

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2012

LUCAS TADEU SILVA MOREIRA

A INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE NO TORNEAMENTO
DA LIGA DE ALUMÍNIO AA 7075

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Guaratinguetá

2012

- M838i Moreira, Lucas Tadeu Silva
A influência da aplicação de fluido de corte no torneamento da liga de alumínio AA 7075 / Lucas Tadeu Silva Moreira – Guaratinguetá : [s.n], 2012.
114 f : il.
Bibliografia: f. 97-102
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.
Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
1. Liga de alumínio - Torneamento 2. Desgaste mecânico I. Título
- CDU 669.715(043)

LUCAS TADEU SILVA MOREIRA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCOS VALERIO RIBEIRO
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO
Unesp-Feg


Prof. Dr. AMAURI HASSUI
UNICAMP

Dezembro de 2012

DADOS CURRICULARES

LUCAS TADEU SILVA MOREIRA

| | |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| NASCIMENTO | 24.07.1984 – PINDAMONHANGABA / SP |
| FILIAÇÃO | Ademir Moreira Alaíde Fernandes da Silva Moreira |
| 2000/2001 | Curso Técnico em Mecânica na ETEC João Gomes de Araújo de Pindamonhangaba. |
| 2004/2008 | Curso de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica na Universidade de Taubaté. |

Dedico este trabalho, primeiramente a Deus, pela oportunidade de conquistar mais um sonho e pelas experiências vividas; E a minha família, pela confiança e participação nos momentos de conquista.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela oportunidade de concluir mais uma etapa de minha vida, onde me fortaleci ao superar cada momento de dificuldade.

À minha família pela confiança e por todo suporte afetivo, tornando este sonho em realidade.

À minha namorada Stephânia pelo incentivo e compreensão.

Ao professor Dr. Marcos Valério Ribeiro, agradeço a sua dedicação e auxílio, que para mim, foi essencial para a conclusão deste trabalho, além de sua amizade.

Ao Manoel, técnico do laboratório de usinagem, pelo apoio e orientação na realização dos ensaios.

Ao Renan, aluno do curso de mestrado, pelo apoio na realização dos ensaios.

Ao amigo Dr. Marcelo Acácio pelo incentivo dado para que realizasse o meu mestrado.

Aos gestores da área em que atuo na Gerdau pela confiança e apoio.

Ao Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP pelo apoio na realização deste trabalho de mestrado.

À FAPESP pelo apoio financeiro.

Este trabalho contou com apoio da seguinte entidade:

- FAPESP – através do projeto nº 10/06964-3

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará
ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

RESUMO

MOREIRA, L. T. S. A influência da aplicação de fluido de corte no torneamento da liga de alumínio AA 7075. 2012. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

Atualmente, dentre os tipos de metais utilizados na indústria metal-mecânica, as ligas de alumínio têm sido largamente utilizadas, principalmente na indústria aeroespacial, devido suas propriedades físicas e mecânicas. As ligas de alumínio mais utilizadas são as da série 7000, as quais apresentam ótimas propriedades após o tratamento térmico, sendo o Zn o seu principal elemento de liga seguido de Mg, Cu e Cr. Nas operações de usinagem existentes, o torneamento permanece como a operação mais importante no trabalho destas ligas, onde o aumento da produtividade e a redução dos custos de fabricação são a chave para o sucesso dos negócios. Testes de laboratório realizados anteriormente mostraram que a redução da temperatura de corte se apresenta como um fator importante para o aumento da vida da ferramenta. Em contrapartida, na última década, algumas pesquisas tiveram como meta restringir ao máximo o uso de fluidos refrigerante e/ou lubrificante na indústria metal-mecânica. Dentre os fatores que justificaram esse procedimento estão os custos operacionais da produção, as questões ecológicas acompanhadas das exigências legais de conservação do meio ambiente e a preservação da saúde do ser humano. Desta maneira, a técnica da mínima quantidade de fluido (MQF) ganhou espaço, baseada também na necessidade do uso de lubrificantes ecologicamente corretos e com altíssima taxa de redução de calor. O trabalho proposto visa estudar a influência da aplicação das técnicas de lubri-refrigeração abundante e de mínima quantidade de fluido (MQF) no processo de torneamento da liga de alumínio AA 7075, estabelecendo uma relação entre o comportamento da rugosidade, forma do cavaco e o desgaste da ferramenta de corte. Através dos resultados deste trabalho foi possível verificar a potencialidade de utilização da técnica de mínima quantidade de fluido (MQF) na usinagem da liga de alumínio AA 7075, haja vista o seu comportamento não ter sido inferior em relação ao desgaste das ferramentas, a rugosidade das superfícies e aos cavacos formados quando comparada com a condição de aplicação de fluido abundante utilizando os mesmos parâmetros de corte.

PALAVRAS-CHAVE: Torneamento. Alumínio. Mínima quantidade de fluido. Rugosidade. Formação do cavaco. Desgaste.

ABSTRACT

MOREIRA, L. T. S. The influence of the application of cutting fluid in turning aluminum alloy AA 7075. 2012. 114 f. Dissertation (Master's degree in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

Currently, among the types of metals used in metalworking industry, aluminum alloys have been widely used, especially in the aerospace industry because of their physical and mechanical properties. Aluminum alloys are the most commonly used 7000 series, which have excellent properties after heat treatment, the Zn being the main alloying element followed by Mg, Cu and Cr. In existing machining operations, turning remains the most important operation in the work of these alloys, where increasing productivity and reducing manufacturing costs are the way to business success. Laboratory tests have shown previously that reducing the cutting temperature is presented as an important factor for increasing the tool life. In contrast, in the last decade, some research had the goal much to restrict the use of refrigerant fluids and / or lubricant in metalworking industry. Among the factors that justified this procedure are operational costs of production, ecological issues accompanied by the legal requirements of environmental conservation and preservation of the health of human beings. Thus, the technique of the minimum quantity of fluid (MQF) gained space, also based on the need to use environmentally friendly lubricants and with high reduction ratio of heat. The proposed work aims to study the effect of applying the techniques of lubrication and cooling wet and minimal quantity of fluid (MQF) in the process of turning aluminum alloy AA 7075, establishing a relationship between the behavior of the roughness, chip and wear of the cutting tool. Through the results of this study has shown the potential use of the technique of minimal quantity of fluid (MQF) in machining of aluminum alloy AA 7075, considering his behavior was not below in relation to tool wear, the roughness of surfaces and the chip formed when compared with the wet condition fluid application using the same cutting parameters.

KEYWORDS: Turning. Aluminum. Minimum quantity of fluid. Roughness. Chip formation. Wear.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Distribuição de materiais estruturais em um Boeing 767 (GODEFROID E BASTIAN, 1993)..... | 39 |
| Figura 2 – Distribuição em peso dos componentes estruturais em um Boeing 767 (GODEFROID E BASTIAN, 1993)..... | 39 |
| Figura 3 – Distribuição de materiais estruturais no Boeing 787 Dreamliner (adaptado de PIRES, 2011)..... | 40 |
| Figura 4 – Estratégias de lubrificação em um processo de corte, adaptado de Tõnschoff et al., (1994)..... | 46 |
| Figura 5 – Modelo esquemático de um sistema de mínima quantidade de fluido por pressão, adaptado de Kamata e Obikawa (2007)..... | 47 |
| Figura 6 – Rugosidade média (R_a), adaptado de Camargo (2002)..... | 49 |
| Figura 7 – Rugosidade máxima (R_{max}), adaptado de Camargo (2002)..... | 49 |
| Figura 8 – Contribuição geométrica do avanço e raio de ponta da ferramenta na rugosidade, adaptado de Diniz et al. (2000)..... | 50 |
| Figura 9 – Variação da rugosidade em função do processo de usinagem utilizado, adaptado de Camargo (2002)..... | 51 |
| Figura 10 – Procedimento de preparação dos corpos de prova (adaptado de CUNHA, 2004)..... | 54 |
| Figura 11 – Formato final dos corpos de prova utilizados nos ensaios..... | 54 |
| Figura 12 – Pastilha de metal duro utilizada nos ensaios..... | 54 |
| Figura 13 – Torno CNC do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT)..... | 55 |
| Figura 14 – Rugosímetro portátil MARSURF modelo M300..... | 56 |
| Figura 15 – Microscópio óptico MARVISION modelo MM200..... | 56 |
| Figura 16 – Sistema de mínima quantidade de fluido (MQF)..... | 57 |
| Figura 17 – Bicos direcionadores do sistema MQF..... | 58 |
| Figura 18 – Fluxograma dos ensaios de usinagem da liga de alumínio AA 7075..... | 58 |
| Figura 19 – Esquema do ensaio de torneamento cilíndrico externo (adaptado de CUNHA, 2004)..... | 59 |
| Figura 20 – Esquema de utilização dos parâmetros de corte nos ensaios de usinagem com refrigeração abundante..... | 59 |
| Figura 21 – Esquema de utilização dos parâmetros de corte nos ensaios de usinagem com refrigeração MQF..... | 60 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 22 – Esquema de medição da rugosidade dos corpos de prova..... | 61 |
| Figura 23 – Medição do desgaste de flanco (v_b) da ferramenta, adaptado de Sandvik (2005)..... | 61 |
| Figura 24 – Comportamento da rugosidade média em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev, realizada nos CDP'S 01 e 02..... | 63 |
| Figura 25 – Comportamento da rugosidade máxima em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev, realizada nos CDP'S 01 e 02..... | 63 |
| Figura 26 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev, realizada nos CDP'S 01 e 02..... | 64 |
| Figura 27 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (a) e último (b) passe na usinagem do CDP 01 com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev..... | 65 |
| Figura 28 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (c) e último (d) passe na usinagem do CDP 02 com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev..... | 65 |
| Figura 29 – Comportamento da rugosidade média em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 03 e 04..... | 66 |
| Figura 30 – Comportamento da rugosidade máxima em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 03 e 04..... | 67 |
| Figura 31 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 03 e 04..... | 68 |
| Figura 32 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (e) e último (f) passe na usinagem do CDP 03 com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev..... | 68 |
| Figura 33 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (e) e último (f) passe na usinagem do CDP 04 com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev..... | 69 |
| Figura 34 – Comportamento da rugosidade média em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração abundante, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 05 e 06..... | 70 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 35 – Comportamento da rugosidade máxima em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração abundante, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 05 e 06..... | 70 |
| Figura 36 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração abundante, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 05 e 06..... | 71 |
| Figura 37 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (i) e último (j) passe na usinagem do CDP 05 com refrigeração abundante, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev..... | 72 |
| Figura 38 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (k) e último (l) passe na usinagem do CDP 06 com refrigeração abundante, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev..... | 72 |
| Figura 39 – Comportamento da rugosidade média em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev, realizada nos CDP'S 01 e 02..... | 73 |
| Figura 40 – Comportamento da rugosidade máxima em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev, realizada nos CDP'S 01 e 02..... | 74 |
| Figura 41 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev, realizada nos CDP'S 01 e 02..... | 75 |
| Figura 42 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (m) e último (n) passe na usinagem do CDP 01 com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev..... | 75 |
| Figura 43 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (o) e último (p) passe na usinagem do CDP 02 com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev..... | 76 |
| Figura 44 – Comportamento da rugosidade média em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 03 e 04..... | 77 |
| Figura 45 – Comportamento da rugosidade máxima em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 03 e 04..... | 77 |
| Figura 46 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 03 e 04..... | 78 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 47 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (q) e último (r) passe na usinagem do CDP 03 com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev..... | 79 |
| Figura 48 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (s) e último (t) passe na usinagem do CDP 04 com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev..... | 79 |
| Figura 49 – Comportamento da rugosidade média em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração MQF, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 05 e 06..... | 80 |
| Figura 50 – Comportamento da rugosidade máxima em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração MQF, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 05 e 06..... | 81 |
| Figura 51 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração MQF, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 05 e 06..... | 82 |
| Figura 52 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (u) e último (v) passe na usinagem do CDP 05 com refrigeração MQF, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev..... | 82 |
| Figura 53 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (x) e último (z) passe na usinagem do CDP 06 com refrigeração MQF, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev..... | 83 |
| Figura 54 – Comportamento da rugosidade média em função do comprimento de corte: $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev..... | 84 |
| Figura 55 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função do comprimento de corte: $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev..... | 85 |
| Figura 56 – Documentação do cavaco obtido no primeiro e último passe dos ensaios com refrigeração abundante (a e d, respectivamente) e no primeiro e último passe dos ensaios com refrigeração MQF (m e p, respectivamente): $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev..... | 86 |
| Figura 57 – Comportamento da rugosidade média em função do comprimento de corte: $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev..... | 87 |
| Figura 58 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função do comprimento de corte: $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev..... | 88 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 59 – Documentação do cavaco obtido no primeiro e último passe dos ensaios com refrigeração abundante (e e h, respectivamente) e no primeiro e último passe dos ensaios com refrigeração MQF (q e t, respectivamente): $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev..... | 89 |
| Figura 60 – Comportamento da rugosidade média em função do comprimento de corte: $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev..... | 90 |
| Figura 61 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função do comprimento de corte: $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev..... | 91 |
| Figura 62 – Documentação do cavaco obtido no primeiro e último passe dos ensaios com refrigeração abundante (i e l, respectivamente) e no primeiro e último passe dos ensaios com refrigeração MQF (u e z, respectivamente): $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev..... | 92 |
| Figura 63 – Comportamento da rugosidade média em função das velocidades de corte (v_c) de 500 m/min e 300 m/min e da variação do comprimento de corte, nos ensaios realizados com refrigeração abundante e avanço (f) de 0,3 mm/rev..... | 93 |
| Figura 64 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função das velocidades de corte (v_c) de 500 m/min e 300 m/min e da variação do comprimento de corte, nos ensaios realizados com refrigeração abundante e avanço (f) de 0,3 mm/rev..... | 93 |
| Figura 65 – Comportamento da rugosidade média em função das velocidades de corte (v_c) de 500 m/min e 300 m/min e da variação do comprimento de corte, nos ensaios realizados com refrigeração MQF e avanço (f) de 0,3 mm/rev..... | 94 |
| Figura 66 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função das velocidades de corte (v_c) de 500 m/min e 300 m/min e da variação do comprimento de corte, nos ensaios realizados com refrigeração MQF e avanço (f) de 0,3 mm/rev..... | 94 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 – Capacidade de produção instalada de alumínio primário no Brasil (adaptado de ABAL, 2012)..... | 28 |
| Quadro 2 – Séries das ligas fundidas de alumínio e seus principais elementos, adaptado de Bresciani Filho (1992) e Zangrandi (2008)..... | 29 |
| Quadro 3 – Designação dos tratamentos térmicos básicos aplicados às ligas de alumínio fundidas (SICHA, 1990)..... | 31 |
| Quadro 4 – Séries das ligas trabalhadas de alumínio e seus principais elementos, adaptado de Bresciani Filho (1992) e Nock Jr. (1990)..... | 33 |
| Quadro 5 – Designação dos tratamentos térmicos básicos aplicados às ligas de alumínio trabalhadas (DAVIS, 2002)..... | 34 |
| Quadro 6 – Designação dos tratamentos térmicos básicos aplicados para o endurecimento por precipitação das ligas de alumínio trabalhadas (ZANGRANDI, 2008)..... | 35 |
| Quadro 7 – Designações básicas de endurecimento das ligas de alumínio trabalhadas, não endurecíveis por precipitação (ZANGRANDI, 2008)..... | 36 |
| Quadro 8 – Dígitos complementares das designações básicas H1, H2 e H3 e seus respectivos significados..... | 37 |
| Quadro 9 – Designações de endurecimento com três dígitos, para as ligas de alumínio não endurecíveis por tratamentos térmicos..... | 38 |
| Quadro 10 – Fluidos de corte comumente utilizados na usinagem de ligas de alumínio, adaptado de Schey (1993)..... | 44 |
| Quadro 11 – Composição química da liga de alumínio AA 7075, adaptado de Alcoa Alumínio (2012)..... | 53 |

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** – Resultado dos ensaios realizados no CDP 01 com refrigeração abundante, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,1 mm/rev.....103
- Tabela 2** – Resultado dos ensaios realizados no CDP 02 com refrigeração abundante, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,1 mm/rev.....104
- Tabela 3** – Resultado dos ensaios realizados no CDP 03 com refrigeração abundante, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev.....105
- Tabela 4** – Resultado dos ensaios realizados no CDP 04 com refrigeração abundante, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev.....106
- Tabela 5** – Resultado dos ensaios realizados no CDP 05 com refrigeração abundante, velocidade de corte (v_c) de 300 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev.....107
- Tabela 6** – Resultado dos ensaios realizados no CDP 06 com refrigeração abundante, velocidade de corte (v_c) de 300 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev.....108
- Tabela 7** – Resultado dos ensaios realizados no CDP 01 com refrigeração MQF, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,1 mm/rev.....109
- Tabela 8** – Resultado dos ensaios realizados no CDP 02 com refrigeração MQF, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,1 mm/rev.....110
- Tabela 9** – Resultado dos ensaios realizados no CDP 03 com refrigeração MQF, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev.....111
- Tabela 10** – Resultado dos ensaios realizados no CDP 04 com refrigeração MQF, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev.....112
- Tabela 11** – Resultado dos ensaios realizados no CDP 05 com refrigeração MQF, velocidade de corte (v_c) de 300 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev.....113
- Tabela 12** – Resultado dos ensaios realizados no CDP 06 com refrigeração MQF, velocidade de corte (v_c) de 300 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev.....114

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|------------------------------------------------|
| AA | Aluminum Association |
| ABAL | Associação Brasileira de Alumínio |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas e Técnicas |
| AISI | American Iron and Steel Institute |
| ANSI | American National Standards Institute |
| APC | Aresta Postiça de Corte |
| BA | Bahia |
| CDP | Corpo de Prova |
| CNC | Comando Numérico Computadorizado |
| DMT | Departamento de Materiais e Tecnologia |
| EMBRAER | Empresa Brasileira de Aeronáutica |
| ISO | International Organization for Standardization |
| MA | Maranhão |
| MG | Minas Gerais |
| MQF | Mínima Quantidade de Fluido |
| NBR | Norma Brasileira Regulamentadora |
| PA | Pará |
| RJ | Rio de Janeiro |
| RPM | Rotações por Minuto |
| SP | São Paulo |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|--------------|-----------------------------|---------------|
| a_p | Profundidade de Corte | <i>mm</i> |
| f | Avanço | <i>mm/rev</i> |
| R_a | Rugosidade Média | μm |
| lm | Comprimento de Medição | <i>mm</i> |
| R_{max} | Rugosidade Máxima | μm |
| r_ϵ | Raio da Ponta da Ferramenta | <i>mm</i> |
| v_b | Desgaste de Flanco | <i>mm</i> |
| v_c | Velocidade de Corte | <i>m/min</i> |
| z_i | Rugosidade parcial | μm |
| y_i | Ordenadas de Afastamento | |

SUMÁRIO

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------|
| AGRADECIMENTOS | vii |
| RESUMO..... | x |
| ABSTRACT | xi |
| LISTA DE FIGURAS | xii |
| LISTA DE QUADROS | xvii |
| LISTA DE TABELAS | xviii |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS | xix |
| LISTA DE SÍMBOLOS | xx |
| SUMÁRIO..... | xxi |
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO | 23 |
| 1.1 Objetivos | 25 |
| CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 26 |
| 2.1 O alumínio e suas ligas | 26 |
| 2.2 História da indústria do alumínio no mundo..... | 26 |
| 2.3 História da indústria do alumínio no Brasil | 27 |
| 2.4 Classificação e designação das ligas de alumínio | 29 |
| 2.4.1 Classificação e designação das ligas de alumínio fundidas | 30 |
| 2.4.2 Classificação e designação das ligas de alumínio trabalhadas | 32 |
| 2.5 Considerações sobre as ligas de alumínio na indústria aeronáutica..... | 39 |
| CAPÍTULO 3 – USINAGEM DAS LIGAS DE ALUMÍNIO..... | 43 |
| 3.1 Utilização de fluidos de corte na usinagem de ligas de alumínio | 44 |
| 3.2 Viabilidade do sistema de mínima quantidade de fluido (MQF) | 47 |
| 3.3 Rugosidade na operação de torneamento | 49 |
| CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS..... | 54 |
| 4.1 Materiais..... | 54 |
| 4.1.1 Corpos de prova | 54 |
| 4.1.2 Ferramenta de corte | 55 |
| 4.1.3 Máquina-ferramenta | 56 |
| 4.1.4 Rugosímetro | 56 |
| 4.1.5 Microscópio óptico | 57 |
| 4.1.6 Fluido de corte..... | 58 |
| 4.1.7 Mínima quantidade de fluido (MQF) | 58 |
| 4.2 Fluxograma dos ensaios..... | 59 |
| 4.2.1 Ensaio de usinagem da liga AA 7075 | 60 |
| 4.2.2 Análise do cavaco..... | 61 |
| 4.2.3 Medições de rugosidade | 61 |
| 4.2.4 Análise do desgaste da ferramenta | 62 |
| CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 63 |

| | | |
|-------------------------------|-------------------------------------------|-----|
| 5.1 | Usinagem com refrigeração abundante | 63 |
| 5.2 | Usinagem com refrigeração MQF | 73 |
| 5.3 | Análise comparativa..... | 84 |
| CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES | | 96 |
| Referências | | 98 |
| Anexo A..... | | 104 |

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Dentre os tipos de metais utilizados na indústria metal-mecânica, as ligas de alumínio têm grande importância técnica devido a sua baixa densidade, elevada relação resistência/peso, endurecibilidade, aparência, fabricabilidade, possibilidade de tratamento superficial e propriedades físicas e mecânicas (WEINGAERTNER ET AL., 1994).

O alumínio puro não apresenta elevada resistência mecânica, contudo a adição de elementos como o cobre, zinco, magnésio, silício, entre outros, associada à aplicação de tratamento térmico, permite obter um material de utilização importante em estruturas as quais requerem resistência mecânica. No caso das ligas de alumínio da série 7000, as quais apresentam ótimas propriedades após o tratamento térmico, o principal elemento de liga é o zinco seguido de magnésio, cobre e cromo. Tais ligas são muito utilizadas na indústria aeroespacial por apresentar alta resistência mecânica e baixo peso.

Durante anos a usinagem vem se apresentando como o processo mais utilizado no trabalho destes metais na indústria metal-mecânica, consumindo uma grande quantidade de dinheiro na execução de suas operações, tais como, torneamento, fresamento, furação, etc. (CHILDS ET AL., 2001).

Dentre as operações existentes, o torneamento permanece como a operação mais importante, onde o aumento da produtividade e a redução dos custos de fabricação são a chave para o sucesso dos negócios (TRENT E WRIGHT, 2000).

No torneamento, altos valores utilizados nos parâmetros de corte oferecem boas oportunidades para o aumento da produtividade, entretanto, esta condição envolve grande risco de deterioração da qualidade superficial e vida da ferramenta, (CHILDS ET AL., 2001; UEDA, HOSOKAWA E YAMADA, 2006). A deterioração da qualidade superficial durante o torneamento está diretamente relacionada com a progressão do desgaste da ferramenta. Pesquisadores concentraram sua atenção sobre

as melhorias no torneamento convencional, de modo que a vida da ferramenta pudesse ser melhorada ou sua falha evitada. A falha da ferramenta é tratada como um dano tão grande que a mesma perde a sua capacidade de remoção de material da peça. Tal dano não pode ser evitado, mas se podem descobrir maneiras de minimizá-lo através da análise de suas causas (BOOTHROYD E KNIGHT, 2005).

Testes de laboratório realizados anteriormente mostraram que a redução da temperatura de corte se apresenta como um fator importante para a minimização das falhas que podem ocorrer com as ferramentas, pois uma pequena redução na temperatura aumentará muito a vida da ferramenta de corte, (TUHOLSKI, 1993).

Em contrapartida, na última década, algumas pesquisas tiveram como meta restringir ao máximo o uso de fluido refrigerante e/ou lubrificante na indústria metal-mecânica. Dentre os fatores que justificaram esse procedimento estão os custos operacionais da produção, as questões ecológicas acompanhadas das exigências legais de conservação do meio ambiente e a preservação da saúde do ser humano (MACHADO E DINIZ, 2000). Segundo Novaski e Dörr (1999), os gastos relacionados com a ferramenta de corte representam de 2% a 4% do custo do processo contra 17% em refrigeração.

De acordo com Silva et al. (2001), Mason, (2001) e Heisel et al. (1998), apesar das insistentes tentativas de eliminar completamente os fluidos de corte, em muitos casos, a refrigeração ainda é essencial para se obter vidas econômicas de ferramentas e a qualidade superficial requerida. Isto é particularmente válido quando há exigência de tolerâncias estreitas, alta precisão dimensional e de forma, ou quando se trata de usinagem de materiais de difícil corte. Desta maneira, a técnica da mínima quantidade de fluido (MQF) ganhou espaço, baseada também na necessidade do uso de lubrificantes ecologicamente corretos (isentos de solventes e materiais fluorados) e com altíssima taxa de redução de calor (MACHADO E DINIZ, 2000).

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi estudar o efeito das técnicas de lubri-refrigeração abundante e de mínima quantidade de fluido (MQF) no processo de torneamento da liga de alumínio AA 7075, estabelecendo uma relação entre o comportamento da rugosidade, formação do cavaco e desgaste da ferramenta de corte. Através dos resultados deste trabalho foi possível verificar a potencialidade de utilização da técnica de mínima quantidade de fluido (MQF) na usinagem da liga de alumínio AA 7075, haja vista o seu comportamento não ter sido inferior em relação ao desgaste das ferramentas, a rugosidade das superfícies e aos cavacos formados quando comparada com a condição de aplicação de fluido abundante utilizando os mesmos parâmetros de corte.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O alumínio e suas ligas

O alumínio é produzido comercialmente há cerca de 150 anos, e está presente na África, América do Norte, América Latina, Ásia, Europa e Oceania. No total, são 46 países que produziram, em 2006, aproximadamente 34 milhões de toneladas de alumínio primário. O Brasil é o sexto maior produtor mundial de alumínio primário, precedido pela China, Rússia, Canadá, Estados Unidos e Austrália (ABAL, 2012).

O grande aumento no consumo de alumínio prova a importância deste metal na indústria moderna. O alumínio é o mais importante dos metais não ferrosos e está entre os mais consumidos anualmente. A variedade de aplicações do alumínio está relacionada com suas características físico-químicas, com destaque para seu baixo peso específico, quando comparado com outros metais de grande consumo, resistência à corrosão e alta condutividade elétrica e térmica (ABAL, 2012).

2.2 História da indústria do alumínio no mundo

Quando o alumínio era pouco conhecido e tinha um elevado custo de produção suas primeiras aplicações foram limitadas a trabalhos luxuosos, como estatuetas e placas comemorativas. Com o desenvolvimento dos processos industriais, o metal passou a estar disponível em maiores quantidades; entretanto, ele ainda era medido em quilos ao invés de toneladas. No final do Século XIX, com o aumento da produção e preços menores, o alumínio foi sendo gradualmente utilizado em utensílios de cozinha e em alguns dos primeiros automóveis que já possuíam painéis revestidos com este material comercialmente (ABAL, 2012).

Conseqüentemente, no início do Século XX, as indústrias de alumínio começaram a trabalhar na produção de ligas de alumínio com propriedades mecânicas mais elevadas, sendo que os primeiros experimentos ocorreram somente a partir do aprimoramento dos princípios metalúrgicos fundamentais envolvidos.

O rápido e notável crescimento da importância do alumínio na indústria é resultado de uma série de fatores:

- É um metal que possui excelente combinação de propriedades úteis, resultando numa adequabilidade técnica para um campo vasto de aplicações em engenharia;
- Pode ser facilmente transformado por meio de todos os processos metalúrgicos normais, tornando-se, assim, viável à indústria manufatureira em qualquer forma necessária;
- Em laboratórios acadêmicos, a indústria do alumínio e seus próprios usuários têm desenvolvido novas pesquisas, técnicas de fabricação, de soldagem e de acabamento, o que tem levado a um conhecimento maior de técnicas de engenharia deste metal, fazendo com que seja considerado um material de fácil aplicação;
- A livre divulgação da indústria sobre recomendações aos usuários e potenciais de uso do alumínio, o que foi muito importante para sua aceitação geral.

2.3 História da indústria do alumínio no Brasil

Em 1917, surgiu a Companhia Paulista de Artefatos de Alumínio (CPAA), que registrou a marca Rochedo e iniciou a fabricação de placas fundidas para automóveis. Na década de 1930, a O. R. Muller, instalada em São Paulo, consolidou-se no ramo de produção de bisnagas de alumínio, utilizando matéria-prima importada. De fato, a incipiente indústria de transformação era totalmente dependente das importações do produto primário.

As primeiras referências sobre a bauxita no Brasil estão nos Anais de 1928 da Escola de Minas de Ouro Preto e nessa época ocorreram duas iniciativas concorrentes para implantar a produção de alumínio: a da Elquisa - Eletro Química Brasileira S/A, de Ouro Preto (MG) e a da CBA - Companhia Brasileira de Alumínio, de Mairinque (SP). Tais registros apontam que nesse período os primeiros quilos de alumínio

primário foram produzidos no Brasil graças à perseverança de alguns empresários pioneiros, porém insuficientes para atender à demanda.

A Elquisa teve dificuldades de comercialização devido ao excesso de produção mundial de alumínio. Apenas em 1938, com o apoio do governo Vargas, começou em definitivo a produção do metal em Ouro Preto. Porém, sua primeira utilização para a produção de alumina e alumínio no País, em escala industrial, aconteceu em 1944, durante a 2ª Grande Guerra Mundial, consolidando a indústria no Brasil. Tal iniciativa partiu do grande empreendedor Américo Giannetti, que deu início à promissora história de uma indústria que, década após década, apresentaria uma evolução impressionante.

Em junho de 1950, a Elquisa foi adquirida pela Aluminium Limited do Canadá - ALCAN, tornando-se assim a primeira empresa multinacional a participar do mercado brasileiro, produzindo não só o alumínio primário, como também produtos transformados de alumínio.

A Companhia Brasileira de Alumínio - CBA, fundada em 1941, contava com as reservas de bauxita de Poços de Caldas, mas sua unidade industrial para a produção de alumínio primário acabou sendo localizada na área de Rodovelho, próxima de Sorocaba, onde a disponibilidade de energia elétrica e o combustível (lenha) eram abundantes. A empresa paulista foi uma das pioneiras que permaneceu até hoje. Outra empresa que ainda hoje possui uma posição de destaque na indústria transformadora de alumínio é a atual Laminação de Metais Clemente, fundada na década de 1940.

Em 1983, o Brasil passa de grande importador a um dos principais exportadores mundiais, graças aos grandes e contínuos investimentos das empresas do setor. Três anos depois, o país torna-se o quinto produtor mundial de alumínio primário.

Atualmente o Brasil conta a presença de grandes empresas produtoras de alumínio em seu território, atuando desde a extração da bauxita até a produção de ligas de alta resistência mecânica utilizadas nas indústrias automobilística e aeroespacial, por exemplo.

No Quadro 1 é mostrada a atual capacidade de produção instalada de alumínio primário no Brasil.

