

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
**Franz Wilhelm Vogl**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA LIGA AA7050-  
T74 EM OPERAÇÕES DE USINAGEM POR  
TORNEAMENTO**

**Taubaté - SP**  
**2007**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
**Franz Wilhelm Vogl**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA LIGA AA7050-  
T74 EM OPERAÇÕES DE USINAGEM POR  
TORNEAMENTO**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

**Área de concentração:**

Tecnologia dos Materiais e Processos de Fabricação

**Orientador:**

Prof. Dr. Gilberto Walter Arenas Miranda

**Co-orientador:**

Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

**Taubaté – SP**  
**2007**

**Ficha catalográfica elaborada pelo  
SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU**

V883e Vogl, Franz Wilhelm  
Estudo do comportamento da liga AA7050-T74 em operações de  
usinagem por torneamento / Franz Wilhelm Vogl. - 2007.  
113f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade de Taubaté, Departamento  
de Engenharia Mecânica, 2007.

Orientação: Prof. Dr. Gilberto Walter Arenas Miranda, Co-  
Orientação: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro, Programa de Pós-  
graduação em Engenharia Mecânica.

1. Torneamento. 2. Alumínio. 3. Desgaste. 4. Rugosidade.  
5. Usinagem sem fluido. 6. Usinagem com fluido. I. Título.

**FRANZ WILHELM VOGL**  
**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA LIGA AA7050-T74 EM OPERAÇÕES DE**  
**USINAGEM POR TORNEAMENTO**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

**Área de concentração:**  
Tecnologia dos Materiais e Processos de Fabricação

Data: \_\_\_\_\_

Resultado: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Universidade \_\_\_\_\_

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Universidade \_\_\_\_\_

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Universidade \_\_\_\_\_

Assinatura \_\_\_\_\_

Dedico a conclusão deste trabalho:

À minha esposa, *Ivone* e à minha filha *Andréa*  
companheiras em todas as lutas.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que é nosso maior mestre.

À minha família, pela dedicação.

Ao Prof. Dr. Gilberto Walter Arenas Miranda, pela habilidade com que orientou este trabalho.

Ao Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro, pela dedicação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. José Eduardo Salgueiro Lima da ETEP Faculdades que tanto incentivou-me a fazer o mestrado.

Ao Prof. Adriano Santos Batista pela ajuda que tem dado na ETEP Faculdades.

A UNESP-Guaratinguetá, por ceder seus laboratórios para execução dos testes.

Ao Tecnólogo José Manuel Bernardes, pela ajuda como operador do torno CNC.

A Sandvik-Coromant, na pessoa do Eng. Okis Bigelli, que intermediou o fornecimento das ferramentas utilizadas neste trabalho.

Ao MSc. Elias Alves da Cunha pela grande colaboração no uso do campus da UNESP-Guaratinguetá.

E, finalmente, a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

A mente que se abre a uma nova idéia jamais  
voltará seu tamanho original.

Albert Einstein

## RESUMO

Dentre os materiais disponíveis aos processos industriais, os metais não-ferrosos ocupam posição de destaque por possuírem características físicas, químicas e mecânicas diferenciadas, tornando-os importantes para a engenharia, principalmente, nos setores de transporte, mecânico e elétrico. A crescente importância dos metais não-ferrosos na indústria, torna necessário um conhecimento mais profundo das características de processamento destes materiais. O trabalho proposto visa promover o estudo da usinagem de uma liga de alumínio (AA7050), por meio da variação das condições de usinagem (avanço, velocidade corte, presença ou não de fluido de corte, etc.) buscando-se observar os valores das rugosidades obtidas em função de se estabelecer padrões de comportamento desta liga em usinagem por torneamento para diferentes geometrias de ferramenta. Após cada operação de usinagem a ferramenta e o cavaco foram analisados no microscópio óptico, para verificação do desgaste da ferramenta e do tipo de cavaco gerado, quanto a superfície das peças, a mesma teve a rugosidade medida, periodicamente, com o uso de um rugosímetro portátil e os dados dispostos em gráficos em função dos parâmetros “Ra” e “Ry”. Notou-se uma pequena vantagem da ferramenta “C”, que mesmo com baixas velocidades apresentou não só menores valores de rugosidade, como também um comportamento mais estável em relação a variação do valor da rugosidade apresentada. Numa avaliação geral esta ferramenta poderia ser indicada como a melhor escolha para o conjunto de parâmetros testados, em que a condição de usinagem recomendada seria a de 350 m/min e avanço de 0,2 mm/volta. Foi possível observar também que a utilização do fluido de corte possibilita um melhor desempenho das ferramentas em relação à rugosidade obtida e quebra do cavaco.

**Palavras-chave:** torneamento, alumínio, rugosidade, fluido de corte, usinagem com fluido e usinagem sem fluido.

## ABSTRACT

Among the available materials to the industrial process, the non-ferrous metals has a highlighted position due to its distinguished physical, chemical and mechanical properties, becoming important for the engineering, specially for the transportation, mechanical and electrical sectors. The growing importance of non-ferrous metals in the industry makes necessary a deep knowledge about its capability of process and manufacturing. The considered work aims at to promote the machining study of an aluminum alloy (AA7050), by means of the variation of the machining conditions (feed rate, cutting speed, wet or dry machining, etc.) searching to observe the gotten values of roughness in function of if establishing standards of behavior of this alloy in machining for different tool geometries. After each machining operation the cutting tool and the chip had been analyzed by light optic microscopy, for verification of the tool wear and the generated chip type, already the surface of the parts had had its roughness measured, periodically, with the use of one portable roughness meter and the data made use in graphs in function of the "Ra" and "Ry" parameters. A small advantage of tool "C" was noticed, that exactly with low speeds it presented not only lesser values of roughness, as also a more steady behavior in relation to the roughness values. In a general evaluation this tool could be indicated as the best choice for the set of tested parameters, which the condition of recommended machining would be of 350 m/min and 0,2 mm/rev. for feed rate. It was possible to also observe that the use of the coolant makes possible one better tool performance in relation to the obtained roughness and chip breaking.

**Key words:** turning, aluminum, roughness, coolant, dry machining and wet machining.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Desgaste de flanco VB ( $\mu\text{m}$ ) para ferramentas de metal duro e diamante policristalino em operação de torneamento de liga AA2618 (15%SiC)	31
Figura 2 – Zonas de deformação primária e secundária na usinagem de alumínio	33
Figura 3 – Esquema de formação do cavaco	34
Figura 4 – Área de contato cavaco-ferramenta	36
Figura 5 – Zona de fluxo entre cavaco e ferramenta	37
Figura 6 – Formas de cavaco: a) helicoidal; b) lasca; c) fita; d) espiral	39
Figura 7 – Aumento das velocidades de corte das ferramentas com o desenvolvimento de novos materiais nos últimos anos	41
Figura 8 – A) a- Desgaste de flanco, b e c – desgaste de entalhe; B) Desgaste de cratera; C) Deformação plástica; D) Aresta postiça; E) Lascamento; F) Trintas Térmicas; G) Quebra	43
Figura 9 – Consumo médio de fluido de corte na Alemanha, em 1997	48
Figura 10 – Relação de custos de fabricação associados ao uso de fluido de corte	49
Figura 11 – Perfil esquemático da superfície de uma peça	52
Figura 12 – Representação esquemática das ondulações e das micro-irregularidades	54
Figura 13 – Representação das rugosidades “Ra” e “Rmax”	56
Figura 14 – Perfil de rugosidade de uma peça torneada	57
Figura 15 – Perfil teórico de rugosidade de uma peça torneada	59
Figura 16 – Representação do corpo-de-prova: (a) formato inicial, (b) formato final	62
Figura 17 – Foto das ferramentas utilizadas nos ensaios de torneamento	63
Figura 18 – Torno CNC utilizado	64
Figura 19 – Rugosímetro utilizado	65

Figura 20 – Microscópio Óptico utilizado	65
Figura 21 – Esquema do ensaio de torneamento cilíndrico externo de acabamento	66
Figura 22 – Fluxograma dos ensaios de usinagem da liga AA 7050-T74	67
Figura 23 – Ferramentas “C”, utilizadas para diferentes velocidades de corte	70
Figura 24 – Ferramentas “D”, utilizadas para diferentes velocidades de corte	71
Figura 25 – Ferramentas “T”, utilizadas para diferentes velocidades de corte	72
Figura 26 – Cavacos obtidos com o uso da ferramenta de corte “C”, para diferentes velocidades de corte	73
Figura 27 – Cavacos obtidos com o uso da ferramenta de corte “D”, para diferentes velocidades de corte	74
Figura 28 – Cavacos obtidos com o uso da ferramenta de corte “T”, para diferentes velocidades de corte	75
Figura 29 – Gráficos das rugosidades Ra (a) e Ry (b) obtidas com o uso da velocidade de corte de 100 m/min (ferramentas “C”, “D” e “T”)	76
Figura 30 – Gráficos das rugosidades Ra (a) e Ry (b) obtidas com o uso da velocidade de corte de 250 m/min (ferramentas “C”, “D” e “T”)	77
Figura 31 – Gráficos das rugosidades Ra (a) e Ry (b) obtidas com o uso da velocidade de corte de 350 m/min (ferramentas “C”, “D” e “T”)	78
Figura 32 – Ferramentas “C”, utilizadas para diferentes avanços	80
Figura 33 – Ferramentas “D”, utilizadas para diferentes avanços	80
Figura 34 – Ferramentas “T”, utilizadas para diferentes avanços	81
Figura 35 – Cavacos obtidos com a ferramenta de corte “C”, para diferentes avanços	82
Figura 36 – Cavacos obtidos com a ferramenta de corte “D”, para diferentes avanços	82
Figura 37 – Cavacos obtidos com a ferramenta de corte “T”, para diferentes avanços	83
Figura 38 – Região de aplicação do quebra-cavaco (AL), das ferramentas utilizadas	84

Figura 39 – Gráficos das rugosidades “Ra (a)” e “Ry (b)”, em função do avanço (ferramenta “C”)	85
Figura 40 – Gráficos das rugosidades “Ra (a)” e “Ry (b)”, em função do avanço (ferramenta “D”)	86
Figura 41 – Gráficos das rugosidades “Ra (a)” e “Ry (b)”, em função do avanço (ferramenta “T”)	87
Figura 42 – Ferramentas “C” utilizadas com e sem fluido de corte	88
Figura 43 – Ferramentas “D” utilizadas com e sem fluido de corte	89
Figura 44 – Ferramentas “T” utilizadas com e sem fluido de corte	89
Figura 45 – Cavacos obtidos usando a ferramenta “C”, com e sem fluido de corte	90
Figura 46 – Cavacos obtidos usando a ferramenta “D”, com e sem fluido de corte	91
Figura 47 – Cavacos obtidos usando a ferramenta “T”, com e sem fluido de corte	91
Figura 48 – Gráficos das rugosidades “Ra”(a) e “Ry” (b) obtidas com e sem o uso de fluido de corte (ferramenta “C”)	93
Figura 49 – Gráficos das rugosidades “Ra”(a) e “Ry” (b) obtidas com e sem o uso de fluido de corte (ferramenta “D”)	94
Figura 50 – Gráficos das rugosidades “Ra”(a) e “Ry” (b) obtidas com e sem o uso de fluido de corte (ferramenta “T”)	95
Figura 51 – Rugosidades Ra e Ry em função da velocidade de corte para as ferramentas “C”, “D” e “T” (Lc= 600 m)	97
Figura 52 – Comparação do desempenho das ferramentas em função da rugosidade “Ra” para avanços de 0,1 e 0,2 mm/volta	98

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Composição química da liga de alumínio AA 7050-T74	61
Tabela 2 – Valores teóricos para as rugosidades “Ra” e “Ry”	106
Tabela 3 – Rugosidade “Ra” em função do avanço com fluido, Ferramenta “C”	106
Tabela 4 – Rugosidade “Ry” em função do avanço com fluido, Ferramenta “C”	106
Tabela 5 – Rugosidade “Ra” em função do avanço com fluido, Ferramenta “D”	107
Tabela 6 – Rugosidade “Ry” em função do avanço, com fluido, Ferramenta “D”	107
Tabela 7 – Rugosidade “Ra” em função do avanço, com fluido, Ferramenta “T”	107
Tabela 8 – Rugosidade “Ry” em função do avanço, com fluido, Ferramenta “T”	108
Tabela 9 – Rugosidade “Ra” em função do comprimento de corte com e sem fluido, Ferramenta “C”	108
Tabela 10 – Rugosidade “Ry” em função do comprimento de corte com e sem fluido, Ferramenta “C”	108
Tabela 11 – Rugosidade “Ra” em função do comprimento de corte com e sem fluido, Ferramenta “D”	109
Tabela 12 – Rugosidade “Ry” em função do comprimento de corte com e sem fluido, Ferramenta “D”	109
Tabela 13 – Rugosidade “Ra” em função do comprimento de corte com e sem fluido, Ferramenta “T”	109
Tabela 14 – Rugosidade “Ry” em função do comprimento de corte com e sem fluido, Ferramenta “T”	110
Tabela 15 – Rugosidade “Ra” em função da velocidade de corte com fluido, Ferramenta “C”	110

Tabela 16 – Rugosidade “Ry” em função da velocidade de corte com fluido, Ferramenta “C”	110
Tabela 17– Rugosidade “Ra” em função da velocidade de corte com fluido, Ferramenta “D”	111
Tabela 18 – Rugosidade “Ry” em função da velocidade de corte com fluido, Ferramenta “D”	111
Tabela 19 – Rugosidade “Ra” em função da velocidade de corte com fluido, Ferramenta “T”	111
Tabela 20 – Rugosidade “Ry” em função da velocidade de corte com fluido, Ferramenta “T”	112
Tabela 21 – Rugosidade “Ra” em função da velocidade de corte (Lc=600 m)	112

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 –	Designação das ligas de alumínio	26
Quadro 2 –	Designação das ligas de alumínio para o estado “H”	26
Quadro 3 –	Sistema de designação de têmperas para o alumínio e suas ligas, subdivisão para as têmperas “H”	26
Quadro 4 –	Sistema de designação de têmperas para o alumínio e suas ligas, subdivisão para as têmperas “T”	27
Quadro 5 –	Condições de corte recomendadas	63

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVOS	20
1.1.1 Geral	20
1.1.2 Específicos	20
2 REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1 INTRODUÇÃO	21
2.2 ALUMÍNIO E ALGUMAS DE SUAS LIGAS	24
2.2.1 Generalidades	25
2.2.2 Principais Propriedades Físico-Químicas do Alumínio	28
2.2.3 Importância das Ligas de Alumínio para a Produção Metal-Mecânica	29
2.2.4 Materiais para Ferramentas	30
2.2.5 Desgastes nas Ferramentas e Condições de Corte	31
2.3 USINAGEM DOS METAIS	32
2.3.1 Mecanismo de Formação do Cavaco	33
2.3.2 Tipos de Cavacos	37
2.3.3 Forma dos Cavacos	38
2.3.4 Ferramentas de Corte	41
2.3.5 Avarias e Desgaste da Ferramenta	42

2.3.6 A Racionalização de Fluido de Corte	45
2.4 ACABAMENTO SUPERFICIAL	51
2.4.1 Relação entre usinagem e rugosidade	52
2.4.2 Parâmetros de rugosidade	55
3 MATERIAIS E MÉTODOS	61
3.1 MATERIAIS	61
3.1.1 Corpos-de-Prova	61
3.1.2 Ferramentas de Corte	62
3.1.3 Fluido de Corte	63
3.2 EQUIPAMENTOS	64
3.2.1 Máquina-Ferramenta	64
3.2.2 Rugosímetro	64
3.2.3 Microscópio Óptico	65
3.2.4 Instrumentos de Medição	66
3.3 METODOLOGIA DOS TESTES	66
3.3.1 Ensaio de Medição de Rugosidade com Variação da Velocidade de Corte	67
3.3.2 Análise do Desgaste das Ferramentas	68
3.3.3 Ensaio de Medição de Rugosidade com Variação do Avanço	69
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.1 COMPARAÇÃO DAS FERRAMENTAS, EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE	70

4.1.1 Análise das Ferramentas	70
4.1.2 Análise dos Cavacos	72
4.1.3 Análise da Variação de Rugosidade “Ra” e “Ry” em Função da Velocidade	75
4.2 COMPARAÇÃO DAS FERRAMENTAS, VARIANDO-SE O AVANÇO	79
4.2.1 Análise das Ferramentas	79
4.2.2 Análise dos Cavacos	81
4.2.3 Análise da Variação de Rugosidade “Ra” e “Ry” em Função do Avanço	84
4.3 COMPARAÇÃO DAS FERRAMENTAS, COM E SEM FLUIDO DE CORTE	88
4.3.1 Análise das Ferramentas	88
4.3.2 Análise dos Cavacos	90
4.3.3 Análise da Variação de Rugosidade “Ra” e “Ry” em Usinagem Com e Sem Fluido de Corte	92
4.4 COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES FERRAMENTAS	96
5 CONCLUSÃO	99
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	100
REFERÊNCIAS	1001
BILIOGRAFIA CONSULTADA	105
APÊNDICE - A	106

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria aeronáutica e aeroespacial, frente às mudanças ocorridas nos últimos tempos no transporte aéreo de massa e com o desenvolvimento de novos produtos, exige uma disponibilidade maior de materiais para os quais se tenha qualidade de informações suficientes para seu processamento (HEINZ *et al.*, 2000).

Nesse sentido, principalmente, na indústria nacional, o alumínio possui importância significativa devido ao seu potencial de produção, e suas características físicas e mecânicas intrínsecas. O alumínio e suas ligas têm importância técnica devido à sua baixa densidade, elevada relação resistência/peso, endurecibilidade de muitas ligas, aparência, fabricabilidade, possibilidade de tratamento superficial e propriedades físicas e mecânicas.

Materiais que apresentam elevada relação resistência/peso, como o alumínio, e potencial para economia, no que tange ao peso na fabricação de produtos, são muito aceitos, principalmente, na indústria aeronáutica e automobilística. Porém, segundo Gomes (2001), não são muitos os centros de pesquisa de usinagem que possuem máquinas com faixas superiores a 15.000 rotações no Brasil. Isto faz com que o volume de pesquisa seja pequeno, em função do universo de variáveis existentes no processo de usinagem além do aspecto de desenvolvimento e aplicação de novos materiais.

A opção pelo trabalho sobre a Liga AA7050-T74 se deu pela sua grande utilização na indústria aeronáutica, buscando contribuir dessa forma com a divulgação do conhecimento científico, na expectativa de que o mesmo encontre aplicação no setor produtivo.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Geral

Consiste no estudo do comportamento em usinagem da liga de alumínio AA 7050-T74 por torneamento utilizando-se para tanto ferramentas de três geometrias diferentes, mas mantendo-se o mesmo quebra-cavaco.

### 1.1.2 Específicos

- a) verificar o comportamento de cada uma das ferramentas, no que diz respeito à vida útil de cada uma delas, ao cavaco formado e a rugosidade produzida, no que se refere à variação das condições operacionais de corte (velocidade de corte e avanço);
- b) analisar a influência da aplicação ou não de fluido de corte durante a operação de torneamento no que se refere à rugosidade obtida, aos desgastes apresentados e cavacos produzidos.

O trabalho proposto visa promover o estudo da usinagem de uma liga de alumínio (AA7050), por meio da variação das condições de usinagem (avanço, velocidade corte, presença ou não de fluido de corte, etc.) buscando-se observar os valores das rugosidades obtidas em função de se estabelecer padrões de comportamento desta liga em usinagem por torneamento para diferentes geometrias de ferramenta.

O presente trabalho foi organizado para sua apresentação nos seguintes Capítulos:

- Capítulo 1 – Introdução
- Capítulo 2 – Revisão da Literatura
- Capítulo 3 – Materiais e Métodos
- Capítulo 4 – Resultados e Discussões
- Capítulo 5 – Conclusões

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A presente pesquisa se realizou através da visitas às Bibliotecas de Instituições tais como: ITA/CTA, ETEP Faculdades, UNITAU e UNESP-Guaratinguetá. Foram utilizadas as bases de dados destas Bibliotecas e ainda o Portal de Periódicos da CAPES. Sempre que possível foram privilegiadas as referências com menos que dez anos de publicação.

### 2.1 INTRODUÇÃO

Segundo Weingaertner; Schroeter e Cúrsio (1994), o alumínio, dentre os metais não-ferrosos, destaca-se por ter alta resistência à corrosão e apresentar um comportamento muito melhor a baixas temperaturas se comparado com os demais. O alumínio e suas ligas têm importância técnica devido às suas propriedades físicas e mecânicas, principalmente em relação à relação resistência/peso, a temperabilidade e a trabalhabilidade destas ligas.

Pesquisas realizadas por uma indústria do setor automobilístico, por exemplo, revelam que o alumínio oferece cerca de 60% de redução de peso, quando comparado com aço e o ferro fundido na fabricação de veículos. Isso na prática significa que o uso desse material contribui, significativamente, para a economia de combustíveis e redução da emissão de poluentes no meio ambiente global (AA, 2001). Isso frente à escassez cada vez maior de combustíveis fósseis como o petróleo, e as exigências permanentes de redução dos índices de poluição atmosférica, dá a esse material uma grande importância tecnológica para o desenvolvimento de novos produtos, os quais devem estar adequados a essa realidade.

Com relação aos critérios de usinabilidade baseados na rugosidade da peça e na característica do cavaco, não se pode dizer que o alumínio tenha uma boa usinabilidade, pois em condições normais de usinagem, o cavaco formado é longo e o acabamento superficial

obtido é insatisfatório. Porém, bons acabamentos superficiais podem ser obtidos se a velocidade de corte for suficientemente alta e a geometria da ferramenta adequada (DINIZ; MARCONDES e COPPINI, 2000).

Segundo Kim e Kang (1997), superfícies espelhadas de alumínio sem rebarbas podem ser obtidas usando ferramentas de diamante em processos de fresamento a alta velocidade sem a necessidade de operações posteriores como, por exemplo, o polimento.

Ainda, conforme os autores citados acima, se tomadas como base as propriedades mecânicas do alumínio, a força de corte, e por essa razão, a potência requerida para usinagem é menor do que a esperada para esses materiais. Embora algumas ligas de alumínio apresentem um limite de resistência equivalente ao de alguns aços de baixo carbono, em temperatura ambiente, quando em temperaturas elevadas, essa resistência é bastante reduzida. Este fato favorece a usinagem dessas ligas, já que a elevação da temperatura é inerente ao processo de usinagem e, as ligas de alumínio por possuírem alta condutividade térmica, atraem para a peça boa parte do calor gerado.

Assim sendo, segundo Diniz; Marcondes e Coppini (2000) se faz necessário que haja uma refrigeração eficiente, a fim de se evitar a formação de aresta postiça de corte, porém as forças de corte necessárias para usinagem das ligas de alumínio são bem baixas quando comparadas com as forças relativas aos aços.

A divulgação das pesquisas sobre as vantagens que as ligas de alumínio podem oferecer com respeito à sua usinabilidade tendem a ser restritas desde a muito tempo, principalmente porque estas ligas sempre carregaram um falso estigma de impróprias a esta operação. Entretanto, nota-se que se forem escolhidas as ligas de alumínio adequadas, aliadas as operações de usinagem otimizadas, pode-se obter bons resultados, tanto em termos de qualidade da peça final, quanto em termos de custos (WEINGAERTNER; SCHROETER e CÚRSIO, 1994).

O processo de usinagem abrange muitos parâmetros e esta complexidade é, além disso, composta por uma variedade de operações e materiais envolvidos. Hoje, a usinagem é freqüentemente realizada em máquinas-ferramenta de comando numérico, com ferramentas múltiplas, constituídas de pastilhas, suportes e fixações. Porém, segundo Zhou e Wysk (1992), as decisões para a seleção de ferramentas, a determinação de parâmetros de usinagem e os tempos de troca de ferramentas são feitas pelos planejadores de processos, programadores e operadores de máquinas em diferentes estágios da fabricação

A usinabilidade pode ser definida como o grau de dificuldade de usinagem de um determinado material, ou ainda, segundo Ferraresi (1977, p. 566) como “a grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo (índice ou porcentagem), o conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a um outro tomado como padrão”.

Segundo Weingaertner *et al.* (1994), a usinabilidade de metais é, normalmente, analisada com relação a quatro critérios: qualidade superficial, formação de cavacos, vida da ferramenta e forças de corte. Nesse aspecto, a usinabilidade exerce forte influência sobre a produtividade e o custo final de produção e serve como parâmetro para reforçar a necessidade da preocupação não só de materiais com propriedades mecânicas, físicas e químicas superiores, mas também com o comportamento destes materiais quando submetidos a algum tipo de processo de fabricação. A idéia é que eles sejam passíveis de sofrer operações de processamento pelas técnicas existentes tanto do ponto de vista prático quanto econômico.

As propriedades do material de corte são de fundamental importância no que diz respeito à vida e ao desgaste da ferramenta, e conseqüentemente à sua usinabilidade. Existem vários mecanismos de desgaste da ferramenta que são o resultado de processos físicos e químicos durante a operação de usinagem. Os quatro principais processos de desgaste são:

adesão, abrasão, difusão, oxidação, que ocorrem simultaneamente durante o processo de corte, os quais muitas vezes também são dependentes da presença e intensidade do calor.

O processo de corte gera uma grande quantidade de calor devido à energia necessária para deformação do cavaco e ao atrito da ferramenta-peça e cavaco-ferramenta. O fluido de corte (quando predominantemente refrigerante) tem a função de dissipar o calor gerado neste processo, procurando minimizar o desgaste da ferramenta, e também a dilatação térmica da peça (principalmente em materiais com alta condutividade térmica, como é o caso do alumínio) e o dano térmico à estrutura superficial da peça (DINIZ; MARCONDES e COPPINI, 2000).

## 2.2 ALUMÍNIO E ALGUMAS DE SUAS LIGAS

O alumínio está presente nas mais diversas formas em nosso dia-a-dia. Assim, encontramos o alumínio nos veículos, nos carpetes e assentos de aviões, no tratamento da água de piscinas, na forma de sulfato de alumínio, nos cabos que levam energia elétrica a todos os recantos do país, nas luminárias, nas persianas e numa infinidade de outras aplicações. O alumínio, quando polido, tem aspecto de prata, com grande reflexibilidade, dissolve bem o hidrogênio, mas reage com o oxigênio formando  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (alumina) em sua superfície. Esse óxido peculiar, contínuo, transparente, inerte e aderente, preserva (passiva) o alumínio de certos meios agressivos. Todo agente químico que dissolver ou atacar essa película origina processos de corrosão ao alumínio. Quanto mais puro o alumínio, maiores a resistência à corrosão e a eletrocondutibilidade.

### 2.2.1 Generalidades

Freire (1983), define o alumínio como um elemento metálico inalterável ao ar. No entanto, é atacado pela maior parte dos ácidos minerais quando em solução aquosa (ácido clorídrico, sulfúrico, etc.) e soluções básicas (NaOH), resistindo bem à ação das substâncias orgânicas (álcoois, óleos, vernizes, ácido láctico etc.).

O alumínio puro tem baixa resistência mecânica, ou seja, na condição pura (99,99%), sua resistência à tração é cerca de 6 kgf/mm<sup>2</sup>. Quando comercialmente puro (99,9%) a resistência do alumínio é de 9,1 kgf/mm<sup>2</sup>. Assim, pode-se concluir que as impurezas contribuem para aumentar sua resistência em quase 50% (FREIRE, 1983). Para algumas ligas de alumínio esta resistência à tração pode ser superior à do aço, como é o caso da liga de alumínio ASTM 7075 quando comparada ao aço ABNT 1020.

Elementos químicos como cobre, magnésio, silício, zinco e manganês, sucatas selecionadas e refinadores de grãos são adicionados ao alumínio, permitindo a obtenção de ligas quando submetidos à fusão em fornos especiais. Os produtos dessas ligas podem ser provenientes de fundidos ou transformações mecânicas, como trefilação, extrusão, forjamento, laminação, usinagem e outros (FREIRE, 1983; WEINGAERTNER e SCHROETER, 1991).

Como têmpera (tratamento térmico), entende-se a ocorrência de solubilidade de alguns elementos de liga no alumínio, a qual aumenta com a temperatura e é muito baixa à temperatura ambiente. Dependendo do elemento de liga, a solubilidade pode ser elevada (Si, por exemplo), mesmo à temperatura ambiente. Assim, o tratamento térmico caracteriza o estado ou a condição produzida no metal ou liga, quando trabalhado mecânica e/ou termicamente, conferindo-lhe estruturas e/ou propriedades específicas (BRESCIANI FILHO, 1992). Outras características em relação ao estado ou condição do material podem ser

acrescentadas na nomenclatura das ligas de alumínio, associando-se uma letra e dígitos específicos, conforme Quadros 1 a 4:

**Quadro 1** – Designação das ligas de alumínio (adaptado de BRESCIANI FILHO, 1992)

<b>Dígitos</b>	<b>Estado do material</b>
F	material sem garantia quanto às suas propriedades mecânicas, não havendo controle das condições do processo de fabricação;
O	material recozido, com a máxima capacidade de conformabilidade
W	material solubilizado
H	material que não apresenta solubilidade e, portanto, suas propriedades mecânicas são obtidas por deformação mecânica. Acompanha um ou mais dígitos
T	material que apresenta solubilidade e, portanto, tratável termicamente podendo ou não ter encruamento adicional. Acompanha um ou mais dígitos;

**Quadro 2** – Designação das ligas de alumínio para o estado H (adaptado de BRESCIANI FILHO, 1992)

<b>Dígitos</b>	<b>Estado do material</b>
H1x	apenas encruada
H2x	encruada e recozida parcialmente
H3x	estabilizada após encruamento

**Quadro 3** - Sistema de designação de têmperas para o alumínio e suas ligas, subdivisão para as têmperas H (adaptado de BRESCIANI FILHO, 1992)

<b>Dígitos</b>	<b>Subdivisão para tempera H</b>
H1	Encruado somente
H2	Encruado e parcialmente recozido
H3	Encruado e estabilizado
HX2	1/4 duro, HX4 - 1/2 duro, HX8 - duro, HX9 - extraduro

**Quadro 4** – Sistema de designação de têmperas para o alumínio e suas ligas, subdivisão para as têmperas T (adaptado de BRESCIANI FILHO, 1992)

<b>D ígitos</b>	<b>Subdivisão para têmpera T</b>
T1	Trabalho à quente + envelhecimento natural
T2	Trabalho à quente + encruamento + envelhecimento natural
T3	Solubilização + encruamento + envelhecimento natural
T4	Solubilização + envelhecimento natural
T5	Trabalho à quente + envelhecimento artificial
T6	Solubilização + envelhecimento artificial
T7	Solubilização + estabilização (superenvelhecimento)
T8	Solubilização + encruamento + envelhecimento artificial
T9	Solubilização + envelhecimento artificial + encruamento
T10	Trabalho à quente + encruamento + envelhecimento artificial

As ligas de “corte livre”, ou seja, mais indicadas para a usinagem são as do tipo ASTM 2011, 2017 e 2024 à base de cobre, e do tipo ASTM 6061 e 6262 à base de magnésio-silício. As mais comuns para componentes fundidos são Al-Si-Cu, Al-Si-Mg, Al-Si-Cu-Mg, Al-Si-Cu-Fe. O cobre contribui para o aumento da elasticidade e da resistência à tração, e o silício melhora o processo de fundição, aumentando a resistência à abrasão. Ligas de Al-Si-Cu com mais de 4% de cobre, ou aquelas contendo magnésio, podem ser tratadas, termicamente (WEINGAERTNER e SCHROETER, 1991).

A adição de cromo, níquel, vanádio, prata, boro, chumbo, bismuto, zircônio e lítio conferem à liga de alumínio mais resistência à corrosão sob tensão, controle de recristalização e usinabilidade. Entretanto, outros elementos como o ferro, titânio, sódio, estrôncio e antimônio são considerados impurezas e devem ser controlados. O elemento químico adicionado à liga é que determina o tipo e a aplicação da mesma (WEINGAERTNER e SCHROETER, 1991).

