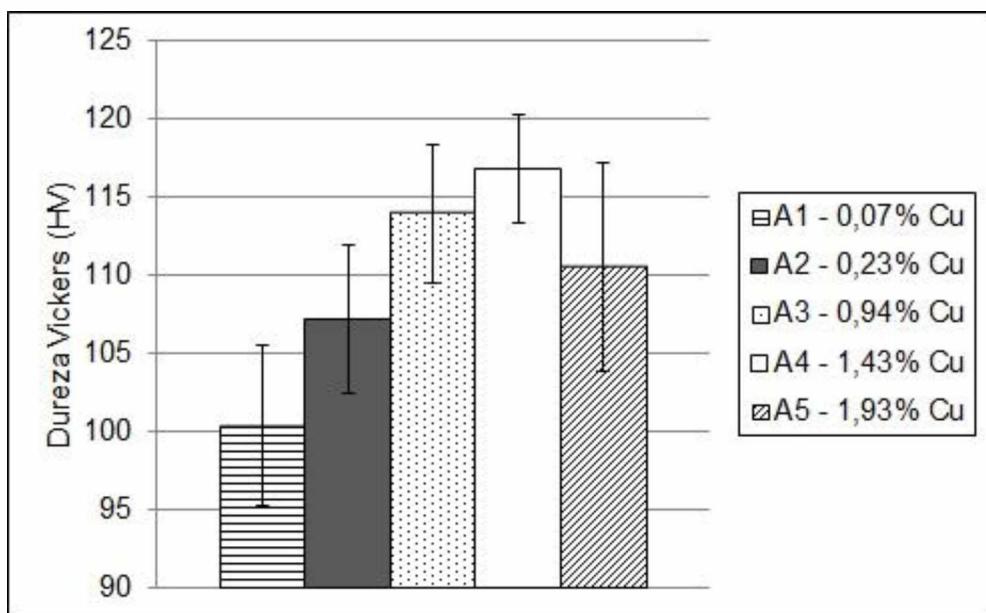


Figura 4.4. Dureza Vickers das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Os resultados de dureza média em duas regiões diferentes ao longo das barras utilizadas são apresentados na Tab. 4.1. Na Tab. 4.2 é apresentado um quadro de ANOVA (análise de variância) para os dados de dureza, onde o efeito do tratamento

está relacionado com os diferentes teores de cobre presentes na liga de alumínio 6351 e o efeito de bloco trata-se das duas regiões das barras onde foram realizadas as indentações. Com 95% de confiança, como  $p < 0,05$  ( $p = 0,000037$ ), é possível afirmar que a dureza de pelo menos uma das amostras com diferentes teores de cobre é diferente. Por outro lado, como  $p > 0,05$  ( $p = 0,269905$ ) não houve diferença na dureza das amostras nas diferentes regiões medidas (periferia e centro).

Tabela 4.1. Dureza Vickers em diferentes regiões das barras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Dureza Vickers (HV)						
	Tratamento (Teor de Cobre)					
Bloco (Região)	A1 – 0,07% Cu	A2 – 0,23% Cu	A3 – 0,94% Cu	A4 – 1,43% Cu	A5 – 1,93% Cu	Média do Bloco
1 – Periferia	105,4	108	111,6	116,1	110,6	110,3
2 – Centro	95,3	106,4	116,3	117,5	104,3	108
Média do Tratamento	100,4	107,2	114	116,8	107,4	109,1

Tabela 4.2. Quadro de Anova para os resultados de Dureza Vickers das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Efeito	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Média Quadrática	F	Valor p
Interseção	1191001	1	1191001	10482,23	0,000000
Teor de cobre	3313	4	828	7,29	0,000037
Região	140	1	140	1,23	0,269905
Erro	10680	94	114		

Como foi constatado pela análise de variância que pelo menos uma amostra da liga de alumínio possui dureza diferente foi preciso realizar testes de hipótese para a diferença entre as médias de dureza das diferentes amostras da liga estudada. As hipóteses utilizadas nesta análise foram as seguintes:

- $H_0$ : Dureza amostra (a) = Dureza amostra (b)
- $H_1$ : Dureza amostra (a)  $\neq$  Dureza amostra (b)

Assim, para 95% de confiança, os testes que apresentarem valor  $p < 0,05$  estarão dentro da região de rejeição da hipótese  $H_0$ . Consequentemente, as durezas das amostras testadas serão estatisticamente diferentes. Na Tab. 4.3 são apresentados os valores  $p$  para o teste de hipótese comparativo realizado entre as amostras, tomadas duas a duas. Com 95% de confiança, como  $p < 0,05$ , a amostra 1 possui estatisticamente uma dureza diferente, no caso, menor que as demais amostras. Além disso, a amostra 2 possui estatisticamente dureza menor que as amostras 3 e 4. Por fim, foi possível observar que a amostra 5 possui estatisticamente dureza menor que a amostra 4. A diferença entre a dureza média das demais amostras é decorrente do erro experimental.

Tabela 4.3. Valor  $p$  para a diferença entre as médias de dureza das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Diferença entre as médias de dureza das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre		
Amostra (a)	Amostra (b)	Valor $p$
A1 – 0,07% Cu	A2 – 0,23% Cu	<b>0,0486</b>
A1 – 0,07% Cu	A3 – 0,94% Cu	<b>0,0002</b>
A1 – 0,07% Cu	A4 – 1,43% Cu	<b>0,0000</b>
A1 – 0,07% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,0868
A2 – 0,23% Cu	A3 – 0,94% Cu	<b>0,0351</b>
A2 – 0,23% Cu	A4 – 1,43% Cu	<b>0,0016</b>
A2 – 0,23% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,9534
A3 – 0,94% Cu	A4 – 1,43% Cu	0,3001
A3 – 0,94% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,0936
A4 – 1,43% Cu	A5 – 1,93% Cu	<b>0,0126</b>

De maneira geral, o aumento no teor de cobre presente na liga de alumínio 6351, resultou em aumento na dureza média da liga, exceção a amostra 5 (1,93% Cu). Este aumento na dureza da liga de alumínio 6351 tratada termicamente com o aumento do teor de cobre (até 1,43% Cu), se deve provavelmente ao endurecimento por solução sólida promovido pelo cobre na matriz de alumínio, como verificado por Wang et al. (2007) e confirmado pela análise de EDS realizada neste trabalho. O cobre quando em solução sólida causa deformação do reticulado cristalino, o que representa uma barreira ao movimento de discordâncias. Além disso, o aumento da dureza consequente da maior quantidade de cobre adicionada à liga de alumínio

também se deve à precipitação de fases como  $\text{CuAl}_2$  após o tratamento térmico de envelhecimento (ZEREN; KARAKULAK; GÜMÜS, 2011).

Na Fig. 4.5 são apresentadas as médias de microdureza Vickers obtidas a partir de indentações realizadas na matriz de alumínio das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. É possível observar uma tendência de aumento da microdureza à medida que se aumenta a quantidade de cobre adicionada à liga de alumínio estudada, exceto a amostra 2 (0,23% Cu) que apresentou menor valor médio de microdureza. Entretanto, os intervalos de confiança dos resultados apresentados pelas amostras 1, 2 e 3 se sobrepõem. A análise estatística poderá elucidar se houve realmente diferença entre a microdureza apresentada por estas amostras. De maneira geral, aumentando o teor de cobre de 0,07% Cu para 1,93% Cu foi obtido em média um aumento na microdureza de 121 HV para 141 HV. Isto representa um aumento percentual do valor de microdureza de aproximadamente 17%.

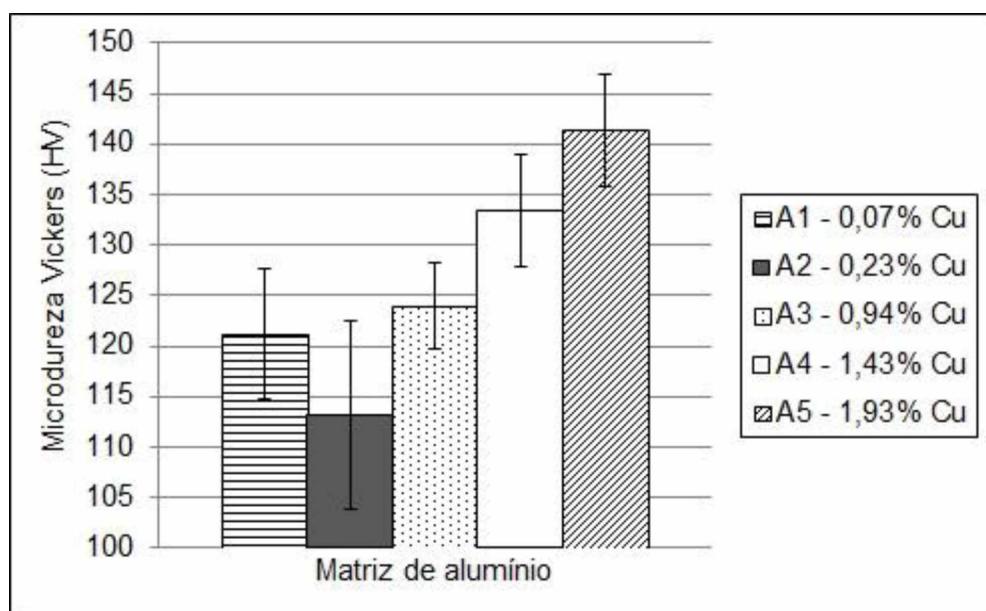


Figura 4.5. Microdureza Vickers da matriz de alumínio das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Com o intuito de investigar se existe diferença significativa entre as microdurezas da matriz de alumínio apresentadas pelas diferentes amostras da liga de alumínio 6351 foi realizada uma análise de variância, mostrada na Tab. 4.4. Com 95% de confiança, como  $p < 0,05$  ( $p = 0,000000$ ), é possível afirmar que a microdureza da matriz de alumínio de pelo menos uma das amostras com diferentes teores de cobre é diferente.

Tabela 4.4. Quadro de ANOVA para a microdureza da matriz de alumínio das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Efeito	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Média Quadrática	F	Valor p
Intersecção	<b>400942,2</b>	1	<b>400942,2</b>	<b>14740,52</b>	<b>0,000000</b>
Teor de cobre	<b>2403,8</b>	4	<b>600,9</b>	<b>22,09</b>	<b>0,000000</b>
Erro	544,0	20	27,2		

Como foi constatado pela análise de variância que pelo menos uma amostra da liga de alumínio possui microdureza da matriz de alumínio diferente, foram realizados testes de hipótese para a diferença entre as médias de microdureza das diferentes amostras da liga estudada. As hipóteses utilizadas nesta análise foram as seguintes:

- $H_0$ : Microdureza da matriz de alumínio amostra (a) = Microdureza da matriz de alumínio amostra (b)
- $H_1$ : Microdureza da matriz de alumínio amostra (a)  $\neq$  Microdureza da matriz de alumínio amostra (b)

Na Tab. 4.5 são apresentados os valores p para o teste de hipótese comparativo realizado entre as amostras, tomadas duas a duas. Com 95% de confiança, como  $p > 0,05$ , não existe diferença estatística apenas entre a microdureza da amostra 1 em relação às amostras 2 e 3. A diferença entre a microdureza média da matriz de alumínio destas amostras é decorrente do erro experimental. Em contrapartida, foi verificado que a microdureza da matriz de alumínio das demais amostras é estatisticamente diferente. Comprovando assim, que o aumento do teor de cobre realmente resultou em aumento na microdureza da matriz da liga de alumínio 6351.

Tabela 4.5. Valor p para a diferença entre as médias de microdureza da matriz de alumínio das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Diferença entre as médias de microdureza da matriz de alumínio das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre		
Amostra (a)	Amostra (b)	Valor p
A1 – 0,07% Cu	A2 – 0,23% Cu	0,0873
A1 – 0,07% Cu	A3 – 0,94% Cu	0,3531
A1 – 0,07% Cu	A4 – 1,43% Cu	<b>0,0044</b>
A1 – 0,07% Cu	A5 – 1,93% Cu	<b>0,0002</b>
A2 – 0,23% Cu	A3 – 0,94% Cu	<b>0,0194</b>

A2 – 0,23% Cu	A4 – 1,43% Cu	<b>0,0009</b>
A2 – 0,23% Cu	A5 – 1,93% Cu	<b>0,0001</b>
A3 – 0,94% Cu	A4 – 1,43% Cu	<b>0,0062</b>
A3 – 0,94% Cu	A5 – 1,93% Cu	<b>0,0001</b>
A4 – 1,43% Cu	A5 – 1,93% Cu	<b>0,0228</b>

Já na Fig. 4.6 são apresentadas as médias de microdureza Vickers obtidas a partir de indentações realizadas na partícula de segunda fase encontrada nas amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. Novamente é possível perceber que em média a microdureza apresentou uma tendência de aumento quando se aumenta a quantidade de cobre adicionada à liga de alumínio 6351. Ao aumentar a quantidade de cobre na liga de 0,07% Cu até 1,93% Cu a microdureza na partícula de segunda fase aumentou em média de 125 HV à 184 HV. Este aumento representa cerca de 50% de aumento na microdureza. Este aumento significativo pode ser atribuído ao aumento da quantidade de cobre na fase rica neste elemento encontrada pela análise de EDS.

Além disso, é notável o aumento da microdureza da partícula de segunda fase em relação à matriz de alumínio, passando em média de valores na faixa de 121 HV a 141 na matriz de alumínio para 125 HV a 184 HV na partícula endurecedora. Este comportamento confirma o endurecimento por precipitação sofrido pela liga de alumínio 6351 estudada a partir do tratamento térmico de envelhecimento.

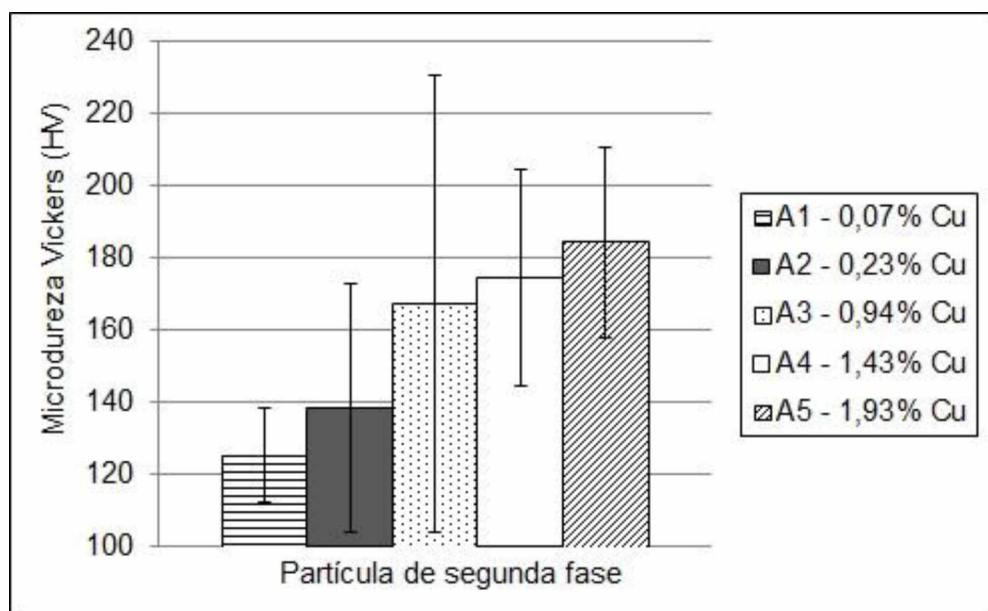


Figura 4.6. Microdureza Vickers da partícula de segunda fase encontrada nas amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Na Tab. 4.6 é apresentado um quadro de ANOVA (Análise de Variância) a fim de analisar estatisticamente a influência do teor de cobre na microdureza da partícula de segunda fase encontrada nas diferentes amostras da liga de alumínio 6351. Com 95% de confiança, como  $p < 0,05$  ( $p = 0,026322$ ), é possível afirmar que a microdureza da partícula de segunda fase de pelo menos uma das amostras com diferentes teores de cobre é diferente.

Tabela 4.6. Quadro de ANOVA para a microdureza da partícula de segunda fase das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Efeito	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Média Quadrática	F	Valor p
Interseção	<b>625048,4</b>	<b>1</b>	<b>625048,4</b>	<b>690,9666</b>	<b>0,000000</b>
Teor de cobre	<b>12538,6</b>	<b>4</b>	<b>3134,7</b>	<b>3,4652</b>	<b>0,026322</b>
Erro	18092,0	20	904,6		

Como foi constatado pela análise de variância que pelo menos uma amostra da liga de alumínio possui microdureza da partícula de segunda fase diferente, foram realizados testes de hipótese para a diferença entre as médias de microdureza. As hipóteses utilizadas nesta análise foram as seguintes:

- $H_0$ : Microdureza da partícula de segunda fase amostra (a) = Microdureza da partícula de segunda fase amostra (b)
- $H_1$ : Microdureza da partícula de segunda fase amostra (a)  $\neq$  Microdureza da partícula de segunda fase amostra (b)

Na Tab. 4.7 são apresentados os valores p para o teste de hipótese comparativo realizado entre as amostras, tomadas duas a duas. Com 95% de confiança, como  $p < 0,05$ , a amostra 1 (0,07% Cu) possui estatisticamente microdureza da partícula de segunda fase menor que as amostras 4 (1,43% Cu) e 5 (1,93% Cu). Além disso, também foi comprovado que a amostra 2 (0,23% Cu) possui estatisticamente microdureza da partícula de segunda fase menor que a amostra 5 (1,93% Cu). A diferença entre a microdureza média da partícula de segunda fase das demais amostras é decorrente do erro experimental.

Tabela 4.7. Valor p para a diferença entre as médias de microdureza da partícula de segunda fase das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Diferença entre as médias de microdureza da partícula de segunda fase das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre		
Amostra (a)	Amostra (b)	Valor p
A1 – 0,07% Cu	A2 – 0,23% Cu	0,3491
A1 – 0,07% Cu	A3 – 0,94% Cu	0,1074
A1 – 0,07% Cu	A4 – 1,43% Cu	<b>0,0032</b>
A1 – 0,07% Cu	A5 – 1,93% Cu	<b>0,0005</b>
A2 – 0,23% Cu	A3 – 0,94% Cu	0,2967
A2 – 0,23% Cu	A4 – 1,43% Cu	0,0616
A2 – 0,23% Cu	A5 – 1,93% Cu	<b>0,0188</b>
A3 – 0,94% Cu	A4 – 1,43% Cu	0,7945
A3 – 0,94% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,5110
A4 – 1,43% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,4994

Segundo Yang et al. (2011), a distorção do reticulado cristalino, resultado da dissolução de elementos de liga, produz uma espécie de campo de tensão. Este campo de tensão pode interagir com discordâncias, impedindo seu movimento. Assim, isto significativamente aumenta a microdureza. Portanto, quando dissolvidos na matriz de alumínio ou precipitados, os elementos de liga incluindo o cobre, aprimoram a microdureza da liga de alumínio 6351 (YANG et al., 2011).

#### 4.1.3 Resultados de resistência à tração

Na Tab. 4.8 são apresentados os valores médios das propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração realizados nas cinco amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. Já na Fig. 4.7 está presente a curva tensão versus alongamento percentual após a ruptura para um corpo de prova de cada amostra ensaiada a fim de melhor ilustrar o comportamento da deformação provocada pela aplicação da carga para as diferentes amostras.

Tabela 4.8. Valores médios das propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração das amostras da liga de alumínio 6351

Amostra	Limite de escoamento (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Limite de ruptura (MPa)	Alongamento percentual apóas a ruptura (%)
1	74,1	251,3	247,5	6,11
2	79,2	262,5	258,7	5,91
3	86,5	262,7	257,9	5,37
4	95,1	258,4	249,7	4,95
5	94	268,7	266,8	4,88

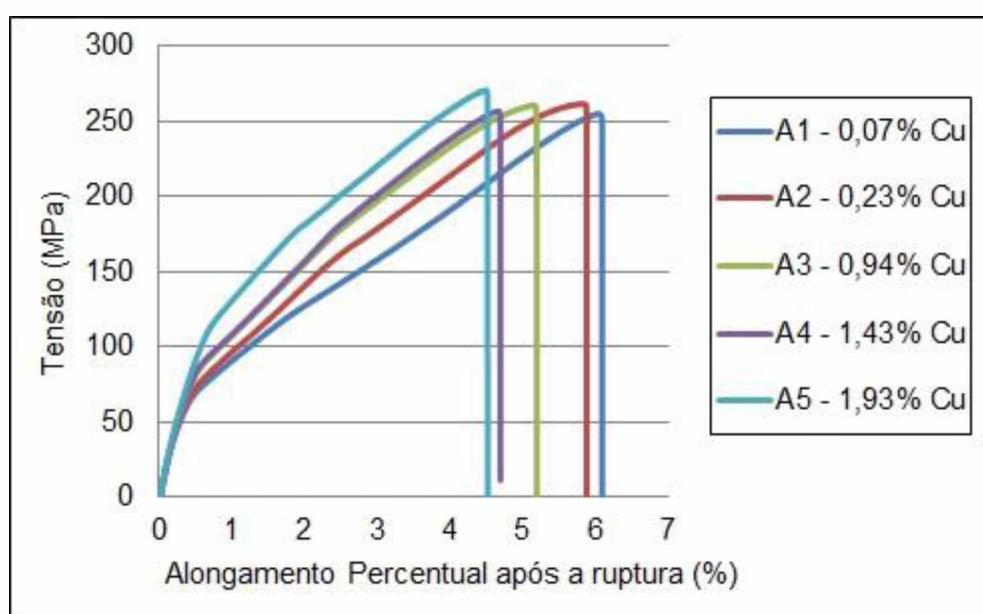


Figura 4.7. Curvas tensão (MPa) x alongamento percentual apóas a ruptura (%) de um corpo de prova de cada uma das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Os valores médios do limite de resistência à tração com um intervalo de confiança de 95% são apresentados na Fig. 4.8. É possível perceber que a amostra 1 com a menor quantidade de cobre (0,07%) foi a que apresentou o menor valor médio de resistência à tração (251,3 MPa) entre as amostras ensaiadas. Por sua vez, a amostra 5 com o maior teor de cobre (1,93%), apresentou resistência à tração de 268,7 MPa. Comparando as amostras 1 e 5 que são os extremos em relação ao teor de cobre, o aumento no mesmo de 0,07% até 1,93% significou um aumento na resistência mecânica em cerca de 7%. Em contrapartida, as amostras 2, 3 e 4 com

teores de cobre intermediários até 1,43% apresentaram valores intermediários de resistência mecânica na faixa de 258,4 MPa até 262,7 MPa.

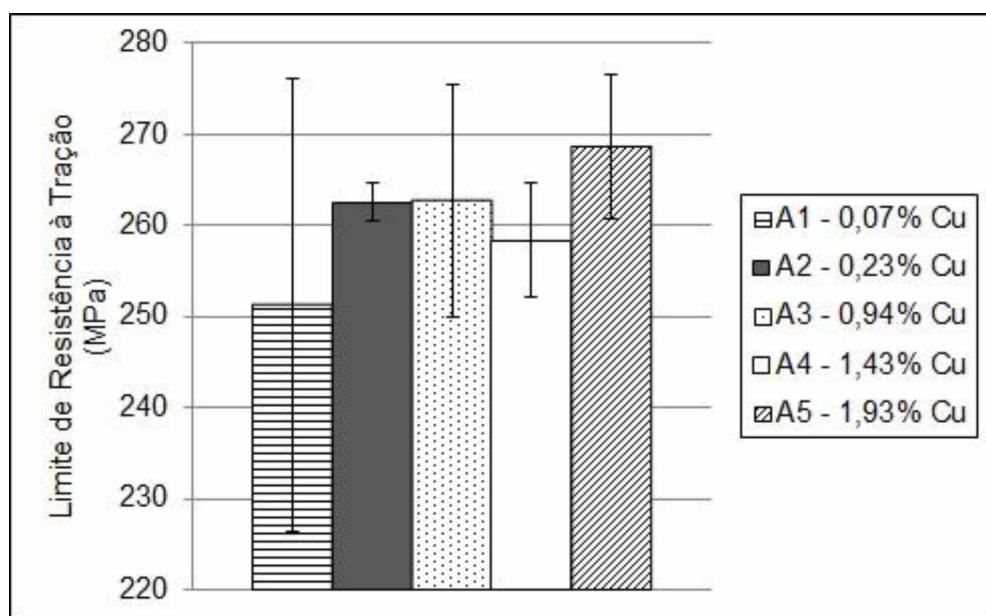


Figura 4.8. Limite de resistência à tração das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Na Tab. 4.9 é apresentado um quadro de ANOVA (Análise de Variância) a fim de analisar estatisticamente a influência do teor de cobre no limite de resistência à tração das diferentes amostras da liga de alumínio 6351. Com 95% de confiança, como  $p < 0,05$  ( $p = 0,027262$ ), é possível afirmar que o limite de resistência à tração de pelo menos uma das amostras com diferentes teores de cobre é diferente.

Tabela 4.9. Quadro de ANOVA para o limite de Resistência à Tração das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Efeito	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Média Quadrática	F	Valor p
Interseção	<b>1019438</b>	<b>1</b>	<b>1019438</b>	<b>35714,57</b>	<b>0,000000</b>
Teor de cobre	<b>495</b>	<b>4</b>	<b>124</b>	<b>4,34</b>	<b>0,027262</b>
Erro	285	10	29		

Da mesma forma como analisado para os resultados de dureza, como foi constatado pela análise de variância que pelo menos uma amostra da liga de alumínio possui limite de resistência à tração diferente, foi preciso realizar testes de hipótese

para a diferença entre as médias de limite de resistência à tração das diferentes amostras da liga estudada. As hipóteses utilizadas nesta análise foram as seguintes:

- $H_0$ : Limite de resistência à tração amostra (a) = Limite de resistência à tração amostra (b)
- $H_1$ : Limite de resistência à tração amostra (a)  $\neq$  Limite de resistência à tração amostra (b)

Na Tab. 4.10 são apresentados os valores  $p$  para o teste de hipótese comparativo realizado entre as amostras, tomadas duas a duas. Com 95% de confiança, como  $p < 0,05$ , a amostra 5 possui estatisticamente um limite de resistência à tração diferente, no caso, maior que as demais amostras, exceto a amostra 3. A diferença entre o limite de resistência à tração médio das demais amostras é decorrente do erro experimental. Assim como avaliado para os resultados de dureza, o maior limite de resistência à tração apresentado pela amostra com a maior quantidade de cobre deve-se provavelmente ao endurecimento promovido pelo cobre por solução sólida na matriz de alumínio. Na condição de tratada por solubilização, uma alta e uniforme concentração de cobre referente à dissolução de fases  $\text{CuAl}_2$  podem promover a resistência à tração em detrimento do alongamento (LU et al., 2015). Além disso, a precipitação da fase rica em cobre, verificada na análise de EDS também contribui para o aumento da resistência mecânica das amostras da liga de alumínio 6351 com maior quantidade de cobre (LI; BRUSETHAUG; OLSEN, 2006).

Tabela 4.10. Valor  $p$  para a diferença entre as médias de limite de resistência à tração das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Diferença entre as médias de limite de resistência à tração das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre		
Amostra (a)	Amostra (b)	Valor $p$
A1 – 0,07% Cu	A2 – 0,23% Cu	0,1248
A1 – 0,07% Cu	A3 – 0,94% Cu	0,1530
A1 – 0,07% Cu	A4 – 1,43% Cu	0,2980
A1 – 0,07% Cu	A5 – 1,93% Cu	<b>0,0450</b>
A2 – 0,23% Cu	A3 – 0,94% Cu	0,9499
A2 – 0,23% Cu	A4 – 1,43% Cu	0,0560
A2 – 0,23% Cu	A5 – 1,93% Cu	<b>0,0304</b>
A3 – 0,94% Cu	A4 – 1,43% Cu	0,2614
A3 – 0,94% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,1588
A4 – 1,43% Cu	A5 – 1,93% Cu	<b>0,0115</b>

Já na Fig. 4.9 são mostrados os valores médios do alongamento percentual após a ruptura com intervalo de confiança de 95% para as cinco amostras ensaiadas. As amostras 1 e 2 que contém os menores teores de cobre (0,07% e 0,23%) apresentaram em média os maiores valores de alongamento após a ruptura de 6,11% e 5,91%, respectivamente. Já a amostra 3 com teor de cobre intermediário (0,94%) apresentou alongamento intermediário (5,37%) entre as cinco amostras ensaiadas. E por fim, as amostras 4 e 5 com maiores teores de cobre (1,43% e 1,93%) apresentaram em média os menores valores de alongamento após a ruptura de 4,95% e 4,88%, respectivamente. Desta forma, comparando as amostras 1 e 5 que são os extremos em termos da quantidade de cobre, pode-se observar uma diminuição no alongamento após a ruptura aparentemente pequena de valores de 6,11% para 4,88%. Porém, estes valores representam que houve em média uma diminuição no alongamento, e consequentemente na ductilidade, de cerca de 20% ao se aumentar de 0,07% a 1,93% o teor de cobre presente na liga de alumínio 6351.

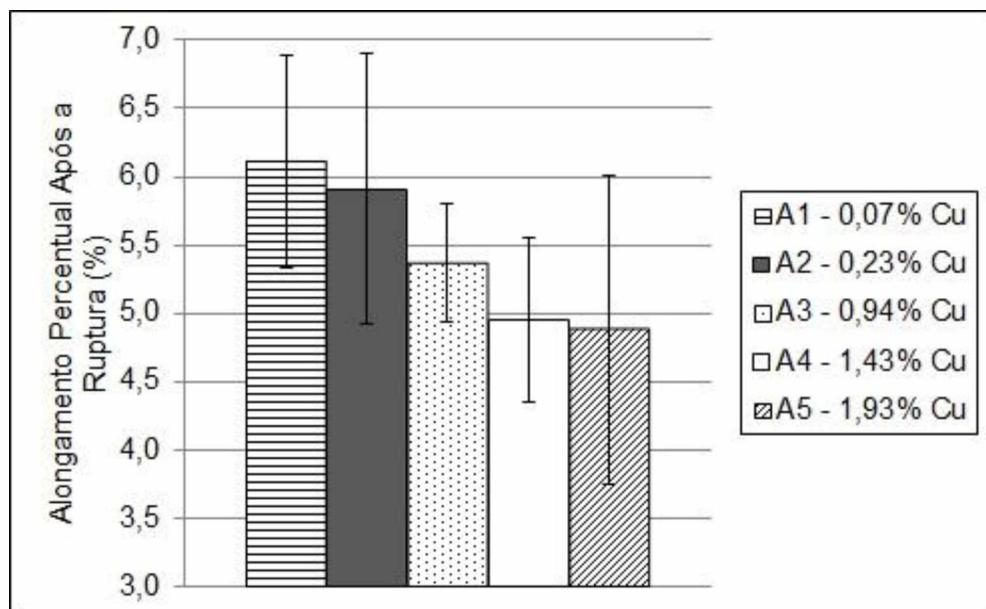


Figura 4.9. Alongamento percentual após a ruptura das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Na Tab. 4.11 é apresentado um quadro de ANOVA (Análise de Variância) a fim de analisar estatisticamente a influência do teor de cobre no alongamento percentual após a ruptura das diferentes amostras da liga de alumínio 6351. Com 95% de confiança, como  $p < 0,05$  ( $p = 0,003180$ ), é possível afirmar que o alongamento de pelo menos uma das amostras com diferentes teores de cobre é diferente.

Tabela 4.11. Quadro de ANOVA para o alongamento percentual após a ruptura das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Efeito	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Média Quadrática	F	Valor p
Intersecção	<b>444,6719</b>	<b>1</b>	<b>444,6719</b>	<b>4027,085</b>	<b>0,000000</b>
Teor de cobre	<b>3,6779</b>	<b>4</b>	<b>0,09195</b>	<b>8,327</b>	<b>0,003180</b>
Erro	1,1042	10	0,1104		

Como foi constatado pela análise de variância que pelo menos uma amostra da liga de alumínio possui alongamento diferente, foi preciso realizar testes de hipótese para a diferença entre as médias de dureza das diferentes amostras da liga estudada. As hipóteses utilizadas nesta análise foram as seguintes:

- $H_0$ : Alongamento percentual após a ruptura amostra (a) = Alongamento percentual após a ruptura amostra (b)
- $H_1$ : Alongamento percentual após a ruptura amostra (a)  $\neq$  Alongamento percentual após a ruptura amostra (b)

Na Tab. 4.12 são apresentados os valores p para o teste de hipótese comparativo realizado entre as amostras, tomadas duas a duas. Com 95% de confiança, como  $p < 0,05$ , a amostra 1 possui estatisticamente um alongamento percentual após a ruptura diferente, no caso, maior que as demais amostras, exceto a amostra 2. Além disso, também foi observado a amostra 2 possui estatisticamente um alongamento maior que as amostras 4 e 5. A diferença entre alongamento médio das demais amostras é decorrente do erro experimental. Segundo Shabestari e Moemeni (2004) a porosidade reduz a ductilidade e aumenta a suscetibilidade ao início de trincas por fadiga em ligas Al-Si-Mg. Desta forma, o aumento do teor de cobre, possivelmente aumentou a densidade de poros na liga e, consequentemente resultou em diminuição do seu alongamento. Já Grosselle, Timelli e Bonollo (2010) atribuem o decréscimo da ductilidade de ligas Al-Si-Cu-Mg à presença de fases como  $\text{Cu}_2\text{Al}$  ( $\theta$ ) e  $\text{Mg}_2\text{Si}$  ( $\beta$ ). Segundo os autores, estes precipitados são frágeis e podem se fraturar quando submetidos à tensões bem baixas durante a deformação, acelerando o crescimento de uma trinca.

Tabela 4.12. Valor p para a diferença entre as médias de limite de alongamento percentual após a ruptura das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Diferença entre as médias de alongamento percentual após a ruptura das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre		
Amostra (a)	Amostra (b)	Valor p
A1 – 0,07% Cu	A2 – 0,23% Cu	0,5307
A1 – 0,07% Cu	A3 – 0,94% Cu	<b>0,0233</b>
A1 – 0,07% Cu	A4 – 1,43% Cu	<b>0,0071</b>
A1 – 0,07% Cu	A5 – 1,93% Cu	<b>0,0183</b>
A2 – 0,23% Cu	A3 – 0,94% Cu	0,0970
A2 – 0,23% Cu	A4 – 1,43% Cu	<b>0,0232</b>
A2 – 0,23% Cu	A5 – 1,93% Cu	<b>0,0418</b>
A3 – 0,94% Cu	A4 – 1,43% Cu	0,0714
A3 – 0,94% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,1570
A4 – 1,43% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,8257

#### 4.1.4 Resultados de resistência ao impacto

Na Fig. 4.10 são apresentados os valores médios da energia absorvida compensada obtida nos ensaios de impacto Charpy com intervalo de confiança de 95% para as cinco amostras ensaiadas. Quanto menor for esta energia absorvida, menor será a tenacidade à fratura por impacto do material. Assim, uma trinca originada no material se propagará mais facilmente provocando a fratura. Segundo Ibrahim et al. (2011b) o cobre diminui a tenacidade à fratura de ligas Al-Si-Cu-Mg, especialmente sob condições do tratamento térmico T6.

Os valores médios da energia absorvida compensada obtidos se apresentaram bem próximos, variando entre um menor valor de 3,11 J para a amostra 2 (0,23% Cu) até o maior valor de 4,40 J para a amostra 4 (1,43% Cu). Desta forma, não é possível dizer que existe diferença considerável entre os valores obtidos. Isso se deve à variação destes resultados que se mostrou considerável, devido à grande desvio padrão das medidas e também pequena quantidade de amostras ensaiadas ( $n = 2$ ). Isto pode ser comprovado a partir da análise de variância (ANOVA) apresentada na Tab. 4.13. Com 95% de confiança, como  $p > 0,05$  ( $p = 0,057984$ ), é possível afirmar que estatisticamente não há diferença na energia absorvida apresentada pelas diferentes amostras da liga de alumínio 6351 estudadas. A diferença entre a energia absorvida compensada das amostras é decorrente do erro experimental.