Quadro 1 – Capacidade de produção instalada de alumínio primário no Brasil (adaptado de ABAL, 2012).

| PRODUTORES | LOCALIZAÇÃO | 2009 | 2010 | 2011 |
|--------------------------------------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|
| Albras – Alumínio Brasileiro S.A. | Barcarena (PA) | 460 | 460 | 460 |
| Alcoa Alumínio S.A. | Poços de Caldas (MG) | 97 | 97 | 97 |
| Consórcio de Alumínio do Maranhão – Alumar | São Luís (MA) | 450 | 450 | 450 |
| Novelis do Brasil Ltda. | Ouro Preto (MG) | 51 | 51 | 51 |
| | Aratu (BA) | 60 | 60 | 0 |
| Valesul Alumínio S.A. | Santa Cruz (RJ) | 95 | 0 | 0 |
| Votorantim Metais – CBA | Alumínio (SP) | 475 | 475 | 475 |
| Total | | 1.688 | 1.593 | 1.533 |

Unidade: 1000 t

Esses são apenas alguns dados da união dos produtores primários e transformadores da Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) para discutir e conciliar os interesses comuns, quanto à produção do alumínio.

2.4 Classificação e designação das ligas de alumínio

O alumínio e suas ligas são classificados através das categorias: Trabalhados (dúcteis) e Fundidos, em que cada uma delas possui um diferente sistema de designação conforme o principal elemento de liga presente.

Os materiais trabalhados podem ser encontrados na forma de laminados planos (chapas, folhas), extrudados (barras, perfis, tubos) e forjados. Já os fundidos, possuem a forma de lingotes e destinam-se principalmente aos processos de fundição em areia, e em molde permanente por gravidade ou sob pressão (BRESCIANI FILHO, 1992).

Alguns países da Europa como Itália, Alemanha e França, utilizam um sistema alfa numérico para a identificação das ligas de alumínio, estabelecido pela *Internacional Organization for Standardization* (ISO). Os Estados Unidos e outros países como a Inglaterra e o Brasil, utilizam um sistema numérico para a identificação das ligas de alumínio, estabelecido pela *American National Standards Institute* (ANSI), também adotado pela *Aluminum Association*, segundo Mazzolani (1995).

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) adotou um sistema de identificação numérico semelhante e compatível com o sistema utilizado pela *Aluminum Association*.

2.4.1 Classificação e designação das ligas de alumínio fundidas

As ligas de alumínio fundidas foram agrupadas em famílias ou séries. Cada liga dentro de uma mesma série é identificada por um sistema de quatro dígitos, acompanhado de um último dígito separado dos três primeiros por um ponto decimal (ZANGRANDI, 2008).

No Quadro 2 são mostradas as séries de ligas fundidas de alumínio com seus respectivos elementos de liga.

Quadro 2 – Séries das ligas fundidas de alumínio e seus principais elementos, adaptado de Bresciani Filho (1992) e Zangrandi (2008).

| SÉRIE | INDICAÇÃO DA COMPOSIÇÃO |
|-----------|-------------------------------|
| 1XX.X | 99,00% mín. de alumínio |
| 2XX.X (a) | Cobre |
| 3XX.X (b) | Silício e cobre e/ou magnésio |
| 4XX.X | Silício |
| 5XX.X | Magnésio |
| 6XX.X | Série não utilizada |
| 7XX.X (a) | Zinco |
| 8XX.X (a) | Estanho |

(a) Ligas endurecíveis por precipitação. (b) Algumas ligas da série não são endurecíveis por precipitação. Não indicadas: Ligas não endurecíveis por precipitação.

Para a série 1XX.X, o primeiro dígito indica alumínio não ligado (comercialmente puro), com composição controlada. Os dígitos seguintes (segundo e terceiro) indicam aproximadamente a porcentagem mínima de alumínio acima de 99%. Para as ligas fundidas das séries 2XX.X a 8XX.X, o primeiro dígito indica a série a qual pertence a liga e o seu principal elemento de liga, ou seja, aquele com a maior porcentagem média, exceto nos casos em que a composição de liga representa uma modificação de uma liga previamente registrada (ZANGRANDI, 2008). Os dois dígitos seguintes (segundo e terceiro), não têm nenhum significado especial, e servem apenas para identificar diferentes ligas de uma mesma série (DAVIS, 2002).

Segundo Sicha (1990) e Davis (2002), o quarto dígito colocado após o ponto decimal das séries indica a forma do produto, ou seja, se for igual à zero indica produto fundido e se for igual a um ou dois indica lingote. Assim, por exemplo, as ligas 1XX.0 e 2XX.0 são produtos fundidos e as ligas 3XX.1 e 4XX.2 são lingotes.

As modificações da composição química original de uma liga fundida ou as modificações nos limites de impureza do alumínio fundido são indicadas por letras maiúsculas, escritas em ordem alfabética, exceto as letras I, O, Q e X, precedendo o número de identificação da liga ou do alumínio não ligado (DAVIS, 2002).

Complementando o sistema de designação, segundo a composição, existe o sistema de designação da condição de têmpera, isto é, do grau de endurecimento do material obtido por tratamento mecânico e térmico.

A *Aluminum Association* utiliza um sistema alfa numérico comum para a designação dos tratamentos térmicos das ligas de alumínio fundidas e trabalhadas, exceto para os lingotes fundidos, que em geral, não recebem tratamentos térmicos.

No Quadro 3 são mostradas as designações dos tratamentos térmicos mais comuns aplicáveis às ligas de alumínio fundidas.

Quadro 3 – Designação dos tratamentos térmicos básicos aplicados às ligas de alumínio fundidas (SICHA, 1990).

| DESIGNAÇÃO | SIGNIFICADO |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| F | <i>Conforme fabricada.</i> Indica que não houve nenhum controle especial sobre os parâmetros térmicos do processo. |
| O | <i>Recozida.</i> Indica que o produto fundido foi tratado termicamente para melhorar a ductilidade e a estabilidade dimensional. |
| T4 | <i>Envelhecida Naturalmente.</i> Indica que as propriedades mecânicas do produto (após a solubilização) foram estabilizadas por precipitação à temperatura ambiente. |
| T5 | <i>Processada a quente seguida de envelhecimento artificial.</i> Indica que as propriedades do produto fundido (após a conformação a quente) foram melhoradas por precipitação artificial em temperaturas acima da ambiente. |
| T6 | <i>Envelhecida artificialmente.</i> Indica que as propriedades mecânicas do produto (após solubilização) foram estabilizadas por precipitação em temperaturas acima da ambiente. |
| T7 | <i>Superenvelhecida ou estabilizada.</i> Indica que o produto foi artificialmente envelhecido (após solubilização) para proporcionar estabilidades da resistência mecânica e dimensional. |

2.4.2 Classificação e designação das ligas de alumínio trabalhadas

Ao contrário das ligas de alumínio fundidas, as ligas de alumínio trabalhadas são dúcteis, e permitem um trabalho posterior de conformação mecânica a quente ou a frio, após o processo de solidificação.

As ligas de alumínio trabalhadas também foram agrupadas em famílias ou séries, de maneira análoga às ligas fundidas, em que cada liga dentro de uma mesma série foi identificada por um sistema de quatro dígitos, sem o ponto decimal (ZANGRANDI, 2008).

Para a série 1XXX, o primeiro dígito designa o alumínio não ligado (comercialmente puro) com composição controlada. Os dois últimos dígitos indicam, aproximadamente, a porcentagem de alumínio mínima que excede 99,0%. Assim, por

exemplo, o alumínio comercial AA 1060 tem no mínimo 99,60% de alumínio e o alumínio AA 1080 tem no mínimo 99,8% de alumínio (NOCK Jr., 1990).

O segundo dígito diferente de zero (inteiros de 1 a 9) indica modificações de uma ou mais impurezas. O segundo dígito igual a zero indica que essa composição é a primeira registrada da série e ainda não sofreu nenhuma modificação.

Para as ligas trabalhadas das séries de 2XXX a 8XXX, o primeiro dígito designa a série a qual pertence à liga, de acordo com o seu principal elemento constituinte, ou seja, presente com a maior porcentagem média, exceto nos casos em que a composição atual da liga expressa uma modificação da liga registrada previamente.

Se a maior porcentagem média for igual para mais de um elemento, a série a qual pertencerá a liga é definida pela sequência dos elementos obedecendo a ordem: cobre, manganês, silício, magnésio, $MgSi_2$, zinco e outros. O Segundo dígito do número indica uma modificação da liga de forma análoga ao alumínio puro (série 1XXX). Se for igual a zero indica que essa composição da liga é a original da série. Se for diferente de zero (inteiros de 1 a 9) indica modificações da composição original da liga. Os dois últimos dígitos não tem nenhum significado especial e servem apenas para identificar diferentes ligas de uma mesma série (DAVIS, 2002).

No Quadro 4 são apresentadas as séries de ligas trabalhadas, seus respectivos elementos de liga principais e a identificação daquelas que são tratáveis termicamente.

Quadro 4 – Séries das ligas trabalhadas de alumínio e seus principais elementos, adaptado de Bresciani Filho (1992) e Nock Jr. (1990).

| SÉRIE | INDICAÇÃO DA COMPOSIÇÃO |
|----------|-------------------------|
| 1XXX (c) | 99,00% mín. de alumínio |
| 2XXX (a) | Cobre |
| 3XXX (c) | Manganês |
| 4XXX (c) | Silício |
| 5XXX (c) | Magnésio |
| 6XXX (a) | Magnésio e Silício |
| 7XXX (a) | Zinco |
| 8XXX (b) | Outros elementos |
| 9XXX | Série não utilizada |

(a) Ligas endurecíveis por precipitação. (b) Várias ligas dessa série são endurecíveis por precipitação. (c) Ligas endurecíveis por deformação a frio.

As ligas de alumínio trabalhadas são ternárias e quaternárias. Assim, por exemplo, as ligas da série 2XXX mais importantes tratáveis termicamente são as ligas dos sistemas Al-Cu-Mg, Al-Cu-Si e Al-Cu-Mg-Si, da série 6XXX é a liga do sistema Al-Mg-Si e da série 7XXX são as ligas dos sistemas Al-Zn-Mg e Al-Zn-Mg-Cu (HUNSICKER, 1990).

O sistema de designação dos tratamentos térmicos das ligas de alumínio trabalhadas estabelecido pela *Aluminum Association* é semelhante ao sistema utilizado para as ligas fundidas, em que cada designação básica indica uma sequência de tratamentos térmicos ou térmicos e mecânico, para produzir diferentes condições de endurecimento e combinações de propriedades à liga. Os tratamentos térmicos “F” e “O” podem ser aplicados tanto para as ligas endurecíveis por precipitação como para as ligas endurecíveis por deformação, enquanto “W” e “T” são aplicados somente para as ligas endurecíveis por precipitação (ZANGRANDI, 2008).

No Quadro 5 são indicadas as designações dos tratamentos térmicos básicos aplicados às ligas de alumínio trabalhadas.

Quadro 5 – Designação dos tratamentos térmicos básicos aplicados às ligas de alumínio trabalhadas (DAVIS, 2002).

| DESIGNAÇÃO | SIGNIFICADO |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| F | <i>Conforme fabricada.</i> Indica que não houve nenhum controle especial sobre os parâmetros térmicos do processo a quente, a frio ou sobre as condições de endurecimento. |
| O | <i>Recozida.</i> Indica que o produto foi tratado termicamente para se obter os menores valores de resistência mecânica. |
| W | <i>Solubilizada.</i> Indica uma condição instável, após o resfriamento rápido da liga. Aplica-se somente para as ligas que endurecem por envelhecimento natural (na temperatura ambiente) e deve ser indicado o tempo de envelhecimento (por exemplo, W ½ h). |
| T | <i>Tratada termicamente.</i> Indica uma condição estável após a solubilização, diferente daquelas obtidas por meio dos tratamentos “F” ou “O”. A letra T é sempre seguida por um dígito (inteiro de 1 a 10) para indicar a sequência dos tratamentos básicos, conforme indicado no quadro 3. |

As ligas endurecíveis por envelhecimento natural apresentam variações de propriedades após a solubilização mesmo à temperatura ambiente. O envelhecimento natural pode se iniciar de imediato após a solubilização, ou após certo tempo (período de incubação), que varia de uma liga para outra (HUNSICKER, 1990). É por essa razão que deve ser indicado o tempo em que a liga se encontra na condição “W”.

No Quadro 6 são indicadas as designações dos tratamentos térmicos básicos aplicáveis para o endurecimento por precipitação das ligas de alumínio trabalhadas, das séries 2XXX, 6XXX e 7XXX e algumas da série 8XXX.

Quadro 6 – Designação dos tratamentos térmicos básicos aplicados para o endurecimento por precipitação das ligas de alumínio trabalhadas (ZANGRANDI, 2008).

| DESIGNAÇÃO | SIGNIFICADO |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| T1 | <i>Processamento a quente seguido de envelhecimento natural.</i> Indica que as propriedades mecânicas da liga conformada a quente foram estabilizadas por precipitação espontânea na temperatura ambiente. |
| T2 | <i>Processamento a quente, trabalhado a frio seguido de envelhecimento natural.</i> Indica que as propriedades mecânicas da liga (conformada a quente, seguida de trabalho a frio) foram estabilizadas por precipitação espontânea na temperatura ambiente. |
| T3 | <i>Solubilização, trabalho a frio seguido de envelhecimento natural.</i> Indica que as propriedades mecânicas da liga (solubilizada, seguida de deformada a frio) foram estabilizadas por precipitação espontânea na temperatura ambiente. |
| T4 | <i>Solubilizada seguida de envelhecimento natural.</i> Indica que as propriedades mecânicas da liga solubilizada foram estabilizadas por precipitação à temperatura ambiente. |
| T5 | <i>Processamento a quente seguido de envelhecimento artificial.</i> Indica que as propriedades da liga conformada a quente foram melhoradas por precipitação artificial em temperaturas acima da ambiente. |
| T6 | <i>Solubilização seguida de envelhecimento artificial.</i> Indica que as propriedades mecânicas da liga solubilizada foram estabilizadas por precipitação artificial em temperaturas acima da ambiente. |
| T7 | <i>Solubilização seguida de superenvelhecimento ou estabilização.</i> Indica que a liga solubilizada foi Superenvelhecida artificialmente, para proporcionar a máxima resistência mecânica e melhorar a resistência à corrosão. |
| T8 | <i>Solubilização, trabalho a frio seguido de envelhecimento artificial.</i> Indica que as propriedades mecânicas da liga (solubilizada, seguida de deformada a frio) foram estabilizadas por precipitação em temperaturas acima da ambiente. |
| T9 | <i>Solubilização, envelhecimento artificial seguido de deformação a frio.</i> Indica que a liga foi solubilizada, endurecida por precipitação artificial, seguida de endurecimento por deformação a frio. |
| T10 | <i>Processamento a quente, trabalho a frio seguido de envelhecimento artificial.</i> Indica que as propriedades mecânicas da liga (conformada a quente, seguida de trabalho a frio) foram melhoradas por precipitação artificial em temperaturas acima da ambiente. |

As letras “W” e “T” indicam duas condições diferentes de endurecimento das ligas tratáveis termicamente. A letra “W” indica uma condição instável, após a solubilização, enquanto que a letra “T” indica uma condição final estável, porém, diferente daquelas condições obtidas por meio dos tratamentos “F” e “O” (DAVIS, 2002).

As ligas de alumínio trabalhadas também possuem um sistema para designar o estado de endurecimento por deformação a frio das ligas não endurecíveis por precipitação, o qual é constituído pela letra “H” (iniciais de *hardened*), seguida por dois ou mais dígitos. O primeiro dígito indica a sequência das operações de endurecimento, conforme mostradas no Quadro 4.

No Quadro 7 são apresentadas as designações básicas de endurecimento aplicáveis ao alumínio comercial série 1XXX, às ligas de alumínio das séries 3XXX, 4XXX, 5XXX e algumas ligas da série 8XXX, com os seus respectivos significados (DAVIS, 2002).

Quadro 7 – Designações básicas de endurecimento das ligas de alumínio trabalhadas, não endurecíveis por precipitação (ZANGRANDI, 2008).

| DESIGNAÇÃO | SIGNIFICADO |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| H1 | <i>Endurecida por deformação.</i> Indica que a liga foi endurecida por deformação para obter a resistência desejada, sem tratamento térmico posterior. Um segundo dígito indica o grau de endurecimento. |
| H2 | <i>Endurecida por deformação e parcialmente recozida.</i> Indica que a liga foi endurecida por deformação a frio, além do grau desejado e, a resistência foi reduzida ao nível pretendido por meio de um recozimento parcial. Um segundo dígito indica o grau de endurecimento remanescente após o recozimento. |
| H3 | <i>Endurecida por deformação e estabilizada.</i> Indica que a liga foi endurecida por deformação a frio e suas propriedades mecânicas foram estabilizadas por meio de um tratamento térmico em baixas temperaturas, ou pelo calor gerado no processo de fabricação. Aplica-se somente às ligas com tendência ao amolecimento na temperatura ambiente, se não forem estabilizadas. Um segundo dígito indica o grau de endurecimento após o tratamento de estabilização. |

Um segundo dígito (de 1 a 9) deve ser escrito, após o dígito das designações básicas H1, H2 e H3, para indicar o grau de endurecimento ou encruamento da liga. Esse segundo dígito conforme mostrado no Quadro 8, está relacionado com o nível de resistência mecânica da liga (DAVIS, 2002).

Quadro 8 – Dígitos complementares das designações básicas H1, H2 e H3 e seus respectivos significados.

| DESIGNAÇÃO | SIGNIFICADO |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9 | O número 9 designa um grau de endurecimento (extra bruto), cuja resistência à tração da liga excede aquela da condição “8” em no mínimo 10 MPA. |
| 8 | Designa um grau de encruamento da liga (totalmente ou 100% endurecida), cuja resistência à tração é equivalente aquele valor atingido por uma redução a frio em torno de 75%, realizada após um recozimento pleno, em que a temperatura máxima atingida durante o processo de redução não ultrapassa a 50° C. |
| 6 | Designa um grau de endurecimento (3/4 endurecida), cuja resistência à tração da liga é aproximadamente igual a média entre a resistência à tração da condição “4” (recozida) e da condição “8” (100% endurecida). |
| 4 | Designa um grau de endurecimento da liga (1/2 endurecida), cuja resistência à tração é aproximadamente igual a média entre a resistência à tração da condição “O” (recozida) e da condição “6” (3/4 endurecida). |
| 2 | Designa um grau de endurecimento (1/4 endurecida), cuja resistência à tração da liga é aproximadamente igual a média entre a resistência à tração da condição “O” (recozida) e da condição “4” (3/4 endurecida). |
| 1 | Designa um grau de endurecimento (1/8 endurecida), cuja resistência à tração da liga é aproximadamente igual a média entre a resistência à tração da condição “O” (recozida) e da condição “2” (1/4 endurecida). |

Geralmente um terceiro dígito poderá ser usado, quando necessário, para identificar alguma variação nos graus de endurecimento das designações básicas com dois dígitos, ou quando alguma outra característica for afetada de forma significativa (HUNSICKER, 1990).

No Quadro 9 são apresentados alguns exemplos de designações de endurecimento com três dígitos, estabelecidos pela NBR 6835 (2000).

Quadro 9 – Designações de endurecimento com três dígitos, para as ligas de alumínio não endurecíveis por tratamentos térmicos.

| DESIGNAÇÃO | SIGNIFICADO |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| H111 | Indica que a liga foi endurecida por deformação a frio em grau menor do que o necessário para obter as propriedades do grau de endurecimento H11. |
| H112 | Indica que a liga foi endurecida por deformação durante algum processo de conformação a quente sem controle especial do grau de encruamento ou do tratamento térmico, porém, há limites para as propriedades mecânicas. |
| H311 (a) | Indica que a liga foi endurecida por deformação a frio em grau menor do que o necessário para obter as propriedades do grau de endurecimento H31. |
| H321 (a) | Indica que a liga foi endurecida por deformação a frio em grau menor do que o necessário para obter as propriedades do grau de endurecimento H32. |

(a) Designação utilizada para ligas de alumínio com teores nominais de magnésio acima de 4%.

2.5 Considerações sobre as ligas de alumínio na indústria aeronáutica

Os materiais sempre desempenharam um importante papel na elaboração de conceitos relacionados com o projeto e montagem de aviões. Antes da 1ª Guerra Mundial as estruturas dos aviões eram compostas basicamente de madeira, mas devido à escassez da mesma, além de problemas relacionados à anisotropia, absorção de umidade, instabilidade dimensional e vulnerabilidade, iniciou-se o estudo e domínio dos metais, principalmente das ligas de alumínio.

Uma grande variedade de ligas de alumínio e de tratamentos térmicos fornece combinações específicas de resistência mecânica, tenacidade à fratura, resistência à fadiga, resistência à corrosão, soldabilidade e conformabilidade. Estas características, aliadas a elevadas relações resistência / peso específico, fazem com que as ligas de alumínio sejam umas das melhores escolhas para diversas aplicações de engenharia, principalmente na indústria aeronáutica, onde as ligas quaternárias Al-Zn-Mg-Cu da

série 7XXX e as ternárias Al-Cu-Mg da série 2XXX foram desenvolvidas em grande escala para uso em aplicações estruturais (BARROSO, 2004).

Segundo Godefroid e Bastian (1993), as ligas de alumínio sempre foram consideradas materiais aeronáuticos por excelência. Esta tendência de utilização das ligas de alumínio na construção aeronáutica foi progressiva até a década de 1980, quando se registraram índices da ordem de 78%, em peso, de ligas de alumínio na constituição estrutural dos aviões.

As Figuras 1 e 2 mostram o percentual de distribuição de materiais estruturais e as distribuições em peso destes materiais na estrutura de um avião Boeing 767.

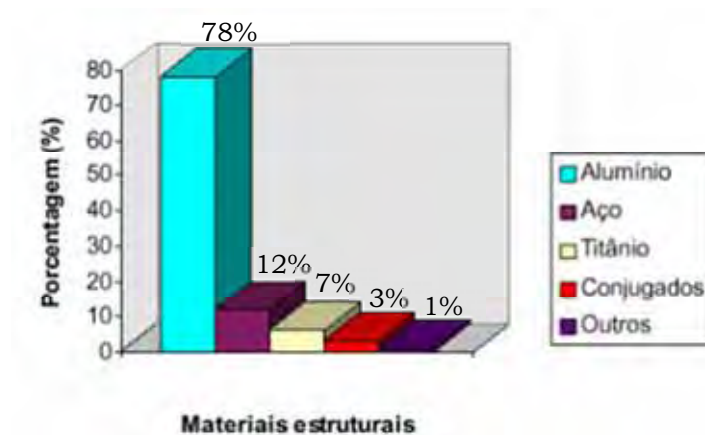


Figura 1 – Distribuição de materiais estruturais em um Boeing 767, (GODEFROID E BASTIAN, 1993).



Figura 2 – Distribuição em peso dos componentes estruturais em um Boeing 767 (GODEFROID E BASTIAN, 1993).

Este avião possui 34% do peso das asas em ligas de alumínio de alta resistência e 38% do peso da fuselagem do mesmo material e são locais onde estas ligas têm seu papel mais importante. Os aços especiais são basicamente utilizados no trem de pouso (12%), e as ligas de titânio e as superligas são empregadas principalmente nas estruturas sujeitas a elevadas temperaturas, enquanto que os materiais compostos (alto custo de fabricação) são utilizados nas superfícies de controle.

Em 2011 foi lançado oficialmente o Boeing 787 Dreamliner. A aeronave representa a primeira mudança drástica desde o Boeing 747, lançado na década de 1960. É 20% mais leve e tão resistente quanto os da geração anterior, construídos basicamente com alumínio (PIRES, 2011).

A Figura 3 mostra a distribuição de materiais estruturais na estrutura do avião comercial Boeing 787 Dreamliner.

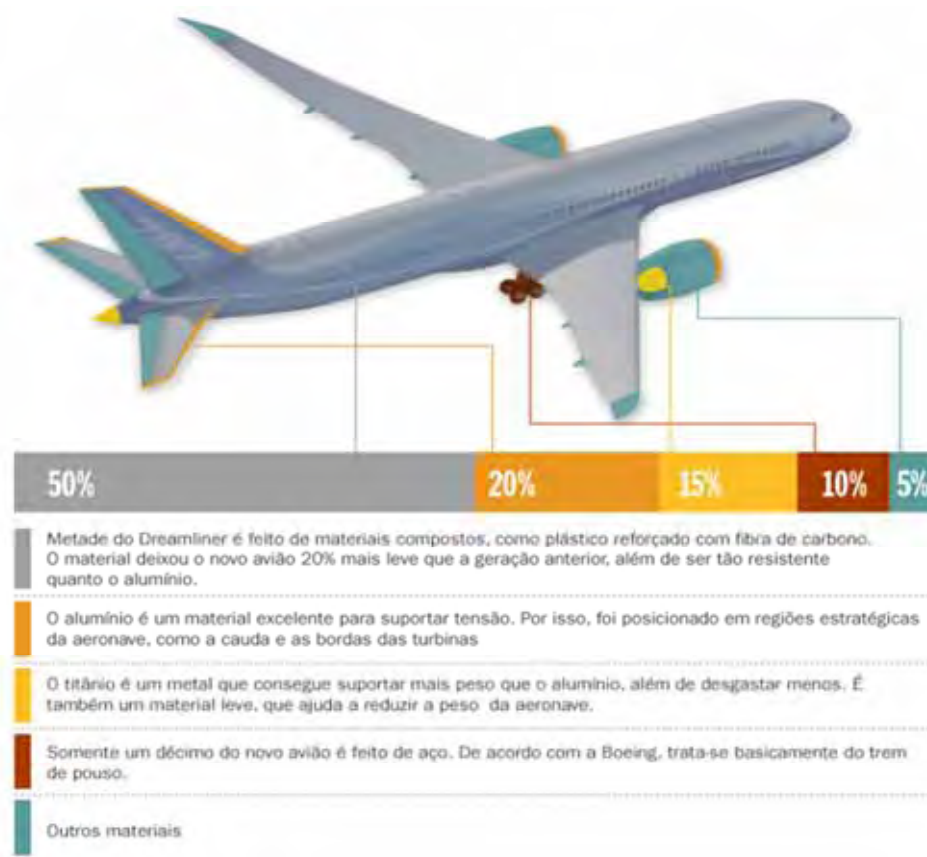


Figura 3 – Distribuição de materiais estruturais no Boeing 787 Dreamliner (adaptado de PIRES, 2011).

A EMBRAER – Empresa Brasileira de Aeronáutica, considerada a quarta maior empresa de aviação civil no mundo, também se preocupa constantemente com o estudo e conhecimento das ligas de alumínio empregadas em seus projetos. A empresa se destaca mundialmente pela qualidade de seus produtos tanto em termos tecnológicos quanto de projeto estrutural, o que, através da aplicação de materiais de elevado desempenho, possibilita desenvolver aeronaves com elevada resistência à fadiga e respeitável desempenho em uso. As ligas de alumínio são aplicadas em cerca de 80% dos seus componentes estruturais, sendo que as ligas das famílias 2XXX e 7XXX são as mais largamente utilizadas e que merecem maior destaque. As ligas de alumínio da família 7XXX são empregadas basicamente nos revestimentos da fuselagem e asas, cavernas usinadas e conformadas, longarinas, nervuras, diversos perfis estruturais, reforçadores, etc, (BARROSO, 2004).

Neste sentido, o estudo da liga AA 7075 passou a ser mais discutido, visando conhecer melhor suas características e comportamento sob diferentes aspectos, assim como o seu comportamento nos processos de usinagem existentes, devido sua larga aplicação na indústria aeroespacial.

CAPÍTULO 3 – USINAGEM DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

As ligas de alumínio estão entre os metais mais comumente usinados (TRENT, 1977). A maioria dessas ligas funde a temperaturas entre 500 °C e 600 °C, sendo que a temperatura de corte dificilmente alcança estes patamares, além do que, as taxas de desgaste da ferramenta também são baixas. Quando usinado com ferramentas e condições adequadas, podem adquirir bons acabamentos superficiais através de operações como o torneamento, por exemplo, minimizando a necessidade dos processos de retificação e polimento. O alumínio é comumente usinado com ferramentas de aço rápido, metal duro e diamante. As principais preocupações com a usinabilidade das ligas de alumínio incluem a vida da ferramenta, as características do cavaco e o acabamento superficial da peça (CHAMBERLAIN, 1979).

A usinagem de ligas de alumínio com ferramentas convencionais, na indústria, não é realizada sem qualquer dificuldade. Estes materiais tendem a aderir à superfície da ferramenta e rebarbas são formadas (CARRILERO ET AL., 2002). O dano da ferramenta é causado principalmente pela formação de uma camada de aderência e uma aresta postiça de corte (APC), implicando a redução da vida da ferramenta.

Segundo Derflinger, Brändle e Zimmermann (1999), os fluidos de corte têm um papel importante no processo de usinagem, pois contribuem para:

- Redução do atrito no contato peça-ferramenta;
- Remoção do cavaco da superfície de saída da ferramenta;
- Diminuição da temperatura na zona de contato;
- Limitação da difusão de elementos químicos da ferramenta para o cavaco e vice-versa.

No entanto, a utilização de fluidos de corte prejudica seriamente a qualidade do ambiente e aumenta o custo de usinagem. Segundo Dreejith e Ngoi (2000), a lubrificação representa de 16% - 20% do custo do produto.

Segundo Cunha (2004), em testes realizados na usinagem por torneamento da liga de alumínio AA 7050, baseada nos elementos Al, Zn, Mg e Cu, foi possível verificar uma baixa influência da velocidade de corte e do comprimento de usinagem no acabamento superficial das peças usinadas. Isto se deve principalmente à alta taxa de usinabilidade do alumínio e ao baixo desgaste apresentado pelas ferramentas de corte durante o processo.

Outros dados relevantes dizem respeito à rugosidade obtida, as quais se encontraram muito próximas à rugosidade calculada (rugosidade teórica); com velocidades de corte superiores a 500 m/min, o comportamento dos cavacos foram praticamente os mesmos, tanto na condição de corte a seco quanto na condição de corte com refrigeração abundante, revelando uma queda do desempenho do fluido de corte em manter a lubrificação e facilitar o escoamento do cavaco; e que a escolha correta do fluido de corte é um fator de elevada importância, pois esta escolha, se realizada de maneira adequada, pode trazer benefícios em relação à preservação da ferramenta de corte e diminuição do desgaste prematuro da mesma.

3.1 Utilização de fluidos de corte na usinagem de ligas de alumínio

Muitos fluidos de corte utilizados com sucesso na usinagem de materiais ferrosos não são adequados para a usinagem de ligas de alumínio, especialmente por três razões:

- A primeira razão é que as ligas de alumínio, quando usinadas rapidamente, desenvolvem uma película de óxido de alumínio duro nas superfícies expostas da ferramenta. Esta película prejudica a formação do cavaco, arruinando rapidamente as arestas de corte da ferramenta. Por esta razão, certos fluidos de corte contêm aditivos que inibem a formação de óxidos de alumínio, (KELLY e COTTERELL, 2002);
- A segunda razão é que normalmente as ligas de alumínio contêm quantidades significativas de silício, causando adesão de material à ferramenta. Isto promove uma rápida geração de calor, devido à

soldagem do cavaco na ferramenta e o surgimento de APC, encurtando drasticamente a vida da ferramenta, a menos que o fluido de corte seja aplicado de maneira adequada com extrema pressão e aditivos lubrificantes;

- O terceiro fator é que o alumínio e suas ligas têm um dos maiores coeficientes de expansão térmica entre a base dos metais, juntamente com sua baixa dureza e elasticidade, exigindo que o fluido de corte possua aditivos que promovam uma excelente refrigeração do material durante o corte.

No Quadro 10 são apresentados os fluídos de corte comumente utilizados na usinagem de ligas de alumínio.