As ligas das série 7000 são constituídas de ligas tratadas termicamente, feitas por laminação ou por extrusão. A liga de alumínio 7050 pode ser dividida em duas famílias dependendo da percentagem de cobre como terceiro elemento ligante: a liga de ALZnMgCu e a AlZnMg. Essas ligas, desenvolvidas pela Alcoa a partir de 1970, são geralmente usadas em aplicações estruturais e também em estruturas soldadas, pois possuem resistência nas zonas afetadas termicamente (MAZZOLANI, 1995).

A liga 7050-T74 foi desenvolvida para preencher a necessidade de um material que desenvolvesse alta resistência na direção da espessura, boa resistência à esfoliação por corrosão e trinca por corrosão sob tensão e boa tenacidade à fratura e características de fadiga. A substituição de 0,1% de Zr por 0,2% de Cr na liga 7075 minimizou a sensibilidade ao resfriamento e melhorou a propriedade de tenacidade à fratura. O equilíbrio de fase diminui a tenacidade à fratura e a capacidade de endurecimento por envelhecimento devido a não nucleação dos dispersóides de zircônio e cromo durante resfriamento. Entretanto os átomos de soluto que não se dissolvem durante a solubilização, estão disponíveis para formar precipitados resistentes durante o tratamento de envelhecimento. Isto é muito importante desde que a liga 7050 contenha um aumento no teor de cobre em comparação a liga 7075. As placas e os forjados da liga 7050-T74 são os novos produtos padrões de materiais de seção espessa na aviação e a placa de 7050-T76 e as extrudadas, têm muitas aplicações (CARVALHO, 1999).

### **2.2.2 Principais Propriedades Físico-Químicas do Alumínio**

É importante conhecer as principais propriedades físico-químicas do alumínio envolvido nos processos de fabricação por usinagem, pois elas influenciam na escolha de parâmetros de corte, nos materiais para ferramentas e outros elementos importantes para a

usinagem. No caso do alumínio, pode-se citar, com relação ao processo de usinagem e, comparando com o aço, algumas propriedades (COELHO, ASPINWALL e WISE, 1995; COELHO, 1994; WEINGAERTNER e SCHROETER, 1991) como:

- c) baixa densidade – corresponde aproximadamente a 1/3 da densidade do aço induzindo reduzidas vibrações mecânicas na operação de usinagem pela baixa inércia do conjunto, pois pode se trabalhar com componentes mais leves. Assim, permite o uso de maiores velocidades de corte, com melhor acabamento superficial, maior produtividade e, em consequência, menor custo por peça, em função de ocorrer uma diminuição do  $k_s$ , o que leva a uma diminuição na taxa de desgaste;
- d) elevada condutividade térmica – permite maior dissipação do calor pela peça, possibilitando o uso de elevadas velocidades de corte. Conseqüentemente, pode-se obter maior produtividade;
- e) baixo ponto de fusão – ocasiona o aparecimento de Aresta Postiça de Corte (APC), exigindo cuidados especiais para que se tenha menor aderência de material da peça na superfície de saída da ferramenta, como utilização de fluido de corte, acabamento da ferramenta polido e maiores velocidades de corte.

### **2.2.3 Importância das Ligas de Alumínio para a Produção Metal-Mecânica**

Chiesa; Fuoco e Santarini (1995), destacaram a importância das propriedades desses materiais para a aplicação nas indústrias de transportes, tanto automobilística quanto aeroespacial, é importante registrar que tais setores industriais eram responsáveis por, aproximadamente, dois terços da demanda mundial de fundidos em alumínio (na época 83% na França; 83% no Japão e 60% nos Estados Unidos).

A liga de alumínio tipo A356 (4056 - 7% Si) contendo 20% ou 25% de partículas de carboneto de silício em suspensão, forma os chamados Compósitos de Matriz Metálica (MMC). Essa liga é utilizada em algumas aplicações aeroespaciais, em protótipos de carros e até mesmo, em carros de competição (CHIESA, FUOCO e SANTARINI, 1995; VACCARI, 1991). Mesmo com a facilidade para a obtenção de produtos MMC's próximos de sua forma final, não se elimina totalmente a necessidade de operações de usinagem para a obtenção das dimensões finais do produto (MUBARAKI *et al.*, 1995).

#### **2.2.4 Materiais para Ferramentas**

Quanto aos materiais utilizados para ferramentas na usinagem de ligas de alumínio são normalmente o aço rápido, o metal duro e o diamante. Comparativamente, o aço rápido apresenta as seguintes vantagens: elevada tenacidade, boa resistência à quebra, fácil usinabilidade e baixo custo. É muito usado na fabricação de ferramentas especiais, brocas, machos etc., quando o uso de novos materiais e revestimentos duros não se justificam técnica e economicamente. Quanto à classe dos aços rápidos, prefere-se o tipo S (12-1-2) com 12% de W, 1% de Mo e 2% de V, que apresenta boa resistência ao desgaste sob temperatura elevada (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2000).

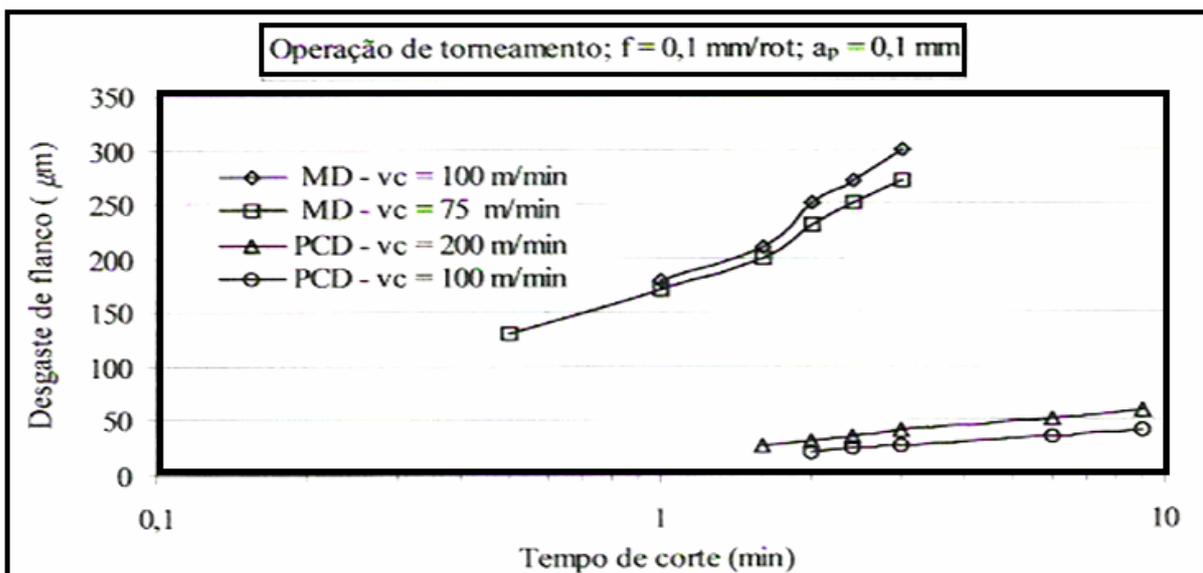
O metal duro das classes K e P tem como composto principal o carboneto de tungstênio. Porém, na classe P, encontra-se um percentual considerável de carboneto de titânio. O alumínio, por apresentar afinidade química com o titânio, descaracteriza as propriedades desejáveis deste tipo de carboneto (ISO P) como ferramenta de corte para a usinagem de tais ligas. Normalmente utiliza-se a classe K(10) para corte contínuo e K(20) para cortes interrompidos (FERRARESI, 1977; WEINGAERTNER e SCHROETER, 1991).

Segundo Kim e Kang (1997) existem inconvenientes na utilização de processos de usinagem convencionais de ligas de alumínio com altas velocidades de corte e ferramentas de

metal duro. Nesse caso, ocorrerão desgastes excessivos na ferramenta, arestas postiças de corte e rebarbas provenientes da maior plasticidade do material o que, geralmente, requer operações posteriores de acabamento, elevando o custo de produção. As ferramentas de diamante policristalino (PCD), normalmente reduzem tais efeitos e permitem em altas velocidades de corte, melhor qualidade superficial das peças de alumínio.

### 2.2.5 Desgastes nas Ferramentas e Condições de Corte

Na usinagem de ligas de alumínio, a ocorrência de desgaste de flanco da ferramenta é bem maior que o de desgaste de cratera, o que gera aumento da temperatura, e o material quando deformado plasticamente é então extrudado entre a peça e a superfície de folga da ferramenta, devido ao baixo ponto de fusão, reduzindo assim a qualidade superficial da peça (COELHO, 1994; HUNG *et al.*, 1996). Na Figura 1 podem ser observados os diferentes comportamentos da progressão do desgaste de flanco para o metal duro (MD) e o diamante policristalino (PCD).



**Figura 1** – Desgaste de flanco  $V_B$  ( $\mu\text{m}$ ) para ferramentas de metal duro e diamante policristalino em operação de torneamento da liga AA2618(15% SiC) adaptado de Coelho; Aspinwall e Wise (1996).

Para a usinagem da liga de alumínio (AlSi9Cu3), Byrne *et al.* (1997) utilizaram um torno convencional e outro de alta precisão com mancal aerostático, e realizaram torneamento cilíndrico externo com corte ortogonal, profundidade de corte  $a_p = 0,1$  mm, avanço variando de  $f = 0,03$  a  $0,2$  mm/volta, velocidade de corte variando de  $v_c = 190$  a  $880$  m/min e ferramenta recoberta com PCD. Para a condição em que o avanço era  $f = 0,05$  mm/volta foi obtida uma rugosidade média  $R_a$  entre  $0,45$  e  $0,23$   $\mu\text{m}$ , os autores observaram, que a rugosidade variou principalmente em função do avanço. Em relação a influência da velocidade de corte, a mesma depende do comportamento cinemático da máquina-ferramenta, ou seja, do nível de vibração alcançado no sistema em função da rotação utilizada.

Weingaertner e Schroeter (1991) afirmam que os esforços de corte na usinagem de ligas de alumínio atendem, em geral, aos modelos empíricos utilizados para a usinagem dos metais ferrosos. Resultados experimentais demonstraram que as forças de corte, de avanço e passiva, em um processo de torneamento das ligas de alumínio tipos Usinal 201 e 301 apresentaram as mesmas tendências de variações quando alterados alguns parâmetros, como o avanço ( $f$ ), a profundidade de corte ( $a_p$ ), a velocidade de corte ( $v_c$ ) e a geometria da ferramenta em relação aos ângulos de posição ( $\chi_r$ ) e de saída ( $\gamma_0$ ) além do raio de ponta da ferramenta ( $r_\epsilon$ ).

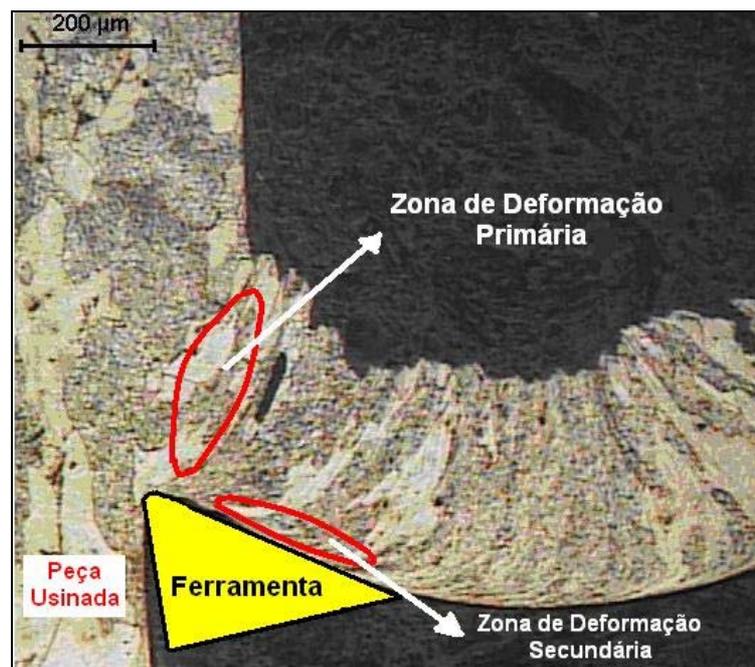
### 2.3 USINAGEM DOS METAIS

A usinagem pode ser entendida como sendo um processo de fabricação com remoção de cavaco, conferindo à peça a forma, ou as dimensões ou mesmo acabamento necessário, baseado no movimento relativo entre a ferramenta de corte e a peça. A usinagem possui ainda

a peculiaridade de ser um processo essencialmente prático, mas envolvendo um número bastante grande de variáveis, tornando muito difícil fazer uma previsão do que ocorre durante o andamento do processo. Assim, torna necessários estudos para que se tenha um aumento do desempenho das operações de usinagem, através da vida da ferramenta, forças de corte, potência consumida e superfície final da peça, para uma melhoria do desempenho econômico das operações de usinagem.

### 2.3.1 Mecanismo de Formação do Cavaco

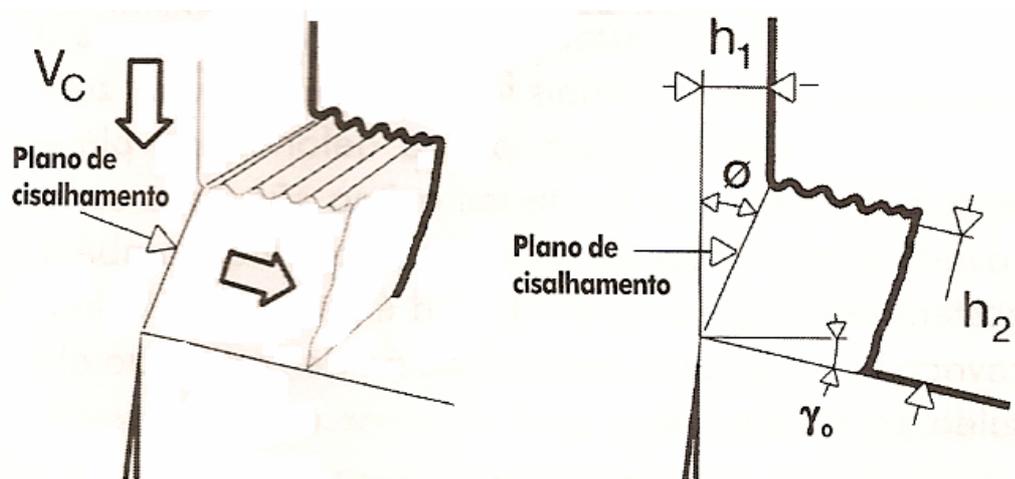
Para uma explicação científica das diferentes grandezas relacionadas com a usinagem dos metais, tais como desgaste da ferramenta e suas causas, torna-se necessário uma melhor compreensão dos mecanismos formadores do cavaco. Independente da ferramenta utilizada na usinagem, o cavaco é formado por um mecanismo de deformação, onde os cristais do metal são alongados por meio de escorregamento ou cisalhamento como mostrado na Figura 2, segundo Cunha (2004).



**Figura 2** - Zonas de deformação na usinagem de alumínio, adaptado de Cunha (2004).

Devido à alta deformação no processo de usinagem, a constituição do cavaco ocorre num espaço de tempo muito curto. Fatores como uma grande quantidade de material cisalhado, deformação plástica, alta pressão e alta temperatura, também, acompanham e influenciam o processo de formação do cavaco. O material da peça usinada ao redor da aresta de corte é submetido a grandes tensões e pode sofrer algumas mudanças metalúrgicas (BAYOUMI e XIE, 1995). Durante o processo de usinagem, o material da peça usinada sofre uma grande deformação plástica por causa da movimentação entre a ferramenta e a peça. Usualmente, durante a usinagem de alguns metais, duas regiões específicas do cavaco são formadas, conforme a Figura 2.

O corte dos metais envolve o cisalhamento concentrado ao longo de um plano chamado plano de cisalhamento (zona primária de cisalhamento). O ângulo entre o plano de cisalhamento e a direção de corte é chamado de ângulo de cisalhamento ( $\phi$ ), conforme a Figura 3. Quanto maior a deformação do cavaco sendo formado, menor o ângulo de cisalhamento e maiores são os esforços de corte. Esta influência é marcante na usinagem de materiais dúcteis, muito suscetíveis à deformação como no caso das ligas de titânio.



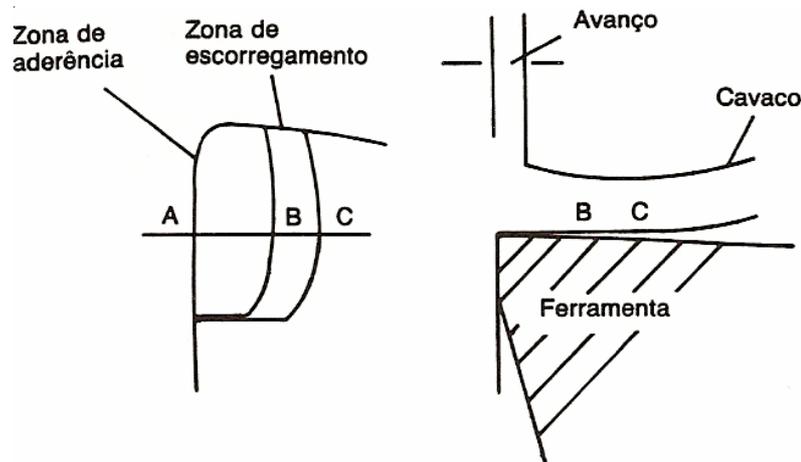
**Figura 3** - Esquema da formação do cavaco (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2000)

Segundo Ferraresi (1977), a parte do cavaco que não entra em contato com a ferramenta, é rugosa em razão da deformação não ser homogênea. Isto ocorre devido à presença de pontos de baixa resistência ou de concentração de tensão presente no metal sendo usinado. Um plano de cisalhamento passando através de um ponto de concentração de tensão, causa deformação a um valor de tensão mais baixo que aquele que deforma um ponto que não está sob concentração de tensão.

O fenômeno de formação do cavaco é periódico. Essa periodicidade é comprovada, experimentalmente, por meio da medida da frequência e da amplitude de variação da intensidade da força de usinagem. Na usinagem de materiais dúcteis, que têm grande zona plástica e, por isso, deformam-se bastante antes da ruptura. Já em materiais frágeis, que possuem zona plástica bem pequena e, por isso, rompem-se com pouca deformação plástica quando submetidos à tensão, a ruptura do cavaco é total (não somente da peça, mas, também das porções anteriores e posteriores de cavaco), e o pequeno cavaco formado sai da região de corte, não atritando com a superfície de saída da ferramenta (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2000).

Trent (1991), comenta que, na interface cavaco-superfície de saída da ferramenta, existe uma zona de aderência e, logo após esta, uma zona de escorregamento entre o cavaco e a ferramenta (Figura 4). Isto ocorre quando da usinagem de vários metais, os que formam cavacos contínuos, como será definido mais à frente, com ferramentas de aço rápido e metal duro. Nestas condições, o movimento do cavaco na zona de aderência ocorre por cisalhamento do material do cavaco. Bem próximo da interface é formada uma zona de cisalhamento intenso chamada de zona de fluxo. Ali existe uma camada de material estacionário na interface cavaco-ferramenta e a velocidade de saída do cavaco vai aumentando à medida que se percorre sua espessura, até que se chega ao fim da zona de fluxo, onde acaba o cisalhamento e a velocidade de saída do cavaco torna-se constante. Essa zona de

fluxo tem uma espessura da ordem de 0,01 a 0,08 mm, isto é, depois disso a velocidade de saída do cavaco se estabiliza (Figura 4). Na zona de aderência, a área de contato entre cavaco e ferramenta é total, isto é, a área real de contato é igual a aparente (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2000).

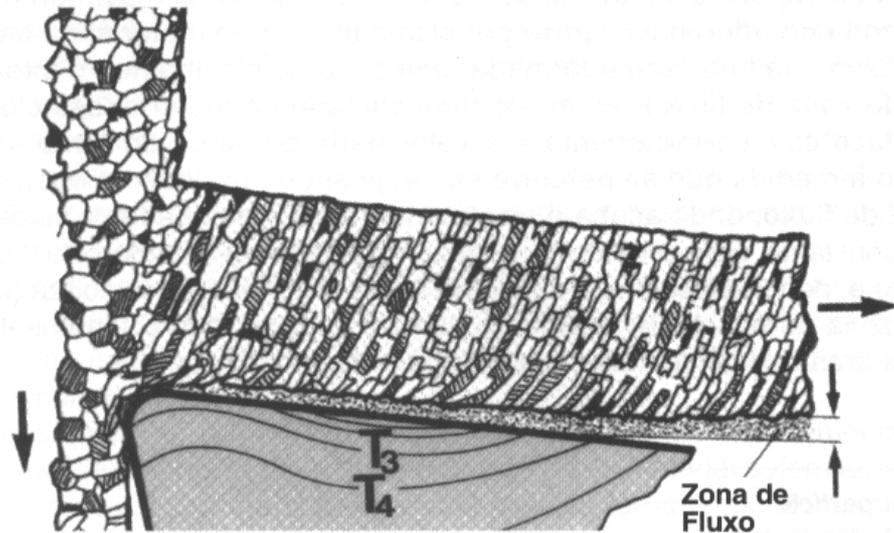


**Figura 4** - Área de contato cavaco-ferramenta (adaptado de DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2000).

Ao lado da zona de aderência acontece uma zona de fluxo, como mostrado na Figura 5. Ali o contato se dá apenas nos picos das irregularidades das duas superfícies em contato, a zona de aderência ocorre devido às altas tensões de compressão, às altas taxas de deformação e à homogeneidade do material da peça em contato com a ferramenta (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2000).

Segundo Wright (1979) citado por Diniz; Marcondes e Coppini (2000), as condições na interface de escorregamento ou aderência, dependem do par ferramenta-peça, do tempo de usinagem e da velocidade de corte. As condições de aderência são favorecidas por altas velocidades de corte, longos tempos de usinagem e pequenas diferenças entre o material da peça e o da ferramenta. Quanto menor o ângulo de saída da ferramenta, maior o comprimento

de contato cavaco-superfície de saída da ferramenta e, com isso, maior a zona de aderência. Quanto maior a zona de aderência, maior a temperatura de corte e a força de usinagem.



**Figura 5** - Zona de fluxo entre cavaco e ferramenta (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2000).

### 2.3.2 Tipos de Cavacos

De acordo com Ferraresi (1977), os cavacos são classificados de diversas maneiras. Uma das mais didáticas é aquela que os classifica em tipos e formas. Os tipos de cavacos são:

- a) cavaco contínuo - apresenta-se constituído de lamelas justapostas numa disposição contínua. A distinção das lamelas não é nítida. Forma-se na usinagem de materiais dúcteis como o aço, por exemplo, onde o ângulo de saída deve assumir valores elevados;
  - b) cavaco de cisalhamento - apresenta-se constituído de lamelas justapostas bem distintas;
  - c) cavaco de ruptura - apresenta-se constituído de fragmentos arrancados da peça usinada.
- A superfície de contato entre cavaco e superfície de saída da ferramenta é reduzida, assim como a ação do atrito; o ângulo de saída da ferramenta deve assumir valores baixos, nulos ou negativos.

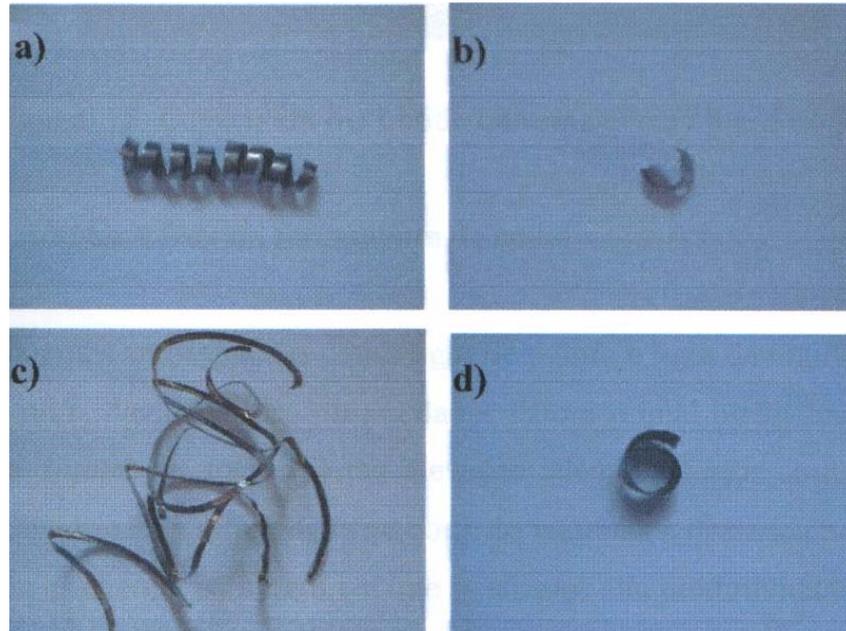
Não há uma distinção muito nítida entre os cavacos contínuos e de cisalhamento. Conforme as condições de usinagem e a geometria da ferramenta, se estas impuserem uma deformação maior ao cavaco, pode-se passar do cavaco contínuo ao de cisalhamento, mas, o principal fator determinante do tipo de cavaco é o material da peça usinada. Em geral, materiais dúcteis como aços e alumínio, formam cavacos contínuos ou de cisalhamento e materiais frágeis como ferros fundidos e latões, formam cavacos de ruptura (MACHADO, 1988).

### **2.3.3 Formas dos Cavacos**

As formas de cavaco são conforme ilustrado na Figura 6:

- a) cavaco helicoidal;
- b) cavaco em lascas ou pedaços;
- c) cavaco em fita; e
- d) cavaco em espiral.

O cavaco em fita carrega consigo todos os inconvenientes já citados, anteriormente. As outras formas de cavaco não apresentam transtornos mais sérios, dependendo do tipo de processo utilizado. Assim, por exemplo, o cavaco em lascas é preferido quando houver pouco espaço disponível, ou quando o cavaco deve ser removido por fluido refrigerante sob pressão, como no caso da furação profunda (FERRARESI, 1977).



**Figura 6** – Formas de cavaco: a) helicoidal; b) lasca; c) fita; d) espiral (MOREIRA, 2002)

Em fresamento de faceamento, quando a remoção de material é elevada, prefere-se a formação de cavacos helicoidais, pois estes saltam fora do bolsão de armazenamento de cavaco entre os dentes da fresa, não ocorrendo o risco de entupimento deste espaço. Logicamente, não faz sentido definir as formas de um cavaco se ele é do tipo de ruptura. Pois este é sempre muito pequeno, em geral em forma de pó. Assim, a classificação das formas de cavaco dada acima se presta aos cavacos do tipo contínuo e de cisalhamento (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2000).

De acordo com Ferraresi (1977), diversos problemas práticos têm relação com a forma do cavaco produzido na usinagem, já que esta tem implicações nas seguintes áreas:

- a) segurança do operador - um cavaco longo, em forma de fita, pode atingir o operador e machucá-lo, seriamente;
- b) possível dano à ferramenta e à peça – um cavaco em forma de fita, pode se enrolar à peça, danificando seu acabamento superficial. Isto é um problema mais sério, ainda, em

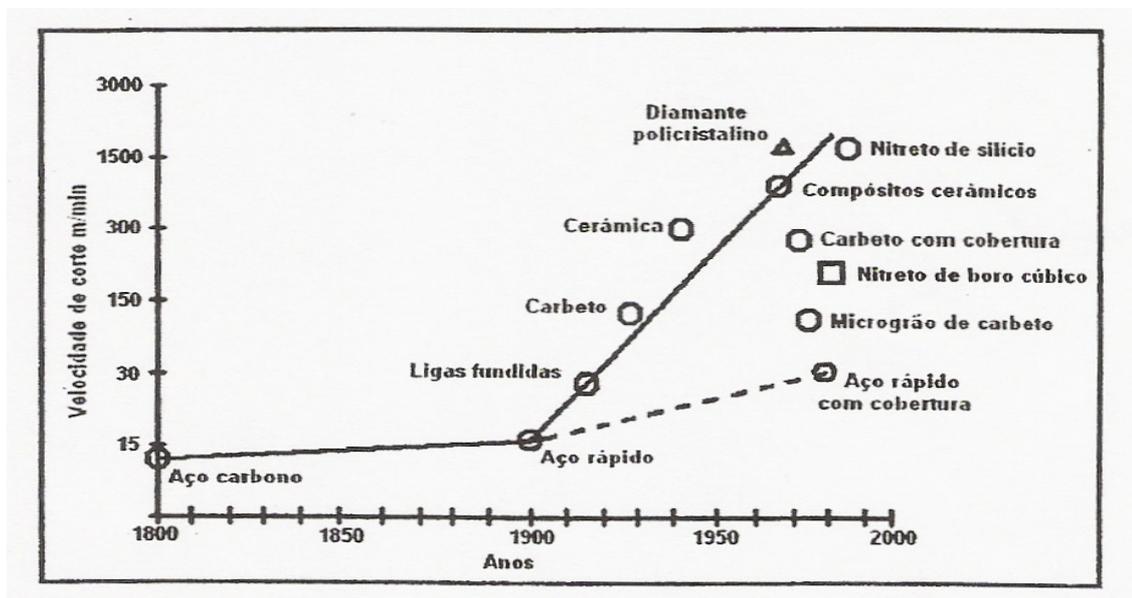
operações como o torneamento interno, onde o cavaco em fita não tem para onde sair e acaba danificando bastante o acabamento superficial da peça usinada. Além do dano à peça, um cavaco em fita pode, também, prejudicar a ferramenta. Em operações de torneamento, por exemplo, quando o cavaco se enrola sobre a peça, ele tenta penetrar entre a interface peça-ferramenta, podendo causar a quebra da mesma. Em operações de furação, o cavaco em fita pode, devido ao seu baixo fator de empacotamento e à dificuldade de sua expulsão pelo fluido de corte, entupir o canal helicoidal da broca e causar, também, a sua quebra;

- c) manuseio e armazenagem do cavaco - logicamente, um cavaco longo em forma de fita, é muito mais difícil de manipular e requer um espaço muito maior para ser armazenado, que um cavaco curto com o mesmo peso;
- d) forças de corte, temperatura e vida da ferramenta - ao se procurar deformar mais o cavaco visando aumentar sua capacidade de quebra, pode-se aumentar bastante os esforços de corte, com conseqüente aumento da temperatura e diminuição da vida da ferramenta.

Materiais frágeis como o ferro fundido cinzento, tendem a formar cavacos na forma de pequenas partículas. Por outro lado, materiais dúcteis tendem a formar cavacos longos e contínuos que são perigosos e difíceis de manusear. Quando se formam cavacos longos em forma de fita, com todos seus inconvenientes citados anteriormente, é necessário que o operador pare a máquina, periodicamente, para remover o cavaco amontoado. Isto representa um desperdício de tempo e um risco à sua segurança (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2000). Por isso, muito se tem feito no sentido de aumentar a capacidade de quebra do cavaco de materiais dúcteis.

### 2.3.4 Ferramentas de Corte

A competição global exige um contínuo aumento de produtividade nas operações de usinagem. Além disso, o aparecimento de novos materiais, como os materiais compósitos e ligas de titânio, de difícil usinagem (devido ao grande desgaste que estas ocasionam nas ferramentas de corte), e as exigências cada vez maiores de acabamento superficial e de tolerâncias dimensionais mais apertadas, fazem com que a tecnologia das ferramentas de corte esteja em constante desenvolvimento para atender a estes novos desafios. O desenvolvimento das ferramentas de corte inclui: o uso de novos materiais, novos revestimentos, novos sistemas de corte e outras técnicas com o objetivo principal de aumentar a vida da ferramenta de corte e a taxa de remoção de material. Também, com o objetivo de auxiliar no aumento de produtividade nas operações de remoção de material, novos métodos de controle e planejamento de processos com alta dependência dos computadores têm sido implementados nos ambientes fabris. Na Figura 7 pode ser observada a evolução das ferramentas de corte.