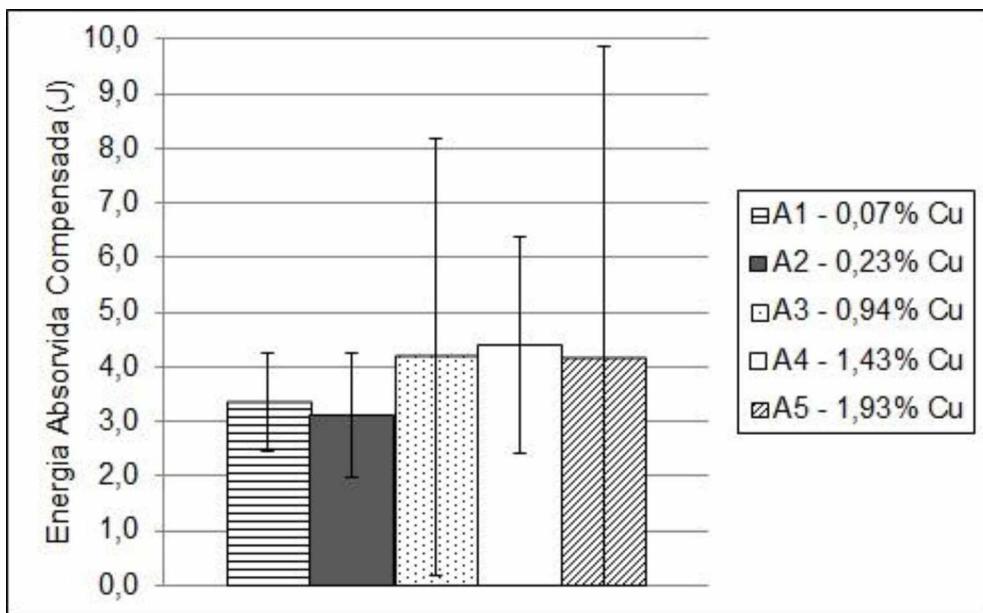


Figura 4.10. Energia absorvida compensada das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Tabela 4.13. Quadro de ANOVA para a energia absorvida compensada das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Efeito	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Média Quadrática	F	Valor p
Interseção	147,7634	1	147,7634	1090,505	0,000000
Teor de cobre	2,5993	4	0,6498	4,796	0,057984
Erro	0,6775	5	0,1355		

## 4.2 Resultados dos ensaios de furação

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos durante os ensaios de furação. Estes resultados compreendem torque e força de avanço na ferramenta de corte, diâmetro e rugosidade do furo, alterações subsuperficiais e formação de cavacos e rebarbas.

### 4.2.1 Torque

Os valores médios do torque na ferramenta de corte, com intervalo de confiança de 95%, em diferentes velocidades de corte durante a furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre estão apresentados na Fig. 4.11. É

possível observar que para a faixa de velocidades de corte ensaiadas a amostra 2 (0,23% Cu), uma das amostras de menor dureza e resistência mecânica apresentou em média os menores valores de torque durante a furação. Em contrapartida, a amostra 5 (1,93% Cu), em média a amostra de maior resistência mecânica e dureza intermediária resultou em maiores valores de torque.

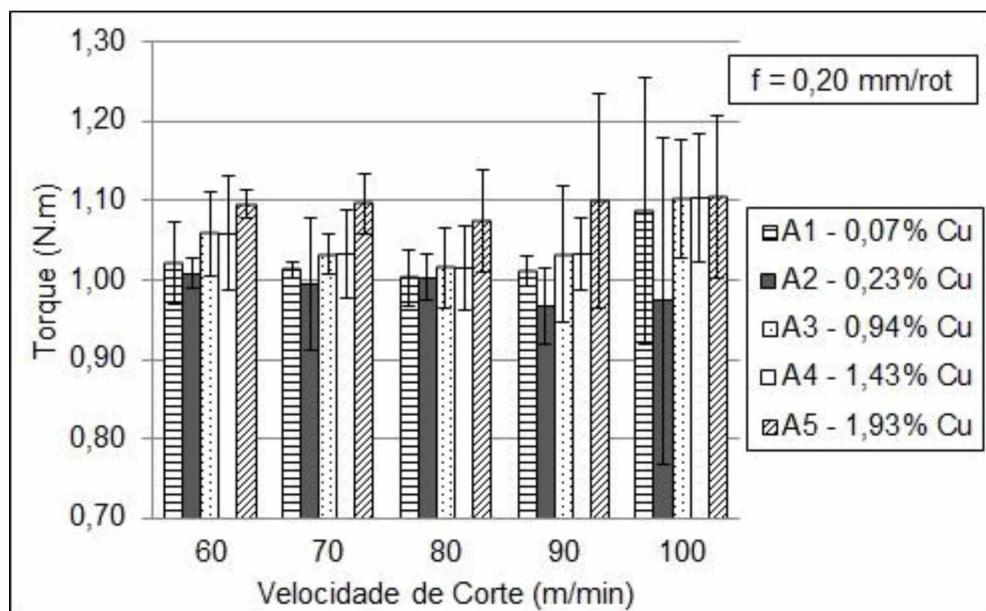


Figura 4.11. Torque em diferentes velocidades de corte na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

O torque na furação é o esforço resultante da força de usinagem na direção de corte atuando nas duas arestas de corte da broca. Segundo Machado et al. (2011) os principais fatores que influenciam a força de usinagem são a resistência ao cisalhamento do material nos planos de cisalhamento primário e secundário; e a área dos planos de cisalhamento primário e secundário. Neste caso, a maior resistência ao cisalhamento da amostra com maior quantidade de cobre (1,93% Cu) impôs maior esforço sobre a ferramenta de corte, resultando em maiores valores de torque.

Além disso, geralmente o aumento da velocidade de corte provoca o aumento da geração de calor durante o processo de usinagem. Este aumento de temperatura, por sua vez, diminui a resistência ao cisalhamento do material a ser usinado. Consequentemente, as componentes da força de usinagem tendem a ser menores com o aumento da velocidade de corte (FERRARESI, 1970). Entretanto, esta tendência de diminuição do torque na ferramenta de corte com o aumento da velocidade de corte não pôde ser percebido durante os ensaios de furação. É importante ressaltar que os ensaios foram realizados com a utilização do fluido de

corte aplicado na forma de jorro, que deve ter contribuído para a refrigeração do processo. Impedindo assim, o efeito do aumento da temperatura provocado pelo aumento da velocidade de corte, anteriormente citado.

Na Fig. 4.12 são apresentados os valores médios do torque, com intervalo de confiança de 95%, em diferentes avanços da ferramenta de corte no processo de furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. Claramente é possível perceber um aumento quase linear do torque com o aumento do avanço da ferramenta. Foram obtidos valores médios de torque de aproximadamente 0,60 N.m para o menor avanço (0,10 mm/rot) e valores entre 1,38 N.m e 1,56 N.m para o maior avanço ensaiado (0,30 mm/rot). O aumento do avanço corresponde ao aumento da seção transversal de corte, ou seja, da quantidade de material a ser cisalhado (MACHADO et al., 2011). Resultando assim, em aumento das componentes da força de usinagem.

Para os menores avanços utilizados (0,10 e 0,15 mm/rot) nenhuma das amostras se destaca por apresentar menor valor de torque durante a furação. Já para os maiores avanços (0,20 à 0,30 mm/rot) em média a amostra 2 (0,23% Cu) foi a que causou menores valores de torque. Por outro lado, a amostra 5 com maior quantidade de cobre, e consequentemente maior resistência mecânica, resultou em maiores valores de torque.

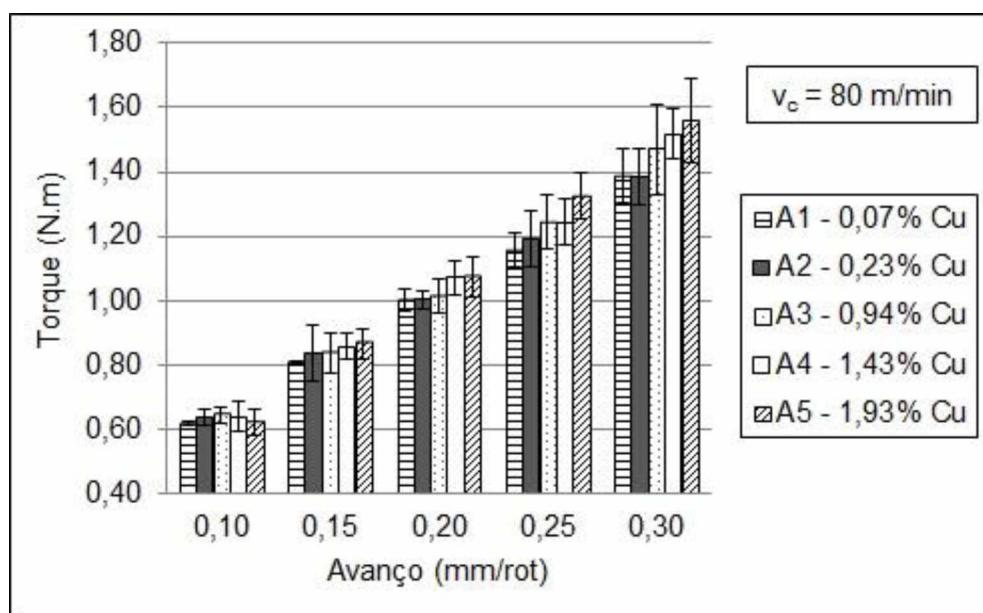


Figura 4.12. Torque em diferentes avanços na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Para melhor explicar a influência dos parâmetros de corte e do teor de cobre adicionado na liga de alumínio 6351 usinada no torque durante a furação foi realizada uma regressão múltipla a partir dos ensaios propostos pelo planejamento fatorial 2<sup>3</sup>. A regressão foi feita com três parâmetros de entrada, sendo eles os dois parâmetros de corte variados (velocidade de corte e avanço) e o teor de cobre presente na amostra da liga de alumínio 6351. Como neste trabalho foram utilizadas cinco amostras com diferentes teores de cobre, a análise foi realizada tomando as amostra da liga de alumínio duas a duas. Na Tab. 4.14 é apresentado o modelo ajustado para o torque na furação para a comparação entre as amostras 2 (0,23% Cu) e 5 (1,93% Cu). Nela são apresentados os parâmetros que foram significativos a um nível de significância de 10%, sendo que são destacados em negrito os parâmetros significativos ao nível de significância de 5%. Os parâmetros são significativos ao nível de significância de 5% quando o valor p é menor que 0,05. Além do valor p também é apresentado o efeito e o coeficiente da regressão de cada um destes parâmetros. É importante ressaltar que estes modelos preliminares foram criados com o intuito de investigar quais os parâmetros são mais importantes na variação do torque no processo de furação e tentar distinguir o comportamento das diferentes amostras sobre o mesmo. Nesta etapa não se tem como objetivo fazer uma otimização ou previsão a partir do modelo.

Tabela 4.14. Efeitos, coeficientes e valores p da regressão múltipla para o torque na furação comparando amostras 2 e 5 da liga de alumínio 6351

Sumário da Regressão para a Variável Dependente: Torque na Furação			
$R = 0,99988363$ ; $R^2 = 0,99976727$ ; $R^2$ Ajustado= 0,99918543			
$F(5,2) = 1718$ ; $p < 0,00058$			
	Efeito	Coeficiente	valor p
Interseção		<b>1,039872</b>	<b>0,000020</b>
f	<b>0,849212</b>	<b>0,424606</b>	<b>0,000117</b>
Teor de Cobre	<b>0,046886</b>	<b>0,023443</b>	<b>0,036434</b>
$v_c \cdot f$	-0,0323	-0,016150	0,072469
f.Teor de Cobre	<b>0,052358</b>	<b>0,026179</b>	<b>0,029533</b>

A partir da Tab. 4.14 é possível notar que o torque na furação é mais sensível ao avanço da ferramenta e ao teor de cobre, bem como a interação entre eles. A regressão confirma a tendência de aumento do torque com o aumento do avanço (de 0,10 para 0,30 mm/rot) e com o aumento do teor de cobre (de 0,23% Cu para 1,93% Cu) observados nas Fig. 4.11 e Fig. 4.12. Além disso, foi também confirmado que o aumento da velocidade de corte não implica em influência significativa na variação do

torque na furação. É importante ressaltar que o efeito principal do avanço é o maior dentre os efeitos das variáveis significativas.

Nas comparações entre as demais amostras da liga de alumínio 6351 verificou-se que sempre o avanço foi um parâmetro significativo, resultando no aumento do torque na furação. As interações  $v_c.f$  e  $f.teor$  de cobre se mostraram significativas em algumas comparações, provocando a diminuição e o aumento do torque, respectivamente.

Em relação ao efeito do teor de cobre, parâmetro de maior relevância neste trabalho, não foi observado que este parâmetro se mostrou significativo em todas as comparações. Porém, analisando todas as comparações, mesmo aquelas em que o teor de cobre não foi significativo com 95% de confiança, foi possível determinar que a amostra 2 (0,23% Cu) estatisticamente foi a amostra que resultou em menor torque na ferramenta de corte durante a furação. Assim, para a amostra 2, foi realizada uma nova regressão múltipla. Nesta etapa, as variáveis utilizadas foram a velocidade de corte e o avanço. Para esta análise foi adicionado um nível central para as variáveis.

A regressão para a amostra 2 mostrou que, com 95% de confiança, o efeito principal do avanço e da interação entre a velocidade de corte e o avanço foram significativos em relação ao torque na ferramenta de corte durante a furação. Na Eq. 4.1 é apresentada a equação do modelo ajustado que descreve o torque na furação da amostra 2 em função das variáveis velocidade de corte e avanço.

$$\text{Torque na Furação da liga 6351(0,23% Cu)} = 0,290 + 3,477f - 0,004v_c.f + 1,934f^2 \quad (4.1)$$

Este modelo apresentou um grau de ajuste de  $R^2 = 0,9984$ . Esse valor indica boa correlação entre o modelo e os dados obtidos nos ensaios experimentais de furação realizados. Em outras palavras, o modelo explica 99,84% dos resultados experimentais obtidos.

Já na Fig. 4.13 é apresentada uma superfície de resposta do torque na furação da amostra 2 em função dos parâmetros velocidade de corte e avanço.

Tanto a equação que descreve o modelo como a superfície de resposta confirmam a importância significativa do avanço no aumento do torque aplicado na ferramenta de corte durante o processo de furação da amostra 2. De acordo com a Fig. 4.13, para obter menores valores do torque na furação da amostra 2 (0,23% Cu) da liga de alumínio 6351, é recomendável utilizar o menor valor de avanço (0,10 mm/rot), independente da velocidade de corte utilizada (60 m/min à 100 m/min).

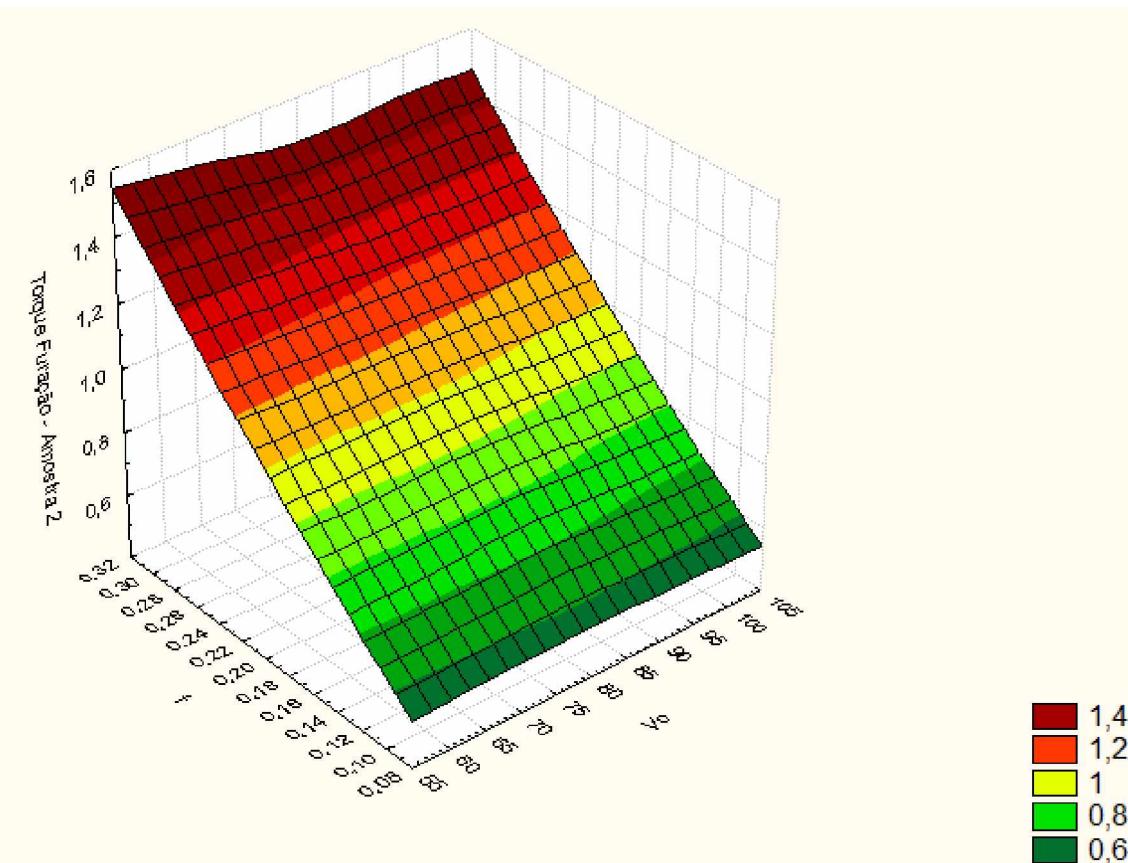


Figura 4.13. Superfície de resposta do torque (N.m) na furação da amostra 2 em função dos parâmetros velocidade de corte e avanço

#### 4.2.2 Força de avanço

Os valores médios da força de avanço na ferramenta de corte, com intervalo de confiança de 95%, em diferentes velocidades de corte durante a furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre estão apresentados na Fig. 4.14. Não é possível perceber alguma tendência de aumento ou diminuição da força de avanço a medida que se aumenta a velocidade de corte, exceto na furação da amostra 2 (0,23% Cu). A diminuição das componentes da força de usinagem devido à diminuição da resistência ao cisalhamento do material, decorrente do aumento da geração de calor, sugerida por Machado et al. (2011), provavelmente não é significativo nesta faixa de variação de velocidades de corte.

Já comparando os valores médios da força de avanço obtidos na furação das amostras da liga de alumínio com diferentes teores de cobre fica evidente uma tendência de aumento da força de avanço com o aumento do teor de cobre. As amostras 3, 4 e 5 com maiores teores de cobre apresentaram maiores valores de força de avanço durante sua usinagem na faixa de 460 N a 500N. A maior resistência

mecânica e dureza apresentada por estas amostras resultaram em maior esforço durante o corte na direção de avanço da ferramenta.

Na comparação entre a amostra 2 com a amostra 1, que possui a quantidade de cobre (0,07% Cu) mais próxima da utilizada na liga 6351 comercial (0,10% Cu), em média a amostra 2 resultou em menores valores da força de avanço. Além disso, para a amostra 2, diferentemente das demais, a força de avanço foi menor quando se aumentou a velocidade de corte. A força de avanço para esta amostra variou de 455 N para a menor velocidade de corte (60 m/min) até 429 N para a maior velocidade de corte ensaiada (100 m/min). Apesar da diferença entre as médias da força de avanço obtidas na furação das amostras 1 e 2, os intervalos de confiança destes valores se sobrepõem. Assim, não é possível fazer inferências significativas sobre a diferença dos valores da força de avanço apresentados pelas amostras 1 e 2. A partir da análise estatística será possível verificar se houve diferença significativa entre estes resultados.

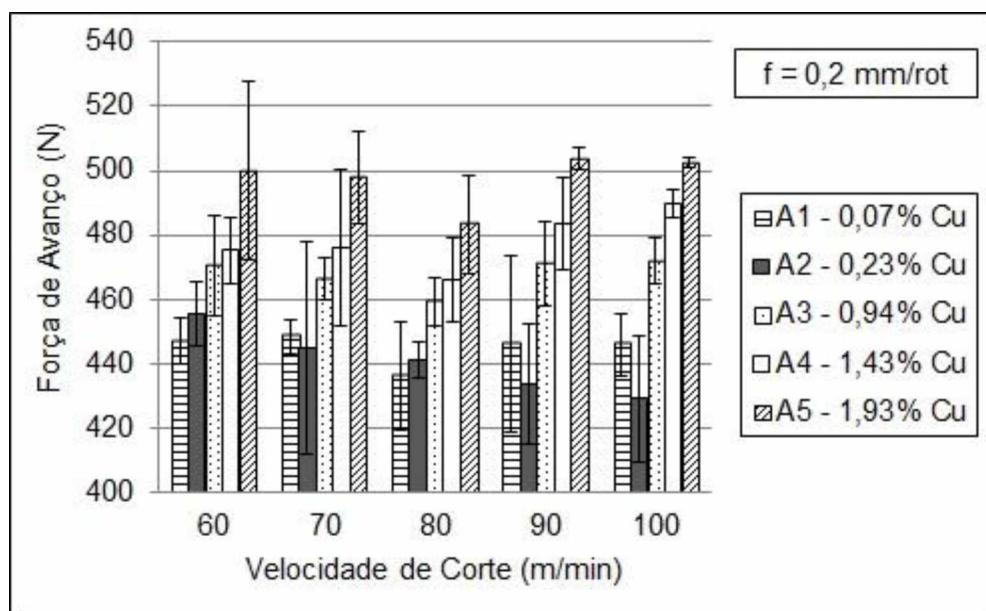


Figura 4.14. Força de avanço em diferentes velocidades de corte na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Os valores médios da força de avanço, com intervalo de confiança de 95%, em diferentes avanços na furação das diferentes amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre são apresentados na Fig. 4.15. Desta forma, como verificado para o torque, o aumento no avanço da ferramenta de corte resultou em um aumento praticamente linear da força de avanço. Para o menor avanço (0,10 mm/rot) a força de avanço obtida ficou em torno de 300 N, atingindo valores na faixa de 587 N

a 682 N para o maior avanço da ferramenta (0,30 mm/rot). Este comportamento se deve ao fato de que aumentando o avanço, aumenta-se também a área da seção transversal de corte, ou seja, a área de material a ser cisalhado (MACHADO et al., 2011). As amostras da liga de alumínio 6351 com maior quantidade de cobre, de maior resistência mecânica, implicaram em maior esforço exercido sobre a ferramenta de corte na direção de avanço durante a furação.

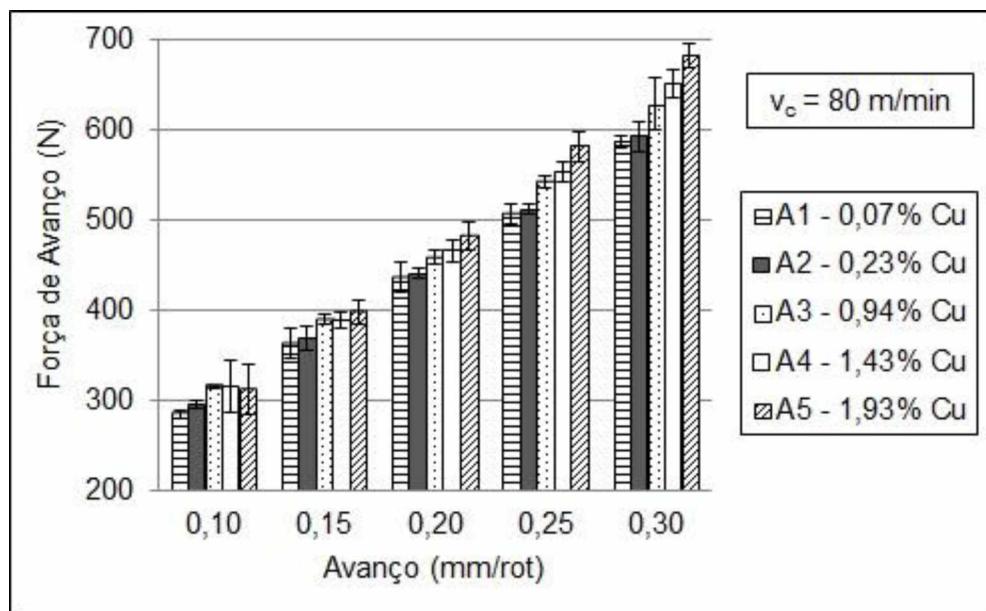


Figura 4.15. Força de avanço em diferentes avanços na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Na Tab. 4.15 é apresentado o modelo ajustado para a força de avanço na furação para a comparação entre as amostras 2 (0,23% Cu) e 5 (1,93% Cu). A partir desta tabela é possível notar que, assim como o torque, a força de avanço na furação é mais sensível ao avanço da ferramenta e ao teor de cobre, bem como a interação entre eles. A regressão confirmou a tendência de aumento da força de avanço com o aumento do avanço (de 0,10 para 0,30 mm/rot) e com o aumento do teor de cobre (de 0,23% Cu para 1,93% Cu), observados nas Fig. 4.14 e Fig. 4.15. Além disso, foi também confirmado que o aumento da velocidade de corte não implica em influência significativa na variação da força de avanço na furação. É importante ressaltar que o efeito principal do avanço é o maior dentre os efeitos das variáveis significativas.

Tabela 4.15. Efeitos, coeficientes e valores p da regressão múltipla para a força de avanço na furação comparando amostras 2 e 5 da liga de alumínio 6351

Sumário da Regressão para a Variável Dependente: Força de Avanço na Furação			
$R = 0,99978619$ ; $R^2 = 0,99957243$ ; $R^2$ Ajustado = 0,99925175			
$F(3,4) = 3117$ ; $p < 0,0000$			
	Efeito	Coeficiente	valor p
Interseção		<b>463,1677</b>	<b>0,000000</b>
$f$	<b>335,562</b>	<b>167,7810</b>	<b>0,000000</b>
Teor de Cobre	<b>29,0434</b>	<b>14,5217</b>	<b>0,001135</b>
f.Teor de Cobre	<b>14,6186</b>	<b>7,3093</b>	<b>0,013772</b>

Em relação ao efeito do teor de cobre, parâmetro de maior relevância neste trabalho, se mostrou significativo em sete das dez comparações realizadas entre as cinco amostras da liga de alumínio estudada. Foi observado que, sempre que significativo, o efeito do aumento do teor de cobre resultou no aumento da força de avanço na furação. Assim, na análise de todas as comparações, mesmo aquelas em que o teor de cobre não foi significativo com 95% de confiança, foi possível determinar que a amostra 1 (0,07% Cu) foi a que resultou em menor força de avanço na ferramenta de corte durante o processo de furação.

A regressão para a amostra 1 mostrou que, com 95% de confiança, apenas o efeito principal do avanço foi significativo em relação à força de avanço na ferramenta de corte durante a furação. Na Eq. 4.2 é apresentada a equação do modelo ajustado que descreve a força de avanço na furação da amostra 1 em função do avanço.

$$\text{Força de avanço na Furação da liga 6351(0,07% Cu)} = 151,898 + 1421,941f \quad (4.2)$$

Este modelo apresentou um grau de ajuste de  $R^2 = 0,9932$ . Esse valor indica boa correlação entre o modelo e os dados obtidos nos ensaios experimentais de furação realizados. Em outras palavras, o modelo explica 99,32% dos resultados experimentais obtidos.

Já na Fig. 4.16 é apresentada uma superfície de resposta que representa o comportamento da força de avanço na furação da amostra 1 em função dos parâmetros de corte velocidade de corte e avanço.

A equação que descreve o modelo e a superfície de resposta confirmam a importância significativa do avanço no aumento da força de avanço aplicado na ferramenta de corte durante o processo de furação da amostra 1. De acordo com a Fig. 4.16, para obter menores valores força de avanço na furação da amostra 1

(0,07% Cu) da liga de alumínio 6351, é recomendável utilizar o menor valor de avanço (0,10 mm/rot), independente da velocidade de corte utilizada (60 m/min à 100 m/min).

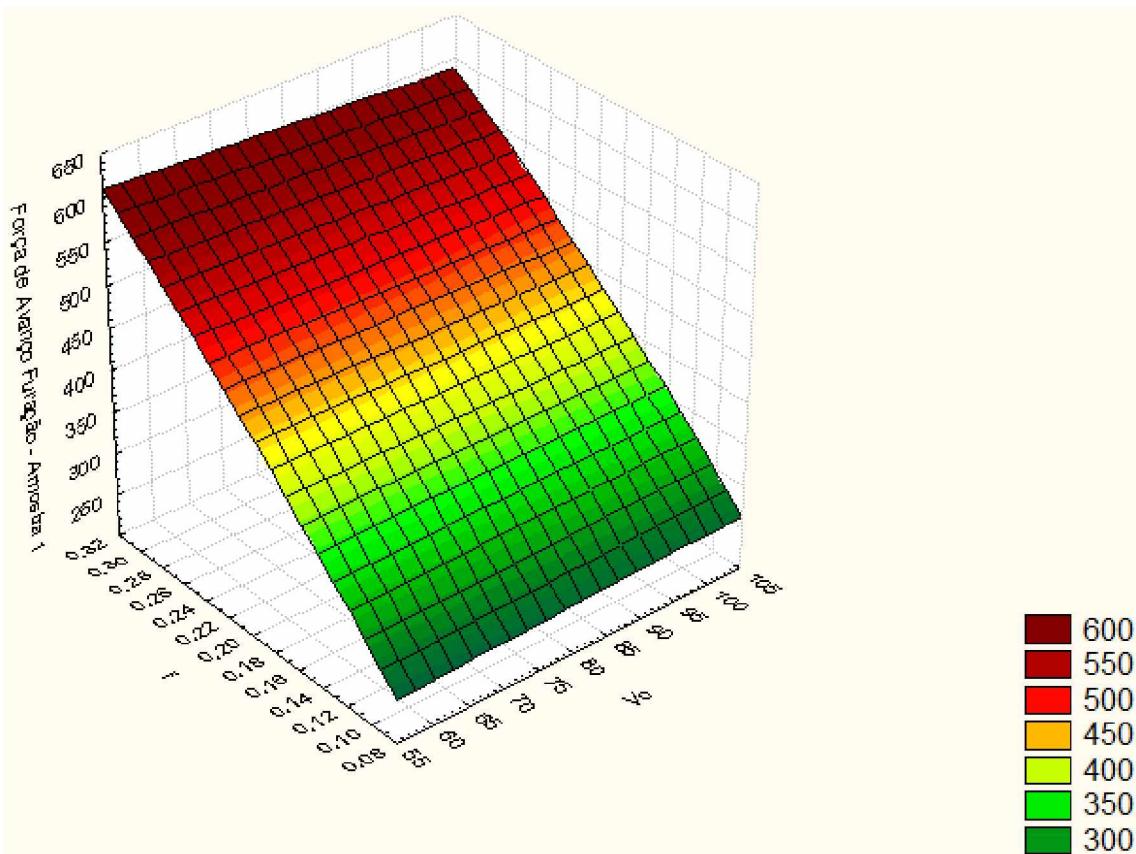


Figura 4.16. Superfície de resposta da força de avanço (N) na furação da amostra 1 em função dos parâmetros velocidade de corte e avanço

#### 4.2.3 Diâmetro do furo

Na Fig. 4.17 é apresentado o diâmetro médio, com intervalo de confiança de 95%, dos furos obtidos no processo de furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. Além disso, é apresentado também o diâmetro nominal do furo de 6,35 mm (diâmetro da broca). É possível observar que o diâmetro médio de todos os furos foi maior que o diâmetro nominal. A amostra 2 (0,23%) foi a que resultou em diâmetro médio mais próximo do diâmetro nominal, com valor de 6,359 mm. A partir da amostra 3 é possível observar um aumento no diâmetro médio dos furos com o aumento da quantidade de cobre adicionada na liga.

Além disso, na Fig. 4.17 é apresentado o diâmetro máximo (6,382 mm) para o campo de tolerância H e qualidade de trabalho IT11 para o diâmetro de 6,35 mm. Os diâmetros médios dos furos de todas as amostras ficaram dentro da tolerância especificada. Tolerância comumente utilizada para furos obtidos por furação.

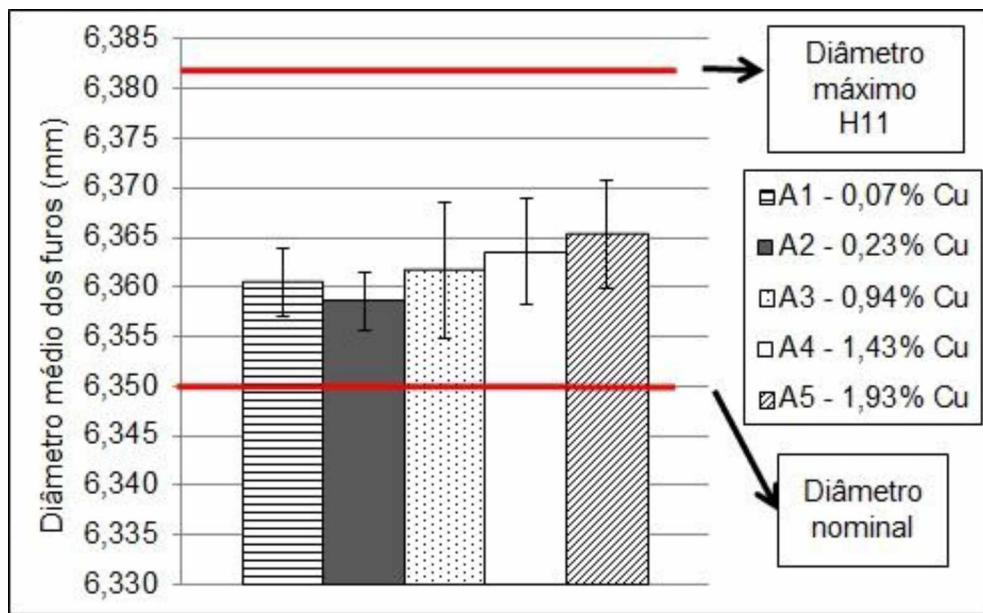


Figura 4.17. Diâmetro médio dos furos obtidos no processo de furação das amostras da liga de alumínio com diferentes teores de cobre

Na Tab. 4.16 é apresentado um quadro de ANOVA (Análise de Variância) a fim de analisar estatisticamente a influência do teor de cobre no diâmetro médio dos furos obtidos na furação das diferentes amostras da liga de alumínio 6351. Com 95% de confiança, como  $p > 0,05$  ( $p = 0,265362$ ), é possível afirmar que estatisticamente não existe diferença entre o diâmetro médio dos furos das diferentes amostras. A diferença entre o diâmetro médio dos furos das amostras é decorrente do erro experimental.

Tabela 4.16. Quadro de ANOVA para o diâmetro médio dos furos obtidos na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Efeito	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Média Quadrática	F	Valor p
Interseção	<b>2428,439</b>	<b>1</b>	<b>2428,439</b>	<b>39030068</b>	<b>0,000000</b>
Teor de cobre	0,000	4	0,000	1	0,265362
Erro	0,003	55	0,000		

#### 4.2.4 Rugosidade

Os valores médios do parâmetro de rugosidade  $Rq$ , com intervalo de confiança de 95%, em diferentes velocidades de corte durante a furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre estão apresentados na Fig. 4.18.