Quadro 10 – Fluídos de corte comumente utilizados na usinagem de ligas de alumínio, adaptado de Schey (1993).

| PROCESSO | FERRAMENTA | FLUIDO DE CORTE |
|-------------|------------|-----------------|
| TORNEAMENTO | Metal Duro | El, Cl |
| FURAÇÃO | Metal Duro | Ol, Sp |

El – emulsão de óleo mineral, Cl – fluido químico, Sp – fluídos especialmente formulados,
Ol – óleo mineral ou sintético

O fluido de corte escolhido deve ser capaz de dissipar o calor rapidamente, que se acumula durante a usinagem. Caso contrário, a peça mostrará uma tendência de ter o seu acabamento superficial piorado através do crescimento de marcas em sua superfície, e uma incapacidade de manter tolerâncias, (KELLY e COTTERELL, 2002).

Em um processo de usinagem estável deve ser obtido um equilíbrio entre a geração e a dissipação de calor. Temperaturas excessivas podem aumentar rapidamente o desgaste da ferramenta, causando mudanças microestruturais, tensões residuais nas camadas superficiais e erros dimensionais como resultado da expansão térmica. A parte do calor absorvida pelos fluidos refrigerantes e a redução do

crescimento do calor durante a lubrificação dependem fortemente do processo de corte (KELLY E COTTERELL, 2002).

Para cortes a seco ou que impliquem o uso reduzido de fluidos de corte, a variação da temperatura deve ser suficiente para evitar a sua acumulação acima da temperatura crítica, onde a remoção de cavacos da zona de corte também se mostra como um importante aspecto.

Existem várias maneiras de preencher esses requisitos e ao mesmo tempo reduzir o consumo de fluidos de corte, sendo o primeiro passo, testar formas alternativas de lubri-refrigeração. Se o corte sem lubri-refrigeração se revela impraticável, o uso de fluidos de corte com maior estabilidade química e uma melhoria dos métodos de aplicação pode reduzir a quantidade total de fluidos empregados na operação. Isto se dá, devido à formação de finos filmes na face de corte que diminuem o atrito e consequentemente o desgaste da ferramenta.

A usinagem a seco é o principal objetivo ecológico, porém isto não é real para todas as operações. Dependendo do processo de corte, o uso reduzido de fluidos de corte é considerado como um passo intermediário.

Uma redução volumétrica importante dos fluidos é concebível, passando de lubri-refrigeração abundante para óleo em spray ou névoa. Embora seja incapaz de remover o calor da zona de corte, devido a pequenas quantidades aplicadas, o fluido pode fornecer lubrificação suficiente para minimizar o atrito entre o cavaco e a ferramenta, evitando a geração de calor nos primeiros instantes.

Na Figura 4 são apresentadas algumas estratégias de lubrificação alternativa para um processo de corte.

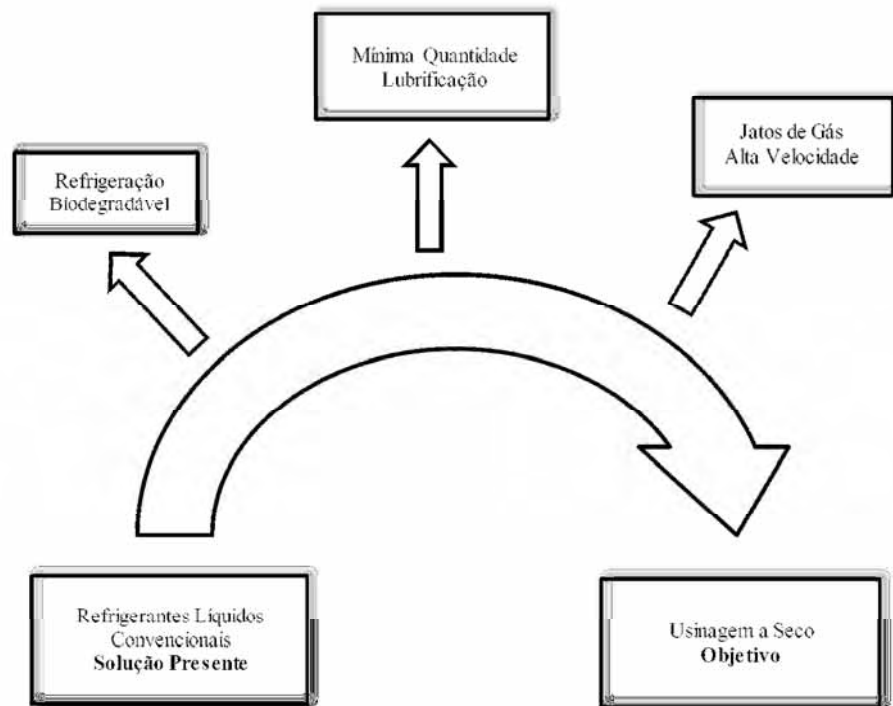


Figura 4 – Estratégias de lubrificação em um processo de corte, adaptado de Tönschoff et al., (1994).

3.2 Viabilidade do sistema de mínima quantidade de fluido (MQF)

O sistema de mínima quantidade de fluido (MQF), no processo de usinagem, é uma alternativa para os sistemas de lubrificação abundante ou completamente seca, e tem sido considerado como uma solução na redução do uso de lubrificantes, visando enfrentar os impactos ambientais, econômicos e preocupações com o desempenho do processo mecânico (HEINEMANN ET AL. 2006). MQF se refere ao uso de fluidos de corte de apenas uma pequena taxa de fluxo, na faixa de 50 ml/h – 500 ml/h, possuindo vantagens quanto à estabilidade térmica e a capacidade de lubrificação sobre os fluidos de corte convencionais.

Muitos pesquisadores têm sugerido as técnicas de MQF nos processos de usinagem (RIBEIRO ET AL., 2011; MACHADO e WALLBANK, 1997; DAVIM ET AL., 2006). Lugscheider et al. (1997) aplicou esta técnica no processo de alargamento de ferro fundido cinzento e de ligas de alumínio com ferramentas de metal duro revestido. Uma significativa redução no desgaste da ferramenta e uma melhora na

qualidade superficial dos furos foram observadas com a utilização da técnica de MQF quando comparada com o corte a seco. Dhar et al. (2006) empregou a Técnica de MQF no torneamento do aço AISI 1040, nos quais os resultados indicaram claramente que uma mistura de ar e óleo integral é melhor do que o sistema convencional de refrigeração abundante. Braga et al. (2002) relata que a furação da liga de alumínio-silício com ferramentas de metal duro não revestidas e com revestimento de diamante K10, utilizando a técnica de MQF, apresentou qualidade igual ou superior aos resultados obtidos com refrigeração abundante. As investigações realizadas por Kelly e Cotterell (2002) em ligas de alumínio revelaram que a técnica de MQF é preferível para altas velocidades de corte e taxas de avanço. Davim et al. (2007) investiu em experimentos com usinagem de metais sob diferentes condições de ambientes de refrigeração. A influência da velocidade de corte e da taxa de avanço sobre aspectos de usinabilidade foram estudados e concluiu-se que a refrigeração abundante pode ser substituída com sucesso pelo sistema de MQF.

Na Figura 5 é mostrado o modelo esquemático de um sistema de mínima quantidade de fluido por pressão para uma ferramenta de geometria definida, utilizada em processos de torneamento.

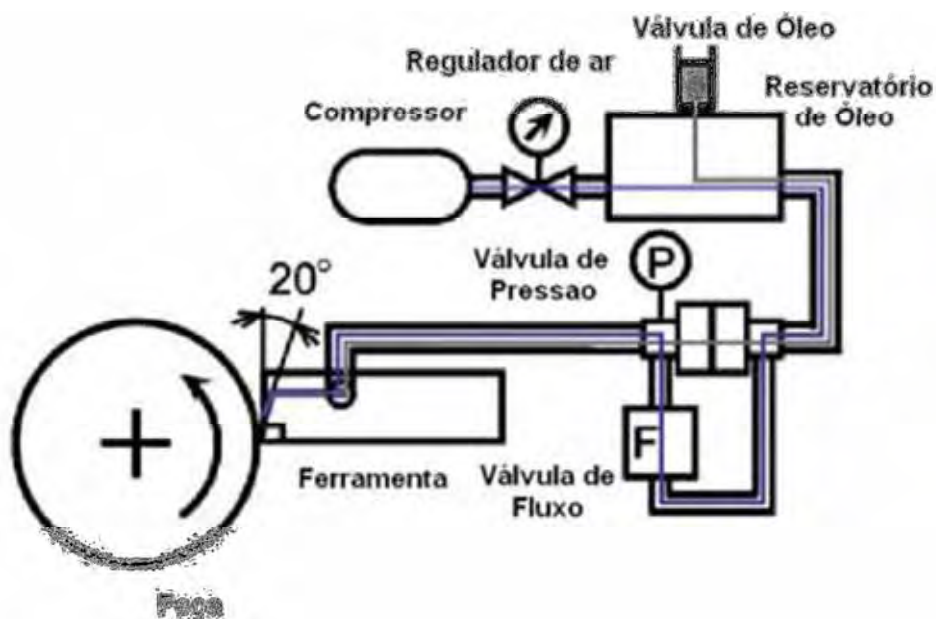


Figura 5 – Modelo esquemático de um sistema de mínima quantidade de fluido por pressão, adaptado de Kamata e Obikawa (2007).

A técnica de MQF sugere grandes vantagens ao processo de usinagem. Grande parte das investigações experimentais, quanto aos aspectos de usinabilidade, estão limitadas à eficiência do processo de MQF em relação ao corte a seco e com refrigeração abundante. Mas, para alcançar boa qualidade superficial em uma superfície usinada com mínima força específica de corte, as condições de corte devem ser cuidadosamente selecionadas com um ótimo sistema de MQF ou um novo material de ferramenta deve ser desenvolvido com um menor coeficiente de atrito e uma alta resistência ao calor, (GAITONDE, KARNIK e DAVIM, 2008).

Segundo Gaitonde, Karnik e Davim (2008), nenhum trabalho de pesquisa reportou em sua literatura a determinação da quantidade ideal de fluido com adequadas condições de corte para a obtenção de melhores resultados no processo de usinagem. Assim, os resultados deste trabalho oferecerão informações sobre a influência dos sistemas de lubri-refrigeração abundante e MQF no processo de torneamento da liga de alumínio AA 7075, esperando apresentar subsídios para se promover a otimização da usinagem destas ligas tirando o máximo de proveito do papel do fluido de corte.

3.3 Rugosidade na operação de torneamento

O torneamento de acabamento é a operação final, e em muitos casos, a única operação que irá determinar a qualidade da peça usinada. Após o desbaste ou semi-acabamento, o acabamento acontece para deixar as peças com suas tolerâncias e acabamento superficial dentro do especificado (CAMARGO, 2002).

Dentre os procedimentos usados para avaliar o acabamento superficial de uma peça no processo de torneamento, são comumente utilizados a rugosidade média (R_a) e a rugosidade máxima (R_{max}), segundo Camargo (2002).

A rugosidade média (R_a) consiste na média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m). Esta grandeza pode ser considerada como a altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas entre o

perfil de rugosidade e a linha média, tendo por comprimento, o percurso de medição (l_m), conforme Figura 6 (CAMARGO, 2002).

Na Figura 6 é mostrado o modelo esquemático do parâmetro R_a para medição do acabamento superficial.

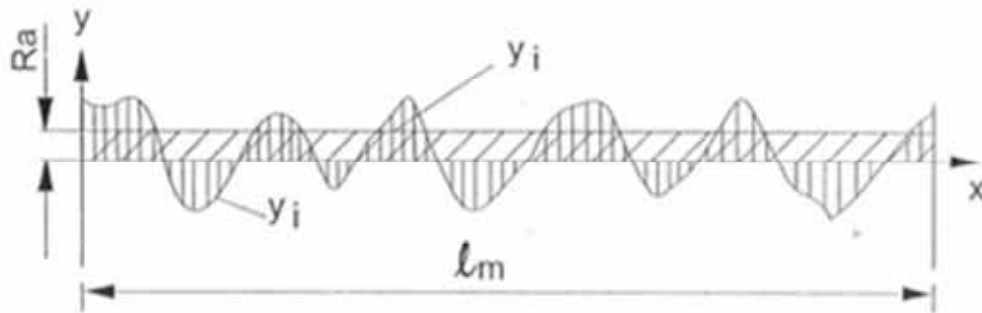


Figura 6 – Rugosidade média (R_a), adaptado de Camargo (2002).

A rugosidade máxima (R_{max}) é definida como o maior valor das rugosidades parciais (z_i) que se apresenta no percurso de medição (l_m), ou seja, a maior distância entre duas linhas paralelas a linha média que tangenciam o perfil no pico mais alto e do vale mais profundo em um comprimento de medição (l_m), conforme Figura 7 (CAMARGO, 2002).

Na Figura 7 é mostrado o modelo esquemático do parâmetro R_{max} para medição do acabamento superficial.

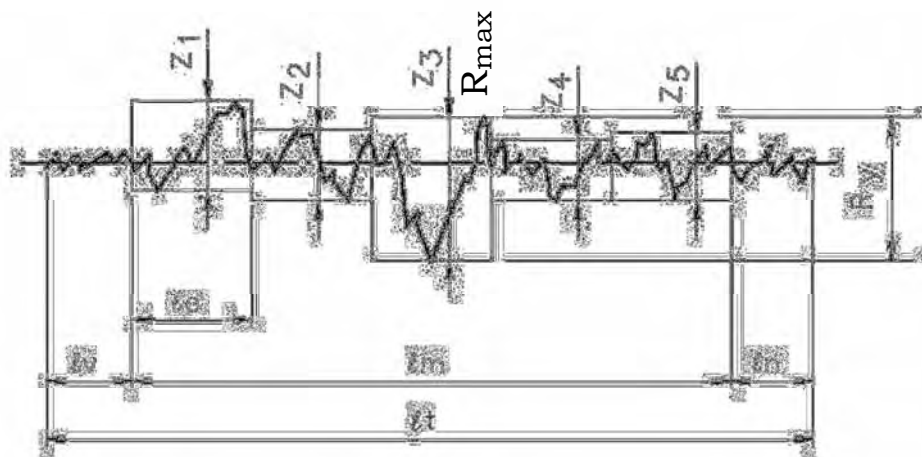


Figura 7 – Rugosidade máxima (R_{max}), adaptado de Camargo (2002).

Os valores de R_a e R_{max} geralmente são expressos em μm no sistema métrico ou μin no sistema inglês, com os rugosímetros possuindo geralmente resoluções que vão de 0,1 a 0,001 μm (AMORIM, 2002).

A rugosidade de uma peça manufaturada é afetada por diversos fatores, desde o processo de fabricação até a geometria da ferramenta, passando pelos parâmetros de corte. Os valores teóricos de R_{max} e R_a , no torneamento, podem ser calculados de acordo com as Equações 1 e 2 respectivamente. Estes valores são chamados de teóricos porque só consideram a influência geométrica do avanço (f) e do raio de ponta da ferramenta (r_ϵ), conforme mostra a Figura 8 (REIS, 2000).

Na Figura 8 é mostrado o modelo esquemático da contribuição geométrica do avanço e raio de ponta da ferramenta na rugosidade superficial.

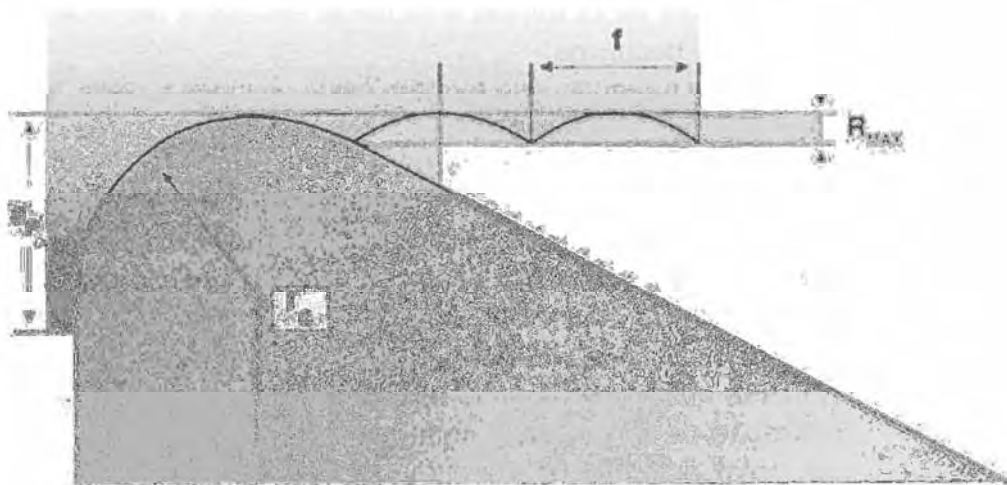


Figura 8 – Contribuição geométrica do avanço e raio de ponta da ferramenta na rugosidade, adaptado de Diniz et al. (2000).

$$R_{max} = \frac{f^2}{8.r_\epsilon} \quad (\mu\text{m}) \quad (1)$$

onde R_{max} é a rugosidade máxima, f o avanço e r_ϵ o raio de ponta da ferramenta.

A rugosidade teórica R_a pode ser calculada utilizando-se a analogia $R_{\max}/R_a = 4$, assim temos um valor aproximado da mesma (DINIZ E NORITOMI, 1998).

$$R_a = \frac{f^2}{32.r_\epsilon} \text{ (}\mu\text{m)} \quad (2)$$

onde R_a é a rugosidade média, f o avanço e r_ϵ o raio de ponta da ferramenta.

Na Figura 9 é mostrada a classificação do acabamento superficial em função do grau de rugosidade e o processo de usinagem que pode ser usado em sua obtenção. Também é possível visualizar uma relação aproximada entre a simbologia de triângulos, as classes e os valores de R_a (μm).



Figura 9 – Variação da rugosidade em função do processo de usinagem utilizado, adaptado de Camargo (2002).

Normalmente a rugosidade real obtida é maior que a calculada pelas equações 3.1 e 3.2. Esse efeito decorre de fatores como vibração, presença de aresta postiça de corte (APC), desgaste da ferramenta, deformação do cavaco, fluxo lateral do cavaco e erros de fixação da peça e da ferramenta (REIS, 2000).

Segundo Cunha (2004), em testes realizados na usinagem por torneamento da liga de alumínio AA 7050, foi possível verificar uma baixa influência da velocidade de corte e do comprimento de usinagem no acabamento superficial das peças usinadas. Isto se deve principalmente à alta taxa de usinabilidade do alumínio e ao baixo desgaste apresentado pelas ferramentas de corte durante o processo, tanto na usinagem com refrigeração abundante quanto na usinagem a seco. Outro dado relevante é que a rugosidade obtida foi muito próxima à rugosidade calculada (rugosidade teórica), para as condições de corte utilizadas.

CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

O material utilizado nos ensaios foi a liga de alumínio AA 7075 fabricada pela Alcoa Alumínio S.A., a qual é amplamente utilizada na indústria aeronáutica, conforme composição química apresentada no Quadro 11.

Quadro 11 – Composição química da liga de alumínio AA 7075, adaptado de Alcoa Alumínio (2012).

| Composição Química – Liga de Alumínio AA 7075 – (%) | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------|------|---------|------|---------|-----------|---------|------|--------|
| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Outros |
| 0,40 | 0,50 | 1,2-2,0 | 0,30 | 2,1-2,9 | 0,18-0,28 | 5,1-6,1 | 0,20 | 0,15 |

Este material foi obtido na forma de placas laminadas, sendo estas cortadas por meio de serra de fita na forma de barras retangulares de três polegadas de espessura pelo seu fornecedor, sendo sua composição química especificada pelo próprio fabricante.

4.1.1 Corpos de prova

Os corpos de prova foram preparados no Laboratório de Estudo da Usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT), por meio de usinagem por torneamento convencional, a fim de transformar as barras retangulares em barras cilíndricas conforme mostra a Figura 10.

Após a obtenção das barras cilíndricas por torneamento convencional, os corpos de prova foram novamente usinados, e uma de suas extremidades foi rebaixada para fixação na placa do torno CNC, perfazendo um diâmetro de 62 mm, comprimento total de 250 mm e comprimento de corte útil de 220 mm para os ensaios, conforme mostra a Figura 11.

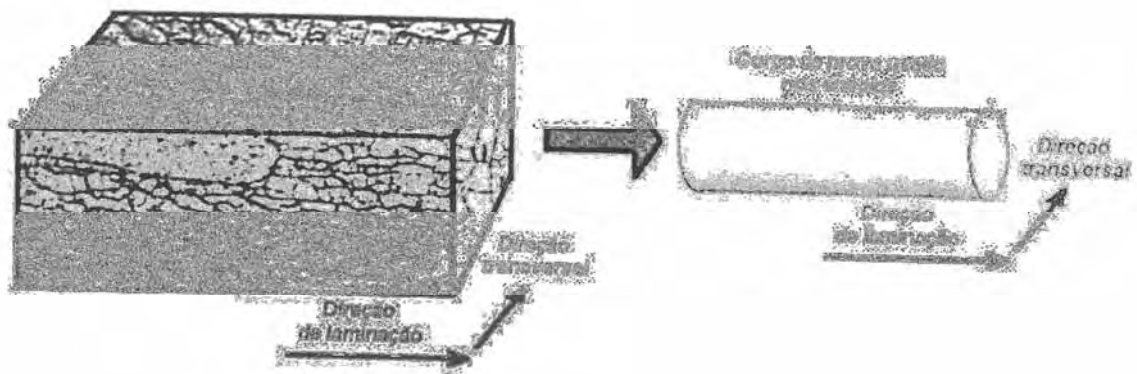


Figura 10 – Procedimento de preparação dos corpos de prova (adaptado de CUNHA, 2004).

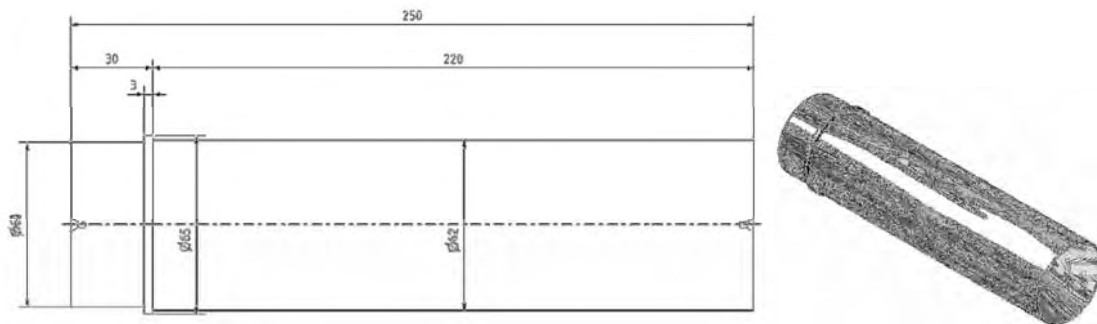


Figura 11 – Formato final dos corpos de prova utilizados nos ensaios.

4.1.2 Ferramenta de corte

Nos ensaios foram utilizadas pastilhas de metal duro sem cobertura de geometria CCGX 09 T3 04-AL H10 de formato rômbo de 80° do fabricante SANDVIK, conforme mostra a Figura 12.

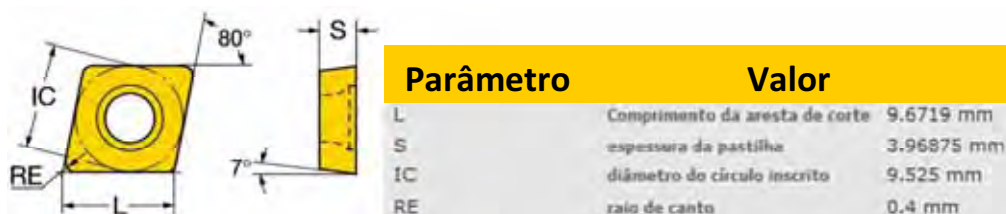


Figura 12 – Pastilha de metal duro utilizada nos ensaios, adaptado de Sandvik (2005).

Os parâmetros de corte recomendados pelo fabricante foram: a_p (0,5 a 5,0 mm); f (0,1 a 0,3 mm/r); v_c (250 a 2500 m/min).

O suporte utilizado nos ensaios foi o SCLCR 2020 K09 do fabricante SECO (Laboratório de Estudo da Usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia – DMT).

4.1.3 Máquina-ferramenta

Para os ensaios de usinagem foi utilizado um Torno CNC (Figura 13) do fabricante ROMI, modelo Centur 30S, comando MACH 9, rotação máxima 3500 RPM, potência 10 kW, do Laboratório de Estudo da Usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT).



Figura 13 – Torno CNC do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT).

4.1.4 Rugosímetro

Para a medição da rugosidade foi utilizado um rugosímetro portátil MARSURF (Figura 14) modelo M300 do fabricante MAHR, com apalpador mecânico tipo estilete,

do Laboratório de Estudo da Usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT).



Figura 14 – Rugosímetro portátil MARSURF modelo M300.

4.1.5 Microscópio óptico

Para análise da ferramenta de corte foi utilizado um Microscópio óptico MARVISION (Figura 15) do fabricante MAHR, modelo MM200 com aumento de 32x, possuindo micrômetro digital para medição do desgaste da ferramenta, do Laboratório de Estudo da Usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT).



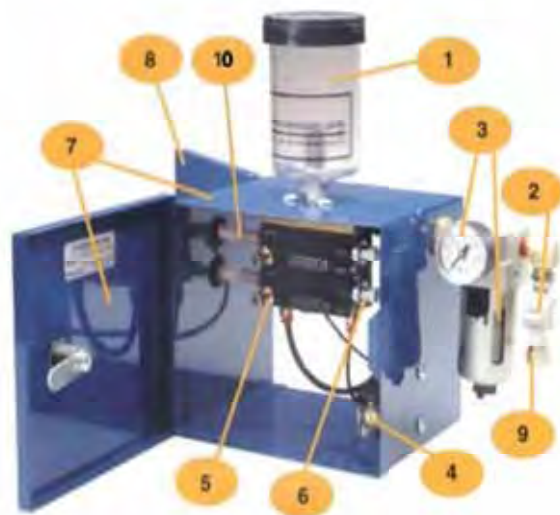
Figura 15 – Microscópio óptico MARVISION modelo MM200.

4.1.6 Fluido de corte

Nos ensaios de refrigeração abundante foi utilizado óleo emulsionável LUBRAX INDUSTRIAL OP-38 de base naftênica para usinagem de metais em operações como perfuração, fresamento, aplainamento, corte, torneamento, esmerilhamento, retificação e rosqueamento. Este produto forma emulsões do tipo óleo em água, leitosas, homogêneas e estáveis em todas as concentrações indicadas para uso e pode ser utilizado para todos os metais.

4.1.7 Mínima quantidade de fluido (MQF)

Nos ensaios foi utilizado um sistema de mínima quantidade de fluido (MQF), desenvolvido para atender operações de usinagem de metais ferrosos e não ferrosos. Este sistema consiste na utilização de óleo vegetal ACCU-LUBE LB1000 do fabricante ITW CHEMICAL e de ar comprimido com fluxo constante a uma pressão de 5 bar (kgf/cm^2), como meio de lubri-refrigeração, direcionados para região de corte através de bicos direcionadores, conforme mostram as Figuras 16 e 17.



1. Reservatório 300 ml;
2. Registro de acionamento;
3. Manômetro e filtro de ar;
4. Gerador de frequência (sentido horário aumenta frequência);
5. Bomba pneumática de ajuste individual;
6. Ajuste do fluxo de lubrificante;
7. Caixa metálica;
8. Furos de montagem ou bases magnéticas para fixação rápida;
9. Entrada de ar;
10. Saída para o bocal aplicador.

Figura 16 – Sistema de mínima quantidade de fluido (MQF).



Figura 17 – Bicos direcionadores do sistema MQF.

4.2 Fluxograma dos ensaios

O fluxograma mostrado na Figura 18 apresenta os procedimentos de ensaio adotados para o estudo da usinagem da liga AA 7075 e análise dos resultados.

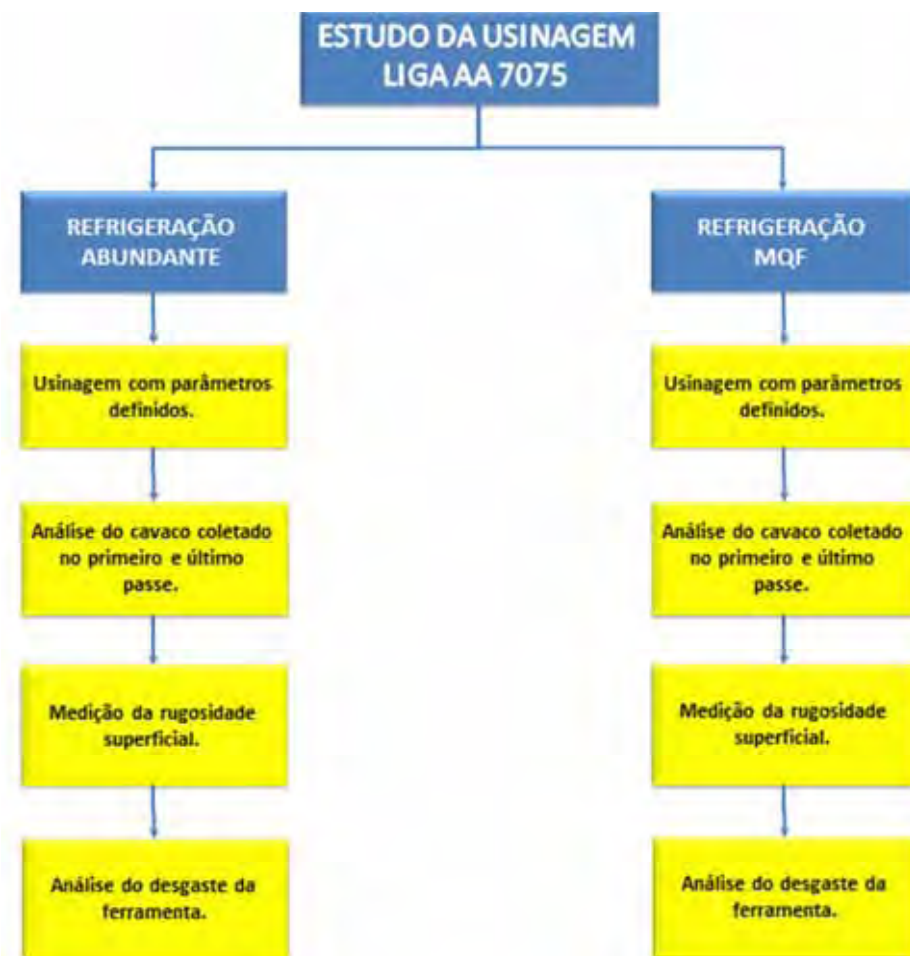


Figura 18 – Fluxograma dos ensaios de usinagem da liga de alumínio AA 7075.

4.2.1 Ensaios de usinagem da liga AA 7075

Os ensaios de usinagem foram realizados por meio de torneamento cilíndrico externo (Figura 19) com profundidade de corte (a_p) constante de 0,5 mm e variação da velocidade de corte (V_c) e do avanço (f), conforme parâmetros de corte indicados no catálogo do fabricante da ferramenta de corte utilizada.