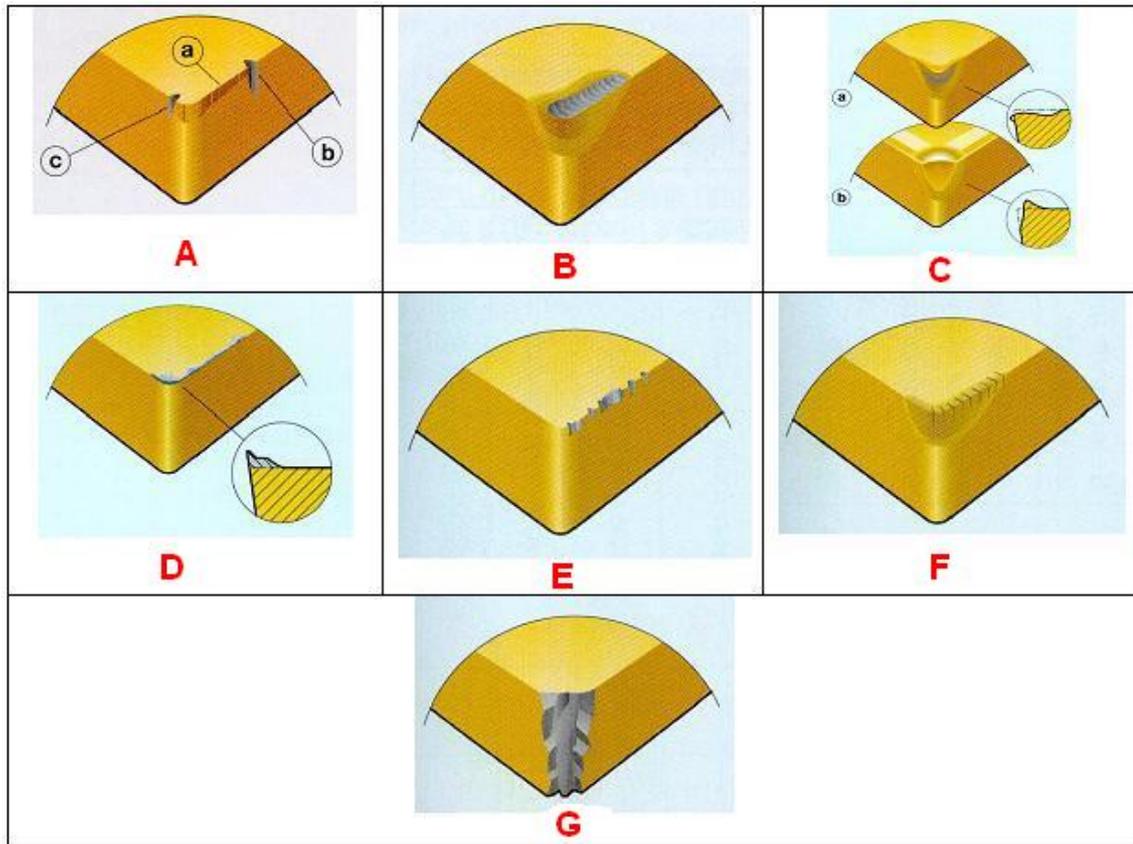
**Figura 7** - Aumento da velocidade de corte das ferramentas com o desenvolvimento dos materiais, na escala do tempo, adaptado de Koster (1990).

Existe uma ampla gama de diferentes materiais que podem ser escolhidos para serem utilizados como ferramenta de corte, devido aos intensos investimentos que vêm sendo feitos nas áreas de pesquisa e desenvolvimento de novos materiais e, também devido à acirrada concorrência existente entre os diversos fornecedores. A introdução de ferramentas de corte mais sofisticadas tem contribuído para a melhoria dos processos de usinagem com a redução dos tempos de corte e o crescimento do volume de cavaco removido (MARCONDES, 1990).

### **2.3.5 Avarias e Desgaste da Ferramenta**

A escolha correta de uma ferramenta no que se refere aos vários quesitos envolvidos, como: classe, geometria, sistema de fixação, escolha dos parâmetros de usinagem, etc, tem grande influência na sobrevida da mesma, porém num dado momento esta será vencida pelo desgaste (MARCONDES, 1990). Observa-se na Figura 8, os tipos de desgaste e avarias mais comuns no processo de torneamento, em seguida as explicações detalhadas de cada um deles.

Na Figura 8.A, região (a) apresenta desgaste de flanco e nas regiões (b e c) apresentam-se os desgastes de entalhe. Esses desgastes ocasionam um acabamento ruim e superfícies com problemas de tolerância dimensional. Sua principal causa é a elevada velocidade de corte ou insuficiente resistência ao desgaste do inserto. Pode ser minimizado pela redução da velocidade de corte e pelo emprego de insertos com classe mais resistente ao desgaste (MARCONDES, 1990).



**Figura 8** – (A) Desgaste de flanco (a), Desgaste de entalhe (b e c), (B) Desgaste de cratera, (C) Deformação plástica, (D) Aresta postiça, (E) Lascamento, (F) Trincas térmicas, (G) Quebra (SANDVIK, 2002).

Na Figura 8.B, é apresentado o desgaste de cratera, que provoca o enfraquecimento da cunha de corte, podendo causar a sua ruptura, comprometer o acabamento e aumentar o consumo de potência. É causado por abrasão resultante do atrito entre o cavaco e a superfície de saída do inserto e a difusão atômica gerada por elevadas temperaturas nesta região. Pode ser solucionado pela escolha de uma geometria mais positiva, redução do avanço e da velocidade de corte para diminuir a temperatura. Quando a área craterizada se localiza próxima à aresta o aumento do avanço afasta a cratera da região da aresta de corte.

Na Figura 8.C, é representada a avaria por deformação plástica, estas são depressões ou protuberâncias impostas a aresta de corte, provocam deficiência do controle de cavaco e mau acabamento superficial. Promovem ainda desgaste de flanco excessivo que pode conduzir a quebra da aresta. Pode ser causado por demasiada temperatura de corte combinada

com uma grande pressão de corte ou força de avanço. Pode ser solucionada utilizando-se uma classe mais dura com maior resistência à deformação plástica ou ainda, diminuindo-se a velocidade de corte e o avanço.

Na Figura 8.D, é apresentada a Aresta Postiça de Corte (APC), que pode comprometer o acabamento e a integridade da aresta de corte quando a APC se desprende. É causada por resíduos dos cavacos que estão sendo removidos e que se soldam na aresta de corte, devido à baixa velocidade de corte; geometria de corte negativa ou pouco positiva; materiais muito tenazes como certos aços inoxidáveis e alumínio puro. Para evitá-la deve-se aumentar a velocidade de corte, selecionar geometrias mais positivas e utilizar fluidos de corte com maior teor de lubricidade de forma mais abundante.

Na Figura 8.E, está representado o lascamento, que são pequenas fraturas na aresta que podem comprometer o acabamento da superfície e promover um desgaste de flanco excessivo. É consequência do uso de uma classe de metal duro, demasiadamente frágil e/ou aresta de corte pouco reforçada. Pode ser solucionado pela seleção de um inserto mais tenaz e com aresta mais robusta, recomenda-se, ainda, o aumento da velocidade de corte ou a escolha de uma geometria mais positiva.

Na Figura 8.F, estão as trincas térmicas, que são pequenas fissuras perpendiculares à aresta de corte que podem causar o lascamento desta, e comprometer o desempenho da ferramenta proporcionando um acabamento de pouca qualidade e conseqüentemente um baixo rendimento da ferramenta em termos de sua vida. São causadas por variações bruscas de temperatura, procedente de torneamento intermitente e abastecimento irregular de fluido refrigerante. Pode-se solucioná-las utilizando classes de inserto mais tenazes com resistência superior a choques térmicos, regularizando-se o suprimento ou mesmo eliminando o fluido refrigerante.

Finalmente na Figura 8.G, estão representadas as quebras: definem-se por fraturas que não só ocasionam estragos no inserto, como também no porta-ferramenta e na própria peça. São ocasionadas por classe de inserto muito rígido, carga excessiva sobre o inserto, geometria de corte inadequada e frágil, insertos com dimensões inadequadas, ou ainda como consequência de um desgaste exagerado ou outras avarias. Podem ser solucionadas utilizando-se uma classe de inserto mais tenaz, reduzindo-se o avanço e/ou a profundidade de corte, selecionando-se uma geometria de corte mais robusto e inserto mais espesso ou de maior aresta de corte (MARCONDES, 1990).

### **2.3.6 A Racionalização de Fluido de Corte**

Tanto o óleo como a água, aplicados em separado no processo de usinagem, não atendiam de forma plena às características exigidas para os fluidos de corte no que se referia às propriedades de refrigeração, lubrificação, estabilidade química etc. Os fluidos de corte eram classificados como fluidos à base de óleo e de água, dependendo de sua constituição média. Com o desenvolvimento dos fluidos sintéticos, tal classificação foi dividida em quatro grupos: óleo puro, óleo emulsionável, fluido semi-sintético e fluido sintético. O de uso mais freqüente é o óleo emulsionável que, de acordo com Machado e Diniz (2000, p. 32) "são compostos bifásicos de óleos minerais adicionados à água na proporção de 1:10 a 1:100, mais agentes emulgadores que garantem a miscibilidade destes com a água". Na verdade, aqui não se tem mistura de óleo com água, mas, sim de partículas de óleo envolvidas pela água. Então, tem-se uma emulsão, não uma solução e o nome trivial "óleo solúvel" não é o correto.

Para se evitar os efeitos nocivos da água presentes na emulsão, empregam-se aditivos anticorrosivos, tais como, o nitrito de sódio. São usados, ainda, biocidas e fungicidas que inibem o crescimento de bactérias e fungos, devendo ser compatíveis com a pele humana e atóxicos. Os aditivos de Extrema Pressão (EP) e antidesgaste usados, que aumentam as

propriedades de lubrificação, são os mesmos empregados para óleos puros. No entanto, o uso de cloro como aditivo para fluidos de corte vem encontrando restrições em todo o mundo, devido aos danos que este causa ao meio ambiente e à saúde humana. Por esta razão estão sendo novamente utilizados aditivos à base de enxofre e cálcio. Usa-se, ainda, gordura e óleo animal e vegetal para melhorar as propriedades de lubrificação (MACHADO e DINIZ, 2000).

Desde o século passado vêm sendo estudadas as melhorias das propriedades físico-mecânicas tanto nas máquinas e ferramentas como nos fluidos de corte. As variáveis e parâmetros de processos de fabricação por usinagem devem ser compatíveis com as novas tendências de responsabilidade ambiental, atendendo a normas nacionais e/ou internacionais, como é o caso das ISO 14000. Assim sendo, a escolha dos fluidos de corte em processos de usinagem mostra-se complexa, pois, além de eficiência técnica para a usinagem dos materiais, os mesmos não deverão causar poluição ao ambiente (SOKOVIC e MIJANOVIC, 1997). Isso exige inovação tecnológica aplicada aos fluidos de corte, solução de problemas, ainda não resolvidos e até mesmo, implemento cultural e de aprendizagem da parte do operador dessas máquinas.

Emulsões à base de óleo sintético e água têm sido usadas, e apresentam melhores resultados para o processo de usinagem, devido aos efeitos de refrigeração e de lubrificação, que tornam superior a qualidade das superfícies usinadas, aumentando a vida da ferramenta (MACHADO e WALLBANK. 1997).

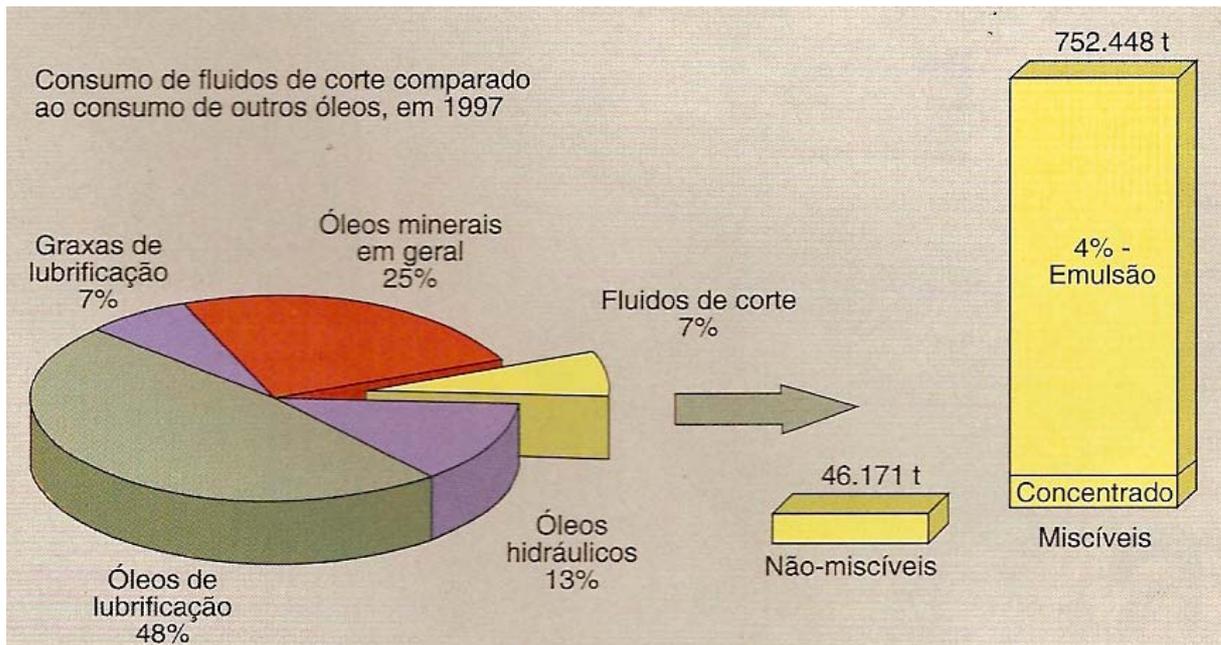
As questões econômicas, ambientais e de saúde do ser humano relacionadas aos processos de fabricação por usinagem, são algumas das variáveis de processo, que justificam as tendências de uso de fluido de corte atomizado, em substituição ao emulsionado. O fluido de corte atomizado consiste de um volume mínimo de fluido de corte (10 ml/h a 1000 ml/h) atomizado por ar comprimido e aplicado na região de corte (interface da peça e ferramenta) durante o processo de usinagem.

Alguns dos problemas relacionados ao uso de fluido de corte atomizado incluem, principalmente, as características e/ou propriedades dos materiais envolvidos no processo, quais sejam: altas temperaturas de alguns materiais durante a usinagem, resultado abrasivo das ligas de alumínio-silício e do ferro fundido, bem como o efeito de micro soldas tanto na ferramenta como na peça, em virtude do baixo ponto de fusão de alguns materiais, como as ligas de alumínio (HEINE, 1997; SOKOVIC e MIJANOVIC, 1997).

Muitas indústrias utilizam fluido de corte emulsionado sem necessidade. De acordo com estudos realizados para as indústrias alemãs, os custos associados ao uso desses fluidos representam aproximadamente 16% dos custos de fabricação. Portanto, devem ser utilizados onde são extremamente necessários, como é o caso da usinagem de ligas de alumínio e aço inoxidável, em que a aderência do cavaco na cunha de corte é uma constante, gerando aderência do material da peça à cunha de corte da ferramenta (CSELLE e BARIMANI, 1995; DERFLINGER *et al.*, 1999; GRANGER, 1994; HYATT, 1997.a; HEINE, 1997; LAYRES *et al.*, 1997; MACHADO e WALLBANK, 1997).

Segundo Novaski e Dörr (1999), apenas na Alemanha para se dar um exemplo, foram utilizadas em 1997, cerca de 800.000 toneladas de meios de refrigeração e lubrificação de corte (Figura 9).

Kammermeier *et al.* (2000) acrescentam que de 20 a 100 litros de fluido de corte emulsionado por minuto, circulavam nos centros de usinagem para refrigerar a área de corte, esvaziar os cavacos produzidos, garantir a estabilidade térmica da máquina e garantir um processo de usinagem seguro. Aliado ao crescimento do entendimento do processo, suportado por restrições ecológicas e econômicas, os mesmos citam outras ações tecnológicas de materiais de ferramentas e máquinas que permitem a racionalização dos fluidos de corte emulsionados, em alguns processos de usinagem, pelo uso de fluidos de corte atomizados.

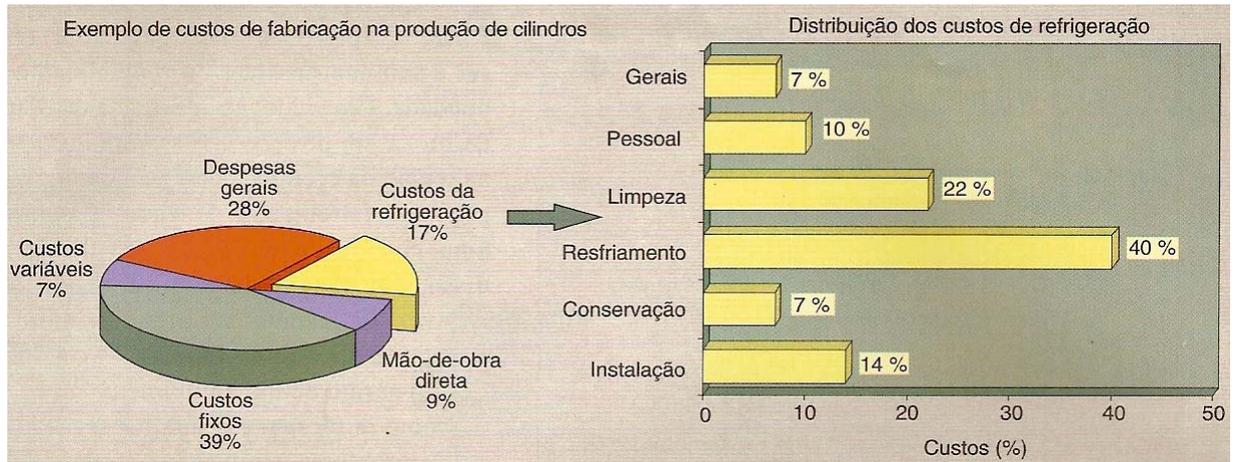


**Figura 9** – Consumo médio de fluidos de corte na Alemanha, em 1997 (NOVASKI e DÖRR, 1999).

Na Figura 10 é mostrado em um comparativo no qual a porcentagem dos custos referentes ao sistema de refrigeração não pode mais ser negligenciada. Pode-se observar que os gastos relacionados com a ferramenta representam apenas de 2 a 4 % contra 17 % em refrigeração. Adicionalmente, na usinagem com refrigeração ocorre a necessidade de se separar os cavacos, o que ocasiona mais desembolso (NOVASKI e DÖRR, 1999).

Por outro lado, durante a utilização de refrigerantes surgem esforços adicionais ao sistema, a exemplo da limpeza constante do chão de fábrica e dos cuidados que o operador da máquina deve ter para evitar problemas de saúde.

Ao substituir parte dos processos que utilizam fluidos de corte por processos de usinagem a seco, tem-se um ganho relativo de custos de fluidos e um acréscimo nos custos da ferramenta. Porém, no geral, o custo total fica reduzido, representando um ganho não só financeiro como, também, ambiental, (CSELLE e BARIMANI, 1995; GRANGER, 1994; HEINE, 1997; HYATT, 1997.b).



**Figura 10** – Relação de custos de fabricação associados ao uso de fluido de corte, (NOVASKI e DÖRR, 1999).

Em se tratando de usinagem, os fluidos de corte devem resfriar a peça, lubrificar o processo de corte e arrastar os cavacos gerados no corte de metais. Mas, as operações de fresamento, torneamento, corte de engrenagens e mesmo as de furação estão cada vez mais sendo feitas sem a utilização de fluido de corte, tanto para minimizar o impacto ambiental e os danos para a saúde quanto para reduzir custos (MASON, 2001). Nas operações de corte de metais, os custos de aquisição dos fluidos de corte, o seu uso e o descarte podem ser de 1,5 até 4 vezes o custo das ferramentas de corte usadas na operação.

Os custos dos fluidos de corte, relacionados com o processo de usinagem são, freqüentemente, relegados a um segundo plano. Mas é importante que eles sejam observados ao lado dos custos fixos da instalação dos sistemas ligados ao uso dos mesmos (NOVASKI e DÖRR, 1999). Neles, estão embutidos, por exemplo, os gastos feitos com fornecimento, tratamento e eliminação dos resíduos nocivos ao meio ambiente. Na Alemanha, os custos com eliminação incluindo a separação do lixo, a queima ou o armazenamento dos resíduos, são mais elevados do que o fornecimento. Além disso, não se pode menosprezar a manutenção dos sistemas de armazenamento dos fluidos e o consumo de energia associado necessário, por exemplo, para o seu resfriamento.

Embora os ambientalistas de todo o mundo tenham intensificado sua atenção aos rejeitos industriais perigosos nos últimos anos, os fluidos de corte continuam sendo largamente, utilizados e continuarão sendo nas próximas décadas. O que tem mudado são as técnicas de fabricação e de utilização destes fluidos permitindo que sejam neutralizados antes do descarte e, em alguns casos, reaproveitados, diminuindo, assim, seus efeitos negativos quando descartados. Motivos econômicos também têm colocado os fluidos de corte, em especial os óleos de corte, sob a mira dos pesquisadores com o objetivo de diminuir sua participação nos custos finais do produto usinado (DINIZ; MARCONDES e COPPINI, 2000).

Uma tendência observada na última década refere-se a pesquisas que tiveram como objetivo, restringir ao máximo o uso de fluidos refrigerantes e/ou lubrificantes na produção metal-mecânica. Para que a utilização do fluido de corte seja minimizada, suas técnicas têm sido intensamente experimentadas: o corte completamente sem fluido e o corte com Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), ou seja, quase sem fluido de corte.

A usinagem sem fluido de corte surge como um imperativo, na busca de redução de custos, aumento da produtividade e atendimento aos requisitos ecológicos, pois se torna cada vez mais indesejável o uso de sistemas de refrigeração na produção (NOVASKI e DÖRR 1999).

Ao se abrir mão do uso de fluidos de corte, porém, a sua influência positiva na usinagem também perde o efeito. As principais funções do fluido são a redução do atrito (lubrificação), eliminação do calor (refrigeração) e auxílio ao transporte dos cavacos (limpeza). Com a falta de lubrificação, a camada de separação entre a ferramenta e o material não será mais suficientemente garantida e o atrito aumentará. Uma consequência para a ferramenta será o aumento do desgaste abrasivo e de adesão. Prevê-se, ainda, uma elevação da temperatura no processo.

Segundo Mason (2001) a idéia da usinagem quase sem fluido de corte é borrifar uma quantidade mínima de refrigerante e/ou lubrificante sobre a aresta de corte. A técnica da usinagem com quantidades mínimas de lubrificante (MQL) reduz o atrito pela lubrificação no ponto de contato ferramenta/peça. A quantidade de lubrificante usada é tão pequena que não há problema de descarte. Mesmo assim, a peça e a ferramenta são suficientemente lubrificadas e refrigeradas para garantir bons resultados de corte. Frequentemente, uma mistura ar-óleo é bombeada através da ferramenta diretamente na zona de corte. As vantagens incluem o baixo consumo de lubrificante, cavacos secos, nenhum descarte de refrigerante e ar mais limpo. A grande desvantagem está associada à necessidade de sistemas de exaustão de ar junto às máquinas, com o objetivo de proteger a saúde dos operadores, em função dos danos que a névoa produzida pelos sistemas pode provocar.

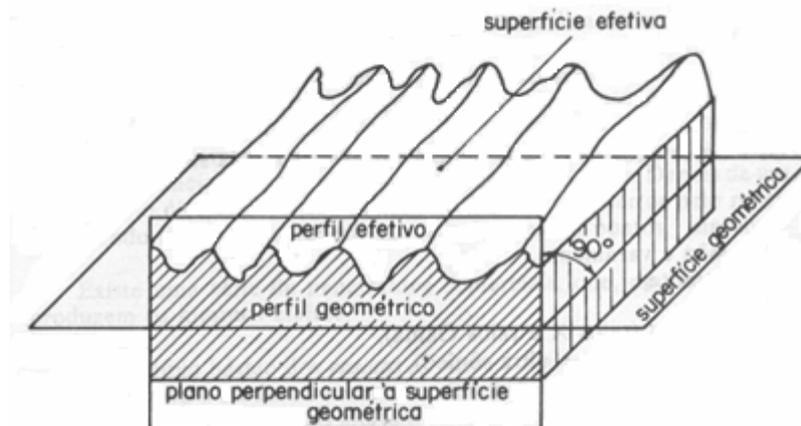
## **2.4 ACABAMENTO DA SUPERFÍCIE**

A necessidade de fabricação de produtos cada vez menores, mais leves, com maior exatidão e, se possível, com baixo custo, tem constantemente lançado desafios à engenharia de fabricação (Di RAIMO e PORTO, 2001). Com o desenvolvimento dos equipamentos de alta precisão um bom acabamento superficial das peças usinadas, utilizadas em suas montagens, tornou-se um item obrigatório.

Portanto, o estudo do acabamento superficial nesses materiais se justifica devido à influência deste nas condições de funcionamento e na confiabilidade dos componentes mecânicos sendo por isso, um dos principais itens analisados no estudo de integridade superficial de componentes usinados.

As superfícies metálicas caracterizam-se por apresentarem uma superfície com riscos ou rugosidades que, em vista das considerações anteriores, exigem, muitas vezes, um controle

rigoroso (Figura 11). O acabamento da superfície é medido através da rugosidade que por sua vez é expressa em micrometros ( $\mu\text{m}$ ). Em diversos países foram desenvolvidos critérios de medida, que deram origem a várias normas (AGOSTINHO, RODRIGUES e LIRANI, 1977). No Brasil, a norma de rugosidade é a NBR-6405 / 1988 “Rugosidade das superfícies”.



**Figura 11** – Perfil esquemático da superfície de uma peça (AGOSTINHO, RODRIGUES e LIRANI, 1977)

#### 2.4.1 Relação entre usinagem e rugosidade

Segundo Ferraresi (1977), a qualidade das superfícies das peças é caracterizada pelo acabamento obtido na usinagem e pelas propriedades físicas e mecânicas do metal na camada superficial. Estas propriedades são modificadas durante o processo de usinagem devido, principalmente, a ação dos seguintes fatores:

- a) pressão da ferramenta de corte contra a peça;
- b) atrito da superfície de incidência da ferramenta com a peça;
- c) atrito interno do metal na região de deformação plástica;
- d) calor gerado no processo de corte;

- e) fenômenos específicos do processo de formação do cavaco;
- f) trepidação da ferramenta e da máquina.

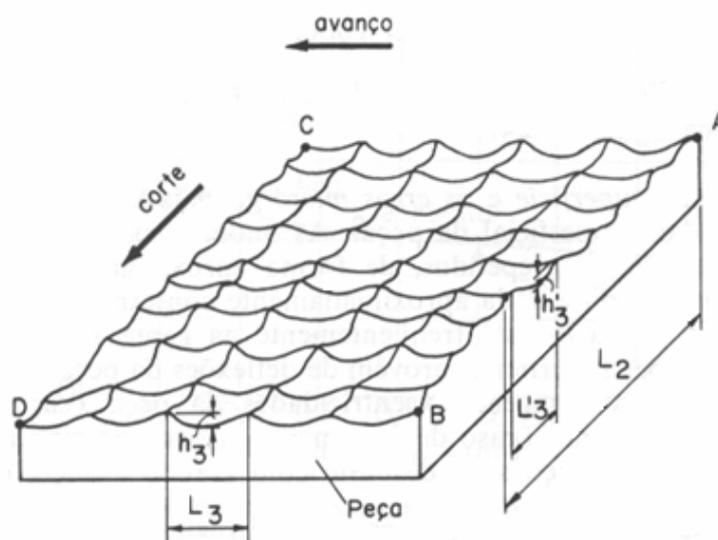
Dessa forma, além de se obter na peça usinada uma série de irregularidades geométricas, a estrutura cristalográfica da camada superficial é modificada. A composição química pode ser alterada, havendo em certos aços uma descarbonetação. A espessura da camada superficial modificada depende do processo, das condições de usinagem e do material. Quanto mais dúctil for o material maior será a modificação das propriedades da camada superficial da peça (FERRARESI, 1977).

Os erros geométricos que aparecem nas superfícies das peças, provenientes da usinagem, podem ser classificados em desvios macro-geométricos, ondulações e desvios micro-geométricos. A separação entre estes desvios é arbitrária, sendo impraticável a determinação dos erros de todos os pontos de uma superfície, faz-se a determinação ao longo das linhas que constituem os perfis das superfícies usinadas (AGOSTINHO, RODRIGUES e LIRANI, 1977). Os desvios macro-geométricos de forma geral (erros de forma) se estendem por toda a superfície a ser testada. São, geralmente, admitidos dentro das tolerâncias de usinagem, especificadas pelos projetistas.

As ondulações de superfície e os erros micro-geométricos estão, diretamente, ligados à qualidade superficial da peça. As ondulações referem-se às séries de desvios regularmente repetidos, de forma aproximadamente senoidal e com um comprimento constante. Ondulações superficiais provêm de deflexões da peça ou da máquina-operatriz durante a usinagem, excentricidades da peça (caso de torneamento) ou da ferramenta (caso de fresamento), folgas no eixo-árvore e nas guias da máquina, operações de desbaste com grande avanço, etc. (FERRARESI, 1977).

Os desvios micro-geométricos, ou as micro-irregularidades, constituem a rugosidade. Esses desvios são os de maior importância, uma vez que a rugosidade é avaliada pela altura e certas características das micro-irregularidades, são originadas pelo próprio processo de formação do cavaco, vibrações da ferramenta, aresta postiça de corte, marcas do avanço da ferramenta com a peça, etc. A rugosidade pode ser considerada como superposta a uma superfície ondulada. A rugosidade é, geralmente, classificada em transversal e longitudinal (Figura 12).

Micro-irregularidades transversais apresentam-se na direção do movimento de avanço da ferramenta (direção AC da Figura 12), enquanto que micro-irregularidades longitudinais estão na direção do movimento de corte. Conforme o processo e as condições de usinagem, pode predominar um ou outro tipo de micro-irregularidade. Assim, nas operações de torneamento e aplainamento, a máxima rugosidade é encontrada, geralmente, na direção de avanço, isto é, a rugosidade transversal é a que caracteriza (FERRARESI, 1977).



**Figura 12** - Representação esquemática das ondulações e das micro-irregularidades (FERRARESI, 1977)

Vibrações auto-induzidas do sistema elástico peça-ferramenta-máquina, produzem um movimento oscilatório (trepidações) numa direção normal à superfície da peça usinada, variando, periodicamente, a posição da aresta cortante em relação a esta superfície. Dependendo da frequência das oscilações e da velocidade de corte, haverá formação de ondulações ou micro-irregularidades longitudinais (FERRARESI, 1977).

#### 2.4.2 Parâmetros de rugosidade

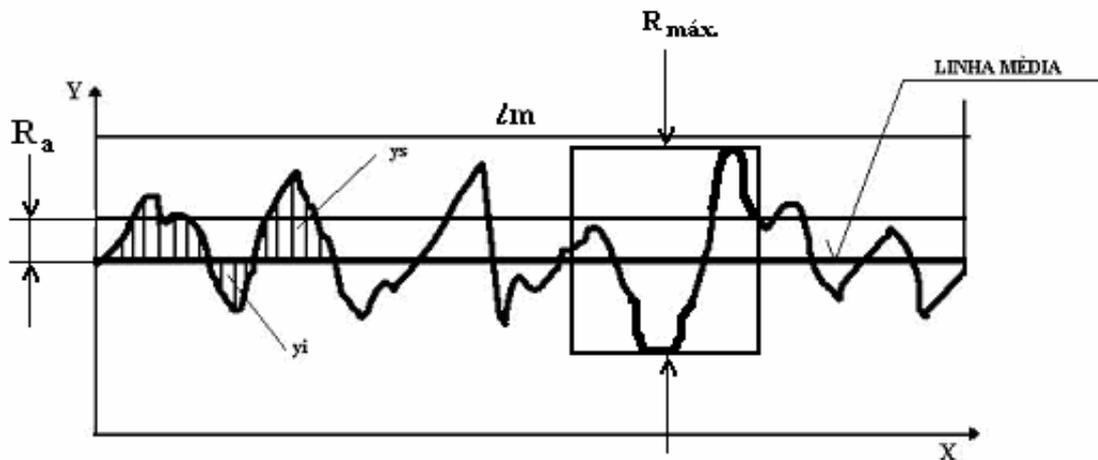
Segundo Boothroyd e Knight (1989), citado em Salles, Gonçalves e Corrêa (2001), a rugosidade da superfície final, obtida durante a operação de usinagem, pode ser considerada como a soma de dois efeitos independentes:

- a) a rugosidade da superfície teórica que é o resultado da geometria da ferramenta e do avanço;
- b) a rugosidade da superfície real que é o resultado das irregularidades da operação de corte.