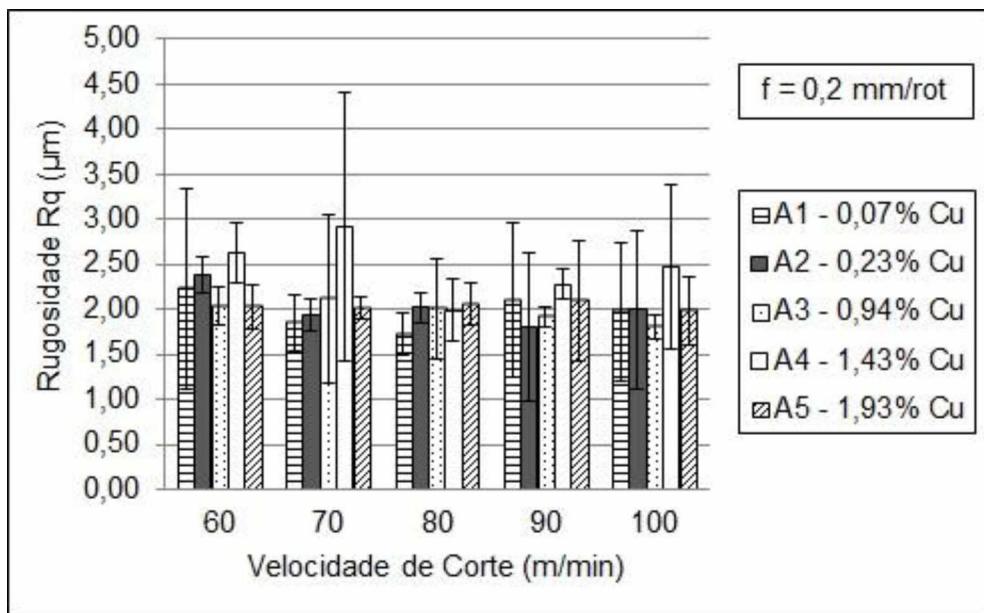


Figura 4.18. Parâmetro de rugosidade Rq em diferentes velocidades de corte na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

A rugosidade de uma superfície usinada é muitas vezes utilizada como parâmetro de saída do processo. Consequentemente, pode também representar uma medida da usinabilidade de um material. Diversos fatores influenciam a rugosidade. Entre eles é possível citar o material da peça, material e geometria da ferramenta de corte, processo de usinagem, máquina-ferramenta, condições de corte, atmosfera de usinagem, presença de aresta postiça de corte (APC), vibrações, etc (MACHADO et al., 2011).

De maneira geral, o aumento da velocidade de corte tende a melhorar o acabamento de uma peça usinada. Com o aumento da velocidade de corte aumenta-se a temperatura durante a usinagem. Este aumento de temperatura acima da temperatura de recristalização do material da peça favorece o desaparecimento da APC. A APC aumenta a rugosidade devido ao fato de que partes dela podem ser cisalhadas durante o processo e permanecerem aderidas à superfície da peça em usinagem. Esta elevação da temperatura com o aumento da velocidade de corte também causa a diminuição das componentes da força de usinagem. Este fator também pode resultar em melhoria do acabamento. Em contrapartida, o aumento da velocidade de corte pode em alguns casos aumentar as vibrações durante o processo. Isso pode ser prejudicial ao acabamento das peças. Por isso, melhores acabamentos são obtidos em máquinas-ferramentas mais rígidas (MACHADO et al., 2011).

A partir da Fig. 4.18 não é possível identificar alguma tendência de aumento ou diminuição do parâmetro de rugosidade Rq com o aumento da velocidade de corte.

Nas velocidades de corte ensaiadas a rugosidade  $Rq$  variou em torno do valor de 2  $\mu\text{m}$ . Como mencionado anteriormente, durante o processo de furação, a velocidade de corte diminui à medida que se caminha da periferia para o centro da broca. Assim, durante a furação, principalmente de materiais dúcteis, a formação de aresta postiça de corte na vizinhança do centro da broca é inevitável (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Por meio dos valores de rugosidade obtidos não é possível afirmar que a aresta postiça de corte esteve presente durante a usinagem na faixa de velocidades ensaiada neste trabalho. Maiores considerações acerca da APC serão feitas no tópico da análise da formação de cavacos.

Ainda analisando a Fig. 4.18, não é evidente uma tendência de aumento ou diminuição da rugosidade  $Rq$  com a variação da quantidade de cobre adicionada à liga. Em média a amostra 4 (1,43 % Cu), amostra de maior resistência mecânica e uma das que apresentaram menor capacidade de deformação, apresentou pior acabamento superficial para a maioria das velocidades de corte ensaiadas.

Segundo Machado et al. (2011), a composição química, dureza, microestrutura e consistência metalúrgica do material da peça são fatores que também podem afetar o acabamento. Em geral, o acabamento é melhor quando:

- a composição química do material é desfavorável ao aparecimento da APC;
- alta dureza e baixa ductilidade;
- granulação fina e alta dureza dos microconstituintes;
- consistência nas propriedades ao longo de toda a seção transversal.

Na análise microestrutural não foi percebida variação na granulação das amostras com variação da quantidade de cobre adicionada à liga de alumínio 6351. Por outro lado, foi observado um aumento considerável na microdureza da partícula de segunda fase rica em cobre à medida que se aumentou o teor de cobre na liga de alumínio 6351. Além disso, foi percebida uma tendência de aumento da dureza da liga com o aumento da quantidade de cobre até 1,43%. Ao mesmo tempo, a ductilidade da liga sofreu considerável decréscimo à medida que se aumentou o teor de cobre. Desta forma, apesar de na literatura ser encontrado que materiais mais duros e com menor capacidade de deformação proporcionam melhor acabamento superficial após a usinagem, as amostras de maior dureza e menor ductilidade implicaram em pior acabamento dos furos obtidos pelo processo de furação. Uma provável explicação para este fato pode ser a presença de porosidade na liga de alumínio. Além da influência das propriedades citadas sobre a rugosidade de uma superfície usinada, é preciso lembrar que a rugosidade tende a ser menor em materiais inerentemente puros e livres de defeitos (trincas, bolhas e inclusões) (JOHNE, 1994). Portanto, a maior porosidade criada pela maior quantidade de cobre presente na liga de alumínio

investigada pode ter sido um fator prejudicial ao acabamento obtido no processo de furação.

Já na Fig. 4.19 são apresentados os valores médios do parâmetro de rugosidade  $Rq$ , com intervalo de confiança de 95%, em diferentes avanços durante a furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.

De acordo com Machado et al. (2011), para a maioria dos processos de usinagem convencional, incluindo a furação, o avanço é o parâmetro de corte mais influente sobre o acabamento de uma superfície usinada. Isso se deve ao fato de que a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar em proporção quadrática ao avanço. A partir da Fig. 4.19 uma leve tendência de aumento da rugosidade  $Rq$  pode ser obtida com o aumento do avanço. Para o menor avanço utilizado (0,10 mm/rot) o parâmetro de rugosidade  $Rq$  ficou na faixa de 1,2528  $\mu\text{m}$  até 1,7468  $\mu\text{m}$ . Por outro lado, para o maior avanço utilizado (0,30 mm/rot) o parâmetro de rugosidade  $Rq$  foi obtido entre 2,0852  $\mu\text{m}$  até 2,8985  $\mu\text{m}$ . Em média a amostra 2 (0,23% Cu) apresentou melhor acabamento. Por sua vez, a amostra 5 (1,93% Cu) apresentou pior acabamento para a maioria das velocidades de corte ensaiadas.

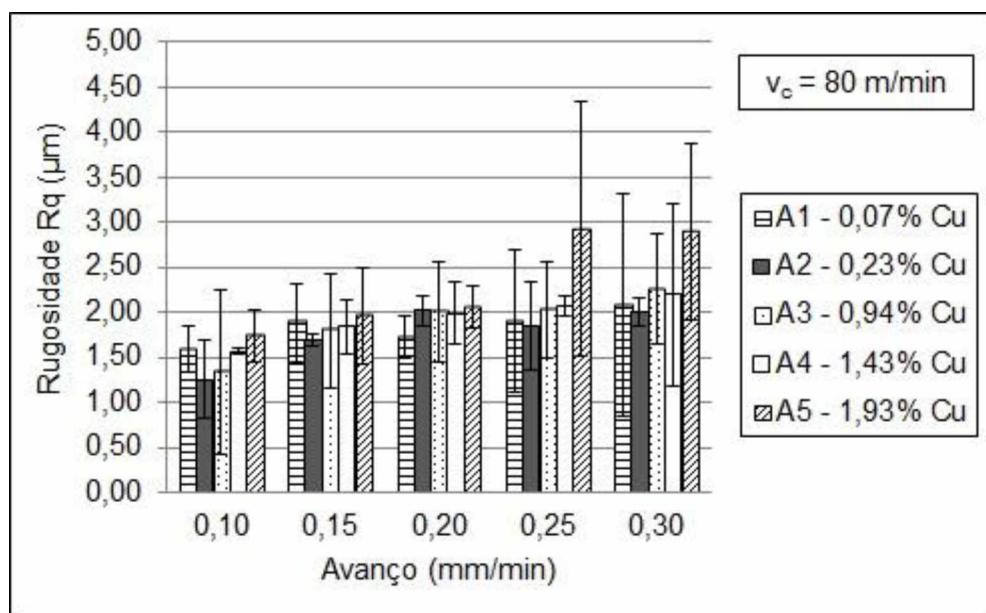


Figura 4.19. Parâmetro de rugosidade  $Rq$  em diferentes avanços na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Na tabela Tab. 4.17 é apresentado o modelo ajustado para o parâmetro de rugosidade  $Rq$  na furação para a comparação entre as amostras 2 (0,23% Cu) e 5 (1,93% Cu). A partir desta tabela é possível notar que a rugosidade da parede dos

furos é mais sensível ao avanço da ferramenta e ao teor de cobre, bem como a interação entre eles. A interação entre a velocidade de corte e o teor de cobre também se mostrou significativa na rugosidade. A regressão confirmou a tendência de aumento da rugosidade com o aumento do avanço (de 0,10 para 0,30 mm/rot) e com o aumento do teor de cobre (de 0,23% Cu para 1,93% Cu) observados nas Fig. 4.18 e Fig. 4.19. É importante ressaltar que o efeito principal do avanço é o maior dentre os efeitos das variáveis significativas.

Tabela 4.17. Efeitos, coeficientes e valores p da regressão múltipla para o parâmetro de rugosidade Rq na furação comparando amostras 2 e 5 da liga de alumínio 6351

Sumário da Regressão para a Variável Dependente: Rugosidade Rq na Furação			
$R = 0,99697390$ ; $R^2 = 0,99395695$ ; $R^2$ Ajustado = 0,98589956			
$F(4,3) = 123,36$ ; $p < 0,00117$			
	Efeito	Coeficiente	valor p
Interseção		2,160204	0,000002
f	0,712742	0,356371	0,000383
Teor de Cobre	0,384292	0,192146	0,002376
$v_c$ .Teor de cobre	0,333942	0,166971	0,003578
f.Teor de Cobre	0,136058	0,068029	0,042161

Assim como observado para o torque e força de avanço, nas comparações entre as demais amostras da liga de alumínio 6351 verificou-se que sempre o avanço foi um parâmetro significativo, resultando no aumento da rugosidade dos furos obtidos pela furação. Além do avanço, a velocidade de corte e as interações  $v_c$ .teor de cobre e f.teor de cobre se mostraram significativas em algumas comparações, provocando também sempre o aumento da rugosidade.

Em relação ao efeito do teor de cobre, parâmetro de maior relevância neste trabalho, se mostrou significativo em apenas quatro das dez comparações realizadas entre as cinco amostras da liga de alumínio estudada. Foi observado que, sempre que significativo, o efeito do aumento do teor de cobre resultou no pior acabamento superficial dos furos. Exceção a comparação entre a amostra 2 e a amostra 3. Em que o aumento do teor de cobre de 0,23% Cu para 0,94% Cu resultou em melhoria do acabamento, mesmo esta variação não sendo estatisticamente significativa, segundo a regressão. Desta forma, verificando todas as comparações, mesmo aquelas em que o teor de cobre não foi significativo com 95% de confiança, foi possível determinar que a amostra 1 (0,07% Cu) da liga de alumínio ensaiada foi a que resultou em melhor acabamento superficial dos furos obtidos pelo processo de furação. Neste caso, o

aumento do teor de cobre, que aumentou a resistência mecânica e dureza da amostra da liga de alumínio 6351 resultou em maiores valores do parâmetro de rugosidade  $Rq$ . Apesar de a literatura apresentar que normalmente materiais mais duros levam a melhores acabamentos. Assim, a amostra 1 (0,07% Cu) da liga de alumínio ensaiada foi a que resultou em melhor acabamento superficial dos furos obtidos pelo processo de furação.

Apesar de o modelo obtido ter sido significativo, a regressão para a amostra 1 mostrou, com 95% de confiança, que nenhum efeito foi significativo em relação à rugosidade dos furos. Na Eq. 4.3 é apresentada a equação do modelo ajustado que descreve a rugosidade na furação da amostra 1.

$$\text{Rugosidade } Rq \text{ na Furação da liga 6351(0,07% Cu)} = 0,329 + 13,860f - 28,072f^2 \quad (4.3)$$

Este modelo apresentou um grau de ajuste de  $R^2 = 0,5824$ . Esse valor não indica bom ajuste entre o modelo e os dados obtidos nos ensaios experimentais de furação realizados. Em outras palavras, o modelo explica apenas 58,24% dos resultados experimentais obtidos. Este fato, provavelmente, se deve à grande dispersão nas medições de rugosidade.

Na Fig. 4.20 é apresentada uma superfície de resposta que representa o comportamento do parâmetro de rugosidade  $Rq$  dos furos obtidos pelo processo de furação da amostra 1 em função dos parâmetros velocidade de corte e avanço. A superfície de resposta e a equação do modelo ajustado comprovam a importante influência prejudicial do avanço no acabamento superficial dos furos. Portanto, a partir da Fig. 4.20, para obter o melhor acabamento dos furos no processo de furação da amostra 1 (0,07% Cu) da liga de alumínio, é recomendável a utilização do menor avanço (0,1 mm/rot), independente da velocidade de corte (60 m/min a 100 m/min). Menores velocidades de corte resultam em acabamento superficial levemente melhor.

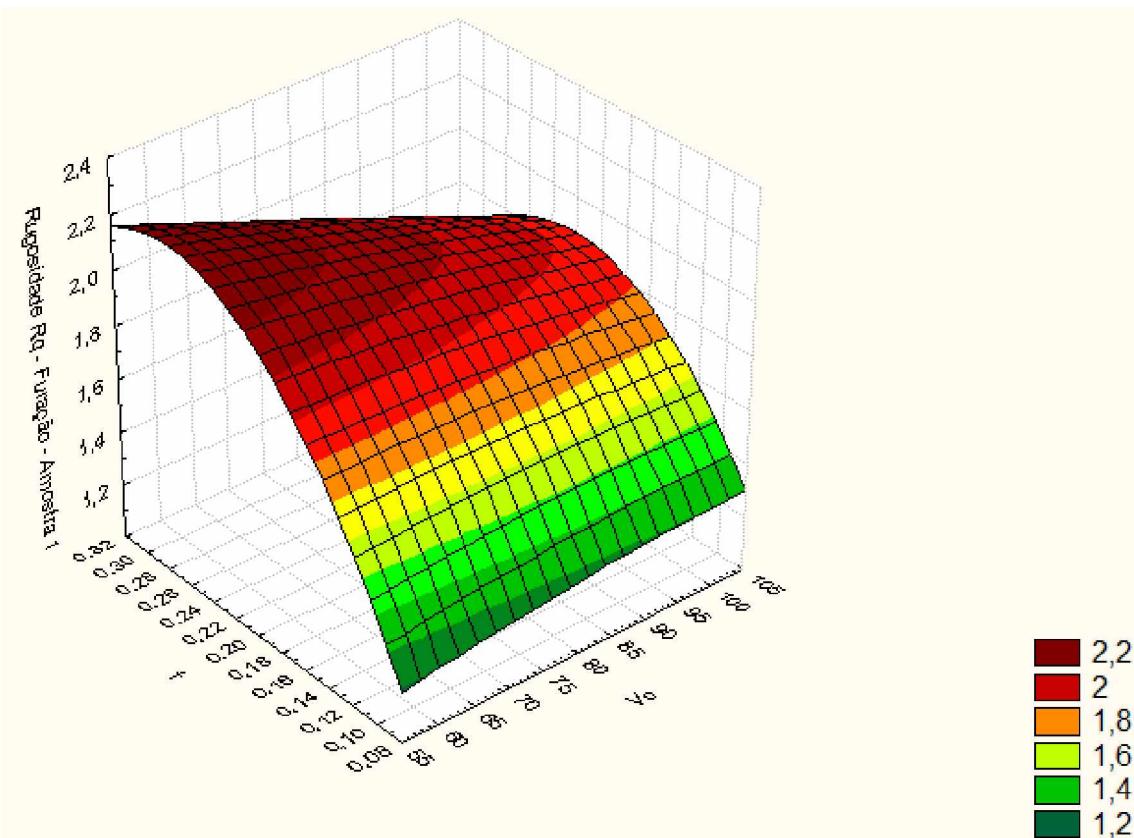


Figura 4.20. Superfície de resposta do parâmetro de rugosidade  $Rq$  ( $\mu m$ ) na furação da amostra 1 em função dos parâmetros velocidade de corte e avanço

#### 4.2.5 Alterações subsuperficiais

De acordo com Machado et al. (2011), a condição final de uma superfície usinada é resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibrações, tensões residuais, reações químicas, etc. Assim, o estudo da integridade superficial de uma peça usinada engloba tanto o acabamento como também as alterações subsuperficiais provocadas pelo processo de usinagem.

Na Fig. 4.21 são apresentadas as micrografias obtidas por microscopia ótica da seção transversal dos furos para análise de alterações subsuperficiais durante a furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre em aumentos de 100x, 200x e 500x. Ao analisar principalmente as micrografias realizadas com aumento de 500x fica evidente uma pequena faixa de deformação plástica próxima à superfície usinada. Esta deformação representa uma zona afetada pelo corte. Neste trabalho o tamanho desta zona de deformação não foi medida. A partir da escala das micrografias, aparentemente esta deformação ficou restrita à uma pequena faixa de aproximadamente  $5\mu m$  a  $10\mu m$ . A amostra 2 (0,23% Cu) que apresentou em média uma das maiores valores de alongamento (5,91%) visualmente apresentou

maior quantidade de deformação microestrutural próxima à superfície usinada. Ao mesmo tempo, as amostras 3 (0,94% Cu) e 4 (1,43% Cu) também apresentaram uma zona afetada pelo corte evidente. Em contrapartida, a amostra 5 (1,93% Cu) de menor alongamento (4,88%), visualmente foi a amostra que sofreu menor deformação após a furação. Já na amostra 1 (0,07% Cu) não ficou evidente a deformação microestrutural caracterizando a zona afetada pelo corte.

Com o intuito de comprovar e tentar quantificar esta deformação plástica (zona afetada pelo corte) foram realizados ensaios de microdureza. Foram realizadas cinco indentações partindo da superfície usinada em direção ao interior do material. Os valores de microdureza obtidos são apresentados na Fig. 4.22. Foi observado que a amostra 1 (0,07% Cu) apresentou um amolecimento próximo à superfície usinada. Para a amostra 1, a microdureza à 15  $\mu\text{m}$  da superfície usinada (83,2 HV) foi cerca de 30% menor que a microdureza média do material (121,2 HV). Esta diminuição da microdureza provavelmente foi causada pelo aquecimento devido a geração de calor durante o processo de furação.

Já as amostras 2 (0,23% Cu) e 5 (1,93% Cu) apresentaram valores de microdureza medidas próximas à superfície usinada bem próximos da sua microdureza média. A amostra 2 apresentou microdureza a 15  $\mu\text{m}$  da superfície usinada de 114 HV, enquanto sua microdureza média é 113,2 HV. Já para a amostra 5, a microdureza a 15  $\mu\text{m}$  da superfície usinada foi de 137 HV, enquanto sua microdureza média é 141,4 HV.

Por outro lado, as amostras 3 (0,94% Cu) e 4 (1,43% Cu) sofreram endurecimento próximo à superfície usinada. Para a amostra 3, a microdureza a 15  $\mu\text{m}$  da superfície usinada (149 HV) foi cerca de 20% maior que a microdureza média do material (124 HV). Já para a amostra 4, a microdureza a 15  $\mu\text{m}$  da superfície usinada (141 HV) foi cerca de 5% maior que a microdureza média do material (133,4 HV).

Os resultados confirmam a observação visual de que ocorreu a formação de uma zona afetada pelo corte, caracterizada pela alteração da microestrutura, e consequentemente da microdureza do material próximo à superfície usinada.

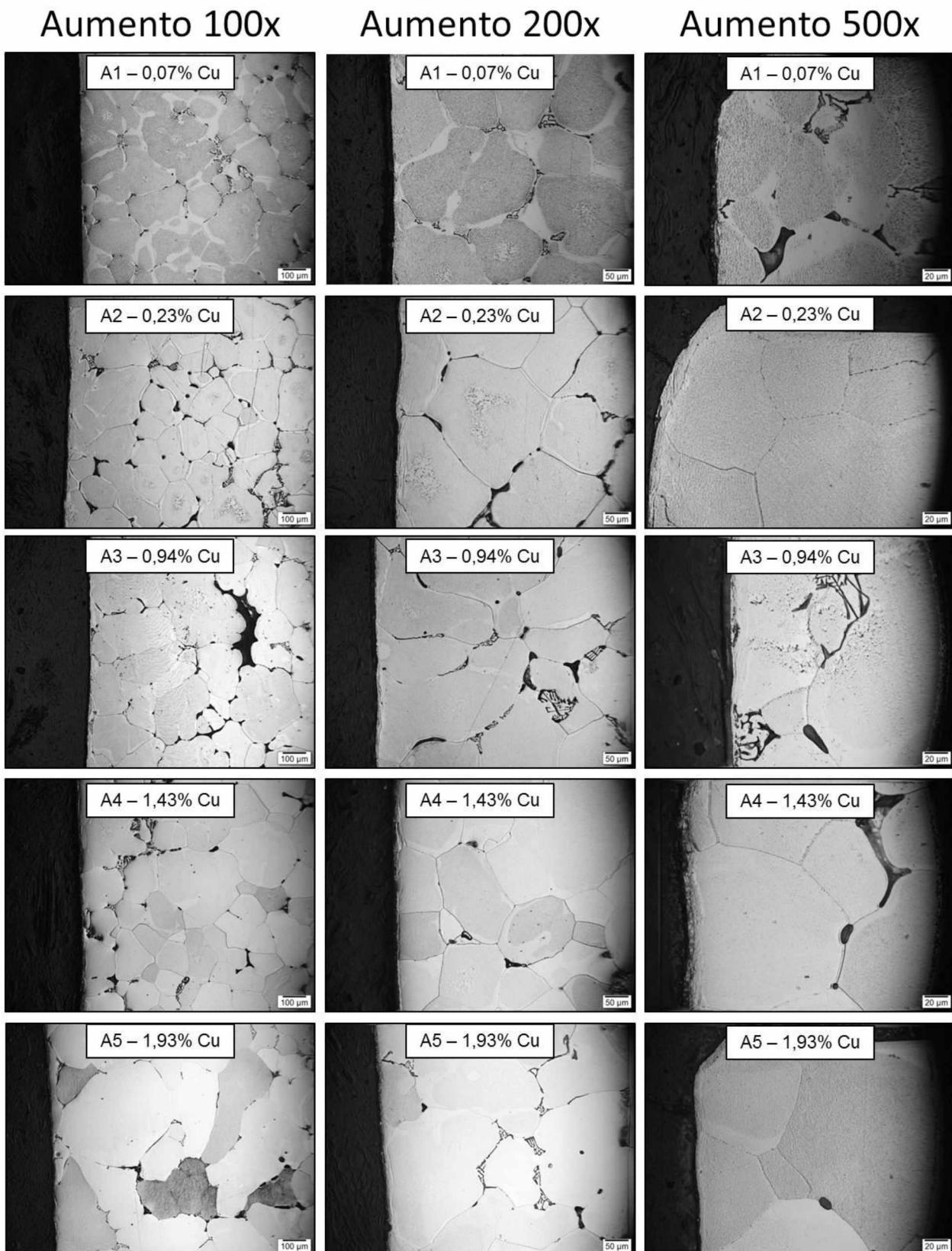


Figura 4.21. Micrografias obtidas por microscopia ótica da seção transversal dos furos para análise de alterações subsuperficiais durante a furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre em aumentos de 100x, 200x e 500x

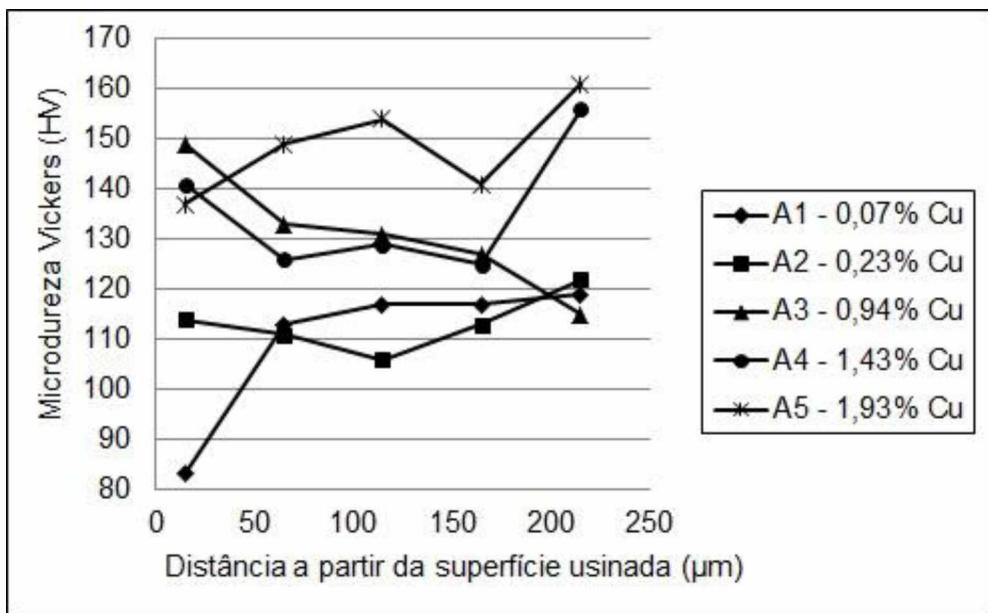


Figura 4.22. Microdureza Vickers em função da distância a partir da superfície usinada no processo de furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

#### 4.2.6 Formação de cavacos

Os cavacos obtidos na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre são apresentados na Fig. 4.23. De acordo com a figura, os cavacos formados na usinagem de todas as amostras se apresentaram predominantemente em forma de leque (*fan shaped chips*). Apenas poucos cavacos se aproximaram do formato cônico. Segundo Batzer et al. (1998), a forma em leque é considerada a forma ideal de cavaco para a maioria de aplicações em furação. De acordo com estes autores, o cavaco na forma de leque é formado quando cavacos cônicos não puderam se curvar suficientemente para acompanhar a hélice do canal helicoidal da broca. Assim, ele se fratura previamente à uma revolução completa da ferramenta de corte.

Outra observação importante é o aumento no tamanho dos cavacos quando se aumenta a profundidade de corte de  $a_p = 3,15$  mm para  $a_p = 4,90$  mm. O aumento na profundidade de corte aumenta a largura de corte da seção transversal de corte.

Já em relação ao tamanho dos cavacos apresentados pelas amostras com diferentes quantidades de cobre, não é evidente uma tendência de aumento ou diminuição dos cavacos com o aumento da quantidade de cobre adicionada à liga de alumínio 6351. Na menor profundidade de corte utilizada ( $a_p = 3,15$  mm) as amostras 4 e 5 com maiores quantidades de cobre (1,43% Cu e 1,93% Cu), que são as amostras com menor capacidade de deformação (4,95% e 4,88%), aparentemente

apresentaram cavacos menores. Já para a maior profundidade de corte ( $a_p = 4,90$  mm) não houve diferença visível entre os tamanhos dos cavacos na furação das diferentes amostras.



Figura 4.23. Cavacos formados na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre em profundidades de corte de  $a_p = 3,15$  mm e  $a_p = 4,90$  mm

A diferença da morfologia dos cavacos também foi investigada a partir do parâmetro número de cavacos por grama. Este parâmetro avalia a capacidade de quebra dos cavacos na furação das diferentes amostras da liga estudada. Desta forma, quanto maior o valor do parâmetro cavacos/grama, maior será a capacidade de quebra do cavaco. Consequentemente, menor será o tamanho médio dos cavacos gerados. Na Fig. 4.24 são apresentados os valores médios do número de cavacos por grama, com intervalo de confiança de 95%, na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.

Primeiramente, foi observado que o número de cavacos por grama na furação com a maior profundidade de corte foi consideravelmente menor. Foram obtidos valores para este parâmetro em média entre 109,7 a 142,2 para a menor profundidade de corte ( $a_p = 3,15$  mm). Enquanto que para a maior profundidade de corte ( $a_p = 4,90$ ) os valores do número de cavacos por grama obtidos variaram em média de 63 até 88,4. Isto comprova a observação feita sobre o tamanho dos cavacos apresentados na Fig. 4.23.

Em média, a amostra 2 (0,23% Cu) foi aquela que apresentou o maior valor de número de cavacos por grama obtidos na furação para as duas profundidades de corte ensaiadas. Evidenciando assim, que os cavacos na usinagem desta amostra se quebraram mais facilmente. Isto explica o fato de que a amostra 2 foi a que exigiu menores valores de torque e força de avanço durante a furação. O trabalho realizado para a remoção de cavaco foi menor. Por outro lado, a amostra 1 (0,07% Cu), amostra que possui o teor de cobre mais próximo da liga 6351 comercial (0,10% Cu), foi a que resultou em média no menor valor de número de cavacos por grama para as duas profundidades de corte utilizadas. Além disso, na menor profundidade de corte ( $a_p = 3,15$  mm), para as amostras com teor de cobre acima de 0,23% foi possível observar uma tendência de diminuição do número de cavacos por grama quando se aumentou a quantidade de cobre adicionada à liga de alumínio 6351. Apesar da amostra 2 ser uma das amostras da liga de alumínio estudada que apresenta uma das maiores capacidades de deformação, esta amostra apresentou em média o menor valor de energia absorvida compensada nos ensaios de impacto. Assim, trincas formadas na ponta da ferramenta de corte provavelmente se propagaram mais facilmente pelo plano de cisalhamento primário, provocando a maior ruptura dos cavacos na furação da amostra 2.

Na Tab. 4.18 é apresentado um quadro de ANOVA (análise de variância) para o número de cavacos por grama. Com 95% de confiança, como  $p < 0,05$  ( $p = 0,008275$ ), é possível afirmar que o número de cavacos por grama de pelo menos uma das amostras com diferentes teores de cobre é diferente. Da mesma maneira, como

$p < 0,05$  ( $p = 0,000000$ ) houve diferença significativa da profundidade de corte no número de cavacos por grama obtido na furação com as diferentes profundidades de corte.

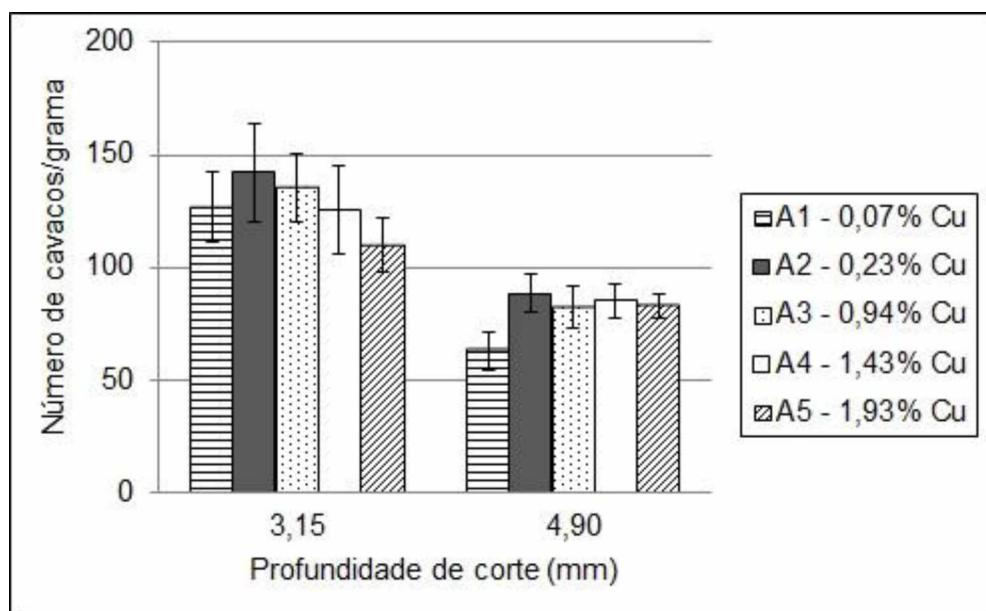


Figura 4.24. Número de cavacos por grama em diferentes profundidades de corte na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Tabela 4.18. Quadro de Anova para o número de cavacos por grama das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Efeito	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Média Quadrática	F	Valor p
Interseção	1062026	1	1062026	2791,010	0,000000
Teor de cobre	5559	4	1390	3,652	0,008275
$a_p$	55069	1	55069	144,722	0,000000
Erro	35388	93	381		

Como foi constatado pela análise de variância que pelo menos uma amostra da liga de alumínio apresentou número de cavacos por grama diferente, foi preciso realizar testes de hipótese para a diferença entre as médias dos valores obtidos para as diferentes amostras da liga estudada. As hipóteses utilizadas nesta análise foram as seguintes:

- $H_0$ : Número de cavacos por grama amostra (a) = Número de cavacos por grama amostra (b)

- $H_1$ : Número de cavacos por grama amostra (a)  $\neq$  Número de cavacos por grama amostra (b)

Na Tab. 4.19 são apresentados os valores p para o teste de hipótese comparativo realizado entre as amostras, tomadas duas a duas. Com 95% de confiança, como  $p < 0,05$  ( $p = 0,0397$ ), foi verificado que existe estatisticamente diferença apenas entre o número de cavacos por grama da amostra 2 e da amostra 5. A diferença entre o número de cavacos por grama médio das demais amostras é decorrente do erro experimental.

Tabela 4.19. Valor p para a diferença entre as médias do número de cavacos por grama das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Diferença entre as médias do número de cavacos por grama das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre		
Amostra (a)	Amostra (b)	Valor p
A1 – 0,07% Cu	A2 – 0,23% Cu	0,0828
A1 – 0,07% Cu	A3 – 0,94% Cu	0,2526
A1 – 0,07% Cu	A4 – 1,43% Cu	0,3226
A1 – 0,07% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,8975
A2 – 0,23% Cu	A3 – 0,94% Cu	0,4682
A2 – 0,23% Cu	A4 – 1,43% Cu	0,3410
A2 – 0,23% Cu	A5 – 1,93% Cu	<b>0,0397</b>
A3 – 0,94% Cu	A4 – 1,43% Cu	0,8278
A3 – 0,94% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,1742
A4 – 1,43% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,2370

Ainda na análise dos cavacos, estes são muitas vezes utilizados na investigação da formação de aresta postiça de corte durante a usinagem. Como comentado anteriormente, a rugosidade de uma superfície usinada depende de diversos fatores. Entre estes fatores está a usinagem na presença de aresta postiça de corte. No processo de furação, devido à variação da velocidade de corte ao longo da aresta de corte, a aresta postiça de corte deve estar presente. A aresta postiça de corte pode em algumas situações ser verificada na forma de material aderido na superfície inferior dos cavacos. Assim, na Fig. 4.25 são apresentadas imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura, com aumentos de 60x e 100x, da parte inferior dos cavacos formados com profundidade de corte de  $a_p = 3,15$  mm na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.

A partir da Fig. 4.25, não é possível observar a presença de material aderido à superfície inferior dos cavacos. Ficam evidentes, porém, trincas e deformações na superfície inferior dos cavacos resultados de seu contato com a superfície de saída da ferramenta de corte. A superfície inferior do cavaco apresenta uma estrutura em forma de “escamas”, o que indica a formação na presença de aresta postiça de corte.

Outra forma de investigar a presença da aresta postiça de corte pode ser feita por meio da análise da ferramenta de corte após a usinagem. Como a aresta postiça de corte pode se apresentar de forma estável e instável, dependendo da velocidade de corte utilizada, partes da APC podem ser cisalhadas e permanecerem aderidas à ferramenta de corte. Na Fig. 4.26 são mostradas em detalhe a aresta de corte e a superfície de folga das duas arestas de corte da broca helicoidal utilizada nos ensaios de furação. É possível perceber uma camada de material aderido próximo à aresta de corte, destacadas por setas. As dimensões desta camada de material aderido não foram mensuradas neste trabalho. Além disso, também foi possível observar que a ferramenta de corte não sofreu desgaste considerável, suficiente para alterar os esforços durante a usinagem e o acabamento superficial dos furos produzidos.

Por fim, outra maneira de se analisar a formação da aresta postiça de corte seria a análise da textura das paredes dos furos gerados. Esta análise poderia evidenciar material aderido à superfície. Porém, esta análise não foi realizada neste trabalho.