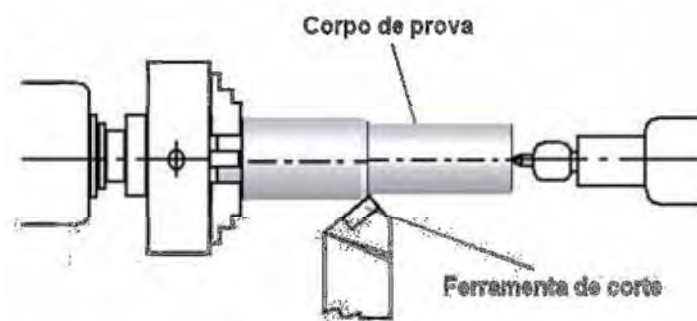


Figura 19 – Esquema do ensaio de torneamento cilíndrico externo (adaptado de CUNHA, 2004).

Nas Figuras 20 e 21 são mostrados os esquemas de utilização dos parâmetros de corte nos ensaios de usinagem com refrigeração abundante e MQF.

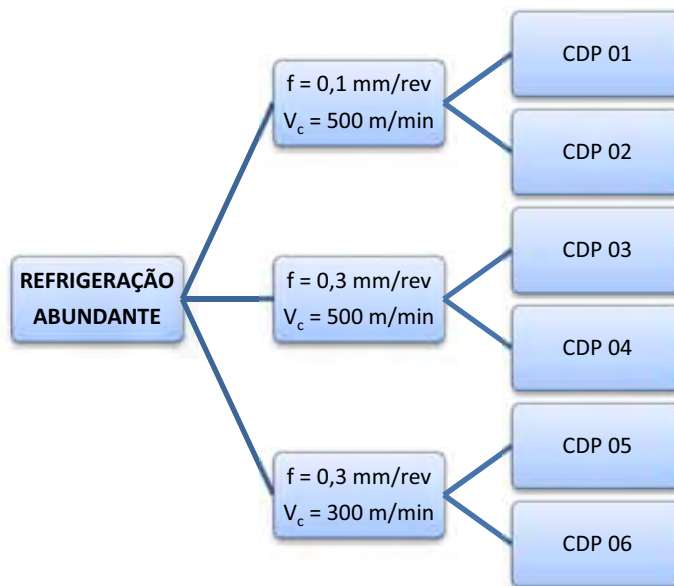


Figura 20 – Esquema de utilização dos parâmetros de corte nos ensaios de usinagem com refrigeração abundante.

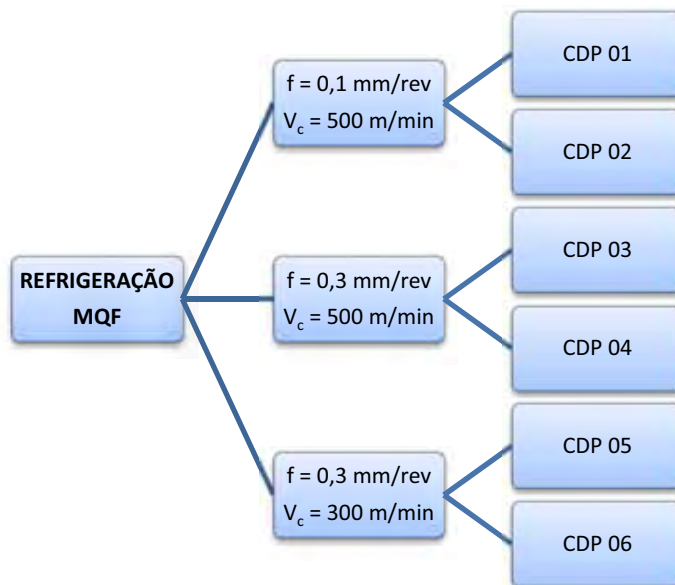


Figura 21 – Esquema de utilização dos parâmetros de corte nos ensaios de usinagem com refrigeração MQF.

4.2.2 Análise do cavaco

Nos ensaios, após o primeiro e o último passe da usinagem de cada corpo de prova, uma amostra do cavaco foi documentada tanto nas usinagens realizadas com refrigeração abundante, quanto nas usinagens realizadas com refrigeração MQF. Isto foi feito para que se pudesse correlacionar sua forma com as condições de corte estabelecidas e os desgastes da ferramenta.

4.2.3 Medições de rugosidade

Nos ensaios foram realizadas medições de rugosidade em todas as condições de usinagem a cada dois passes dados nos corpos de prova, com 0,5 mm de profundidade cada. Foram feitas três medições em torno de cada corpo de prova utilizando Rugosímetro (item 4.1.4), dispostas a um ângulo de 120° uma da outra, com o corpo de prova apoiado sobre dois prismas em uma mesa de medição (Figura 22), sendo que para os corpos de prova usinados com avanço de 0,1 mm/rev foi utilizado um *cut-off* de 0,25 mm e para os corpos de prova usinados com avanço de 0,3 mm/rev foi utilizado um *cut-off* de 0,8 mm.



Figura 22 – Esquema de medição da rugosidade dos corpos de prova.

4.2.4 Análise do desgaste da ferramenta

Nos ensaios foi realizada análise do desgaste da ferramenta em todas as condições de usinagem a cada dois passes dados nos corpos de prova, com 0,5 mm de profundidade cada. A análise foi feita em microscópio óptico (item 4.1.6), com o qual foi possível medir a progressão do desgaste de flanco (v_b) da ferramenta em função do comprimento de corte usinado, conforme mostra a Figura 23.

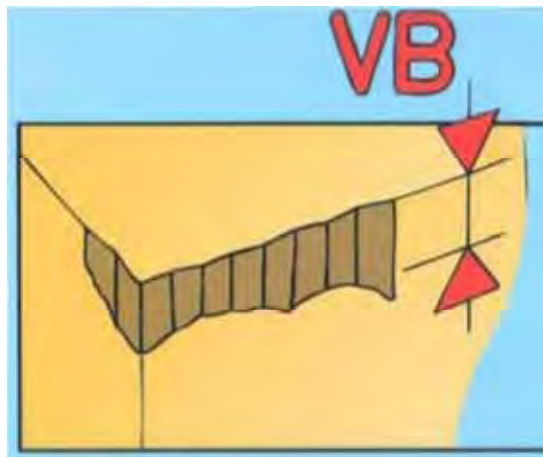


Figura 23 – Medição do desgaste de flanco (v_b) da ferramenta, adaptado de Sandvik (2005).

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios foram realizados utilizando-se as técnicas de lubri-refrigeração abundante e de mínima quantidade de fluido (MQF), para que se pudesse analisar o comportamento da usinagem utilizando os dois sistemas.

5.1 Usinagem com refrigeração abundante

Nas Figuras 24 a 28 são mostrados os comportamentos da rugosidade média (R_a), da rugosidade máxima (R_{max}), do desgaste da ferramenta e a documentação dos cavacos obtidos nos ensaios de usinagem realizados nos CDP'S 01 e 02 com refrigeração abundante, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,1 mm/rev, em função do comprimento de corte. Os valores obtidos nos ensaios são mostrados nas Tabelas 1 e 2 do Anexo A.

Nas Figuras 24 e 25 é possível observar uma semelhança entre o comportamento da rugosidade média (R_a) e da rugosidade máxima (R_{max}), nos ensaios realizados nos CDP'S 01 e 02. O resultado obtido para a rugosidade média (R_a) no ensaio do CDP 02 permaneceu acima da rugosidade teórica no início do ensaio, porém atingiu o valor teórico calculado com o aumento do comprimento de corte.

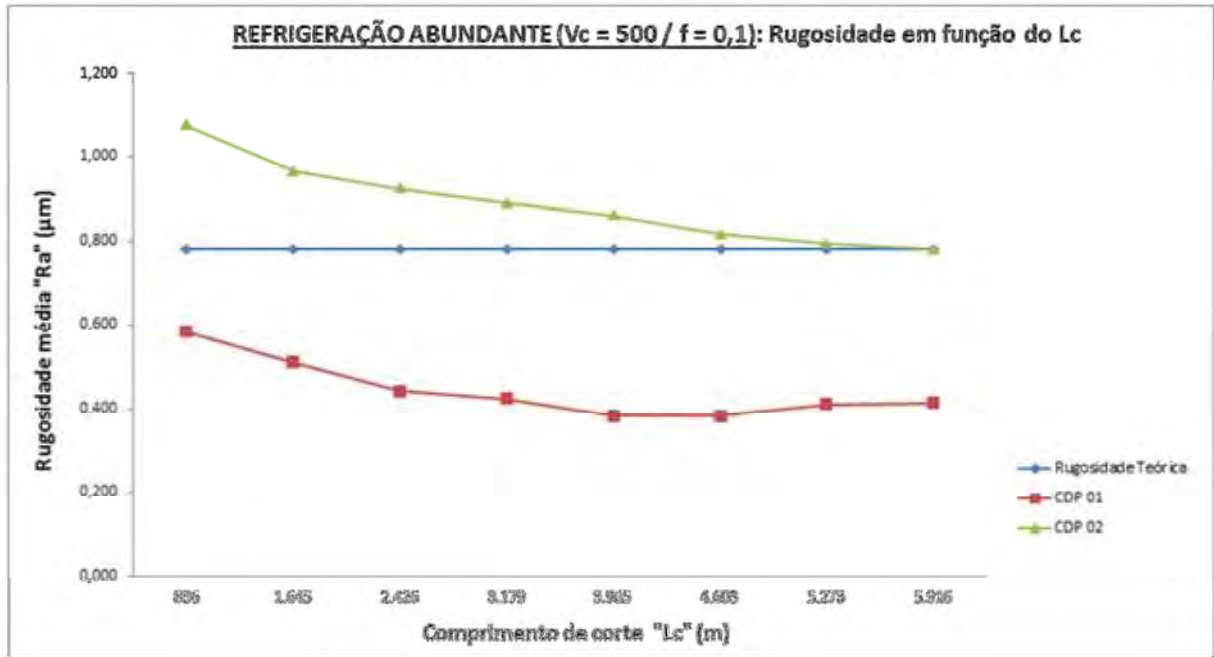


Figura 24 – Comportamento da rugosidade média em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev, realizada nos CDP'S 01 e 02.

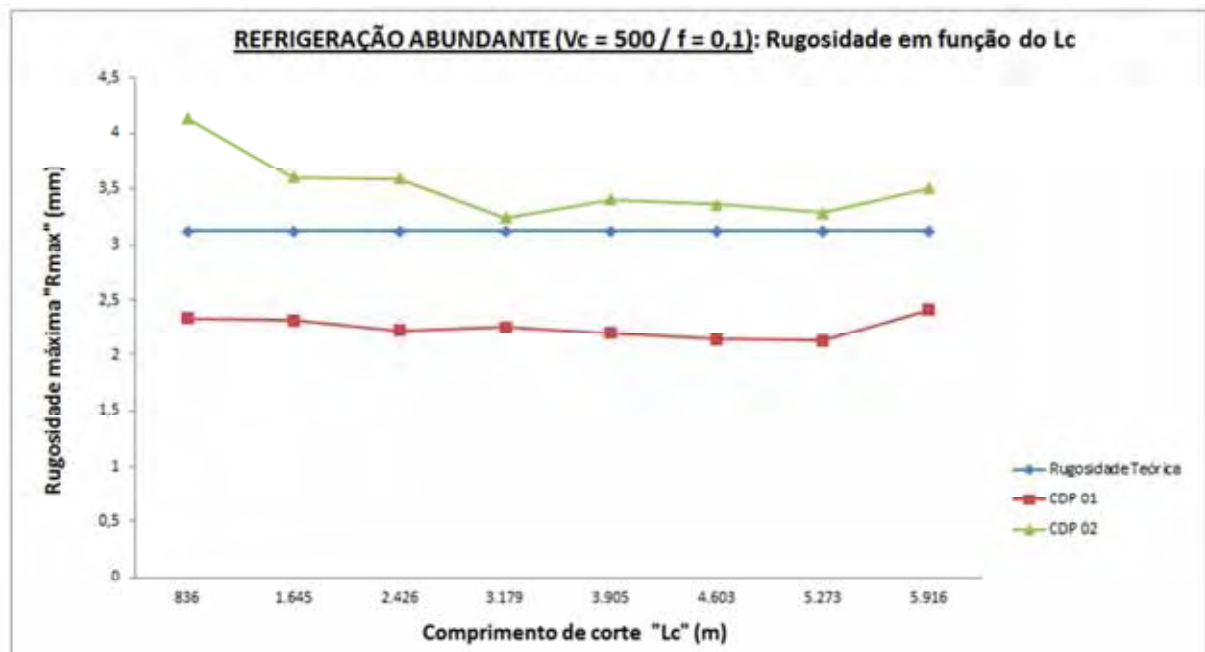


Figura 25 – Comportamento da rugosidade máxima em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev, realizada nos CDP'S 01 e 02.

Na Figura 26 pode-se observar que o comportamento do desgaste da ferramenta nos ensaios dos CDP'S 01 e 02 foi bastante semelhante, além de apresentarem uma diferença pequena entre os seus valores.

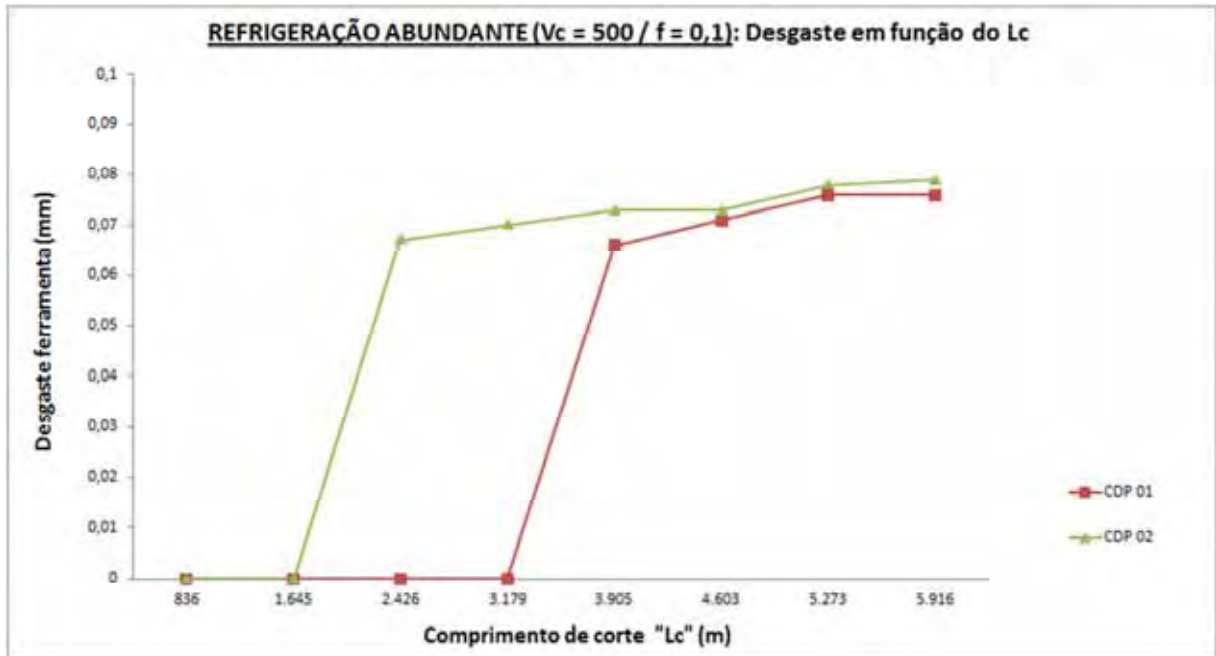


Figura 26 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev, realizada nos CDP'S 01 e 02.

Nas Figuras 27 e 28 pode-se observar a documentação de cavacos em forma de fita no ensaio do CDP 01 e cavacos helicoidais longos no ensaio do CDP 02. Esta diferença provavelmente tenha ocorrido devido à diferença do comportamento do metal duro e da aresta de corte de uma ferramenta para outra.



Figura 27 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (a) e último (b) passe na usinagem do CDP 01 com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev.

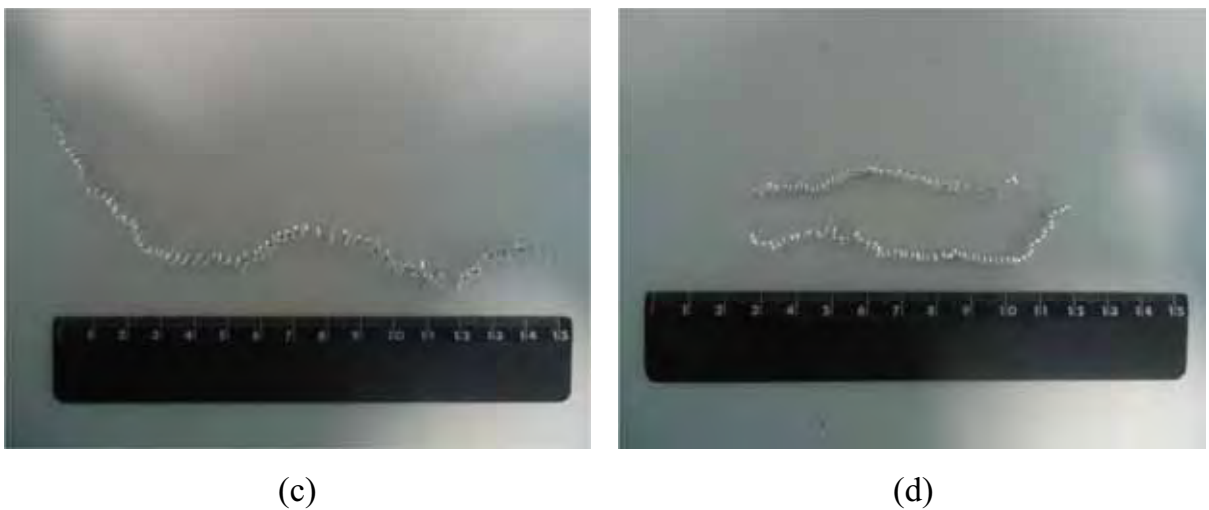


Figura 28 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (c) e último (d) passe na usinagem do CDP 02 com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev.

Nas Figuras 29 a 33 são mostrados os comportamentos da rugosidade média (R_a), da rugosidade máxima (R_{max}), do desgaste da ferramenta e a documentação dos cavacos obtidos nos ensaios de usinagem realizados nos CDP'S 03 e 04 com refrigeração abundante, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev, em função do comprimento de corte. Os valores obtidos nos ensaios são mostrados nas Tabelas 3 e 4 do Anexo A.

Nas Figuras 29 e 30 é possível observar um o comportamento praticamente idêntico entre a rugosidade média (R_a) e a rugosidade máxima (R_{max}), nos ensaios realizados nos CDP'S 03 e 04.

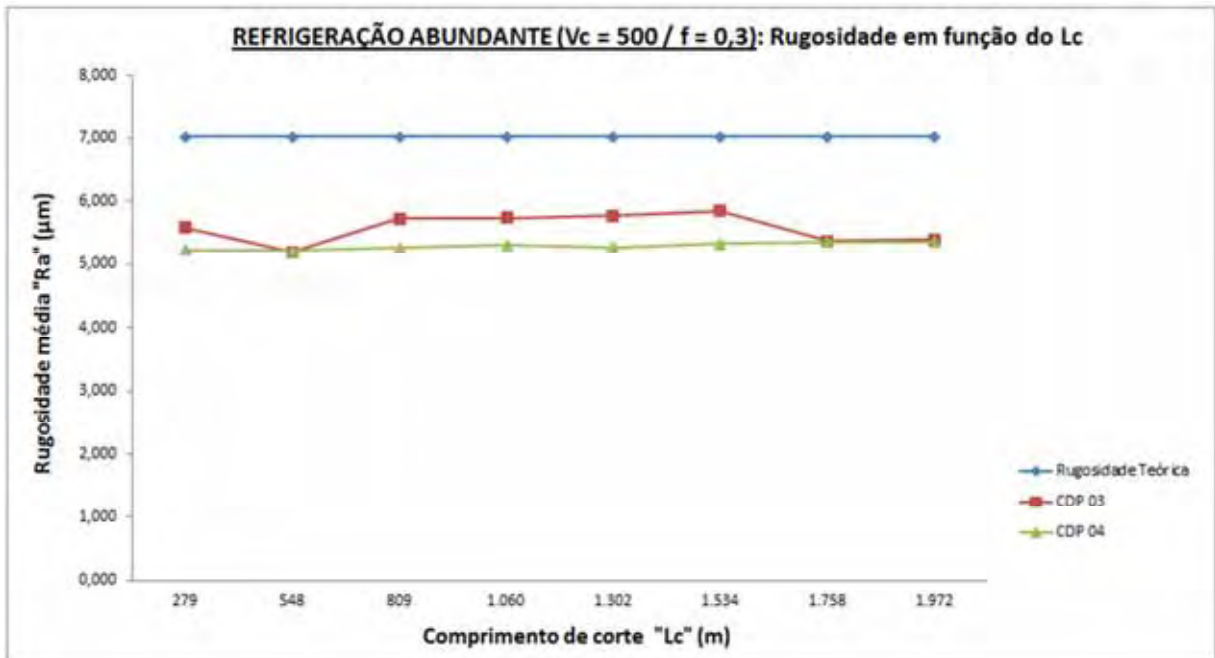


Figura 29 – Comportamento da rugosidade média em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 03 e 04.

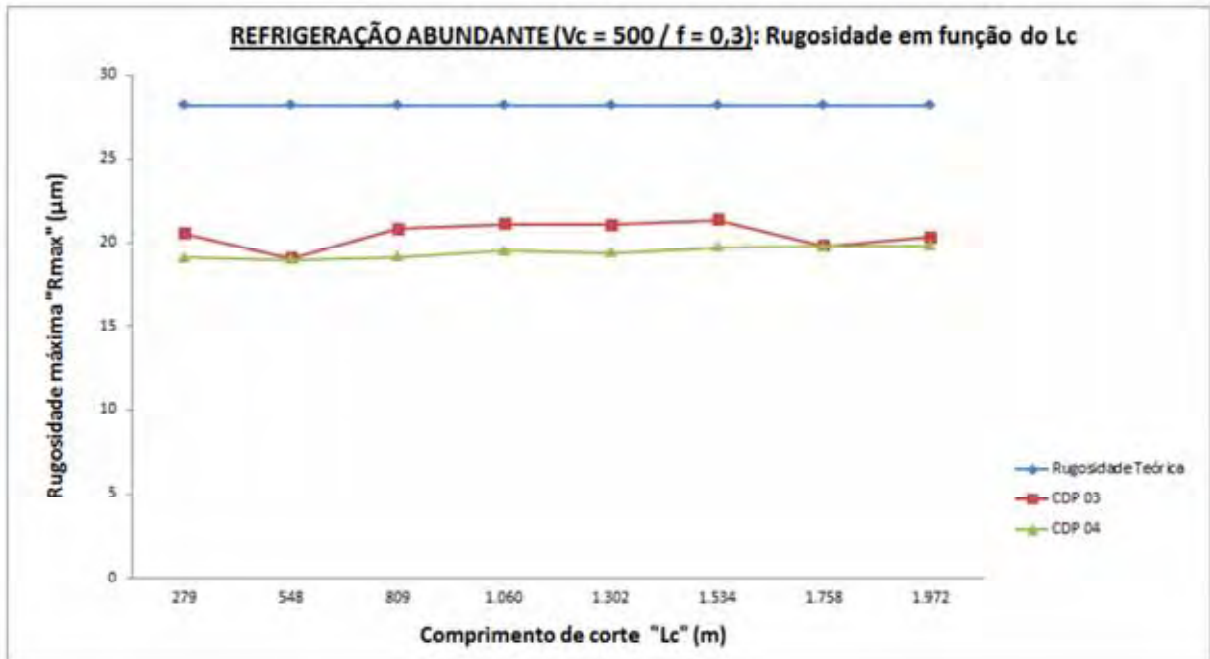


Figura 30 – Comportamento da rugosidade máxima em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 03 e 04.

Na Figura 31 pode-se observar que o comportamento do desgaste da ferramenta nos ensaios dos CDP'S 03 e 04 foi mais estável, além de apresentarem uma diferença pequena entre os seus valores.

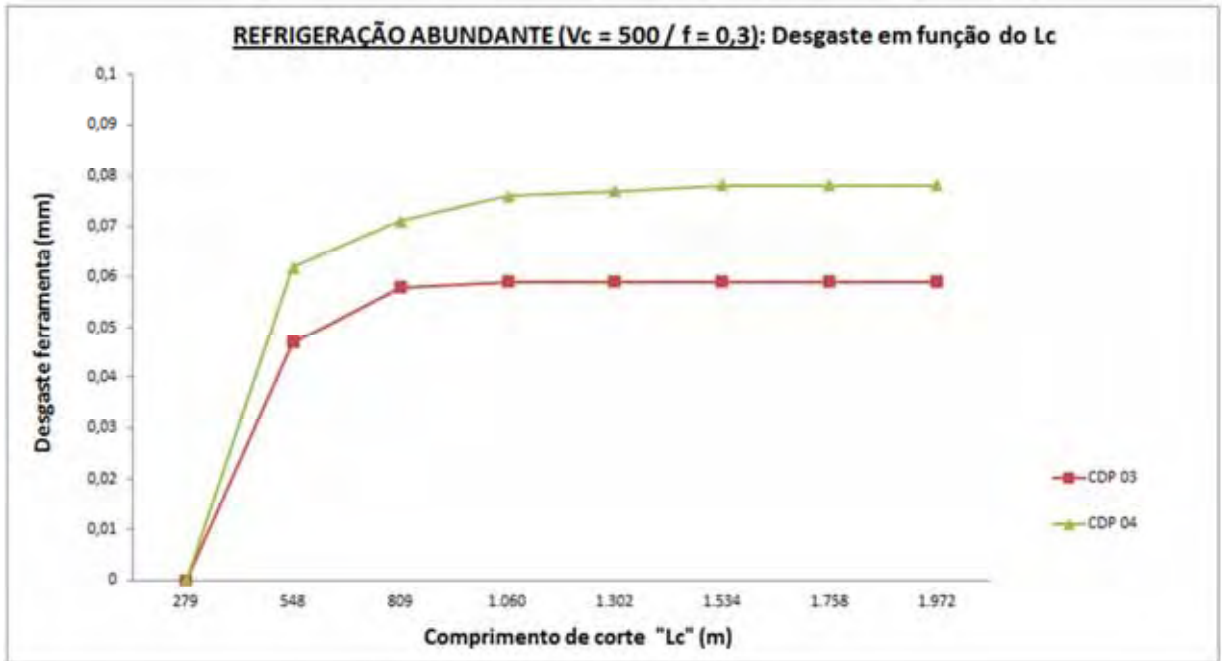


Figura 31 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 03 e 04.

Nas Figuras 32 e 33 pode-se observar a documentação de cavacos helicoidais curtos nos ensaios do CDP 01 e um pouco mais alongados nos ensaios do CDP 02, porém com uma diferença não significativa ente os dois.



(e)



(f)

Figura 32 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (e) e último (f) passe na usinagem do CDP 03 com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev.

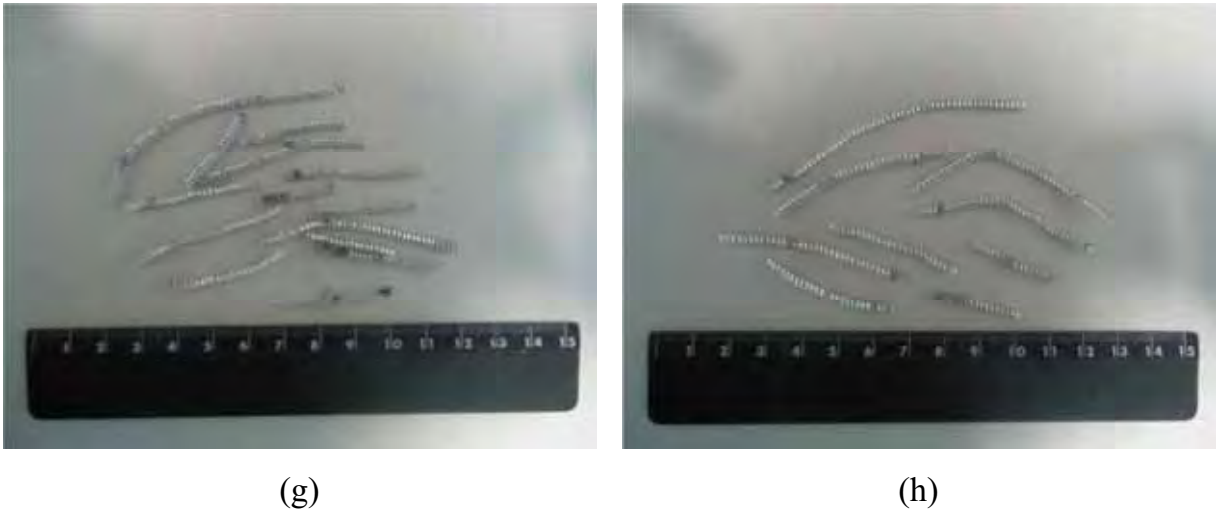


Figura 33 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (e) e último (f) passe na usinagem do CDP 04 com refrigeração abundante, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev.

Nas Figuras 34 a 38 são mostrados os comportamentos da rugosidade média (R_a), da rugosidade máxima (R_{max}), do desgaste da ferramenta e a documentação dos cavacos obtidos nos ensaios de usinagem realizados nos CDP'S 05 e 06 com refrigeração abundante, velocidade de corte (v_c) de 300 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev, em função do comprimento de corte. Os valores obtidos nos ensaios são mostrados nas Tabelas 5 e 6 do Anexo A.

Nas Figuras 34 e 35 é possível observar um o comportamento praticamente idêntico entre a rugosidade média (R_a) e a rugosidade máxima (R_{max}), nos ensaios realizados nos CDP'S 05 e 06.

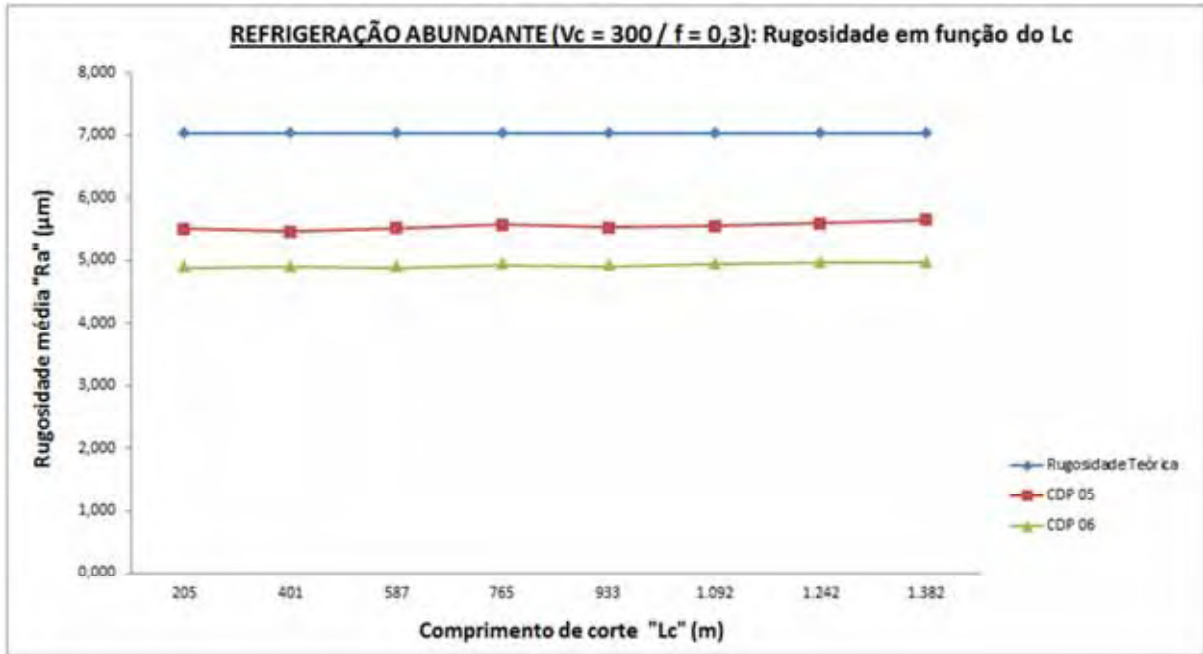


Figura 34 – Comportamento da rugosidade média em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração abundante, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 05 e 06.