Rugosidade média ( $R_a$ ), é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamentos ( $y_i$ ) e ( $y_s$ ), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição ( $l_m$ ), conforme a Figura 13 (AGOSTINHO, RODRIGUES e LIRANI, 1977). A expressão para  $R_a$  é apresentada na equação (1):

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx \quad (1)$$

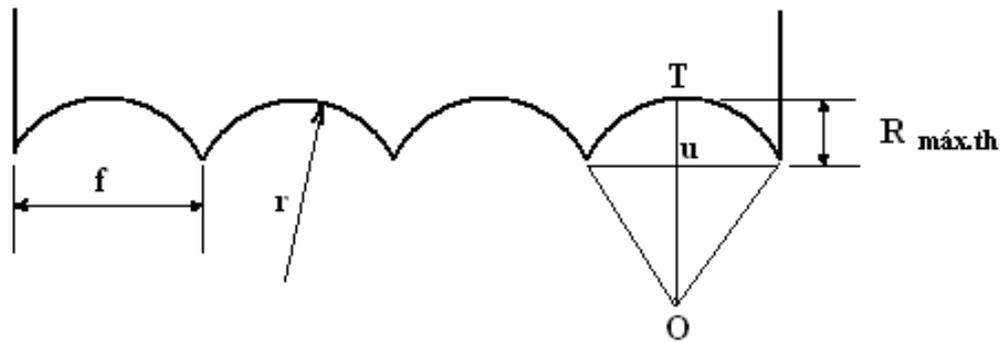
Rugosidade máxima ( $R_{m\acute{a}x.}$ ), é o maior valor das rugosidades parciais que se apresenta no percurso de medição ( $l_m$ ). A Figura 13 representa a definição de “ $R_a$ ” e “ $R_{m\acute{a}x.}$ ”, de acordo com a norma NBR 6405/1988:



**Figura 13** – Representação das rugosidades “ $R_a$ ” e “ $R_{m\acute{a}x.}$ ” (AGOSTINHO, RODRIGUES E LIRANI, 1977)

Segundo Salles; Gonçalves e Corrêa (2001), as expressões para cálculo da rugosidade teórica nas operações de torneamento, são consideradas teóricas por se tratar apenas de uma relação geométrica entre as marcas geradas pelo avanço e raio de ponta da ferramenta, não considerando os demais fatores que influenciam na geração da rugosidade de uma superfície usinada.

Segundo Diniz e Noritomi (1998) a rugosidade teórica máxima ( $R_{m\acute{a}x.th}$ ) deste perfil é a distância  $u_T$  (Figura 14), que pode ser calculada através da equação (2):



**Figura 14.** Perfil de rugosidade de uma peça torneada (DINIZ e NORITOMI, 1998).

$$R_{máx.th} = \frac{f^2}{8 \times r_\epsilon} \quad (2)$$

Onde:

$r_\epsilon$  = raio de ponta da ferramenta.

A rugosidade teórica  $R_a$ , que será chamada de  $R_{aT}$ , também pode ser calculada utilizando-se esta analogia, onde se obtém um valor aproximado para a mesma de:

$$R_{aT} = \frac{R_{máx.th}}{4} \quad (3)$$

Assim sendo:

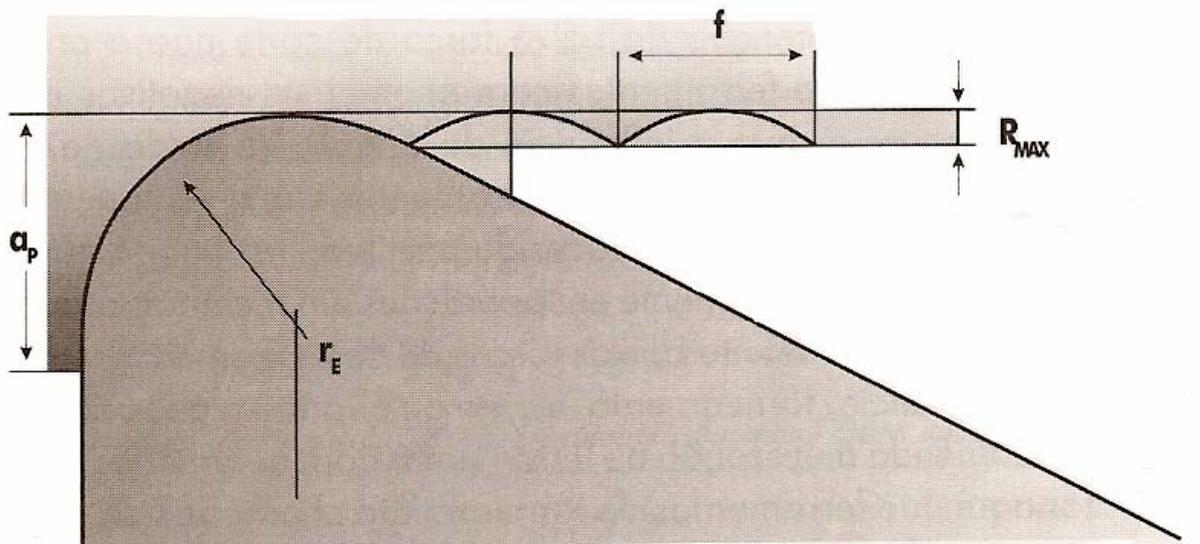
$$R_{aT} = \frac{f^2}{32 \times r_\epsilon} \quad (4)$$

Vários fatores de processo afetam a capacidade da ferramenta em manter o acabamento superficial e a tolerância na produção: faixa de avanço, raio da ponta do inserto,

velocidade de corte, material da peça, geometria de corte, desenvolvimento de aresta postiça, desenvolvimento de outros tipos de desgaste da ferramenta, material da ferramenta, controle de cavacos, profundidade de corte, fluido de corte, estabilidade, vibrações.

A relação existente entre o avanço e o raio de curvatura da ponta da ferramenta representa uma das mais importantes considerações na obtenção de um bom acabamento superficial na peça (Figura 15). Tratando-se de uma operação de acabamento, a relação entre o raio de curvatura da ferramenta e o avanço não pode ser pequena. Um raio de curvatura igual ao avanço dará origem a uma aparência de rosca na superfície da peça. Porém, uma relação ( $r_{\epsilon}/f$ ) maior que 10 origina um atrito entre uma parte da aresta lateral de corte e a peça, podendo prejudicar o acabamento superficial da mesma. Recomenda-se, no ponto de acabamento da peça (tanto para aço, como para metal duro) uma relação máxima ( $r_{\epsilon}/f$ ) = 3 (FERRARESI, 1977).

Em usinagem de acabamento, a medida da superfície acabada envolve a determinação de desvios a partir da superfície nominal. Há uma relação indireta entre a tolerância dimensional e certos parâmetros de acabamento superficial. Geralmente, valores de acabamento superficial estão dentro das tolerâncias dimensionais ao passo que, por outro lado, desvios aceitáveis dentro do acabamento excederão a tolerância dimensional (SANDVIK COROMANT, 1994).



**Figura 15** - Perfil teórico de rugosidade de uma peça torneada (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2000)

A rugosidade indica as pequenas irregularidades e os desvios microgeométricos espaçados ao longo de um comprimento da amostra na superfície. Alturas totais do perfil são mais altas do que os valores de rugosidade médios medidos. Se a tolerância dimensional for muito apertada, especialmente, nos diâmetros, surge o risco de ocorrer um conflito de limites. Se tanto a tolerância quanto os limites de acabamento superficial forem utilizados nas peças, é prática comum estabelecer os parâmetros de acabamento superficial bem abaixo da tolerância dimensional (SANDVIK COROMANT, 1994).

A velocidade de corte exerce uma grande influência sobre o acabamento de superfície, principalmente, nos metais onde há formação de aresta postiça de corte. O material depositado transitoriamente na superfície de saída da ferramenta tende a sair sob a forma de partículas, as quais aderem ao cavaco e à superfície usinada da peça. Essas partículas além de prejudicarem, sensivelmente, o acabamento superficial da peça, contribuem para o desgaste da superfície de folga da ferramenta, o qual piora ainda mais o acabamento. Aumentando-se a velocidade de corte, acima deste valor crítico, haverá aumento da temperatura de corte, que provocará uma recristalização e uma mudança de fase do material da aresta postiça. A aresta postiça perde

sua dureza, não podendo oferecer resistência às forças de usinagem. Tem-se, assim, o desaparecimento da aresta postiça com aumento da velocidade (FERRARESI, 1977).

Ângulo de posição da aresta: apresenta grande influência sobre a rugosidade da peça. Essa influência se torna somente apreciável para avanços maiores que 0,25 mm/volta. O ângulo de posição da aresta secundária, deve ser maior que  $2^\circ$  para evitar que esta raspe na peça, prejudicando o acabamento (FERRARESI, 1977).

Ângulo de saída: a diminuição do ângulo de saída aumenta a solitação da ferramenta, aumentando, em conseqüência, a temperatura de corte. Verifica-se, ainda, um aumento da rugosidade, principalmente nas baixas velocidades de corte. Com relação ao emprego do ângulo de saída negativo por exemplo, nos insertos de cerâmica, em altas velocidades de corte, tem-se verificado uma melhoria do acabamento da superfície da peça usinada, devido à estabilidade oferecida por este tipo de ferramenta.

Ângulo de folga: a influência do ângulo de folga no acabamento é muito pequena, porém, o desgaste de flanco da ferramenta é geralmente acompanhado de uma deterioração do acabamento (FERRARESI, 1977).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

O material utilizado para a realização dos ensaios foi a liga de Alumínio ASTM 7050-T74, de uso aeronáutico, obtido junto à Empresa Brasileira de Aeronáutica (EMBRAER), o qual foi entregue na forma de barras cilíndricas.

As análises para identificação da composição da liga foram feitas no laboratório de absorção atômica do Departamento de Engenharia Química da Escola de Engenharia de Lorena (EEL – USP), através de um espectrômetro de absorção atômica, marca Perkin Elmer e modelo Analyst 800, utilizando-se a atomização por chama, os resultados estão apresentados na Tabela 1, juntamente com a referência da ASM.

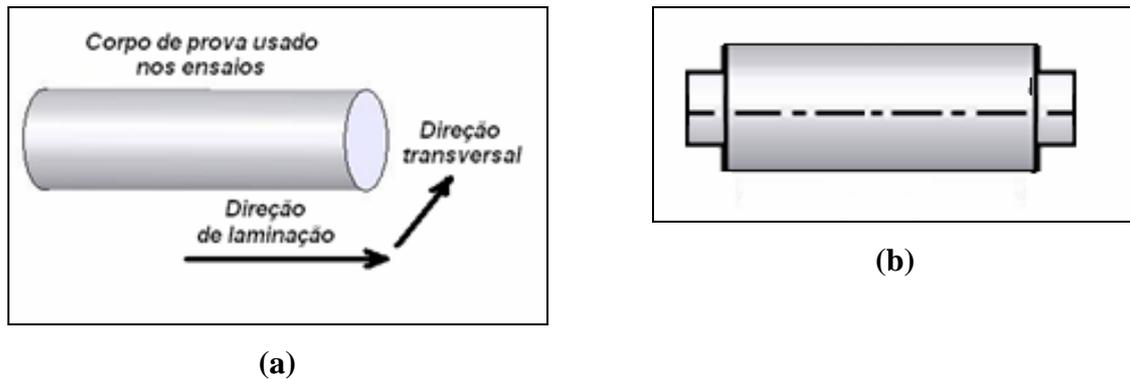
**Tabela 1** - Composição química da liga de alumínio AA 7050-T74

	Zn %	Ti %	Mg %	Cu %	Zr %	Fe %	Mn %	Cr %	Si %
<b>Especificação do AA 7050</b>	5,7	0,06	1,9	2	0,08	0,15	0,1	0,04	0,12
	a	Máx.	a	a	a	Máx.	Máx.	Máx.	Mín.
	6,7		2,6	2,6	0,15				
<b>ENCONTRADO</b>	6,2	0,06	1,47	2,28	0,1	0,08	0,013	0,015	0,39

(Metals Handbook, 1989)

##### 3.1.1 Corpos-de-Prova

Os corpos-de-prova, em número de 37 no total, foram preparados na oficina mecânica do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT - UNESP), através do corte de uma barra cilíndrica com auxílio de uma serra mecânica e posterior torneamento desta barra redonda, a fim de transformá-lo num cilindro conforme mostrado na Figura 16.



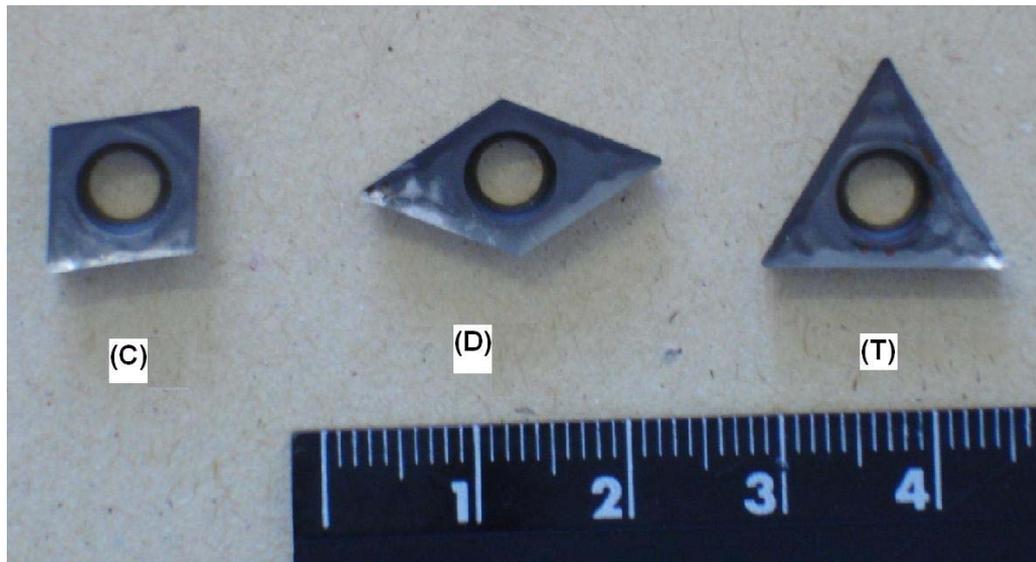
**Figura 16** - Representação dos corpos-de-prova: (a) formato inicial e (b) formato final.

Após o torneamento em tornos convencionais do departamento (FEG - UNESP) os corpos-de-prova ficaram com formato, como indicado na Figura 16.b, tendo as suas duas extremidades rebaixadas para fixação na placa do torno CNC. Os diâmetros iniciais dos corpos-de-prova ( $D$ ) variaram entre 22 e 37 mm e seus comprimentos ( $L$ ) de 200 a 310 mm.

### 3.1.2 Ferramentas de Corte

Para os ensaios foram utilizados três tipos de pastilhas intercambiáveis (Figura 17) e seus respectivos suportes, os parâmetros recomendados pelo fabricante constam do Quadro 5:

- metal duro sem cobertura de geometria CCGX 09T304-AL Classe Sandvik H10 (ISO N10) e com seu respectivo suporte SCLCR 2020K09, ângulo de posição  $95^\circ$ , denominada a partir de agora de Ferramenta “C”;
- metal duro sem cobertura de geometria DCGX 11T304-AL Classe Sandvik H10 (ISO N10) e com seu respectivo suporte SDJCR 2020K11, ângulo de posição  $93^\circ$ , denominada a partir de agora de Ferramenta “D”;
- metal duro sem cobertura de geometria TCGX 16T304-AL Classe Sandvik H10 (ISO N10) e com seu respectivo suporte STGCR 2020K16, ângulo de posição  $91^\circ$ , denominada a partir de agora de Ferramenta “T”.



**Figura 17** – Foto das ferramentas utilizadas nos ensaios de torneamento

**Quadro 5** – Condições de corte recomendadas (SANDVCK, 2002)

<b>Ferramenta</b>	<b>Profundidade (mm)</b>	<b>Avanço (mm/volta)</b>	<b>Velocidade de corte (m/min)</b>
Ferramenta C	0,5 a 5,0		
Ferramenta D	0,5 a 5,5	0,10 a 0,30	250 a 2500
Ferramenta T	0,5 a 7,0		

### 3.1.3 Fluido de Corte

Nos ensaios foi utilizado um fluido de corte desenvolvido para atender às operações de usinagem para metais ferrosos e ligas de alumínio, o TAPMATIC – tipo ME-1. Este fluido consiste de uma microemulsão de concentração 5 a 10% em água, conforme necessidade operacional; no caso foi utilizada uma concentração de 10%. Contém, em sua composição uma mistura de óleos minerais, ésteres, amidas bóricas, tensoativos, biocidas e antiespumantes.

## 3.2 EQUIPAMENTOS

### 3.2.1 Máquina-Ferramenta

Torno CNC (Figura 18), marca Romi, modelo Centur 30S, comando MACH 9, rotação máxima 3500 RPM, potência de 7,5 CV, do Laboratório de Estudo da usinagem (Universidade Estadual Paulista - UNESP-Guaratinguetá).



**Figura 18** – Torno CNC utilizado.

### 3.2.2 Rugosímetro

Rugosímetro portátil Surftest 301 da Mitutoyo, com apalpador mecânico tipo estilete e raio de ponta de 5  $\mu\text{m}$ , conforme a Figura 19.



**Figura 19** - Rugosímetro portátil utilizado

### 3.2.3 Microscópio Óptico

Microscópio óptico metalúrgico da marca NIKON, conforme a Figura 20, modelo EIPHOT 200 com aumento de 50x, acoplado a um software de análise de imagens.



**Figura 20** – Microscópio Óptico utilizado.

### 3.2.4 Instrumentos de Medição

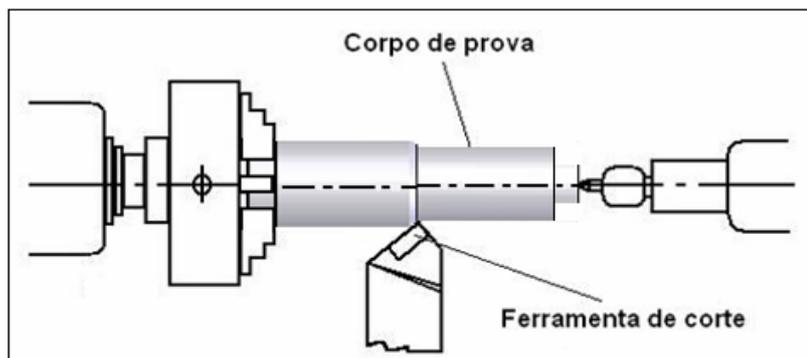
Para as medidas do diâmetro e comprimento dos corpos-de-prova foram utilizados os seguintes equipamentos:

- micrômetro Mitutoyo de 25 a 50 mm/0,01mm (UNESP);
- micrômetro digital Mitutoyo de 0 a 25 mm/0,01mm (UNESP);
- paquímetro digital Mitutoyo de 0 a 150 mm/0,05mm (UNESP); e
- paquímetro Mitutoyo de 0 a 200 mm/0,05 (UNESP).

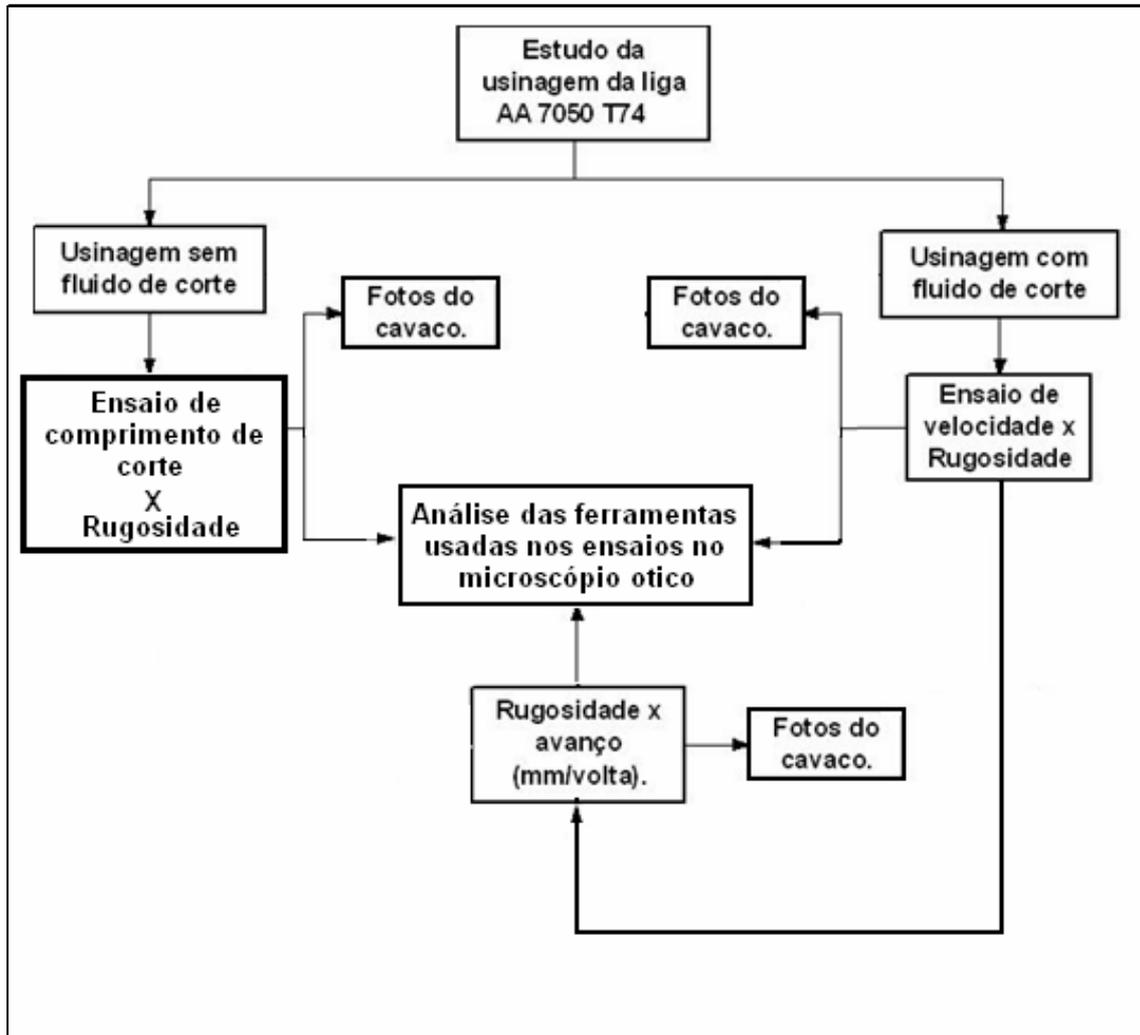
### 3.3 METODOLOGIA DOS TESTES

Foram realizados ensaios de torneamento cilíndrico externo (Figura 21), com parâmetros de usinagem típicos de acabamento (baixos valores de avanço e profundidade de usinagem). Como parâmetros iniciais foram utilizados dados do catálogo do fabricante das ferramentas de corte utilizadas (Quadro 5).

No fluxograma representado na Figura 22, são apresentados os procedimentos de ensaio adotados para o estudo da usinagem da liga AA7050 - T74 e análise dos resultados.



**Figura 21** - Esquema do ensaio de torneamento cilíndrico externo de acabamento



**Figura 22** - Fluxograma dos ensaios de usinagem da liga AA 7050-T74

### 3.3.1 Ensaios de Medição de Rugosidade com Variação da Velocidade de Corte

Para os ensaios de medição de rugosidade com variação da velocidade de corte foram utilizados os valores de velocidade de corte ( $v_c$ ) de 100, 250, 350 m/min, com ferramentas de metal duro “C”, “D” e “T”, avanço ( $f$ ) de 0,2 mm/volta e profundidade de usinagem ( $a_p$ ) de 1,5 mm com a utilização de fluido de corte. Os valores de velocidade de corte escolhidos, o foram em função das dimensões originais dos cdps, as quais não permitiam a utilização de velocidades mais elevadas, em função do limite de rotação da máquina (3.500 rpm).

Após cada operação de usinagem foram colhidas amostras, do cavaco e da ferramenta usada nos testes. Usando um microscópio óptico, já apresentado no item 3.2.3, fez-se uma análise dos desgastes das ferramentas nas operações de torneamento.

Em relação aos ensaios comparativos com e sem a utilização de fluido de corte, os testes somente foram realizados para a velocidade de corte  $v_c = 350$  m/min, mantendo-se o avanço de 0,2 mm/volta e profundidade de 1,5 mm.

Em todas as ocasiões foi medida a rugosidade da peça, para tanto foram utilizados os parâmetros Rugosidade Média ( $R_a$ ) e Rugosidade Máxima ( $R_y$ ), segundo a indicação do fabricante do rugosímetro, que define “ $R_y$ ” como sendo a altura máxima do perfil de rugosidade apresentado (MITUTOYO, 1999). Esta medição foi feita periodicamente, sempre que se parava a máquina para examinar o desgaste da ferramenta e colher os cavacos, o cdp era retirado e colocado na bancada para a medição da rugosidade em três pontos diametralmente opostos. Os gráficos a respeito dos valores de rugosidade foram obtidos a partir das tabelas apresentadas no Apêndice A.

### **3.3.2 Análise do Desgaste das Ferramentas**

A análise dos desgastes sofridos pela ferramenta foi feita em um microscópio ótico (item 3.2.3), com auxílio do *software* “IMAGE J”, escolhido porque faz uma análise detalhada das imagens, o que possibilitou contornar o problema de diferença de relevo na ferramenta e, conseqüentemente, a diferença de foco por ele gerada. As fotos foram feitas para a mesma região, porém, em diferentes profundidades de foco, logo após foram empilhadas, para que por meio de um “*plugin*” do programa de análise de imagens chamado “*extend deph of focus*” fossem selecionadas as regiões de melhor foco, criando com esta técnica uma única imagem que representa toda a topografia da ferramenta.

### **3.3.3 Ensaio de Medição de Rugosidade com Variação do Avanço**

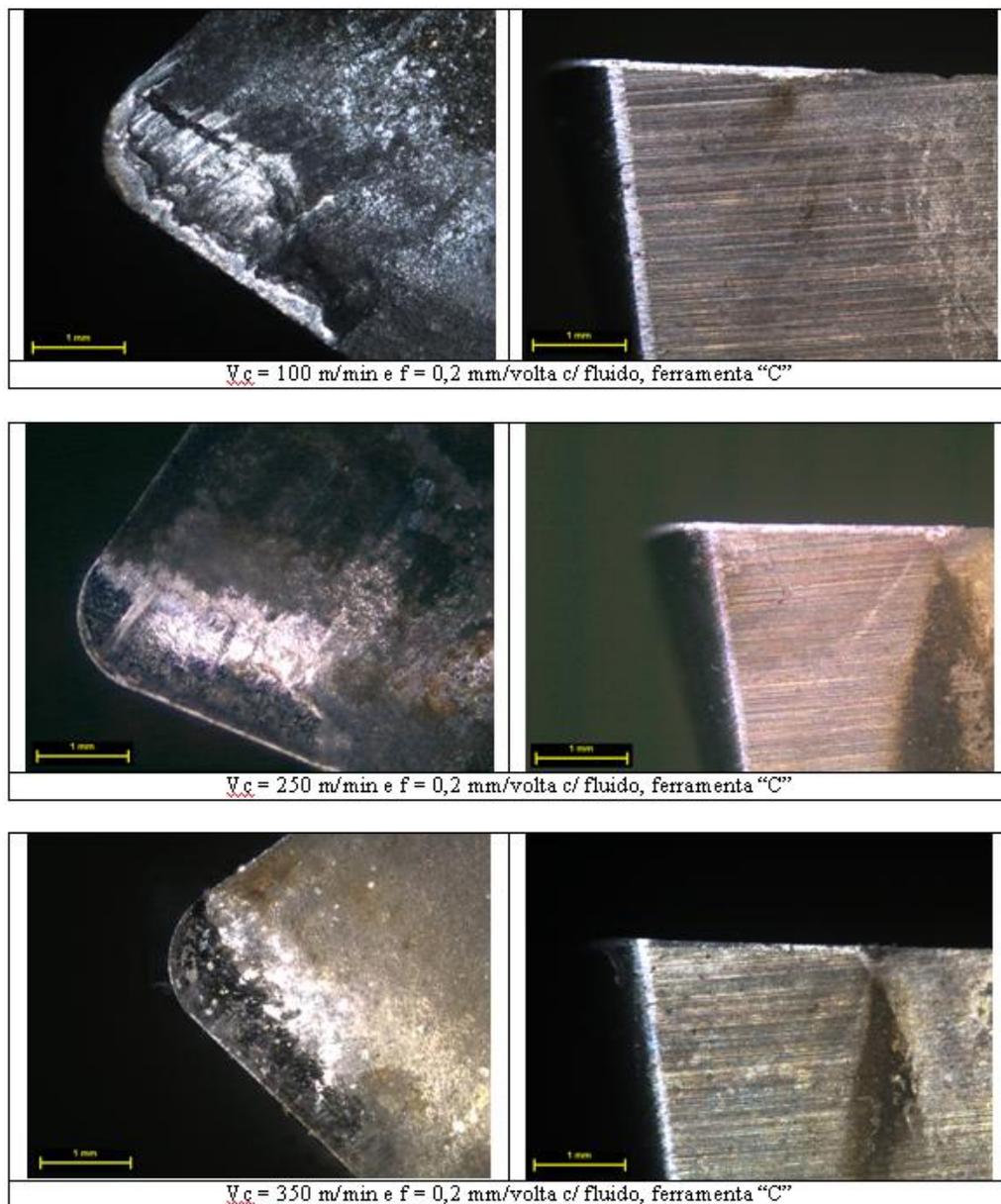
Para os ensaios de medição de rugosidade com variação de avanço foram utilizados os valores de avanço  $f = 0,1$  e  $0,2$  mm/volta, utilizando assim um valor do extremo e outro no meio da faixa de avanços recomendada (Quadro 5), com ferramentas de metal duro “C”, “D” e “T”, com velocidade de corte (350 m/min) e profundidade de usinagem (1,5 mm). Após cada operação de usinagem a ferramenta e o cavaco foram analisados no microscópio óptico (item 3.2.3), para verificação do desgaste da ferramenta e do tipo de cavaco gerado, o registro desse processo foi feito por meio de foto com a sua forma final.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

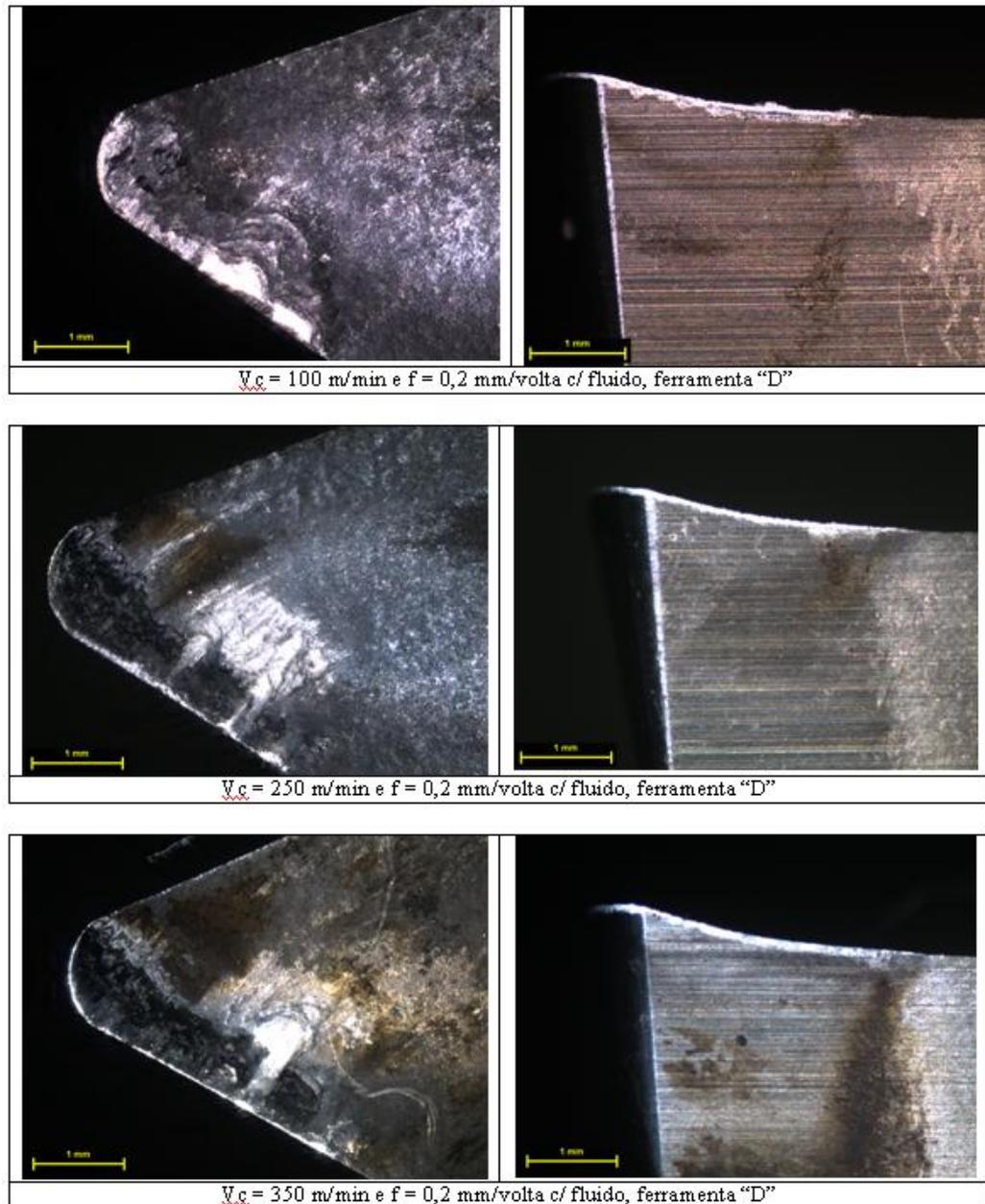
### 4.1 COMPARAÇÃO DAS FERRAMENTAS EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE

#### 4.1.1 Análise das Ferramentas

As ferramentas após os testes com utilização de fluido de corte, foram fotografadas no final do ensaio, através de microscopia óptica e as mesmas são apresentadas a seguir (Figuras 23, 24 e 25).



