

# ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA DEFLEXÃO DA FERRAMENTA SOBRE A PRECISÃO DE FORMA E A QUALIDADE SUPERFICIAL NO FRESAMENTO DE TOPO

## Daniel Del Valle Campos

Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Mecânica de Precisão  
Universidade Federal de Santa Catarina, Caixa Postal – 476- EMC  
Campus Universitário, Trindade, Florianópolis, SC. CEP: 88.040-970  
daniel.campos@cnh.com

## Rolf Bertrand Schroeter

Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Mecânica de Precisão  
Universidade Federal de Santa Catarina, Caixa Postal – 476- EMC  
Campus Universitário, Trindade, Florianópolis, SC. CEP: 88.040-970  
rolf@lmp.usfc.br

**Resumo.** *O fresamento de topo é um processo de usinagem com ferramenta de geometria definida cada vez mais aplicado na indústria, onde vem ganhando espaço e substituindo processos tradicionalmente empregados graças a sua maior produtividade. Na indústria de matrizes, muitas vezes as fresas são configuradas com elevado índice de esbeltez ( $L/D > 5-10$ ), para possibilitar a usinagem de ranhuras profundas ou superfícies complexas. Dependendo das condições de engajamento e de contato, podem surgir vibrações regenerativas que, aliadas às deflexões da ferramenta, levam a erros de forma e de medida nas peças. Neste trabalho realizou-se o estudo da influência da razão do comprimento em balanço da fresa pelo seu diâmetro sobre a precisão de forma e a qualidade da superfície gerada. Os estudos foram feitos comparando também fresamento concordante e discordante para diferentes comprimentos em balanço da fresa. Os resultados obtidos com o aumento do comprimento em balanço estão dentro do esperado e pôde-se definir estratégias de usinagem levando em conta o fresamento concordante e discordante e comprimento em balanço.*

**Palavras-chave:** *fresamento de topo, usinagem, deflexão, erro de forma, forças de corte.*

## 1. INTRODUÇÃO

O fresamento, ainda que complexo, é um dos processos de usinagem com maior emprego na indústria atual devido a fatores como sua alta taxa de remoção de material e produção de superfícies com elevada precisão superficial e dimensional, além de sua elevada flexibilidade, sendo utilizado na fabricação de superfícies planas, contornos, ranhuras, cavidades entre outras [1,2].

Dentro do fresamento um dos métodos mais amplamente utilizados, e que vem ganhando ainda mais espaço principalmente na matrizaria e produção de moldes, é o fresamento de topo, que alia as características acima descritas a uma ampla gama de fresas padronizadas, disponíveis para este tipo de operação. O fato da fresa de topo ser fixada em apenas uma de suas extremidades, combinada com a falta de rigidez da mesma, faz com que surjam deflexões devido à ação das forças de usinagem [2]. As principais conseqüências são perdas de qualidade superficial e dimensional da peça acabada.

O presente trabalho tem como objetivo a análise da influência do comprimento em balanço das fresas de topo sobre o erro de forma em peças de alumínio, em ensaios de fresamento de topo com velocidades de corte convencionais. As deflexões são avaliadas a partir dos erros de linearidade causados nas peças e medidos em relação a uma superfície de referência tomada na própria peça. Finalmente, são obtidos padrões de comportamento que podem ser utilizados na determinação de estratégias de fresamento.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1. O processo de fresamento

O processo de fresamento é um dos mais universais conhecido, possuindo grande variação quanto ao tipo de máquina utilizado, movimento da peça e tipos de ferramenta. As aplicações freqüentes do processo são a obtenção de superfícies planas, rasgos, ranhuras, perfis, contornos, cavidades e roscas, entre outros. A remoção de material deste processo é caracterizada pelo movimento relativo entre uma ferramenta rotativa, com número variável de gumes e denominada fresa, e a peça. O movimento relativo pode ser resultante apenas da movimentação da ferramenta sobre a peça, ou ainda, ser resultante de uma combinação de movimentos de peça e ferramenta. Contudo, como característica do processo, tem-se a velocidade de avanço da peça bem inferior à velocidade de rotação da ferramenta. Como vantagens gerais do processo de fresamento pode-se citar as altas taxas de remoção obtidas e a possibilidade de obtenção de superfícies de elevada qualidade e complexidade [1,3,4].

De acordo com a direção de corte e de avanço pode-se distinguir dois tipos de fresamento: o concordante e o discordante. No fresamento concordante, os movimentos de corte e de avanço têm o mesmo sentido, iniciando-se o corte com espessura máxima de cavaco. No fresamento discordante a espessura inicial de corte é teoricamente zero. Assim, no início do corte não há uma remoção nítida de cavaco, mas apenas o esmagamento do material da peça e o atrito entre o gume da ferramenta e o material da peça. De acordo com a posição de ferramenta em relação à peça (no caso do eixo da ferramenta interceptar a peça) o processo assume uma porção concordante e outra discordante. Tal característica observa-se freqüentemente no fresamento frontal e de topo.

