

## EVOLUÇÃO DA CINEMÁTICA DA FURAÇÃO POR ESCOAMENTO

### **Walter Lindolfo Weingaertner**

Laboratório de Mecânica de Precisão  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Campus Universitário - Trindade  
Caixa Postal - 476 - EMC  
88.010-970 - Florianópolis – SC  
e-mail: wlw@emc.ufsc.br

### **Carlos Augusto Silva de Oliveira**

Laboratório de Conformação Mecânica  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Campus Universitário Trindade  
Caixa Postal - 476 - EMC  
88.040-970 - Florianópolis – SC  
e-mail: carlosa@emc.ufsc.br

### **Moacir Eckhardt**

Laboratório de Conformação Mecânica  
Departamento de Tecnologia  
Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul  
Campus Panambi  
98.280-000 – Panambi – RS  
e-mail: eckhardt@emc.ufsc.br

**Resumo.** *A cinemática da furação por escoamento tem sofrido alterações importantes desde a sua introdução como processo de fabricação. A cinemática é caracterizada pelo comportamento da força de avanço e pelo momento torçor gerados durante a execução da bucha, em dependência das variáveis de entrada. Atualmente a cinemática pode ser classificada em três casos distintos em função do movimento de penetração da ferramenta na peça. O primeiro caso considera o emprego de uma força externa constante. O segundo caso refere-se a utilização de velocidade de avanço constante, sendo a força de avanço e o momento torçor variável ao longo do tempo e, o terceiro caso, compreende o emprego de velocidades de avanço e rotação variáveis em processo, o que também implica em variação dos esforços durante a execução do processo. Este artigo descreve as fases características de cada caso, e apresentar a sua influência sobre o comportamento das curvas de força de avanço e de momento torçor.*

**Palavras-chave:** *Furação por escoamento, Deformação plástica, Cinemática*

## 1. INTRODUÇÃO

A furação por escoamento é um processo destinado a obtenção de fixações de alta resistência em estruturas metálicas de pequena espessura. O processo se desenvolve através da penetração de uma ferramenta rotativa de metal duro, que através do calor gerado pelo atrito e pela deformação plástica do material promove a conformação de uma bucha, pelo deslocamento radial/axial do material do furo. Posteriormente pode ser realizado o rosqueamento por conformação, produzindo uma bucha rosçada [Weingaertner, 1995].

A seqüência de conformação da bucha é ilustrada na Figura 1 [Lopes, 1994], onde é mostrado o escoamento ascendente e descendente do material da chapa.

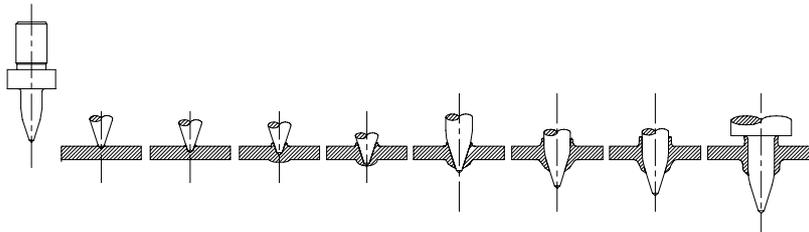


Figura 1 - Conformação de uma bucha por furação por escoamento [Lopes, 1994]

Durante a conformação da bucha, ocorrem diferentes taxas de deformação e diferentes temperaturas na região de trabalho. No início da entrada da ponta cônica da ferramenta no material da chapa, ocorre um processo de deformação à frio pois as velocidades relativas entre peça e ferramenta são baixas. A medida que a ferramenta penetra na peça o material começa a escoar para cima e a temperatura aumenta, diminuindo a resistência do material e facilitando a sua conformação.

O comportamento da furação por escoamento pode ser caracterizado basicamente pela força de avanço " $F_f$ " e pelo momento torçor " $M_t$ ". Estes esforços variam em função das grandezas empregadas no processo, principalmente da velocidade de avanço e da rotação da ferramenta, que por sua vez caracterizam a cinemática do processo.