**Figura 23** - Ferramentas "C", utilizadas para diferentes velocidades de corte.

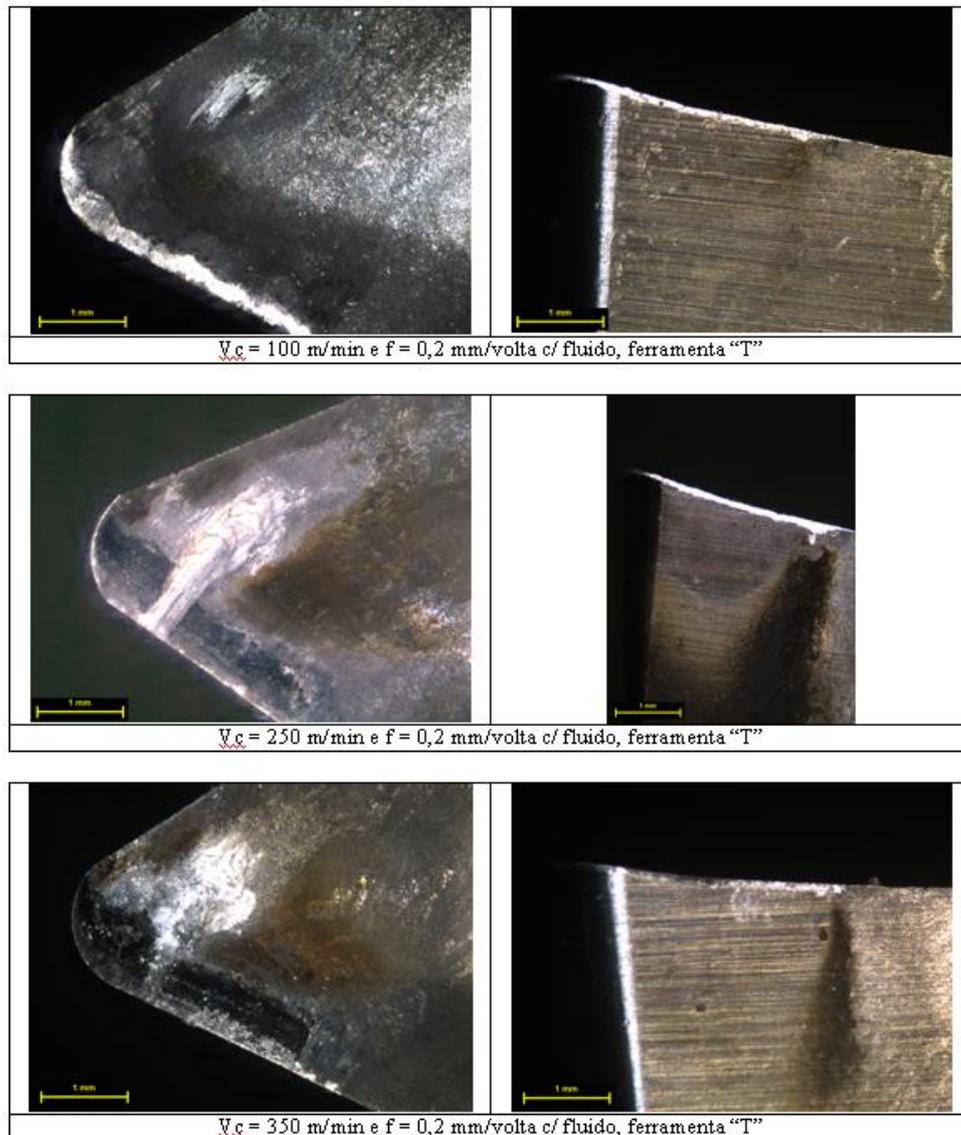


**Figura 24** - Ferramentas "D", utilizadas para diferentes velocidades de corte.

Nota-se uma maior deposição de material na aresta de corte para as velocidades de 100 m/min além da presença de uma aresta postiça de corte ainda incipiente, a qual tende a ocorrer em baixas velocidades.

Para todas as ferramentas testadas ocorre uma diminuição visível dos níveis de deposição na aresta de corte quando da mudança de velocidade de 100 para 250 m/min e, nota-se, para velocidades de 350 m/min, que as arestas de corte encontram-se, praticamente,

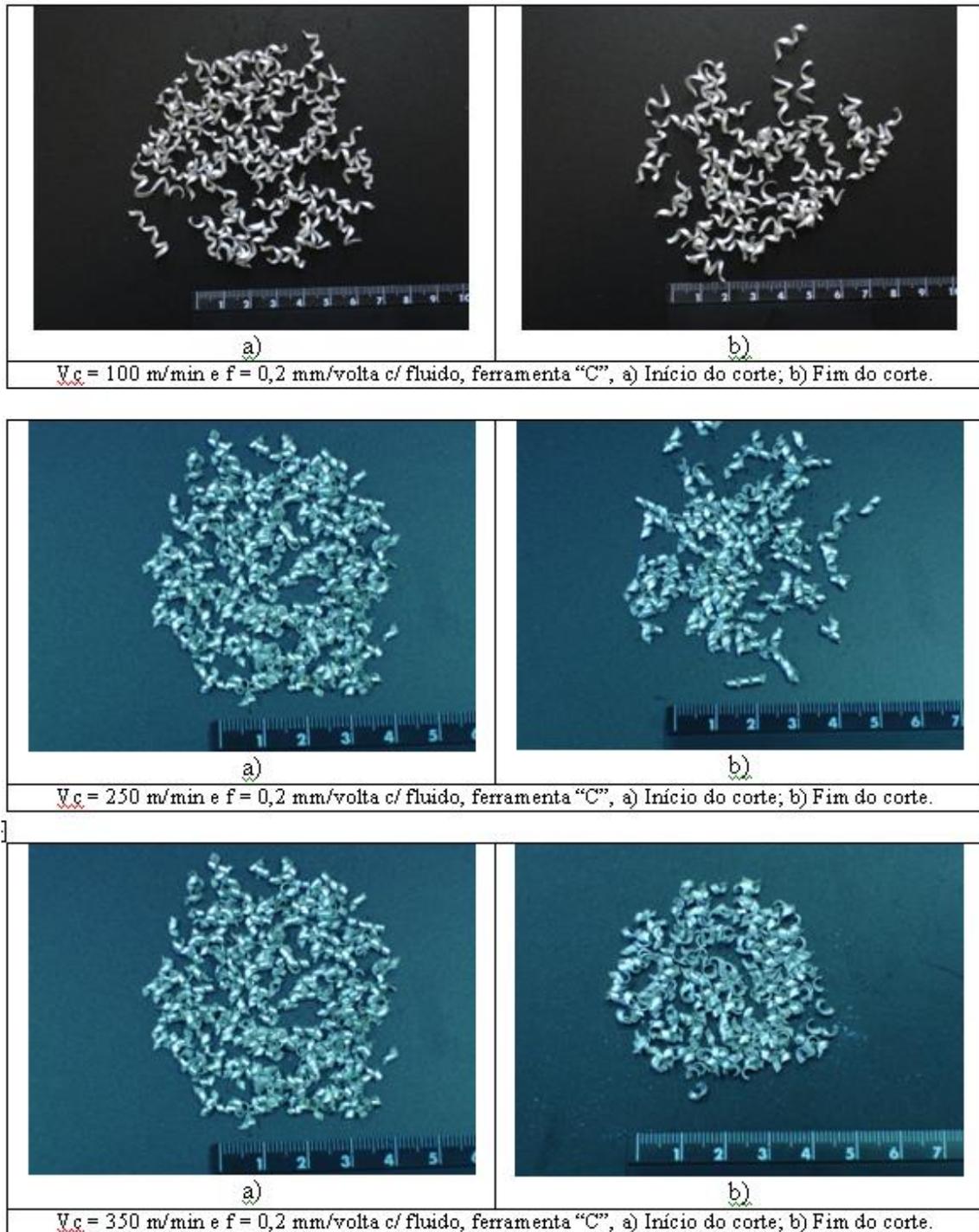
intactas o que contribui para maior eficiência na operação de corte com as ferramentas testadas.



**Figura 25** - Ferramentas "T", utilizadas para diferentes velocidades de corte.

#### 4.1.2 Análise dos Cavacos

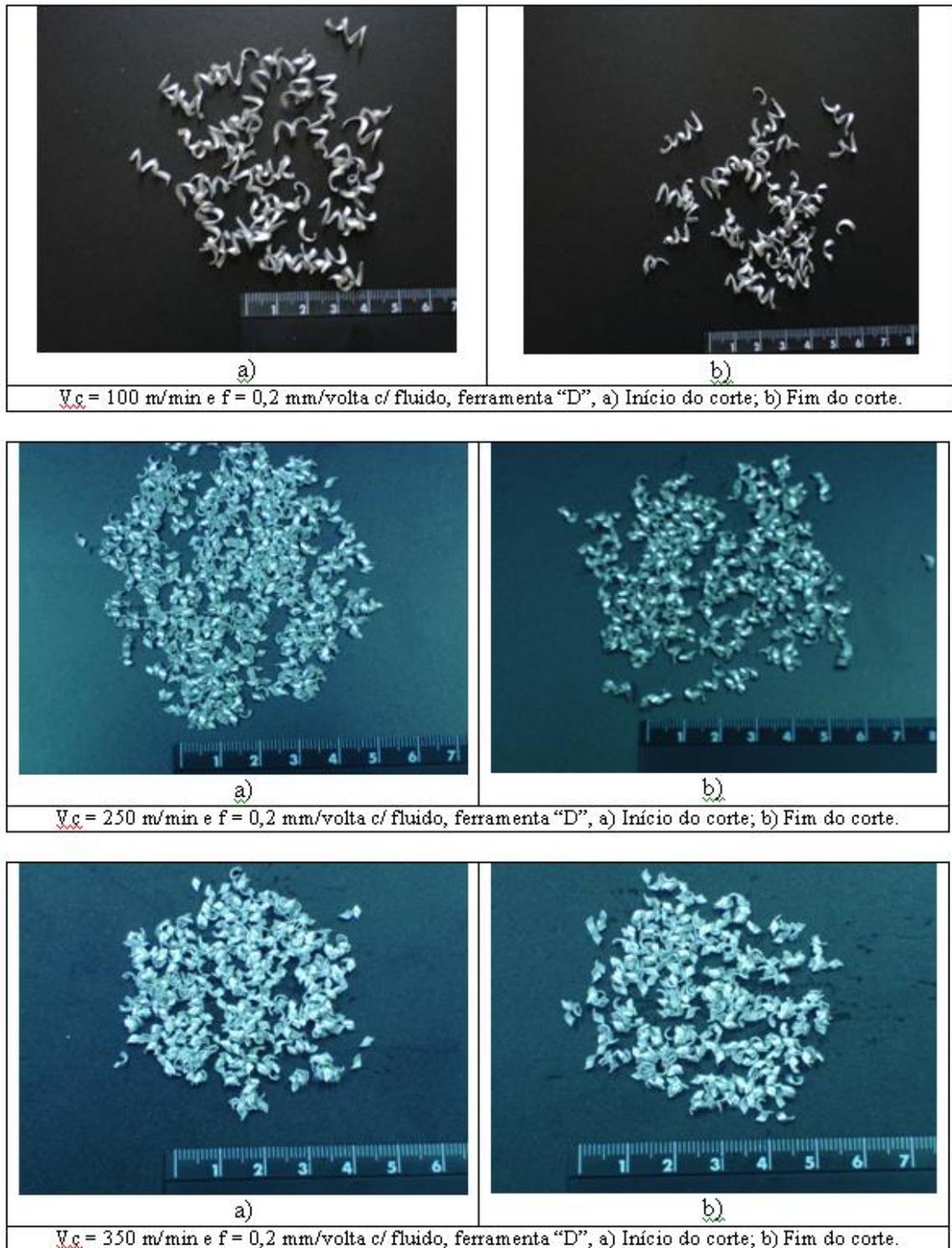
Amostras dos cavacos obtidos nos testes foram fotografadas com uma câmera digital e as mesmas são apresentadas a seguir (Figuras 26, 27 e 28).



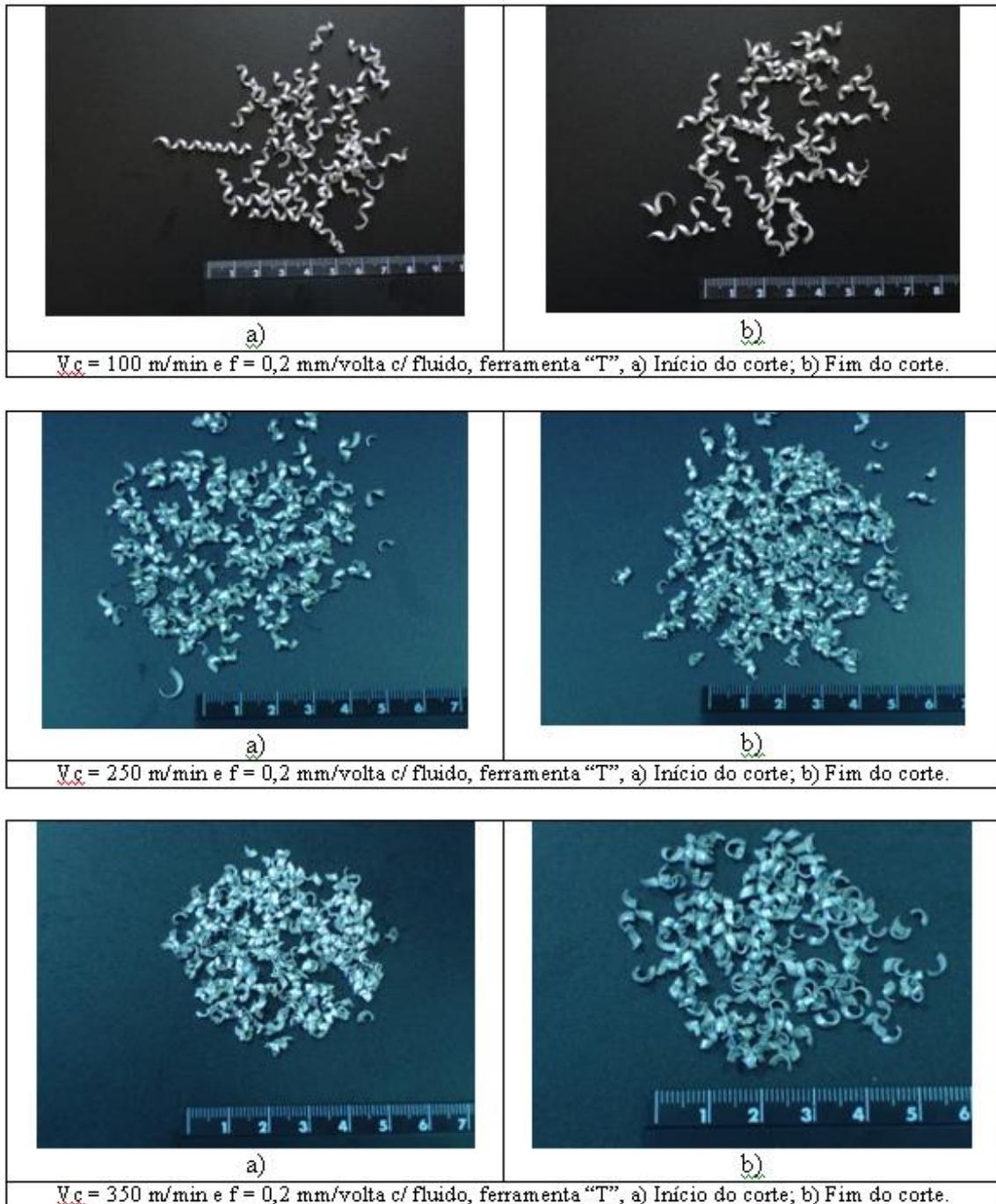
**Figura 26** - Cavacos obtidos com a ferramenta de corte "C", para diferentes velocidades de corte.

Há um pequeno decréscimo no tamanho dos cavacos com o aumento da velocidade, possivelmente em virtude do aumento na taxa de deformação que leva a um encruamento mais acentuado, fazendo com que o cavaco sofra uma quebra prematura, fato também, observado por Cunha (2004). Nota-se uma tendência do cavaco ser mais curto no início da

vida da ferramenta, aumentando um pouco seu tamanho ao final dos testes, possivelmente em função da pequena perda de afiação da aresta de corte da ferramenta.



**Figura 27** - Cavacos obtidos com a ferramenta de corte "D", para diferentes velocidades de corte.

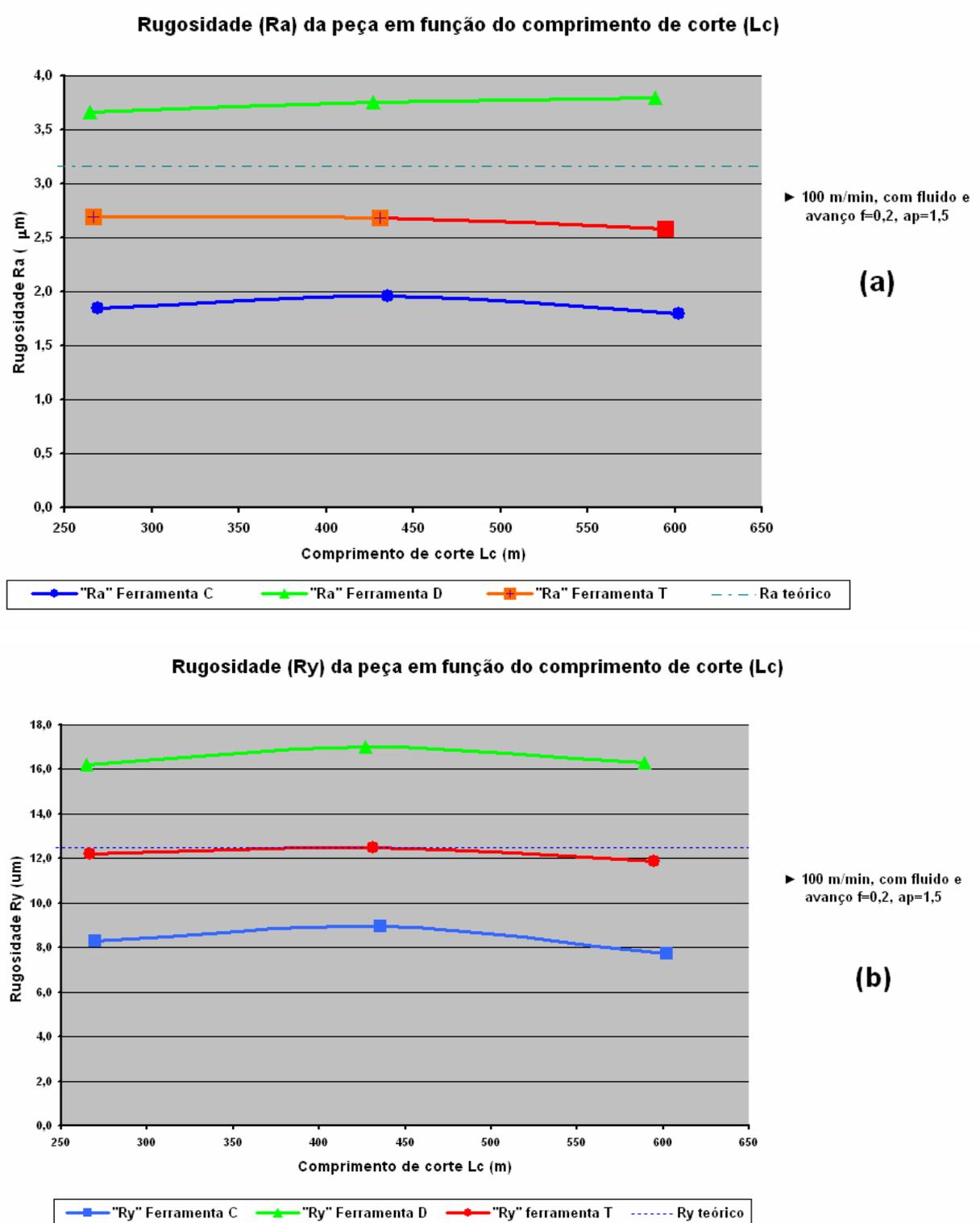


**Figura 28** - Cavacos obtidos com a ferramenta de corte "T", para diferentes velocidades de corte.

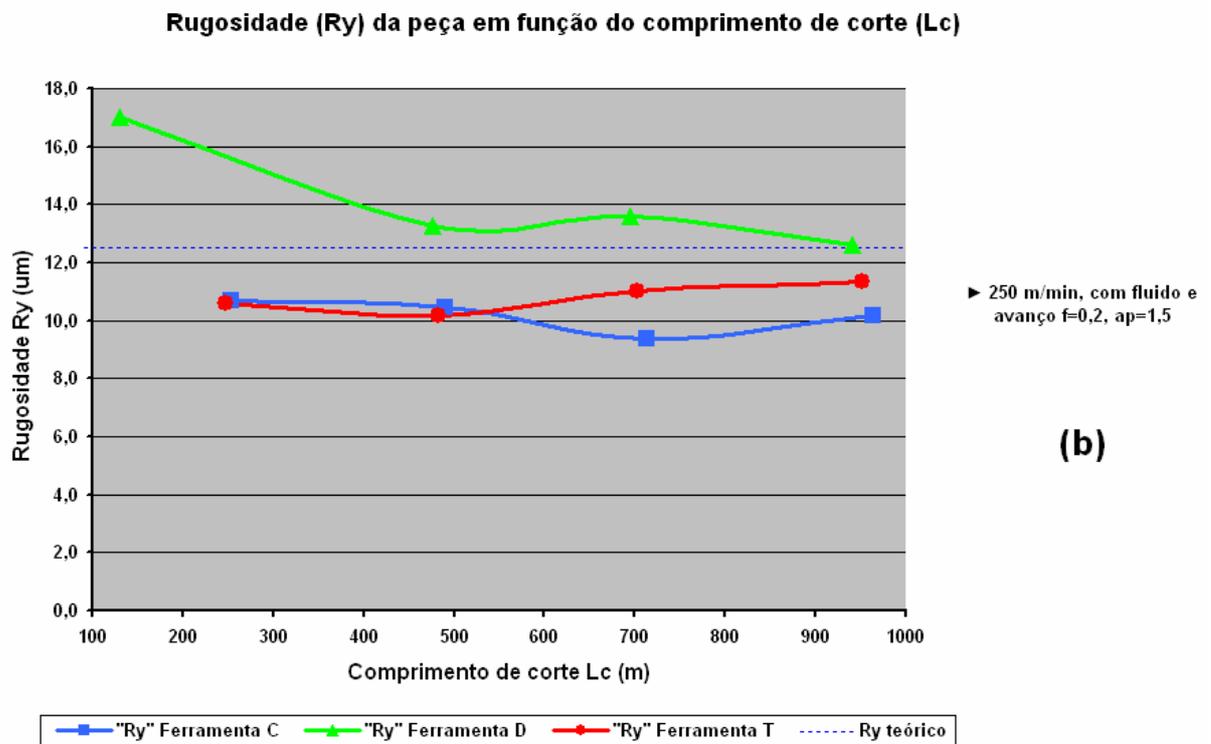
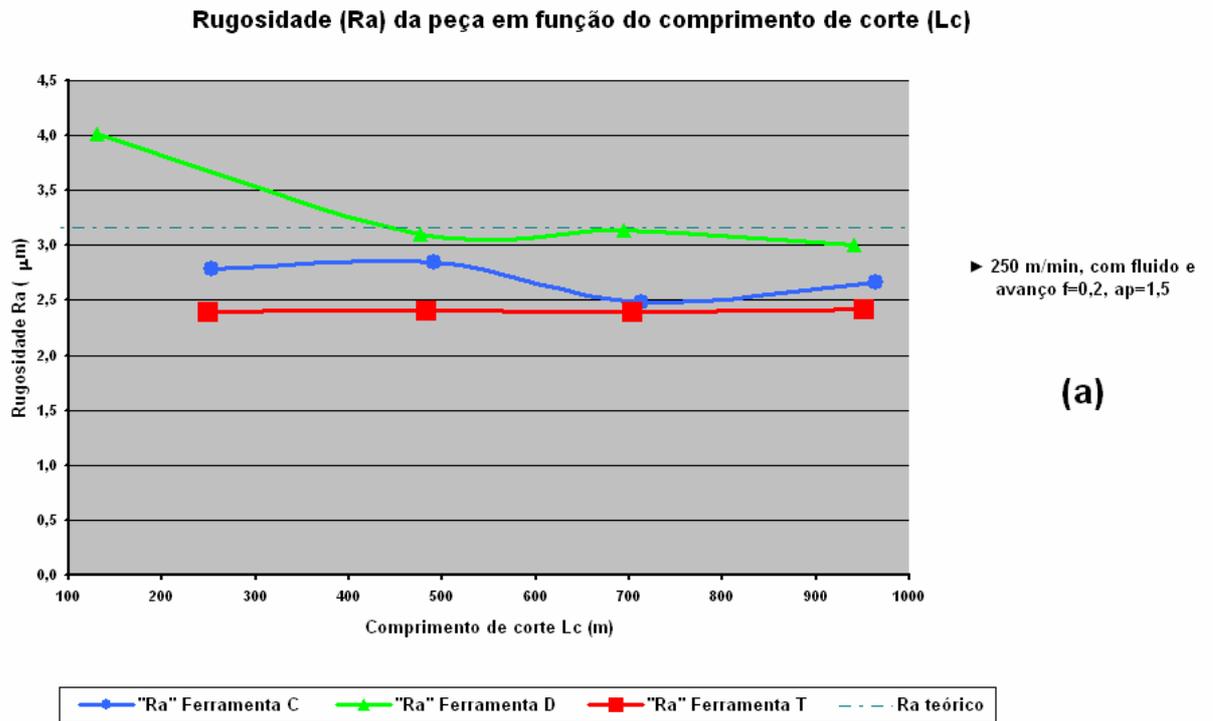
#### 4.1.3 Análise da Variação de Rugosidade "Ra" e "Ry" em Função da Velocidade

Após a realização dos ensaios com as três ferramentas utilizadas nas três diferentes velocidades de corte, com a utilização de fluido de corte, os valores de rugosidade medidos durante os ensaios foram agrupados em gráficos (Figuras 29, 30 e 31). Estes permitem a

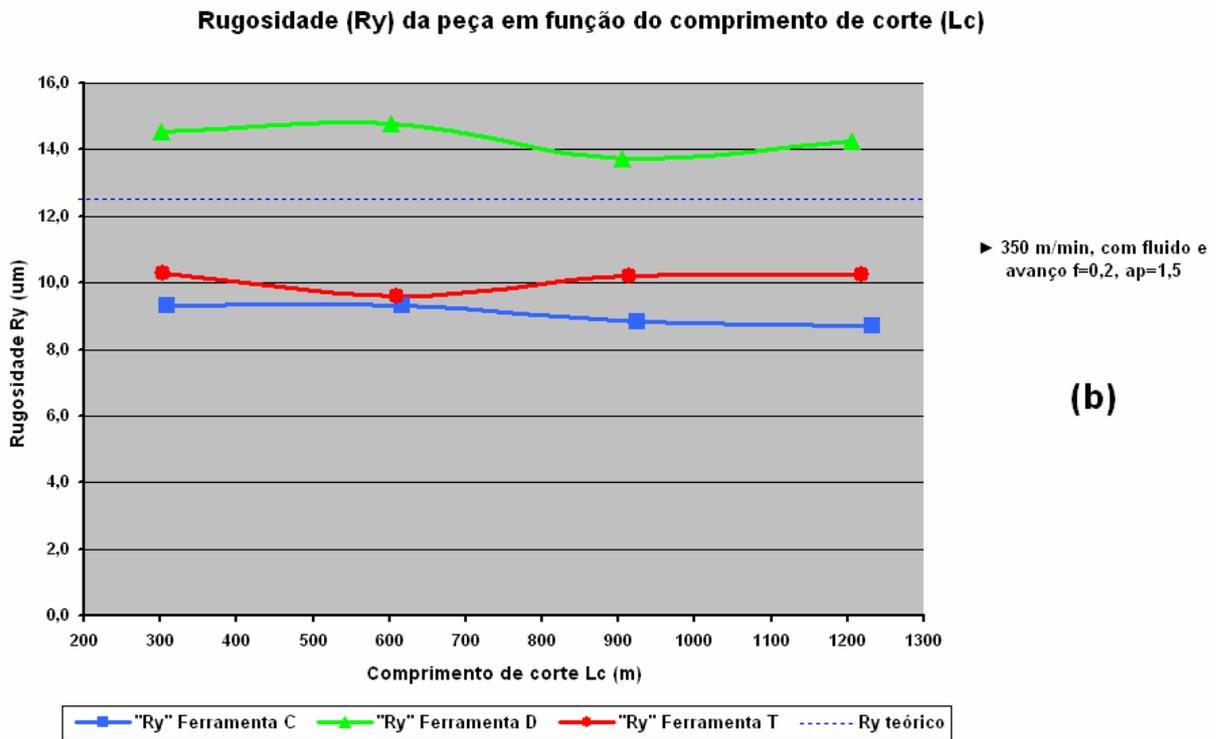
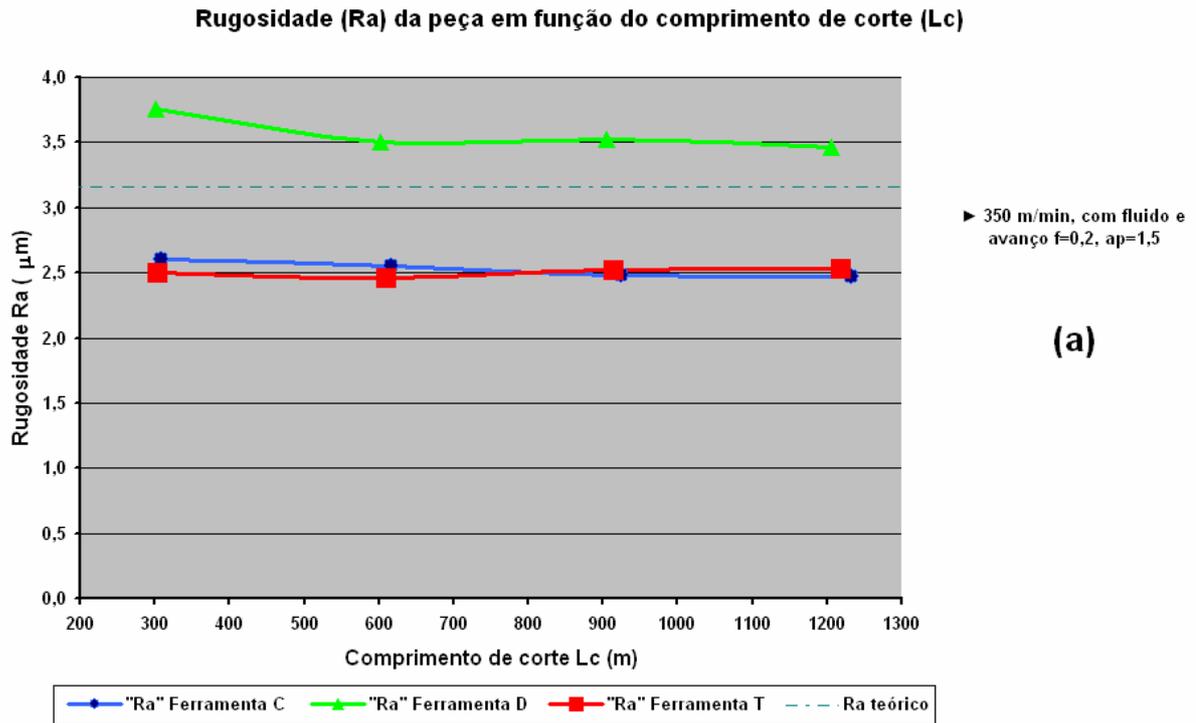
observação da variação da rugosidade para cada uma das velocidades utilizadas, possibilitando a comparação do desempenho das três ferramentas para cada situação de teste.