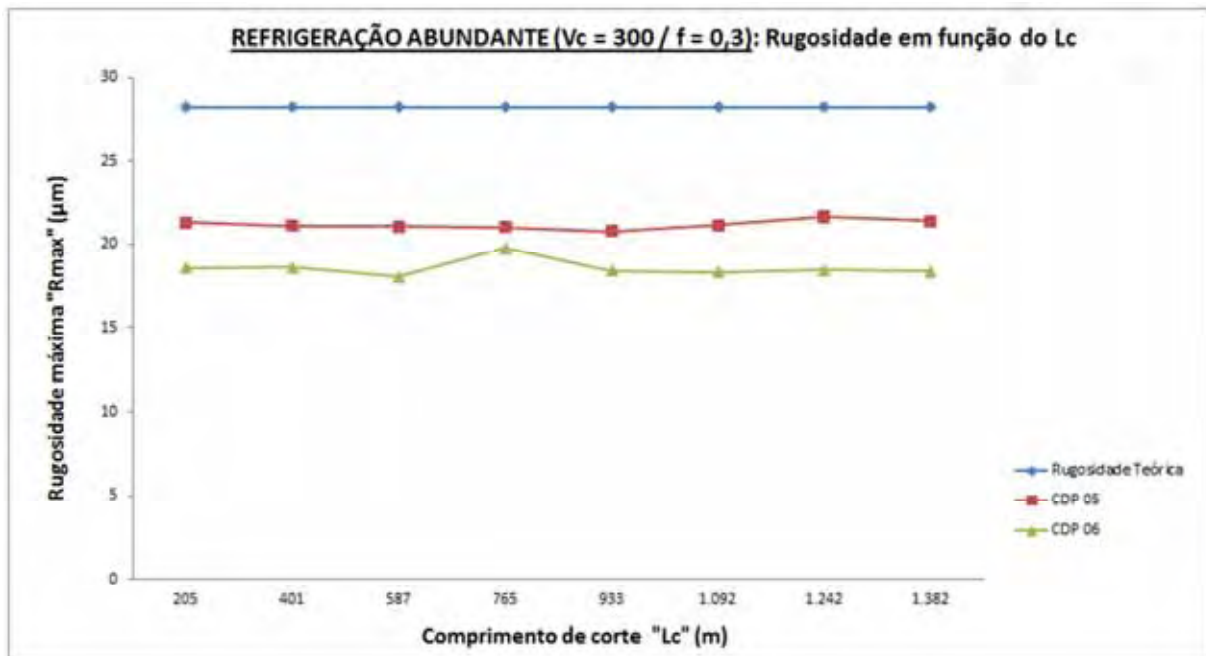


Figura 35 – Comportamento da rugosidade máxima em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração abundante, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 05 e 06.

Na Figura 36 pode-se observar que o comportamento do desgaste da ferramenta nos ensaios dos CDP'S 05 e 06 não apresentou uma diferença significativa entre os seus valores.

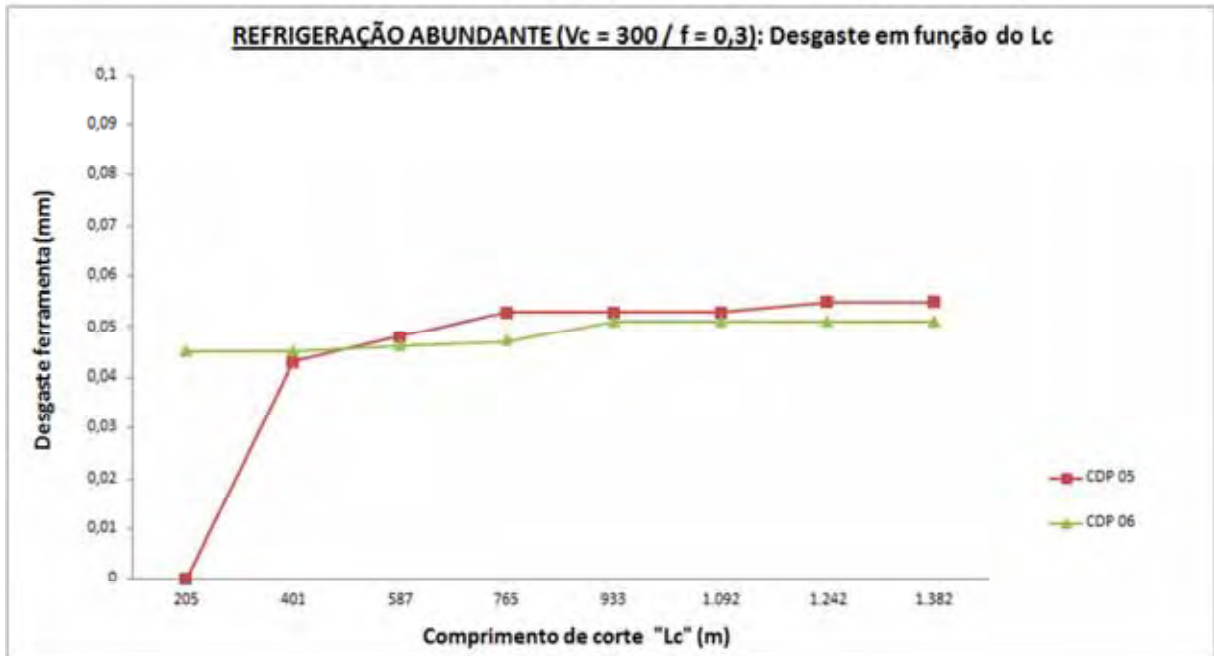


Figura 36 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração abundante, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 05 e 06.

Nas Figuras 37 e 38 pode-se observar a documentação de cavacos helicoidais mais alongados nos ensaios dos CDP'S 05 e 06, porém com uma diferença não significativa entre os dois.

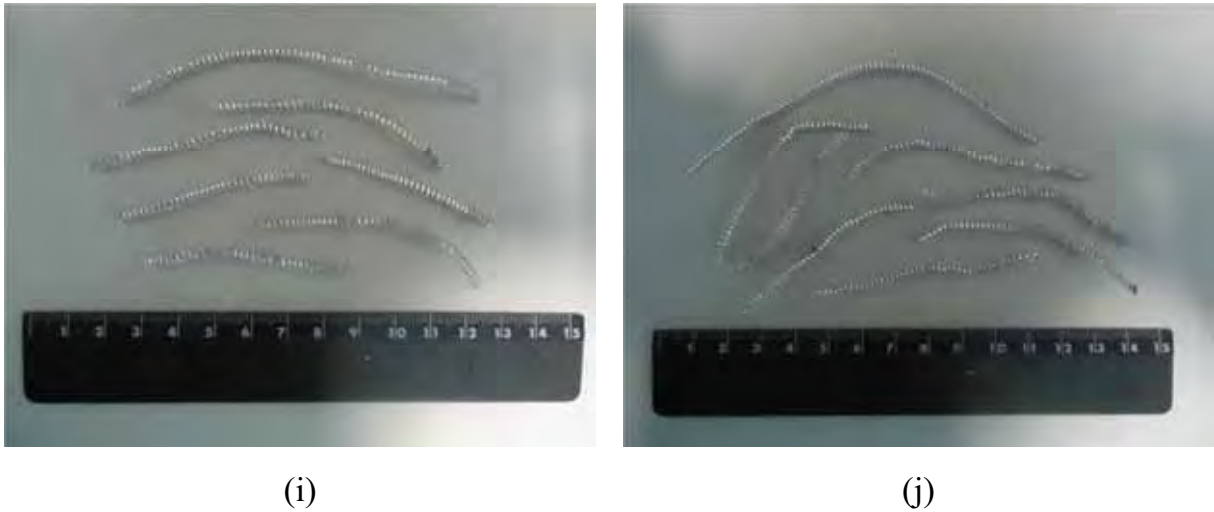


Figura 37 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (i) e último (j) passe na usinagem do CDP 05 com refrigeração abundante, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev.

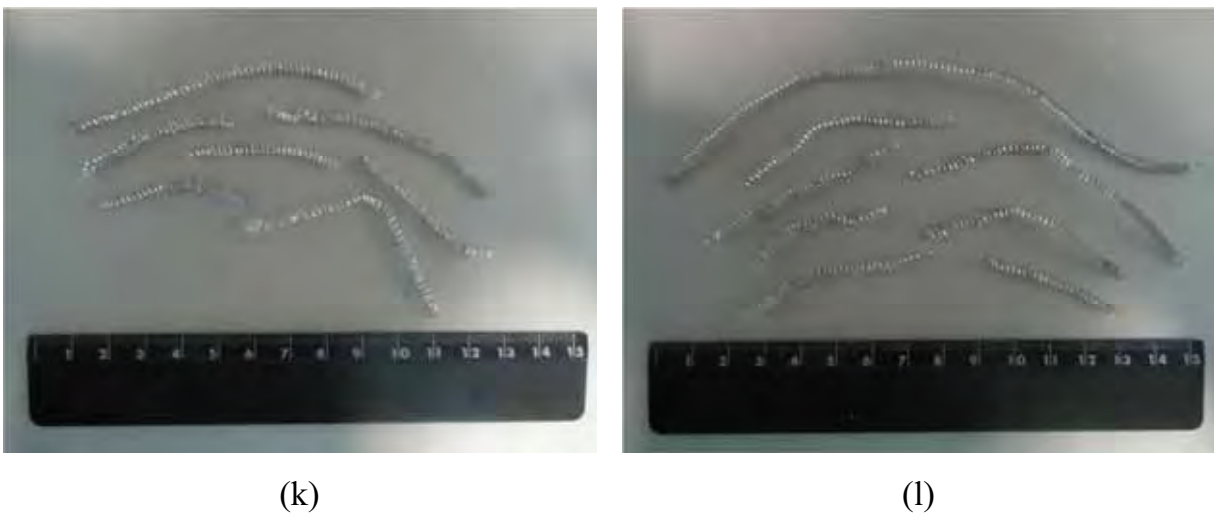


Figura 38 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (k) e último (l) passe na usinagem do CDP 06 com refrigeração abundante, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev.

5.2 Usinagem com refrigeração MQF

Nas Figuras 39 a 43 são mostrados os comportamentos da rugosidade média (R_a), da rugosidade máxima (R_{max}), do desgaste da ferramenta e a documentação dos cavacos obtidos nos ensaios de usinagem realizados nos CDP'S 01 e 02 com refrigeração MQF, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,1 mm/rev,

em função do comprimento de corte. Os valores obtidos nos ensaios são mostrados nas Tabelas 7 e 8 do Anexo A.

Nas Figuras 39 e 40 é possível observar uma semelhança entre o comportamento da rugosidade média (R_a) e o da rugosidade máxima (R_{max}), nos ensaios realizados nos CDP'S 01 e 02. Os resultados obtidos para a rugosidade média (R_a) e rugosidade máxima (R_{max}) no ensaio do CDP 02 permaneceram acima da rugosidade teórica calculada.

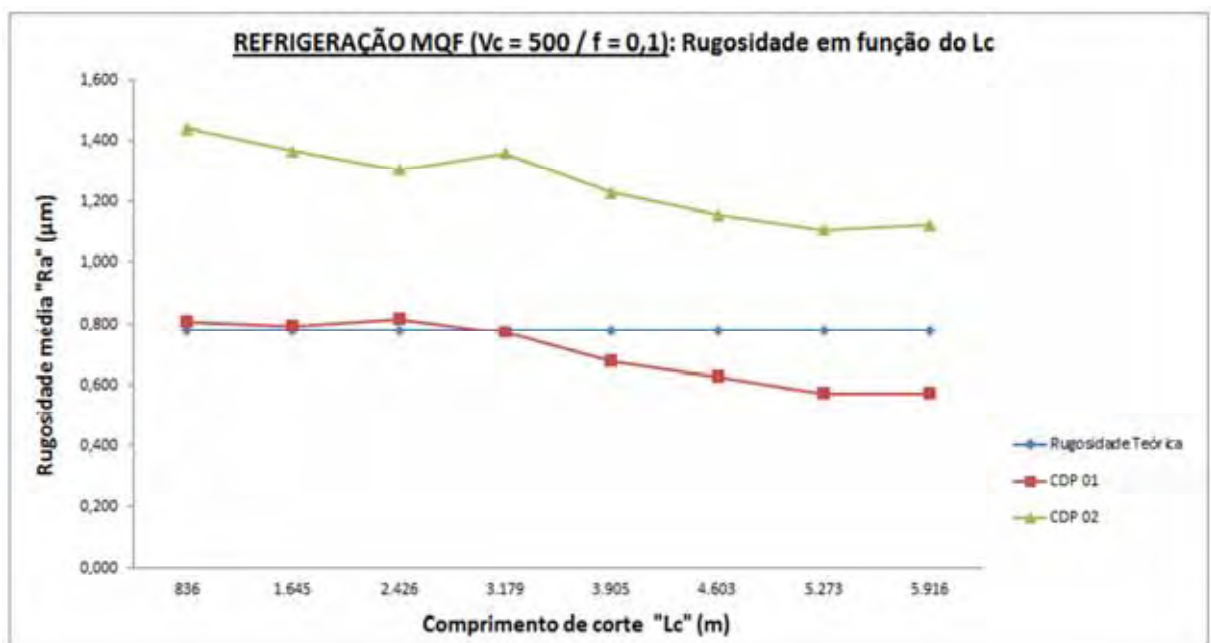


Figura 39 – Comportamento da rugosidade média em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev, realizada nos CDP'S 01 e 02.

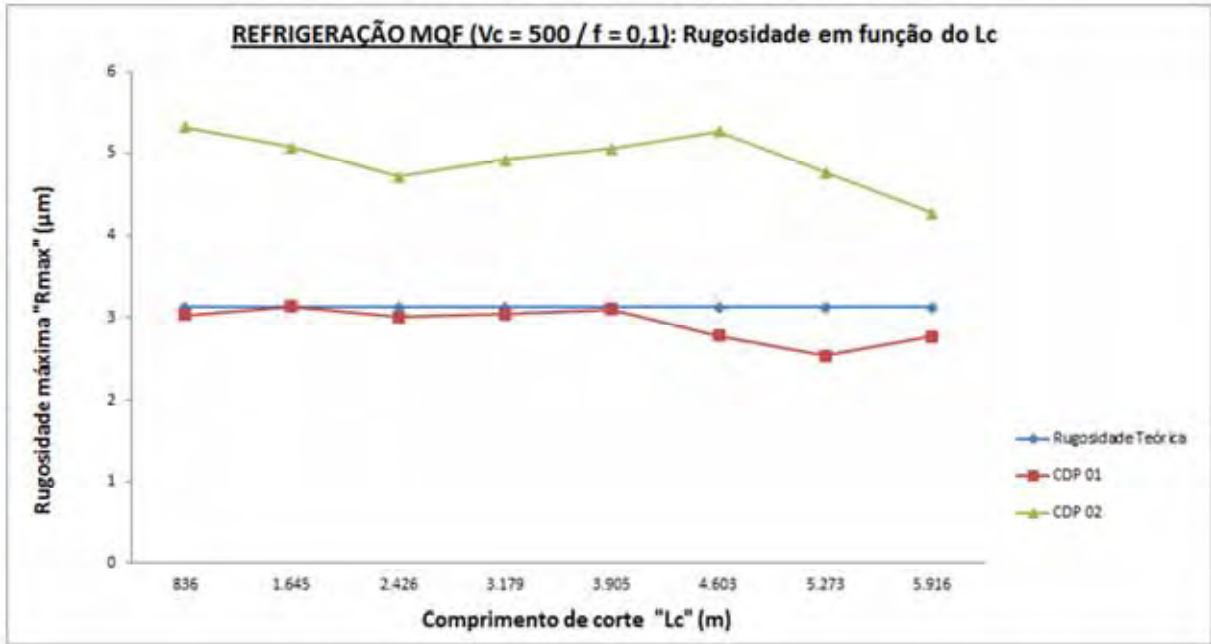


Figura 40 – Comportamento da rugosidade máxima em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev, realizada nos CDP'S 01 e 02.

Na Figura 41 pode-se observar que o comportamento do desgaste da ferramenta foi bastante semelhante nos ensaios dos CDP'S 01 e 02.

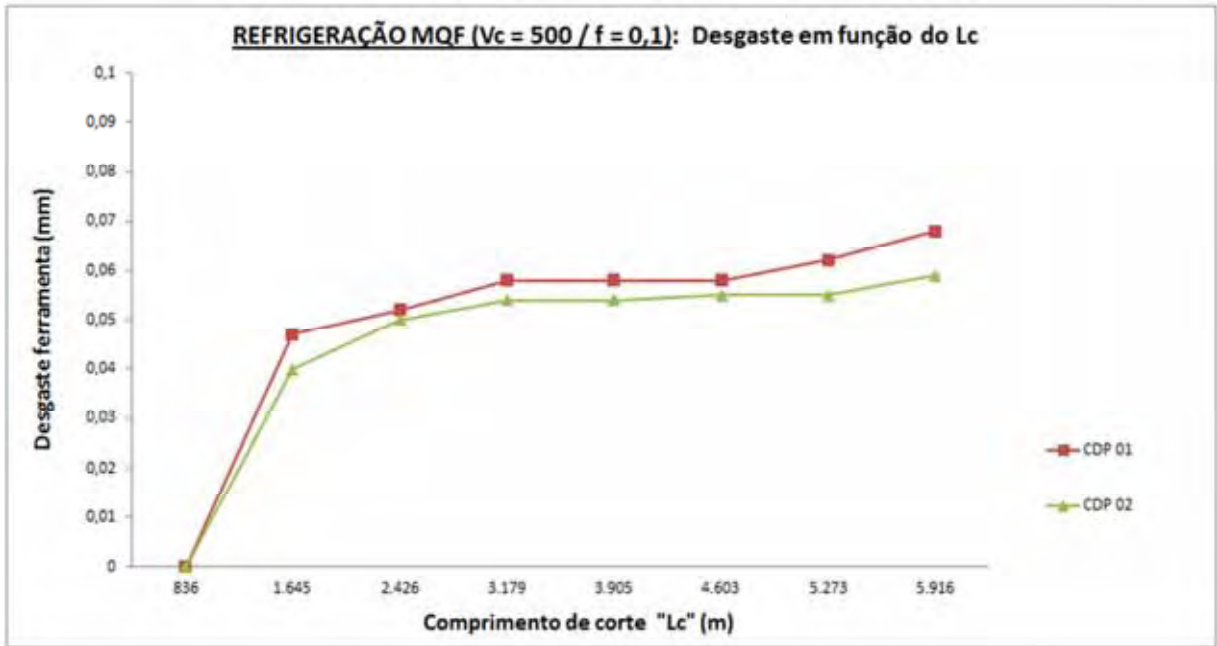


Figura 41 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev, realizada nos CDP'S 01 e 02.

Nas Figuras 42 e 43 pode-se observar a documentação de cavacos em forma helicoidal longa após o primeiro passe e em forma de fita após o último passe nos ensaios dos CDP'S 01 e 02.



(m)



(n)

Figura 42 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (m) e último (n) passe na usinagem do CDP 01 com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev.

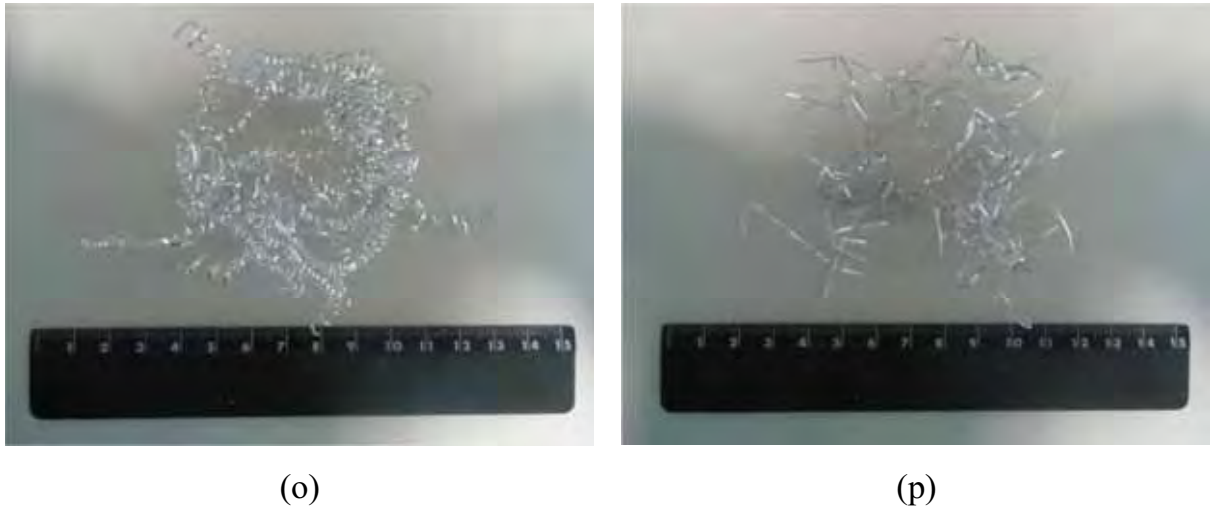


Figura 43 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (o) e último (p) passe na usinagem do CDP 02 com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev.

Nas Figuras 44 a 48 são mostrados os comportamentos da rugosidade média (R_a), da rugosidade máxima (R_{max}), do desgaste da ferramenta e a documentação dos cavacos obtidos nos ensaios de usinagem realizados nos CDP'S 03 e 04 com refrigeração MQF, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev, em função do comprimento de corte. Os valores obtidos nos ensaios são mostrados nas Tabelas 9 e 10 do Anexo A.

Nas Figuras 44 e 45 é possível observar que o comportamento da rugosidade média (R_a) entre os ensaios realizados nos CDP'S 03 e 04 são praticamente iguais e que não houve uma diferença significativa entre os valores obtidos para sua rugosidade máxima (R_{max}).

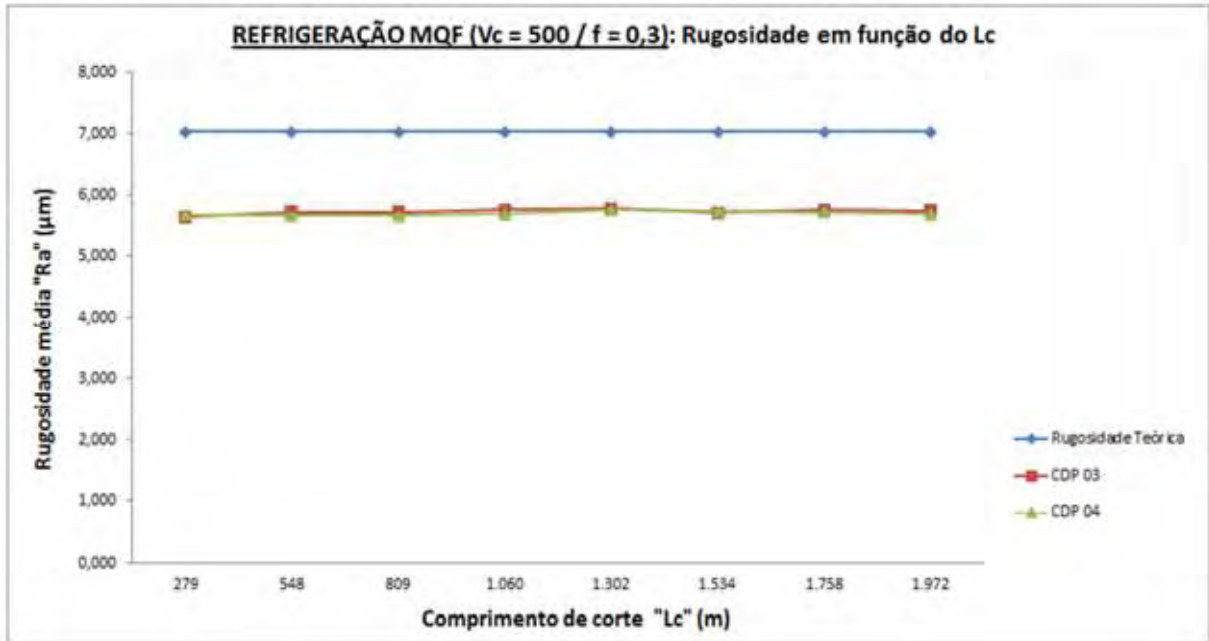


Figura 44 – Comportamento da rugosidade média em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 03 e 04.

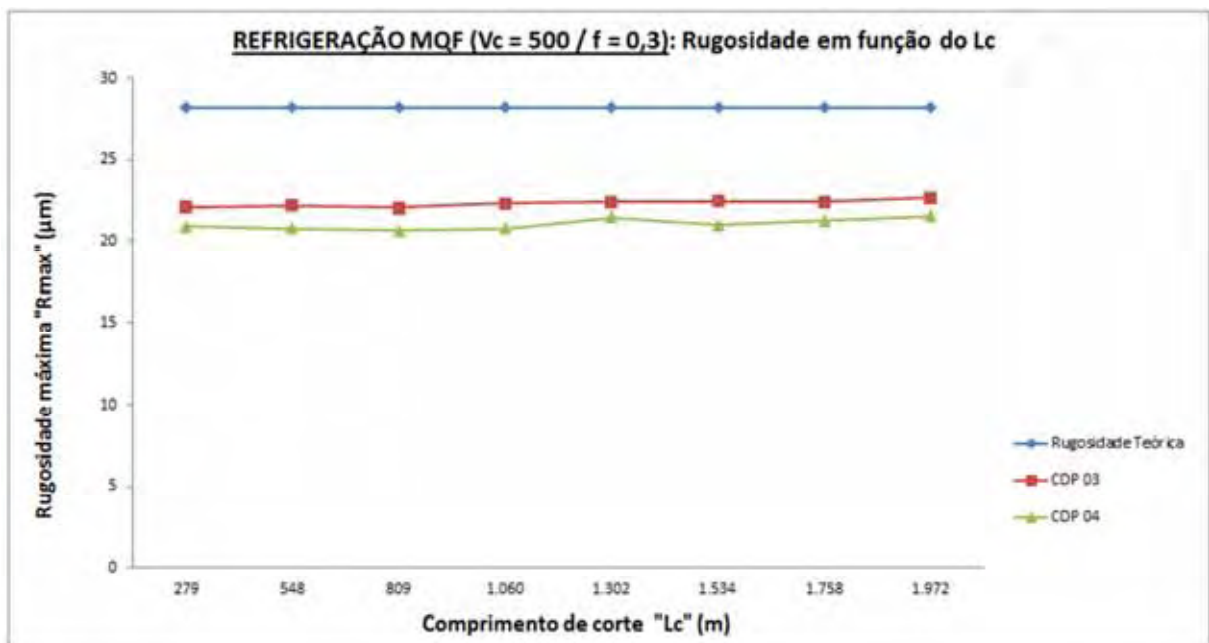


Figura 45 – Comportamento da rugosidade máxima em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 03 e 04.

Na Figura 46 pode-se observar que o comportamento do desgaste da ferramenta foi praticamente o mesmo nos ensaios dos CDP'S 03 e 04.

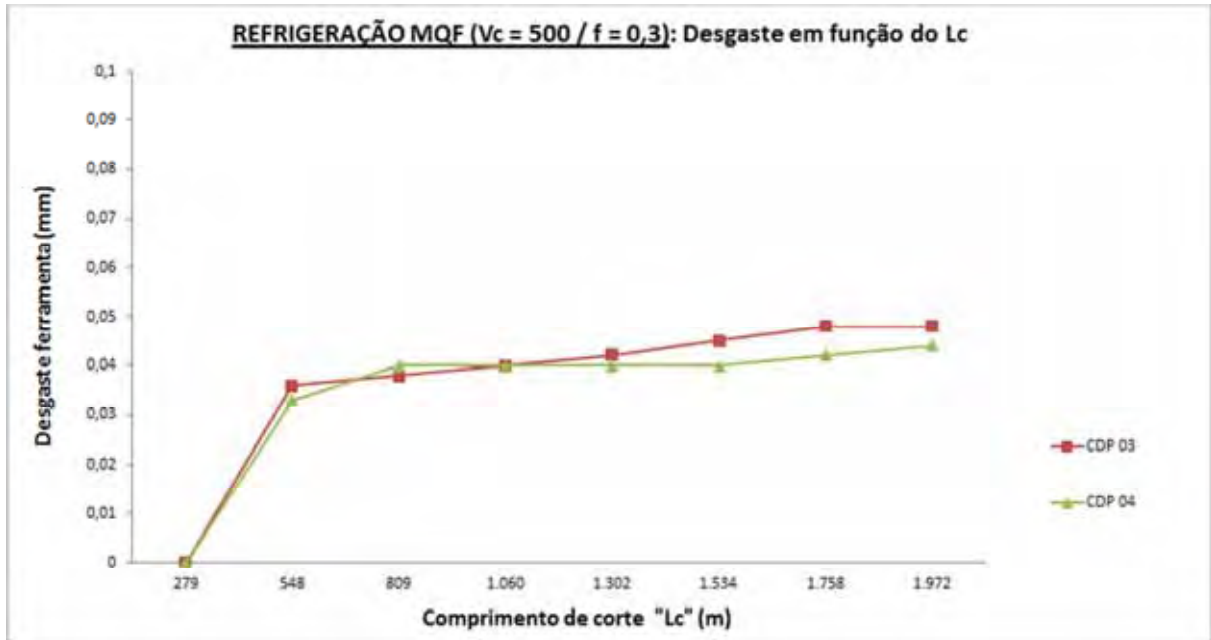


Figura 46 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 03 e 04.

Nas Figuras 47 e 48 pode-se observar a documentação de cavacos curtos e longos na forma helicoidal nos ensaios dos CDP'S 03 e 04.

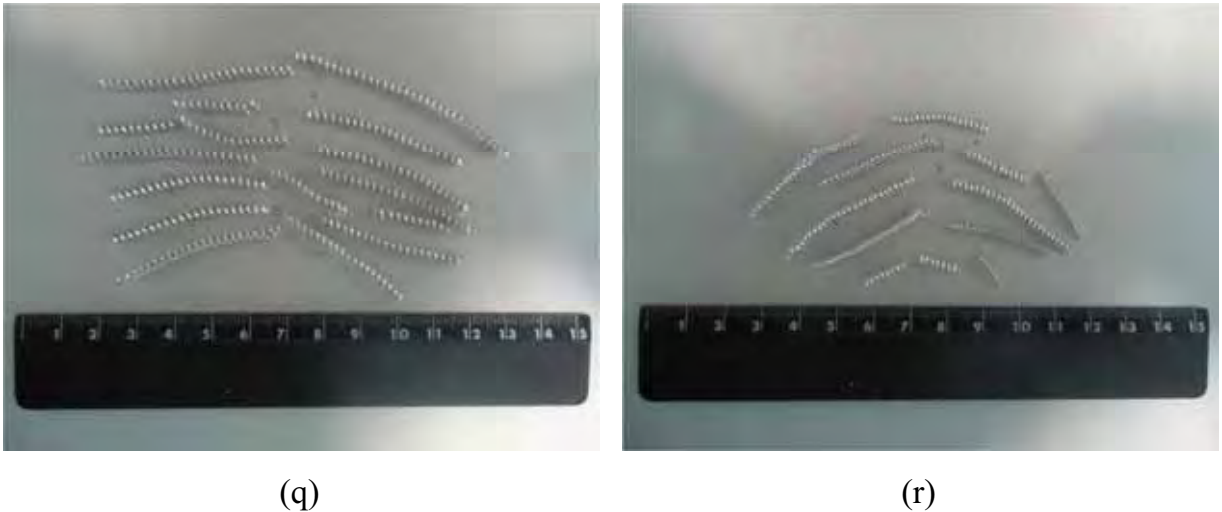


Figura 47 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (q) e último (r) passe na usinagem do CDP 03 com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev.