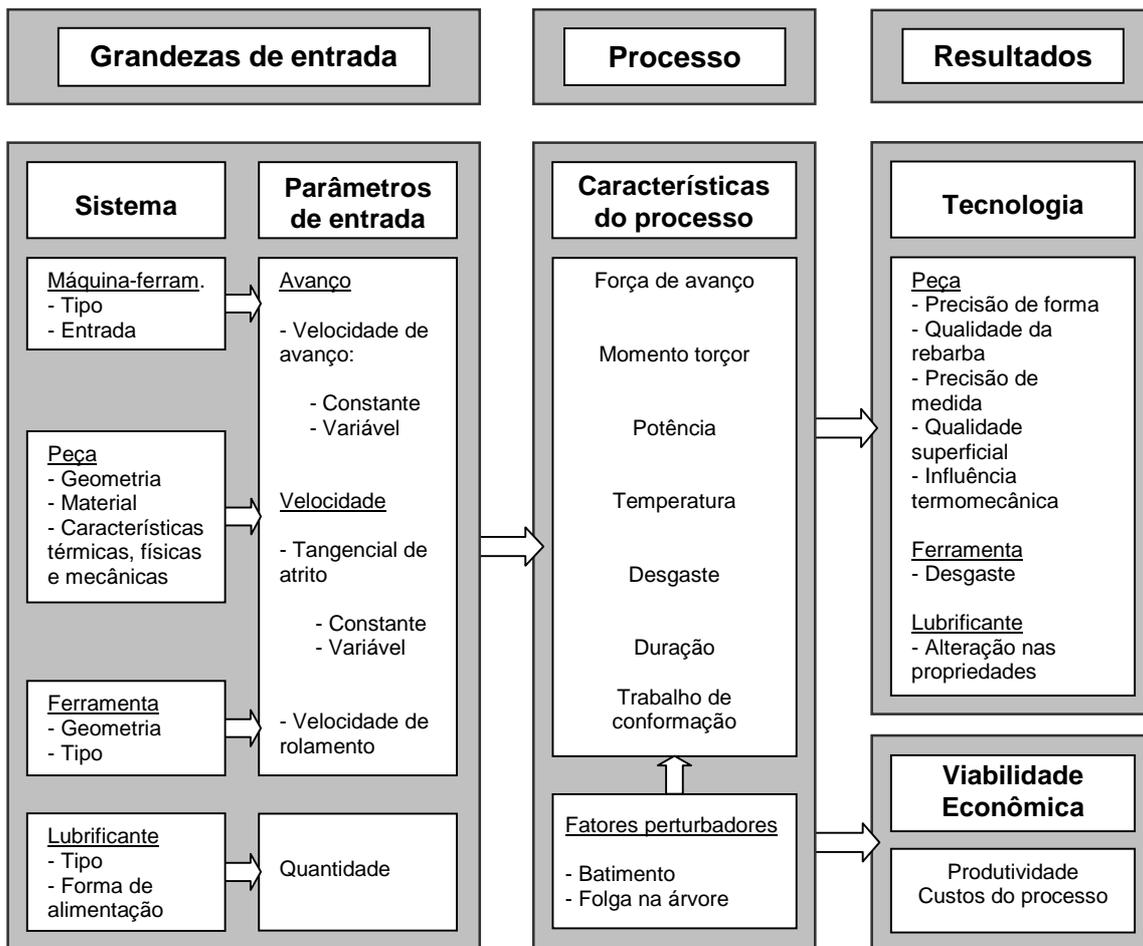
Atualmente a cinemática pode ser classificada em três casos distintos em função do movimento de penetração da ferramenta na peça. O primeiro caso considera o emprego de uma força " $F_f$ " externa constante. O segundo, refere-se a utilização de velocidade de avanço " $v_f$ " constante, sendo a força de avanço " $F_f$ " e o momento torçor " $M_t$ " variáveis ao longo do tempo e o terceiro, compreende o emprego de velocidades de avanço " $v_f$ " e rotação variáveis em processo, o que novamente implica em variação dos esforços durante a execução do furo. Com o estudo da cinemática do processo é possível determinar-se, não somente o comportamento dos esforços durante o transcorrer da operação, mas também o comportamento do material da peça que está sendo deformado, além do tempo de um determinado efeito.

Este trabalho apresenta a evolução da cinemática do processo de furação por escoamento descrevendo as fases características de cada caso.

## 2. TECNOLOGIA DO PROCESSO

Uma visão geral da furação por escoamento, suas diversas grandezas e resultados de trabalho, é apresentada na Tabela 1. As grandezas de entrada estão subdivididas em dois grupos principais: grandezas de sistema, cuja alteração não é imediata, e os parâmetros de entrada, que normalmente podem ser modificadas diretamente na máquina. As grandezas de processo e resultados de trabalho são variáveis dependentes das grandezas de entrada.