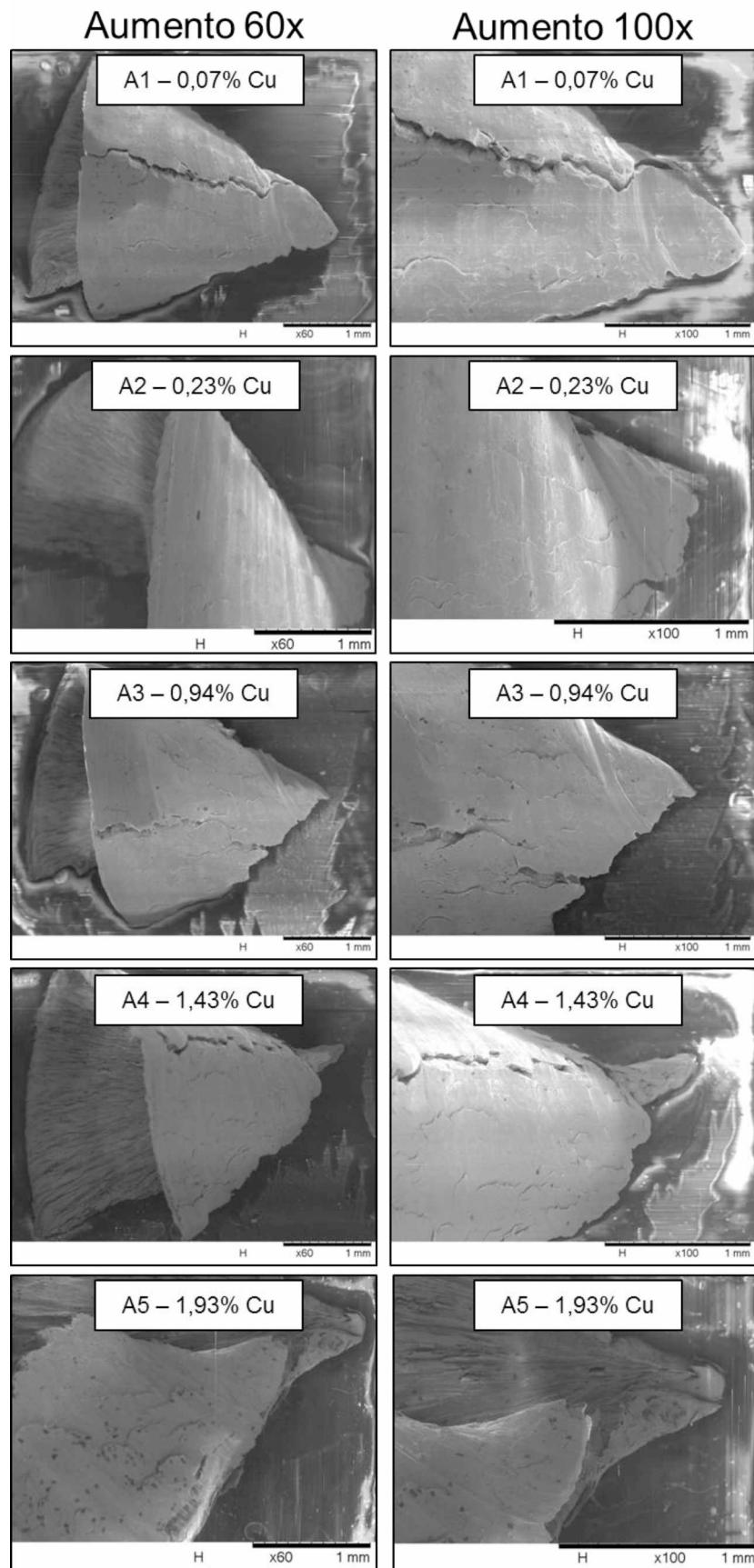


Figura 4.25. Imagens obtidas por MEV da superfície inferior dos cavacos formados na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

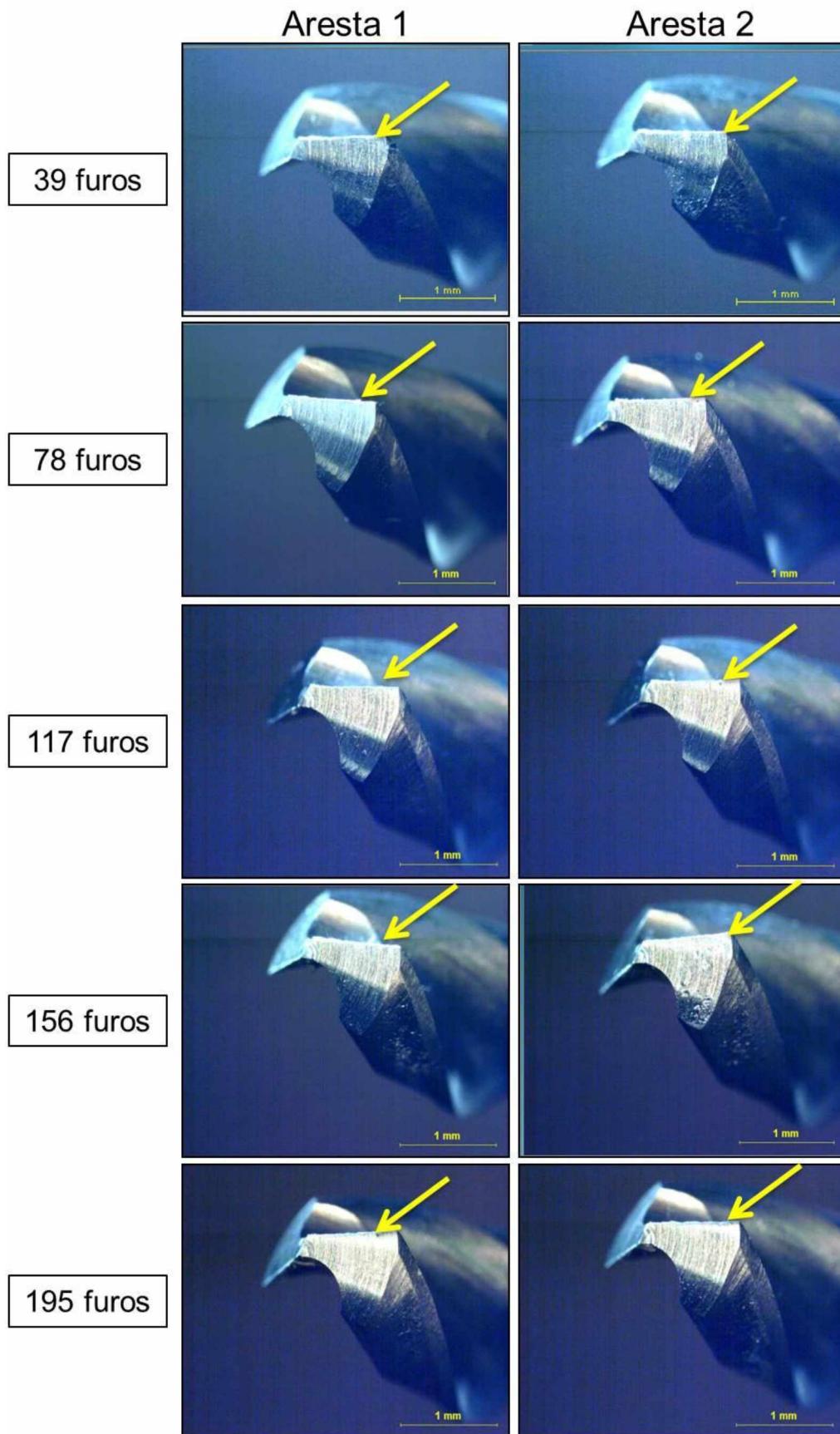


Figura 4.26. Detalhe da aresta de corte e da superfície de folga das duas arestas de corte da broca helicoidal utilizada nos ensaios de furação

#### 4.2.7 Formação de rebarbas

Na Fig. 4.27 são apresentadas as rebarbas de entrada formadas na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes quantidades de cobre. Foram geradas rebarbas, mesmo que de pequenas dimensões, em todas as amostras da liga usinada. Segundo a classificação proposta por Kim, Min e Dornfeld (2001) as rebarbas de entrada formadas podem ser classificadas como do tipo rebarba uniforme pequena.

Já na Fig. 4.28 são apresentadas as médias dos valores da máxima altura da rebarba de entrada formadas na furação das diferentes amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. A amostra 1 (0,07% Cu), com maior capacidade de alongamento, apresentou em média o maior valor da altura da rebarba de entrada ( $h_{re} = 0,199$  mm). A altura da rebarba de entrada sofreu decréscimo, de cerca de 50%, à medida que se aumentou a quantidade de cobre adicionada à liga de alumínio 6351. O menor valor da altura da rebarba de entrada ( $h_{re} = 0,106$  mm) foi apresentada pela amostra 5 (1,93% Cu), que possui o menor valor de alongamento percentual após a ruptura dentre as amostras ensaiadas. As propriedades das amostras da liga de alumínio 6351, principalmente a ductilidade, provavelmente é a razão principal para este comportamento.

Na Tab. 4.20 é apresentado um quadro de ANOVA (análise de variância) para a altura da rebarba de entrada na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. Com 95% de confiança, como  $p < 0,05$  ( $p = 0,002464$ ), é possível afirmar que a altura da rebarba de entrada de pelo menos uma das amostras com diferentes teores de cobre é diferente.

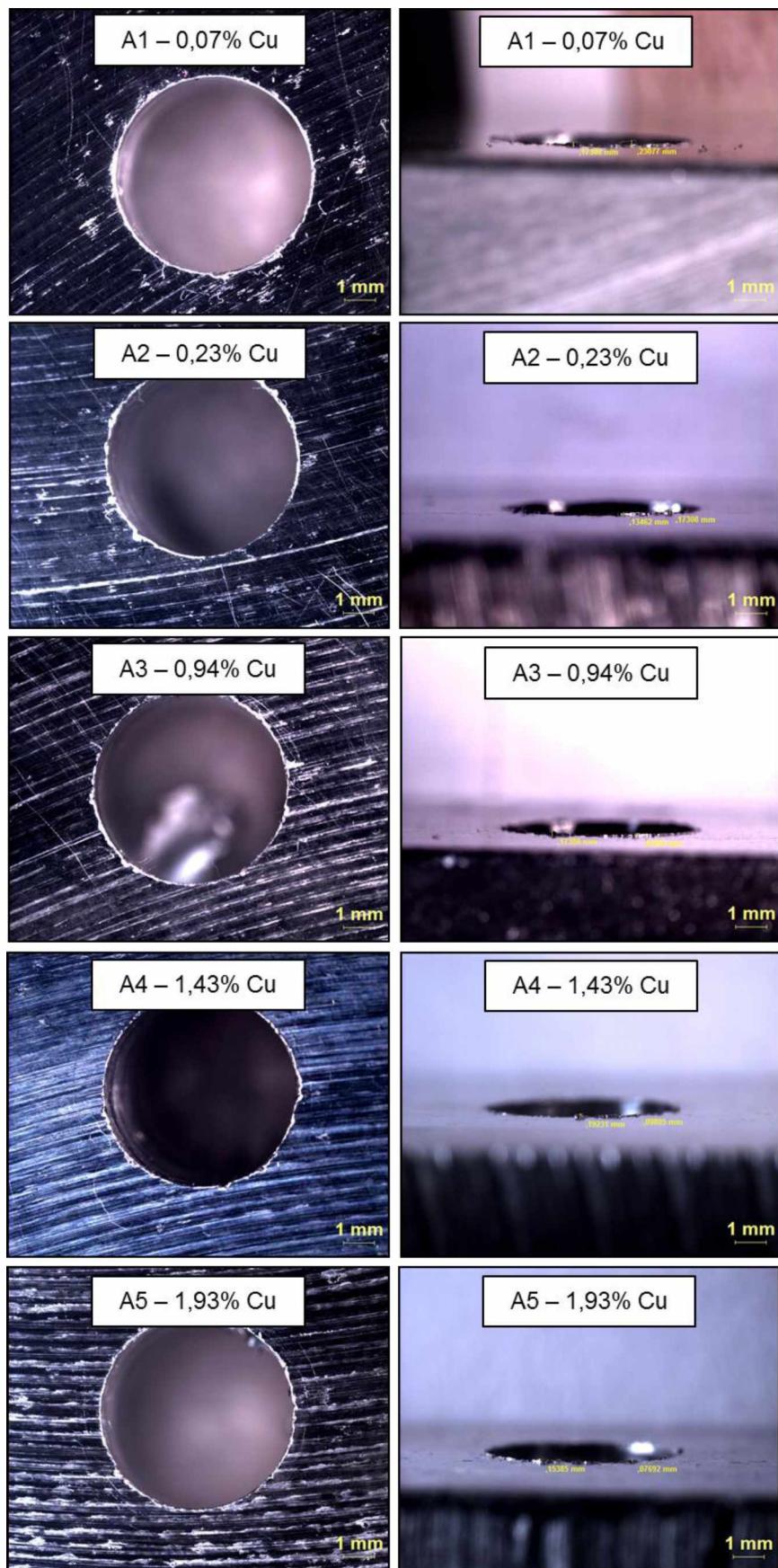


Figura 4.27. Vistas frontal e lateral das rebarbas de entrada formadas na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

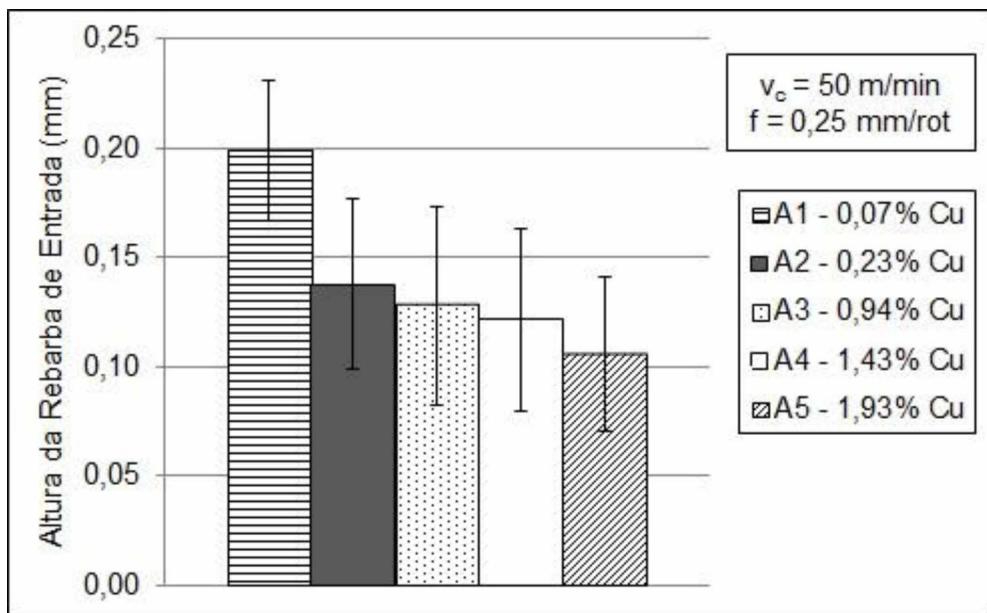


Figura 4.28. Altura da rebarba de entrada formada na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Tabela 4.20. Quadro de ANOVA para a altura da rebarba de entrada na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Efeito	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Média Quadrática	F	Valor p
Interseção	<b>0,575988</b>	<b>1</b>	<b>0,575988</b>	<b>415,5123</b>	<b>0,000000</b>
Teor de cobre	<b>0,030721</b>	<b>4</b>	<b>0,007680</b>	<b>5,5404</b>	<b>0,002464</b>
Erro	0,034655	25	0,001386		

Como foi constatado pela análise de variância que pelo menos uma amostra da liga de alumínio apresentou altura da rebarba de entrada diferente, foram realizados testes de hipótese para a diferença entre as médias da altura da rebarba de entrada das diferentes amostras da liga estudada. As hipóteses utilizadas nesta análise foram as seguintes:

- $H_0$ : Altura da rebarba de entrada amostra (a) = Altura da rebarba de entrada amostra (b)
- $H_1$ : Altura da rebarba de entrada amostra (a)  $\neq$  Altura da rebarba de entrada amostra (b)

Na Tab. 4.21 são apresentados os valores p para o teste de hipótese comparativo realizado entre as amostras, tomadas duas a duas. Com 95% de confiança, como  $p < 0,05$ , a amostra 1 apresentou estatisticamente altura da rebarba de

entrada diferente, no caso, maior que as demais amostras. A diferença entre a altura da rebarba de entrada das demais amostras é decorrente do erro experimental. Portanto, é possível concluir que aumentando a quantidade de cobre adicionada à liga de alumínio de 0,07% Cu para 1,93% Cu resultou na diminuição da altura da rebarba de entrada formada durante o processo de furação.

Tabela 4.21. Valor p para a diferença entre as médias da altura da rebarba de entrada na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Diferença entre as médias da altura da rebarba de entrada na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre		
Amostra (a)	Amostra (b)	Valor p
A1 – 0,07% Cu	A2 – 0,23% Cu	<b>0,0113</b>
A1 – 0,07% Cu	A3 – 0,94% Cu	<b>0,0083</b>
A1 – 0,07% Cu	A4 – 1,43% Cu	<b>0,0039</b>
A1 – 0,07% Cu	A5 – 1,93% Cu	<b>0,0006</b>
A2 – 0,23% Cu	A3 – 0,94% Cu	0,6750
A2 – 0,23% Cu	A4 – 1,43% Cu	0,4884
A2 – 0,23% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,1498
A3 – 0,94% Cu	A4 – 1,43% Cu	0,8075
A3 – 0,94% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,3488
A4 – 1,43% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,4725

As rebarbas de saída formadas na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre são apresentadas na Fig. 4.29. Segundo Kim, Min e Dornfeld (2001) as rebarbas de saída formadas durante a furação de todas as amostras ensaiadas podem ser classificadas em rebarbas do tipo transiente. A rebarba transiente é um tipo de rebarba formada em um estágio transiente entre a rebarba uniforme e a rebarba do tipo coroa. Uma fratura inicial ocorre próxima ao final das arestas de corte da broca, similarmente ao que acontece à rebarba uniforme. Porém, esta fratura ocorre mais tarde que na formação da rebarba uniforme, criando uma seção uniforme maior. Como a broca avança ainda mais, a tensão na aresta tangencial da broca excede a tensão de ruptura do material. Assim, a fratura da rebarba do tipo coroa ocorre (KIM; MIN; DORNFELD, 2001).

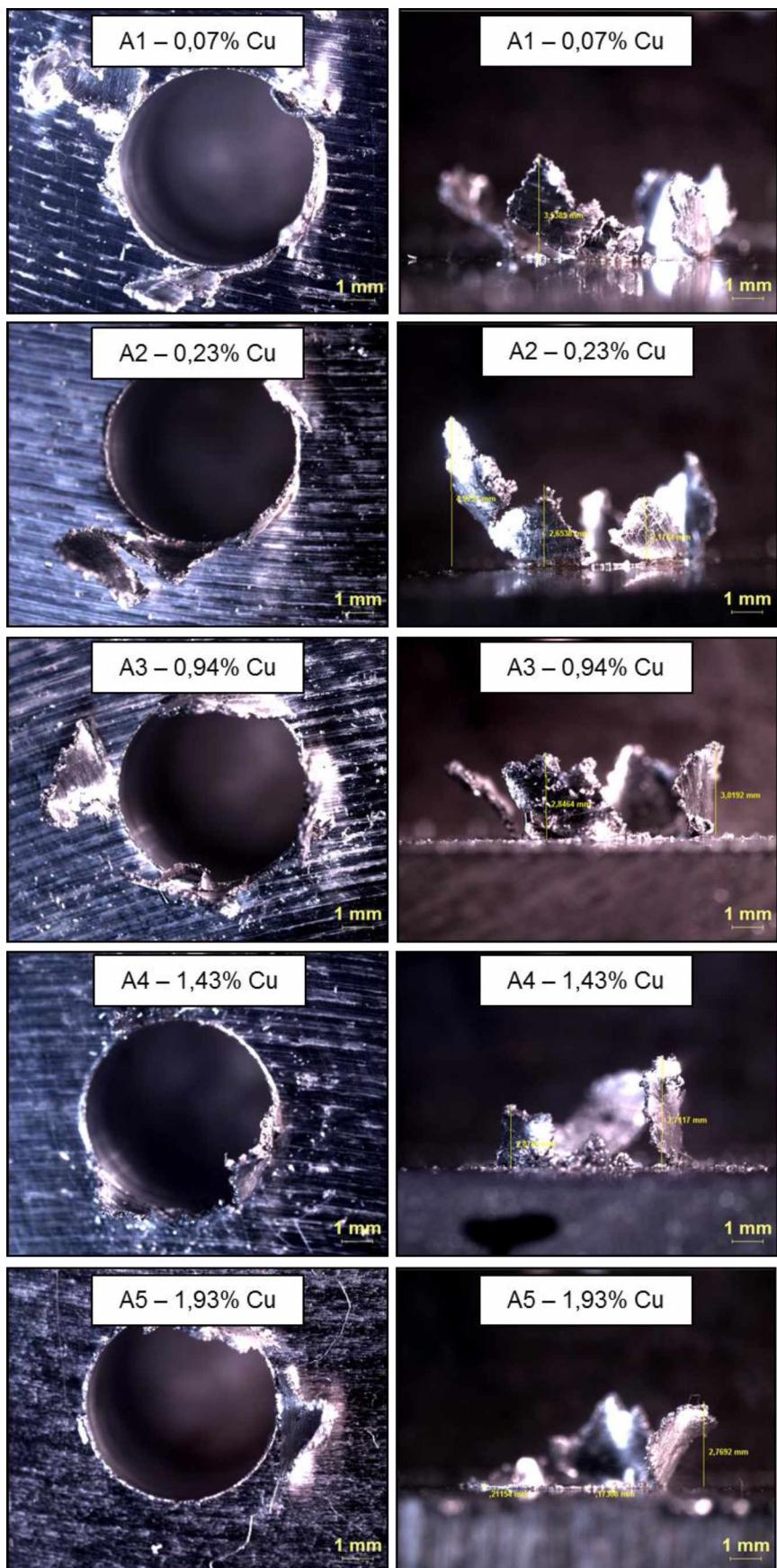


Figura 4.29. Vistas frontal e lateral das rebarbas de saída formadas durante a furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Já na Fig. 4.30 são apresentadas as médias dos valores da máxima altura da rebarba de saída formadas na furação das diferentes amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. As amostras 1 e 2, com as menores adições de cobre (0,07% Cu e 0,23% Cu) resultaram em média em maiores alturas da rebarba de saída no processo de furação, de aproximadamente  $h_{rs} = 3,40$  mm. Estas amostras são as amostras mais dúcteis dentre as amostras estudadas. Quando se aumenta a quantidade de cobre na liga de alumínio até 1,93% Cu foi observada a diminuição (de cerca de 30%) da altura da rebarba de saída para cerca de  $h_{rs} = 2,33$  mm. Porém, a amostra 3, com nível intermediário de cobre (0,94% Cu) foi a que resultou em média na menor altura da rebarba de saída. De maneira geral, é possível dizer que quanto maior a quantidade de cobre presente na liga de alumínio 6351, em média, menor foi a altura da rebarba de saída no processo de furação. Como os intervalos de confiança dos resultados obtidos se sobrepõem não é possível precisar se a quantidade de cobre de 0,94% Cu foi uma exceção à tendência de diminuição da altura da rebarba de saída com o aumento do teor de cobre. Para verificar se existe diferença estatística, foi realizada uma análise de variância dos resultados obtidos.

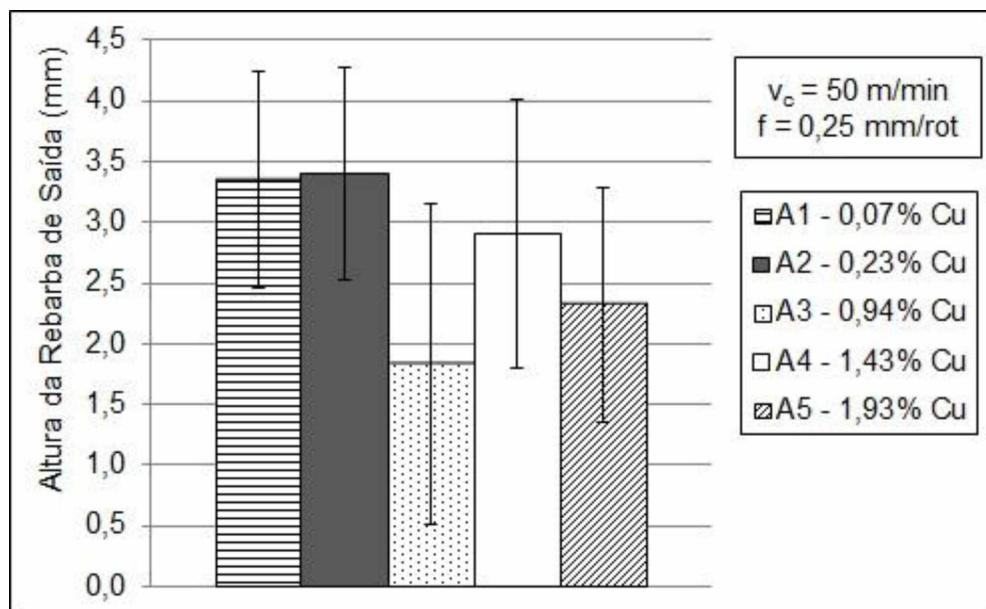


Figura 4.30. Altura da rebarba de saída formada na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Na Tab. 4.22 é apresentado um quadro de ANOVA (análise de variância) para a altura da rebarba de saída na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. Com 95% de confiança, como  $p < 0,05$  ( $p = 0,048968$ ), é

possível afirmar que a altura da rebarba de saída de pelo menos uma das amostras com diferentes teores de cobre é diferente.

Tabela 4.22. Quadro de ANOVA para a altura da rebarba de saída na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Efeito	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Média Quadrática	F	Valor p
Interseção	<b>229,2652</b>	<b>1</b>	<b>229,2652</b>	<b>231,6885</b>	<b>0,000000</b>
Teor de cobre	<b>10,9889</b>	<b>4</b>	<b>2,7472</b>	<b>2,7763</b>	<b>0,048968</b>
Erro	24,7385	25	0,9895		

Como foi verificado pela análise de variância que pelo menos uma amostra da liga de alumínio apresentou altura da rebarba de saída diferente, foram realizados testes de hipótese para a diferença entre as médias da altura da rebarba de saída das diferentes amostras da liga estudada. As hipóteses utilizadas nesta análise foram as seguintes:

- $H_0$ : Altura da rebarba de saída amostra (a) = Altura da rebarba de saída amostra (b)
- $H_1$ : Altura da rebarba de saída amostra (a)  $\neq$  Altura da rebarba de saída amostra (b)

Na Tab. 4.23 são apresentados os valores p para o teste de hipótese comparativo realizado entre as amostras, tomadas duas a duas. Com 95% de confiança, como  $p < 0,05$ , apenas a amostra 3 (0,94% Cu) apresentou estatisticamente altura da rebarba de saída menor que a amostra 1 (0,07% Cu). A diferença entre a altura da rebarba de saída das demais amostras é decorrente do erro experimental. Portanto, diferentemente da altura da rebarba de entrada, não foi possível encontrar uma relação entre a quantidade de cobre adicionada à liga de alumínio 6351 e a altura da rebarba de saída formada no processo de furação.

Tabela 4.23. Valor p para a diferença entre as médias da altura da rebarba de saída na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Diferença entre as médias da altura da rebarba de saída na furação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre		
Amostra (a)	Amostra (b)	Valor p
A1 – 0,07% Cu	A2 – 0,23% Cu	0,9119
A1 – 0,07% Cu	A3 – 0,94% Cu	<b>0,0343</b>
A1 – 0,07% Cu	A4 – 1,43% Cu	0,4404
A1 – 0,07% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,0728
A2 – 0,23% Cu	A3 – 0,94% Cu	0,0294
A2 – 0,23% Cu	A4 – 1,43% Cu	0,3877
A2 – 0,23% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,0608
A3 – 0,94% Cu	A4 – 1,43% Cu	0,1401
A3 – 0,94% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,4557
A4 – 1,43% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,3336

### 4.3 Resultados dos ensaios de alargamento

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos durante os ensaios de alargamento. Estes resultados incluem torque e força de avanço na ferramenta de corte, diâmetro e rugosidade do furo alargado, desvios de circularidade e cilindricidade e alterações subsuperficiais.

#### 4.3.1 Torque

Na Fig. 4.31 são apresentados os valores médios do torque na ferramenta de corte, com intervalo de confiança de 95%, em diferentes velocidades de corte durante o alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. Não é possível observar alguma tendência de aumento ou diminuição do torque no alargamento em função do aumento da velocidade de corte. De acordo com Yamada (2010), o torque no alargamento independe da rotação da ferramenta de corte, e consequentemente, da velocidade de corte.

É importante ressaltar a diferença nos valores de torque encontrados nos ensaios de alargamento em relação aos encontrados nos ensaios de furação. O torque médio no alargamento foi cerca de 5 vezes menor que na furação. Isso se deve preferencialmente à profundidade de corte utilizada nos dois processos. Para o

processo de alargamento foi utilizada profundidade de corte de  $a_p = 0,1$  mm, enquanto que para a furação foi de  $a_p = 3,175$  mm. O aumento da profundidade de corte aumenta a seção de corte a ser cisalhada, e consequentemente, o esforço aplicado na ferramenta na direção de corte.

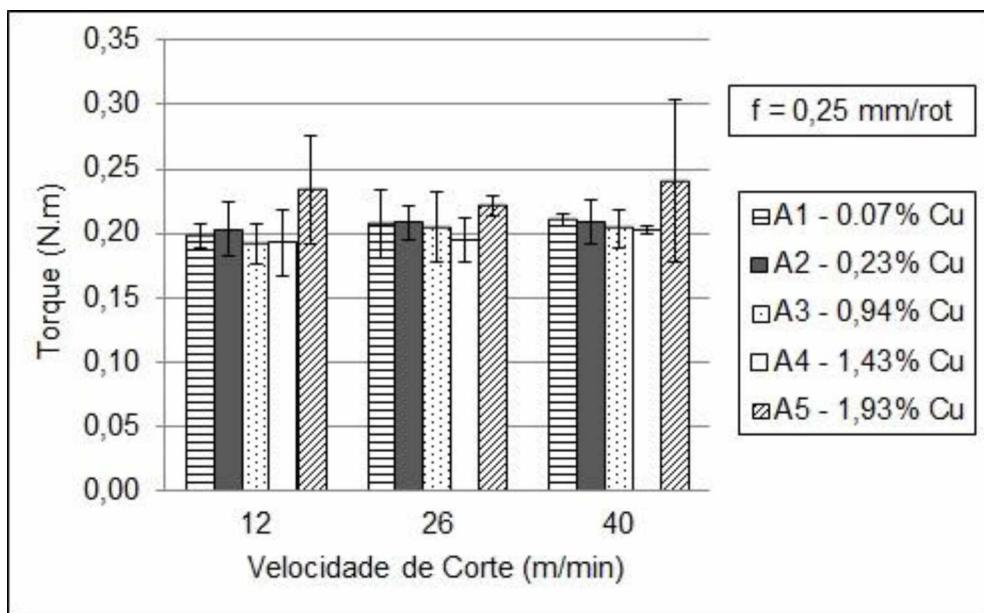


Figura 4.31. Torque em diferentes velocidades de corte no alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Já em relação ao efeito da quantidade de cobre presente na liga de alumínio 6351, aparentemente, existe em média uma tendência de decréscimo do torque aplicado no alargador na medida em que se aumenta o teor de cobre até 1,43% Cu. Este decréscimo no torque parte de valores na faixa de 0,20 N.m para a amostra 1 (0,07% Cu) e atinge um valor mínimo de aproximadamente 0,192 N.m para a amostra 4 (1,43% Cu). Porém, para a amostra 5, com a maior quantidade de cobre (1,93% Cu), o valor médio do torque apresenta um crescimento, em todas as velocidades de corte ensaiadas. O maior valor de torque médio obtido no alargamento da amostra 5 foi de 0,24 N.m.

Assim como comentado anteriormente para os ensaios de furação, a força de usinagem depende principalmente de dois fatores: resistência ao cisalhamento do material nos planos de cisalhamento primário e secundário; e a área dos planos de cisalhamento primário e secundário (MACHADO et al., 2011). O comportamento apresentado anteriormente de maiores valores de torque para as amostras da liga de alumínio com menor teor de cobre, provavelmente se deve à sua maior capacidade de deformação. A combinação do pequeno valor da profundidade de corte utilizada no

alargamento ( $a_p = 0,1$  mm) e da maior ductilidade destas amostras pode ter resultado em um corte não efetivo com maior comprimento de contato cavaco-ferramenta. Assim, implicando em maiores valores do torque na ferramenta de corte. Além, disso, a energia específica para a operação de alargamento é maior do que a operação de furação, isto se deve ao efeito do atrito e recuperação elástica, o chamado efeito escala ("size effect") (VOLLERTSEN et al., 2009). Este efeito foi observado até o teor de 1,43% Cu. Já para o maior teor (1,93% Cu), a capacidade de deformação já não foi o fator primordial afetando o torque no alargador. A maior resistência mecânica desta amostra e microdureza de seus constituintes resultaram em maior esforço aplicado na ferramenta de corte, aumentando o torque durante o alargamento.

Já na Fig. 4.32 são apresentados os valores médios do torque na ferramenta de corte, com intervalo de confiança de 95%, em diferentes avanços durante o alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. No caso da variação do avanço no processo de alargamento, em média, foi evidente um aumento nos valores médios do torque para todas as amostras da liga de alumínio ensaiadas. Para o menor avanço utilizado (0,2 mm/rot) o torque médio das diferentes amostras se apresentou na faixa entre 0,15 N.m e 0,20 N.m. Já no maior avanço (0,3 mm/rot) foram atingidos valores do torque médio de 0,22 N.m até 0,27 N.m. O aumento do avanço diretamente causa um aumento da seção transversal de corte, ou seja, maior é a quantidade de material a ser cisalhado (MACHADO et al., 2011). Desta forma, implicou em aumento no torque.

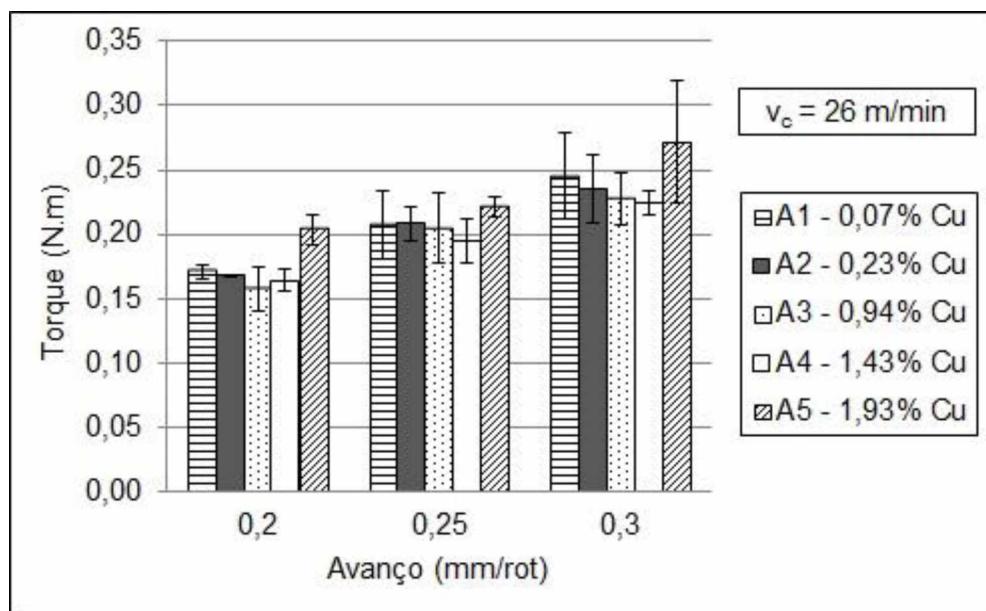


Figura 4.32. Torque em diferentes avanços no alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Novamente também foi observado que o torque apresenta, em média, uma tendência de diminuição à medida que se aumenta o teor de cobre na liga de alumínio até 1,43% Cu e depois sofre um aumento para a maior quantidade de cobre utilizada (1,93% Cu). A explicação para este fato segue a mesma teoria apresentada anteriormente. Para as amostras de 1 a 4 a ductilidade foi mais significativa sobre o torque na ferramenta. Enquanto para a amostra 5 sua maior resistência mecânica foi mais significativa.