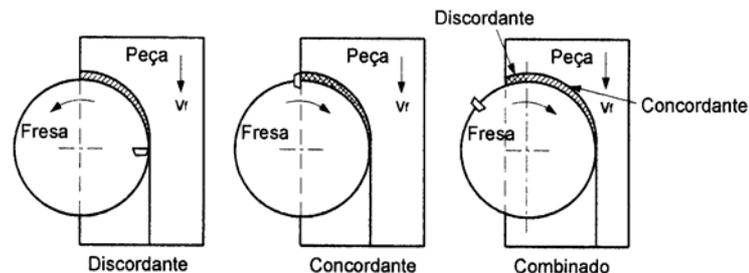


Figura 2.1 – Fresamento discordante, concordante e combinado [1,2,3,7].

Algumas das principais vantagens do fresamento concordante em relação à variação discordante do processo são que a resultante da força de corte empurra a peça contra sua fixação na mesa da máquina, minimizando a possibilidade de vibrações; há um menor desgaste e por conseqüência maior vida da ferramenta; melhor qualidade superficial obtida; menor potência e força de avanço.

Apesar das vantagens que o fresamento concordante possui, há situações nas quais não é possível utilizá-lo, como por exemplo quando existem folgas no fuso da mesa da máquina ferramenta ou quando a superfície da peça possui resíduos de areia de fundição, a peça tenha sido fabricada por forjamento ou for muito irregular [1,3,4].

Dentre as possíveis variações do processo de fresamento, uma das que possui maior emprego nos setores de ferramentaria atualmente é o fresamento de topo. O processo vem sendo utilizado na produção de ranhuras, cavidades, rebaixos, gravações, rasgos e na matrizaria, onde vem ganhando espaço e substituindo processos tradicionalmente empregados, graças a sua maior produtividade [1,3]. Tal evolução se dá principalmente devido ao desenvolvimento de máquinas-ferramentas com

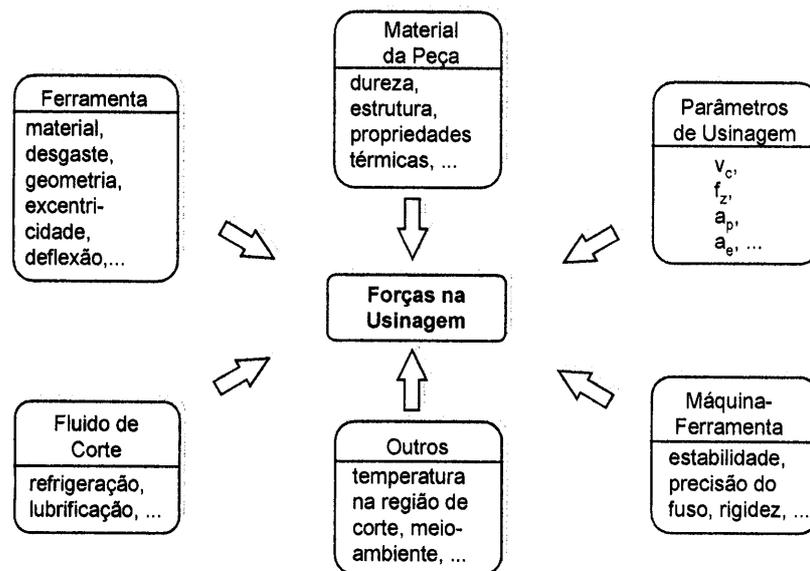
maior rigidez e materiais de ferramenta mais resistentes ao desgaste, aliados ao desenvolvimento tecnológico do fresamento empregando elevadas velocidades de corte.

Em função do campo de aplicação, por exemplo em ranhuras profundas em matrizes, as fresas de topo muitas vezes são configuradas com elevado índice de esbeltez ( $L/D > 5-10$ ), já que, dependendo das condições de engajamento e de contato, podem surgir vibrações regenerativas que aliadas as deflexões da ferramenta levam a erros de forma e de medida nas peças. Tais deflexões tendem a levar a ferramenta tanto para fora quanto para dentro da peça, conforme a intensidade das componentes da força. Dependendo ainda da combinação de corte utilizada, a ferramenta pode ser puxada do fuso da máquina (mesmo sentido de rotação e da hélice) ou forçada em direção a este (sentido de rotação e de hélice contrários), esta combinação é usada preferencialmente na fresagem de contornos onde somente a parte periférica da fresa atua [1,3].