Figura 48 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (s) e último (t) passe na usinagem do CDP 04 com refrigeração MQF, $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev.

Nas Figuras 49 a 53 são mostrados os comportamentos da rugosidade média (R_a), da rugosidade máxima (R_{max}), do desgaste da ferramenta e a documentação dos cavacos obtidos nos ensaios de usinagem realizados nos CDP'S 05 e 06 com refrigeração MQF, velocidade de corte (v_c) de 300 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev, em função do comprimento de corte. Os valores obtidos nos ensaios são mostrados nas Tabelas 11 e 12 do Anexo A.

Nas Figuras 49 e 50 é possível observar que o comportamento da rugosidade média (R_a) entre os ensaios realizados nos CDP'S 05 e 06 são praticamente iguais e que não houve diferença entre os valores obtidos para a rugosidade máxima (R_{max}) no final do ensaio.

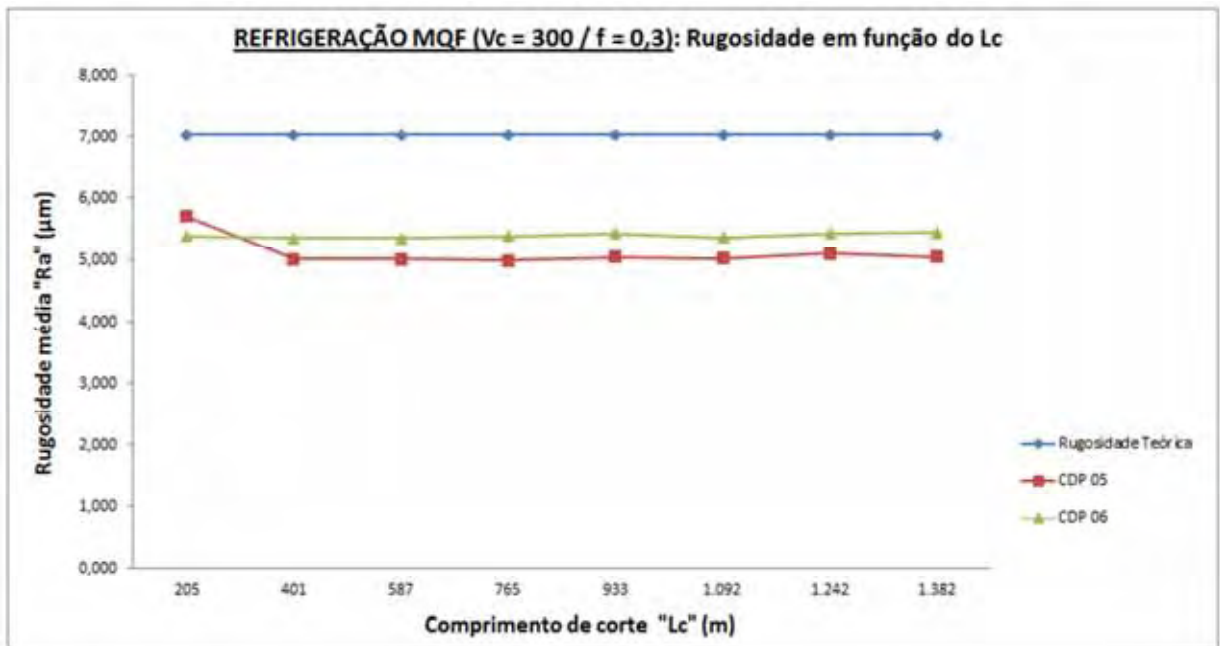


Figura 49 – Comportamento da rugosidade média em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração MQF, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 05 e 06.

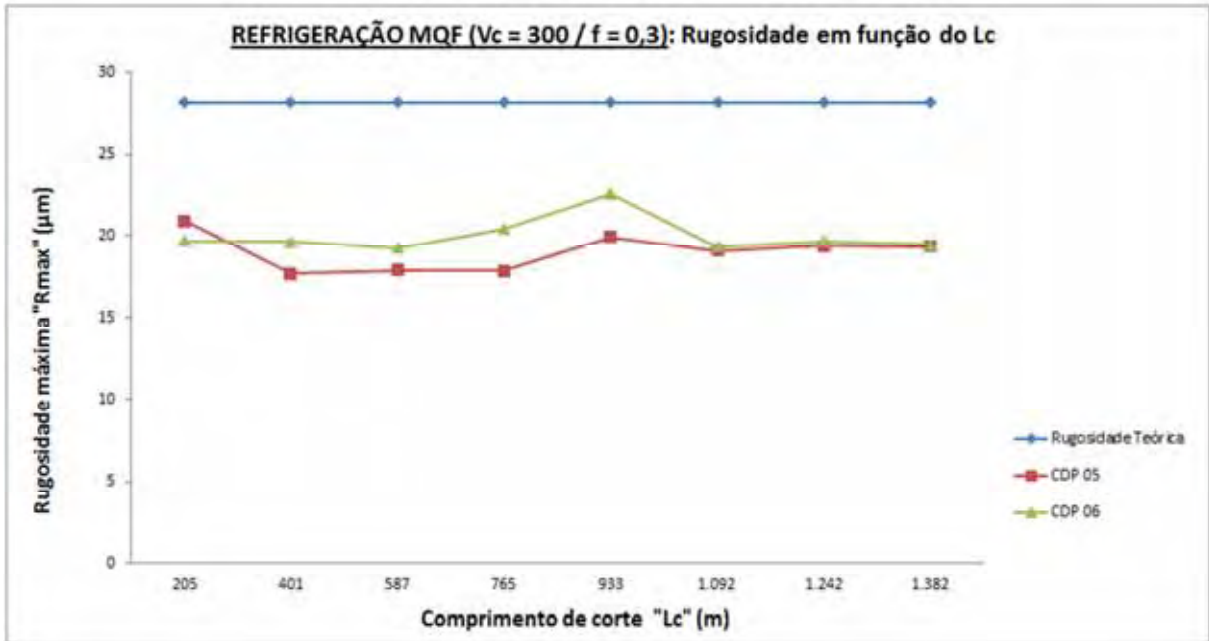


Figura 50 – Comportamento da rugosidade máxima em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração MQF, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 05 e 06.

Na Figura 51 pode-se observar que houve uma variação no comportamento do desgaste da ferramenta nos ensaios dos CDP'S 05 e 06, porém com baixos índices de rugosidade.

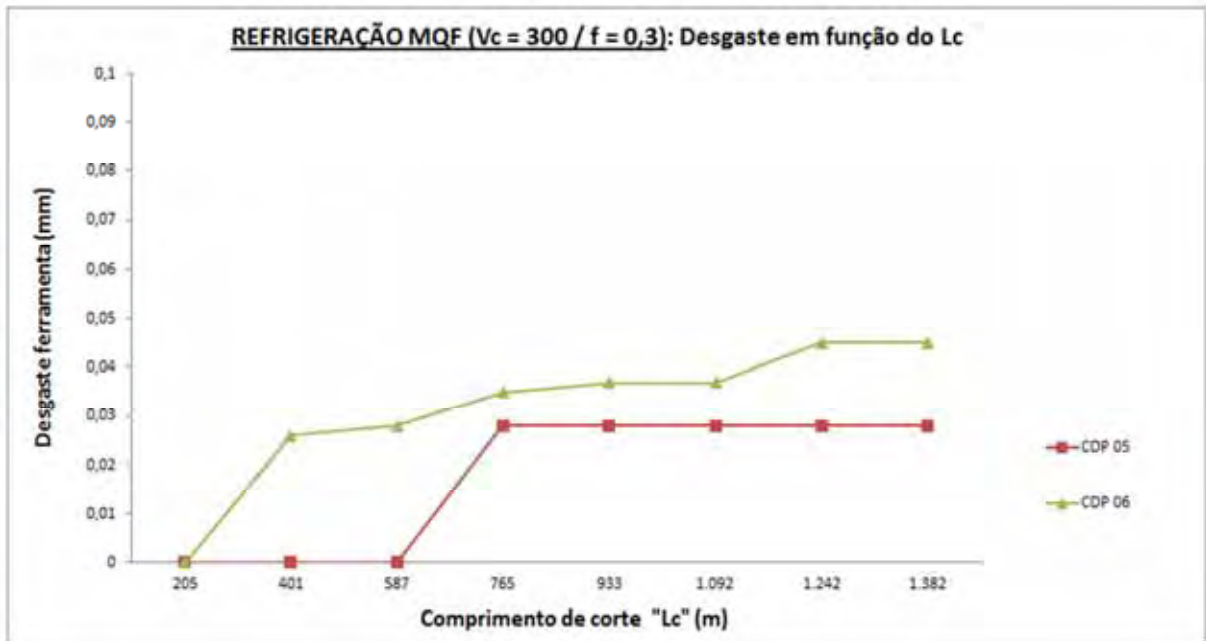


Figura 51 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função do comprimento de corte, para usinagem com refrigeração MQF, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev, realizada nos CDP'S 05 e 06.

Nas Figuras 52 e 53 pode-se observar a documentação de cavacos longos na forma helicoidal nos ensaios dos CDP'S 05 e 06.



(u)



(v)

Figura 52 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (u) e último (v) passe na usinagem do CDP 05 com refrigeração MQF, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev.



Figura 53 – Documentação do cavaco obtido após o primeiro (x) e último (z) passe na usinagem do CDP 06 com refrigeração MQF, $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev.

5.3 Análise comparativa

Nas Figuras 54 a 56 são apresentados os resultados de forma comparativa, entre os ensaios realizados com refrigeração abundante e MQF com velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,1 mm/rev, quanto à rugosidade média, desgaste da ferramenta, em função do comprimento de corte, e a documentação do cavaco obtido.

Pode-se observar na Figura 54, que, tanto para os ensaios com refrigeração abundante quanto com refrigeração MQF, houve uma queda da rugosidade em função do aumento do comprimento de corte. Este fato provavelmente se deve a algum tipo de acomodação da aresta de corte durante a operação de usinagem, a qual pode ser explicada como um desprendimento de uma pequena quantidade de material da aresta de corte da ferramenta no início da operação, visto que as ferramentas usadas na usinagem de alumínio possuem arestas muito afiadas e, portanto, bastante frágeis. Outro fato interessante, é que apesar do resultado da usinagem realizada com refrigeração MQF ter ficado acima da rugosidade teórica, este apresentou uma diferença de apenas $0,068 \mu\text{m}$ (R_a) em relação ao valor teórico calculado.

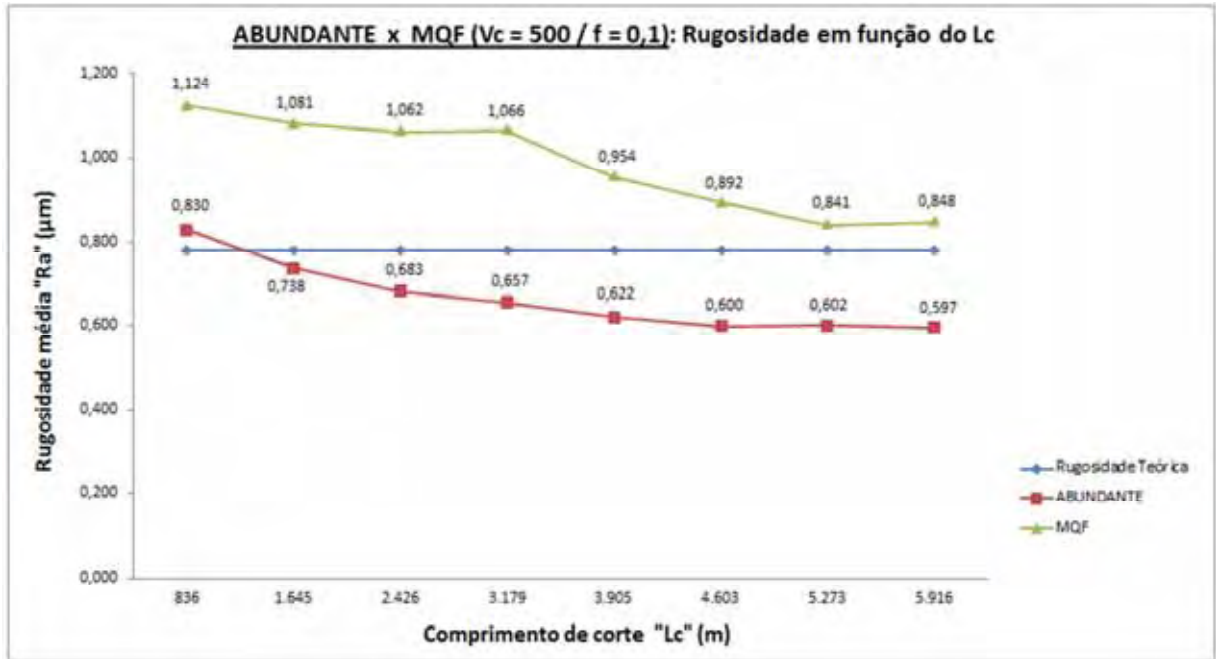


Figura 54 – Comportamento da rugosidade média em função do comprimento de corte: $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev.

Na Figura 55, observa-se que a ferramenta utilizada nos ensaios com refrigeração MQF, apresentou um comportamento mais estável na progressão do seu desgaste em função do aumento do comprimento de corte, estando seus valores próximos aos obtidos pela ferramenta utilizada na usinagem com refrigeração abundante, mostrando a eficiência do sistema de MQF no aumento da vida útil da ferramenta.

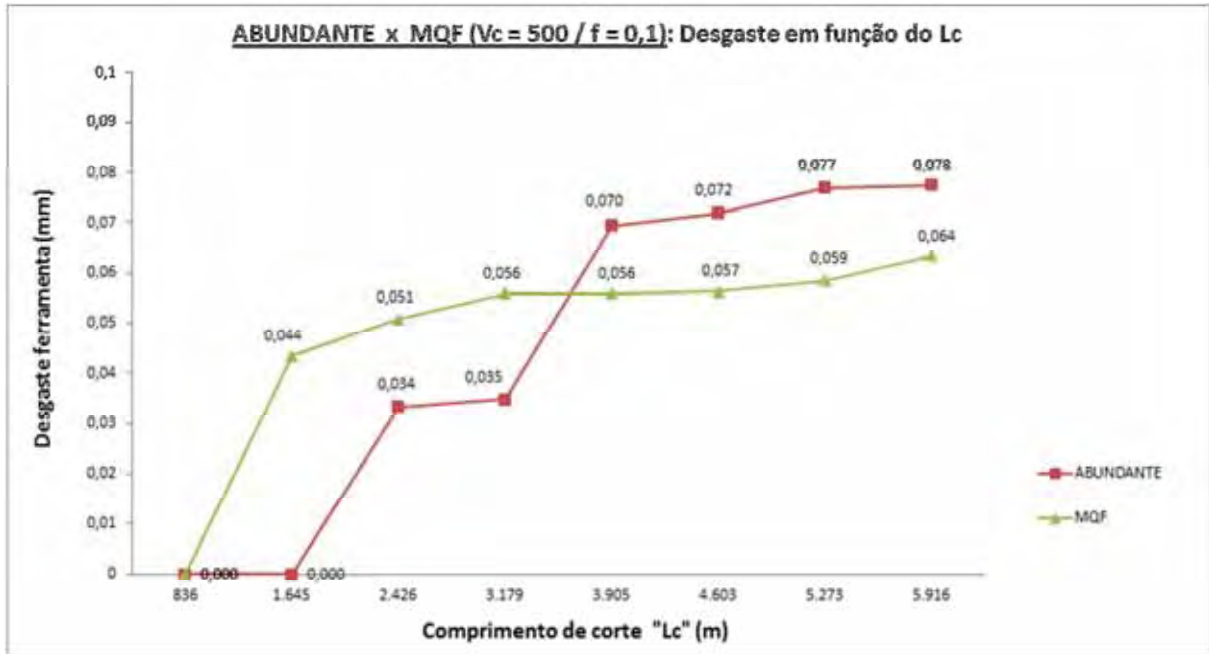


Figura 55 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função do comprimento de corte: $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev.

Outro dado relevante, observado na Figura 56, é que na usinagem com ambas as condições de refrigeração houve a formação de cavacos em forma de fita, o que causa uma condição insegura ao operador, além de potencializar danos à ferramenta de corte e à condição da superfície usinada.

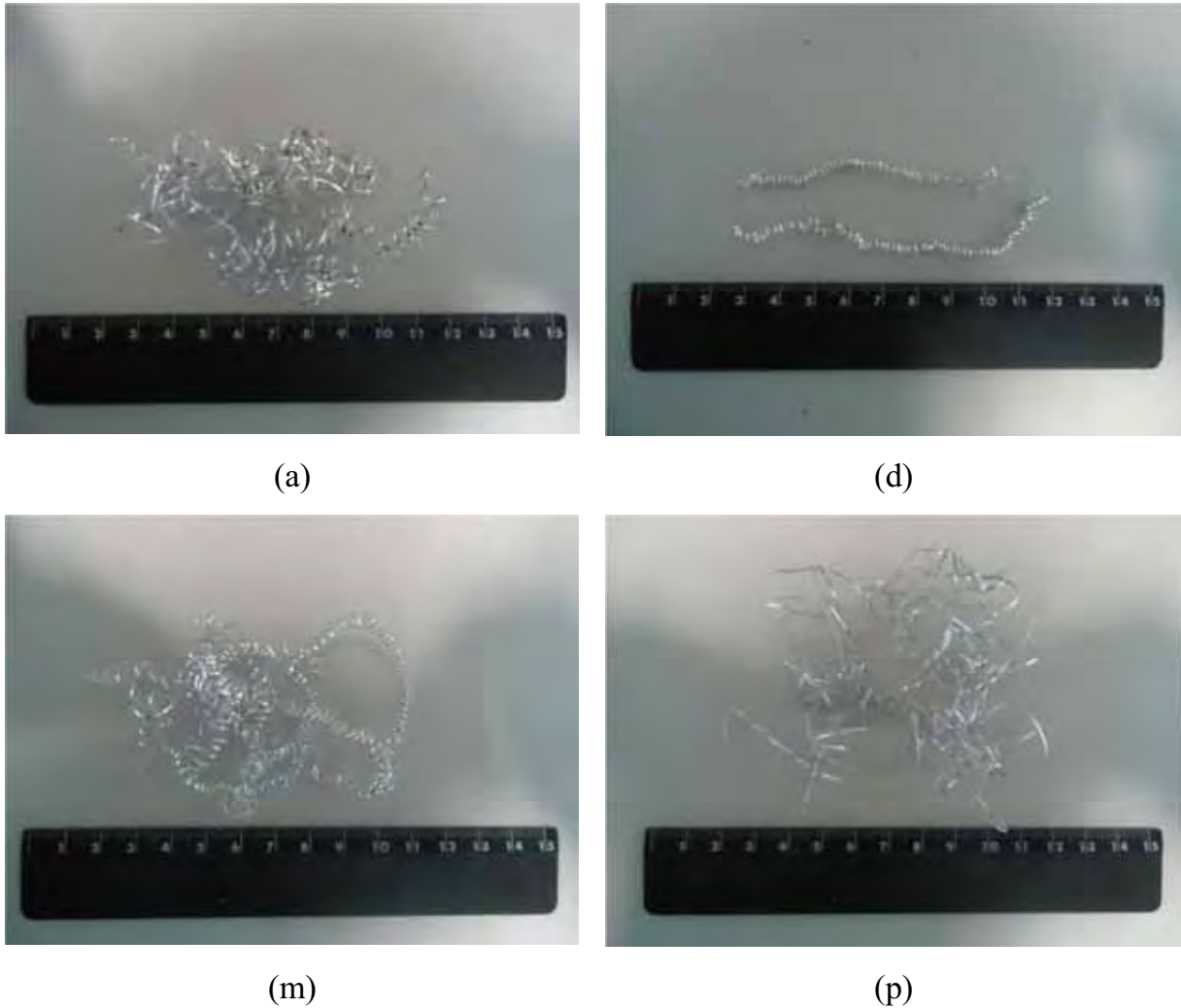


Figura 56 – Documentação do cavaco obtido no primeiro e último passe dos ensaios com refrigeração abundante (a e d, respectivamente) e no primeiro e último passe dos ensaios com refrigeração MQF (m e p, respectivamente): $v_c = 500$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev.

Nas Figuras 57 a 59 são apresentados os resultados de forma comparativa, entre os ensaios realizados com refrigeração abundante e MQF com velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev, quanto à rugosidade média, desgaste da ferramenta, em função do comprimento de corte, e a documentação do cavaco obtido.

Na condição de usinagem com velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev (Figura 57), em ambos os sistemas de refrigeração, pode-se observar que o resultado da rugosidade foi mais estável e sempre inferior ao valor teórico calculado, com uma variação máxima entre os dois sistemas de $0,485 \mu\text{m}$ (R_a),

mostrando o potencial do sistema de MQF na obtenção de índices de rugosidade semelhantes aos obtidos com refrigeração abundante. Outro dado importante é que na usinagem com velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev, a rugosidade se apresentou com valores acima dos obtidos nas usinagens realizadas com velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,1 mm/rev.

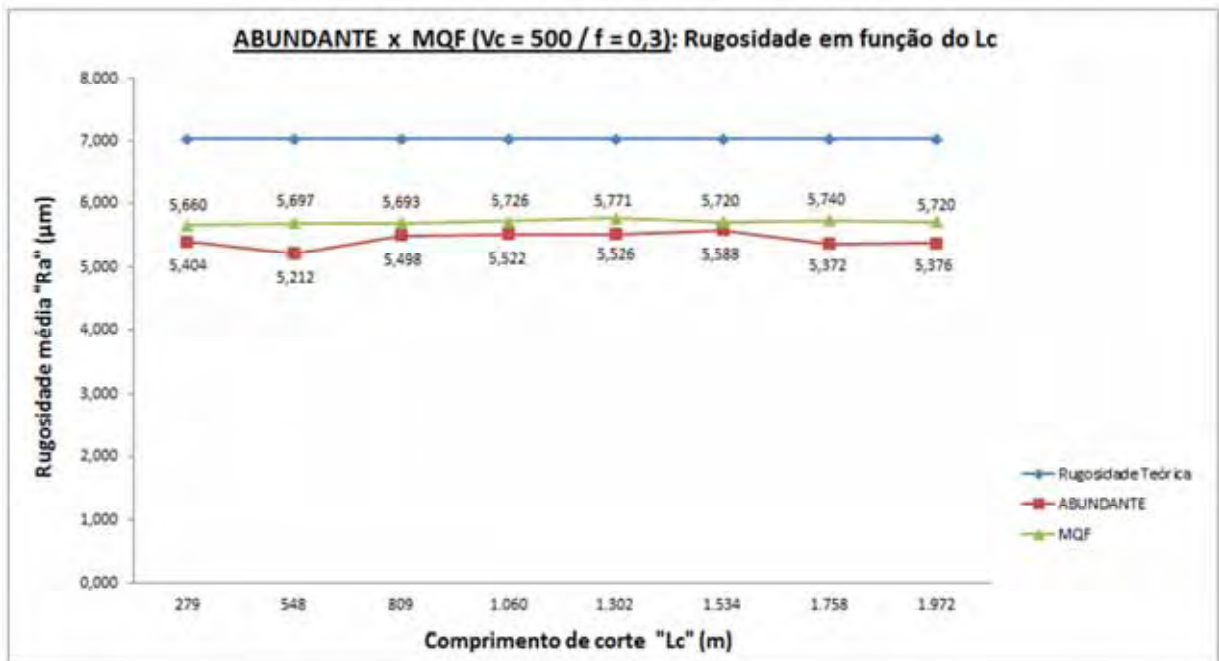


Figura 57 – Comportamento da rugosidade média em função do comprimento de corte: $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev.

O desgaste das ferramentas se apresentou mais estável na condição de usinagem com velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev do que na condição anterior com avanço (f) de 0,1 mm/rev, para ambos os sistemas de refrigeração, sendo o desgaste da ferramenta utilizada com MQF ligeiramente menor em relação à utilizada com refrigeração abundante, conforme mostrado na Figura 58.

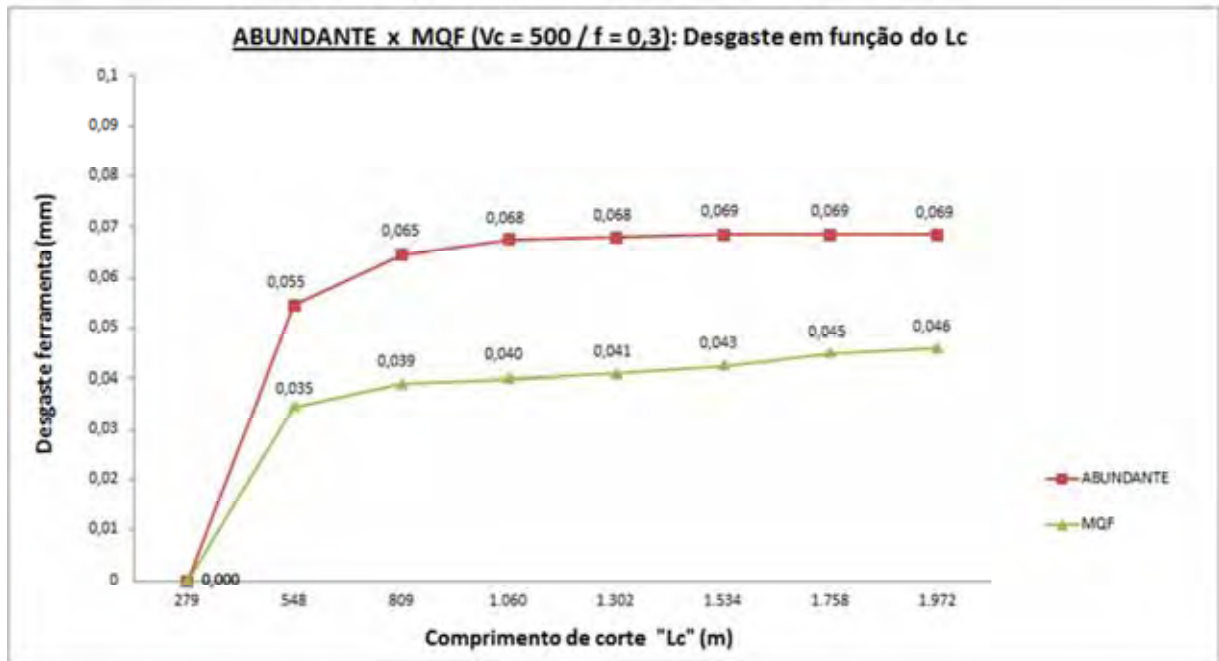


Figura 58 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função do comprimento de corte: $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev.

Também foi possível observar uma boa formação do cavaco na usinagem com velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev, sendo este curto e em formato helicoidal para ambas as condições de refrigeração, conforme mostrado na Figura 59.

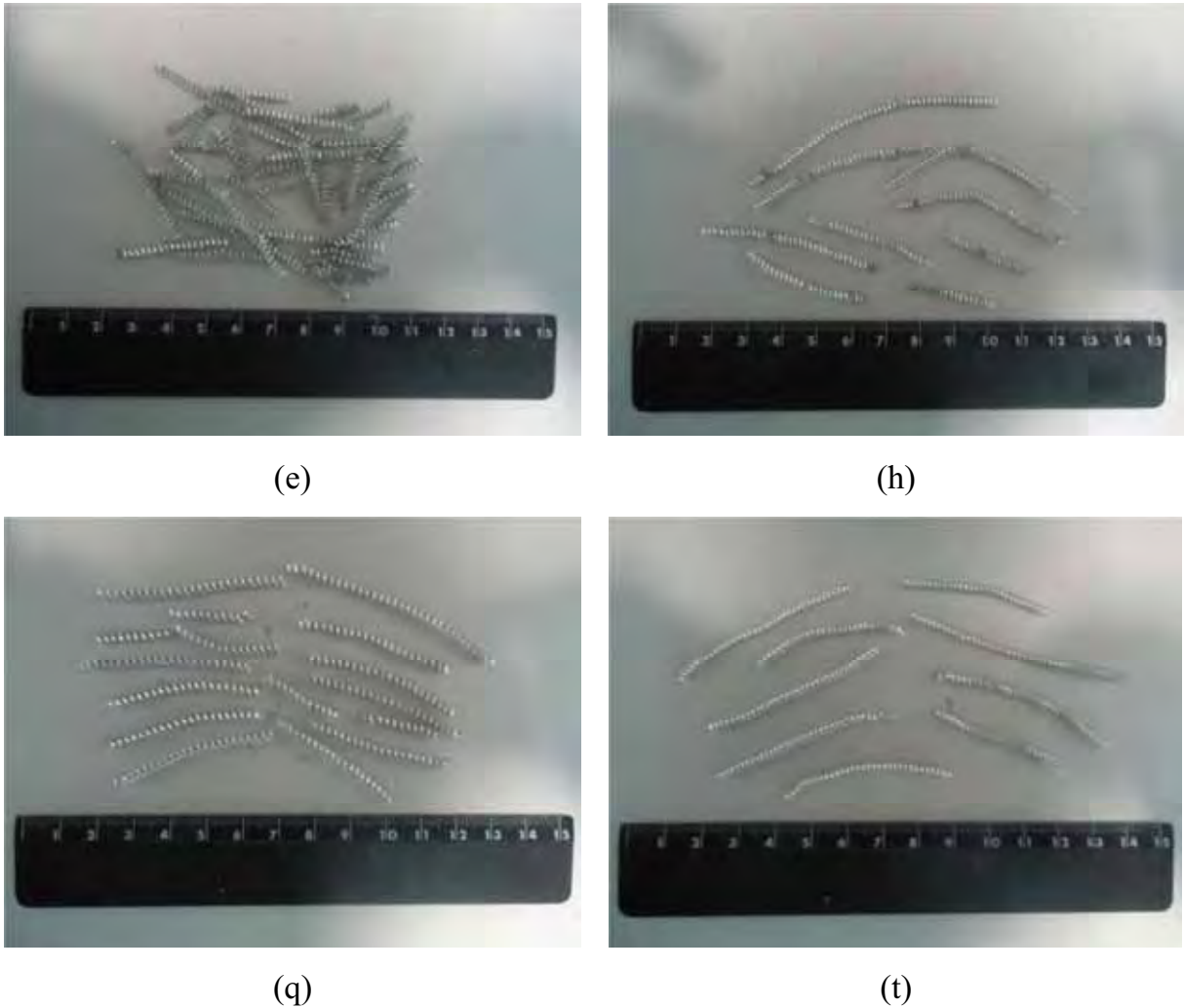


Figura 59 – Documentação do cavaco obtido no primeiro e último passe dos ensaios com refrigeração abundante (e e h, respectivamente) e no primeiro e último passe dos ensaios com refrigeração MQF (q e t, respectivamente): $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev.