Assim como para a furação, foi realizada uma regressão múltipla dos valores médios do torque no alargamento propostos pelo planejamento fatorial 2<sup>3</sup>. Para assim, investigar se existe influência significativa dos parâmetros de corte e do teor de cobre adicionado à liga de alumínio 6351 no torque durante o alargamento. Na Tab. 4.24 é apresentado o modelo ajustado para o torque no alargamento para a comparação entre as amostras 4 (1,43% Cu) e 5 (1,93% Cu). A amostra 4 foi a que em média apresentou os menores valores de torque para a maioria das condições de corte ensaiadas. A amostra 5, por sua vez, resultou nos maiores valores do torque nos ensaios de alargamento.

Tabela 4.24. Efeitos, coeficientes e valores p da regressão múltipla para o torque no alargamento comparando as amostras 4 e 5 da liga de alumínio 6351

Sumário da Regressão para a Variável Dependente: Torque no Alargamento			
$R = 0,99898674$ ; $R^2 = 0,99797451$ ; $R^2$ Ajustado= 0,99527385			
$F(4,3) = 369,53$ ; $p < 0,00023$			
	Efeito	Coeficiente	valor p
Interseção		<b>0,212566</b>	<b>0,000000</b>
$v_c$	<b>0,006118</b>	<b>0,003059</b>	<b>0,046066</b>
$f$	<b>0,066286</b>	<b>0,033143</b>	<b>0,000049</b>
Teor de cobre	<b>0,025798</b>	<b>0,012899</b>	<b>0,000811</b>
$v_c \cdot f$	-0,003770	-0,001885	0,135685

A partir da Tab. 4.24 é possível notar que, com 95% de confiança, o torque no alargamento é mais sensível à velocidade de corte, ao avanço da ferramenta e ao teor de cobre, bem como a interação entre a velocidade de corte e o avanço. O efeito principal do avanço sobre o torque foi o maior dentre os parâmetros significativos, seguido pelo efeito do teor de cobre e da velocidade de corte. A regressão confirmou a tendência de aumento do torque com o aumento do avanço (de 0,10 para 0,30 mm/rot) e com o aumento do teor de cobre (de 1,43% Cu para 1,93% Cu), observados nas

Fig. 4.31 e Fig. 4.32. Além disso, também foi observado que o aumento da velocidade de corte resulta em aumento do torque.

Nas comparações entre as demais amostras da liga de alumínio 6351 verificou-se que sempre o avanço foi um parâmetro significativo, resultando no aumento do torque no alargamento. Já a velocidade de corte foi um parâmetro significativo em cinco das dez comparações realizadas, implicando no aumento do torque no alargamento.

Apesar dos efeitos tanto da velocidade de corte e do avanço causarem o aumento do torque, a interação entre esses dois parâmetros causa a diminuição do torque. Esta interação se mostrou significativa em apenas duas comparações. O mesmo pôde ser verificado para as interações  $v_c$ .teor de cobre e  $f$ .teor de cobre que quando significativas provocaram a diminuição do torque.

Já em relação ao efeito da quantidade de cobre, parâmetro de maior relevância neste trabalho, este foi significativo em seis das dez comparações realizadas. Porém, analisando todas as comparações, mesmo aquelas em que o teor de cobre não foi significativo com 95% de confiança, foi possível comprovar o comportamento do torque em função da variação do teor de cobre verificado nas Fig. 4.31 e Fig. 4.32. Com 95% de confiança foi observado que o aumento do teor de cobre presente na liga de alumínio 6351 de 0,07% até 1,43% resultou no decréscimo do torque no alargamento. Já quando se adiciona 1,93% Cu resulta no maior valor médio do torque nos ensaios de alargamento.

Portanto, o menor torque no alargamento aconteceu na usinagem da amostra 4 (1,43% Cu). Assim, para a amostra 4, foi realizada uma nova regressão múltipla. Nesta etapa, as variáveis utilizadas foram a velocidade de corte e o avanço. Para esta análise foi adicionado um nível central para as variáveis.

A regressão para a amostra 4 mostrou que, com 95% de confiança, o efeito principal do avanço foi significativo em relação ao torque na ferramenta de corte durante o alargamento. Na Eq. 4.4 é apresentada a equação do modelo ajustado que descreve o torque no alargamento da amostra 4 em função das variáveis velocidade de corte e avanço.

$$\text{Torque no Alargamento da liga 6351 (1,43% Cu)} = 0,042 - 0,001v_c + 0,646f \quad (4.4)$$

Este modelo apresentou um grau de ajuste de  $R^2 = 0,9924$ . Esse valor indica boa correlação entre o modelo e os dados obtidos nos ensaios experimentais de furação realizados. Em outras palavras, o modelo explica 99,24% dos resultados experimentais obtidos.

Já na Fig. 4.33 é apresentada uma superfície de resposta do torque no alargamento da amostra 4 em função dos parâmetros de corte velocidade de corte e avanço. Tanto a equação do modelo ajustado como a superfície de resposta confirmam a importância significativa do avanço no aumento do torque aplicado na ferramenta de corte durante o processo de alargamento da amostra 4.

Portanto, a partir da Fig. 4.33, para obter o menor torque na ferramenta de corte no processo de alargamento da amostra 4 (1,43% Cu) da liga de alumínio 6351, é recomendável a usinagem com a velocidade de corte baixa ou intermediária (12 m/min ou 26 m/min) e menor valor do avanço (0,20 mm/rot).

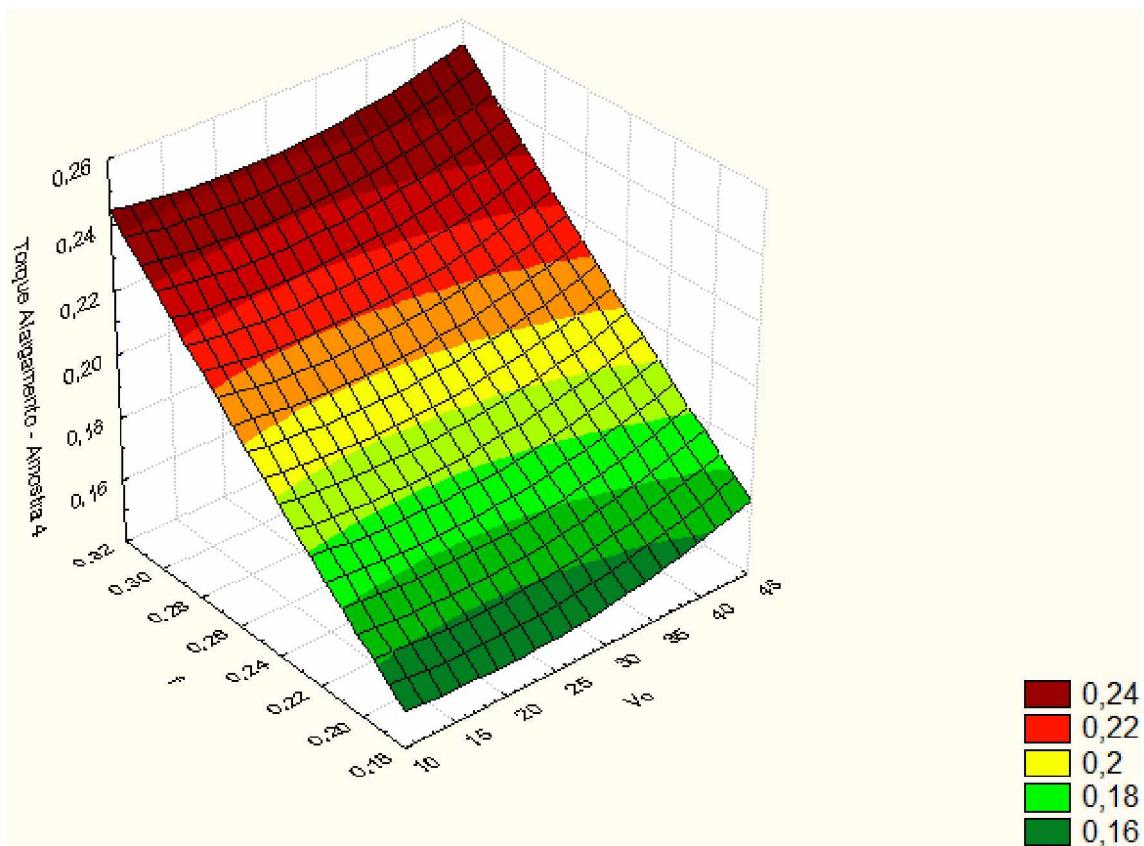


Figura 4.33. Superfície de resposta do torque (N.m) no alargamento da amostra 4 em função dos parâmetros velocidade de corte e avanço

#### 4.3.2 Força de avanço

Os valores médios da força de avanço na ferramenta de corte, com intervalo de confiança de 95%, em diferentes velocidades de corte durante o alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre são apresentados na Fig. 4.34. A partir da figura não é perceptível uma tendência de aumento ou diminuição da força de avanço no alargamento com o aumento da velocidade de corte. Assim como verificado para o torque, a força de avanço decresceu à medida que se

aumenta o teor de cobre de 0,07% Cu para 1,43% Cu. Em média, os menores valores da força de avanço foram obtidos no alargamento da amostra 4, entre 1,16 N e 1,29 N. Já a amostra 5 (1,93% Cu), de maior resistência mecânica, foi a que resultou em maior esforço sobre o alargador na direção de avanço na menor e na maior velocidade de corte utilizada (12 m/min e 40 m/min). Nestas velocidades de corte a força de avanço no alargamento da amostra 5 variou entre 1,62 N e 1,64 N. Para a velocidade de corte intermediária (26 m/min) a amostra 1 (0,07% Cu) apresentou, em média, maior força de avanço. Isso se deve à sua maior ductilidade. Para a velocidade de corte de 26 m/min foi obtida força de avanço de 1,61 N no alargamento da amostra 1. A maior ductilidade do material aumenta a área de contato cavaco-ferramenta, e consequentemente, a área da zona de cisalhamento secundário. Provocando assim, o aumento da componente da força de usinagem na direção de avanço.

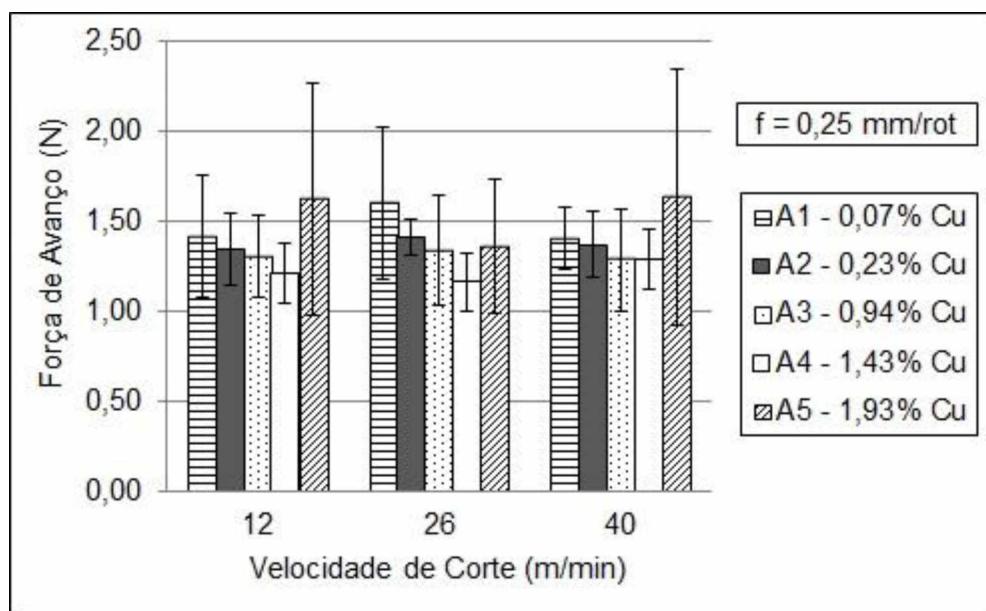


Figura 4.34. Força de avanço em diferentes velocidades de corte no alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Na Fig. 4.35 são apresentados os valores médios da força de avanço na ferramenta de corte, com intervalo de confiança de 95%, em diferentes avanços durante o alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. O aumento do avanço provocou o aumento da força de avanço no processo de alargamento. Novamente a amostra 4 (1,43% Cu) apresentou, em média, os menores valores da força de avanço para todos avanços utilizados. Por outro lado, a amostra 5 resultou em maior força de avanço para os avanços 0,20 mm/rot e

0,30 mm/rot. Já para o avanço intermediário (0,25 mm/rot) a amostra 1 implicou em maior força de avanço.

Na Tab. 4.25 é apresentado o modelo ajustado para a força de avanço no alargamento para a comparação entre as amostras 4 (1,43% Cu) e 5 (1,93% Cu). A amostra 4 foi a que em média apresentou os menores valores de força de avanço durante os ensaios de alargamento. A amostra 5, por sua vez, resultou nos maiores valores de força de avanço para a maioria das condições de corte ensaiadas.

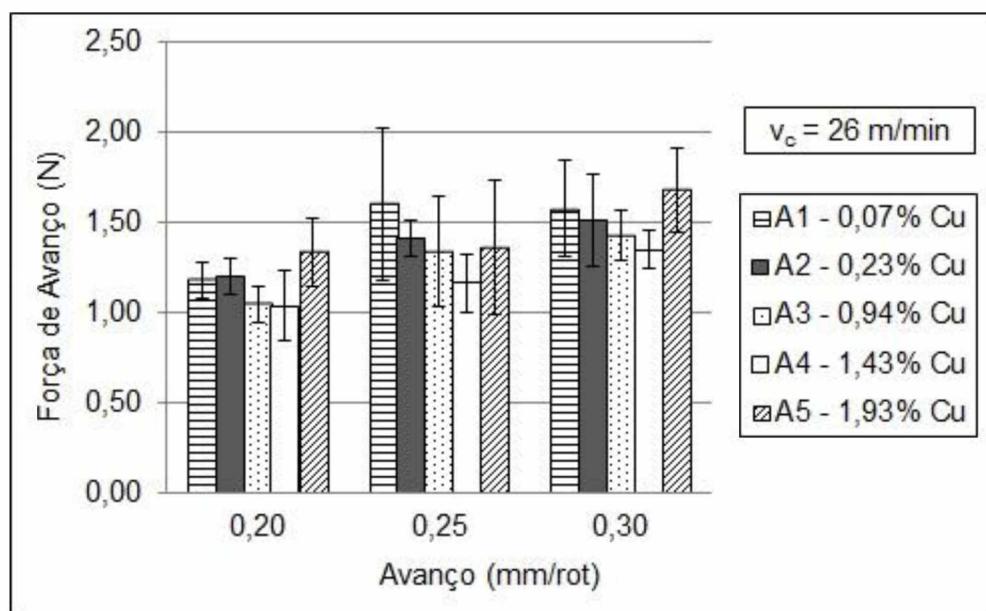


Figura 4.35. Força de avanço em diferentes avanços no alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

A partir da Tab. 4.25 é possível observar que, com 95% de confiança, a força de avanço no alargamento é mais sensível à velocidade de corte, ao avanço da ferramenta e ao teor de cobre. Também foram significativas as interações  $v_c \cdot$ teor de cobre e  $f \cdot$ teor de cobre. O efeito principal do avanço sobre a força de avanço foi o maior dentre os parâmetros significativos, seguido pelo efeito do teor de cobre e da velocidade de corte. A regressão confirmou a tendência de aumento da força de avanço com o aumento do avanço (de 0,10 para 0,30 mm/rot) e com o aumento do teor de cobre (de 1,43% Cu para 1,93% Cu), observados nas Fig. 4.34 e Fig. 4.35. Além disso, diferentemente do ocorrido para o torque, nesta comparação foi observado que o aumento da velocidade de corte resulta em decréscimo estatisticamente significativo da força de avanço. Isto se deve ao aumento da geração de calor provocada pelo aumento da velocidade de corte. O aumento da temperatura

na zona de corte diminui a resistência ao cisalhamento do material, diminuindo o esforço necessário para o corte. Assim, a força de avanço diminui.

Tabela 4.25. Efeitos, coeficientes e valores p da regressão múltipla para a força de avanço no alargamento comparando as amostras 4 e 5 da liga de alumínio 6351

Sumário da Regressão para a Variável Dependente: Força de Avanço no Alargamento			
$R = 0,99999133$ ; $R^2 = 0,99998267$ ; $R^2$ Ajustado= $0,99993934$			
$F(5,2) = 23079$ ; $p < 0,00004$			
	Efeito	Coeficiente	valor p
Interseção		<b>1,407177</b>	<b>0,000000</b>
$v_c$	<b>-0,127646</b>	<b>-0,063823</b>	<b>0,000156</b>
$f$	<b>0,393852</b>	<b>0,196926</b>	<b>0,000016</b>
Teor de cobre	<b>0,334136</b>	<b>0,167068</b>	<b>0,000023</b>
$v_c$ .teor de cobre	<b>-0,099246</b>	<b>-0,049623</b>	<b>0,000258</b>
$f$ .teor de cobre	<b>-0,019612</b>	<b>-0,009806</b>	<b>0,006544</b>

Nas comparações entre as demais amostras da liga de alumínio 6351 verificou-se que sempre o avanço foi um parâmetro significativo, resultando no aumento da força de avanço no alargamento. A velocidade de corte foi um parâmetro significativo em apenas três das dez comparações realizadas. Em algumas comparações o aumento da velocidade provocou a diminuição da força de avanço, porém em outros provocou seu aumento.

A interação entre a velocidade de corte e o avanço foi significativa em apenas três comparações, sempre causando a diminuição da força de avanço. O mesmo pôde ser verificado para as interações  $v_c$ .teor de cobre e  $f$ .teor de cobre, quando significativas provocaram a diminuição do torque.

O teor de cobre foi significativo em seis das dez comparações realizadas. Na análise de todas as comparações, mesmo aquelas em que o teor de cobre não foi significativo com 95% de confiança, foi comprovado o comportamento da força de avanço em função da variação do teor de cobre verificado nas Fig. 4.34 e Fig. 4.35. Com 95% de confiança foi observado que o aumento do teor de cobre presente na liga de alumínio 6351 de 0,07% até 1,43% resultou no decréscimo da força de avanço no alargamento. Já a adição de 1,93% Cu resulta no maior valor médio da força de avanço nos ensaios de alargamento.

Portanto, assim como verificado para o torque, a menor força de avanço no alargamento aconteceu na usinagem da amostra 4 (1,43% Cu). Assim, para a amostra 4, foi realizada uma nova regressão múltipla. Nesta etapa, as variáveis utilizadas foram a velocidade de corte e o avanço. Para esta análise foi adicionado um nível central para as variáveis.

A regressão para a amostra 4 mostrou que, com 95% de confiança, o efeito principal do avanço foi significativo em relação à força de avanço na ferramenta de corte durante o alargamento. Na Eq. 4.5 é apresentada a equação do modelo ajustado que descreve a força de avanço no alargamento da amostra 4 em função das variáveis velocidade de corte e avanço.

$$\text{Força de Avanço no Alargamento da liga 6351 (1,43% Cu)} = 0,432 - 0,015v_c + 3,804f \quad (4.5)$$

Este modelo apresentou um grau de ajuste de  $R^2 = 0,9457$ . Esse valor indica boa correlação entre o modelo e os dados obtidos nos ensaios experimentais de furação realizados. Em outras palavras, o modelo explica 94,57% dos resultados experimentais obtidos.

Já na Fig. 4.36 é apresentada uma superfície de resposta do comportamento da força de avanço no alargamento da amostra 4 em função dos parâmetros de corte velocidade de corte e avanço.

Tanto a equação que descreve o modelo ajustado como a superfície de resposta confirmam a importância significativa do avanço no aumento da força de avanço aplicada na ferramenta de corte durante o processo de alargamento da amostra 4. De acordo com a Fig. 4.36, para obter menores valores da força de avanço na ferramenta de corte durante o alargamento da amostra 4 (1,43% Cu) da liga de alumínio 6351, é recomendável usinar com o menor avanço (0,20 mm/rot) juntamente com velocidade de corte intermediária (26 m/min).

É importante ressaltar que, apesar de ser interessante usinar com os menores valores de torque e força de avanço aplicados ao alargador, esta seleção dos parâmetros de corte para diminuir os esforços de usinagem no alargamento normalmente não acontece com o intuito de diminuir ou retardar o desgaste da ferramenta de corte. Primeiramente, porque em se tratando da usinagem de ligas de alumínio, os mecanismos de desgaste termicamente ativados (difusão, oxidação e deformação plástica à altas temperaturas) não devem estar presentes devido ao baixo ponto de fusão do alumínio. Além disso, mesmo em ligas de alumínio tratadas termicamente, como as ligas da série 6XXX, série da liga utilizada neste trabalho, as

ferramentas de corte não sofrão desgaste considerável por mecanismos como abrasão ou deformação sob altas tensões. Exceção seria a usinagem ligas Al-Si com elevadas quantidades de silício, o que aumenta consideravelmente a dureza e resistência ao desgaste destas ligas. E em se tratando do processo de alargamento, os valores de sobremetal geralmente utilizados resultam em esforços durante o corte (torque e força de avanço) relativamente pequenos, para os materiais normalmente utilizados na fabricação de alargadores para a usinagem do alumínio e suas ligas (aço rápido ou metal duro). Por fim, no processo de alargamento, por ser um processo normalmente de acabamento de furos, a maior preocupação é a qualidade final do furo. Desta forma, a seleção dos parâmetros de corte sempre deve visar à diminuição da rugosidade, desvios de forma (circularidade e cilindricidade) e afastamento do diâmetro nominal do furo (diâmetro do alargador) (BEZERRA et al., 2001). Portanto, a maior preocupação em diminuir os esforços de usinagem durante o processo de alargamento se deve, principalmente, à preocupação em diminuir o efeito prejudicial (vibrações, deflexões, etc.) que maiores esforços de usinagem podem causar na qualidade final do furo alargado.

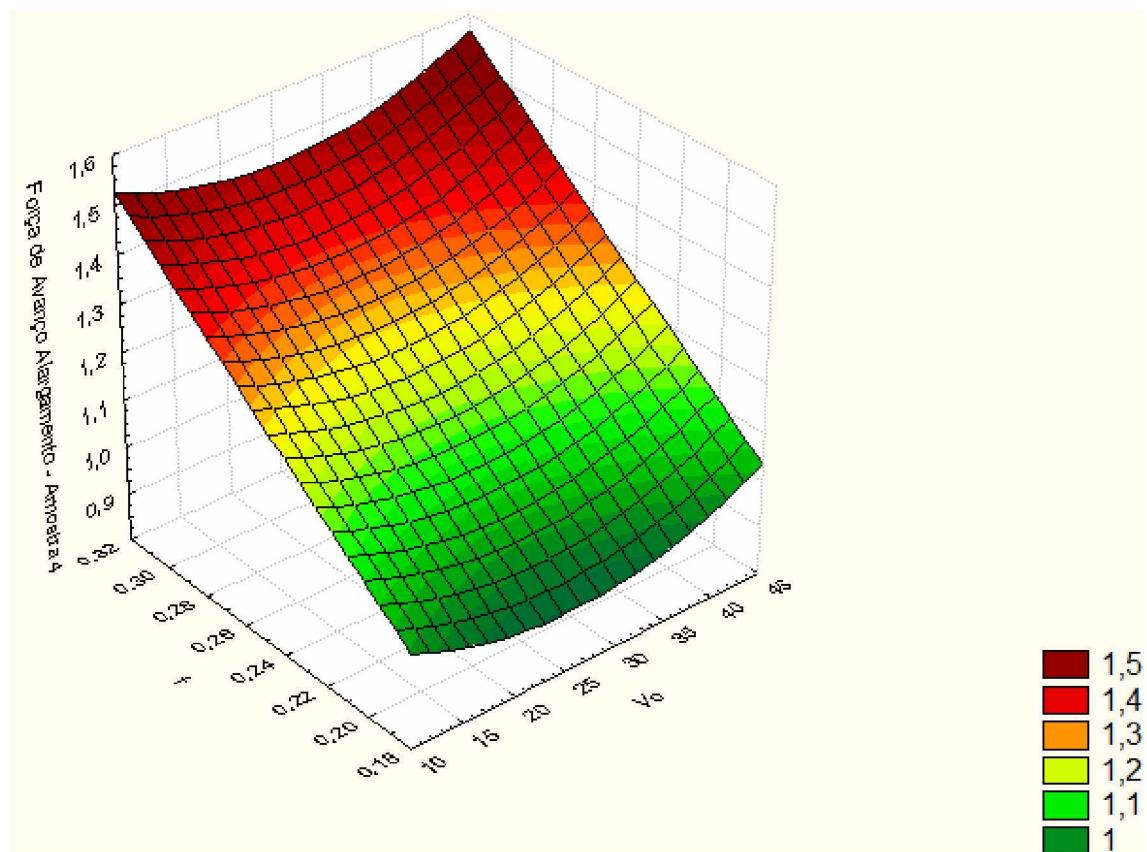


Figura 4.36. Superfície de resposta da força de avanço (N) no alargamento da amostra 4 em função dos parâmetros velocidade de corte e avanço

#### 4.3.3 Diâmetro do furo alargado

O diâmetro médio dos furos, com intervalo de confiança de 95%, obtidos no alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre é apresentado na Fig. 4.37. Também é apresentado o diâmetro nominal do furo de 10 mm (diâmetro do alargador). É possível observar que o diâmetro médio de todos os furos foi maior que o diâmetro nominal. A amostra 2 (0,23%), em média, foi a que resultou em diâmetro médio mais próximo do diâmetro nominal, com valor de 10,012 mm. Já o alargamento da amostra 4 (1,43% Cu) levou em média ao diâmetro mais distante do diâmetro nominal do furo, com valor de 10,038 mm.

Além disso, na Fig. 4.37 é apresentado o diâmetro máximo (10,006 mm) para o campo de tolerância H e qualidade de trabalho IT7 para o diâmetro de 10 mm. Esta qualidade, IT7, é comumente utilizada para furos obtidos por alargamento. O diâmetro médio dos furos obtidos no alargamento de todas as amostras foram maiores que o diâmetro nominal e ficaram fora do afastamento máximo para a tolerância H e qualidade de trabalho IT7, apresentando-se entre as qualidades 9 e 11. Este comportamento pode ser atribuído ao fato de que os furos não passaram pela operação de escareamento antes do alargamento. Segundo Gabor (1982) apud Rosa (2012), a operação de escareamento tem a finalidade de garantir o alinhamento exato do eixo da ferramenta com aquele do furo sendo usinado, uma vez que o alargador não pode compensar esta diferença.

Além disso, os parâmetros de corte também tendem a influenciar o diâmetro dos furos alargados. Bezerra et al. (2001) verificou que o alargamento em maiores velocidades de corte resulta em aumento no diâmetro do furo devido ao aumento de vibrações durante o processo. Em relação ao avanço, normalmente, maiores avanços são recomendados para o alargamento, o que não acontece para operações de furação. Segundo Bezerra et al. (2001), o alargamento em baixos avanços aumenta o tempo de contato entre peça e alargador, como também está associado ao corte excessivo do furo.

Também é preciso levar em conta a relação entre os parâmetros de corte utilizados no alargamento e na furação previamente realizada. É prática usual alargar um furo com cerca de 2/3 da velocidade de corte com a qual ele foi furado. Por outro lado, normalmente o avanço utilizado no alargamento deve ser duas à três vezes maior que o utilizado na pré-furação (ASM INTERNATIONAL, 1990b). Assim, comparando as velocidades de corte utilizadas nos ensaios de alargamento (12 m/min, 26 m/min e 40 m/min) com a velocidade de corte utilizada na pré-furação (30 m/min), indica que apenas a velocidade de 12 m/min tenha sido adequada, o que não aconteceu com os demais valores. Já a comparação dos avanços utilizados nos

ensaios de alargamento (0,20 mm/rot, 0,25 mm/rot e 0,30 mm/rot) com o avanço utilizado na pré-furação (0,25 mm/rot). Assim, nenhum dos valores de avanço utilizados foram adequados. Portanto, a seleção dos parâmetros de corte para os ensaios de alargamento em relação aos utilizados para a pré-furação podem ter contribuído para o maior afastamento do diâmetro dos furos em relação ao diâmetro nominal. E ao mesmo tempo, resultando em valores de diâmetro fora do afastamento máximo previsto para a qualidade de trabalho IT7, normalmente obtida pelo processo de alargamento.

Outra observação importante, foi o fato da amostra 4, que apresentou menores valores de torque e força de avanço no alargamento, resultou no diâmetro médio do furo mais distante do diâmetro nominal. Os maiores esforços durante o processo podem aumentar as deflexões na ferramenta e consequentemente interferir na qualidade do furo. Mas neste caso, a amostra que apresentou o maior desvio do diâmetro foi a que sofreu menores esforços durante o processo de alargamento. Cabe ressaltar que os intervalos de confiança dos diâmetros médios obtidos no alargamento das amostras 3, 4 e 5 se sobrepõem. Assim, a confirmação de que o diâmetro médio obtido no alargamento da amostra 4 foi estatisticamente o maior será obtida a partir da análise de variância dos resultados.

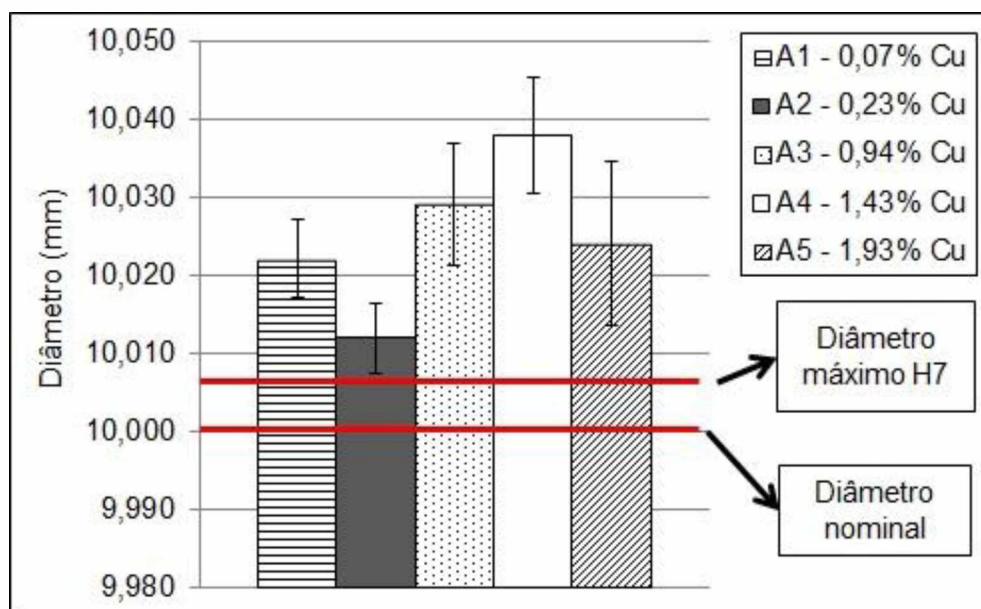


Figura 4.37. Diâmetro médio dos furos obtidos no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Na Tab. 4.26 é apresentado um quadro de ANOVA (Análise de Variância) a fim de analisar estatisticamente a influência do teor de cobre no diâmetro médio dos furos

obtidos no alargamento das diferentes amostras da liga de alumínio 6351. Com 95% de confiança, como  $p < 0,05$  ( $p = 0,000034$ ), é possível afirmar que o diâmetro médio do furo alargado de pelo menos uma das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre é diferente.

Tabela 4.26. Quadro de ANOVA para o diâmetro médio dos furos obtidos no alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Efeito	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Média Quadrática	F	Valor p
Interseção	<b>10050,30</b>	<b>1</b>	<b>10050,30</b>	<b>40174655</b>	<b>0,000000</b>
Teor de cobre	<b>0,01</b>	<b>4</b>	<b>0,00</b>	<b>7</b>	<b>0,000034</b>
Erro	0,02	95	0,00		

Como foi constatado pela análise de variância que pelo menos uma amostra da liga de alumínio apresentou diâmetro médio do furo alargado diferente, foram realizados testes de hipótese para a diferença entre as médias do diâmetro do furo das diferentes amostras da liga estudada. As hipóteses utilizadas nesta análise foram as seguintes:

- $H_0$ : Diâmetro médio amostra (a) = Diâmetro médio amostra (b)
- $H_1$ : Diâmetro médio amostra (a)  $\neq$  Diâmetro médio amostra (b)

Na Tab. 4.27 são apresentados os valores  $p$  para os testes de hipótese comparativos realizados entre as amostras, tomadas duas a duas. Com 95% de confiança, como  $p > 0,05$ , não existe diferença estatística entre o diâmetro médio dos furos produzidos nas amostras 2 e 5. Portanto, não é possível afirmar que a amostra 2 apresentou estatisticamente o menor valor do diâmetro do furo no processo de alargamento. Além disso, foi verificado que não houve diferença estatística entre o diâmetro dos furos produzidos nas amostras 3 e 4. Assim, não é possível afirmar que a amostra 4 apresentou estatisticamente o maior valor do diâmetro do furo no processo de alargamento. A diferença entre o diâmetro dos furos obtidos no alargamento destas amostras é decorrente do erro experimental

Tabela 4.27. Valor p para a diferença entre as médias do diâmetro dos furos no alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Diferença entre as médias do diâmetro dos furos no alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre		
Amostra (a)	Amostra (b)	Valor p
A1 – 0,07% Cu	A2 – 0,23% Cu	<b>0,0046</b>
A1 – 0,07% Cu	A3 – 0,94% Cu	0,1304
A1 – 0,07% Cu	A4 – 1,43% Cu	<b>0,0007</b>
A1 – 0,07% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,7277
A2 – 0,23% Cu	A3 – 0,94% Cu	<b>0,0004</b>
A2 – 0,23% Cu	A4 – 1,43% Cu	<b>0,0000</b>
A2 – 0,23% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,0389
A3 – 0,94% Cu	A4 – 1,43% Cu	0,0928
A3 – 0,94% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,4392
A4 – 1,43% Cu	A5 – 1,93% Cu	<b>0,0314</b>

#### 4.3.4 Desvios de forma: circularidade e cilindricidade

Na Tab. 4.38 é apresentado o desvio de circularidade médio dos furos obtidos em diferentes velocidades de corte no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. De acordo com Bezerra et al. (2001) os desvios de circularidade e cilindricidade tendem a ser menores na usinagem à baixas velocidades de corte. Segundo os autores isso se deve provavelmente ao aumento de vibrações decorrente da usinagem em altas velocidades de corte. Esse comportamento foi percebido apenas no alargamento da amostra 2 (0,23% Cu). Esta amostra também apresentou em média o maior valor do desvio de circularidade (93,52  $\mu\text{m}$ ) no alargamento à maior velocidade de corte (40 m/min) dentre as amostras ensaiadas.

Nas velocidades de corte de 12 m/min e 26 m/min as amostras 3 e 1, respectivamente, em média resultaram em maiores desvios de circularidade entre 37  $\mu\text{m}$  e 49  $\mu\text{m}$ . Para a maior velocidade de corte (40 m/min) a amostra 2 (0,23% Cu) resultou em média no maior desvio de circularidade (93  $\mu\text{m}$ ). Por outro lado, as amostras 4 (1,43% Cu) e 5 (1,93% Cu) com maior quantidade de cobre em média levaram aos menores desvios de circularidade. Para a amostra 5 os desvios de circularidade variaram entre 4  $\mu\text{m}$  e 15  $\mu\text{m}$ . Já na amostra 4 os desvios ficaram entre 3,8  $\mu\text{m}$  e 4,9  $\mu\text{m}$ . A amostra 4 foi dentre as amostras da liga de alumínio 6351 ensaiadas que apresentou maiores valores de resistência mecânica e dureza. Além

disso, durante o alargamento, resultou em média em menores valores de torque e força de avanço aplicados na ferramenta de corte. Assim, a provável explicação para os menores valores do desvio de circularidade apresentados por esta amostra seja a maior estabilidade do processo, e consequentemente menores deflexões e vibrações, devido ao menor esforço aplicado sobre a ferramenta de corte durante o alargamento.