## 2.2. Forças no fresamento

Para deformar o material durante o processo de usinagem e com isso ter-se a remoção de material, é necessário que a ferramenta atue com uma certa força sobre a peça usinada. O conhecimento da grandeza e direção dessa força é de vital importância no dimensionamento dos elementos de máquinas-ferramentas como mancais, guias, acionamentos, sistemas de fixação e na determinação dos parâmetros de corte e estimativa da precisão atingível durante a usinagem [3,4,5].

As forças de usinagem, em geral, são influenciadas por diversos fatores conforme apresentado na **figura 2.2**. Esta força é basicamente influenciada por fatores quase-estáticos e por componentes irregulares de alta dinâmica.



**Figura 2.2** - Fatores que influenciam a força de usinagem [1,3,4,5]

No fresamento as forças são cíclicas e cada dente ou inserto da fresa está sujeito a uma carga de impacto quando entra na região de corte. No fresamento concordante esta força tende a puxar a peça contra a ferramenta, resultando em menor potência de corte necessária ao avanço. Já no fresamento discordante uma tendência oposta é observada [1].

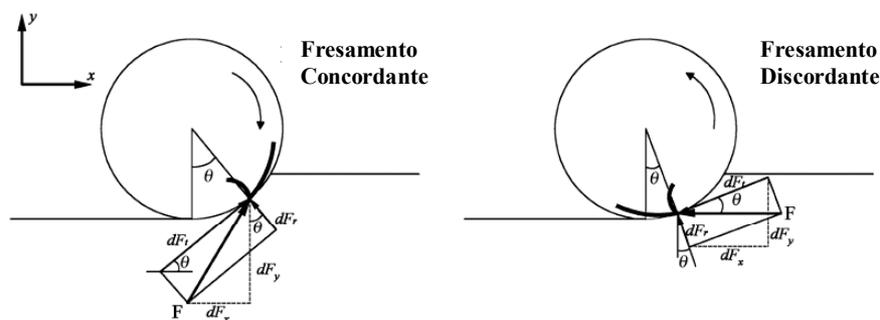
Não há uma relação simples e direta entre força de usinagem e precisão da peça obtida, devendo-se considerar a força e a deflexão instantaneamente à geração da superfície [7]. No fresamento de topo, dependendo da geometria a ser usinada, os esforços aplicados na ferramenta poderão ter características irregulares durante seu percurso, e deverão ser limitados a valores que evitem danos à ferramenta e à precisão da peça. Esta limitação se dá pelo monitoramento de parâmetros de corte, principalmente o avanço e a velocidade de corte.

### 2.3. Deflexão de fresas de topo

A direção e magnitude da força resultante de corte instantânea no processo de fresamento dependem predominantemente da profundidade radial de corte  $a_e$ , da profundidade de corte axial  $a_p$ , da geometria da fresa e do material usinado. Logo, valores excessivos dessa resultante ocasionam a deflexão da ferramenta, geralmente na direção oposta à direção do avanço, causando assim uma imprecisão geométrica na peça. Outro aspecto importante refere-se à máxima velocidade de avanço permissível para uma dada operação de fresamento em função do comprimento em balanço da ferramenta, pois este parâmetro é um dos principais responsáveis pela imprecisão dimensional sofrida pela peça [3,4]. Assim, quando se almeja a obtenção de superfícies com elevada precisão dimensional, deve-se atuar no sentido da minimização das forças envolvidas no processo. A fixação da peça e a estrutura da máquina-ferramenta também são defletidos durante o processo de corte, mas em proporções consideravelmente menores.

O aumento da rigidez e redução da deflexão da fresa podem ser obtidos pelo aumento do diâmetro e pela redução do comprimento livre da fresa. A deflexão é diretamente proporcional ao cubo do comprimento livre e inversamente proporcional à quarta potência do diâmetro, sendo também afetada pelo número de gumes que atuam simultaneamente na peça. Fresas com tamanho de canal reduzido podem ser utilizadas para a diminuição da deflexão, porém com esta medida o espaço para armazenamento de cavacos ficará também reduzido.

No passado, o fresamento concordante era tido como mais favorável quando comparado ao fresamento discordante, devido ao fato do “sobrecorte” de material observado na segunda variação, além do atrito excessivo e colisões entre peça e ferramenta [6]. A causa deste chamado “sobrecorte” torna-se de fácil compreensão quando a força de corte é decomposta em suas componentes tangencial e normal no fresamento concordante e discordante. A **figura 2.3** mostra as forças infinitesimais tangencial e normal, respectivamente  $dF_t$  e  $dF_n$ , atuando no fresamento de topo. Quando a direção de corte é mudada a componente infinitesimal tangencial da força,  $dF_t$ , passa a atuar na direção oposta à rotação da ferramenta.