Tabela 1 - Principais grandezas e resultados de trabalho [Weingaertner, 1995]



### 3. FORÇA DE AVANÇO “ $F_f$ ” E MOMENTO TORÇOR “ $M_t$ ”

A força de avanço e o momento torçor são os esforços que atuam na ferramenta durante a execução do furo, como ilustrado na Figura 2, e variam basicamente em função das variáveis de entrada, da ferramenta e das características do material e da geometria da peça.

A força de avanço é a força necessária à penetração da ferramenta na chapa, sendo uma função da resistência mecânica do material, a espessura da chapa e ao diâmetro da ferramenta bem como das condições de trabalho. É a grandeza de maior influência na vida dos elementos da máquina-ferramenta, como mancais do eixo-árvore, suportes de ferramenta e outros [Duarte Filho, 1998].

A influência das condições de trabalho é significativa. Com o aumento da velocidade de avanço os níveis de força de avanço aumentam, em função da maior taxa de deformação axial imposta, diminuindo o tempo para a execução do furo. Com o aumento da rotação, a quantidade de energia fornecida ao material da peça por unidade volumétrica deslocada, resultante do trabalho de deformação radial, é aumentada, fazendo com que o material se torne plástico mais cedo, sendo conformado com baixos níveis de força de avanço.

O esforço contrário à rotação da ferramenta é o momento torçor, ou seja: é o torque a ser vencido pela potência de acionamento para a fabricação da bucha. O aumento do momento torçor indica que é fornecida uma maior parcela de energia para a execução da bucha [Duarte Filho, 1998].

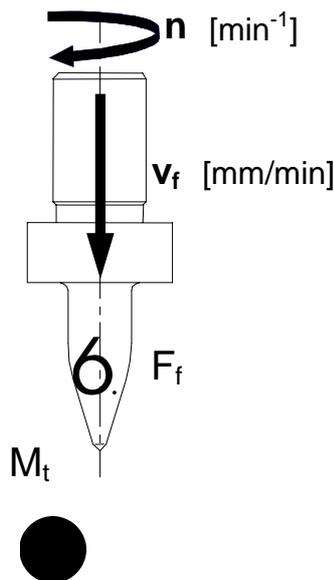


Figura 2 – Movimentos e esforços atuantes na ferramenta durante a furagem por escoamento [Duarte Filho, 1998]

O momento torçor depende basicamente das condições de trabalho, principalmente da velocidade de avanço, da rotação da ferramenta, bem como do material (composição química, resistência mecânica) e da espessura da chapa, de forma semelhante à força de avanço.

O comportamento tanto do momento torçor como da força de avanço devem ser considerados na análise da vida da ferramenta, já que os mecanismos de desgaste também dependem das solicitações mecânicas às quais a ferramenta é submetida [Lopes, 1994].

#### 4. CINEMÁTICA DO PROCESSO

A cinemática do processo de furagem por escoamento refere-se às condições de entrada que ditam o processo.

Tradicionalmente a cinemática do processo era classificada em dois casos distintos. No primeiro caso, considera-se a aplicação de uma força externa constante, e o segundo caso refere-se ao uso de um avanço constantes. Em ambos os casos a rotação é mantida constante durante o desenvolvimento do processo.

Com o uso de máquinas-ferramentas CNC, onde a rotação e a velocidade de avanço podem ser programadas de forma independente, há a possibilidade de uma terceira cinemática do processo de furagem por escoamento, onde a velocidade de avanço e a rotação podem ser variadas em processo [Duarte Filho, 1998].

##### 4.1. Força de avanço constante

Nas primeiras aplicações do processo em furadeiras radiais, de coluna ou de bancada, a ferramenta em rotação era pressionada contra a peça com uma força de avanço constante [Duarte Filho, 1998], função principalmente da força e do peso do operador. Desta forma a velocidade de avanço variava ao longo do tempo, dependendo do desenvolvimento do aquecimento e do escoamento do material [Lopes, 1994].

Como mostrado na Figura 3, a força de avanço atinge um valor limite superior, equivalente ao valor da força “ $F_f$ ” aplicada. À medida que o material é aquecido, a ferramenta penetra com maior facilidade e a força de avanço diminui [Lopes, 1994]. No início do processo, devido à pequena diâmetro de ação da ferramenta e ao pequeno volume deformado,

o momento torçor é pequeno. À medida que a ferramenta penetra na chapa o diâmetro de ação e o volume deformado aumentam, ocorre um aumento correspondente do momento torçor.

