

## A INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE AVANÇO NA TEXTURA SUPERFICIAL DE COMPONENTES USINADOS

**Carlos C. de C. Deonísio**

Instituto de Aeronáutica e Espaço – CTA

deonísio@ccm.ita.cta.br

**Olívio Novaski**

FEM/DEF - Unicamp

**Daniel F.M. Krabbe**

Escola de Engenharia Industrial Mecânica - EEI - S.J.Campos – SP

Krabbe@ieav.cta.br

**Alvaro J. Damião**

Instituto de Estudos Avançados - IEAv- CTA

**Resumo.** Neste trabalho é analisada a influência da velocidade de avanço, sobre a rugosidade, na usinagem de quatro materiais, sendo dois aços, uma liga de titânio e uma liga de alumínio. Da mesma forma, é verificada a influência dos movimentos concordante e discordante, uma vez que, a usinagem foi feita no processo de fresamento tangencial. Os resultados mostram que, o aumento da velocidade de avanço tem um efeito negativo, na rugosidade, com tendência de estabilização. O efeitos dos movimentos concordante e discordante divergiram, em função dos materiais ensaiados.

**Palavras-chave:** Fresamento, Avanço, Rugosidade

### 1. INTRODUÇÃO.

O fresamento é tido hoje, como uma das mais importantes operações de usinagem, devido à sua grande versatilidade e condições de oferecer uma gama enorme de formas geométricas à peça que se deseja obter. Com o advento de máquinas ferramenta cada vez mais eficientes, com possibilidades de usinagem em diversos eixos, a denominação “fresamento”, tem uma conotação totalmente diferente da que era conhecida há 10 ou 20 anos. Hoje a operação de fresamento pode ser melhor conceituada como o avanço de uma ferramenta contra a superfície de uma peça em praticamente qualquer direção. As vantagens do fresamento podem ser descritas como alta capacidade de remoção de cavaco, bom acabamento superficial, exatidão nas dimensões e “flexibilidade” em se gerar as múltiplas formas (NN, 1994).

O fresamento, por ser influenciado consideravelmente pelas condições gerais de usinagem (dimensão e rigidez da fresadora, ferramenta de corte, etc), requer um estudo detalhado sobre a escolha da máquina e das ferramentas. Hoje em dia, tem se procurado pela usinagem no menor tempo possível, obtendo peças com qualidade e da maneira mais rentável possível (NN, 1994).

Basicamente, pode-se afirmar que qualquer que seja o tipo de fresamento que venha a ser realizado, ele emprega uma combinação de parâmetros que envolvem as direções de avanço em relação a rotação da ferramenta, gerando esforços entre ferramenta, peça e máquina. Estes esforços geram na superfície da peça uma alteração no acabamento, aumento de dureza superficial e alterações dimensionais.

Devido à importância assumida pelo processo, tem-se procurado remover sempre maiores volumes de cavaco por unidade de tempo, tendo a velocidade de avanço importância fundamental neste aspecto. É neste contexto que se insere este trabalho.

## 2. TIPOS FUNDAMENTAIS DE FRESAMENTO E EFEITOS DE ALGUNS PARÂMETROS DE USINAGEM NO ACABAMENTO SUPERFICIAL.

Segundo a posição do eixo árvore da máquina-ferramenta, o fresamento é classificado em fresamento horizontal (quando o eixo-árvore está na posição horizontal), fresamento vertical ou fresamento inclinado. A disposição dos dentes ativos da fresa, classifica a operação em: fresamento periférico (ou tangencial); fresamento plano periférico; fresamento plano frontal (ou simplesmente frontal) e fresamento plano frontal periférico. O fresamento tangencial, objeto deste estudo, pode ser conceituado como sendo o fresamento no qual as arestas principais de corte da ferramenta estão situadas na periferia da fresa (isto é, na sua superfície de revolução), gerando a superfície da peça.

O fresamento tangencial ainda pode ser dividido, quanto ao sentido dos movimentos em fresamento concordante e discordante.

O fresamento concordante é aquele em que, na região de penetração do dente da fresa na peça, o sentido do movimento de corte coincide (concorda) com o sentido do movimento de avanço quando o sentido do movimento de avanço é o mesmo do movimento rotatório da fresa (figura 1). Como pode ser visto na figura 1, a aresta de corte ao penetrar na peça, o faz com espessura de corte máxima e prossegue até atingir um valor igual a zero. Por isto, nas peças que apresentam uma camada superficial endurecida (crosta de fundição ou forjamento, por exemplo), o contato inicial da aresta cortante se dá em condições desfavoráveis, o que diminui a vida da ferramenta.