**Figura 2.3**– Comparação geométrica da força infinitesimal entre o fresamento concordante e discordante [6].

Na **figura 2.3**, a posição angular,  $\theta$ , do gume cortante é incrementada segundo o ângulo de hélice da fresa de topo. Em consequência disso, cada força infinitesimal deve ser decomposta em nas direções  $x$  e  $y$  e agrupada de forma a fornecer a força de corte total usando as equações abaixo:

- Fresamento concordante:

$$F_x = \sum (dF_t \cos \theta - dF_r \sin \theta) ; F_y = \sum (dF_t \sin \theta + dF_r \cos \theta) \quad (1)$$

- Fresamento discordante:

$$F_x = \sum (-dF_t \cos \theta - dF_r \sin \theta) ; F_y = \sum (-dF_t \sin \theta + dF_r \cos \theta) \quad (2)$$

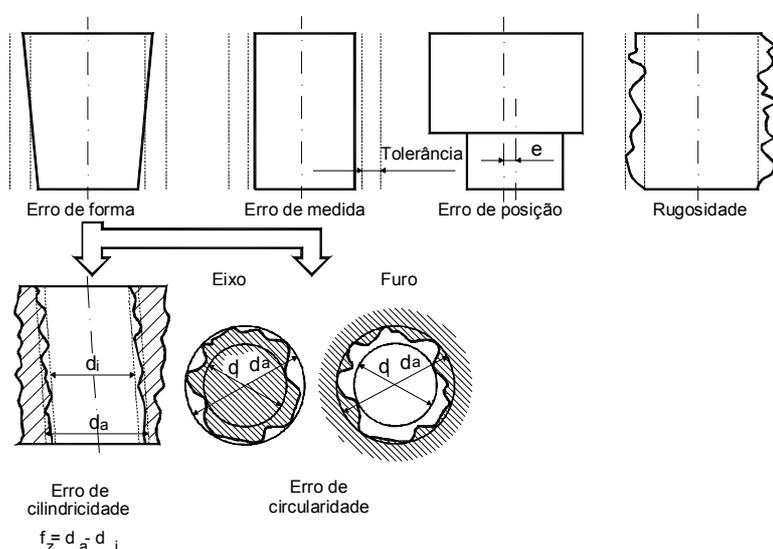
Como resultado do agrupamento das componentes infinitesimais da força de corte nas direções  $x$  e  $y$ , observa-se que a força de corte na direção normal,  $F_y$ , tem magnitude bastante inferior no fresamento discordante quando comparado ao fresamento concordante.

Quando se assume um processo geral de corte, o erro dimensional na peça é mais influenciado pela magnitude da força normal,  $F_y$ , do que pela componente da força na direção do avanço  $F_x$ . Deste modo, no fresamento concordante, a profundidade de corte radial é minimizada para que uma maior precisão dimensional da peça usinada seja alcançada, resultando em uma menor produtividade e conseqüente aumento dos custos de produção.

De acordo com estudos prévios, o “sobrecorte” ocorre quando o fresamento discordante é empregado, pois a força normal tende a atuar na direção  $-y$  (Fig. 2.10).

## 2.4. Erros geométricos na fabricação

Dependendo do processo de fabricação pode-se ter erros diferentes que se caracterizam por propriedades deficientes da peça ou por erros geométricos. Erros que se referem às propriedades das peças são, por exemplo, erros produzidos por tratamento térmicos, com conseqüências sobre a estrutura, dureza e resistência da mesma. Porém, os erros mais freqüentes que ocorrem na fabricação são os erros geométricos, que podem estar situados no âmbito macroscópico ou microscópico. Para uma análise sistemática, os erros são subdivididos de acordo com a **figura 2.4**.



**Figura 2.4** - Erros de geometria de fabricação [5].

## 3. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

### 3.1. Preparação dos ensaios

Os experimentos realizados neste trabalho foram ensaios de fresamento de topo reto com velocidade de corte convencional em corpos de prova de uma liga de alumínio tratável termicamente.

Os ensaios de fresamento foram realizados em uma fresadora vertical CNC Romi POLARIS F400 com potência no fuso de 15 CV (20 CV em regime de 30 min), rotação máxima de 6.000 rpm, curso dos eixos de  $x = 700$  mm;  $y = 420$  mm;  $z = 600$  mm e velocidade de avanço máxima de 20 m/min. Para a realização dos ensaios partiu-se inicialmente de corpos cilíndricos obtidos a partir de uma barra cortada com emprego da serra de fita. O material desses corpos é a liga de alumínio 6061 tratada termicamente, segundo a norma americana da Aluminum Association, **tabela 3.1**.