**Figura 29** - Gráficos das rugosidades Ra (a) e Ry (b) obtidas com o uso da velocidade de corte de 100 m/min (ferramentas "C", "D" e "T")



**Figura 30** - Gráficos das rugosidades Ra (a) e Ry (b) obtidas com o uso da velocidade de corte de 250 m/min (ferramentas "C", "D" e "T")



**Figura 31** - Gráficos das rugosidades Ra (a) e Ry (b) obtidas com o uso da velocidade de corte de 350 m/min (ferramentas "C", "D" e "T")

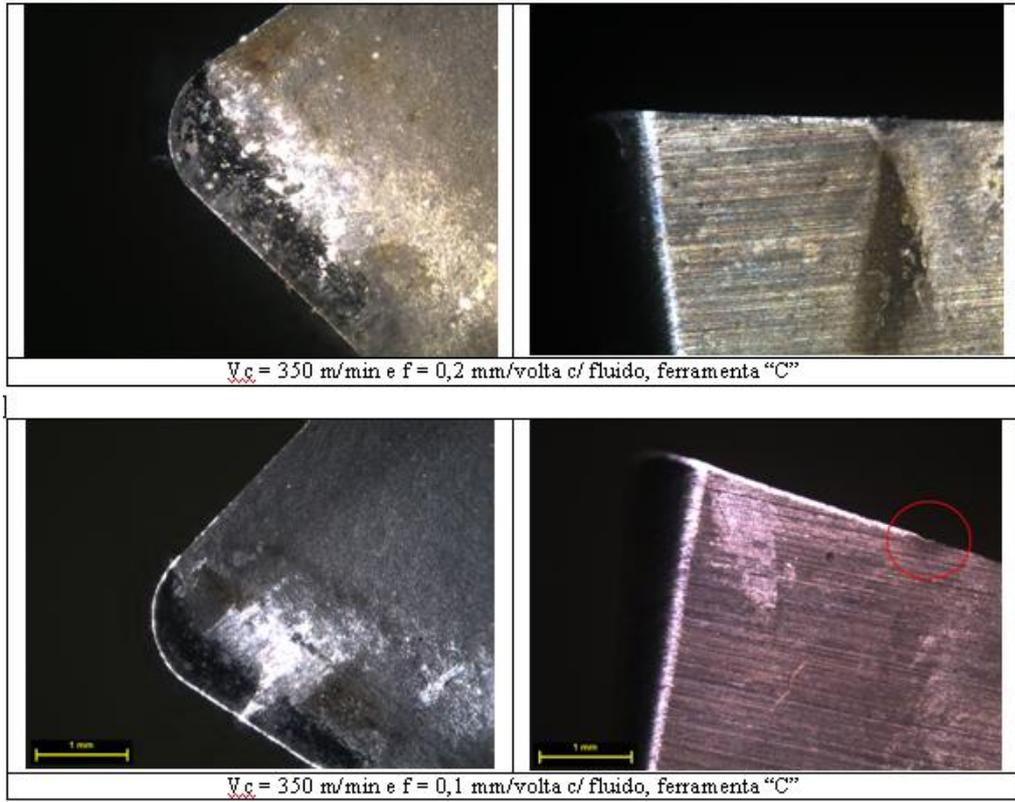
Em função dos gráficos apresentados é possível verificar que duas ferramentas (“C” e “T”) tiveram um desempenho muito próximo para as velocidades utilizadas, as diferenças encontradas foram tão pequenas que fica difícil diferenciar o comportamento de uma e de outra em alguns casos. Quanto à outra ferramenta (“D”) em todas as situações apresentou valores de rugosidade superiores aos das outras ferramentas, o que foi um diferencial constante.

Com o aumento da velocidade de corte, em alguns casos houve um aumento nos valores de rugosidade, talvez em função da dificuldade em se cortar o material por causa de um possível aumento na temperatura. Destacam-se os valores de rugosidade “Ra” e “Ry” obtidos para a ferramenta “C” a 100 m/min, que se apresentaram menores que os demais, fato este que pode estar relacionado com o desgaste menos acentuado da sua aresta de corte, comparativamente, às outras ferramentas testadas para a mesma condição, ou seja, a ferramenta manteve a integridade da sua aresta de corte, o que refletiu na qualidade da superfície gerada.

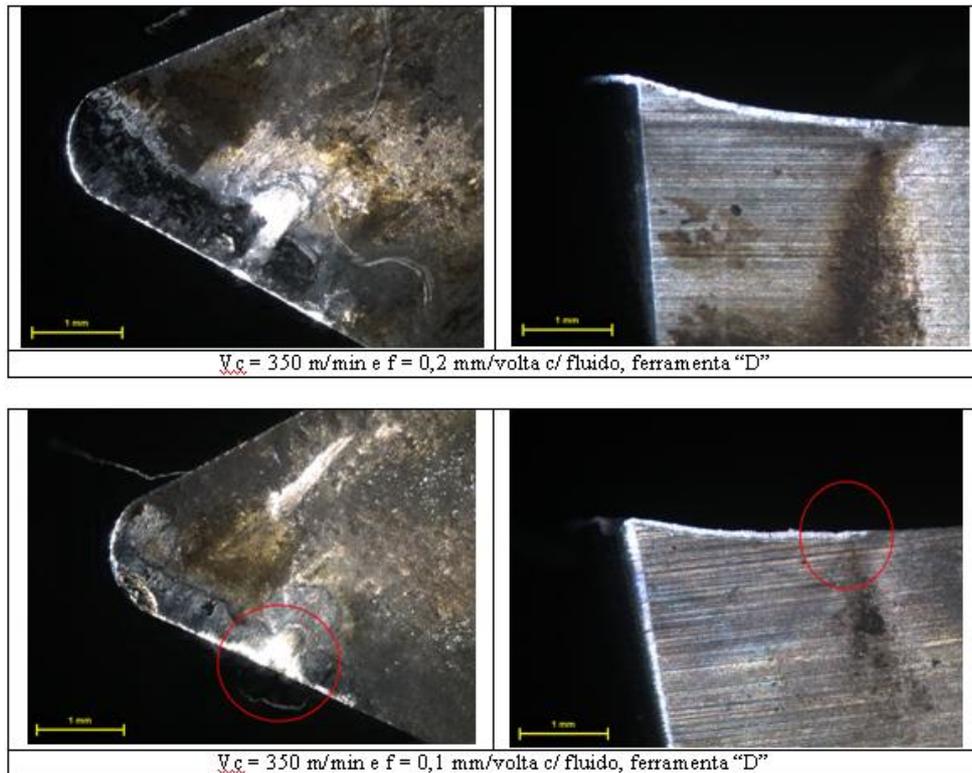
## 4.2 COMPARAÇÃO DAS FERRAMENTAS VARIANDO-SE O AVANÇO

### 4.2.1 Análise das Ferramentas

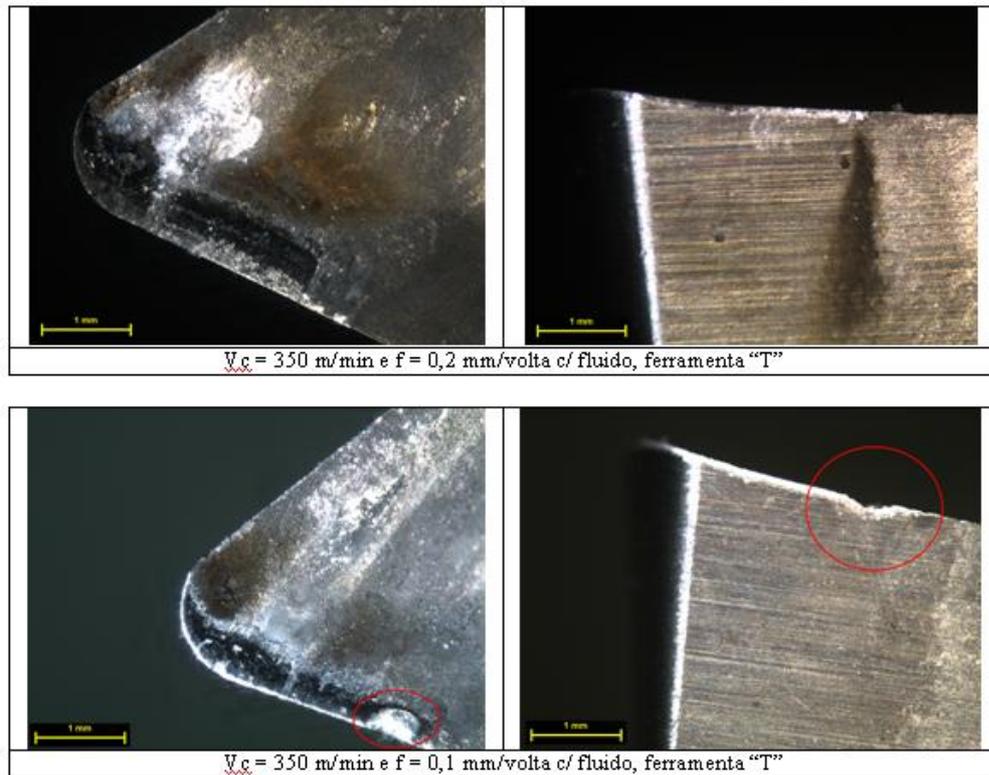
Após os testes com variação de avanço e utilização de fluido de corte, para a velocidade de 350 m/min, foram fotografadas as ferramentas com o auxílio de um microscópio óptico (Figuras 33, 33 e 34).



**Figura 32** - Ferramentas "C", utilizadas para diferentes avanços.



**Figura 33** - Ferramentas "D", utilizadas para diferentes avanços.

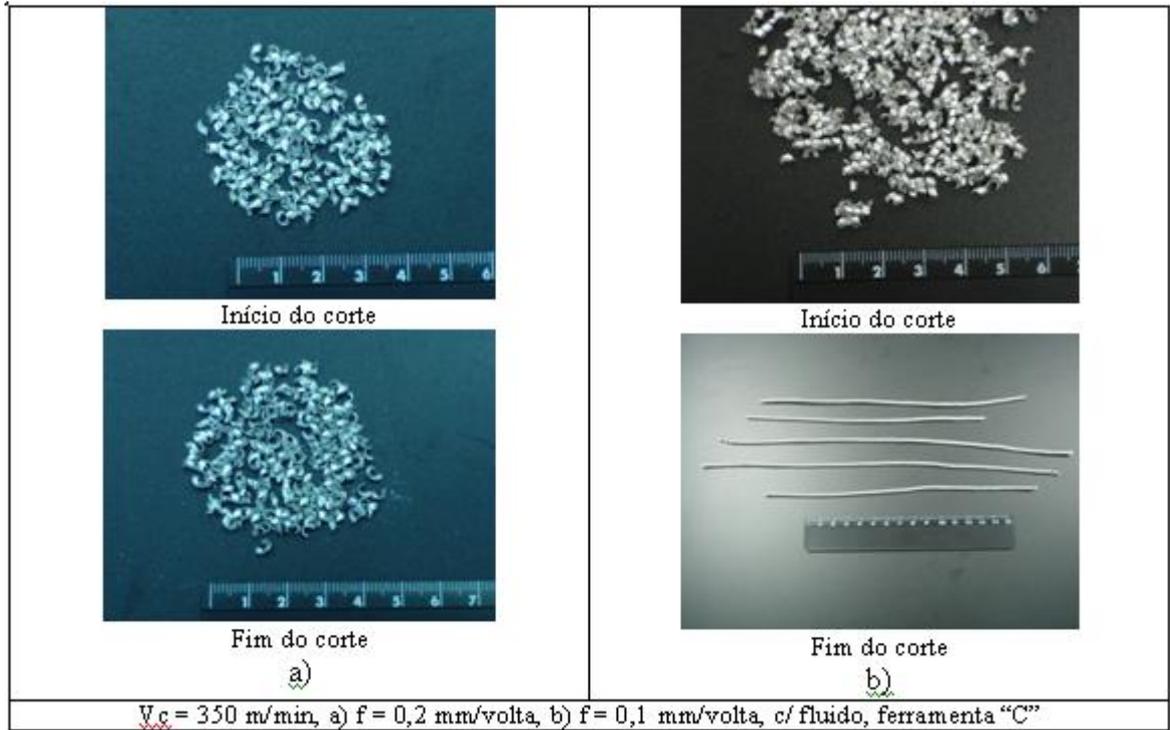


**Figura 34** - Ferramentas “T”, utilizadas para diferentes avanços.

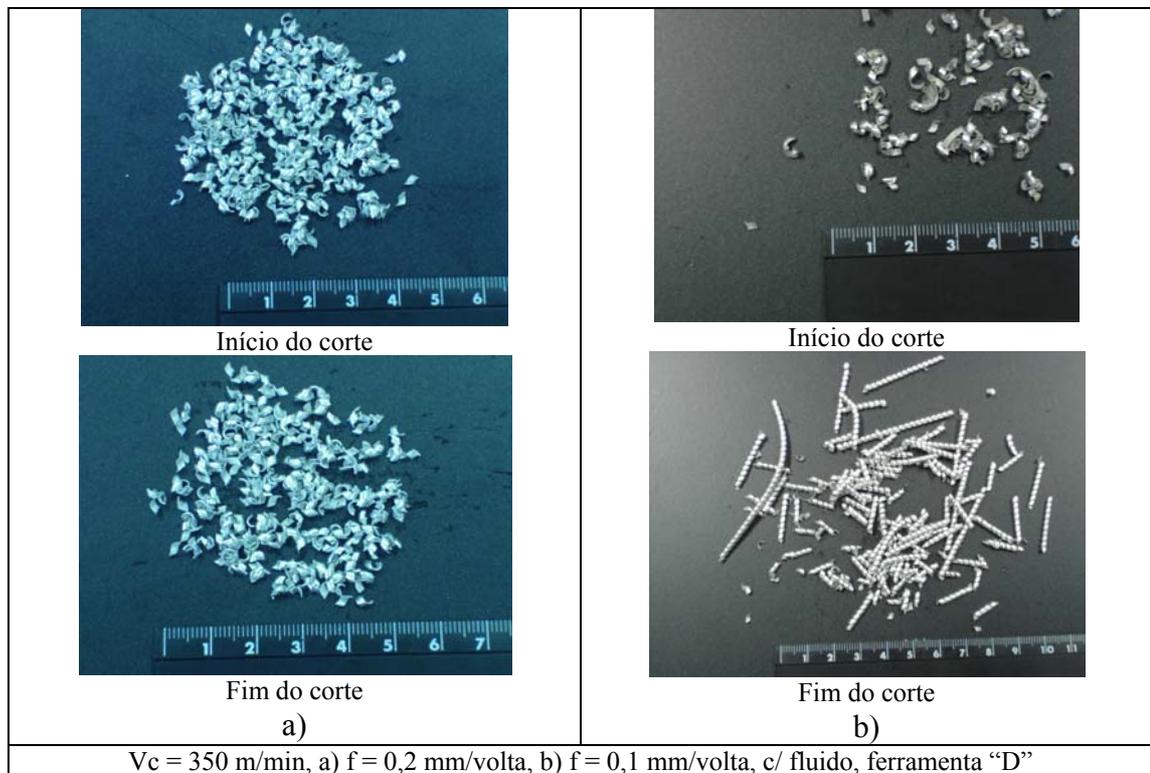
Observa-se em todas as ferramentas testadas, um entalhe na aresta de corte, de maneira mais acentuada nas ferramentas “T” e menos para as ferramentas “D” e “C”. Provavelmente, este fato está relacionado com a diminuição do avanço, o que leva a um aumento da pressão específica de corte “ $K_s$ ” e um aumento no coeficiente de atrito, devido a menor velocidade de avanço, ocasionando, conseqüentemente, uma possível elevação na temperatura e o aparecimento de entalhes na aresta de corte. Haja vista o mecanismo de desgaste por entalhe ser incentivado pelo aumento na temperatura (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2002).

#### 4.2.2 Análise dos Cavacos

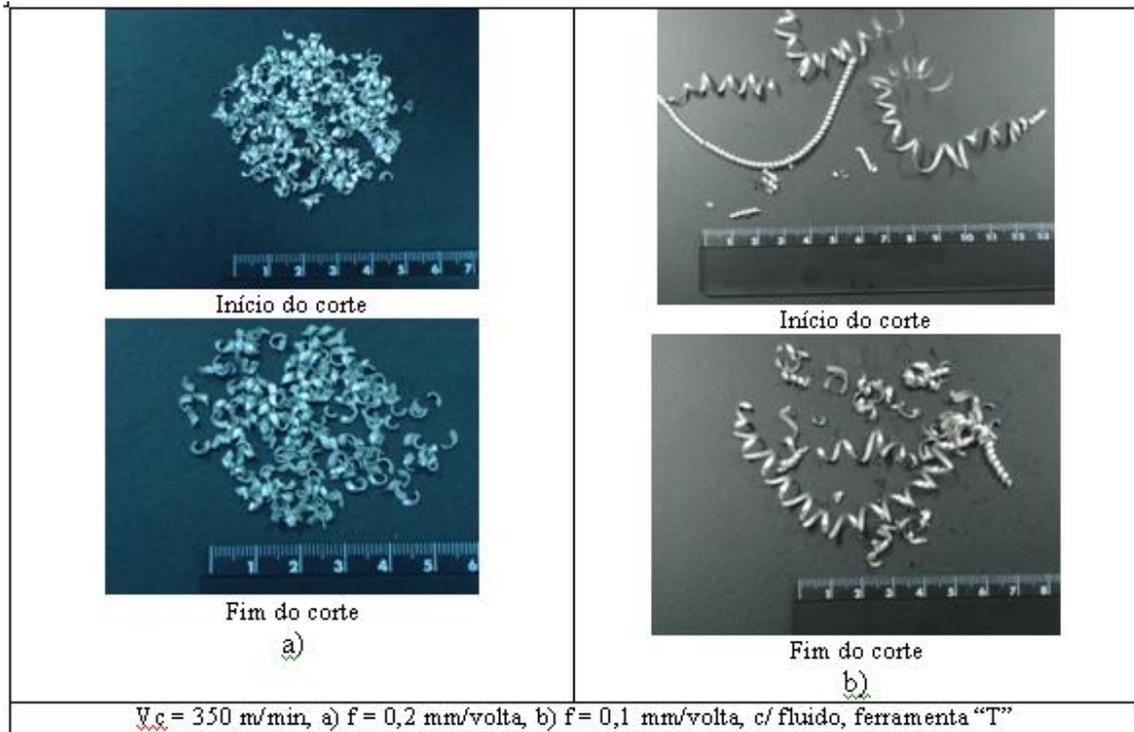
As amostras de cavaco obtidas nos ensaios com variação de avanço foram fotografadas digitalmente e apresentadas a seguir (Figuras 35, 36 e 37).



**Figura 35** - Cavacos obtidos com a ferramenta de corte "C", para diferentes avanços.

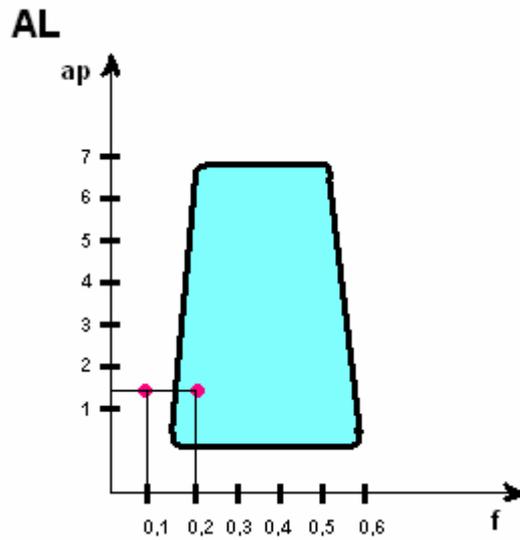


**Figura 36** - Cavacos obtidos com a ferramenta de corte "D", para diferentes avanços.



**Figura 37** - Cavacos obtidos com a ferramenta de corte "T", para diferentes avanços.

Em função da diminuição do avanço o quebra-cavaco não pode ser utilizado na sua melhor região de aplicação (Figura 38), por isso, só no início do corte a aresta teve condições de realizá-lo de forma mais efetiva quebrando o cavaco. Portanto, quando se observa a imagem dos cavacos, vê-se que estes têm seu comprimento aumentado, quando se trabalha com avanços reduzidos. Aspecto este ressaltado para as amostras de cavacos colhidas no final do ensaio que apresentaram um comprimento ainda maior, talvez pela pequena perda de afiação da aresta da ferramenta.



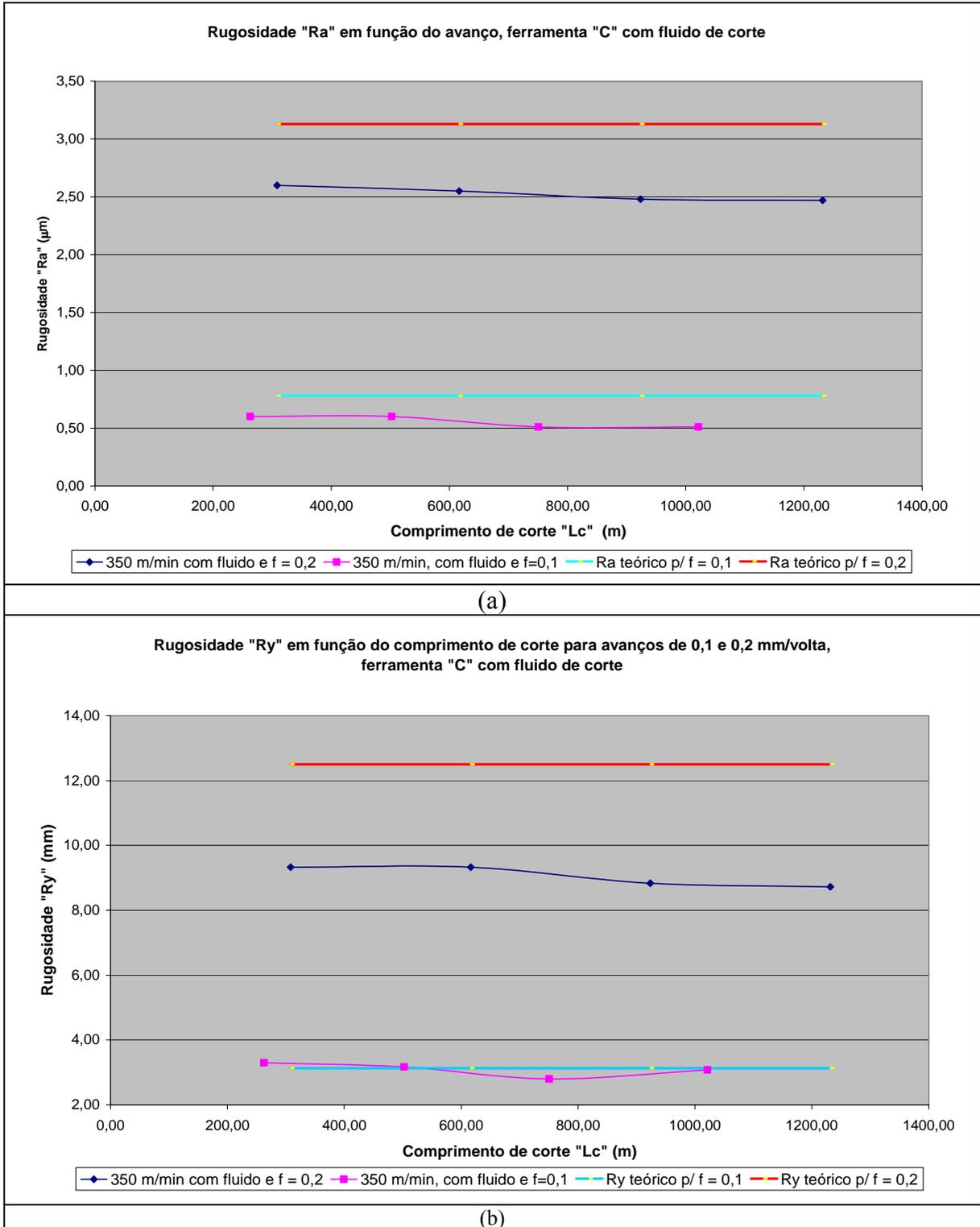
**Figura 38** – Região de melhor aplicação do quebra-cavaco (AL), adaptado de Sandvik (2002)

#### 4.2.3 Análise da Variação de Rugosidade “Ra” e “Ry” em Função do Avanço

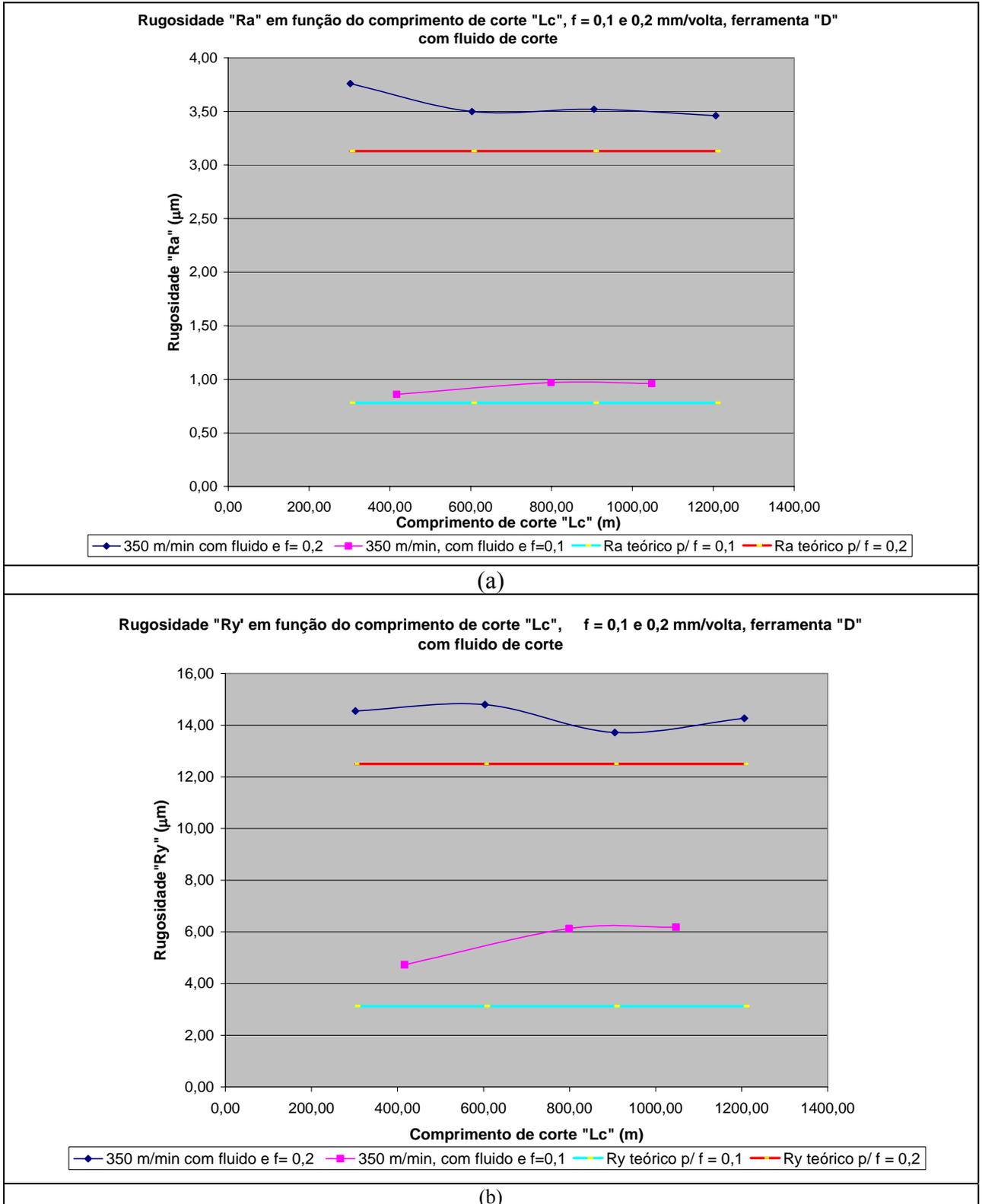
Durante os testes com a variação de avanço, periodicamente, as superfícies tiveram a sua rugosidade medida e representada conforme os gráficos das Figuras 39, 40 e 41.

Para os avanços menores o nível de rugosidade foi menor, aliás, como já era esperado teoricamente, embora o cavaco formado não fosse o melhor possível, correndo o risco do mesmo danificar a superfície usinada devido ao seu comprimento acentuado e podendo ocorrer o risco de que o mesmo se prendesse na peça durante a usinagem.