FIGURA 1

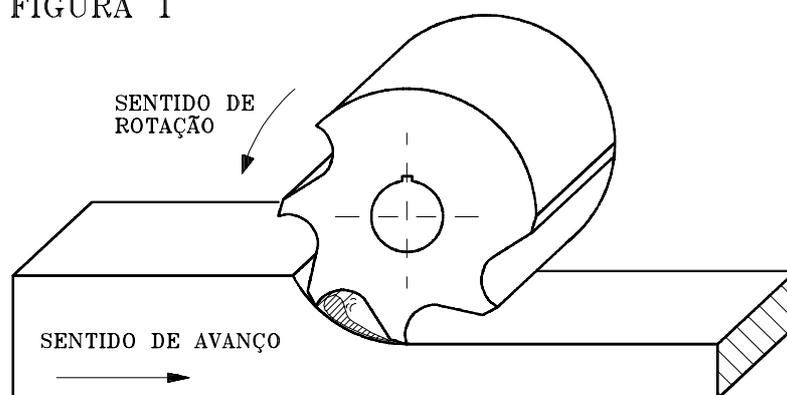


Figura 1 - Fresamento tangencial com sentido de movimento concordante

No fresamento discordante (figura 2), por outro lado, o sentido do movimento de corte, na região de penetração do dente na peça é contrário (discorda) ao sentido do movimento de avanço. Neste fresamento, a espessura de corte aumenta progressivamente de zero até um valor máximo. Inicialmente há um grande atrito entre a ferramenta e a peça. Quando a pressão da aresta de corte atinge um valor capaz de vencer a tensão de ruptura do material da peça, a ferramenta penetra na peça e, retira uma porção de cavaco em formato de vírgula.

FIGURA 2

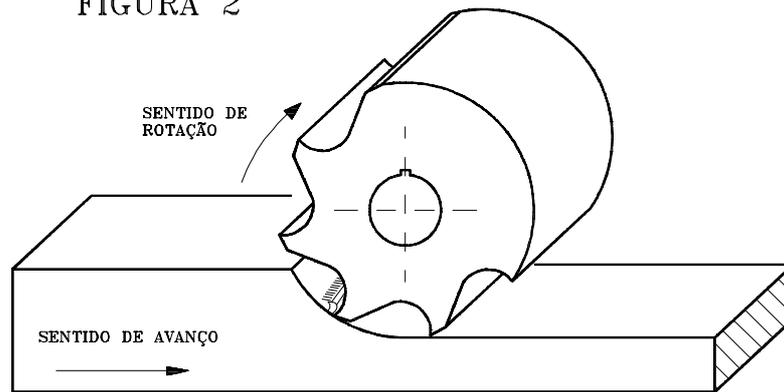


Figura 2 - Fresamento tangencial com sentido de movimento discordante

## 2.1 Acabamento superficial

O acabamento superficial sofre a influência dos múltiplos parâmetros de usinagem, podendo ser melhor evidenciado pela geometria da ferramenta de corte, geometria da peça, rigidez da máquina ferramenta, material da peça, condições de corte e material da ferramenta (Nakayama et al. 1966)

Em geral, pode-se concluir que a rugosidade de uma superfície é menor, quando:

- a) as deflexões geradas por esforços de usinagem ou vibrações são pequenas;
- b) a ferramenta e a peça estão corretamente posicionadas e centradas;
- c) o eixo principal da máquina ferramenta está corretamente alinhado e as guias sem desgastes.

Agostinho et al. (1977), mostraram que, em fresamento, a rugosidade  $R_a$  da peça deve estar entre  $0,4\mu\text{m}$  e  $25,4\mu\text{m}$ , sendo mais usual a faixa compreendida entre  $1,6\mu\text{m}$  e  $6,3\mu\text{m}$ .

## 2.2. Geometria da peça

Peças longas e finas são mais sensíveis às forças elásticas e dinâmicas. Como resultado, as ondulações são mais pronunciadas. Por outro lado, peças de grandes seções transversais, são rígidas e as ondulações pequenas. A seção da peça é fator a ser observado na usinagem.

## 2.3. Rigidez e exatidão da máquina ferramenta

A máquina ferramenta rígida, sem erros de alinhamento, com boa fundação e com movimentos exatos, não interfere no acabamento superficial.

## 2.4. Material da peça

A composição química, dureza, microestrutura e a consistência metalúrgica são fatores que influenciam o acabamento superficial. Em geral, o acabamento superficial tem um melhor aspecto, quando a composição da peça desfavorece o aparecimento da aresta postiça de corte, apresenta alta dureza, baixa ductilidade e homogeneidade.