**Tabela 3.1** – Composição química da liga utilizada

	Liga	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
6061	Composição máxima	0,35		0,70	1,2	0,15	0,80	0,15	0,25
	Composição mínima	0,04	0,15		0,8		0,40		

Na etapa de preparação dos corpos prova, foram realizadas as operações de faceamento e desbaste dos mesmos. A operação de desbaste teve como fim a obtenção das superfícies de referência e da superfície que seria fresada durante os ensaios de deflexão. Para isto foi utilizada uma fresa de topo de aço-rápido com corte à direita e hélice também à direita, com 24 mm de diâmetro, 8 dentes e um ângulo de saída aproximado de 20°. A razão da utilização desta fresa foi a possibilidade de obtenção de uma relação L/d (comprimento em balanço / diâmetro da fresa) bastante pequena, neste caso 2,5. Essa relação baixa pode ser traduzida em baixa deflexão da ferramenta durante a usinagem, fato relevante quando se almeja uma superfície de referência.

Ambas as superfícies do corpo de prova foram usinadas utilizando-se o fresamento concordante, devido ao melhor acabamento superficial obtido com esse tipo de corte, verificável mesmo a olho nu para as condições de usinagem utilizadas. O último passe de corte foi feito em condições de acabamento (baixa profundidade radial  $a_e$ ), a fim de minimizar as forças de corte. Assim obteve-se uma superfície de referência com menores erros de forma, tornando os mesmos desprezíveis quando comparados aos erros de forma resultantes da deflexão da fresa com que os ensaios de deflexão realizados. Essas operações iniciais foram executadas utilizando-se o fluido sintético solúvel em água Bardahl Maxlub Recut 2, em concentração aproximada de 3%.

### 3.2. Ensaios de deflexão

Após a preparação de cada corpo de prova os ensaios que visavam obter os níveis de deflexão da fresa foram realizados sem que a peça fosse movida do seu sistema de fixação, garantindo assim que o sistema de referência utilizado permanecesse inalterado.

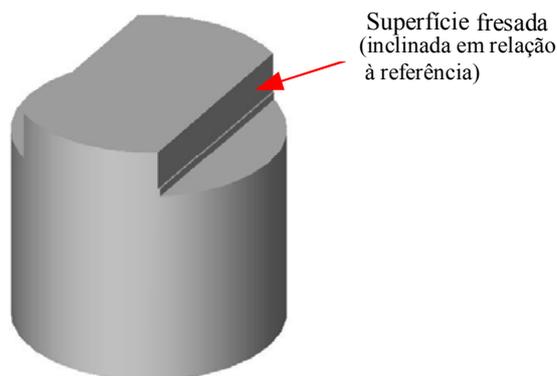
A ferramenta utilizada nos ensaios de deflexão foi um fresa de topo reto de aço-rápido do fabricante OSG, modelo 801/2 BASE DIN844 EDL 4, com diâmetro de 4 mm, 2 dentes, corte e hélice à direita. A seleção deste tipo de ferramenta foi baseada principalmente nas características do material dos corpos de prova e na possibilidade de obtenção de elevados níveis de esbeltez (L/d), podendo para a condição mais crítica de usinagem prevista chegar a valores próximos de 12.

Os parâmetros de corte utilizados nos ensaios de deflexão foram selecionados com base em revisões bibliográficas [3,8], recomendações do fabricante e ensaios preliminares que visavam o ajuste desses parâmetros, principalmente no campo das vibrações geradas durante o processo. A ferramenta foi utilizada em uma velocidade de corte sensivelmente inferior àquela recomendada por seu fabricante para vida econômica (125 m/min) devido à impossibilidade da máquina-ferramenta utilizada atingir tais velocidades. Os demais parâmetros estão de acordo com a recomendação do fabricante e estão resumidos na **tabela 3.2** Todos os ensaios de deflexão foram feitos sem o emprego de fluido de corte.

O comprimento usinado em cada corpo de prova foi de 52,6 mm, indicado na **Figura 3.1**, em apenas uma de suas faces. A face oposta foi usada como referência na máquina de medição por coordenadas do Labmetro-UFSC, onde as medidas foram realizadas.