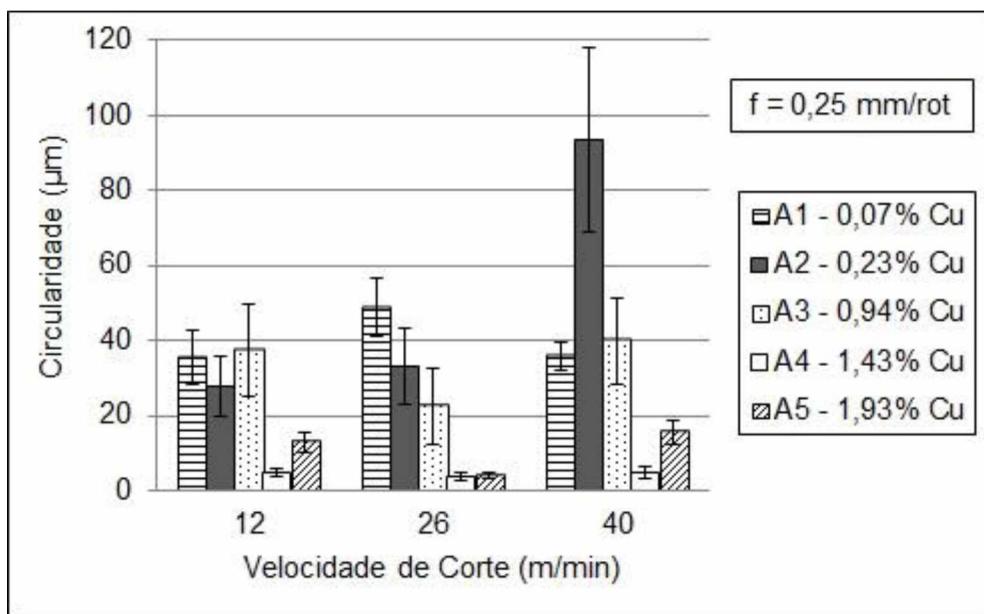


Figura 4.38. Desvio de circularidade dos furos obtidos em diferentes velocidades de corte no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Na Fig. 4.39 é apresentado o desvio de circularidade médio dos furos obtidos em diferentes avanços no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. Segundo Rosa (2012) baixos avanços no alargamento aumentam o tempo de contato da ferramenta com as paredes do furo. Isso pode aumentar o efeito do batimento radial da ferramenta de corte e consequentemente resultando em maiores desvios de circularidade. Por outro lado, a utilização de altos avanços da ferramenta aumentam os esforços de usinagem, o que pode ser prejudicial à circularidade dos furos.

A partir da Fig. 4.39 foi observado que apenas para a amostra 1 (0,07% Cu) houve um aumento do desvio de circularidade com o aumento do avanço utilizado. Para as outras amostras não foi possível verificar este comportamento. Além disso, não é evidente qual avanço levou aos menores desvios de circularidade. Para os valores extremos de avanço utilizados (0,20 mm/rot e 0,30 mm/rot) a amostra 5 (1,93% Cu) resultou em maiores desvios de circularidade entre 60 µm e 70 µm. Já

para o avanço intermediário (0,25% Cu) a amostra 2 (0,23% Cu) foi a que resultou em maior desvio de circularidade com valor de 93  $\mu\text{m}$ . Novamente a amostra 4 (1,43% Cu) se destacou por apresentar os menores desvios de circularidade (3,8  $\mu\text{m}$  à 4,7  $\mu\text{m}$ ) em todos os avanços utilizados nos ensaios de alargamento.

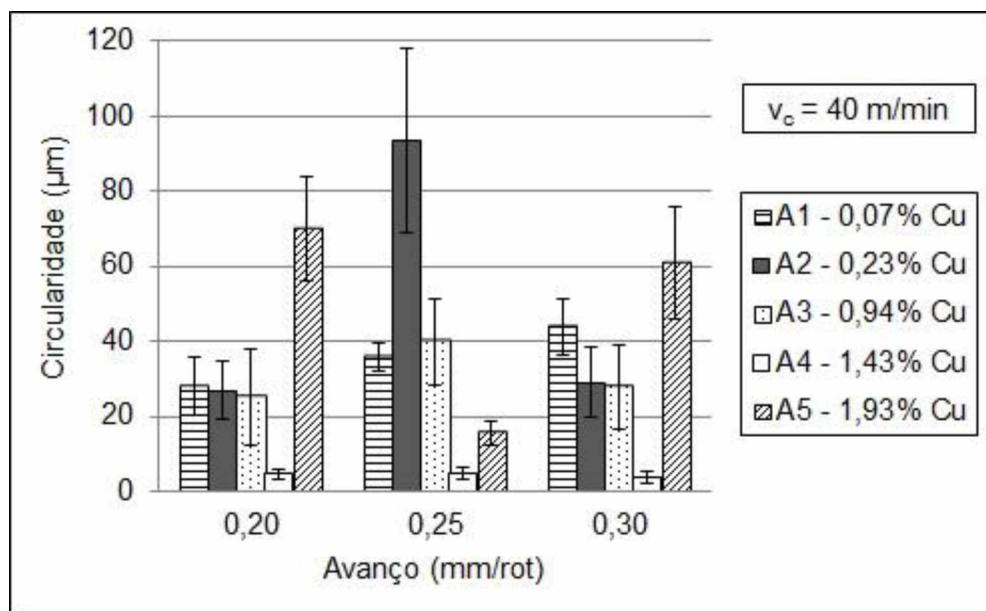


Figura 4.39. Desvio de circularidade dos furos obtidos em diferentes avanços no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Na Fig. 4.40 é apresentada a representação gráfica de uma medição do desvio de circularidade para as amostras 2 e 4 da liga de alumínio 6351. Em média, a amostra 2 apresentou o maior desvio de circularidade medido, enquanto a amostra 4 apresentou os menores desvios de circularidade no processo de alargamento para a maioria das condições de corte ensaiadas.

Na Tab. 4.28 é apresentado o modelo ajustado para a circularidade dos furos obtidos no alargamento para a comparação entre as amostras 2 (0,23% Cu) e 4 (1,43% Cu). É possível observar que, com 95% de confiança, a circularidade dos furos alargados é mais sensível à velocidade de corte, ao avanço da ferramenta e ao teor de cobre. Também foram significativas as interações  $v_c \cdot f$  e  $v_c \cdot \text{teor de cobre}$ . O efeito principal da velocidade de corte sobre a circularidade foi o maior dentre os parâmetros significativos, seguido pelo efeito da interação  $v_c \cdot \text{teor de cobre}$  e o efeito principal do teor de cobre.

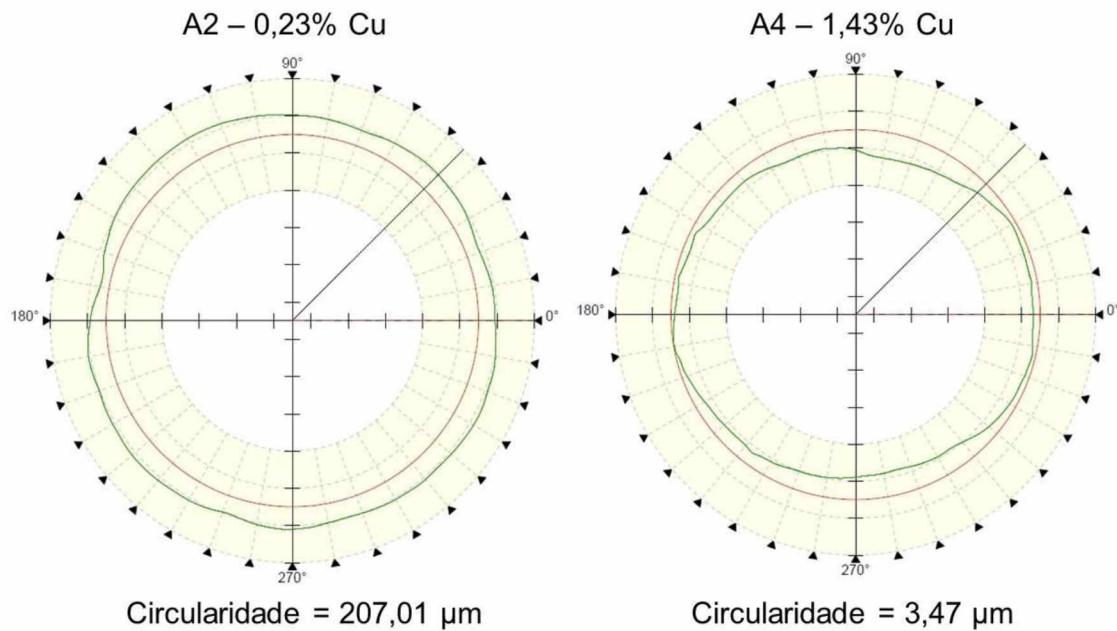


Figura 4.40. Representação gráfica de uma medição do desvio de circularidade no alargamento das amostras 2 e 4 da liga de alumínio 6351 –  $v_c = 40$  m/min e  $f = 0,25$  mm/rot

Nesta comparação o aumento da velocidade de corte (de 12 m/min até 40 m/min) resulta em decréscimo estatisticamente significativo da circularidade. O mesmo aconteceu para o aumento do avanço (de 0,2 até 0,3 mm/rot). Além disso, foi confirmado que a circularidade diminui quando se aumenta o teor de cobre de 0,23% para 1,43%.

Tabela 4.28. Efeitos, coeficientes e valores p da regressão múltipla para a circularidade no alargamento comparando as amostras 2 e 4 da liga de alumínio 6351

Sumário da Regressão para a Variável Dependente: Circularidade no Alargamento			
R= 0,99932943; R <sup>2</sup> = 0,99865932; R <sup>2</sup> Ajustado= 0,99530761			
F(5,2)= 297,96; p<0,00335			
	Efeito	Coeficiente	valor p
Interseção		<b>25,77778</b>	<b>0,000190</b>
<i>v<sub>c</sub></i>	<b>-19,30982</b>	<b>-9,65491</b>	<b>0,001351</b>
<i>f</i>	<b>-6,38760</b>	<b>-3,19380</b>	<b>0,012143</b>
Teor de cobre	<b>-9,66462</b>	<b>-4,83231</b>	<b>0,005359</b>
<i>v<sub>c</sub>.f</i>	<b>6,93334</b>	<b>3,46667</b>	<b>0,010335</b>
<i>v<sub>c</sub>.teor de cobre</i>	<b>-14,02186</b>	<b>-7,01093</b>	<b>0,002557</b>

Nas comparações entre as demais amostras da liga de alumínio 6351 verificou-se que a velocidade de corte foi um parâmetro significativo em apenas três das dez comparações realizadas. Em algumas comparações o aumento da velocidade de corte provocou a diminuição da circularidade, porém em uma comparação provocou seu aumento. O avanço também se mostrou significativo em apenas três das dez comparações realizadas, resultando sempre no decréscimo da circularidade.

Já a interação entre a velocidade de corte e o avanço foi significativa em cinco comparações, sempre causando o aumento da circularidade. Por outro lado a interação  $v_c \cdot \text{teor}$  de cobre se mostrou significativa em quatro comparações e na maioria delas resultou na diminuição da circularidade.

O teor de cobre foi significativo em cinco das dez comparações realizadas. Sempre que significativo este parâmetro resultou em diminuição da circularidade. Analisando todas as comparações, mesmo aquelas em que o teor de cobre não foi significativo com 95% de confiança, foi possível determinar que os menores valores do desvio de circularidade aconteceram no alargamento da amostra 4 (1,43% Cu). Assim, para a amostra 4, foi realizada uma nova regressão múltipla. Nesta etapa, as variáveis utilizadas foram a velocidade de corte e o avanço. Para esta análise foi adicionado um nível central para estas variáveis.

A regressão para a amostra 4 mostrou que, com 95% de confiança, nenhum parâmetro foi significativo em relação à circularidade no alargamento. Além disso, o modelo ajustado não foi significativo. Portanto, os coeficientes são iguais à zero. Isso provavelmente ocorreu devido à grande dispersão nas medições de circularidade. Desta forma, não foi possível obter a equação que descreve a circularidade em função dos parâmetros velocidade de corte e avanço.

O desvio de cilindricidade médio dos furos obtidos em diferentes velocidades de corte no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre é apresentado na Fig. 4.41. Não foi perceptível nenhuma tendência de aumento ou diminuição da cilindricidade com a variação da velocidade de corte. Em média, as amostras 4 (1,43% Cu) e 5 (1,93% Cu) resultaram em menores desvios de cilindricidade para a maioria das velocidades de corte ensaiadas. Porém, como os intervalos de confiança se sobrepõem, não é possível afirmar qual amostra resultou no menor desvio de cilindricidade no alargamento. O menor valor médio do desvio de cilindricidade de 21  $\mu\text{m}$  foi obtido no alargamento da amostra 4 na maior velocidade de corte utilizada (40 m/min). Já o maior valor médio do desvio de cilindricidade de 374  $\mu\text{m}$  foi obtido no alargamento da amostra 3 na menor velocidade de corte (12 m/min).

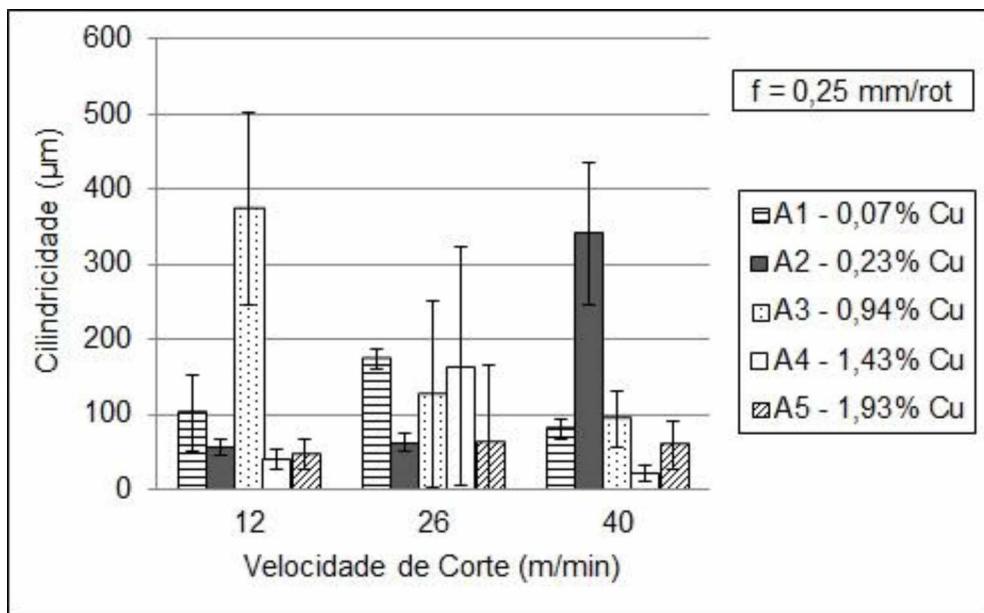


Figura 4.41. Desvio de cilindricidade dos furos obtidos em diferentes velocidades de corte no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

O desvio de cilindricidade médio dos furos obtidos em diferentes avanços no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre é apresentado na Fig. 4.42. Assim como para a variação da velocidade de corte, não foi observada tendência de aumento ou diminuição da cilindricidade dos furos obtidos no alargamento com a variação do avanço. Novamente, o menor valor médio do desvio de cilindricidade ( $21 \mu\text{m}$ ) foi obtido no alargamento da amostra 4 (1,43% Cu) para o avanço intermediário ( $0,25 \text{ mm/rot}$ ). Da mesma maneira como comentado para a circularidade, a provável explicação para os menores valores do desvio de cilindricidade apresentados por esta amostra seja a maior estabilidade do processo, e consequentemente menores deflexões e vibrações, devido ao menor esforço aplicado sobre a ferramenta de corte durante o alargamento. Já o maior desvio de cilindricidade médio ( $341 \mu\text{m}$ ) foi obtido no alargamento da amostra 2 (0,23% Cu) também no avanço de  $0,25 \text{ mm/rot}$ .

Na Fig. 4.43 é apresentada a representação gráfica de uma medição do desvio de cilindricidade para as amostras 3 e 4 da liga de alumínio 6351. Em média, a amostra 3 apresentou o maior desvio médio de cilindricidade, enquanto a amostra 4 apresentou os menores desvios de cilindricidade no processo de alargamento para a maioria das condições de corte ensaiadas.

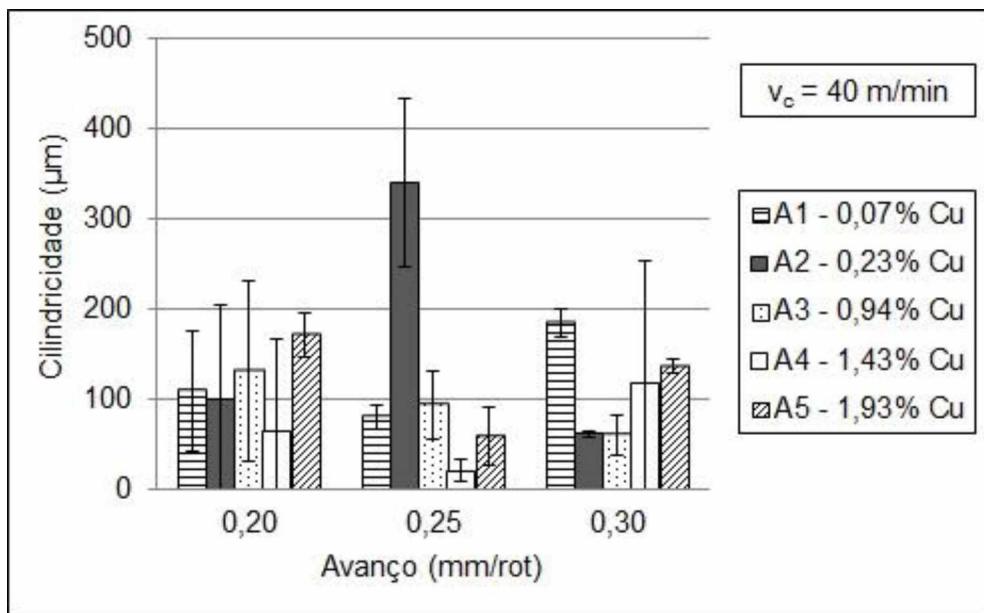


Figura 4.42. Desvio de cilindricidade dos furos obtidos em diferentes avanços no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

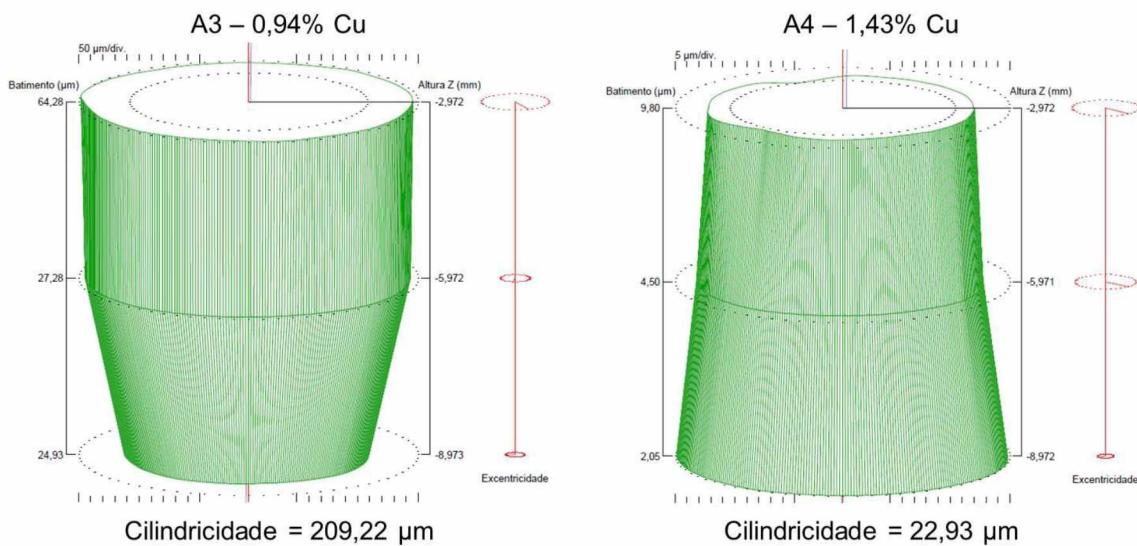


Figura 4.43. Representação gráfica de uma medição do desvio de cilindricidade no alargamento das amostras 3 e 4 da liga de alumínio 6351 –  $v_c = 40$  m/min e  $f = 0,25$  mm/rot

Na Tab. 4.29 é apresentado o modelo ajustado para a cilindricidade dos furos obtidos no alargamento para a comparação entre as amostras 3 (0,94% Cu) e 4 (1,43% Cu). É possível observar que, com 95% de confiança, a cilindricidade no alargamento é mais sensível ao efeito principal do avanço, bem como às interações  $v_c \cdot f$  e  $f \cdot \text{teor de cobre}$ . O efeito da interação  $f \cdot \text{teor de cobre}$  sobre a cilindricidade foi o

maior dentre os parâmetros significativos, seguido pelo efeito principal do avanço e da interação  $v_c \cdot f$ .

Tabela 4.29. Efeitos, coeficientes e valores p da regressão múltipla para a cilindricidade no alargamento comparando as amostras 2 e 4 da liga de alumínio 6351

Sumário da Regressão para a Variável Dependente: Cilindricidade no Alargamento			
$R = 0,97714350$ ; $R^2 = 0,95480941$ ; $R^2$ Ajustado= $0,920916471$			
$F(3,4) = 28,171$ ; $p < 0,00377$			
	Efeito	Coeficiente	valor p
Interseção		<b>92,1335</b>	<b>0,000026</b>
$f$	<b>-46,1264</b>	<b>-23,0632</b>	<b>0,005472</b>
$v_c \cdot f$	<b>36,6630</b>	<b>18,3315</b>	<b>0,012258</b>
f.teor de cobre	<b>50,6052</b>	<b>25,3026</b>	<b>0,003907</b>

Nesta comparação o aumento do avanço (de 0,2 até 0,3 mm/rot) resultou no decréscimo do desvio de cilindricidade. De acordo com Bezerra et al. (2001) o maior contato entre peça e ferramenta no alargamento em baixos avanços podem causar o aumento no desvio de cilindricidade. Já as interações  $v_c \cdot f$  e f.teor de cobre causaram o aumento do desvio de cilindricidade.

É importante ressaltar que em quatro das dez comparações realizadas o modelo ajustado não foi significativo. Portanto, nestas situações os coeficientes são iguais à zero.

Nas comparações entre as demais amostras da liga de alumínio 6351, semelhante ao verificado para a circularidade, foi observado que o avanço se mostrou significativo em apenas três das dez comparações realizadas, resultando sempre no decréscimo da cilindricidade.

Já a interação entre a velocidade de corte e o avanço foi significativa em apenas duas comparações, sempre causando o aumento da cilindricidade. Por outro lado a interação f.teor de cobre se mostrou significativa em duas comparações causando tanto o aumento quanto a diminuição da cilindricidade.

O teor de cobre foi significativo em quatro das dez comparações realizadas. Em sua maioria este parâmetro resultou em diminuição da cilindricidade. Na análise de todas as comparações, mesmo naquelas em que o teor de cobre não foi significativo com 95% de confiança, foi comprovado que os menores valores do desvio de cilindricidade aconteceram no alargamento da amostra 4 (1,43% Cu). Assim, para a amostra 4, foi realizada uma nova regressão múltipla. Nesta etapa, as variáveis

utilizadas foram a velocidade de corte e o avanço. Para esta análise foi adicionado um nível central para as variáveis.

A regressão para a amostra 4 mostrou que, com 95% de confiança, nenhum parâmetro foi significativo em relação à cilindricidade no alargamento. Assim como verificado para a circularidade, o modelo ajustado não foi significativo. Portanto, os coeficientes são iguais à zero. Isso provavelmente se deveu à grande dispersão nas medições de cilindricidade. Desta forma, não foi possível obter a equação que descreve a cilindricidade em função dos parâmetros velocidade de corte e avanço.

#### 4.3.5 Rugosidade

Os valores médios do parâmetro de rugosidade  $Rq$ , com intervalo de confiança de 95%, em diferentes velocidades de corte durante o alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre estão apresentados na Fig. 4.44. Com base nos resultados obtidos a primeira observação que pode ser feita é que, como esperado, o acabamento superficial foi otimizado pelo processo de alargamento em comparação ao processo de furação. Os valores do parâmetro de rugosidade  $Rq$  para o alargamento da liga de alumínio 6351 variou entre 0,23  $\mu\text{m}$  e 0,58  $\mu\text{m}$ . Enquanto que para o processo de furação foram obtidos valores do parâmetro de rugosidade  $Rq$  entre 1,25  $\mu\text{m}$  e 2,92  $\mu\text{m}$ . Desta forma, o processo de alargamento melhorou o acabamento em cerca de 5 vezes em relação ao processo de furação.

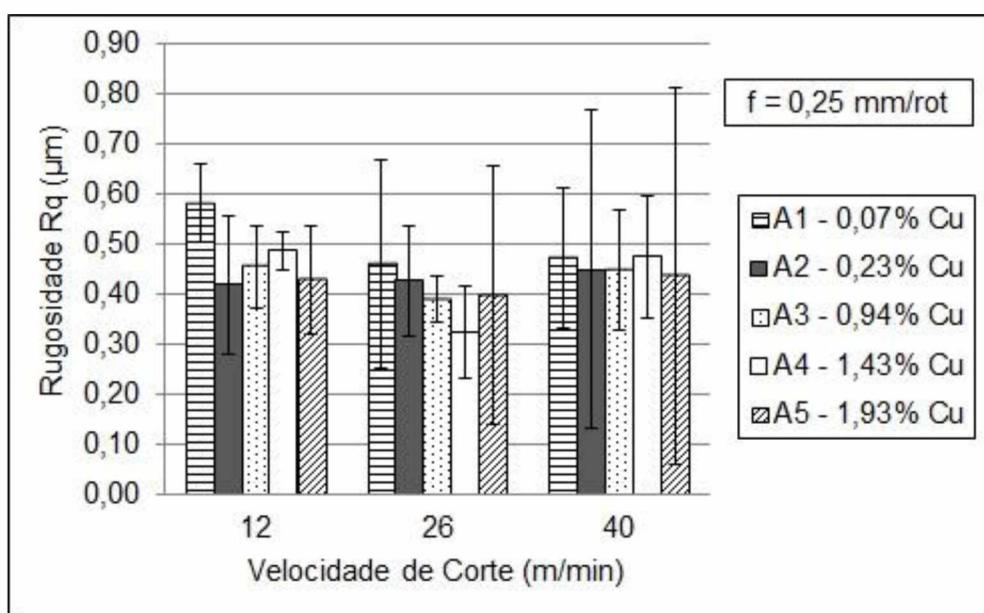


Figura 4.44. Parâmetro de rugosidade  $Rq$  dos furos obtidos em diferentes velocidades de corte no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Bezerra et al. (2001) e Rosa (2012) verificaram que a rugosidade aumenta, ou seja, o acabamento piora, à medida que se aumenta a velocidade de corte no processo de alargamento. Segundo os autores, isso se deve principalmente à maior vibração presente no processo usinando à altas velocidades de corte. Além do efeito da vibração, no alargamento em maiores velocidades de corte, o menor tempo de ação das guias cilíndricas, devido à maior rotação do alargador, resulta em alisamento menos efetivo da superfície usinada (ROSA, 2012). Assim, o acabamento é prejudicado. A partir da Fig. 4.44 este comportamento não é evidente para os valores de rugosidade obtidos. Entretanto, é possível perceber que o alargamento realizado com a velocidade de corte intermediária de 26 m/min levou ao melhor acabamento superficial do furo. O menor valor médio do parâmetro de rugosidade  $Rq$  (0,32  $\mu\text{m}$ ), que aconteceu no alargamento à 26 m/min, foi apresentado pela amostra 4 (1,43% Cu). Por outro lado, a amostra 1 (0,07% Cu) foi a que resultou em média no pior acabamento (0,58  $\mu\text{m}$ ). Este resultado foi obtido na menor velocidade de corte ensaiada (12 m/min).

Já na Fig. 4.45 Os valores médios do parâmetro de rugosidade  $Rq$ , com intervalo de confiança de 95%, em diferentes avanços durante o alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. Neste caso, em média, ficou evidente o aumento da rugosidade com o aumento do avanço, exceto para a amostra 2 (0,23% Cu). De acordo com Rosa (2012), o alargamento realizado em baixos avanços garante um maior tempo de contato das guias cilíndricas do alargador com a parede do furo. Desta forma, as superfícies geradas possuem áreas mais alisadas, e consequentemente, menor rugosidade.

Em relação ao efeito da quantidade de cobre adicionada na liga de alumínio sobre o acabamento superficial no alargamento, foi observado que a amostra 4 (1,43% Cu) resultou em menor rugosidade para a faixa de avanços ensaiadas neste trabalho. Assim como verificado para os desvios de forma, um dos mais prováveis motivos do melhor acabamento superficial dos furos produzidos na amostra 4 são os menores esforços durante a usinagem (torque e força de avanço) que evitam ou diminuem vibrações e deflexões durante o alargamento. Além disso, a maior microdureza desta amostra devido ao seu teor de cobre provavelmente garantiram um corte mais efetivo. Em contrapartida, o pior acabamento superficial foi obtido no alargamento da amostra 1 (0,07% Cu). Diferentemente da amostra 4, a maior ductilidade apresentada pela amostra 1 pode ter culminado em um corte menos efetivo, com bastante deformação do material da peça, prejudicando o acabamento superficial dos furos.

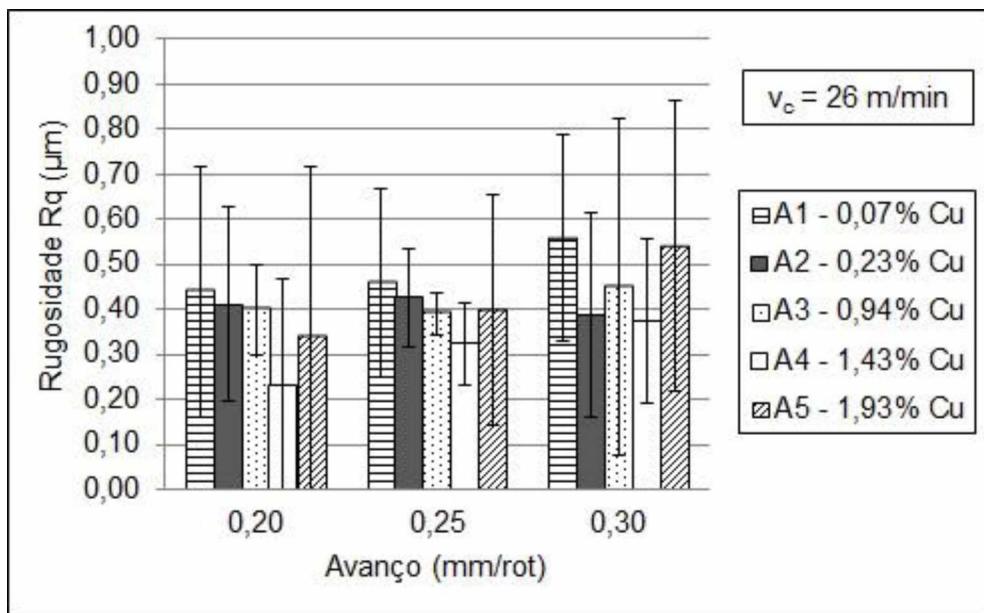


Figura 4.45. Parâmetro de rugosidade Rq dos furos obtidos em diferentes avanços no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Além dos fatores anteriormente citados, outro fator que necessita de atenção são as rebarbas de entrada formadas na pré-furação. Durante os ensaios de furação foi encontrado que a amostra 1 resultou em maior altura média da rebarba de entrada, devido à sua maior capacidade de deformação em relação às demais amostras da liga de alumínio utilizadas neste trabalho. Como após a pré-furação os furos não passaram por escareamento antes do processo de alargamento, é provável que o alargador ao iniciar o corte possa ter levado consigo fragmentos da rebarba de entrada. Este fato pode ter causado riscos na superfície usinada do furo, prejudicando seu acabamento superficial.

Os perfis de rugosidade dos furos alargados com  $v_c = 26 \text{ m/min}$  e  $f = 0,20 \text{ mm/rot}$  realizados nas amostras 1 (0,07% Cu) e 4 (1,43% Cu) da liga de alumínio 6351 são apresentados na Fig. 4.46. O perfil de rugosidade do furo alargado realizado na amostra 4 é mais liso e simétrico, evidenciando melhor acabamento superficial. Já o perfil de rugosidade do furo alargado realizado na amostra 1 se apresenta predominantemente na forma de vales mais profundos, evidenciando pior acabamento superficial devido ao efeito do riscamento da superfície.

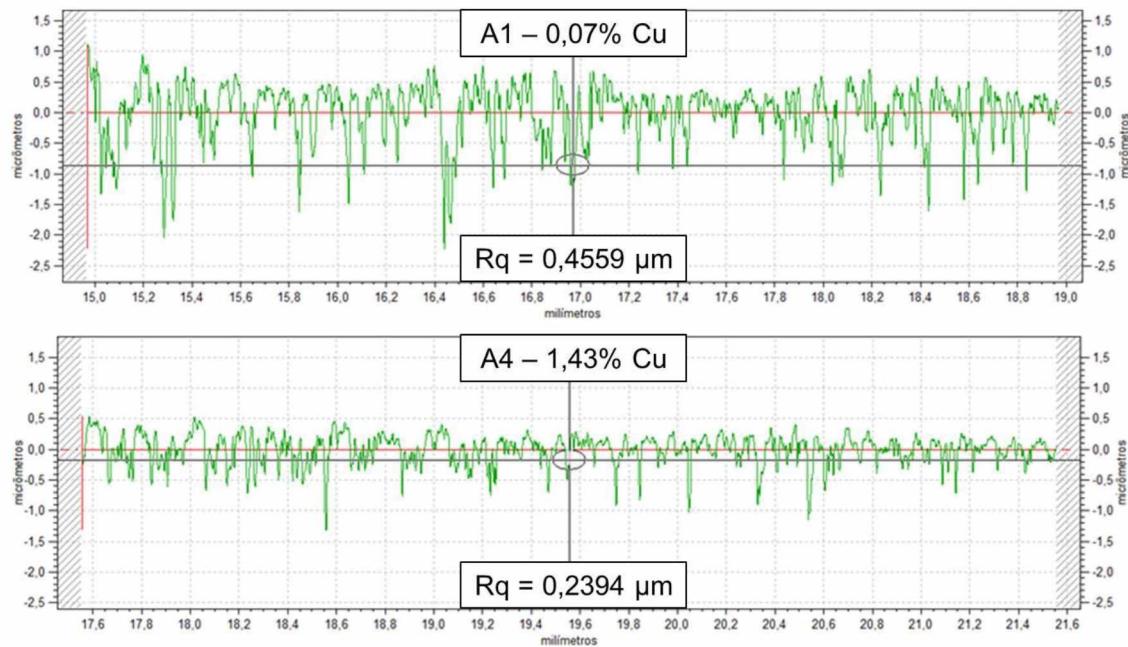


Figura 4.46. Perfis de rugosidade dos furos alargados com  $v_c = 26$  m/min e  $f = 0,20$  mm/rot realizados nas amostras 1 (0,07% Cu) e 4 (1,43% Cu) da liga de alumínio 6351

Na Tab. 4.30 é apresentado o modelo ajustado para o parâmetro de rugosidade  $Rq$  dos furos obtidos no alargamento para a comparação entre as amostras 1 (0,07% Cu) e 4 (1,43% Cu). Nesta comparação é possível observar que, com 95% de confiança, nenhum parâmetro foi significativo. Porém, com 90% de confiança, o efeito principal do teor de cobre é significativo. Assim, ao aumentar o teor de cobre de 0,07% Cu para 1,43% Cu a rugosidade diminui, ou seja, melhor é o acabamento superficial.