## 2.5. Condições de corte

O aumento da velocidade de corte, em geral, tende a melhorar o acabamento superficial. Em baixas velocidades, as forças são maiores e conseqüentemente, a ocorrência da aresta postiça de corte, acontece com maior freqüência, o acabamento superficial torna-se insensível à variações de velocidade de corte elevadas (não levando-se em conta, a possível vibração gerada por esse acréscimo no valor da velocidade de corte). Dentre outros dois parâmetros de usinagem, avanço e profundidade de corte, o avanço é o mais influente. As distâncias formadas entre os picos e os vales, provenientes das marcas do avanço, são proporcionais ao quadrado do avanço (NN, 1994). A profundidade de corte aumenta as forças e portanto as deflexões. A altura das ondulações também aumenta com a profundidade de corte.

## 3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

### 3.1. Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova, de dimensões 4x8x15 mm, foram usinados em uma fresadora convencional, sendo os materiais dos corpos de prova, em aço (ABNT 4140 e ABNT 4340), alumínio (ABNT 2024) e titânio (Ti-6Al-4V, conforme a especificação ASTM B265GR5 ou MIL-T-9046).

### 3.2 Ensaios

Os corpos de provas foram ensaiados a velocidades de corte, profundidade de corte e largura de corte constantes, onde se variou para cada material somente as velocidades de avanço, sendo realizadas três repetições para cada condição. Foram utilizados os seguintes parâmetros e equipamentos.

- Fresadora CNC, marca ROCCOMATIC, modelo 5H;
- Rugosímetro Perthometer S8P, utilizando o apalpador RHT 6-50;
- Fresa tangencial, confeccionado em aço rápido ABNT M3, geometria conforme DIN 844, com diâmetro 22 mm e 6 dentes; (NN,1982)
- Parâmetros de usinagem:
  - $v_c = *30 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$  para o aço ABNT 4140;
  - $v_c = *23 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$  para o aço ABNT 4340;
  - $v_c = *30 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$  para a liga Ti-6Al-4V;
  - $v_c = *245 \text{ m} \times \text{min}^{-1}$  para o alumínio ABNT 2024;
  - $a_e = 0,5 \text{ mm}$ ;
  - $a_p = 4,0 \text{ mm}$
  - $f_z = 0,015 \text{ à } 0,233 \text{ mm/dente}$ , conforme tabela 1
  - $v_f$  calculado, para cada material, a partir da tabela 1, variando de 30 à 5.400  $\text{mm} \times \text{min}^{-1}$  conforme tabela 2;
  - fluido de corte: óleo solúvel à 10%, com vazão de  $8 \text{ l} \times \text{min}^{-1}$ .

\* Recomendações obtidas de NN, 1985 e unidades expressadas segundo VIM, 1995

Tabela 1. Avanços por dente utilizados para os quatro materiais.

Avanço por Dente (mm/dente)				
Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4	Condição 5
0,015	0,075	0,102	0,131	0,233

Tabela 2. Velocidades de avanço utilizadas para os quatro materiais calculadas a partir da tabela 1.

Material	Velocidade de Avanço ( $\text{mm} \times \text{min}^{-1}$ )				
	Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4	Condição 5
ABNT 4140	41	210	280	365	649
ABNT 4340	30	150	205	264	462
Ti-6Al-4V	39	195	264	334	611
ABNT 2024	272	1350	1850	2350	5400

#### 4. RESULTADOS DOS ENSAIOS E DISCUSSÃO

As figuras 3, 4, 5 e 6 apresentam os resultados obtidos, com as condições de usinagem mostradas no item 2.

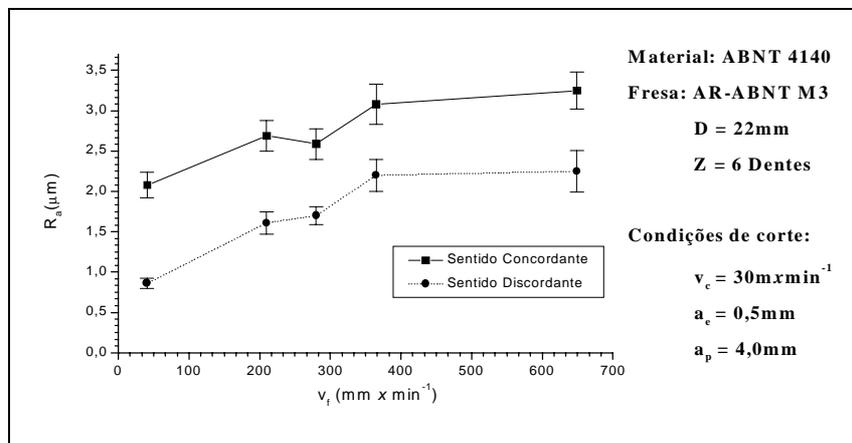


Figura 3 – Variação da rugosidade aritmética média  $R_a$ , em função da velocidade de avanço, na usinagem do aço ABNT 4140