**Tabela 3.2** – Condições de realização dos ensaios de deflexão.

Condição	Ensaio	$v_c$ [m/min]	$a_p$ [mm]	$a_e$ [mm]	$F_z$ [mm]	L[mm]	CONC.	DISC.
<b>1</b>	EF01 – 03	50,3	10,0	0,4	0,02	<b>29,2</b>	X	
<b>2</b>	EF04 – 06	50,3	10,0	0,4	0,02	<b>48,0</b>	X	
<b>3</b>	EF07 – 09	50,3	10,0	0,4	0,02	<b>41,8</b>	X	
<b>4</b>	EF10 – 12	50,3	10,0	0,4	0,02	<b>35,5</b>	X	
<b>5</b>	EF13 – 15	50,3	10,0	0,4	0,02	<b>41,8</b>		X
<b>6</b>	EF16 – 18	50,3	10,0	0,4	0,02	<b>29,2</b>		X



**Figura 3.1** – Corpo de prova após os ensaios de deflexão e preparados para a medição.

Como resultado dessas medições são apresentados os ângulos de inclinação de cada superfície fresada em relação à superfície de referência, obtidos através do mapeamento de toda a área usinada pelo apalpador da máquina de medição. Os ensaios foram repetidos três vezes para cada condição de corte selecionada, para que a verdadeira tendência assumida para a condição ficasse evidenciada.

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise do efeito do comprimento em balanço da fresa de topo no desvio de forma obtido na peça é caracterizado pela presença do ângulo  $\psi$  e quantificado por sua magnitude medida em graus. Uma superfície ideal, ou superfície gerada por uma fresa que hipoteticamente não apresentasse deflexão, teria um ângulo  $\psi$  igual a zero. Valores para esses ângulos de deflexão medidos nas diversas condições de usinagem são apresentados na **Tabela 4.1**, com incerteza de 2 min.

Como os corpos de prova foram gerados por fresamento de topo, as superfícies já apresentavam um certo desvio de forma. Apesar de a deflexão desta ferramenta ser pequena comparada àquela observada na ferramenta utilizada de fato, nos ensaios de deflexão subtraiu-se esse erro sistemático dos resultados de medição para garantir maior precisão na análise.

**Tabela 4.1** – Efeito do comprimento em balanço da fresa na deflexão obtida

Condição de usinagem	Corpos de prova	Média de $\psi$ [°]	Desvio padrão ( $\sigma$ )
Condição 01	EF01-EF03	0,702 $\pm$ 0,033	0,0418
Condição 02	EF04-EF06	0,999 $\pm$ 0,033	0,0682
Condição 03	EF07-EF09	0,860 $\pm$ 0,033	0,0368
Condição 04	EF10-EF12	0,872 $\pm$ 0,033	0,0399
Condição 05	EF13-EF15	0,360 $\pm$ 0,033	0,0407
Condição 06	EF16-EF18	0,326 $\pm$ 0,033	0,0982

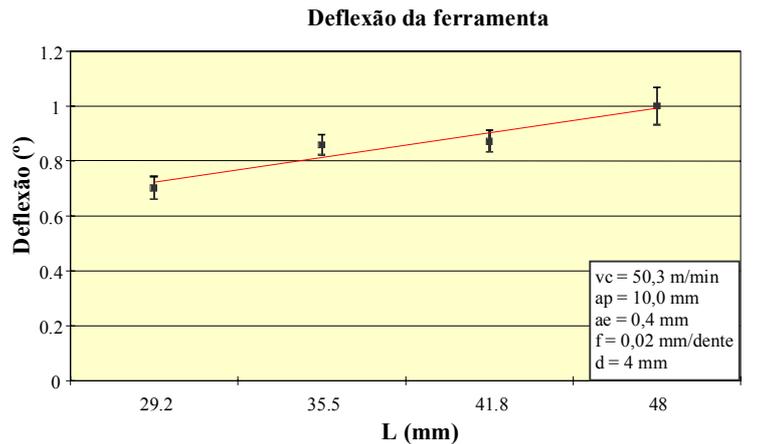
Durante a medição dos corpos de prova, optou-se pelo mapeamento completo das superfícies de referência e defletida. Fez-se essa escolha com o intuito de minimizar os efeitos da rugosidade nas medições de deflexão, que poderiam mascarar os resultados.

Os ângulos de deflexão obtidos nas superfícies de medição não são resultantes apenas da deflexão da fresa. Representam, sim, uma composição das deflexões sofridas pela ferramenta, sistemas de fixação e elementos da própria máquina-ferramenta. Devem ainda ser consideradas as possíveis folgas dos mancais da máquina-ferramenta.