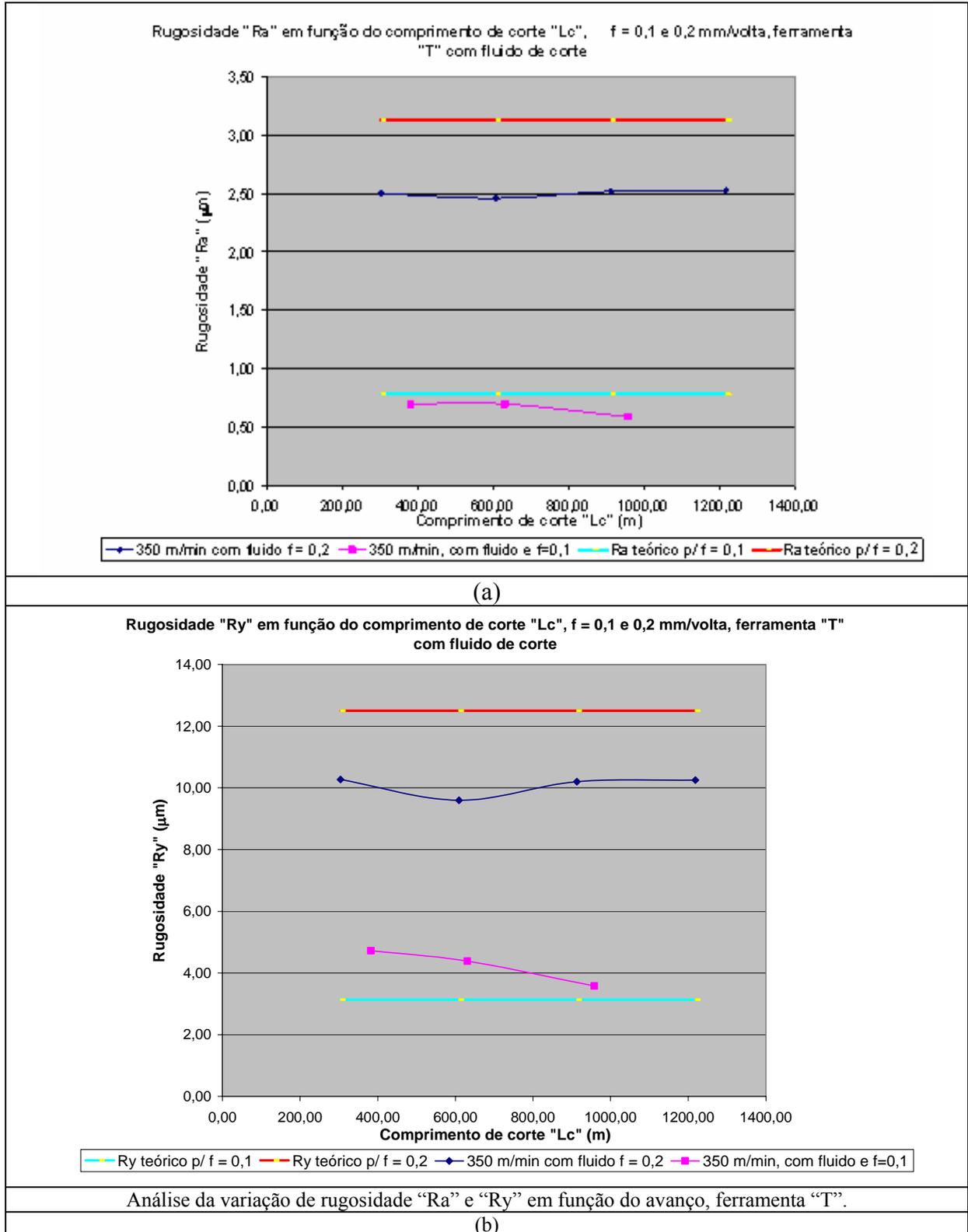
A tendência geral para as ferramentas “C” e “T” foi obter os valores de rugosidade medidos até menores que os teóricos, exceto para os valores de “Ry” da ferramenta “T”, que se apresentaram maiores que o valor teórico para o avanço de 0,1 mm/volta. A mesma condição que apresentou um maior valor de desgaste de entalhe, que certamente influenciou na rugosidade apresentada, fato que também se refletiu na forma do cavaco gerado (em forma de fita), para esta condição.



**Figura 39** – Gráficos das rugosidades Ra (a) e Ry (b) em função do avanço (ferramenta "C")



**Figura 40** - Gráficos das rugosidades Ra (a) e Ry (b) em função do avanço (ferramenta "D")

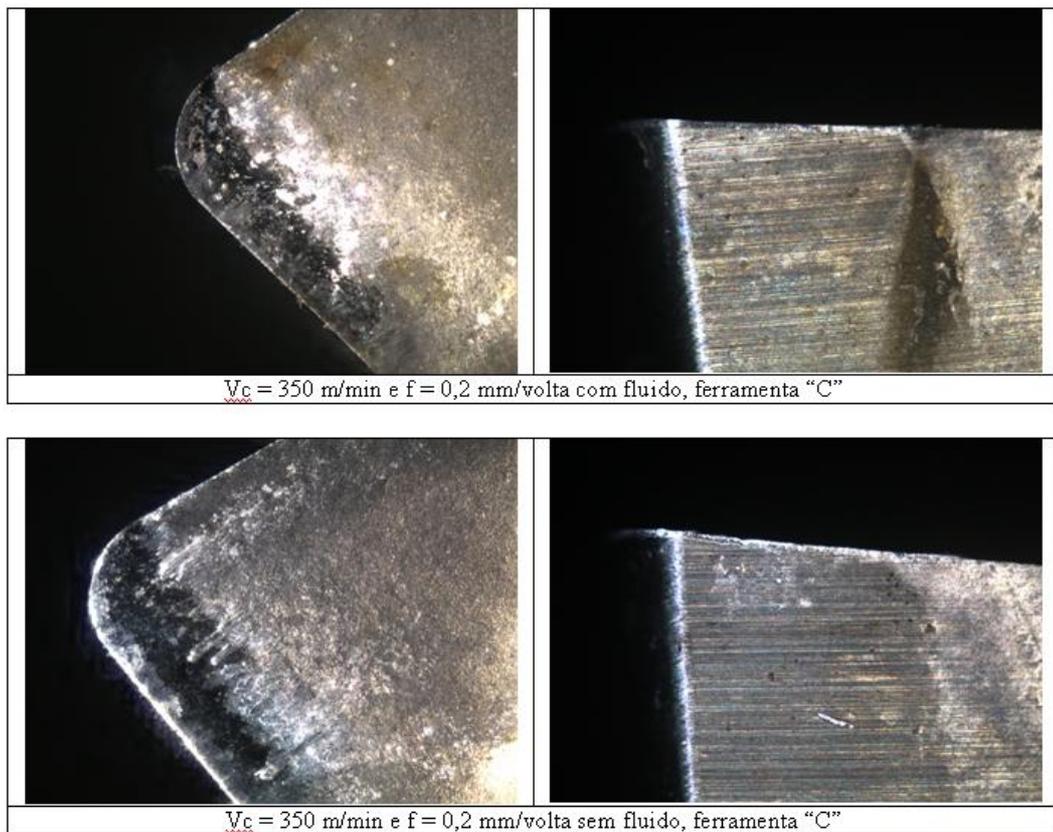


**Figura 41** - Gráficos das rugosidades Ra (a) e Ry (b) em função do avanço (ferramenta "T")

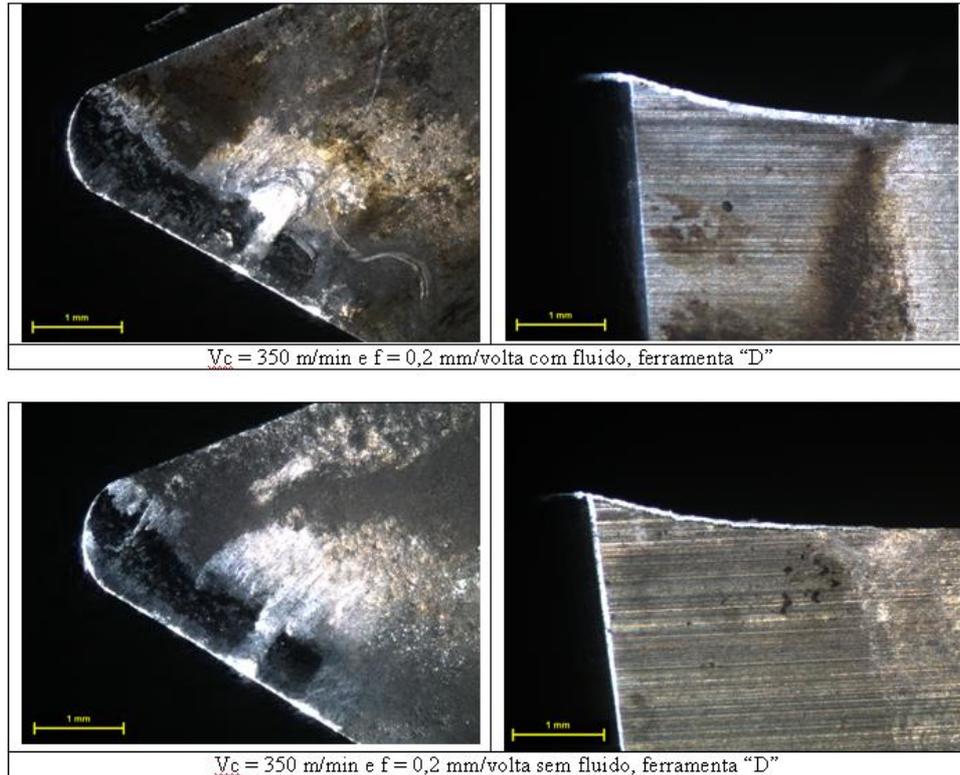
### 4.3 COMPARAÇÃO DAS FERRAMENTAS, COM E SEM FLUIDO DE CORTE

#### 4.3.1 Análise das Ferramentas

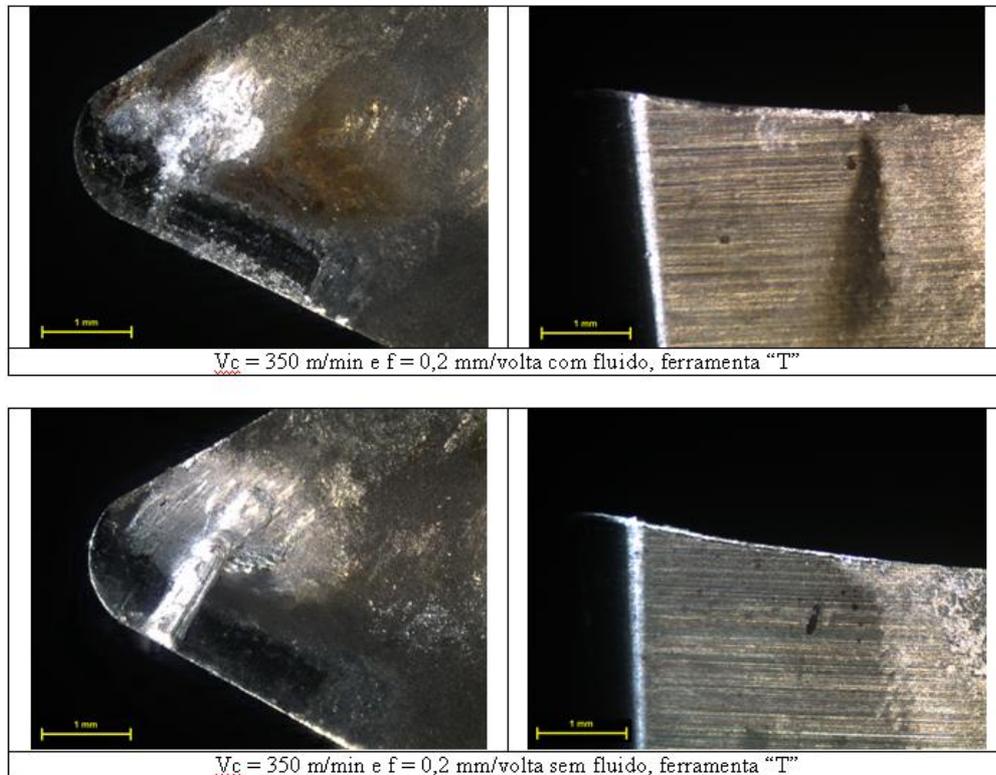
Após a realização dos testes com e sem utilização de fluido de corte, velocidade de corte de 350 m/min e avanço de 0,2 mm/volta, as ferramentas foram fotografadas com o auxílio de um microscópio óptico (Figuras 42, 43 e 44).



**Figura 42** - Ferramentas "C", utilizadas com e sem fluido de corte.



**Figura 43** - Ferramentas "D", utilizadas com e sem fluido de corte.

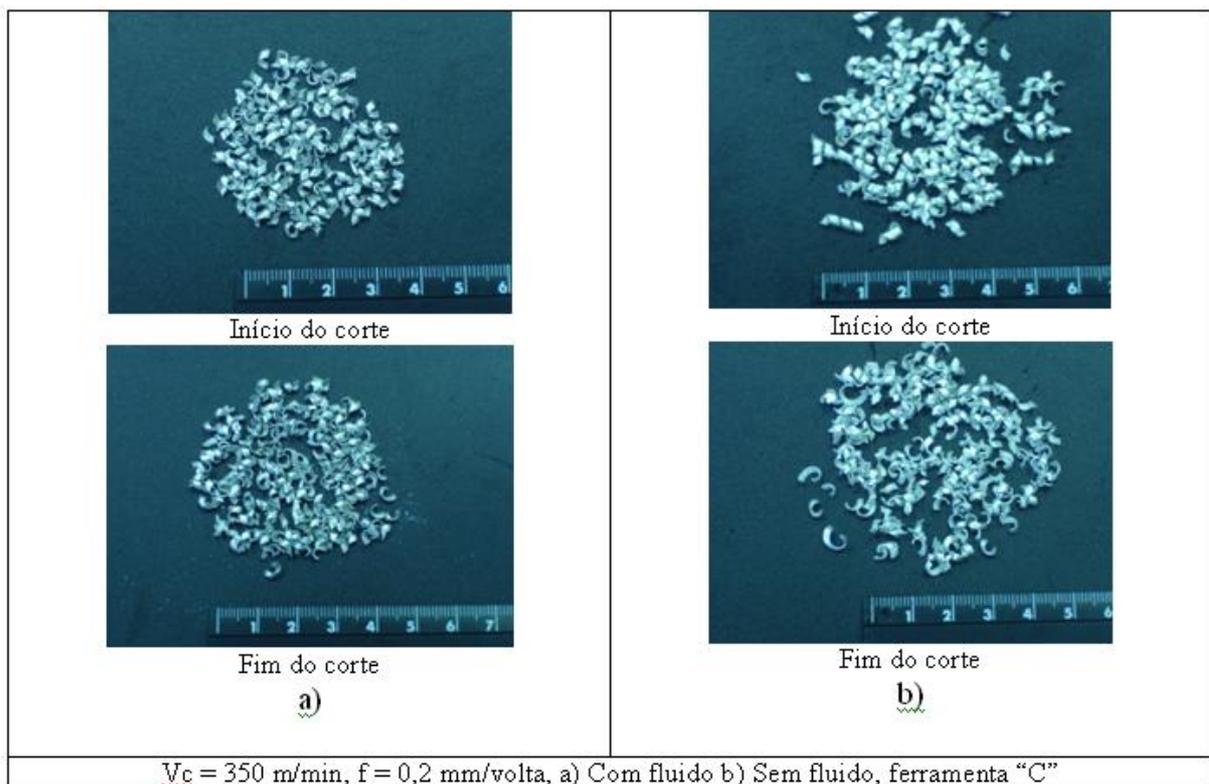


**Figura 44** - Ferramentas "T", utilizadas com e sem fluido de corte.

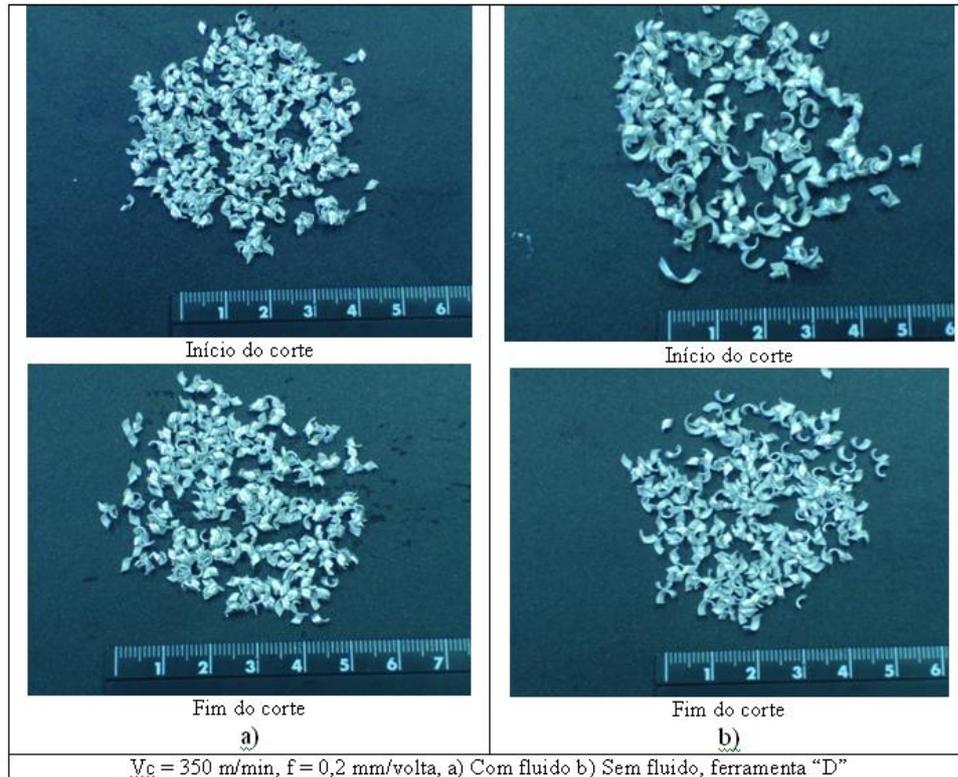
Para a condição sem fluido de corte pode-se notar um ligeiro aumento na quantidade de material depositado na aresta de corte para as ferramentas testadas, quando comparadas com aquelas utilizadas na presença de fluido de corte. A intensidade da degradação das arestas, praticamente, ficou inalterada nas duas condições para as três ferramentas.

#### 4.3.2 Análise dos Cavacos

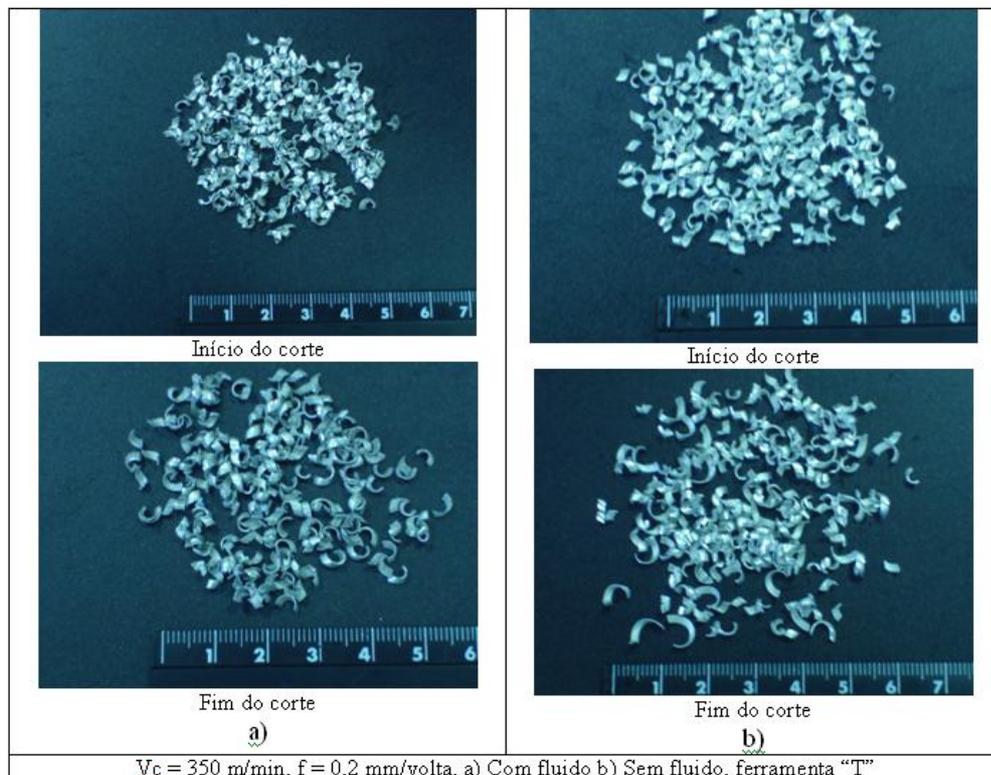
As amostras de cavacos obtidos nos testes com e sem a aplicação de fluido de corte foram fotografadas digitalmente e apresentadas a seguir (Figuras 45, 46 e 47).



**Figura 45** - Cavacos obtidos usando a ferramenta "C", com e sem fluido de corte.



**Figura 46** - Cavacos obtidos usando a ferramenta "D", com e sem fluido de corte.



**Figura 47** - Cavacos obtidos usando a ferramenta "T", com e sem fluido de corte.

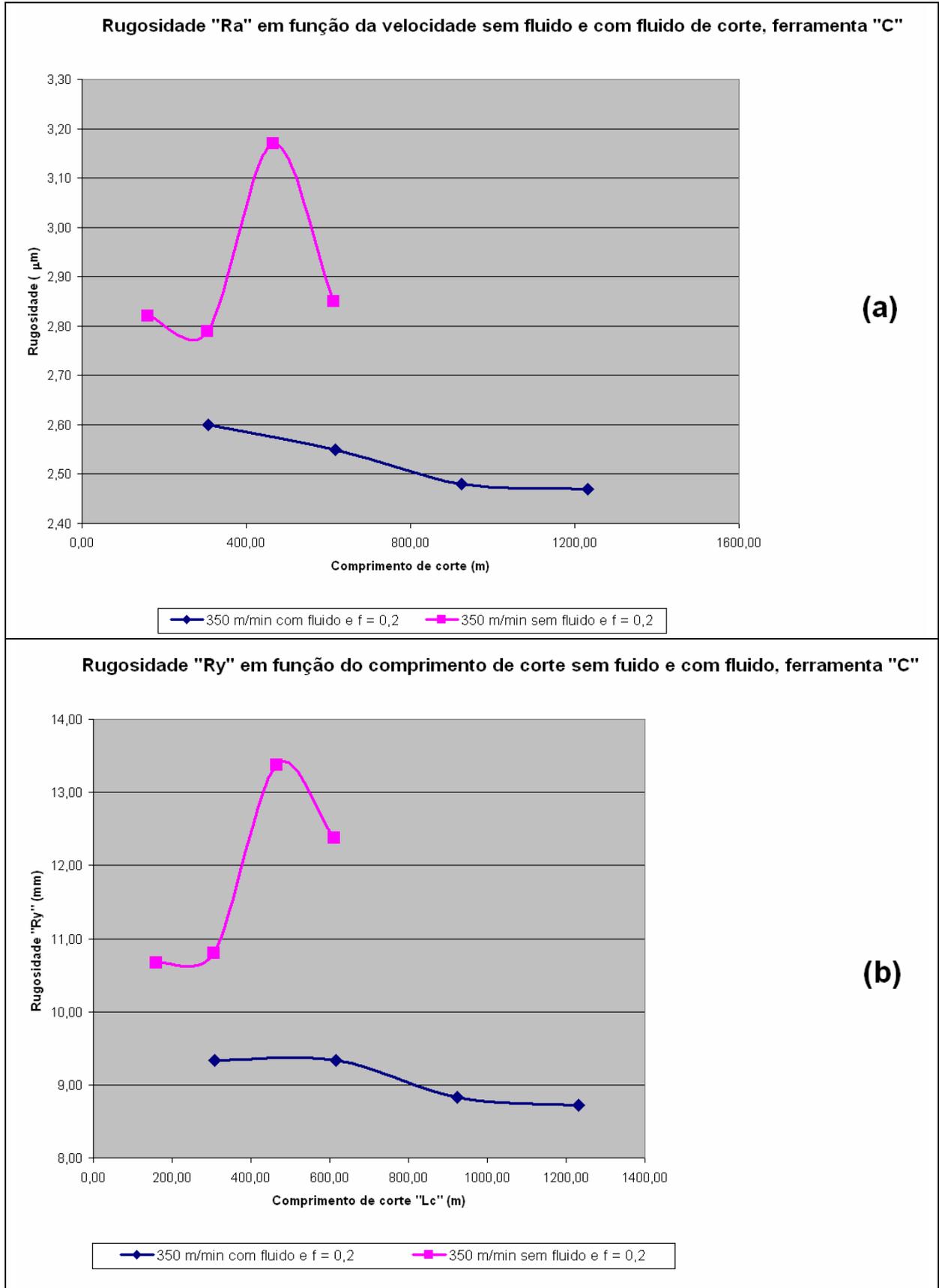
Na condição sem fluido, observa-se uma tendência de aumento no tamanho dos cavacos, possivelmente, em função do aumento da temperatura, que pode ter ocasionado aumento na ductilidade do material retardando o cisalhamento do mesmo. Em ambos os casos, pode-se notar um ligeiro aumento no comprimento dos cavacos quando do final dos testes, talvez em função da perda de afiação da aresta de corte.

#### **4.3.3 Análise da Variação de Rugosidade “Ra” e “Ry” em Usinagem Com e Sem Fluido de Corte**

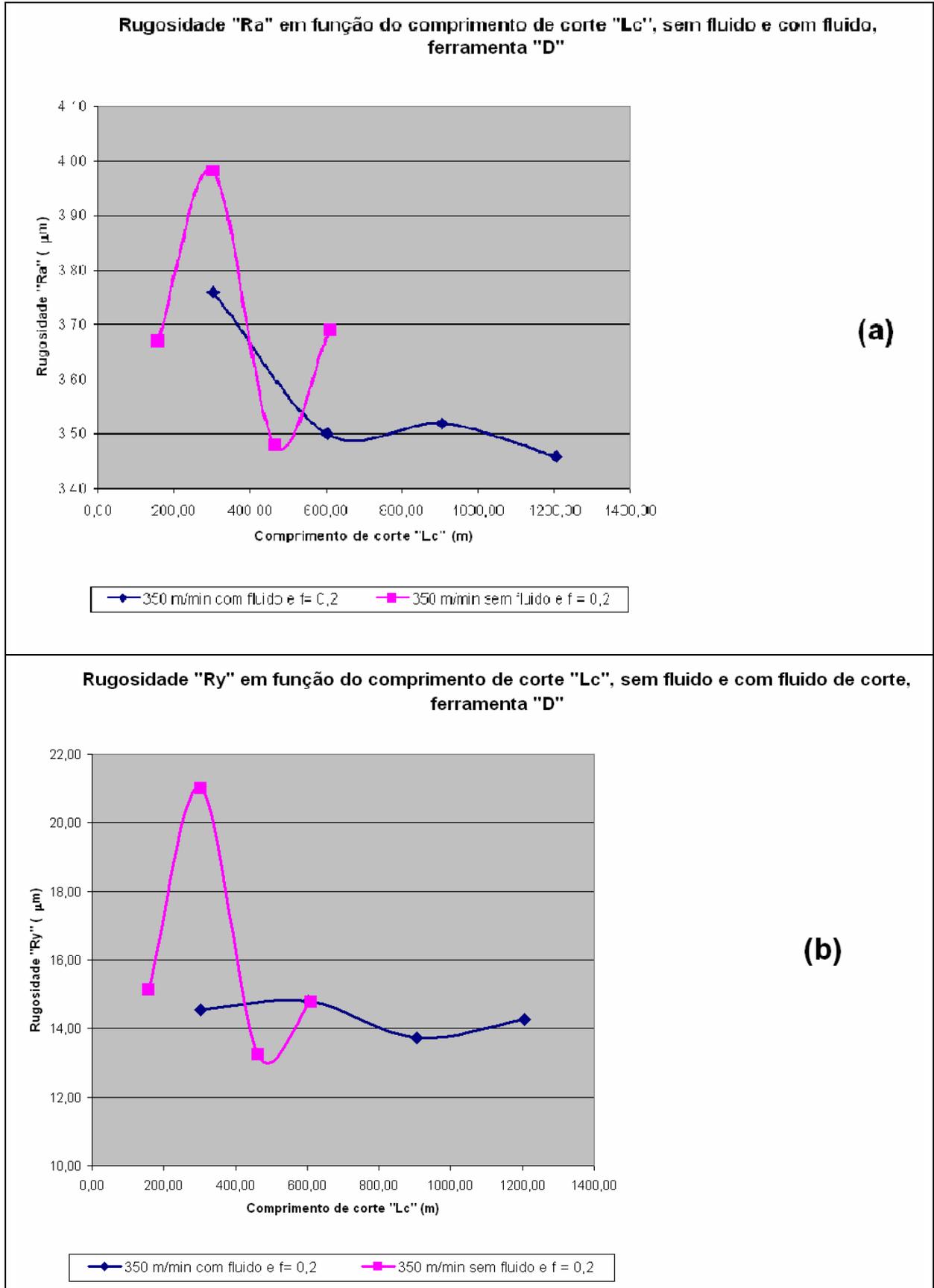
Após os testes com e sem a utilização de fluido de corte a superfície das peças tiveram a sua rugosidade medida, periodicamente, com o uso de um rugosímetro portátil e os dados dispostos em gráficos em função dos parâmetros “Ra” e “Ry” (Figuras 48, 49 e 50).

Para 600 m de comprimento de corte, comparativamente os valores apresentados quando da utilização de fluido de corte são melhores em relação à rugosidade medida e também em relação à preservação da aresta de corte. Na condição sem fluido pode-se notar um aumento no valor da rugosidade, possivelmente, em função de uma maior facilidade na deformação do material do cavaco e do retardo no seu cisalhamento, de uma forma análoga como ocorreu uma variação do tamanho do cavaco formado para esta situação.

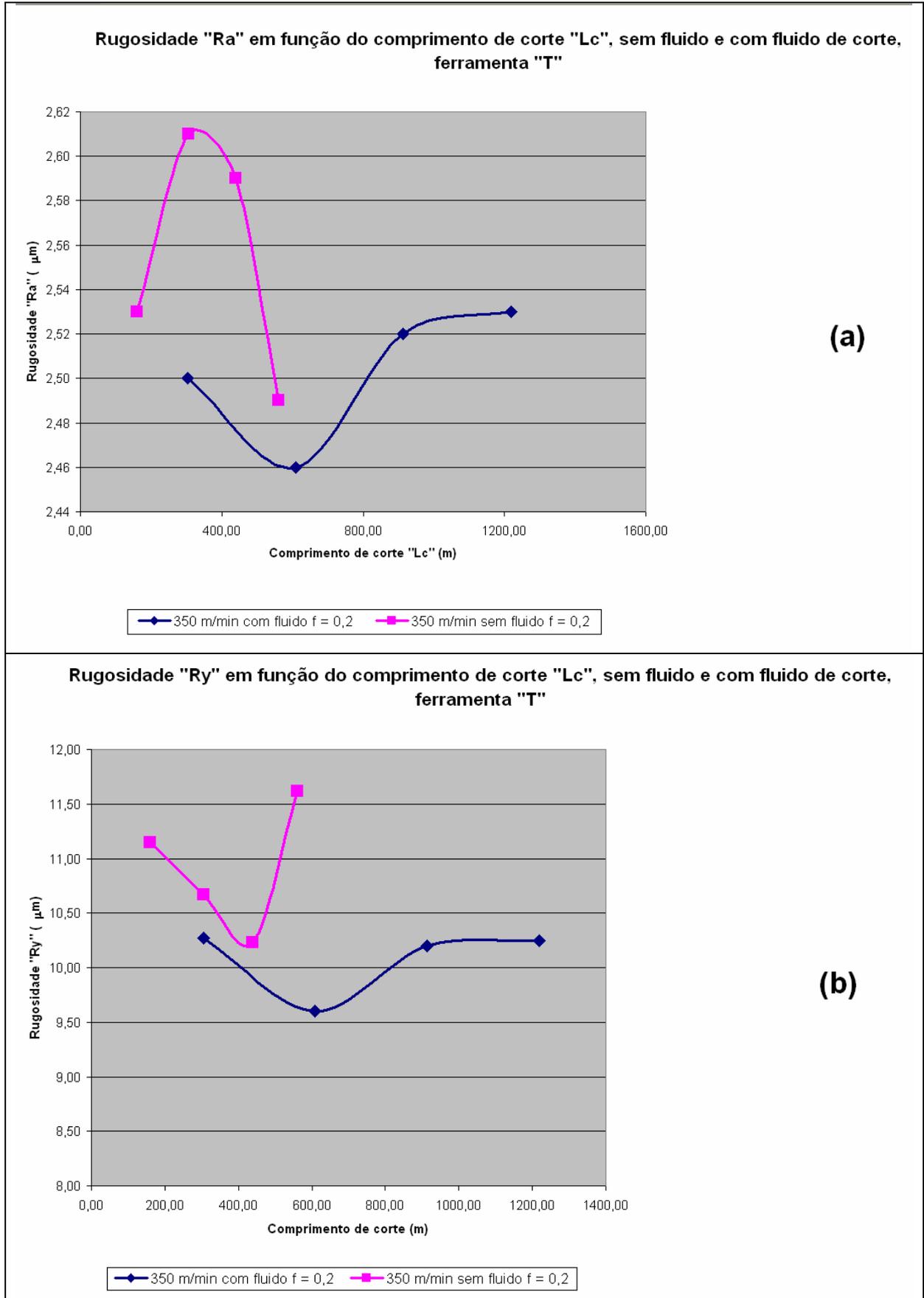
Na presença de fluido de corte, para todas as ferramentas houve uma tendência de estabilização da rugosidade após a acomodação da aresta de corte, os valores de rugosidade só viriam a aumentar com o aumento dos desgastes. Para a condição sem utilização de fluido esta tendência de estabilização da rugosidade não pode ser observada em função do menor comprimento de corte utilizado no ensaio, porém, nota-se uma grande instabilidade inicial nos valores de rugosidade para a condição sem utilização de fluido e bem acima dos apresentados na condição com fluido de corte.