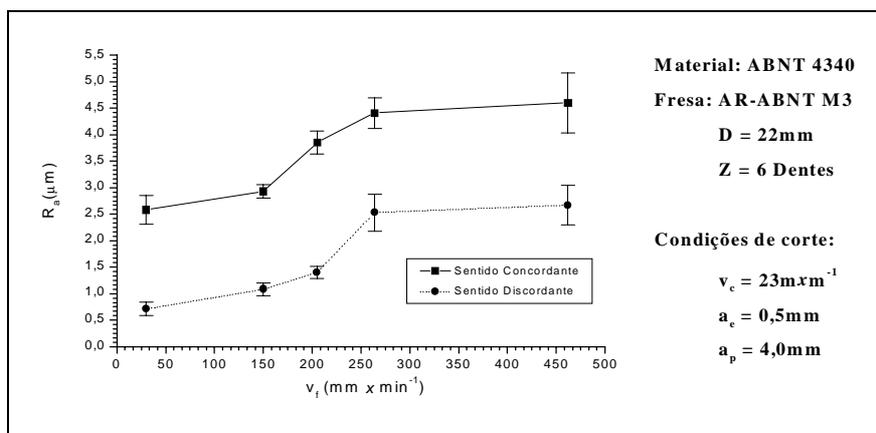


Figura 4 – Variação da rugosidade aritmética média  $R_a$ , em função da velocidade de avanço, na usinagem do aço ABNT 4340

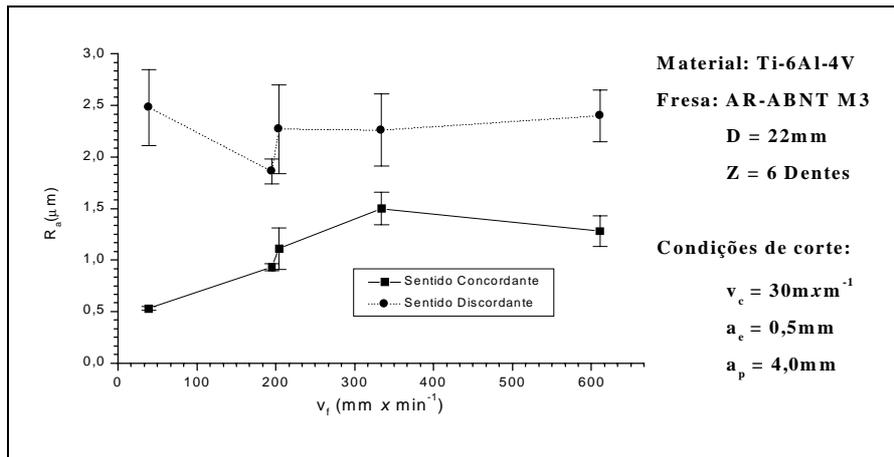


Figura 5 – Variação da rugosidade aritmética média  $R_a$ , em função da velocidade de avanço, na usinagem da liga de titânio Ti-6Al-4V

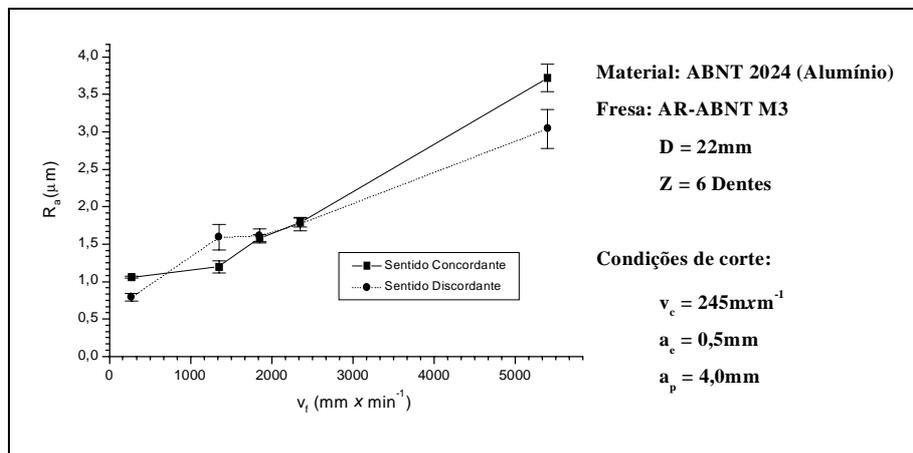


Figura 6 – Variação da rugosidade aritmética média  $R_a$ , em função da velocidade de avanço, na usinagem do alumínio ABNT 2024