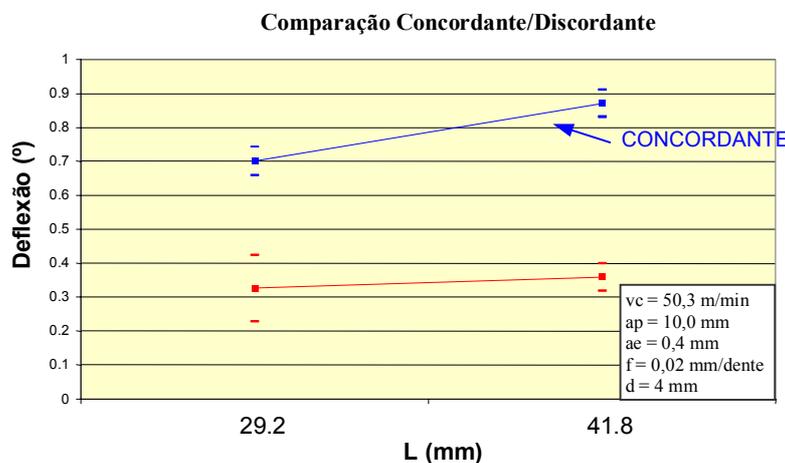
A **figura 4.1** mostra que, como esperado, os erros de forma das superfícies produzidas por fresamento de topo tornam-se maiores com o aumento do comprimento em balanço da ferramenta. Como resultado das medições tem-se, nas condições limites de ensaio, um erro de aproximadamente 0,7° para um comprimento em balanço de 29,2 mm e aproximadamente 1°, quando o comprimento em balanço da fresa é 48 mm. A tendência esperada para os pontos, e que estaria de acordo com os modelos teóricos, é aproximadamente a reta da **figura 4.1**. Os desvios

encontrados nas medições são devidos a fatores sob os quais não se tem total controle durante a execução do ensaio e medição, como por exemplo o posicionamento dos eixos da máquina, condições de afiação da ferramenta e posição de medição.

Ensaio de fresamento discordante foram executados para dois comprimentos em balanço diferentes, a fim de que os níveis de deflexão obtidos pudessem ser comparados aos resultados obtidos para o fresamento concordante nas mesmas condições. A **figura 4.2** apresenta os resultados desses ensaios. Essa figura mostra que o erro de forma das superfícies usinadas com fresamento de topo com corte discordante é consideravelmente inferior àquele observado no fresamento de topo com corte concordante. As forças que atuam no corte discordante têm menores magnitudes que aquelas atuantes no fresamento concordante na direção  $F_y$ , que é a componente da força responsável pela deflexão da fresa e conseqüentemente pelo erro de forma produzido na peça [6].



**Figura 4.1** - Deflexão da ferramenta como função do comprimento em balanço no fresamento de topo concordante.



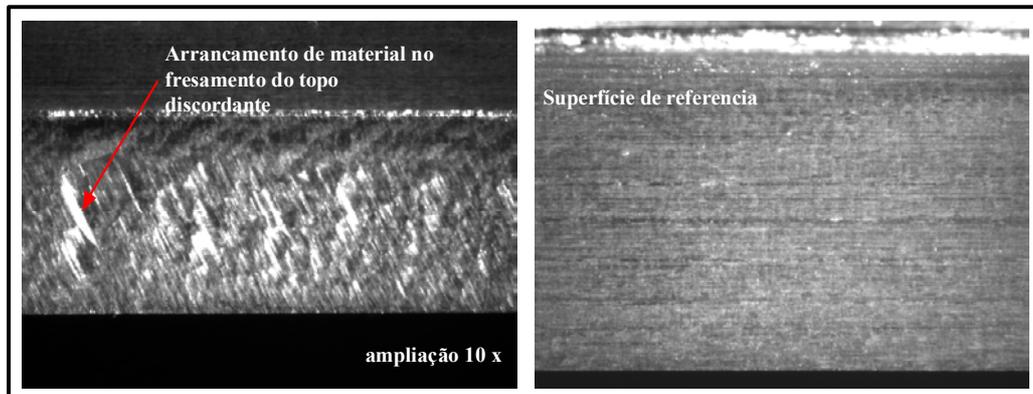
**Figura 4.2** – Deflexões no fresamento concordante e discordante

Para as condições de usinagem utilizadas, o ângulo de inclinação da superfície em relação à referência no fresamento com corte concordante foi aproximadamente duas vezes maior que o ângulo observado no corte discordante para o mesmo comprimento em balanço da fresa.

Devido à menor intensidade da força na direção  $F_y$  que atua no corte discordante tem-se também uma menor sensibilidade à variação do comprimento em balanço da ferramenta. Pelo gráfico da figura 2 pode-se observar que a variação para o corte discordante foi menor que para o concordante.

O sentido da força passiva,  $F_y$ , que causa a deflexão de ferramenta e o erro de forma é diferente no fresamento concordante e discordante. No primeiro a ferramenta é “empurrada” para fora da peça sendo uma das causas dos maiores níveis de deflexão encontrados. Já no fresamento

discordante, a resultante das forças de corte é tal que a ferramenta tende a “entrar” na peça causando o corte excessivo de material denominado, neste trabalho, de sobrecorte. A própria peça atua, agora, como uma barreira física que dificulta a deflexão da fresa, sendo uma das causas dos menores níveis de deflexão observados. Esta força passiva que tende a “puxar” a ferramenta contra a peça provocou, na condição de ensaio com maior comprimento em balanço no fresamento discordante, crateras na superfície fresada devido à força que empurra a fresa contra a peça e provoca arrancamento de material ou sobrecorte. As marcas produzidas podem ser vistas mesmo a olho nu e são mostradas na **figura 4.4** com uma ampliação de 10 vezes.