Nas Figuras 60 a 62 são apresentados os resultados de forma comparativa, entre os ensaios realizados com refrigeração abundante e MQF com velocidade de corte (v_c) de 300 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev, quanto à rugosidade média, desgaste da ferramenta, em função do comprimento de corte, e a documentação do cavaco obtido.

Na condição de usinagem com velocidade de corte (v_c) de 300 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev (Figura 60), pode-se observar que o resultado da rugosidade foi praticamente o mesmo para ambos os sistemas de refrigeração, comprovando a eficácia do sistema de MQF na obtenção de índices de rugosidade iguais aos obtidos

com refrigeração abundante. Outro dado importante é que na usinagem com velocidade de corte (v_c) de 300 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev, a rugosidade apresentou valores próximos aos obtidos nas usinagens realizadas com velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/ver, com variação entre 5 e 6 μm R_a .

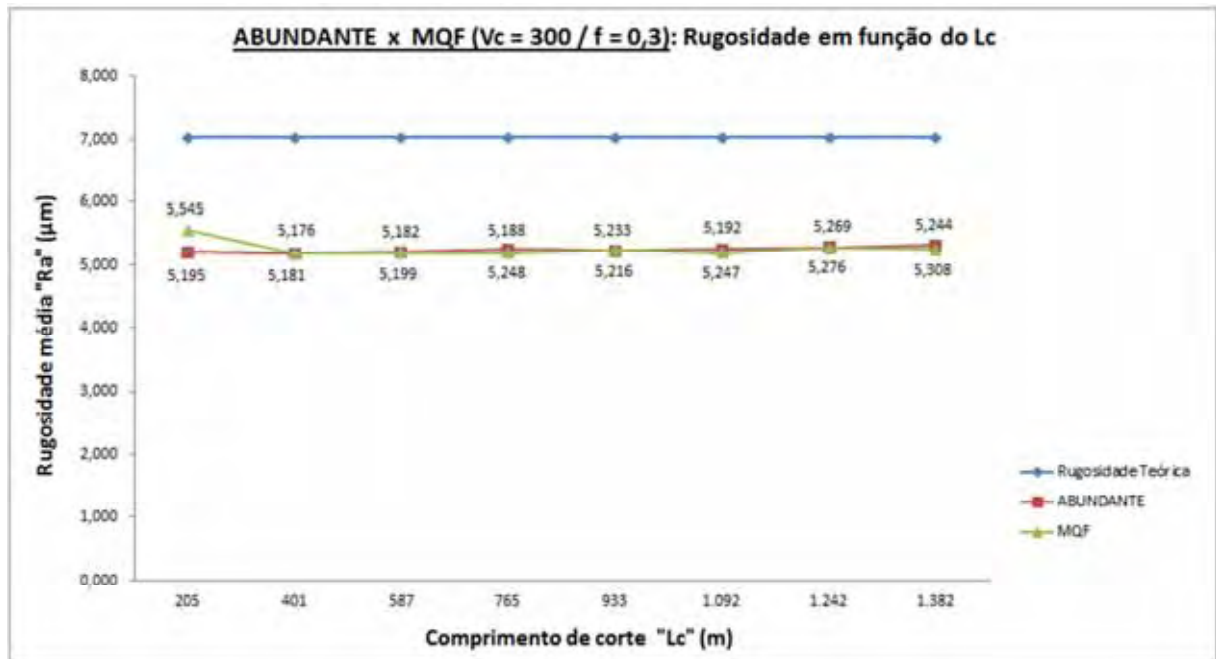


Figura 60 – Comportamento da rugosidade média em função do comprimento de corte: $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev.

O desgaste da ferramenta teve um comportamento menos estável do que na condição de usinagem com velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev, porém ocorreu em menores índices. Quando comparados os valores obtidos no desgaste da ferramenta entre os dois sistemas de refrigeração, percebe-se que não há uma diferença significativa, conforme mostrado na Figura 61.

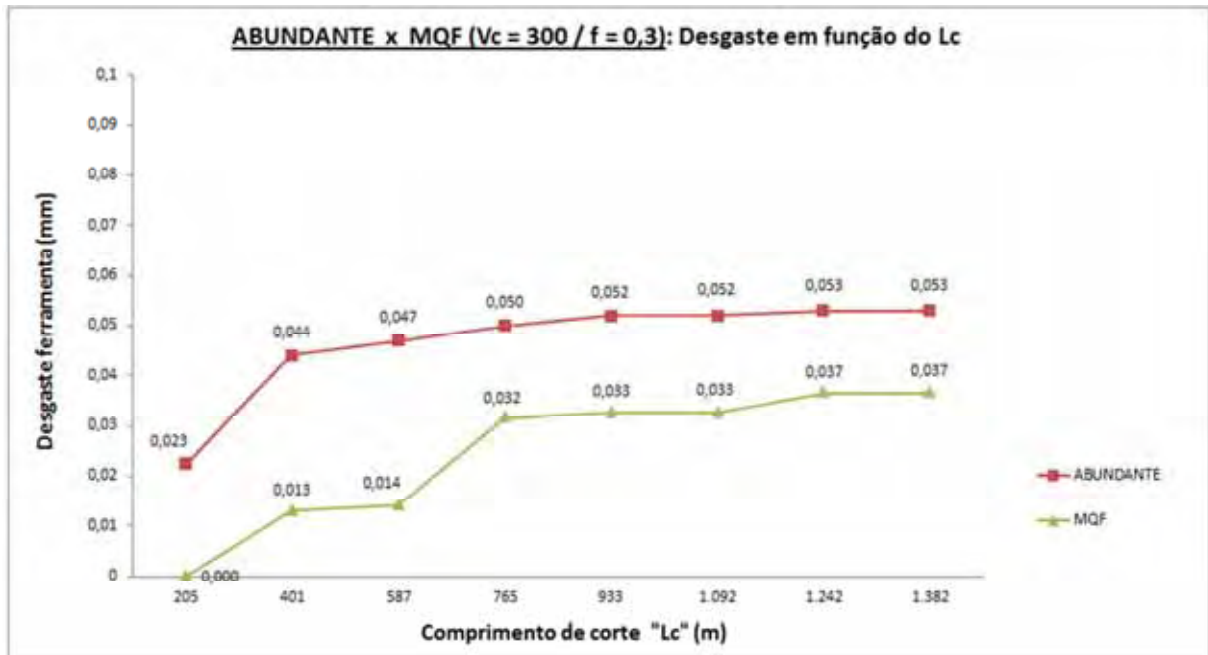


Figura 61 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função do comprimento de corte: $v_c = 500$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev.

Para a condição de velocidade de corte (v_c) de 300 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev, o cavaco também apresentou boa formação, sendo mais alongado do que o obtido na condição com velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev, porém com o mesmo formato helicoidal, em ambos os sistemas de refrigeração, conforme mostrado na Figura 62.

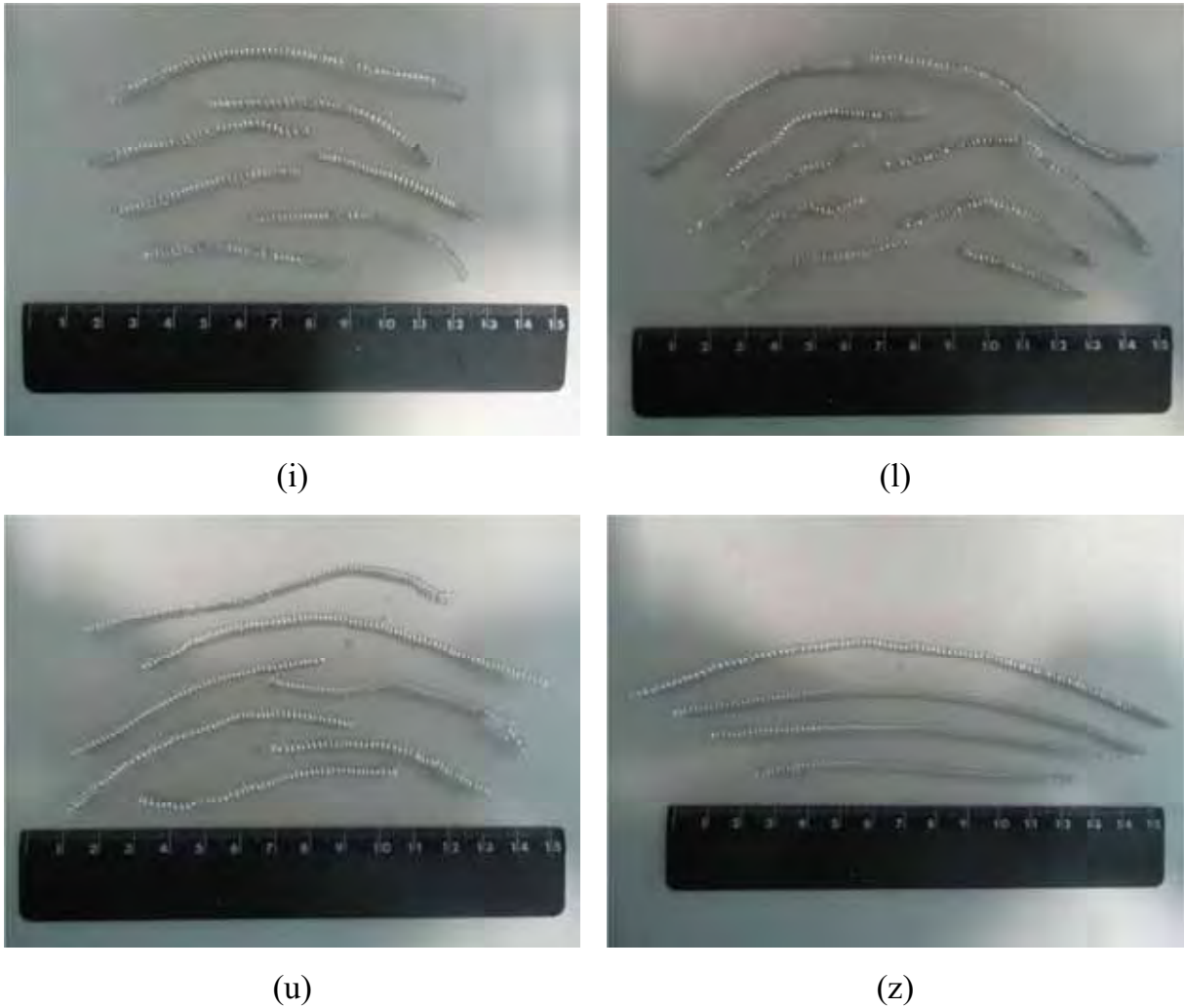


Figura 62 – Documentação do cavaco obtido no primeiro e último passe dos ensaios com refrigeração abundante (i e l, respectivamente) e no primeiro e último passe dos ensaios com refrigeração MQF (u e z, respectivamente): $v_c = 300$ m/min e $f = 0,3$ mm/rev.

Nas Figuras 63 a 66 são apresentados os resultados de forma comparativa, da variação da velocidade de corte entre os ensaios de usinagem realizados com refrigeração abundante e MQF, quanto à rugosidade média e o desgaste da ferramenta, em função do comprimento de corte.

Nas figuras a seguir será possível observar a pequena influência da velocidade de corte no acabamento superficial das peças usinadas e no desgaste das ferramentas utilizadas, conforme mencionado por Cunha (2004) em testes realizados na usinagem por torneamento da liga de alumínio AA 7050.

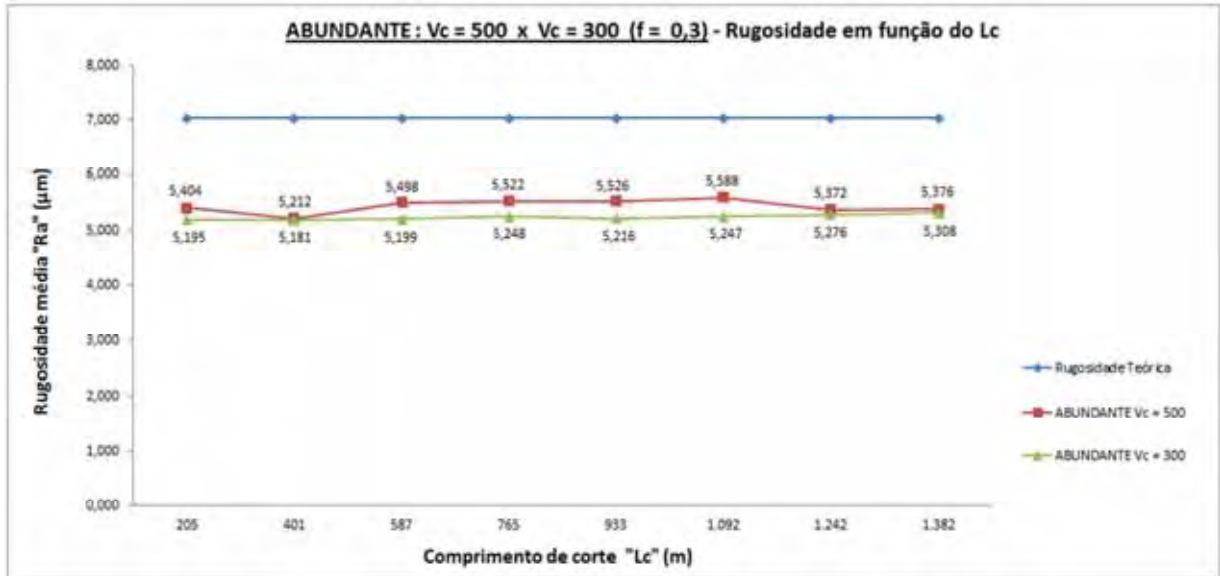


Figura 63 – Comportamento da rugosidade média em função das velocidades de corte (v_c) de 500 m/min e 300 m/min e da variação do comprimento de corte, nos ensaios realizados com refrigeração abundante e avanço (f) de 0,3 mm/rev.

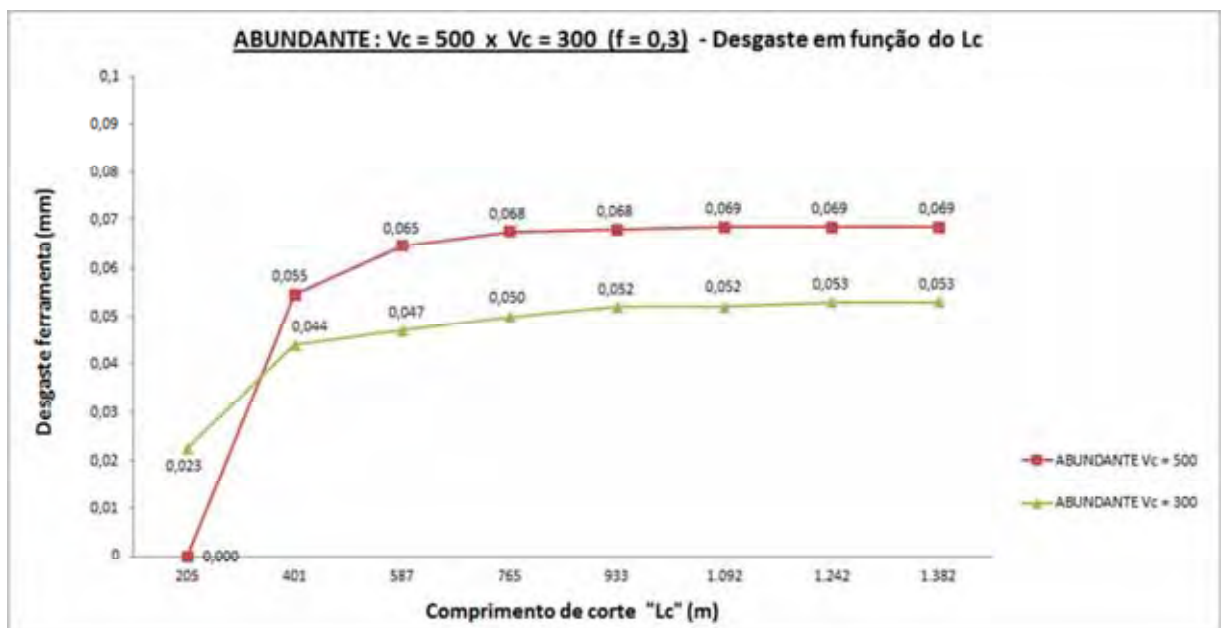


Figura 64 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função das velocidades de corte (v_c) de 500 m/min e 300 m/min e da variação do comprimento de corte, nos ensaios realizados com refrigeração abundante e avanço (f) de 0,3 mm/rev.

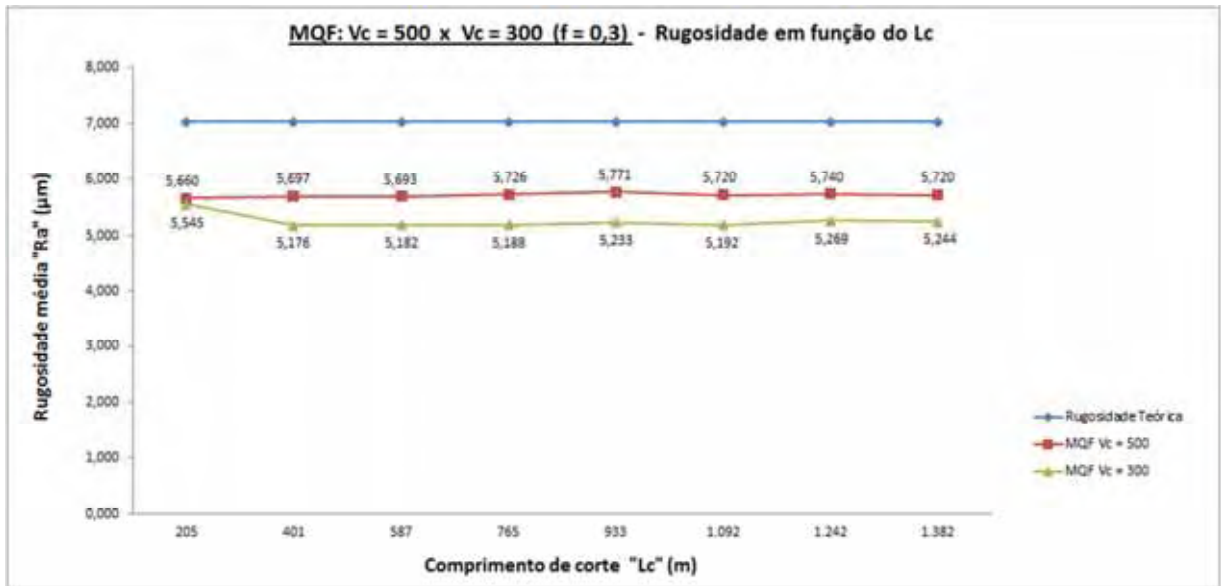


Figura 65 – Comportamento da rugosidade média em função das velocidades de corte (v_c) de 500 m/min e 300 m/min e da variação do comprimento de corte, nos ensaios realizados com refrigeração MQF e avanço (f) de 0,3 mm/rev.

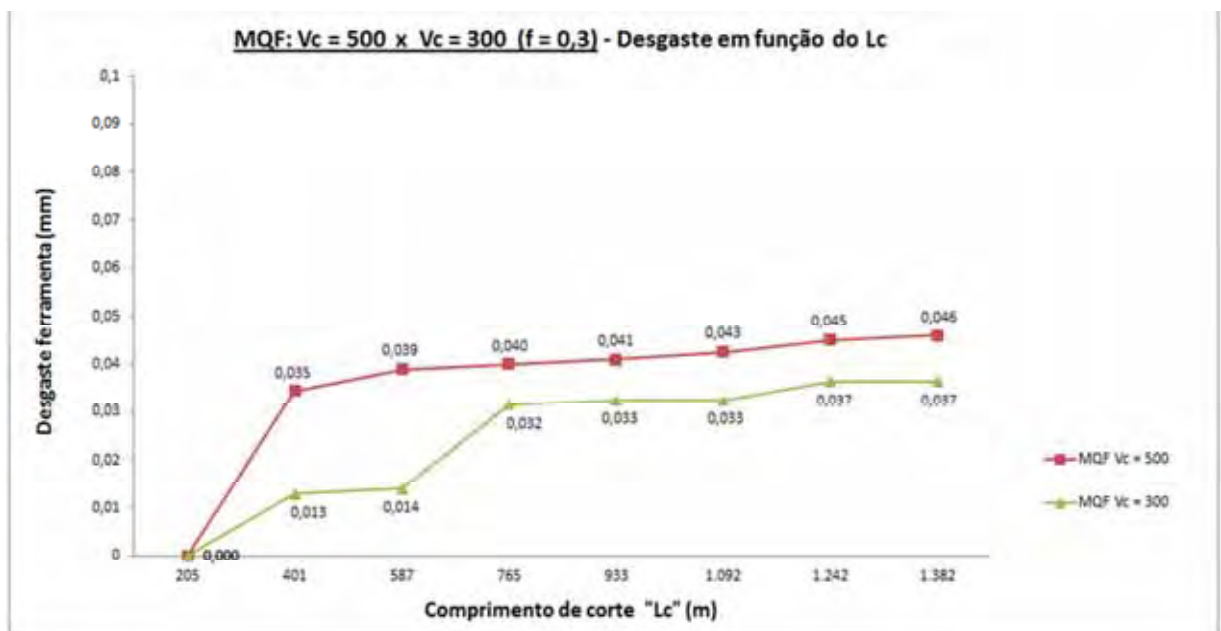


Figura 66 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função das velocidades de corte (v_c) de 500 m/min e 300 m/min e da variação do comprimento de corte, nos ensaios realizados com refrigeração MQF e avanço (f) de 0,3 mm/rev.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

- Para os ensaios realizados com velocidade de corte de 500 m/min, avanço de 0,1 mm/rev e aplicação de fluido abundante foram obtidos os menores valores de rugosidade, porém para as mesmas condições com aplicação de MQF, foram obtidos valores de rugosidade próximos do valor teórico calculado;
- Com a utilização do avanço de 0,1 mm/ver, observou-se a formação de cavacos em fita independente da forma de aplicação de fluido de corte, ou seja, para o quebra-cavaco utilizado esta condição de avanço não permitiu um controle adequado do cavaco;
- De modo geral, independente do avanço utilizado, nos testes realizados com velocidade de corte de 500 m/min pode-se afirmar que o desgaste observado nas ferramentas é praticamente o mesmo utilizando aplicação de fluido abundante ou MQF;
- Mesmo variando a velocidade de corte de 300 para 500 m/min, o desgaste das ferramentas não apresentou um aumento significativo, ou seja, não se observou um aumento proporcional do desgaste em relação à variação da velocidade. Isto foi observado para as duas estratégias de aplicação de fluido;
- No tocante ao controle de cavaco para as condições testadas, merece destaque aquela com velocidade de corte de 500 m/min e avanço de 0,3 mm/rev, como sendo a que apresentou cavacos na forma helicoidal e de comprimento mais curto, em ambas as estratégias de aplicação de fluido;
- Embora os melhores resultados em termos de controle de cavaco e desgaste de ferramenta tenham sido obtidos para o avanço de 0,3 mm/rev, este não permite a obtenção de valores de rugosidade comparáveis com aqueles obtidos quando se utiliza o avanço de 0,1 mm/rev. Entretanto, estes valores permaneceram abaixo da rugosidade teórica calculada;

- Com base nas observações feitas, verifica-se a potencialidade de utilização da técnica de MQF na usinagem da liga de alumínio AA 7075, haja vista o seu comportamento não ter sido inferior em relação ao desgaste das ferramentas, a rugosidade das superfícies e aos cavacos formados quando comparada com a condição de aplicação de fluido abundante utilizando os mesmos parâmetros de corte;
- Para o conjunto de condições testadas, fica a recomendação de se utilizar a velocidade de corte de 500 m/min e avanço de 0,3 mm/rev com aplicação de MQF, tendo em vista um melhor controle do cavaco alcançado e valores de rugosidade obtidos compatíveis com os valores teóricos. Caso a rugosidade seja o fator preponderante, a escolha do avanço deve recair sobre o valor de 0,1 mm/rev, pois a relação entre rugosidade e avanço é mandatória.

Referências

ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **A indústria do alumínio**. 2012. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/industria/introducao.asp>>. Acesso em: 28 out. 2012.

ALCOA ALUMÍNIO. **Composição química da liga de alumínio AA 7075**. 2012. Disponível em: <<http://www.alcoa.com/brazil/pt/home.asp>>. Acesso em: 28 out. 2012.

AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. Dissertação de mestrado apresentada a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6835: **Alumínio e suas ligas: classificação das têmperas**. Rio de Janeiro, 2000.

BARROSO, E. K. L. **Efeito da Pré-deformação e Shot Peening na Tenacidade à Fratura e Propagação de Trinca por Fadiga da Liga de Alumínio 7475-T7351, de Aplicação Aeronáutica**. Dissertação de mestrado apresentada a Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2004.

BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W. A. **Fundamentals of Machining and Machine Tools**. Third ed. CRC Taylor & Francis, 2005.

BRAGA, D. U.; DINIZ, A. E.; MIRANDA, G. W. A.; COPPINI, N. L. **Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum–silicon alloys**. 2002. J. Mater Process. Technol. 122, 127–138.

BRESCIANI FILHO, E. **Seleção de metais não ferrosos**. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 1992.

CAMARGO, R. **Rugosidade superficial nas operações de torneamento**. Santa Bárbara d'Oeste, Centro SENAI – Fundação Romi Formação de Formadores, 2002.96p.

CHAMBERLAIN, B. **Machinability of Aluminium Alloys**. Metals Handbook, Vol. 2—Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals, 9th Edition, ASME, 1979, pp. 187–190.

CHILDS, T. H. C.; MAEKAWA, K.; OBIKAWA T.; YAMANE Y. **Metal Machining Theory and Applications**. Butterworth Heinemann, Oxford, 2001.

CARRILERO, M. S.; SOLA, J. M. S.; SANCHEZ, J. M.; ALVAREZ, M.; GONZALEZ, A.; MARCOS, J. M. **A SEM and EDS insight into the BUL and BUE differences in the turning processes of AA2024 Al–Cu alloy**. Int. J. Machine Tools Manufacture 42 (2002) 215–220.

CUNHA, E. A. **Estudo da usinagem por torneamento da liga AA 7050 – T7451**. Dissertação de mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Química de Lorena, Lorena, 2004.

DAVIM, J. P.; SREEJITH, P. S.; GOMES, R.; PEIXOTO, C. **Experimental studies on drilling of aluminium (AA1050) under dry, minimum quantity of lubricant, and flood-lubricated conditions**. 2006. Proc. ImechE Part B: J. Eng. Manuf. 220, 1605–1611.

DAVIM, J. P.; SREEJITH, P. S.; SILVA, J. **Turning of brasses using minimum quantity of lubricant (MQL) and flooded-lubricant conditions**. 2007. Mater. Manuf. Process. 22, 45–50.

DAVIS, J. R. (Ed.). Alloy and temper designation systems. **ASM specialty handbook: aluminum and aluminum alloys**. Materials park, Ohio: ASM International, 2002. p. 18-30.

DAVIS, J. R. (Ed.). Physical metallurgy. **ASM specialty handbook: aluminum and aluminum alloys**. Materials park, Ohio: ASM International, 2002a. p. 31-46.

DAVIS, J. R. (Ed.). Selection and application of aluminum alloys. **ASM specialty handbook: aluminum and aluminum alloys**. Materials park, Ohio: ASM International, 2002b. p. 57-195.

DAVIS, J. R. (Ed.). Forming. **ASM specialty handbook: aluminum and aluminum alloys**. Materials park, Ohio: ASM International, 2002c. p. 231-46.

DAVIS, J. R. (Ed.). Properties of aluminum and aluminum alloys. **ASM specialty handbook: aluminum and aluminum alloys**. Materials park, Ohio: ASM International, 2002d. p. 577-731.

DERFLINGER, V.; BRÄNDLE, H.; ZIMMERMANN, H. **New hard/lubricant coating for dry machining**, *Surf. Coat. Technol.* 113 (1999) 286–292.

DINIZ, A. E.; NORITOMI, P. Y. **Influência dos parâmetros de corte na rugosidade**. *Máquinas e Metais*. São Paulo, v. 35 (391), 1998, p. 92 – 101.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos metais**. Artliber, São Paulo, 2000.

DHAR, N. R.; ISLAM, M. W.; ISLAM, S.; MITHU, M. A. H. **The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel**. 2006. *J. Mater. Process. Technol.* 171, 93–99.

DREEJITH, P. S.; NGOI, B. K. A. **Dry machining: machining of the future**. *J. Mater. Process. Technol.* 101 (2000) 287–291.

GAITONDEA, V. N.; KARNIKB, S. R.; DAVIM P. J. **Selection of optimal MQL and cutting conditions for enhancing machinability in turning of brass**. *Journal of materials processing technology* 204 (2008) 459–464.

GODEFROID, L. B.; BASTIAN, F. L. **The Effects of Stress Ratio on Fatigue Behavior of Aluminum Alloys for Aeronautical Applications.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHT METALS PROCESSINGS AND APPLICATIONS, CIM, Quebec, Canada, p. 667-676, 1993.

HEINEMANN, R.; HINDUJA, S.; BARROW, G.; PETUELLI, G. **Effect of MQL on the tool life of small twist drills in deep-hole drilling.** 2006. Int. J. Mach. Tool Manuf. 46, 1–6.

HEISEL, U.; LUTZ, D.; WASSMER, R.; WALTER, U. **A técnica da quantidade mínima de fluidos e suas aplicações nos processos de corte.** Revista Máquinas e Metais, n° 386, p. 22-38, fevereiro, 1998.

HUNSICKER, H. Y. Metallurgy of heat treatment and general principles of precipitation hardening. In: HATCH, J. E. (Ed.) **Aluminum: properties and physical metallurgy.** Metals Park, Ohio: ASM, 1990. ch. 5, p. 134-99.

KAMATA, Y.; OBIKAWA T. High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools. Journal of Materials Processing Technology 192–193 (2007) 281–286.

KELLY, J. F.; COTTERELL, M. G. **Minimal lubrication machining of aluminium alloys.** September 2001, Journal of Materials Processing Technology 120 (2002) 327–334.

LUGSCHEIDER, E.; KNOTEK, O.; BARIMANI, C.; LEYENDECKER, T.; LEMMER, O.; WENKE, R. **Investigations on hard coat reamers in different lubricant free cutting operations.** 1997. Surf. Coat. Technol. 90, 172–177.

MASON, F. **Usinando a seco ... ou quase a seco.** Revista Máquinas e Metais, São Paulo, vol. 37, n. 424, p 160-173, mai. 2001.

MACHADO, A. R.; DINIZ, A. E. **Vantagens e desvantagens do uso (ou não) de fluidos de corte.** Revista Máquinas e Metais, n° 419, p. 134 – 151, dezembro, 2000.

MACHADO, A. R.; WALLBANK, J. **The effect of extremely low lubricant volumes in machining.** 1997. *Wear* 210, 76–82.

MAZZOLANI, F. M. Aluminum and its alloys. **Aluminum alloys structures.** 2nd ed. London: FN Spon, 1995. Ch.1, p. 1-43.

NOCK Jr., J. A. Properties of comercial wrought alloys. In: HATCH, J. E. (Ed.) **Aluminum: properties and physical metallurgy.** Metals Park, Ohio: ASM, 1990. ch. 9, p. 351-78.

NOVASKI, O.; DÖRR, J. **Usinagem sem refrigeração.** *Revista Máquinas e Metais*, São Paulo, vol. 35, n. 398, p 18-27, mar. 1999.