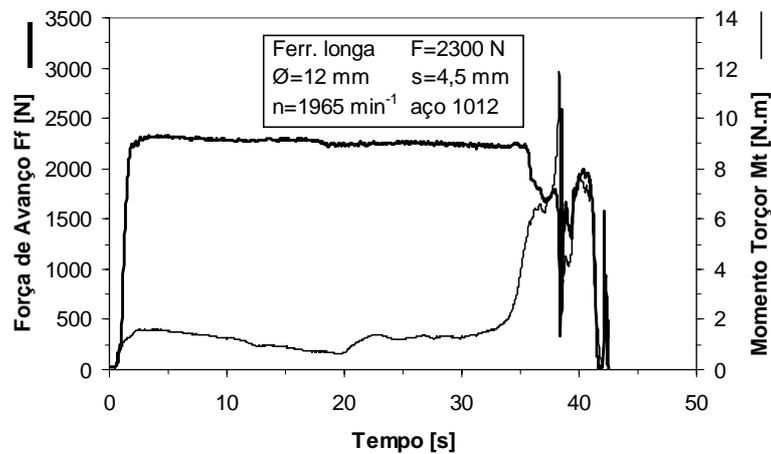


Figura 3 – Comportamento da força de avanço e do momento torçor em função do emprego de força de avanço constante [Lopes, 1994]

O trabalho com força de avanço constante era efetuado classicamente em máquinas convencionais sem mecanismo de avanço automático. O tempo de furação longo nestas condições torna o processo anti-econômico para lotes grandes [Duarte Filho, 1998].

#### 4.2. Velocidade de avanço constante

Velocidades de avanço constantes podem ser obtidas tanto em máquinas convencionais com sistema de avanço automático, como em máquinas CNC. A força de avanço, assim como o momento torçor, são variáveis ao longo do tempo, como mostrado na Figura 4.

Nestas curvas são definidos alguns pontos característicos, onde há nitidamente uma mudança de comportamento da força de avanço e do momento torçor. A partir destes pontos na curva de força de avanço são definidas as diferentes fases do processo.

##### I - Fase inicial

Na entrada da ponta da ferramenta na peça o material inicialmente escoava para cima da chapa e a força de avanço “ $F_f$ ” cresce linearmente. O momento torçor “ $M_t$ ” segue um comportamento semelhante, devido à crescente área de contato entre a ferramenta e a peça, mas defasado em relação à força de avanço. Na parte de baixo da chapa gradualmente se forma uma protuberância, como já mostrado na Figura 1.

##### II, III e IV- Fases de escoamento

Depois que o valor máximo de força de avanço “ $F_{f\text{máx}}$ ” é atingido, inicia o escoamento do material. Neste instante, a temperatura da peça foi suficientemente elevada a ponto de diminuir a resistência ao escoamento do material, ao longo da fase II. Após a ponta da ferramenta atravessar a chapa a força de avanço atinge o valor “ $F_{f1}$ ”, permanecendo neste patamar. Durante a fase II e em boa parte da fase III o momento torçor é crescente, atingindo o seu valor máximo “ $M_{tmáx}$ ” no final fase III ou no início da fase IV. Durante a fase IV, a medida que a parte cônica da ferramenta vai atravessando a chapa, a força de avanço diminui. O seu valor mínimo “ $F_{f2}$ ” no final desta fase determina o início da fase final.