**Figura 4.4** – Crateras geradas pelo arrancamento de material no fresamento discordante.

A maior diferença entre o fresamento concordante e discordante em relação ao acabamento superficial, está nos desvios de menor ordem, 1ª e 2ª ordens principalmente, caracterizados por desvios de perfil, ondulações e ranhuras quando grandes comprimentos em balanço são empregados. Essa diferença foi evidenciada com medições da ondulação da superfície  $W_t$  quando um comprimento em balanço de 41,8 mm é utilizado. No corte discordante esse parâmetro é da ordem de 8  $\mu\text{m}$ , e para o corte concordante, o  $W_t$  é da ordem de 48  $\mu\text{m}$ . Esta diferença é explicada pelo sobrecorte que se observou quando o fresamento discordante é empregado com grandes comprimentos em balanço. Este sobrecorte, cujas causas já foram discutidas na seção anterior deste trabalho, produziu crateras na superfície fresada devido ao arrancamento de material e que aumentaram drasticamente os valores de desvio de perfil da superfície.

## 5. CONCLUSÕES

Nos ensaios realizados observou-se que o emprego de ferramentas com comprimento em balanço elevados no fresamento de topo produz peças com erros de forma, dimensão e rugosidade excessiva devido à deflexão da ferramenta causada pela ação das forças de corte devendo, portanto, ser evitado sempre que possível.

Quando o uso de elevados comprimentos em balanço faz-se necessário, como na produção de cavidades profundas da matrizaria, a recomendação, baseada nos experimentos, é que o fresamento concordante seja empregado, pois mesmo levando a erros de forma sensivelmente maiores, elimina-se o efeito do sobrecorte que produz superfícies com baixíssima qualidade superficial.

O fresamento discordante mostrou-se como opção preferível ao fresamento concordante apenas quando pequenos comprimentos em balanço são empregados, já que o efeito do sobrecorte não é expressivo, os erros de forma obtidos são menores e a qualidade superficial obtida é superior, pois as forças tendem a minimizar o efeito de folgas da máquina-ferramenta diminuindo vibrações.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão de bolsa de estudo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DROZDA, T. J.; WICK, C. (Ed.) **Tool and Manufacturing Engineers Handbook – Machining**. 4. Ed. Dearborn, Michigan : Society of Manufacturing Engineers, 1983. v.1, p. 1.1-1.66, 10.1-10.76.
- [2] STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 2. Ed. Florianópolis : Editora da UFSC, 1995. p. 141-216.
- [3] KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren**, Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren. 6. Auflage. Berlin: Springer – Verlag, 1999. 471p.
- [4] KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Tecnologia da usinagem com ferramentas de geometria definida – Parte 2** (Traduzido e adaptado por Rolf B. Schroeter e Walter L. Weingaertner), LMP/UFSC, 2002. p. 62-125.
- [5] FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: ed. Blücher, 1969. 751p.
- [6] LEE, S. K.; KO, S. L. **Improvement of the accuracy in the machining of a deep shoulder cut by end milling**. Journal of Materials Processing Technology, v. 111, p. 244-249, 2001.
- [7] MACEDO, S. E. M. **Análise de forças no fresamento de topo convencional e com altas velocidades de corte**. Florianópolis, mar. 2001. 109 p. Dissertação de mestrado – CTC-UFSC.
- [8] WEINGÄERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. **Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas**. 1ª ed. São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil, 1990. 79p.
- [9] BET, L. **Estudo de medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor**. Florianópolis, 1999. 243 p. Tese de doutorado CTC-UFSC.

### ANALYSIS OF TOOL DEFLECTION IN SURFACE PRECISION AND QUALITY IN TOP MILLING

***Abstract.** Top-milling is a machining process with geometric defined tool, widely used in industry, replacing traditional processes thanks to its higher productivity. In the mold industries, the mills are sometimes long, with high L/D rates, to enable machining deep slots or complex geometries. Depending on the contact conditions, regenerative vibrations may appear and, allied to tool deflections, generate form errors in the workpieces. The objective of this paper is to analyze the influence of the L/D rate of the top mill in the generated surface quality and form precision. Up-milling and down-milling were also compared with different lengths of mills and it was used to define milling strategies. The results obtained were as expected and shown in the paper..*

***Keywords:** milling, machining, tool deflection, surface errors, cutting forces.*