PIRES, M. T. **Novas tecnologias transformam o Boeing 787 em avião dos sonhos.** *Revista Veja*, São Paulo, 27 set. 2011. Disponível em: <<http://veja.abril.com.br/noticia/ciencia/novas-tecnologias-transformam-boeing-787-em-aviao-dos-sonhos>>. Acesso em: 28 out. 2012.

REIS, A. M. **Influência do ângulo de posição secundário da ferramenta, raio de ponta e lubrificação na usinagem em presença de aresta postíça de corte.** Dissertação de mestrado apresentada a Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2000.

RIBEIRO, M. V.; MOREIRA, L. T. S., SANTOS, R. G. **The influence of coolant application on AA 7075 turning.** In: **European congress of aluminum alloys.** Bremen, Alemanha, out. 5-7, Proceedings of the ECAA, 2011, CD-rom, DGM.

SANDVIK. **Manual técnico de usinagem.** Sandivik Coromant, 2005.

SCHEY, J. A. **Tribology in Metal Working: Friction, Lubrication and Wear.** American Society for Metals, Metals Park, OH, 1993.

SICHA, W. E. Properties of comercial casting alloys. In: HATCH, J. E. (Ed.) **Aluminum: properties and physical metallurgy**. Metals Park, Ohio: ASM, 1990. ch. 8, p. 320-50.

SILVA, L. R.; COELHO, R. T.; JÚNIOR, A. B.; BEZERRA, A. A.; MENDONÇA, W. G. **Estudo da geometria de corte para torneamento de Inconel**. Revista Máquinas e Metais, n° 427, p. 32 – 55, 2001.

TÔNSCHOFF, H. K.; KROOS, F.; SPRINTIG, W.; BRANDT, D. **Reducing use of coolants in cutting processes**. Prod. Eng. 1 (2) (1994) 5–8.

TRENT, E. M. **Metal Cutting**. Butterworths, London, 1977, pp. 139–180.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4^a ed. Butterworth Heinemann, Oxford, 2000.

TUHOLSKI, R. J. **Don't forget the cutting fluid**. Journal of Industrial Technology Fall (1993) 2–5.

UEDA, T.; HOSOKAWA, A.; YAMADA, K. **Effect of oil mist on tool temperature in cutting**. Journal of Manufacturing Science and Engineering 128 (2006) 130–135.

ZANGRANDI, A. **Alumínio e suas ligas: fundamentos metalúrgicos e tecnológicos**. Lorena: Instituto Santa Teresa, 2008.

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B.; BARBA JUNIOR, D. J.; KISH, M. **Qualidade superficial e formação de cavacos na usinagem de Al e Cu**. Máquinas e Metais, p.82-89, Maio 1994.

Anexo A

Tabela 1 – Resultado dos ensaios realizados no CDP 01 com refrigeração abundante, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,1 mm/rev.

| Resultado ensaios CDP 01 - refrigeração abundante | | | | | |
|---------------------------------------------------|--------|-----------|---------------------|---------------------|------------|
| Nº | Ø (mm) | L_c (m) | R_a (µm) | R_{max} (µm) | v_b (mm) |
| 1 | 60 | 836 | 1ª geratriz - 0,569 | 1ª geratriz - 2,185 | 0 |
| | | | 2ª geratriz - 0,590 | 2ª geratriz - 2,484 | |
| | | | 3ª geratriz - 0,591 | 3ª geratriz - 2,338 | |
| 2 | 58 | 1645 | 1ª geratriz - 0,537 | 1ª geratriz - 2,509 | 0 |
| | | | 2ª geratriz - 0,487 | 2ª geratriz - 2,179 | |
| | | | 3ª geratriz - 0,506 | 3ª geratriz - 2,264 | |
| 3 | 56 | 2426 | 1ª geratriz - 0,441 | 1ª geratriz - 2,130 | 0 |
| | | | 2ª geratriz - 0,439 | 2ª geratriz - 2,387 | |
| | | | 3ª geratriz - 0,449 | 3ª geratriz - 2,149 | |
| 4 | 54 | 3179 | 1ª geratriz - 0,437 | 1ª geratriz - 2,435 | 0 |
| | | | 2ª geratriz - 0,410 | 2ª geratriz - 2,142 | |
| | | | 3ª geratriz - 0,428 | 3ª geratriz - 2,191 | |
| 5 | 52 | 3905 | 1ª geratriz - 0,383 | 1ª geratriz - 2,277 | 0,066 |
| | | | 2ª geratriz - 0,384 | 2ª geratriz - 2,124 | |
| | | | 3ª geratriz - 0,382 | 3ª geratriz - 2,197 | |
| 6 | 50 | 4603 | 1ª geratriz - 0,384 | 1ª geratriz - 2,167 | 0,071 |
| | | | 2ª geratriz - 0,384 | 2ª geratriz - 1,990 | |
| | | | 3ª geratriz - 0,382 | 3ª geratriz - 2,271 | |
| 7 | 48 | 5273 | 1ª geratriz - 0,409 | 1ª geratriz - 2,203 | 0,076 |
| | | | 2ª geratriz - 0,397 | 2ª geratriz - 2,045 | |
| | | | 3ª geratriz - 0,427 | 3ª geratriz - 2,136 | |
| 8 | 46 | 5916 | 1ª geratriz - 0,399 | 1ª geratriz - 2,210 | 0,076 |
| | | | 2ª geratriz - 0,412 | 2ª geratriz - 2,515 | |
| | | | 3ª geratriz - 0,432 | 3ª geratriz - 2,496 | |

Tabela 2 – Resultado dos ensaios realizados no CDP 02 com refrigeração abundante, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,1 mm/rev.

| Resultado ensaios CDP 02 - refrigeração abundante | | | | | |
|---------------------------------------------------|--------|--------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Nº | Ø (mm) | L _c (m) | R _a (µm) | R _{max} (µm) | v _b (mm) |
| 1 | 60 | 836 | 1ª geratriz - 1,065 2ª geratriz - 1,067 3ª geratriz - 1,097 | 1ª geratriz - 4,135 2ª geratriz - 4,133 3ª geratriz - 4,132 | 0 |
| 2 | 58 | 1645 | 1ª geratriz - 0,997 2ª geratriz - 0,938 3ª geratriz - 0,960 | 1ª geratriz - 3,827 2ª geratriz - 3,558 3ª geratriz - 3,418 | 0 |
| 3 | 56 | 2426 | 1ª geratriz - 0,911 2ª geratriz - 0,930 3ª geratriz - 0,929 | 1ª geratriz - 3,851 2ª geratriz - 3,674 3ª geratriz - 3,235 | 0,067 |
| 4 | 54 | 3179 | 1ª geratriz - 0,870 2ª geratriz - 0,893 3ª geratriz - 0,902 | 1ª geratriz - 3,406 2ª geratriz - 3,064 3ª geratriz - 3,253 | 0,07 |
| 5 | 52 | 3905 | 1ª geratriz - 0,861 2ª geratriz - 0,898 3ª geratriz - 0,821 | 1ª geratriz - 3,552 2ª geratriz - 3,656 3ª geratriz - 2,991 | 0,073 |
| 6 | 50 | 4603 | 1ª geratriz - 0,794 2ª geratriz - 0,802 3ª geratriz - 0,852 | 1ª geratriz - 3,461 2ª geratriz - 3,424 3ª geratriz - 3,180 | 0,073 |
| 7 | 48 | 5273 | 1ª geratriz - 0,786 2ª geratriz - 0,782 3ª geratriz - 0,810 | 1ª geratriz - 3,162 2ª geratriz - 3,064 3ª geratriz - 3,632 | 0,078 |
| 8 | 46 | 5916 | 1ª geratriz - 0,765 2ª geratriz - 0,791 3ª geratriz - 0,784 | 1ª geratriz - 3,314 2ª geratriz - 4,004 3ª geratriz - 3,174 | 0,079 |

Tabela 3 – Resultado dos ensaios realizados no CDP 03 com refrigeração abundante, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev.

| Resultado ensaios CDP 03 - refrigeração abundante | | | | | |
|---------------------------------------------------|--------|--------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Nº | Ø (mm) | L _c (m) | R _a (µm) | R _{max} (µm) | v _b (mm) |
| 1 | 60 | 279 | 1ª geratriz - 2,331 2ª geratriz - 2,292 3ª geratriz - 2,455 | 1ª geratriz - 10,98 2ª geratriz - 10,70 3ª geratriz - 10,61 | 0 |
| 2 | 58 | 548 | 1ª geratriz - 5,115 2ª geratriz - 5,246 3ª geratriz - 5,242 | 1ª geratriz - 19,07 2ª geratriz - 19,12 3ª geratriz - 19,01 | 0,047 |
| 3 | 56 | 809 | 1ª geratriz - 5,788 2ª geratriz - 5,685 3ª geratriz - 5,711 | 1ª geratriz - 21,11 2ª geratriz - 20,44 3ª geratriz - 20,96 | 0,058 |
| 4 | 54 | 1060 | 1ª geratriz - 5,702 2ª geratriz - 5,689 3ª geratriz - 5,807 | 1ª geratriz - 20,84 2ª geratriz - 21,46 3ª geratriz - 21,09 | 0,059 |
| 5 | 52 | 1302 | 1ª geratriz - 5,791 2ª geratriz - 5,811 3ª geratriz - 5,723 | 1ª geratriz - 20,96 2ª geratriz - 21,19 3ª geratriz - 21,07 | 0,059 |
| 6 | 50 | 1534 | 1ª geratriz - 5,850 2ª geratriz - 5,851 3ª geratriz - 5,845 | 1ª geratriz - 21,85 2ª geratriz - 20,98 3ª geratriz - 21,31 | 0,059 |
| 7 | 48 | 1758 | 1ª geratriz - 5,401 2ª geratriz - 5,351 3ª geratriz - 5,383 | 1ª geratriz - 19,86 2ª geratriz - 19,65 3ª geratriz - 19,93 | 0,059 |
| 8 | 46 | 1972 | 1ª geratriz - 5,407 2ª geratriz - 5,407 3ª geratriz - 5,361 | 1ª geratriz - 20,12 2ª geratriz - 20,65 3ª geratriz - 20,29 | 0,059 |

Tabela 4 – Resultado dos ensaios realizados no CDP 04 com refrigeração abundante, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev.

| Resultado ensaios CDP 04 - refrigeração abundante | | | | | |
|---------------------------------------------------|--------|--------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Nº | Ø (mm) | L _c (m) | R _a (µm) | R _{max} (µm) | v _b (mm) |
| 1 | 60 | 279 | 1ª geratriz - 5,205 2ª geratriz - 5,273 3ª geratriz - 5,207 | 1ª geratriz - 19,18 2ª geratriz - 19,19 3ª geratriz - 18,87 | 0 |
| 2 | 58 | 548 | 1ª geratriz - 5,219 2ª geratriz - 5,236 3ª geratriz - 5,214 | 1ª geratriz - 18,58 2ª geratriz - 19,11 3ª geratriz - 19,18 | 0,062 |
| 3 | 56 | 809 | 1ª geratriz - 5,314 2ª geratriz - 5,207 3ª geratriz - 5,283 | 1ª geratriz - 19,02 2ª geratriz - 19,11 3ª geratriz - 19,29 | 0,071 |
| 4 | 54 | 1060 | 1ª geratriz - 5,260 2ª geratriz - 5,350 3ª geratriz - 5,322 | 1ª geratriz - 19,50 2ª geratriz - 19,46 3ª geratriz - 19,53 | 0,076 |
| 5 | 52 | 1302 | 1ª geratriz - 5,256 2ª geratriz - 5,323 3ª geratriz - 5,250 | 1ª geratriz - 19,42 2ª geratriz - 19,45 3ª geratriz - 19,24 | 0,077 |
| 6 | 50 | 1534 | 1ª geratriz - 5,263 2ª geratriz - 5,318 3ª geratriz - 5,399 | 1ª geratriz - 19,68 2ª geratriz - 20,04 3ª geratriz - 19,40 | 0,078 |
| 7 | 48 | 1758 | 1ª geratriz - 5,391 2ª geratriz - 5,412 3ª geratriz - 5,292 | 1ª geratriz - 19,92 2ª geratriz - 19,99 3ª geratriz - 19,37 | 0,078 |
| 8 | 46 | 1972 | 1ª geratriz - 5,345 2ª geratriz - 5,391 3ª geratriz - 5,341 | 1ª geratriz - 20,04 2ª geratriz - 19,88 3ª geratriz - 19,53 | 0,078 |

Tabela 5 – Resultado dos ensaios realizados no CDP 05 com refrigeração abundante, velocidade de corte (v_c) de 300 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev.

| Resultado ensaios CDP 05 - refrigeração abundante | | | | | |
|---------------------------------------------------|--------|--------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Nº | Ø (mm) | L _c (m) | R _a (µm) | R _{max} (µm) | v _b (mm) |
| 1 | 44 | 205 | 1ª geratriz - 5,481 2ª geratriz - 5,531 3ª geratriz - 5,505 | 1ª geratriz - 21,39 2ª geratriz - 21,47 3ª geratriz - 21,13 | 0 |
| 2 | 42 | 401 | 1ª geratriz - 5,474 2ª geratriz - 5,475 3ª geratriz - 5,453 | 1ª geratriz - 21,30 2ª geratriz - 21,17 3ª geratriz - 20,92 | 0,043 |
| 3 | 40 | 587 | 1ª geratriz - 5,528 2ª geratriz - 5,477 3ª geratriz - 5,549 | 1ª geratriz - 21,17 2ª geratriz - 21,02 3ª geratriz - 21,07 | 0,048 |
| 4 | 38 | 765 | 1ª geratriz - 5,569 2ª geratriz - 5,575 3ª geratriz - 5,568 | 1ª geratriz - 21,30 2ª geratriz - 20,87 3ª geratriz - 20,88 | 0,053 |
| 5 | 36 | 933 | 1ª geratriz - 5,555 2ª geratriz - 5,557 3ª geratriz - 5,470 | 1ª geratriz - 20,92 2ª geratriz - 20,83 3ª geratriz - 20,62 | 0,053 |
| 6 | 34 | 1092 | 1ª geratriz - 5,562 2ª geratriz - 5,547 3ª geratriz - 5,571 | 1ª geratriz - 20,92 2ª geratriz - 20,89 3ª geratriz - 21,69 | 0,053 |
| 7 | 32 | 1242 | 1ª geratriz - 5,623 2ª geratriz - 5,576 3ª geratriz - 5,580 | 1ª geratriz - 22,49 2ª geratriz - 21,12 3ª geratriz - 21,39 | 0,055 |
| 8 | 30 | 1382 | 1ª geratriz - 5,707 2ª geratriz - 5,604 3ª geratriz - 5,649 | 1ª geratriz - 21,61 2ª geratriz - 21,32 3ª geratriz - 21,28 | 0,055 |

Tabela 6 – Resultado dos ensaios realizados no CDP 06 com refrigeração abundante, velocidade de corte (v_c) de 300 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev.

| Resultado ensaios CDP 06 - refrigeração abundante | | | | | |
|---------------------------------------------------|--------|--------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Nº | Ø (mm) | L _c (m) | R _a (µm) | R _{max} (µm) | v _b (mm) |
| 1 | 44 | 205 | 1ª geratriz - 4,849 2ª geratriz - 4,898 3ª geratriz - 4,903 | 1ª geratriz - 18,70 2ª geratriz - 18,46 3ª geratriz - 18,56 | 0,045 |
| 2 | 42 | 401 | 1ª geratriz - 4,887 2ª geratriz - 4,884 3ª geratriz - 4,916 | 1ª geratriz - 18,50 2ª geratriz - 18,09 3ª geratriz - 19,21 | 0,045 |
| 3 | 40 | 587 | 1ª geratriz - 4,859 2ª geratriz - 4,930 3ª geratriz - 4,849 | 1ª geratriz - 17,97 2ª geratriz - 18,05 3ª geratriz - 18,12 | 0,046 |
| 4 | 38 | 765 | 1ª geratriz - 4,922 2ª geratriz - 4,888 3ª geratriz - 4,962 | 1ª geratriz - 18,12 2ª geratriz - 18,02 3ª geratriz - 23,08 | 0,047 |
| 5 | 36 | 933 | 1ª geratriz - 4,901 2ª geratriz - 4,922 3ª geratriz - 4,890 | 1ª geratriz - 18,60 2ª geratriz - 18,35 3ª geratriz - 18,19 | 0,051 |
| 6 | 34 | 1092 | 1ª geratriz - 4,969 2ª geratriz - 4,929 3ª geratriz - 4,905 | 1ª geratriz - 18,19 2ª geratriz - 18,42 3ª geratriz - 18,29 | 0,051 |
| 7 | 32 | 1242 | 1ª geratriz - 4,958 2ª geratriz - 4,943 3ª geratriz - 4,973 | 1ª geratriz - 18,61 2ª geratriz - 18,73 3ª geratriz - 17,95 | 0,051 |
| 8 | 30 | 1382 | 1ª geratriz - 4,969 2ª geratriz - 5,010 3ª geratriz - 4,906 | 1ª geratriz - 18,10 2ª geratriz - 18,48 3ª geratriz - 18,45 | 0,051 |

Tabela 7 – Resultado dos ensaios realizados no CDP 01 com refrigeração MQF, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,1 mm/rev.

| Resultado ensaios CDP 01 - refrigeração MQF | | | | | |
|---------------------------------------------|--------|--------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Nº | Ø (mm) | L _c (m) | R _a (µm) | R _{max} (µm) | v _b (mm) |
| 1 | 60 | 836 | 1ª geratriz - 0,806 2ª geratriz - 0,806 3ª geratriz - 0,819 | 1ª geratriz - 3,119 2ª geratriz - 2,875 3ª geratriz - 3,101 | 0 |
| 2 | 58 | 1645 | 1ª geratriz - 0,799 2ª geratriz - 0,798 3ª geratriz - 0,792 | 1ª geratriz - 3,125 2ª geratriz - 2,893 3ª geratriz - 3,400 | 0,047 |
| 3 | 56 | 2426 | 1ª geratriz - 0,798 2ª geratriz - 0,824 3ª geratriz - 0,834 | 1ª geratriz - 3,034 2ª geratriz - 3,064 3ª geratriz - 2,936 | 0,052 |
| 4 | 54 | 3179 | 1ª geratriz - 0,763 2ª geratriz - 0,758 3ª geratriz - 0,799 | 1ª geratriz - 3,265 2ª geratriz - 3,162 3ª geratriz - 2,704 | 0,058 |
| 5 | 52 | 3905 | 1ª geratriz - 0,678 2ª geratriz - 0,690 3ª geratriz - 0,667 | 1ª geratriz - 3,522 2ª geratriz - 3,027 3ª geratriz - 2,759 | 0,058 |
| 6 | 50 | 4603 | 1ª geratriz - 0,612 2ª geratriz - 0,643 3ª geratriz - 0,626 | 1ª geratriz - 2,728 2ª geratriz - 3,046 3ª geratriz - 2,570 | 0,058 |
| 7 | 48 | 5273 | 1ª geratriz - 0,555 2ª geratriz - 0,589 3ª geratriz - 0,575 | 1ª geratriz - 2,326 2ª geratriz - 2,362 3ª geratriz - 2,918 | 0,062 |
| 8 | 46 | 5916 | 1ª geratriz - 0,537 2ª geratriz - 0,607 3ª geratriz - 0,572 | 1ª geratriz - 2,820 2ª geratriz - 2,472 3ª geratriz - 3,009 | 0,068 |

Tabela 8 – Resultado dos ensaios realizados no CDP 02 com refrigeração MQF, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,1 mm/rev.

| Resultado ensaios CDP 02 - refrigeração MQF | | | | | |
|---------------------------------------------|--------|--------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Nº | Ø (mm) | L _c (m) | R _a (µm) | R _{max} (µm) | v _b (mm) |
| 1 | 60 | 836 | 1ª geratriz - 1,434 2ª geratriz - 1,427 3ª geratriz - 1,449 | 1ª geratriz - 5,280 2ª geratriz - 5,383 3ª geratriz - 5,292 | 0 |
| 2 | 58 | 1645 | 1ª geratriz - 1,366 2ª geratriz - 1,367 3ª geratriz - 1,364 | 1ª geratriz - 4,877 2ª geratriz - 4,852 3ª geratriz - 5,475 | 0,04 |
| 3 | 56 | 2426 | 1ª geratriz - 1,328 2ª geratriz - 1,309 3ª geratriz - 1,279 | 1ª geratriz - 4,785 2ª geratriz - 4,907 3ª geratriz - 4,437 | 0,05 |
| 4 | 54 | 3179 | 1ª geratriz - 1,363 2ª geratriz - 1,350 3ª geratriz - 1,365 | 1ª geratriz - 4,688 2ª geratriz - 4,810 3ª geratriz - 5,249 | 0,054 |
| 5 | 52 | 3905 | 1ª geratriz - 1,205 2ª geratriz - 1,239 3ª geratriz - 1,244 | 1ª geratriz - 5,377 2ª geratriz - 5,219 3ª geratriz - 4,566 | 0,054 |
| 6 | 50 | 4603 | 1ª geratriz - 1,102 2ª geratriz - 1,181 3ª geratriz - 1,189 | 1ª geratriz - 4,529 2ª geratriz - 5,365 3ª geratriz - 5,908 | 0,055 |
| 7 | 48 | 5273 | 1ª geratriz - 1,056 2ª geratriz - 1,159 3ª geratriz - 1,113 | 1ª geratriz - 4,193 2ª geratriz - 4,480 3ª geratriz - 4,901 | 0,055 |
| 8 | 46 | 5916 | 1ª geratriz - 1,106 2ª geratriz - 1,121 3ª geratriz - 1,146 | 1ª geratriz - 4,346 2ª geratriz - 4,321 3ª geratriz - 4,132 | 0,059 |

Tabela 9 – Resultado dos ensaios realizados no CDP 03 com refrigeração MQF, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev.

| Resultado ensaios CDP 03 - refrigeração MQF | | | | | |
|---------------------------------------------|--------|--------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Nº | Ø (mm) | L _c (m) | R _a (µm) | R _{max} (µm) | v _b (mm) |
| 1 | 60 | 279 | 1ª geratriz - 5,607 2ª geratriz - 5,671 3ª geratriz - 5,652 | 1ª geratriz - 21,94 2ª geratriz - 22,25 3ª geratriz - 22,06 | 0 |
| 2 | 58 | 548 | 1ª geratriz - 5,717 2ª geratriz - 5,756 3ª geratriz - 5,703 | 1ª geratriz - 22,27 2ª geratriz - 22,14 3ª geratriz - 22,10 | 0,036 |
| 3 | 56 | 809 | 1ª geratriz - 5,701 2ª geratriz - 5,721 3ª geratriz - 5,746 | 1ª geratriz - 21,89 2ª geratriz - 22,14 3ª geratriz - 22,00 | 0,038 |
| 4 | 54 | 1060 | 1ª geratriz - 5,739 2ª geratriz - 5,782 3ª geratriz - 5,769 | 1ª geratriz - 22,42 2ª geratriz - 22,15 3ª geratriz - 22,28 | 0,04 |
| 5 | 52 | 1302 | 1ª geratriz - 5,830 2ª geratriz - 5,785 3ª geratriz - 5,739 | 1ª geratriz - 22,57 2ª geratriz - 22,31 3ª geratriz - 22,24 | 0,042 |
| 6 | 50 | 1534 | 1ª geratriz - 5,676 2ª geratriz - 5,739 3ª geratriz - 5,710 | 1ª geratriz - 22,48 2ª geratriz - 22,30 3ª geratriz - 22,46 | 0,045 |
| 7 | 48 | 1758 | 1ª geratriz - 5,761 2ª geratriz - 5,805 3ª geratriz - 5,711 | 1ª geratriz - 22,17 2ª geratriz - 22,44 3ª geratriz - 22,53 | 0,048 |
| 8 | 46 | 1972 | 1ª geratriz - 5,739 2ª geratriz - 5,766 3ª geratriz - 5,736 | 1ª geratriz - 22,22 2ª geratriz - 23,03 3ª geratriz - 22,61 | 0,048 |

Tabela 10 – Resultado dos ensaios realizados no CDP 04 com refrigeração MQF, velocidade de corte (v_c) de 500 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev.

| Resultado ensaios CDP 04 - refrigeração MQF | | | | | |
|---------------------------------------------|--------|--------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Nº | Ø (mm) | L _c (m) | R _a (µm) | R _{max} (µm) | v _b (mm) |
| 1 | 60 | 279 | 1ª geratriz - 5,662 2ª geratriz - 5,720 3ª geratriz - 5,650 | 1ª geratriz - 20,74 2ª geratriz - 21,01 3ª geratriz - 21,06 | 0 |
| 2 | 58 | 548 | 1ª geratriz - 5,695 2ª geratriz - 5,663 3ª geratriz - 5,646 | 1ª geratriz - 20,88 2ª geratriz - 20,56 3ª geratriz - 20,95 | 0,033 |
| 3 | 56 | 809 | 1ª geratriz - 5,660 2ª geratriz - 5,676 3ª geratriz - 5,652 | 1ª geratriz - 20,93 2ª geratriz - 20,55 3ª geratriz - 20,56 | 0,04 |
| 4 | 54 | 1060 | 1ª geratriz - 5,715 2ª geratriz - 5,713 3ª geratriz - 5,638 | 1ª geratriz - 20,84 2ª geratriz - 20,78 3ª geratriz - 20,73 | 0,04 |
| 5 | 52 | 1302 | 1ª geratriz - 5,806 2ª geratriz - 5,679 3ª geratriz - 5,783 | 1ª geratriz - 21,66 2ª geratriz - 20,92 3ª geratriz - 21,81 | 0,04 |
| 6 | 50 | 1534 | 1ª geratriz - 5,689 2ª geratriz - 5,739 3ª geratriz - 5,766 | 1ª geratriz - 20,56 2ª geratriz - 20,96 3ª geratriz - 21,53 | 0,04 |
| 7 | 48 | 1758 | 1ª geratriz - 5,672 2ª geratriz - 5,726 3ª geratriz - 5,767 | 1ª geratriz - 21,05 2ª geratriz - 21,52 3ª geratriz - 21,22 | 0,042 |
| 8 | 46 | 1972 | 1ª geratriz - 5,704 2ª geratriz - 5,694 3ª geratriz - 5,682 | 1ª geratriz - 21,44 2ª geratriz - 21,78 3ª geratriz - 21,45 | 0,044 |

Tabela 11 – Resultado dos ensaios realizados no CDP 05 com refrigeração MQF, velocidade de corte (v_c) de 300 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev.

| Resultado ensaios CDP 05 - refrigeração MQF | | | | | |
|---------------------------------------------|--------|--------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
| Nº | Ø (mm) | L _c (m) | R _a (µm) | R _{max} (µm) | v _b (mm) |
| 1 | 44 | 205 | 1ª geratriz - 5,676 | 1ª geratriz - 21,00 | 0 |
| | | | 2ª geratriz - 5,710 | 2ª geratriz - 20,83 | |
| | | | 3ª geratriz - 5,725 | 3ª geratriz - 20,91 | |
| 2 | 42 | 401 | 1ª geratriz - 5,040 | 1ª geratriz - 17,70 | 0 |
| | | | 2ª geratriz - 4,997 | 2ª geratriz - 17,57 | |
| | | | 3ª geratriz - 4,979 | 3ª geratriz - 17,71 | |
| 3 | 40 | 587 | 1ª geratriz - 5,019 | 1ª geratriz - 18,03 | 0 |
| | | | 2ª geratriz - 4,987 | 2ª geratriz - 17,90 | |
| | | | 3ª geratriz - 5,025 | 3ª geratriz - 17,77 | |
| 4 | 38 | 765 | 1ª geratriz - 4,955 | 1ª geratriz - 17,76 | 0,028 |
| | | | 2ª geratriz - 4,953 | 2ª geratriz - 17,70 | |
| | | | 3ª geratriz - 5,055 | 3ª geratriz - 18,13 | |
| 5 | 36 | 933 | 1ª geratriz - 4,980 | 1ª geratriz - 17,29 | 0,028 |
| | | | 2ª geratriz - 4,985 | 2ª geratriz - 18,26 | |
| | | | 3ª geratriz - 5,159 | 3ª geratriz - 24,28 | |
| 6 | 34 | 1092 | 1ª geratriz - 5,019 | 1ª geratriz - 17,96 | 0,028 |
| | | | 2ª geratriz - 5,047 | 2ª geratriz - 21,45 | |
| | | | 3ª geratriz - 5,007 | 3ª geratriz - 17,88 | |
| 7 | 32 | 1242 | 1ª geratriz - 5,080 | 1ª geratriz - 18,69 | 0,028 |
| | | | 2ª geratriz - 5,124 | 2ª geratriz - 19,46 | |
| | | | 3ª geratriz - 5,113 | 3ª geratriz - 20,04 | |
| 8 | 30 | 1382 | 1ª geratriz - 5,020 | 1ª geratriz - 17,96 | 0,028 |
| | | | 2ª geratriz - 5,089 | 2ª geratriz - 21,52 | |
| | | | 3ª geratriz - 5,033 | 3ª geratriz - 18,56 | |

Tabela 12 – Resultado dos ensaios realizados no CDP 06 com refrigeração MQF, velocidade de corte (v_c) de 300 m/min e avanço (f) de 0,3 mm/rev.

| Resultado ensaios CDP 06 - refrigeração MQF | | | | | |
|---------------------------------------------|--------|--------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Nº | Ø (mm) | L _c (m) | R _a (µm) | R _{max} (µm) | v _b (mm) |
| 1 | 44 | 205 | 1ª geratriz - 5,349 2ª geratriz - 5,426 3ª geratriz - 5,381 | 1ª geratriz - 19,66 2ª geratriz - 19,82 3ª geratriz - 19,60 | 0 |
| 2 | 42 | 401 | 1ª geratriz - 5,351 2ª geratriz - 5,348 3ª geratriz - 5,344 | 1ª geratriz - 20,22 2ª geratriz - 19,26 3ª geratriz - 19,50 | 0,026 |
| 3 | 40 | 587 | 1ª geratriz - 5,345 2ª geratriz - 5,388 3ª geratriz - 5,331 | 1ª geratriz - 19,22 2ª geratriz - 19,37 3ª geratriz - 19,17 | 0,028 |
| 4 | 38 | 765 | 1ª geratriz - 5,371 2ª geratriz - 5,374 3ª geratriz - 5,423 | 1ª geratriz - 19,21 2ª geratriz - 19,57 3ª geratriz - 22,60 | 0,035 |
| 5 | 36 | 933 | 1ª geratriz - 5,386 2ª geratriz - 5,361 3ª geratriz - 5,528 | 1ª geratriz - 19,25 2ª geratriz - 19,46 3ª geratriz - 29,01 | 0,037 |
| 6 | 34 | 1092 | 1ª geratriz - 5,326 2ª geratriz - 5,364 3ª geratriz - 5,389 | 1ª geratriz - 19,09 2ª geratriz - 19,42 3ª geratriz - 19,51 | 0,037 |
| 7 | 32 | 1242 | 1ª geratriz - 5,419 2ª geratriz - 5,418 3ª geratriz - 5,461 | 1ª geratriz - 19,73 2ª geratriz - 19,98 3ª geratriz - 19,38 | 0,045 |
| 8 | 30 | 1382 | 1ª geratriz - 5,452 2ª geratriz - 5,477 3ª geratriz - 5,391 | 1ª geratriz - 19,17 2ª geratriz - 19,95 3ª geratriz - 19,26 | 0,045 |