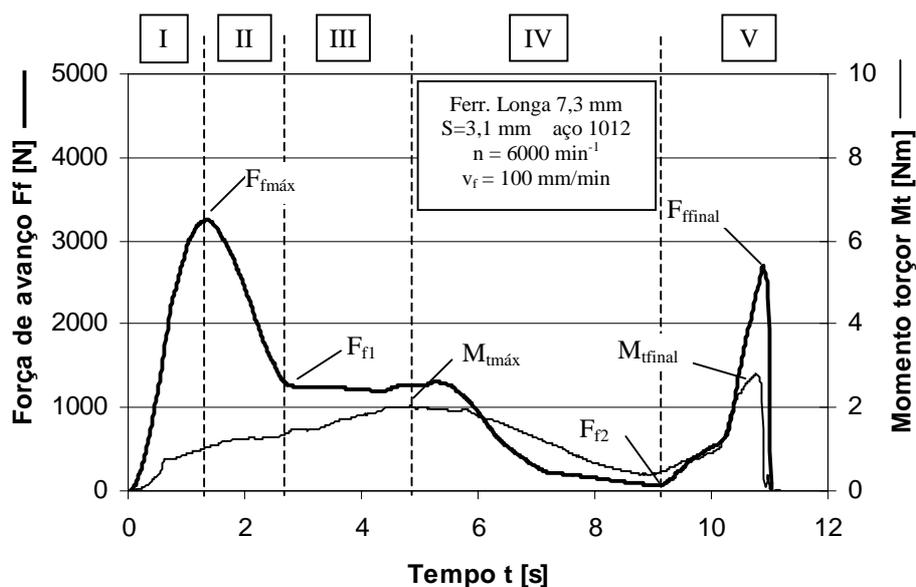


Figura 4 – Comportamento da força de avanço e do momento torçor em função do emprego de velocidade de avanço constante [Duarte Filho,1998]

## V - Fase final

A parte final da conformação da bucha se caracteriza pelo tratamento da rebarba superior, que pode ser retirada ou conformada. O contato dos gumes ou do colar na superfície da peça leva aos picos de força de avanço “ $F_{ffinal}$ ” e momento torçor “ $M_{tfinal}$ ”.

### 4.3. Parâmetros de entrada variáveis

Uma das novas tendências no uso da furação por escoamento refere-se à variação da velocidade de avanço, isoladamente ou em conjunto com a rotação, em máquinas CNC [Duarte Filho, 1998]. A diminuição do tempo principal de processo em até 75% em relação ao processo de furação por escoamento com velocidade de avanço constante e uma forma de bucha mais adequada, indica que melhores resultados de trabalho podem ser obtidos com esta nova abordagem na escolha das condições de trabalho [Heiler, 1995].

Por outro lado, o aumento na velocidade de avanço em processo elevam tanto a força de avanço quanto o momento torçor, o que por consequência exige uma maior potência de acionamento da máquina-ferramenta [Heiler, 1995].

Um aspecto particular das curvas características do processo com velocidade de avanço variável refere-se aos pontos de mudança da velocidade de avanço. Nestes pontos o aumento da força ou do momento é precedida por uma queda, decorrente da dinâmica do acionamento da máquina, que não permite uma aceleração instantânea [Duarte Filho, 1998].

#### a. Velocidade de avanço variável

O comportamento das curvas de força de avanço e de momento torçor para a furação por escoamento com velocidade de avanço e rotações variáveis em processo diferem do comportamento das curvas de força de avanço e de momento torçor para a furação por escoamento com velocidade de avanço constante. No gráfico da Figura 5 se destacam os picos “ $F_{fmáx}$ ” e “ $M_{tmáx}$ ” durante o período de aceleração da velocidade de avanço, notadamente mais elevados do que os apresentados pelo gráfico da Figura 4, com velocidade de avanço constante.

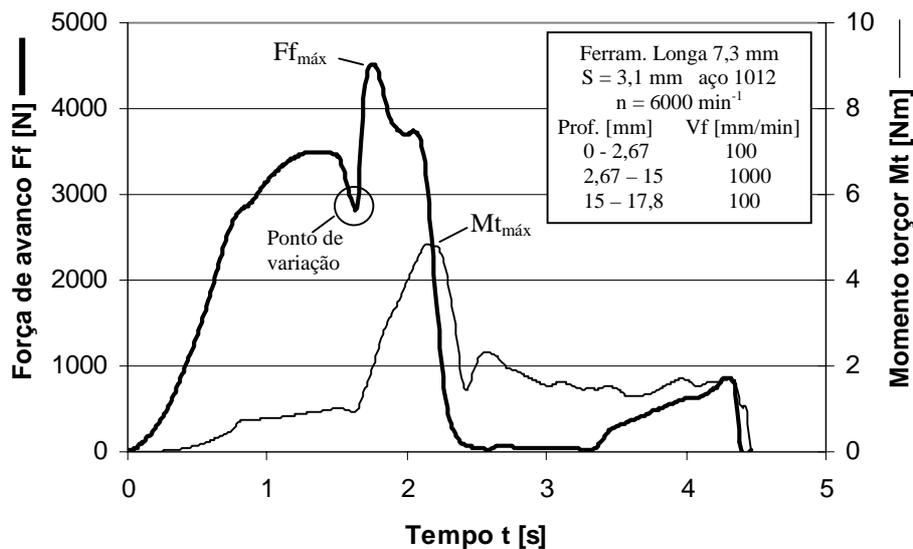


Figura 5 – Comportamento da força de avanço e do momento torçor em função do emprego de velocidade de avanço variável [Duarte Filho, 1998]

Os picos nos valores da força de avanço e do momento torçor são consequência direta do aumento da velocidade de deformação imposta ao material, o que eleva significativamente os esforços necessários para vencer a resistência do material ao escoamento, visto que a temperatura do material deformado, na média não se eleva na mesma proporção [Duarte Filho, 1998].