**Figura 48** – Gráficos das rugosidades Ra (a) e Ry (b) obtidas com e sem o uso de fluido de corte (ferramenta "C")



**Figura 49** – Gráficos das rugosidades Ra (a) e Ry (b) obtidas com e sem o uso de fluido de corte (ferramenta "D")



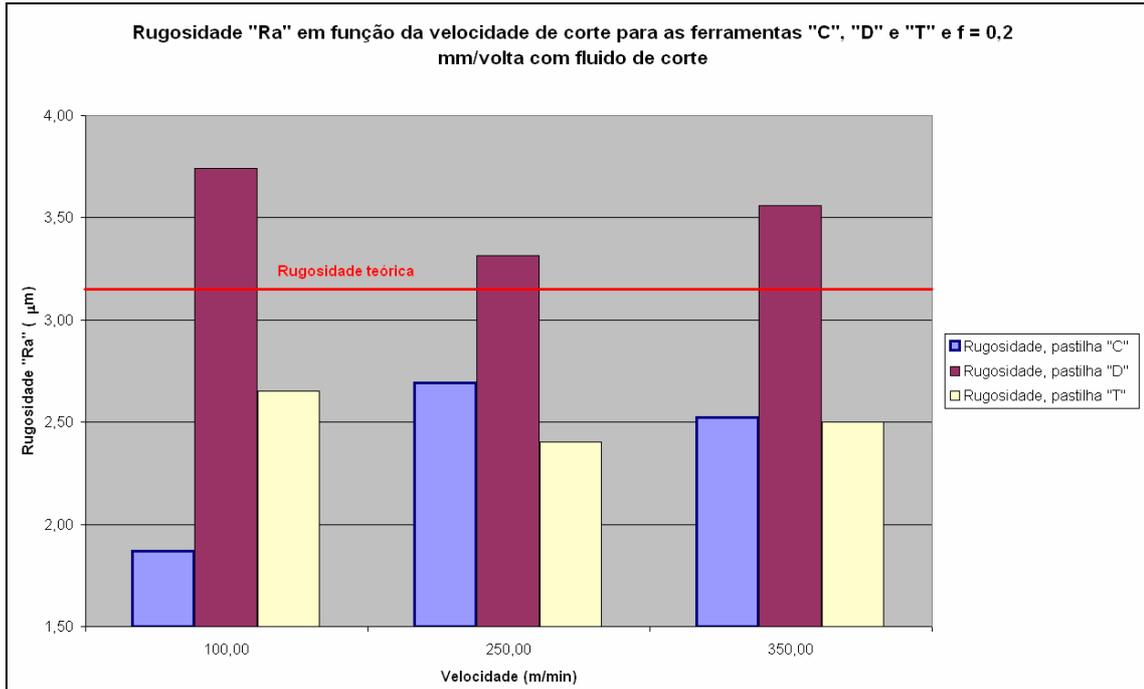
**Figura 50** - Gráficos das rugosidades Ra (a) e Ry (b) obtidas com e sem o uso de fluido de corte (ferramenta "T")

#### 4.4 COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES FERRAMENTAS

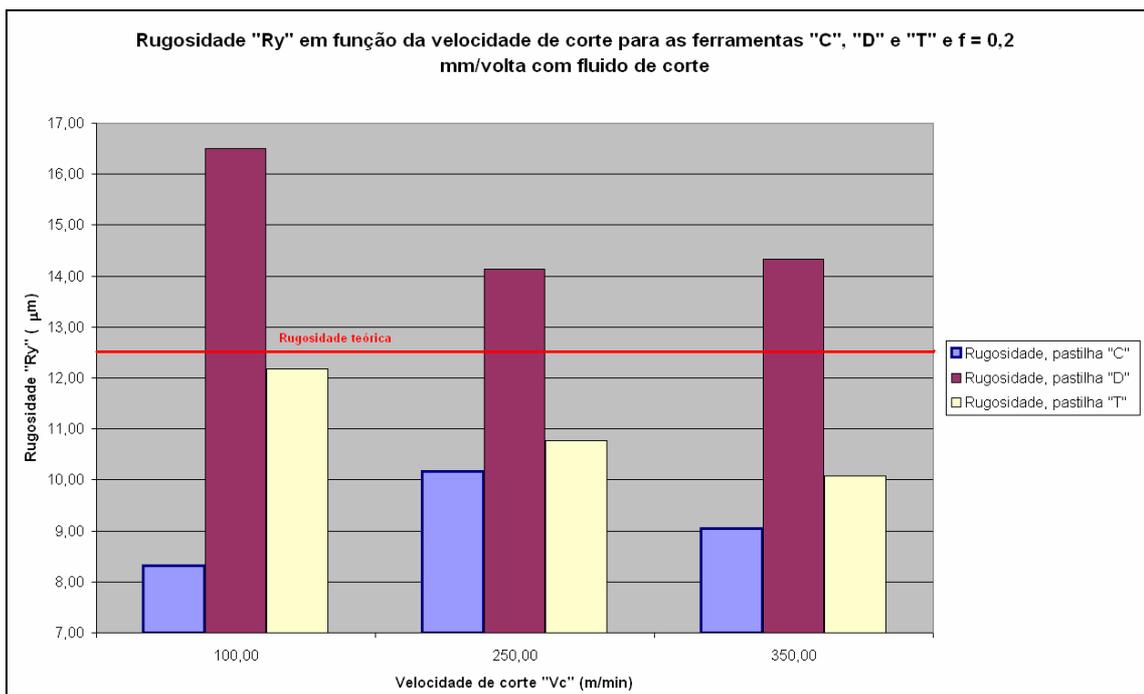
Para efeito de comparação foram medidos os valores de rugosidade para um comprimento de corte de 600 m e inseridos em um gráfico para rugosidade “Ra” e outro para “Ry” (Figura 51), nos quais pode-se observar a equivalência no desempenho das ferramentas “C” e “T”, sempre superior ao da ferramenta “D”, conforme pode ser observado, também, nos gráficos anteriores.

Os valores de rugosidade obtidos com o uso da ferramenta “D”, em todos os casos se mostraram mais elevados do que os obtidos para as outras ferramentas, isto em parte ocorreu em função das características geométricas desta ferramenta, pois a mesma apresenta um ângulo de ponta ( $\epsilon_r = 55^\circ$ ), menor que o das demais ferramentas. Isto vem a prejudicar a estabilidade da ferramenta, proporcionando uma menor rigidez da ponta da ferramenta, influenciando negativamente no perfil de rugosidade gerado.

Como se observa no gráfico da figura 52, em termos de rugosidade os melhores resultados foram obtidos para a ferramenta “C”, tendo sido alcançados os menores valores de rugosidade quando se trabalha com avanço de 0,1 mm/volta, o que já era esperado, teoricamente. Porém, em termos de estabilidade de processo e garantia de qualidade, quando se trabalha com 0,1 mm/volta existe um grande risco de ocorrência de danos na superfície da peça devido ao tipo de cavaco gerado (em forma de fita), devido às condições de processo que não condizem com a melhor região do quebra cavaco da ferramenta. Portanto, a situação mais eficaz e confiável seria com a ferramenta “C” com velocidade de 350 m/min e 0,2 mm/volta e  $a_p = 1,5$  mm.

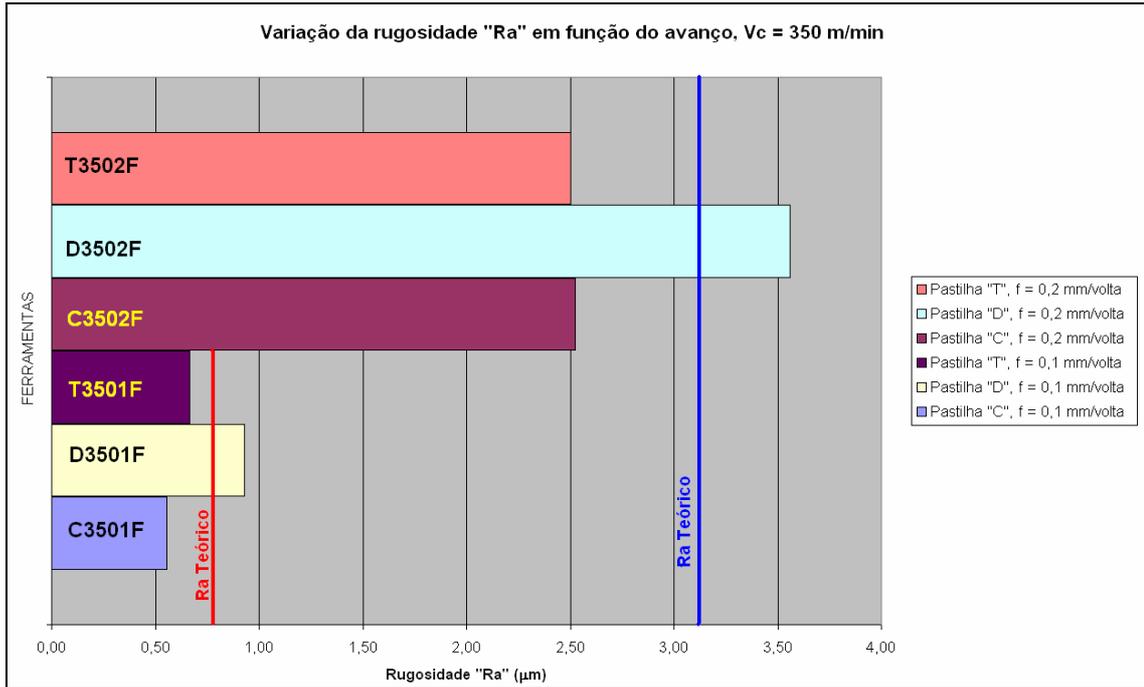


(a)



(b)

**Figura 51** – Rugosidades Ra (a) e Ry (b) em função da velocidade de corte para as ferramentas "C", "D" e "T" ( $L_c = 600$  m).



**Figura 52** – Comparação do desempenho das ferramentas em função da rugosidade "Ra" para avanços de 0,1 e 0,2 mm/volta.

## 5 CONCLUSÕES

As ferramentas com geometria “C” e “T” apresentaram um desempenho muito similar em relação aos valores de rugosidade para as velocidades testadas.

Os valores de rugosidade obtidos com o uso da ferramenta “D” em todos os casos se mostraram mais elevados do que os obtidos para outras ferramentas, possivelmente em função da influência da sua geometria no processo de usinagem interferindo na qualidade da superfície gerada.

Houve uma pequena vantagem da ferramenta “C”, que mesmo com baixas velocidades apresentou menores valores de rugosidade, além de um comportamento mais estável. Numa avaliação geral esta ferramenta poderia ser indicada como a melhor escolha para o conjunto de parâmetros testados, onde a condição de usinagem recomendada seria a de 350 m/min.

Foi possível observar que a utilização do fluido de corte possibilita um melhor desempenho da usinagem em relação à rugosidade, estabilidade dos resultados e quebra do cavaco.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É evidente que este trabalho não encerra o tema, por isso a seguir são apresentadas algumas sugestões para novas pesquisas:

- g) Estudar a forma do perfil da rugosidade gerada na superfície das peças;
- h) Estudar a variação da deformação nos cavacos gerados para as diferentes condições de corte;
- i) Estudar o efeito de outras estratégias de aplicação de fluido de corte, MQF, por exemplo;
- j) Quantificar a variação dimensional nas peças quando da usinagem sem a aplicação de fluido e com MQF;
- k) Estudar as possíveis variações micro-estruturais na superfície das peças em função da aplicação de fluido de corte de forma abundante, MQF ou ausência de fluido.

## REFERÊNCIAS

AA – Aluminum Association. **Aluminum Offers Structural Strength at Decreased Weight**. Disponível: site URL: [www.Aluminum.org](http://www.Aluminum.org), disponível em 2001.

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A.C.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análises de dimensões**, 1ª ed., São Paulo: Edgar Blücher, 1977.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6405: rugosidade das superfícies**. Rio de Janeiro: ABNT, 5p, 1988.

BAYOUMI, A. E.; XIE, J.Q. Some metallurgical aspects of chip formation in cutting Ti-6wt.%Al-4wt.%V alloy. **Materials Science & Engineering**, **A190**, p173-180. maio, 1995.

BRESCIANI FILHO , E. **Seleção de metais não ferrosos**. Campinas,SP: UNICAMP (série manuais), 1992.

BYRNE, G.; BARRY, J.; YOUNG, P. Surface integrity of AISi 9 Machined with PCD cutting tools. **Annals of the CIRP**, v. 46, n.1, 1997, p. 489-92.

CARVALHO, A. L. M. Comportamento mecânico das ligas de alumínio 7010-T74 e 7050-T7451 de aplicação aeronáutica. Guaratinguetá - SP: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá : FEG - UNESP, 1999. Dissertação (mestrado).

CHIESA, F.; FUOCO, R.; SANTARINI, M. Fundição de ligas de alumínio usadas em componentes para indústria automobilística. **Revista Máquinas e Metais**. São Paulo, n; 357, outubro/1995, p. 126-37.

COELHO, R. T. **The machinability of aluminium-based SiC reinforced metal matrix composite (MMC) alloy with emphasis on hole production**. U.K.: School of Manufacturing and Mechanical Engineering. Edgbaston: University of Birmingham, 1994, 304 p. (Doctor of Philosophy, Thesis).

COELHO, R. T.; ASPINWALL, D. K.; WISE, M. L. H. Aplicação de materiais ultraduros como ferramentas de corte de geometria definida. **Revista Máquinas e Metais**. São Paulo, n. 352, maio/1995, p. 50-65.

CSELLE, T.; BARIMANI, A. Today's applications and future developments of coatings for drilling and rotating cutting tools. **Surface and Coatings Technology**, v. 76-77, 1995, p. 712-18.

CUNHA, E. A. **Estudo da usinagem por torneamento da liga ASTM AA-7050 T7451**. [Dissertação Mestrado]. Lorena: FAENQUIL, 2004, 84p.

DERFLINGER, V.; BRÄNDLE, H.; ZIMMERMANN, H. New hard/lubrificant coating for

dry machining. **Surface and Coatings Technology**. v. 113, 1999, p. 286-92.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Metais**. 2. ed.; São Paulo: Ed. Artliber, 2000.

DINIZ, A. E.; NORITOMI, P. Y. Influência dos parâmetros de corte na rugosidade. **Revista Máquinas e Metais**. São Paulo, n. 391, p. 92-101, agosto/1998.

Di RAIMO, E.; PORTO, A. J. V. Rugosidade e Espalhamento Luminoso em Superfícies de Alumínio Torneadas com Ferramenta de Diamante Monocristalino. **In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM**, Uberlândia-MG, nov. 23-26, 2001, Anais CD-ROM, Associação Brasileira de Ciências Mecânicas.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

FREIRE, J. M. **Materiais de construção mecânica: tecnologia mecânica**. Capítulo IX. São Paulo: .TC, 1983.

GOMES, J. O. **Fabricação de superfícies de forma livre por fresamento no aço temperado ABNT 420, na liga de alumínio AMP8000 e na liga de cobre CU-Be**. [Tese de Doutorado]. Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001, 149p.

GRANGER, C. Dry machining's double benefit. **Machinery and Production Engineering**. v. 152 (3873), junho de 1994, p. 14-20.

HEINE, H. J. Dry machining: a promising option. **American Machinist**. August 1997, p. 92-94.

HEINZ, A.; HASZLER, A.; KEIDEL, C.; MOLDENHAUER, S.; BENEDICTUS, R.; MILLER, W. S. Recent development in aluminum alloys for aerospace applications. **Materials Science & Engineering**, v.A, n. 280, p. 102-107, 2000.

HUNG, N. P.; BOEY, F.Y.C.; KHOR, K. A.; PHUA, Y.S.; LEE, H. F. Machinability of aluminium alloys reinforced with silicon carbide particulates. **Journal of materials processing technology**, n. 56, 1996, p. 966-77.

HYATT, G. Getting into dry machining. **Manufacturing Engineering**. v. 119, n. 3, Sep. 1997 (a), p. 87-92.

HYATT, G. High-speed, dry machining can cut cycle times and cost. **Manufacturing Engineering**. v. 119, n.3, Sep. 1997(b), p. 82-87.

KAMMERMEIER, D.; BORSCHERT, B.; KAUPER, H.; SCHENEIDER, M. Furação sem refrigeração: somente razões ecológicas? **Metal Mecânica**. São Paulo, ano XVIII, abril/maio, 2000, p. 62-69.

KIM, J.; KANG, Y. High speed machining of aluminium using diamond endmills. **Int. Journal Mach. Tools Manufacturing**, vol. 37, n. 8, p. 1155-65, 1997.

KOSTER, W. P. Machining. **Advanced Material & Process**. v. 137, p. 67-77, 1990.

LAYRES, M.; MULLER-HUMMEL, P.; DOERFEL, O. Aplicability of different hard coatings in dry milling aluminium alloys. **Surface and Coatings Technology**, v.91, 1997, p. 116-21.

MACHADO, A. R. A evolução dos materiais para ferramenta de corte, **Revista Máquinas e Metais**, n. 265, pp. 92-97, Jan-fev, 1988.

MACHADO, A. R.; DINIZ, A.E. Corte a seco, com mínima quantidade de fluido e com fluido em abundância: uso, aplicações, vantagens e desvantagens. Usinagem 2000. **Feira e Congresso. Anais em CD**, setembro de 2000.

MACHADO, A. R.; WALLBANK, J. The effect of extremely low lubricant volumes in machining. **Wear**. v. 210, n. 1-2; 1997, p. 76-82.

MARCONDES, F. C. **A História do Metal Duro**, faltou o local: Artes Gráficas, 1990.

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

MAZZOLANI, F. M. Aluminum Alloy Structures, London: E & FN, 2 ed., p.693, 1995.

METALS HANDBOOK. **Proprieties and selections: nonferrous alloys and pure metals**, ASM, M. Park 9.ed, v.16, p. 597-606, 1989.

MITUTOYO. **Surface Roughness Tester – User’s Manual**. Manual n. 4648M, Series n. 178, Tokyo, 1999.

MOREIRA, M. R. V. **Estudo da usinagem por torneamento da liga Ti-6Al-4V**, [Dissertação Mestrado em Ciências de Engenharia de Materiais] Departamento de Materiais, Lorena, SP: FAENQUIL, 2002.

MUBARAKI, B.; BANDYOPADHYAY, S.; FOWLE, R.; MATHEW, P. Drilling studies of an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Al metal matrix composites. Part I drill wear characteristics. **Journal of Materials Science**, n. 30, 1995, p. 6273-80.

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

SALLES, J. L. C; GONÇALVES, M. T. T.; CORRÊA, L. O. Rugosidade superficial em operações de torneamento. **In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM**, Uberlândia-MG, nov. 23-26, 2001, Anais CD-ROM, Associação Brasileira de Ciências Mecânicas.

SANDVIK- Coromant. Ferramentas para torneamento **Catálogo C-1000:8**, 2002.

SANDVIK- Coromant. **Modern metal cutting**, 1994.

SOKOVIC, M.; MIJANOVIC, K. Influence of ecological parameters of the cutting fluids on quantifiable parameters of the cutting process. **Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Scientific Conference Achievements in Mechanical & Materials Engineering**, 1997, p. 177-80.

TRENT, E. M. **Metal Cutting**. 3. ed, Butterworths-Heinemann ltd, 273 p. ISBN 0-7506-1068-9, 1991.

VACCARI, J. A. Já chegaram os compósitos com matriz de alumínio fundido. **Revista Máquinas e Metais**. São Paulo, n. 311, dezembro/1991, p. 28-35.

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B.; CÚRSIO, F. Comparação das ligas de Al e Cu quanto às forças de usinagem. **Revista Máquinas e Metais**, p.72-80, Maio 1994.

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.

WEINGAERTNER, W.L.; SCHROETER, R.B. **Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas**. 2.ed. São Paulo: Alcan – Alumínio do Brasil, 1991.

ZHOU, C.; WYSK, R. A. An integrated system for selecting optimum cutting speeds and tool replacement times. **International Journal of Machine Tools & Manufacturing**, v.32, n.5, p.695-707, May 1992.

**BIBLIOGRAFIA CONSULTADA**

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. Produção e reciclagem de latas. Disponível: site **ABAL**. URL : [www.abal.org.br](http://www.abal.org.br), disponível em 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023: Informação e Documentação** - Referências - elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2002, 24p.

BRESCIANI FILHO, E.; GOMES, M. R. **Propriedades e usos de metais não-ferrosos**. São Paulo: (ABM). Édile Serviços Gráficos e Editora Ltda, 1976.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**, São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, v.1, 1986.

COUTINHO, T.A. **Metalografia de não-ferrosos: análise e prática**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

JESUS , E. R. B.; JESUS FILHO, E. S.; ROSSI, J. L. A usinabilidade de compósitos de matriz de alumínio reforçados com partículas de carvão de silício. **Revista Máquinas e Metais**, p.112-123, Agosto 2000.

Van VLACK, L. **Princípio de ciência dos materiais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970, 404 p.

MACHINING. **Metals Handbook**, 9. ed, ASM, V 16, 1997.

MANUAL DA SANDVIK C-2903:4 SPA CoroKey 4. ed, 1998.

MANUAL DA SANDVIK C-5000:329, **Usinagem em altas velocidades de corte e usinagem convencional de moldes e matrizes**, C-5000:329, 1998.

MITUTOYO. **Rugosidade superficial: uma abordagem prática**, 1991.

NING, Y.; RAHMAN, M.; WONG, Y. S. Investigation of chip formation in high speed end milling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 113, p.360-367, 2001.

SINHOFF, V.; ALTMÜLLER, S.; EISENBLÄTTER, G. A Usinagem a seco em alta velocidade: revolução ou evolução? **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, v.35, n.404, p.22-37, set., 1999

TEIXEIRA, F. **Estudo da influência da refrigeração/lubrificação no torneamento do aço ABNT 52100 endurecido**. [Dissertação Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica] Instituto de Engenharia Mecânica, Itajubá, MG: EFEI, 2000. 168 p.

## APÊNDICE – A

Neste Apêndice estão apresentadas as tabelas cujos dados são oriundos dos testes realizados e que foram utilizados para a confecção dos gráficos contidos neste trabalho.

**Tabela 2** - Valores teóricos para as rugosidades "Ra" e "Ry" (equações 2 e 4).

f (mm/rot)	"Ra" teórico	"Ry" teórico
0,1	0,78	3,13
0,2	3,13	12,50

**Tabela 3** – Rugosidade "Ra" em função do avanço, com fluido, Ferramenta "C".

350 m/min com fluido e f = 0,2		350 m/min sem fluido e f = 0,1	
Lc	Ra	Lc	Ra
308,19	2,60	262,76	0,60
616,38	2,55	502,34	0,60
923,55	2,48	750,68	0,51
1231,74	2,47	1021,42	0,51

**Tabela 4** – Rugosidade "Ry" em função do avanço, com fluido, Ferramenta "C".

350 m/min e f = 0,2		350 m/min e f = 0,1	
Lc	Ry	Lc	Ry
308,19	9,33	262,76	3,30
616,38	9,33	502,34	3,17
923,55	8,83	750,68	2,80
1231,74	8,72	1021,42	3,08

**Tabela 5** – Rugosidade “Ra” em função do avanço, com fluido, Ferramenta “D”.

<b>350 m/min e f= 0,2</b>		<b>350 m/min e f = 0,1</b>	
Lc	Ra	Lc	Ra
302,06	3,76	416,57	0,86
603,11	3,50	798,96	0,97
905,17	3,52	1047,61	0,96
1206,22	3,46		

**Tabela 6** – Rugosidade "Ry" em função do avanço, com fluido, Ferramenta “D”.

<b>350 m/min e f= 0,2</b>		<b>350 m/min e f = 0,1</b>	
Lc	Ry	Lc	Ry
302,06	14,55	416,57	4,76
603,11	14,80	798,96	6,13
905,17	13,72	1047,61	6,18
1206,22	14,27		

**Tabela 7** – Rugosidade "Ra" em função do avanço, com fluido, Ferramenta “T”.

<b>350 m/min e f = 0,2</b>		<b>350 m/min e f = 0,1</b>	
Lc	Ra	Lc	Ra
304,11	2,50	382,39	0,70
609,23	2,46	631,04	0,70
913,34	2,52	957,76	0,59
1218,46	2,53		

**Tabela 8** – Rugosidade "Ry" em função do avanço, Ferramenta "T".

<b>350 m/min e f = 0,2</b>		<b>350 m/min e f = 0,1</b>	
Lc	Ry	Lc	Ry
304,11	10,27	382,39	4,72
609,23	9,60	631,04	4,38
913,34	10,20	957,76	3,58
1218,46	10,25		

**Tabela 9** – Rugosidade "Ra" em função do comprimento de corte com e sem fluido, Ferramenta "C".

<b>350 m/min com fluido e f = 0,2</b>		<b>350 m/min sem fluido e f = 0,2</b>	
Lc	Ra	Lc	Ra
308,19	2,60	160,14	2,82
616,38	2,55	306,15	2,79
923,55	2,48	466,29	3,17
1231,74	2,47	612,30	2,85

**Tabela 10** – Rugosidade "Ry" em função do comprimento de corte com e sem fluido, Ferramenta "C".

<b>350 m/min com fluido e f = 0,2</b>		<b>350 m/min sem fluido e f = 0,2</b>	
Lc	Ry	Lc	Ry
308,19	9,33	160,14	10,67
616,38	9,33	306,15	10,80
923,55	8,83	466,29	13,37
1231,74	8,72	612,30	12,38

**Tabela 11** – Rugosidade “Ra” em função do comprimento de corte com e sem fluido, Ferramenta “D”.

<b>350 m/min com fluido e f= 0,2</b>		<b>350 m/min sem fluido e f = 0,2</b>	
Lc	Ra	Lc	Ra
302,06	3,76	158,00	3,67
603,11	3,50	302,06	3,98
905,17	3,52	463,26	3,48
1206,22	3,46	610,24	3,69

**Tabela 12** – Rugosidade “Ry” em função do comprimento de corte com e sem fluido, Ferramenta “D”.

<b>350 m/min com fluido e f= 0,2</b>		<b>350 m/min sem fluido e f = 0,2</b>	
Lc	Ry	Lc	Ry
302,06	14,55	158,00	15,13
603,11	14,80	302,06	21,00
905,17	13,72	463,26	13,23
1206,22	14,27	610,24	14,77

**Tabela 13** – Rugosidade “Ra” em função do comprimento de corte com e sem fluido, Ferramenta “T”.

<b>350 m/min com fluido f = 0,2</b>		<b>350 m/min sem fluido f = 0,2</b>	
Lc	Ra	Lc	Ra
304,11	2,50	159,61	2,53
609,23	2,46	305,13	2,61
913,34	2,52	438,58	2,59
1218,46	2,53	560,26	2,49

**Tabela 14** – Rugosidade “Ry” em função do comprimento de corte com e sem fluido, Ferramenta “T”.

<b>350 m/min com fluido f = 0,2</b>		<b>350 m/min sem fluido f = 0,2</b>	
Lc	Ry	Lc	Ry
304,11	10,27	159,61	11,15
609,23	9,60	305,13	10,67
913,34	10,20	438,58	10,23
1218,46	10,25	560,26	11,62

**Tabela 15** – Rugosidade “Ra” em função da velocidade de corte com fluido, Ferramenta “C”.

<b>100 m/min com fluido f = 0,2</b>		<b>250 m/min com fluido f = 0,2</b>	
Lc	Ra	Lc	Ra
269,37	1,85	253,00	2,79
435,32	1,96	490,76	2,84
602,36	1,80	713,61	2,48
		964,07	2,66

**Tabela 16** – Rugosidade “Ry” em função da velocidade de corte com fluido, Ferramenta “C”.

<b>100 m/min com fluido f = 0,2</b>		<b>250 m/min com fluido f = 0,2</b>	
Lc	Ry	Lc	Ry
269,37	8,27	253,00	10,70
435,32	8,93	490,76	10,43
602,36	7,73	713,61	9,37
		964,07	10,17

**Tabela 17** – Rugosidade “Ra” em função da velocidade de corte com fluido, Ferramenta “D”.

<b>100 m/min com fluido f = 0,2</b>		<b>250 m/min com fluido f = 0,2</b>	
Lc	Ra	Lc	Ra
264,90	3,66	129,68	4,02
427,00	3,76	477,04	3,10
589,10	3,80	694,72	3,14
		941,02	3,01

**Tabela 18** – Rugosidade “Ry” em função da velocidade de corte com fluido, Ferramenta “D”.

<b>100 m/min com fluido f = 0,2</b>		<b>250 m/min com fluido f = 0,2</b>	
Lc	Ry	Lc	Ry
264,90	16,20	129,68	17,03
427,00	17,00	477,04	13,25
589,10	16,30	694,72	13,60
		941,02	12,63

**Tabela 19** – Rugosidade “Ra” em função da velocidade de corte com fluido, Ferramenta “T”.

<b>100 m/min com fluido f = 0,2</b>		<b>250 m/min com fluido f = 0,2</b>	
Lc	Ra	Lc	Ra
266,68	2,69	247,97	2,39
430,98	2,68	482,34	2,41
594,73	2,58	702,97	2,40
		950,94	2,42

**Tabela 20** – Rugosidade “Ry” em função da velocidade de corte com fluido, Ferramenta “T”.

<b>100 m/min com fluido f = 0,2</b>		<b>250 m/min com fluido f = 0,2</b>	
Lc	Ry	Lc	Ry
266,68	12,20	247,97	10,58
430,98	12,48	482,34	10,17
594,73	11,87	702,97	11,00
		950,94	11,33

**Tabela 21** - Rugosidade "Ra" em função da velocidade de corte (Lc = 600 m)

<b>Rugosidade ferramenta "C"</b>			<b>Rugosidade ferramenta "D"</b>		<b>Rugosidade ferramenta "T"</b>	
<b>v<sub>c</sub></b>	<b>Ra</b>	<b>Ry</b>	<b>Ra</b>	<b>Ry</b>	<b>Ra</b>	<b>Ry</b>
<b>100</b>	1,87	8,31	3,74	16,50	2,65	12,18
<b>250</b>	2,69	10,17	3,32	14,13	2,41	10,77
<b>350</b>	2,53	9,05	3,56	14,34	2,50	10,08

Autorizo cópia total ou parcial desta obra, apenas para fins de estudo e pesquisa, sendo expressamente vedado qualquer tipo de reprodução para fins comerciais sem prévia autorização específica do autor.

**Franz Wilhelm Vogl.**

Taubaté, abril de 2007.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)