Tabela 4.30. Efeitos, coeficientes e valores  $p$  da regressão múltipla para o parâmetro de rugosidade  $Rq$  no alargamento comparando as amostras 1 e 4 da liga de alumínio 6351

Sumário da Regressão para a Variável Dependente: Rugosidade $Rq$ no Alargamento			
$R = 0,66796843$ ; $R^2 = 0,44618183$ ; $R^2$ Ajustado= $0,35387880$			
$F(1,6) = 4,8339$ ; $p < 0,07024$			
	Efeito	Coeficiente	valor $p$
Interseção		<b>0,490742</b>	<b>0,000001</b>
Teor de cobre	-0,102784	-0,051392	0,070237

Nas comparações entre as demais amostras da liga de alumínio 6351, a velocidade de corte foi significativa sobre a rugosidade  $Rq$  em cinco das dez comparações realizadas. Quando significativa, na maioria das vezes, resultou em

decréscimo da rugosidade. Já o avanço foi significativo em apenas duas das dez comparações realizadas. Quando significativo, o avanço apresentou o efeito tanto de aumento como de diminuição da rugosidade.

Foi observado que a interação entre a velocidade de corte e o avanço não foi significativa em relação a rugosidade dos furos alargados em nenhuma das comparações. Por outro lado, a interação  $v_c \cdot \text{teor de cobre}$  se mostrou significativa em quatro comparações. Sempre que significativa esta interação resultou no aumento da rugosidade do furo alargado. Ou seja, ao se aumentar ao mesmo tempo o avanço e o teor de cobre na liga de alumínio durante o alargamento tende a prejudicar o acabamento superficial dos furos. Já a interação  $v_c \cdot \text{teor de cobre}$  foi significativa em seis das dez comparações realizadas. Na maioria das vezes o aumento simultâneo da velocidade de corte e do teor de cobre adicionado à liga de alumínio 6351 provoca o decrecimento da rugosidade dos furos alargados.

Por fim, o teor de cobre foi significativo em apenas duas das dez comparações realizadas. Com 95% de confiança, estatisticamente a amostra 4 (1,43% Cu) resultou em melhor acabamento superficial que as amostras 2 (0,23% Cu) e 5 (1,93% Cu). Analisando as demais comparações, mesmo aquelas em que o teor de cobre não foi significativo com 95% de confiança, foi comprovado que os menores valores de rugosidade aconteceram no alargamento da amostra 4 (1,43% Cu). Assim, para a amostra 4, foi realizada uma nova regressão múltipla. Nesta etapa, as variáveis utilizadas foram a velocidade de corte e o avanço. Para esta análise foi adicionado um nível central para estas variáveis.

A regressão para a amostra 4 mostrou, com 95% de confiança, que os efeitos principal e quadrático da velocidade de corte foram significativos em relação ao parâmetro de rugosidade  $Rq$  durante o alargamento. Na Eq. 4.6 é apresentada a equação do modelo ajustado que descreve a rugosidade no alargamento da amostra 4 em função dos parâmetros de corte.

Este modelo apresentou um grau de ajuste de  $R^2 = 0,8252$ . Esse valor indica boa correlação entre o modelo e os dados obtidos nos ensaios experimentais de alargamento realizados. Em outras palavras, o modelo explica 82,52% dos resultados experimentais obtidos.

$$\text{Rugosidade } Rq \text{ no Alargamento da liga 6351 (1,43% Cu)} = 0,605 - 0,027v_c + 0,001v_c^2 \quad (4.6)$$

Já na Fig. 4.47 é apresentada uma superfície de resposta do comportamento da rugosidade do furo obtido pelo alargamento da amostra 4 em função dos parâmetros velocidade de corte e avanço.

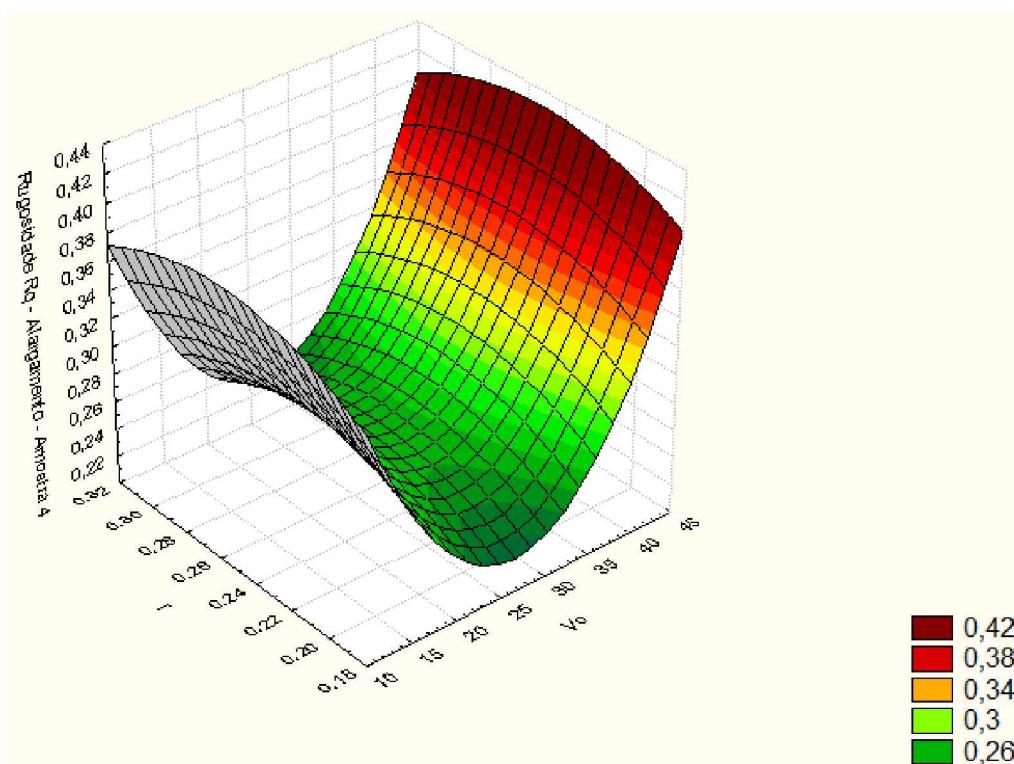


Figura 4.47. Superfície de resposta do parâmetro de rugosidade  $Rq$  ( $\mu m$ ) no alargamento da amostra 4 em função dos parâmetros velocidade de corte e avanço

Tanto a equação que descreve o modelo como a superfície de resposta confirmam a importância significativa da velocidade na variação da rugosidade dos furos no alargamento da amostra 4. De acordo com a Fig. 4.47, para obter o melhor acabamento superficial dos furos no alargamento da amostra 4 (1,43% Cu) da liga de alumínio, é recomendável a combinação da velocidade de corte intermediária ( $v_c = 12$  m/min) com os extremos de avanço ensaiados (0,20 mm/rot ou 0,30 mm/rot).

#### 4.3.6 Alterações subsuperficiais

Na Fig. 4.48 são apresentadas as micrografias obtidas por microscopia ótica da seção transversal dos furos para análise de alterações subsuperficiais durante o alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre em aumentos de 100x, 200x e 500x. Analisando principalmente, as micrografias realizadas com aumento de 500x, fica evidente uma pequena faixa de deformação plástica próxima à superfície usinada. A deformação tem orientação paralela à

superfície usinada. Esta deformação representa uma zona afetada pelo corte. Neste trabalho o tamanho desta zona de deformação não foi medida. Seria de se esperar que esta zona de deformação sofrida durante o processo de alargamento fosse consideravelmente menor do que a observada na furação. Principalmente devido aos esforços (torque e força de avanço) muito menores do que os observados no processo de furação. Porém, em uma análise visual preliminar a partir da escala das micrografias, aparentemente esta deformação se apresentou relativamente em uma camada mais espessa do que a gerada pelo processo de furação. As amostras 2 (0,23%), 3 (0,94% Cu) e 4 (1,43% Cu), com teores de cobre intermediários, aparentemente apresentaram uma maior zona afetada pelo corte, devido à maior quantidade de deformação microestrutural observada próxima a superfície usinada no processo de alargamento. Já nas amostras 1 (0,07% Cu) e 5 (1,93% Cu), com teores mínimo e máximo utilizados neste trabalho, não foi perceptível a deformação microestrutural e consequentemente a zona afetada pelo corte.

Esta deformação plástica sofrida pelo material durante a usinagem, se acontecer em temperaturas abaixo da temperatura de recristalização do material, pode provocar um endurecimento por deformação ou encruamento. Assim, também é possível analisar a zona afetada pelo corte a partir de uma caracterização do material a partir de medições de microdureza próximas à superfície usinada.

Com o intuito de comprovar e tentar quantificar esta deformação plástica (zona afetada pelo corte) foram realizados ensaios de microdureza. Para cada amostra cinco indentações foram realizadas partindo da superfície usinada em direção ao interior do material. Os valores de microdureza obtidos são apresentados na Fig. 4.49. Após o alargamento, a microdureza da amostra 1 (0,07% Cu) à 15  $\mu\text{m}$  da superfície do furo (72,2 HV) foi cerca de 40% menor que a microdureza média do material (121,2 HV). Comportamento semelhante apresentou a amostra 3 (0,23% Cu), na qual a microdureza à 15  $\mu\text{m}$  da superfície do furo (95,3 HV) foi cerca de 23% menor que a microdureza média do material (124 HV). Da mesma forma, para a amostra 4 (1,43% Cu), a microdureza à 15  $\mu\text{m}$  da superfície do furo (121 HV) foi cerca de 9% menor que a microdureza média do material (133,4 HV). Segundo Bhowmick, Lukitsch e Alpas (2010), o aumento da temperatura devido ao calor induzido pelo atrito do contato pode provocar um amolecimento do material após o alargamento. Este decréscimo na microdureza próximo à superfície usinada pode provocar aumento da adesão do material da peça na ferramenta de corte, e consequentemente, aumentar o torque durante o processo de usinagem. Este fenômeno pode explicar os maiores valores em média do torque e força de avanço apresentados em algumas condições de corte pela

amostra 1 em relação às demais amostras ensaiadas, que são mais duras e resistentes que esta.

Já para as amostras 2 (0,23% Cu) e 5 (1,93% Cu) foram verificados aumentos da microdureza próximo à superfície usinada. A microdureza da amostra 2 à 15  $\mu\text{m}$  da superfície do furo foi de 118 HV, enquanto a microdureza média do material é de 113,2 HV. Da mesma forma, a microdureza da amostra 5 à 15  $\mu\text{m}$  da superfície do furo foi de 143 HV, enquanto a microdureza média do material é de 141,4 HV. Em contrapartida ao verificado pela amostra 1, que sofreu decréscimo de sua microdureza próximo à superfície usinada, a amostra 2 sofreu leve aumento. Para a amostra 2 provavelmente o aumento da temperatura não foi suficiente para provocar o amolecimento verificado na amostra 1. Os resultados obtidos pelas medições de microdureza confirmam que ocorreram alterações subsuperficiais no material usinado, provocadas pelo processo de alargamento.

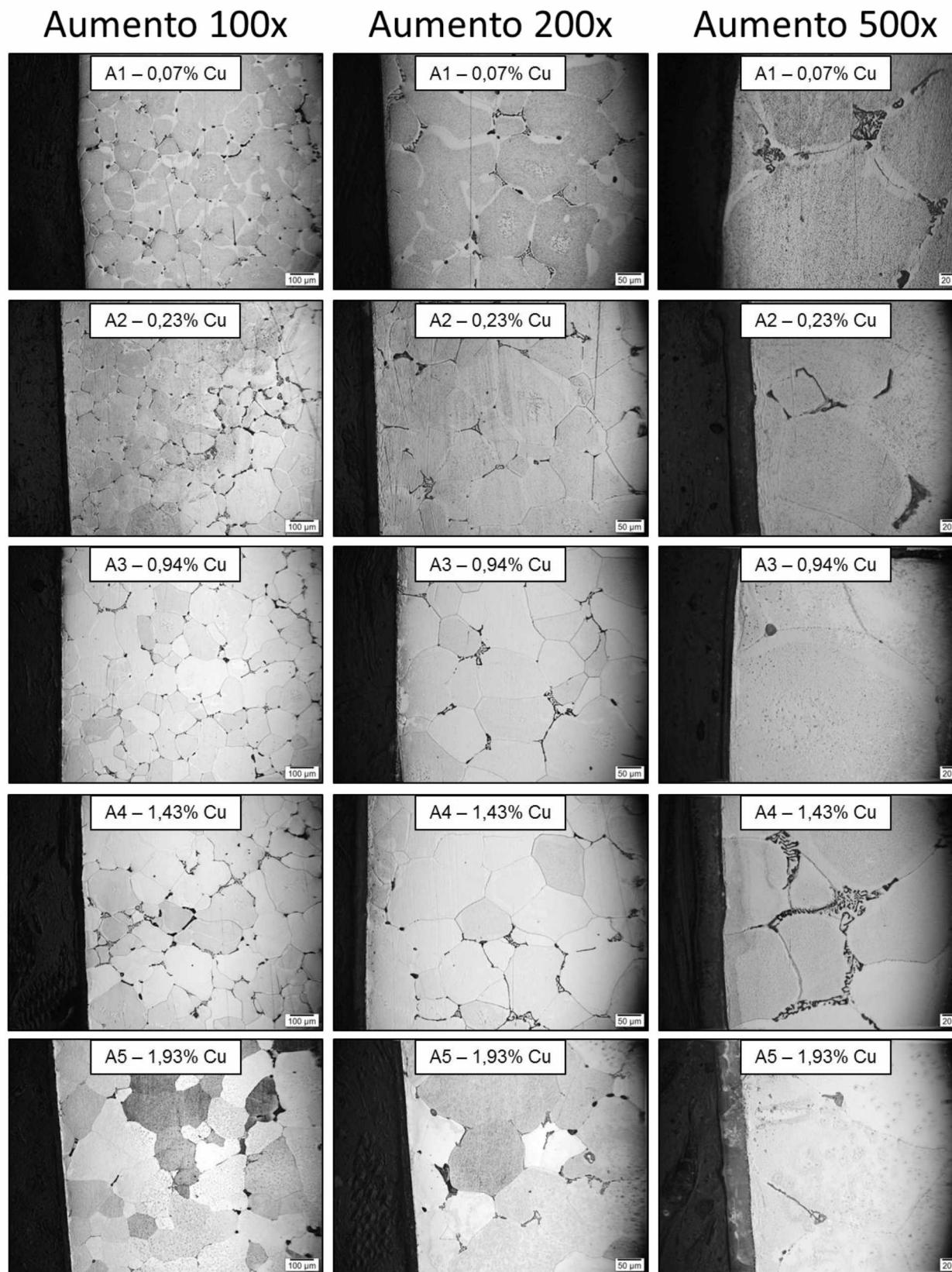


Figura 4.48. Micrografias obtidas por microscopia ótica da seção transversal dos furos para análise de alterações superficiais durante o alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre em aumentos de 100x, 200x e 500x

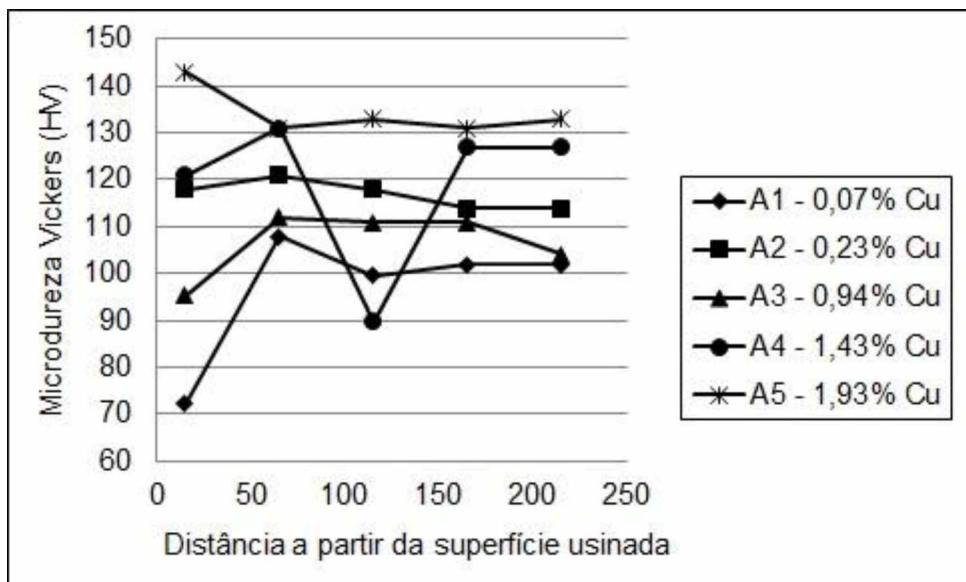


Figura 4.49. Microdureza Vickers em função da distância a partir da superfície usinada no processo de alargamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

#### 4.4 Resultados dos ensaios de rosqueamento

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de rosqueamento. Estes resultados incluem o torque no macho de corte, análise dos filetes das roscas por microscopia eletrônica de varredura e investigação de alterações subsuperfícias por microscopia ótica e ensaios de microdureza.

##### 4.4.1 Torque

Na Fig. 4.50 são apresentados os valores médios do torque, com intervalo de 95% de confiança, no rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre. Os resultados apresentam a média dos valores obtidos do torque máximo obtido durante a fase de corte do macho. O torque obtido pelas diferentes amostras da liga de alumínio 6351 variou de 0,92 N.m até 1,29 N.m.

Nas menores velocidades de corte utilizadas (8 m/min e 10 m/min), as amostras 4 (1,43% Cu) e 5 (1,93% Cu) resultaram em média nos maiores valores do torque. Para a velocidade de corte de 8 m/min os valores do torque no rosqueamento das amostras 4 e 5 ficaram entre 1,24 N.m e 1,25 N.m. Estas amostras possuem maior resistência mecânica, dureza e microdureza dos constituintes entre as amostras ensaiadas. Não foi evidente para todas as amostras uma tendência de aumento ou diminuição do torque no rosqueamento com o aumento da velocidade de corte, como

também foi verificado por (PEREIRA, 2014). Porém, para as amostras 4 e 5 foi verificado que a medida que a velocidade de corte aumenta, em média, o torque sofreu um decréscimo. Este fenômeno pode ser explicado pelo efeito da diminuição dos esforços de usinagem devido à diminuição da resistência ao cisalhamento do material. Essa diminuição da resistência é provocada pelo aumento da geração de calor usinando à velocidades de corte mais altas (MACHADO et al., 2011).

Já para as velocidades de corte de 12 m/min a 18 m/min a amostra 1 (0,07% Cu) se destacou, apresentando em média os maiores valores de torque em relação às demais amostras da liga de alumínio 6351. Esta amostra se diferencia pelo fato de possuir uma maior capacidade de deformação e menor resistência mecânica e dureza dentre as amostras ensaiadas. O maior torque apresentado pela amostra 1 provavelmente se deve à sua maior capacidade de deformação. A maior ductilidade do material pode aumentar o comprimento de contato cavaco-ferramenta, e consequentemente, maiores serão as áreas de cisalhamento primário e secundário. Assim, o torque tende a ser maior.

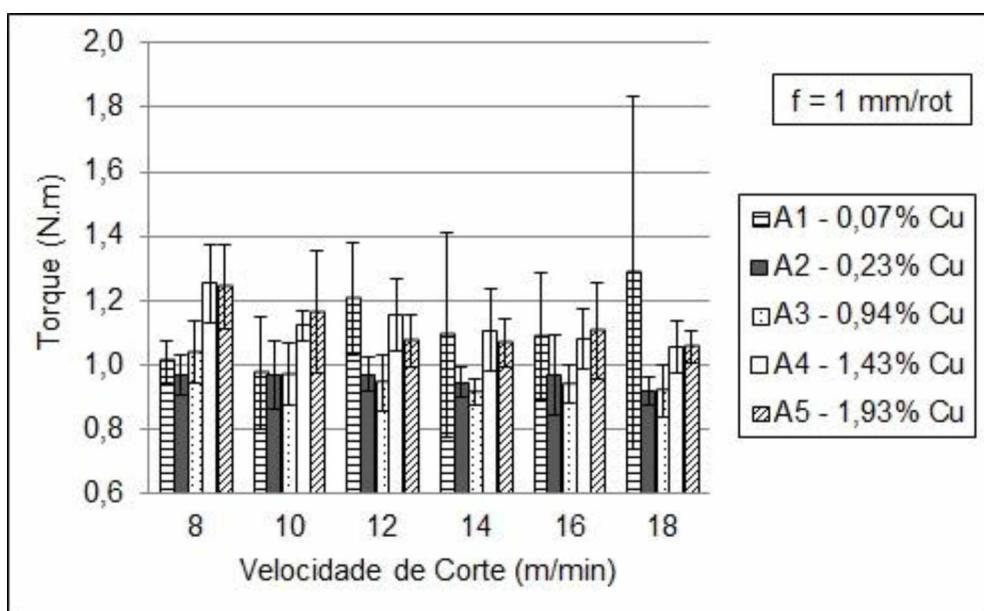


Figura 4.50. Torque em diferentes velocidades de corte no rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Por outro lado, as amostras 2 (0,23% Cu) e 3 (0,94% Cu) resultaram em média nos menores valores de torque para todas as velocidades de corte ensaiadas. O menor valor médio do torque na usinagem da amostra 2 foi de 0,917 N.m na velocidade de corte de 18 m/min. Já para a amostra 3, o menor valor médio do torque obtido foi de 0,915 N.m. Estas amostras são menos resistentes que as amostras 4 e 5.

Ao mesmo tempo, são menos dúcteis que a amostra 1. Outra observação importante a se fazer é que para as amostra 2 e 3 não foi percebido o efeito da diminuição do torque provocada pelo aumento da velocidade de corte, explicado anteriormente.

A fim de investigar a influência dos parâmetros velocidade de corte e teor de cobre adicionado na liga de alumínio 6351 foi realizada uma análise de variância. Na Tab. 4.31 é apresentado um quadro de ANOVA (análise de variância) para os valores médios do torque no rosqueamento. Com 95% de confiança, como  $p > 0,05$  ( $p = 0,636001$ ), é possível afirmar que estatisticamente não há diferença no torque obtido com as diferentes velocidades de corte ensaiadas. Por outro lado, como  $p < 0,05$  ( $p = 0,000332$ ), é possível afirmar que pelo menos uma amostra da liga de alumínio 6351 com diferente teor de cobre apresentou torque no rosqueamento diferente.

Tabela 4.31. Quadro de Anova para o torque no rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Efeito	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Média Quadrática	F	Valor p
Interseção	<b>33,29049</b>	<b>1</b>	<b>33,29049</b>	<b>5929,365</b>	<b>0,000000</b>
$V_c$	0,01940	5	0,00388	0,691	0,636001
Teor de cobre	<b>0,19297</b>	<b>4</b>	<b>0,04824</b>	<b>8,593</b>	<b>0,000332</b>
Erro	0,11229	20	0,00561		

Como foi constatado pela análise de variância que os valores do torque obtidos, com 95% de confiança, não sofrem influência significativa da velocidade de corte, os resultados serão analisados apenas em função do teor de cobre presente na liga de alumínio 6351. Assim, na Fig. 4.51 é apresentada a média de todos os valores de torque no rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 independente da velocidade de corte. A partir da Fig. 4.51 é possível perceber que em média as amostras 1 (0,07% Cu), 4 (1,43% Cu) e 5 (1,93% Cu) apresentaram os maiores valores de torque no rosqueamento. Este comportamento para amostra 1 é devido à sua maior ductilidade. Já para as amostras 4 e 5 se deve à sua maior resistência mecânica e dureza. Como os intervalos de confiança destas amostras se sobrepõem não é possível dizer que há diferença estatística entre estes resultados. Já as amostras 2 (0,23% Cu) e 3 (0,94 % Cu) resultaram em média nos menores valores do torque no processo de rosqueamento.

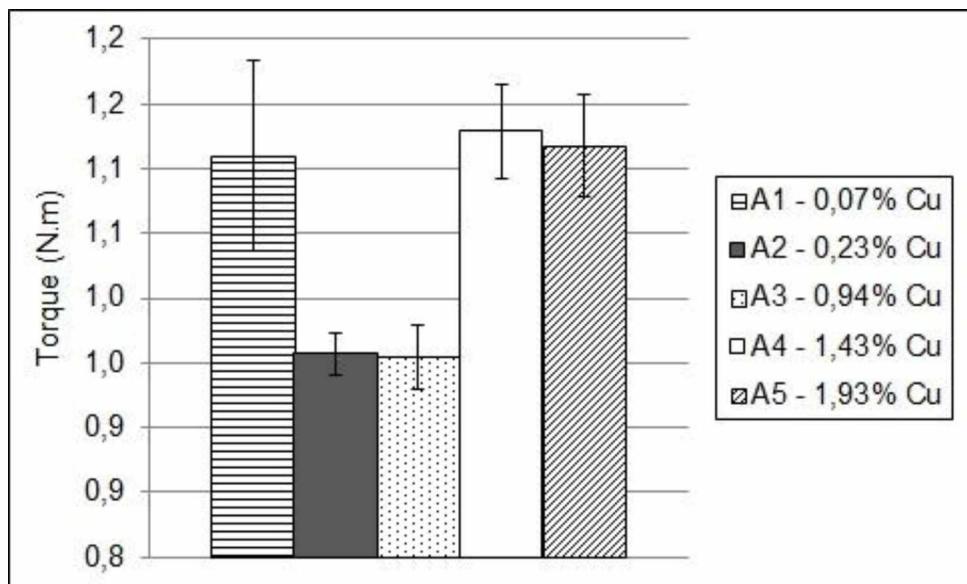


Figura 4.51. Torque no rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Na Tab. 4.31 foi verificado pela análise de variância que pelo menos uma amostra da liga de alumínio apresentou torque no rosqueamento diferente. Assim, foi preciso realizar testes de hipótese para a diferença entre as médias dos valores obtidos para as diferentes amostras da liga estudada. As hipóteses utilizadas nesta análise foram as seguintes:

- $H_0$ : Torque no rosqueamento amostra (a) = Torque no rosqueamento amostra (b)
- $H_1$ : Torque no rosqueamento amostra (a)  $\neq$  Torque no rosqueamento amostra (b)

Na Tab. 4.32 são apresentados os valores  $p$  para os testes de hipótese comparativos realizados entre as amostras, tomadas duas a duas. Com 95% de confiança, como  $p < 0,05$ , foi verificado estatisticamente que as amostras 1, 4 e 5 resultaram em maior torque no rosqueamento. Porém, não existe diferença no torque obtido no rosqueamento destas amostras. Além disso, as amostras 2 e 3 estatisticamente resultaram os menores valores médios do torque no rosqueamento. Entretanto não existe diferença estatística no torque obtido no rosqueamento destas amostras.

Tabela 4.32. Valor p para a diferença entre as médias do torque no rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

Diferença entre as médias do torque no rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre		
Amostra (a)	Amostra (b)	Valor p
A1 – 0,07% Cu	A2 – 0,23% Cu	<b>0,0000</b>
A1 – 0,07% Cu	A3 – 0,94% Cu	<b>0,0000</b>
A1 – 0,07% Cu	A4 – 1,43% Cu	0,5495
A1 – 0,07% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,7990
A2 – 0,23% Cu	A3 – 0,94% Cu	0,8429
A2 – 0,23% Cu	A4 – 1,43% Cu	<b>0,0000</b>
A2 – 0,23% Cu	A5 – 1,93% Cu	<b>0,0000</b>
A3 – 0,94% Cu	A4 – 1,43% Cu	<b>0,0000</b>
A3 – 0,94% Cu	A5 – 1,93% Cu	<b>0,0000</b>
A4 – 1,43% Cu	A5 – 1,93% Cu	0,6388

#### 4.4.2 Análise dos filetes da rosca

Segundo Da Mota (2006), a adesão de cavacos nas roscas fabricadas e nas superfícies de saída e folga dos machos têm grande influência no desgaste e avaria das ferramentas. Na Fig. 4.52 são apresentadas imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de vistas frontais (início e fim das roscas) e laterais dos filetes das rosas produzidas pelo processo de rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.

A primeira observação que pode ser feita é sobre a integridade dos filetes das rosas formadas durante o rosqueamento. Aparentemente os filetes formados se apresentaram íntegros e sem defeitos para praticamente todas as amostras da liga de alumínio ensaiadas. Apenas para a amostra 5 (1,93% Cu) foi observada um pequeno defeito, caracterizado por falta de material, destacado pela seta clara na Fig. 4.52.

Além disso, foi verificada a presença de material aderido na forma de partículas e aglomerados nas rosas para todas as amostras rosqueadas, destacadas por setas escuras na Fig. 4.52. De acordo com (DA MOTA, 2006), estas partículas aderidas podem ter sua origem relacionada com a presença de cavacos tanto no estágio de corte como no retorno das ferramentas. Ainda segundo o autor, o desprendimento desse material aderido pode acarretar prejuízos ao macho de corte, provocando o seu desgaste em suas superfícies de saída e de folga pelo mecanismo de *attrition*.

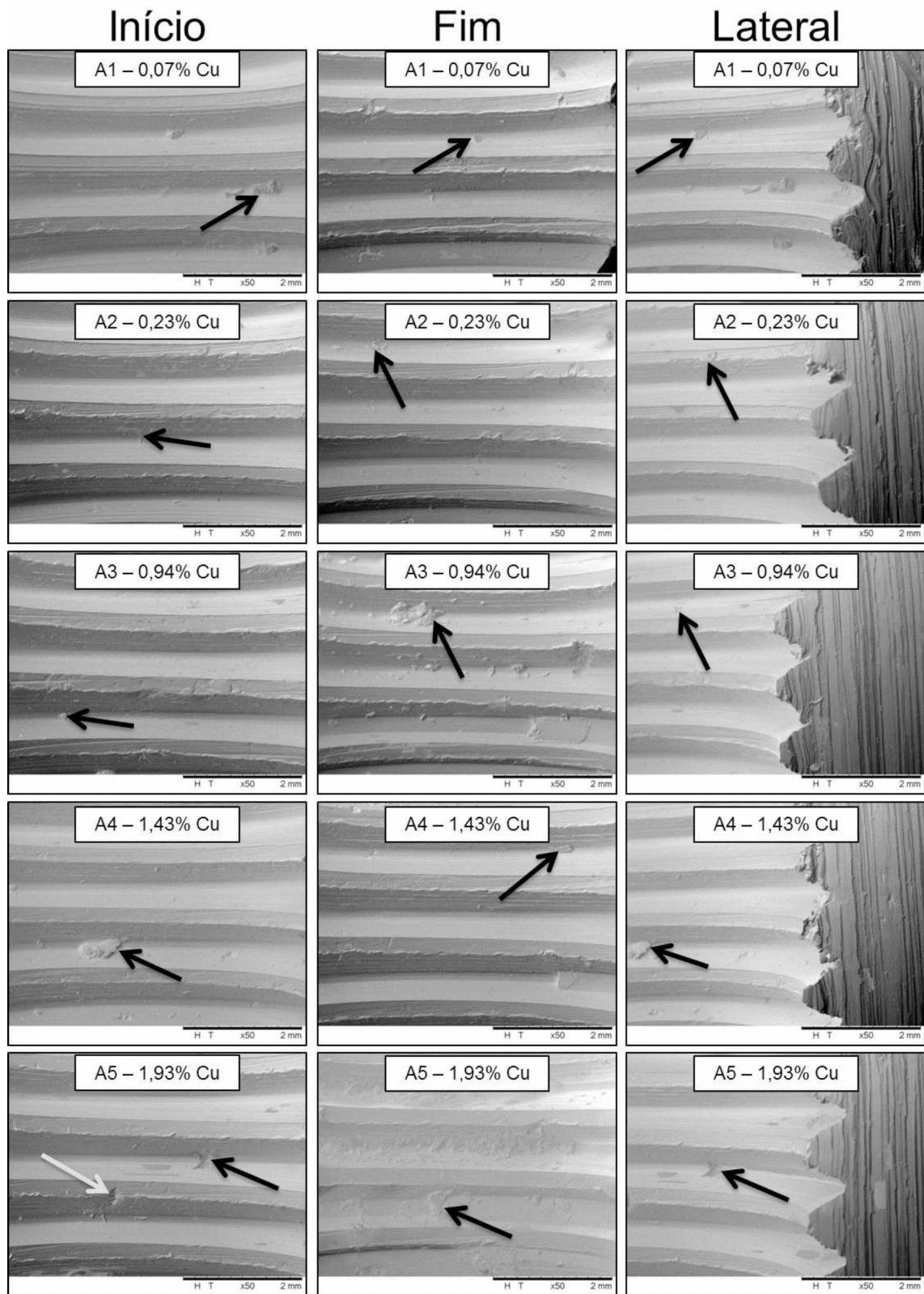


Figura 4.52. Imagens obtidas por MEV dos filetes das roscas produzidas no rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

#### 4.4.3 Alterações subsuperficiais

Na Fig. 4.53 são apresentadas as micrografias obtidas por microscopia ótica da seção transversal das rosas para análise de alterações subsuperficiais durante o rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre em aumentos de 100x, 200x e 500x. A partir da figura, principalmente no aumento de 500x é possível perceber uma pequena camada de material deformado próxima à superfície dos filetes das rosas. Fazendo uma análise visual, aparentemente esta deformação se apresentou de maneira mais evidente para as amostras 2, 3 e 4.

A fim de comprovar e tentar quantificar esta deformação plástica (zona afetada pelo corte) foram realizados ensaios de microdureza. Doze indentações foram realizadas na seção de um filete e mais três indentações entre dois filetes partindo da superfície usinada em direção ao centro do material. Os valores de microdureza obtidos em diferentes posições do filete da rosa são apresentados na Fig. 4.54.

A partir da Fig. 4.54 é possível observar que os pontos de medição próximos às bordas do filete apresentaram maiores valores de microdureza para todas as amostras da liga de alumínio. Os pontos 1, 3, 4, 7 e 12 são exemplos destes pontos. Além disso, estes valores de microdureza obtidos são maiores que a microdureza média de cada amostra. Tomando o ponto 1 como exemplo, a amostra 1 (0,07% Cu) apresentou microdureza neste ponto de 134 HV, cerca de 11% maior que a microdureza média (121,2 HV) desta amostra. Para a amostra 2 (0,23% Cu), a microdureza do ponto 1 foi de 124 HV, 9% maior que sua microdureza média (113,2 HV). Já na amostra 3 (0,94% Cu) a microdureza do ponto 1 obtida foi de 133 HV, enquanto sua microdureza média é 124 HV, o que corresponde a um aumento de 7%. Para a amostra 4 (1,43% Cu), a microdureza do ponto 1 obtida foi 141 HV, cerca de 6% maior que a microdureza média de 133,4 HV desta amostra. Por fim, para a amostra 5 (1,93% Cu), a microdureza do ponto 1 foi 161 HV, enquanto sua microdureza média é 141,4 HV, resultando em um aumento de 14%.

Outra observação importante foram os valores de microdureza obtidos nos pontos 13, 14 e 15. Para todas as amostras ensaiadas foi verificado um decréscimo da microdureza à medida que se distancia da superfície usinada.

A razão mais provável pelo aumento da microdureza das amostras em regiões próximas às bordas do filete é a deformação plástica sofrida pelo material durante o rosqueamento. Esta deformação plástica, quando ocorre à temperatura abaixo da temperatura de recristalização do material, provoca o endurecimento do material devido à deformação plástica. Este fenômeno é denominado encruamento.