Conforme observado nas figuras 3 e 4, na usinagem dos aços, o aumento da velocidade de avanço teve um efeito negativo na rugosidade, cujo efeito deixou de ser tão proeminente a partir de aproximadamente  $300 \text{ mm} \times \text{min}^{-1}$ . O movimento concordante apresentou uma influência mais negativa. Este fato pode, em parte, ser explicado pelo fato de que estes materiais se rompem com baixas taxas de deformação, o que significa que não há um grande escorregamento do dente, no material, até ser atingida a tensão de ruptura do mesmo. Assim, o movimento discordante se mostrou mais favorável, por apresentar um corte menos agressivo.

Nas figuras 5 e 6, observa-se que o movimento concordante apresentou melhor desempenho. A possível explicação reside no fato que, tanto o titânio quanto o alumínio são materiais extremamente dúteis, ou seja, se rompem após sofrerem elevada taxa de deformação. Este fato faz com que, haja um grande escorregamento do dente, antes de haver o rompimento do material. Assim, a tendência da formação da aresta postiça se torna mais acentuada, o que, prejudica o acabamento, no movimento discordante, comparado ao movimento concordante. Outrossim, da mesma forma que a velocidade de corte, parece haver uma tendência de

acomodação da variação da rugosidade, após um certo valor de velocidade de avanço. Tais tendências são observadas na usinagem dos aços e da liga de titânio, todavia, na faixa ensaiada, não observadas na usinagem do alumínio.

## **5. CONCLUSÕES**

Os resultados mostram que, para os vários materiais ensaiados, o aumento da velocidade de avanço se reflete de maneira negativa no comportamento da rugosidade. Todavia, parece haver uma tendência de estabilização, após um certo valor (observados para todos os casos, à exceção do alumínio, talvez a faixa de estabilização esteja em patamares acima dos ensaiados). Se esta estabilização for confirmada em ensaios adicionais, pode ser interessante se saber as faixas da mesma, tendo em vista que a velocidade de avanço está intimamente ligada à produção.

Os movimentos concordantes e discordantes tem efeitos diversos, em função dos materiais a serem usinados, não se podendo generalizar que, sempre haverá predominância de um em relação ao outro, no que se refere à rugosidade e mais especificamente ao parâmetro  $R_a$ . Ao que tudo indica, este fato está mais relacionado ao tipo de material a ser usinado, ou seja, materiais mais dúteis, com maiores tendências para a formação da aresta postiça de corte, quando usinados apresentam melhores rugosidades quando usinados em movimento discordante. Da mesma forma, materiais mais tenazes teriam um comportamento melhor, em movimento concordante. A extrapolação das tendências observadas, nestes ensaios, é um tanto quanto perigosa, de tal sorte que, necessitaria a usinagem de outros materiais, com estas características diversas, para uma afirmação mais enfática.

Outros fatores, além da velocidade de avanço, que poderiam também ter influência na geração da rugosidade, tais como, a força de corte total do processo e a vibração do sistema, não foram considerados neste trabalho, mas com certeza, tiveram influência na rugosidade.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Agostinho, Oswaldo L.; Lirani, João, Lirani - Princípios de Engenharia Mecânica, Tolerâncias, ajustes, desvios e análises de dimensões, 1977
- NN. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT - Aços ferramenta : especificação, NBR 6189 - São Paulo - ABNT, 1982, 13 p.
- Nakayama, K. Shaw; M. C.; Brewer, R.C. - “Relationship Between Cutting Forces, Temperature, Built-up Edge and Surface Finish”, annals of CIRP, vol 14, 1966.
- NN. Machining Data Handbook, 5ª edição, 1985.
- NN. Modern Metal Cutting. Livro produzido pela Sandvik, First English edition published, 1994.
- NN. Vocabulário Internacional de termos Fundamentais de Metrologia – VIM - INMETRO, 1995.

## ***THE INFLUENCE OF FEED ON THE SURFACE TEXTURE OF MILLED WORKPIECES***

**Abstract.** The influence of feed on the surface texture was evaluated for four different materials. Being two steels alloys, one titanium alloy and one aluminum alloy. Also, the influence of movements Down and During Up in tangencial milling was verified. The results indicated that the increase of feed have a negative effect in the roughness, with a tendency of stabilization. The effects of movements Down and During Up also diverge, as a function of the materials.

**Keywords:** Milling, Roughness, Feed.