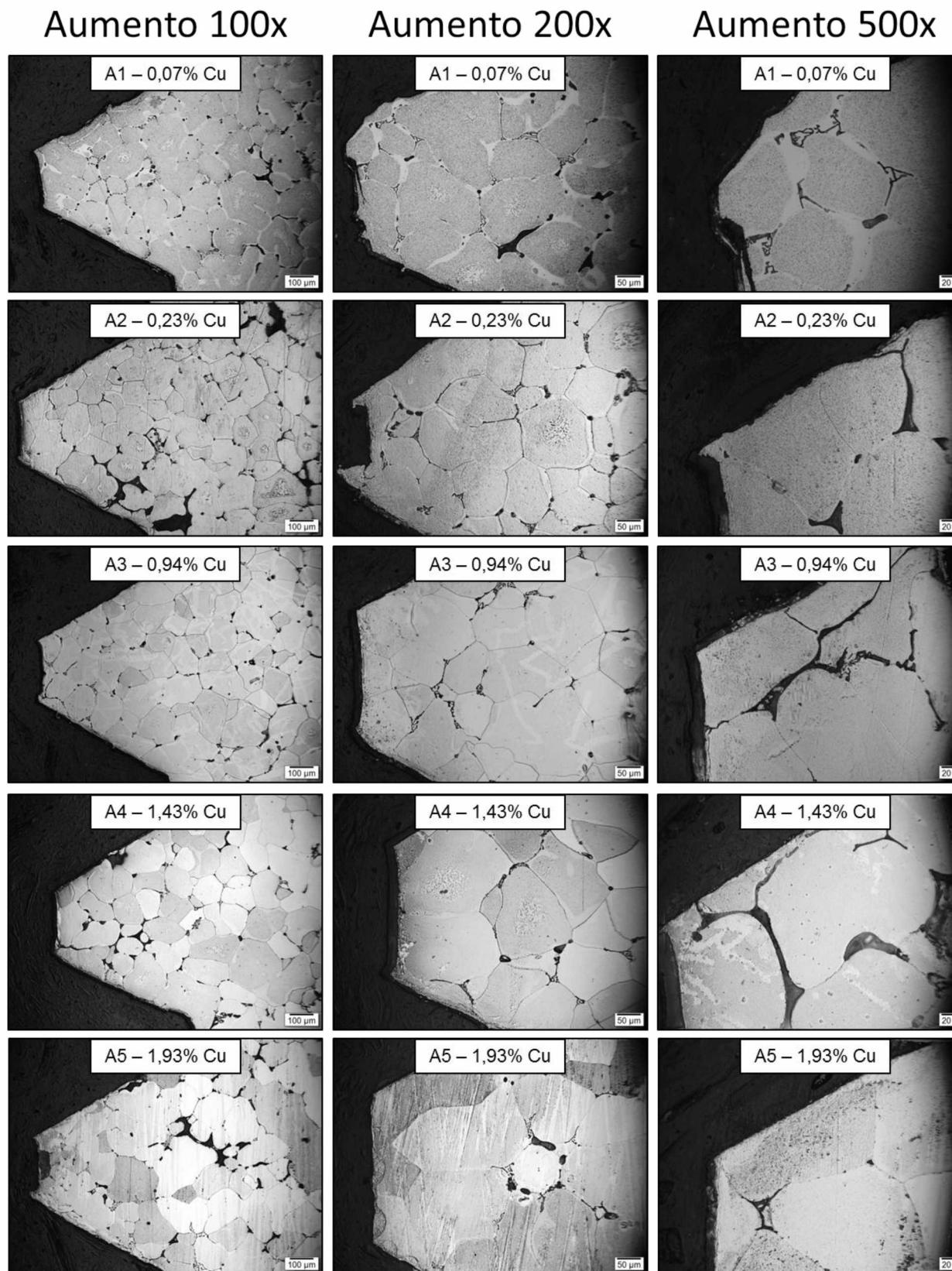


Figura 4.53. Micrografias obtidas por microscopia ótica da seção transversal dos furos para análise de alterações superficiais durante o rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre em aumentos de 100x, 200x e 500x

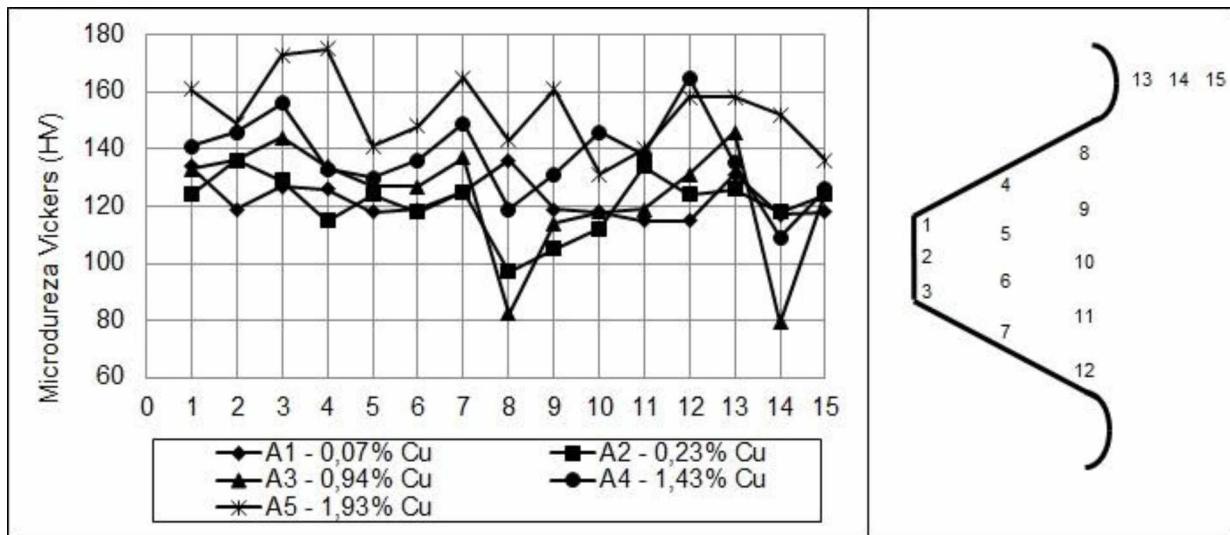


Figura 4.54. Microdureza Vickers em diferentes pontos de um filete de rosca gerado no processo de rosqueamento das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

#### 4.5 Classificação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre quanto à usinabilidade

A usinabilidade de amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre foi investigada neste trabalho a partir dos processos de furação, alargamento e rosqueamento. É sempre importante ressaltar que a usinabilidade não é uma propriedade do material. Mas sim, o modo como ele se comporta durante a usinagem. Isso se deve aos diversos fatores que influenciam a usinabilidade, já comentados anteriormente.

Durante os processos de usinagem desenvolvidos neste trabalho, vários parâmetros de saída (medidas de usinabilidade) foram medidos. A fim de apresentar uma visão global do efeito da adição de cobre na liga de alumínio 6351, nesta seção foi realizado um resumo dos resultados obtidos. Assim, será possível classificar as amostras ensaiadas em termos de usinabilidade.

Para tanto, foi adotado o critério exposto a seguir. Primeiramente, as amostras foram pontuadas quantitativamente. Como foram estudadas cinco amostras, para cada parâmetro estudado elas foram qualificadas do primeiro ao quinto lugar. A amostra que apresentou o melhor resultado em relação a um determinado parâmetro, foi pontuada com 5 pontos. A amostra que foi classificada em segundo lugar foi pontuada com 4 pontos e assim por diante. Até que a amostra que apresentou o pior resultado

foi pontuada com 1 ponto. Para os casos em que não houve diferença estatística entre os resultados obtidos por mais de uma amostra, e não foi possível a tomada de decisão, foi considerado um empate. Então, estas amostras receberam a mesma pontuação referente à classificação dentro das cinco amostras. Ao final, foi calculado o valor total a partir da soma da pontuação obtida por cada amostra em cada parâmetro. É importante ressaltar que não foram aplicados pesos diferentes aos parâmetros de usinabilidade. Todos foram utilizados na análise com a mesma importância. Na Tab. 4.33 são apresentadas as pontuações recebidas por cada amostra da liga de alumínio 6351 nos diversos parâmetros de usinabilidade medidos.

Tabela 4.33. Pontuação das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre nos diversos parâmetros de usinabilidade avaliados

	Amostras da liga de alumínio 6351				
Parâmetros de Usinabilidade	A1 0,07% Cu	A2 0,23% Cu	A3 0,94% Cu	A4 1,43% Cu	A5 1,93% Cu
Torque na furação	4	5	4	3	3
Força de avanço na furação	5	4	4	3	2
Rugosidade na furação	5	4	4	3	3
Tamanho dos cavacos na furação	4	5	4	4	4
Altura das rebarbas de entrada na furação	4	5	5	5	5
Altura das rebarbas de saída na furação	5	5	5	5	5
Torque no alargamento	3	3	3	5	4
Força de avanço no alargamento	5	4	4	3	3
Circularidade no alargamento	3	3	4	5	5
Cilindricidade no alargamento	4	4	4	5	3
Rugosidade no alargamento	4	4	4	5	4
Torque no rosqueamento	4	5	5	4	4
<b>Total</b>	<b>50</b>	<b>51</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>45</b>

onde: 1 : usinabilidade mais baixa

5 : usinabilidade mais alta

A partir da Tab. 4.33 é possível observar a significativa influência da adição de cobre sobre a usinabilidade da liga de alumínio 6351. É importante sempre levar em consideração a diferença das diversas amostras ensaiadas neste trabalho em relação à amostra 1. A amostra 1 possui 0,07% Cu. Segundo a Associação do alumínio,

dentre as amostras utilizadas, este teor de cobre é o mais próximo da composição química presente na liga de alumínio 6351 comercial.

As amostras 3 (0,94% Cu) e 4 (1,43% Cu) apresentaram usinabilidade semelhante à da amostra 1, com parâmetro de usinabilidade 50. Já a amostra 5 (1,93% Cu) resultou em usinabilidade mais baixa (parâmetro de usinabilidade = 45) que a amostra 1. Por fim, a amostra 2 (0,23% Cu) resultou em usinabilidade (parâmetro de usinabilidade = 51) levemente mais alta em relação à amostra 1 e também em relação às demais amostras ensaiadas.

Durante a seleção de um material para determinada aplicação é levado em consideração uma variedade de propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, óticas, etc. Além destas, também é muito importante o comportamento do material durante os principais processos de fabricação mecânica, como usinagem, soldagem, fundição, conformação, etc. Assim, a usinabilidade se destaca como um dos principais parâmetros devido à grande utilização da usinagem na indústria mecânica. Por fim, e não menos importante, o custo também é um fator decisivo na decisão final da seleção do material mais adequado para a referida aplicação.

Por isso, na Fig. 4.55 é apresentado tanto o parâmetro de quantificação de usinabilidade encontrado, como também as propriedades mecânicas das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre medidas neste trabalho. A principal observação a partir da Fig. 4.55 é a de que a adição de cobre na liga de alumínio 6351 até 1,43% Cu, proporciona a obtenção de uma liga de alumínio mais dura e resistente que a comercial, sem prejuízos em sua usinabilidade. Também, é importante ressaltar que a adição de 0,23% Cu implicou nos melhores resultados de usinabilidade obtidos nos processos de usinagem utilizados neste trabalho.

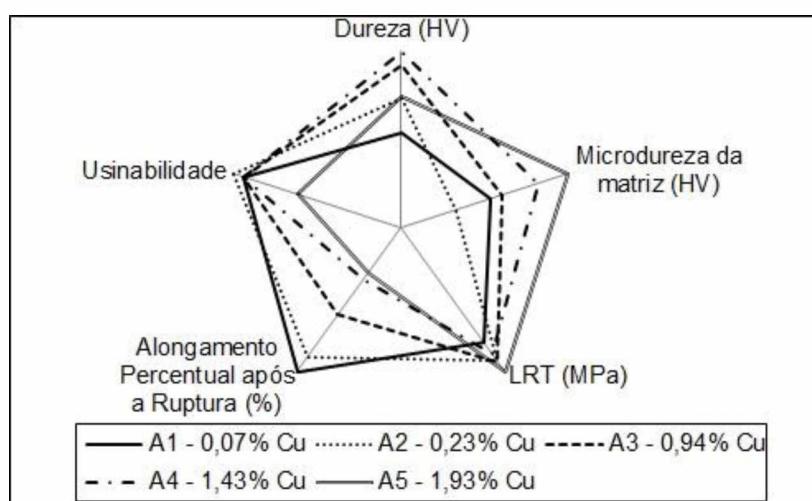


Figura 4.55. Usinabilidade e propriedades mecânicas das amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES

A investigação acerca do efeito do teor de cobre na usinabilidade da liga de alumínio 6351 levou a conclusões importantes sobre o comportamento desta liga durante os ensaios de furação, alargamento e rosqueamento desenvolvidos no presente trabalho.

Na análise microestrutural das amostras da liga de alumínio 6351 foi observada uma tendência de aumento da porosidade da liga com o aumento do teor de cobre. Foi identificada uma partícula de segunda fase endurecedora rica em cobre, localizada preferencialmente nos contornos de grão e composta ainda pelos elementos Al, Fe, Mn e Si. Além disso, também foi percebido o aumento do teor de cobre nesta partícula à medida que foi aumentada a quantidade de cobre adicionada à liga de alumínio.

A dureza média da liga de alumínio 6351 aumentou cerca de 16% com o aumento do teor de cobre de 0,07% Cu até 1,43% Cu. Para o maior nível de cobre utilizado (1,93% Cu) a dureza não seguiu a tendência de aumento.

O aumento no teor de cobre de 0,07% Cu para 1,93% Cu resultou, em média, no aumento de cerca de 17% na microdureza medida na matriz de alumínio, exceto a amostra 3 (0,94% Cu). Ao mesmo tempo, este aumento no teor de cobre implicou em aumento de cerca de 50% na microdureza medida na partícula de segunda fase.

Nos ensaios de tração o aumento no teor de cobre (de 0,07% Cu para 1,93% Cu) adicionado à liga de alumínio 6351 resultou no aumento do limite de resistência à tração em cerca de 7%. Por outro lado, este aumento na quantidade de cobre resultou em decréscimo no alongamento da liga de alumínio em cerca de 20%.

Os valores médios da energia absorvida compensada obtidos nos ensaios de impacto para as amostras com diferentes teores de cobre se apresentaram bem próximos, não podendo ser comprovada a diferença significativa entre os resultados.

Os valores médios do torque e da força de avanço na ferramenta de corte durante os ensaios de furação não sofreram influência significativa do aumento da velocidade de corte. Por outro lado, o aumento do avanço da ferramenta de corte resultou em aumento praticamente linear do torque e da força de avanço. A amostra 2 (0,23% Cu) resultou em média nos menores valores de torque e força de avanço para a maioria das condições de corte utilizadas nos ensaios de furação. A maior resistência mecânica e dureza apresentada pelas amostras com maior quantidade de cobre resultaram em maior esforço durante o corte, elevando o torque e força de avanço.

O diâmetro médio dos furos obtidos na furação de todas as amostras foram maiores que o diâmetro nominal e ficaram dentro do afastamento máximo para a tolerância H e qualidade de trabalho IT11. Não houve influência significativa do teor de cobre sobre o diâmetro médio dos furos obtidos. O parâmetro de rugosidade Rq das paredes dos furos apresentou uma leve tendência de aumento com o aumento do avanço. Entretanto, não sofreu influência significativa do aumento da velocidade de corte. O aumento do teor de cobre na furação resultou em efeito prejudicial ao acabamento superficial dos furos. Assim, a amostra 1 (0,07%) apresentou os menores valores de rugosidade durante os ensaios de furação.

Por meio de análise microestrutural e ensaios de microdureza foi verificada a presença de uma zona afetada pelo corte próxima à superfície usinada durante a furação. Foi verificada diminuição da microdureza da amostra 1 próximo à superfície usinada, provavelmente devido ao aquecimento durante a furação. Já as amostra 3 e 4 sofreram endurecimento próximo à superfície usinada, evidenciando deformação plástica sofrida durante a furação.

Os cavacos formados na furação das amostras da liga de alumínio 6351 se apresentaram na forma de leque, forma considerada ideal para o processo de furação. A amostra 2 (0,23% Cu) apresentou o maior valor de número de cavacos por grama obtidos na furação, evidenciando que os cavacos na usinagem desta amostra se quebraram mais facilmente. A análise de MEV dos cavacos não indicou presença de material aderido à superfície inferior dos mesmos. Já as imagens da broca helicoidal após os ensaios de furação mostraram uma camada de material aderido, evidenciando a presença de APC durante o corte. Além disso, não foi verificado desgaste significativo nas arestas de corte da ferramenta após os ensaios.

A altura da rebarba de entrada obtida no processo de furação sofreu decréscimo, de cerca de 50%, à medida que se aumentou a quantidade de cobre (de 0,07% Cu para 1,93% Cu) adicionada à liga de alumínio 6351. Já a rebarba de saída diminui em cerca de 30% com o aumento do teor de cobre. As rebarbas de entrada

formadas podem ser classificadas como do tipo rebarba uniforme, enquanto as rebarbas de saída do tipo transiente.

Assim como na furação, o torque e a força de avanço não sofreram influência significativa do aumento da velocidade de corte no processo de alargamento. Porém, o aumento do avanço resultou em aumento do torque e da força de avanço neste processo. Foi observado que o aumento do teor de cobre presente na liga de alumínio 6351 de 0,07% Cu até 1,43% Cu resultou no decréscimo do torque e da força de avanço no alargamento. Já quando se adiciona 1,93% Cu resulta no maior valor médio do torque e força de avanço nos ensaios de alargamento.

O diâmetro médio dos furos obtidos no alargamento de todas as amostras foram maiores que o diâmetro nominal e ficaram fora do afastamento máximo para a tolerância H e qualidade de trabalho IT7. A amostra 2 (0,23%), em média, foi a que resultou em diâmetro médio mais próximo do diâmetro nominal.

Os desvios geométricos de circularidade e cilindricidade não foram influenciados significativamente pelos parâmetros de corte velocidade de corte e avanço. Os menores valores de circularidade e cilindricidade foram obtidos no alargamento da amostra 4 (1,43% Cu), em razão da maior estabilidade do processo, e consequentemente menores deflexões e vibrações, devido ao menor esforço aplicado sobre a ferramenta de corte durante o alargamento. O que, juntamente com a menor altura das rebarbas, também explica o melhor acabamento superficial obtido no alargamento da amostra 4. Além disso, o aumento do avanço teve efeito prejudicial sobre a rugosidade, o que não foi observado para o aumento da velocidade de corte.

A partir de análise microestrutural e ensaios de microdureza também foi verificada a existência de uma zona afetada pelo corte no alargamento. As amostras 1, 3 e 4 sofreram diminuição da microdureza, enquanto as amostras 2 e 5 sofreram endurecimento próximo à superfície usinada no alargamento.

O torque máximo na ferramenta de corte durante o processo de rosqueamento não sofreu influência significativa do aumento da velocidade de corte. Os menores valores do torque foram obtidos no rosqueamento das amostras 2 (0,23% Cu) e 3 (0,94% Cu). A partir de análise por MEV foi verificado que os filetes das rosas formadas no rosqueamento de todas as amostras se apresentaram íntegros e sem defeitos. Foi também identificada a presença de material aderido na forma de partículas e aglomerados nas rosas para todas as amostras rosqueadas. Já nos ensaios de microdureza foi observado endurecimento nas bordas do filete da rosa para todas as amostras ensaiadas, devido à deformação plástica sofrida durante o processo de rosqueamento.

Quanto ao parâmetro de usinabilidade definido no presente trabalho, as amostras 3 (0,94% Cu) e 4 (1,43% Cu) apresentaram usinabilidade semelhante à da amostra 1 (0,07% Cu). A amostra 1 possui a composição química mais próxima da liga de alumínio 6351 comercial. Já a amostra 5 (1,93% Cu) resultou em usinabilidade mais baixa que a amostra 1, enquanto a amostra 2 (0,23% Cu) resultou em usinabilidade levemente mais alta em relação à amostra 1 e também em relação às demais amostras ensaiadas.

Desta forma, a adição de cobre na liga de alumínio 6351 até 1,43% Cu, proporciona a obtenção de uma liga de alumínio mais dura e resistente que a comercial, sem prejuízos em sua usinabilidade.

Finalmente, este trabalho confirma a significativa influência de fatores metalúrgicos sobre a usinabilidade da liga de alumínio 6351. Assim, é possível concluir que esforços na busca de ganhos na produção com diminuição de custo, forças de usinagem, melhoria do acabamento e otimização dos processos de produção deve levar em conta não só aspectos como tempos de usinagem, parâmetros de corte, uso de lubrificantes e geometria e material da ferramenta de corte. Mas também, a composição, microestrutura e propriedades do material a ser usinado.

## Propostas para trabalhos futuros

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho, é possível sugerir algumas investigações complementares:

- Realizar a usinagem da amostra da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre em outros processos, verificando se os resultados obtidos neste trabalho podem ser extrapolados para outros processos de usinagem.
- Investigar a geração de calor na usinagem da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre para melhor entendimento das alterações subsuperficiais identificadas.
- Realizar uma análise mais profunda acerca da formação dos cavacos e formação de aresta postiça de corte nas amostras da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre.
- Investigar a influência do método de aplicação e do tipo de fluido de corte sobre a usinabilidade da liga de alumínio 6351 com diferentes teores de cobre
- Investigar a influência do sobremetal na operação de alargamento com diferentes fluidos de corte.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Relatório de Sustentabilidade.** São Paulo, 2012. 66p. Relatório.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6152 - Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente.** Rio de Janeiro, 2002. 34p. Norma técnica.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 209 - Alumínio e suas ligas - Composição química.** Rio de Janeiro, 2010a. 4p. Norma técnica.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 5420 - Alargadores - Termos, definições e tipos.** Rio de Janeiro, 2010b. 19p. Norma técnica.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 5967 - Machos para rosscar - Nomenclatura dos principais tipos e terminologia.** Rio de Janeiro, 2010c. 24p. Norma técnica.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 148-1 - Materiais metálicos - Ensaio de impacto por pêndulo Charpy - Parte 1: Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2013. 26p. Norma técnica.

ALCOA; ALUMÍNIO & CIA. **Ligas e Têmperas de Extrusão,** 2010. 52p. Catálogo.

ASM INTERNATIONAL. **Metals Handbook Vol2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.** 10. ed. United States of America: ASM International, 1990a. 3470p.

ASM INTERNATIONAL. **Metals Handbook Vol. 16: Machining.** 10. ed. United States

of America: ASM International, 1990b. 944p.

ASM INTERNATIONAL. **ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys**. United States of America: ASM International, 1993. 784p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **ABAL**. Disponível em: <[abal.org.br](http://abal.org.br)>. Acesso em: 4 maio. 2016.

AURICH, J. C. et al. Burrs - Analysis, Control and Removal. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 58, p. 519–542, 2009.

BATZER, S. . A. et al. Chip morphology and hole surface texture in the drilling of cast Aluminum alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 79, n. 1–3, p. 72–78, 1998.

BEZERRA, A. A. et al. Effects of machining parameters when reaming aluminium-silicon (SAE 322) alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 112, n. 2–3, p. 185–198, 2001.

BHOWMICK, S.; LUKITSCH, M. J.; ALPAS, A. T. Tapping of Al-Si alloys with diamond-like carbon coated tools and minimum quantity lubrication. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 15, p. 2142–2153, 2010.

BIERMANN, D.; HARTMANN, H. Reduction of burr formation in drilling using cryogenic process cooling. **Procedia CIRP**, v. 3, n. 1, p. 85–90, 2012.

BOGDANOFF, T.; DAHLSTROM, J. **The influence of copper on an Al-Si-Mg alloy (A356) - Microstructure and mechanical properties**. 2009. 69 f. Tese de Doutorado - Jonkoping University, Sweden.

BORBA, R. B. DE. **Estudo da Influência das Afiações em Brocas Escalonadas de Canal Reto na Furação da Liga de Alumínio SAE 306**. 2013. 91 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro. 5<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC Editora S.A., 2002. 589p.

CASTILLO, W. J. G. **Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com**

**Brocas de Metal-Duro com Canais Retos.** 2005. 134 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

**CBA - COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO; VOTORANTIM METAIS. Catálogo de Perfis Industriais.** São Paulo, 2012. 30p. Catálogo.

CHAKRABARTI, D. J.; LAUGHLIN, D. E. Phase relations and precipitation in Al-Mg-Si alloys with Cu additions. **Progress in Materials Science**, v. 49, n. 3-4, p. 389-410, 2004.

**CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CNI; ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. A Sustentabilidade da Indústria Brasileira do Alumínio - Encontro da Indústria para a Sustentabilidade.** Brasília, 2012. 44p. Relatório.

DA CUNHA, D. F.; DA SILVA, M. B. **Effect of Silicon Content of Aluminum Alloy 6351 in Turning Process.** International M. 2012, Houston, Texas, USA. Anais...

DA MOTA, P. R. **Investigação do Comportamento de Ferramentas de Aço-Rápido no Processo de Rosqueamento Interno em Alta Velocidade de Corte.** 2006. 142 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DA MOTA, P. R. **Estudo do Processo de Rosqueamento com Macho de Corte de Metal Duro em Ferro Fundido Vermicular.** 2009. 160 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DASCH, J. M. et al. The Effect of Free-Machining Elements on Dry Machining of B319 Aluminum Alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 10, p. 4638-4644, 2009.

DE SOUZA, A. J. **Processos de Fabricação por Usinagem - Parte 2**, 2011. 113 f. Apostila – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DING, L. et al. The natural aging and precipitation hardening behaviour of Al-Mg-Si-Cu alloys with different Mg/Si ratios and Cu additions. **Materials Science and Engineering: A**, v. 627, p. 119-126, 2015.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos**

**Materiais.** 8<sup>a</sup> ed. São Paulo: Editora Artliber, 2013. 269p.

**DORMER. Catálogo de Produtos,** 2015. 560 p. Catálogo.

EIVANI, A. R.; TAHERI, A. K. Modeling age hardening kinetics of an Al-Mg-Si-Cu aluminum alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 205, n. 1–3, p. 388–393, 2008.

ELSEBAIE, O. et al. Impact toughness of Al–Si–Cu–Mg–Fe cast alloys: Effects of minor additives and aging conditions. **Materials & Design**, v. 60, p. 496–509, 2014.

EQUILAM. **Software de Operação Máquina de Impacto Charpy para Metais.** São Paulo. 19p. Manual de utilização.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1970. 751p.

FROEHLICH, A. R. et al. The correlation of machinability and microstructural characteristics of different extruded aluminum alloys. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 16, n. 6, p. 784–791, 2007.

GABOR, H. Como atuam os alargadores. **Revista Máquinas e Metais**, p. 16–21, 1982.

GARCÍA-GARCÍA, G.; ESPINOZA-CUADRA, J.; MANCHA-MOLINAR, H. Copper content and cooling rate effects over second phase particles behavior in industrial aluminum-silicon alloy 319. **Materials and Design**, v. 28, n. 2, p. 428–433, 2007.

GILLESPIE, L. K. **Deburring and Edge Finishing Handbook.** Dearborn Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1999.

GONÇALVES, R. A. **Investigação da Usinabilidade das ligas de alumínio da série 6XXX.** 2012. 124 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

GROSSELLE, F.; TIMELLI, G.; BONOLLO, F. Doe applied to microstructural and

mechanical properties of Al-Si-Cu-Mg casting alloys for automotive applications. **Materials Science and Engineering A**, v. 527, n. 15, p. 3536–3545, 2010.

HAN, Y. et al. Optimizing the tensile properties of Al–Si–Cu–Mg 319-type alloys: Role of solution heat treatment. **Materials & Design**, v. 58, p. 426–438, 2014.

IBRAHIM, M. F. et al. Metallurgical parameters controlling the microstructure and hardness of Al-Si-Cu-Mg base alloys. **Materials and Design**, v. 32, n. 4, p. 2130–2142, 2011a.

IBRAHIM, M. F. et al. Impact toughness and fractography of Al-Si-Cu-Mg base alloys. **Materials and Design**, v. 32, n. 7, p. 3900–3910, 2011b.

INDAÇO. **Catálogo de Produtos**, 2015. 143p. Catálogo.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **World Aluminium**. Disponível em: <[www.world-aluminium.org](http://www.world-aluminium.org)>. Acesso em: 30 maio. 2016.

JAAFAR, A. et al. Effect of Mg, Si and Cu content on the microstructure of dilute 6000 series aluminium alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 509, n. 35, p. 8632–8640, 2011.

JI, Y. L.; GUO, F. AN; PAN, Y. F. Microstructural characteristics and paint-bake response of Al-Mg-Si-Cu alloy. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)**, v. 18, n. 1, p. 126–131, 2008.

JOHNE, P. **Machining of Products** Table of Contents. **TALAT Lecture 3100**. European Aluminium Association, 1994. 38p.

KAMIYA, M.; YAKOU, T. Role of Second-Phase Particles in Chip Breakability in Aluminum Alloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 48, n. 6, p. 688–697, 2008.

KATGERMAN, L.; ESKIN, D. Hardening, Annealing and Aging. In: **Handbook of Aluminum Vol.1 - Physical Metallurgy and Processes**. 1. ed. New York, USA: Marcel Dekker, Inc., 2003. p. 259–303.

KILIC, D. S.; RAMAN, S. Observations of the Tool-Chip Boundary Conditions in

Turning of Aluminum Alloys. **Wear**, v. 262, n. 7–8, p. 889–904, 2007.

KIM, J. et al. Effects of Cu and Ag additions on age-hardening behavior during multi-step aging in Al-Mg-Si alloys. **Materials Science and Engineering A**, v. 560, p. 154–162, 2013.

KIM, J.; MIN, S.; DORNFELD, D. A. Optimization and control of drilling burr formation of AISI 304L and AISI 4118 based on drilling burr control charts. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 41, n. 7, p. 923–936, 2001.

KISTLER. **Cutting Force Measurement**, 2009. 43p. Catálogo.

LI, Y. J.; BRUSETHAUG, S.; OLSEN, A. Influence of Cu on the mechanical properties and precipitation behavior of AlSi7Mg0.5 alloy during aging treatment. **Scripta Materialia**, v. 54, n. 1, p. 99–103, 2006.

LIANG, W. J. et al. General aspects related to the corrosion of 6xxx series aluminium alloys: Exploring the influence of Mg/Si ratio and Cu. **Corrosion Science**, v. 76, p. 119–128, 2013.

LIU, C. et al. Effect of copper on precipitation and baking hardening behavior of Al-Mg-Si alloys. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 24, n. 7, p. 2289–2294, 2014.

LU, T. et al. Optimizing the tensile properties of Al–11Si–0.3Mg alloys: Role of Cu addition. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 631, p. 276–282, 2015.

MA, Z. et al. A study of tensile properties in Al-Si-Cu and Al-Si-Mg alloys: Effect of ??-iron intermetallics and porosity. **Materials Science and Engineering A**, v. 490, n. 1–2, p. 36–51, 2008.

MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 397p.

MAN, J.; JING, L.; JIE, S. G. The effects of Cu addition on the microstructure and

thermal stability of an Al-Mg-Si alloy. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 437, n. 1-2, p. 146-150, 2007.

MERCHANT, M. E. AN INTERPRETIVE LOOK AT 20TH CENTURY RESEARCH ON MODELING OF MACHINING. **Machining Science and Technology**, v. 2, n. 2, p. 157-163, 1 dez. 1998.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 3<sup>a</sup> ed. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 706p.

NOUARI, M. et al. Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 12-13, p. 1436-1442, 2005.

NOVASKI, O. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1994. 119p.

OGATA, K. **Discrete-Time Control Systems**. 2<sup>a</sup> ed. New Jersey, USA: Prentice-Hall International, Inc., 1995. 744p.

OSG SULAMERICANA. **Catálogo de Produtos**, 2012. 544p. Catálogo.

PEREIRA, I. C. **Comparação entre os Processos de Rosqueamento Interno por Usinagem e Laminação**, 2014. 121 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PEREIRA, I.; DA SILVA, M. B.; GUIMARÃES, V. **Análise da usinabilidade através da força axial e do torque no rosqueamento de dois ferros fundidos cinzentos ligados ao CrCuSn e CrCuSnMo e um ferro fundido vermicular da classe 350**. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. 2010, Campina Grande-PB Anais...9p.

PILNNY, L. et al. Hole quality and burr reduction in drilling aluminium sheets. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 5, n. 2, p. 102-107, 2012.

REIS, D. D.; ABRÃO, A M. The machining of aluminium alloy 6351. **Proceedings of**

**the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 219, n. 1, p. 27–33, 2005.

RICHT, C.; SANDVIK COROMANT. Como escolher o macho correto para a rosca correta. **O Mundo da Usinagem**, p. 36, abr. 2014.

ROSA, V. A. DE O. **Investigação da Operação de Alargamento dos Furos Usinados em Pistões de Ferro-Carbono Sinterizado**, 2012. 122 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SAITO, T. et al. The effects of quench rate and pre-deformation on precipitation hardening in Al-Mg-Si alloys with different Cu amounts. **Materials Science and Engineering A**, v. 609, p. 72–79, 2014.

SAMUEL, A. M. et al. Defects related to incipient melting in Al-Si-Cu-Mg alloys. **Materials and Design**, v. 52, p. 947–956, 2013.

SANDVIK. **Suplemento dos Catálogos de Ferramentas para Torneamento e Rotativas 12.2**, 2012. 643p. Catálogo.

SANDVIK. **Metal Cutting Technology E-Learning**, 2013. Apostila

SANTOS, R. G. DOS; COSTA, D. D. DA. **Avaliação do Processo de Alargamento de Guias de Válvula com Ferramentas Monocortantes**. Congresso Brasileiro de Fabricação - Cobef. 2005. Anais... 9p.

SCHROETER, R. B.; STOETERAU, R. L.; WEINGAERTNER, W. L. **Processos de Usinagem - Fabricação por Remoção de Material**. Santa Catarina, 2004. 180p. Apostila.

SHABESTARI, S. G.; MOEMENI, H. Effect of copper and solidification conditions on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 153–154, n. 1–3, p. 193–198, 2004.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II: Brocas, Alargadores, Ferramentas de**

**Roscar, Fresas, Brochas, Rebolos e Abrasivos.** 2<sup>a</sup> ed. Florianópolis/SC: Editora da UFSC, 1995. 326p.

SVERDLIN, A. Properties of Pure Aluminum. In: **Handbook of Aluminum Vol.1 - Physical Metallurgy and Processes.** 1. ed. New York, USA: Marcel Dekker, Inc. p. 33–79.

TELECURSO 2000 PROFISSIONALIZANTE. **Mecânica - Processos de Fabricação.** São Paulo, 1997. 159p. Apostila.

THE ALUMINUM ASSOCIATION. **International Alloy Designation and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys.** Arlington, VA. The Aluminum Association, Inc., 2015. 38p.

TIRYAKIOGLU, M.; STALEY, J. T. Physical Metallurgy and the Effect of Alloying Additions in Aluminum Alloys. In: **Handbook of Aluminum Vol.1 - Physical Metallurgy and Processes.** 1. ed. New York, USA: Marcel Dekker, Inc., 2003. p. 81–209.

TONSHOFF, H. K. et al. Machines of Holes - Developments in Drilling Technology. **Annals of CIRP**, v. 43, p. 551–561, 1994.

TRENT, E.; WRIGHT, P. **Metal Cutting.** 4. ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000. 446p.

VOLLERTSEN, F. et al. Size effects in manufacturing of metallic components. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 58, n. 2, p. 566–587, 2009.

WANG, E. R. et al. Improved mechanical properties in cast Al–Si alloys by combined alloying of Fe and Cu. **Materials Science and Engineering: A**, v. 527, n. 29–30, p. 7878–7884, 2010.

WANG, G. et al. Influence of Cu content on ageing behavior of AlSiMgCu cast alloys. **Materials and Design**, v. 28, n. 3, p. 1001–1005, 2007.

YAMADA, Y. **Melhoria da Produtividade na obtenção de Furos em Liga de**

**Alumínio Aeronáutico com Ferramentas de Aço Rápido**, 2010. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

YANG, Y. et al. Effect of existing form of alloying elements on the microhardness of Al-Si-Cu-Ni-Mg piston alloy. **Materials Science and Engineering A**, v. 528, n. 18, p. 5723–5728, 2011.

YANG, Y. et al. Evolution of nickel-rich phases in Al-Si-Cu-Ni-Mg piston alloys with different Cu additions. **Materials and Design**, v. 33, n. 1, p. 220–225, 2012.

YIN, D. et al. Effect of natural ageing and pre-straining on the hardening behaviour and microstructural response during artificial ageing of an Al – Mg – Si – Cu alloy. **Journal of Materials and Design**, v. 95, p. 329–339, 2016.

ZEDAN, Y. et al. **Burr Size Minimization When Drilling 6061-T6 Aluminum Alloy**. International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 2012, Houston, Texas, USA. **Anais**... p. 1-7

ZEDAN, Y.; ALKAHTANI, S. Influence of the microstructure on the machinability of heat-treated Al-10.8% Si cast alloys: Role of copper-rich intermetallics. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 213, n. 2, p. 167–179, 2013.

ZEREN, M. Effect of copper and silicon content on mechanical properties in Al-Cu-Si-Mg alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 169, n. 2, p. 292–298, 2005.

ZEREN, M.; KARAKULAK, E.; GÜMÜS, S. Influence of Cu addition on microstructure and hardness of near-eutectic Al-Si-xCu-alloys. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)**, v. 21, n. 8, p. 1698–1702, 2011.

ZHENG, Y. et al. Effects of Cu content and Cu/Mg ratio on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu-Mg alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 649, p. 291–296, 2015.