### b. Rotação e velocidade de avanço variáveis

A Figura 6 mostra o comportamento da força de avanço e momento torçor com a variação da rotação e da velocidade de avanço em processo.

Observa-se a mudança característica do comportamento da curva de força de avanço, em função tanto da diminuição da rotação como do aumento da velocidade de avanço em processo.

Nesta condição os valores tanto da força de avanço “ $F_{f\text{máx}}$ ” quanto do “ $M_{t\text{máx}}$ ” atingiram valores mais elevados em comparação com o gráfico da Figura 5. Estes aumentos se deram em função do aumento da velocidade de avanço e da diminuição da rotação da ferramenta. Esta combinação promove um menor aquecimento e um aumento na velocidade de deformação do material.

Nesta amostra também são visíveis, pela queda nos valores de “ $F_f$ ” e “ $M_t$ ”, os pontos de mudança de rotação e velocidade.

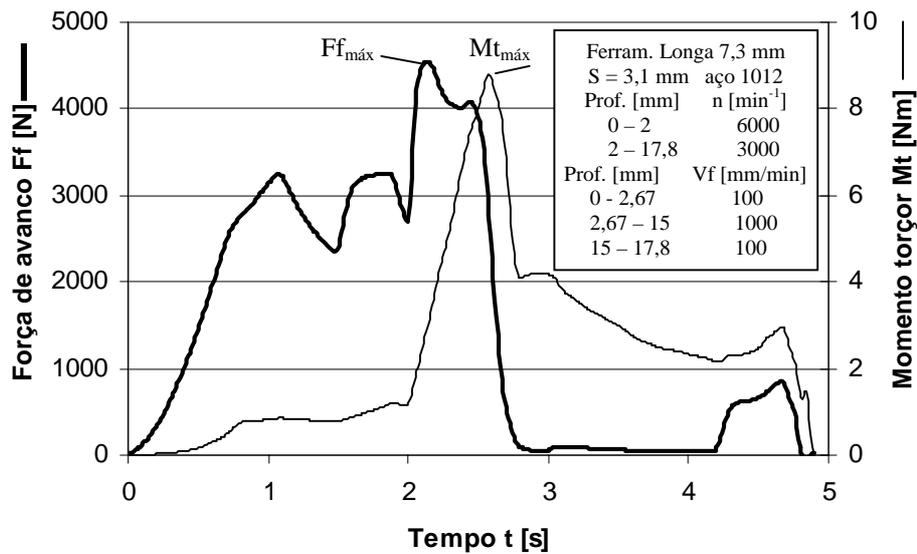


Figura 6 – Comportamento da força de avanço e do momento torçor em função do emprego de rotação e velocidade de avanço variáveis [Duarte Filho, 1998]

## 5. CONCLUSÕES

A evolução das máquinas-ferramentas empregadas na furação por escoamento permitiu modificações no processo, com a redução do tempo principal e alterações na cinemática.

A intensidade e o tempo dos fenômenos térmicos e mecânicos relacionados com o processo são função dos parâmetros de trabalho empregados, sejam eles constantes ou variáveis.

De uma maneira geral, quando do emprego de condições constantes em processo, tem-se valores de força de avanço e momento torçor menores, conseqüência da maior temperatura alcançada na região de deformação.

O comportamento das curvas de força de avanço e momento torçor permitiu avaliar os fenômenos que ocorrem na região de deformação.

## REFERÊNCIAS

- Weingaertner, W. L., Lopes, J. C. O. Fließlochformen und Gewindefurchen -Erfahrungen auf konventionellen Werkzeugmaschinen. In: Seminar : Fließlochformen und Gewinden: Berichte aus Wissenschaft und Praxis, 1., 12 out., 1995, Kassel, Alemanha. Anais ..., Kassel : IPL-GhK, 1995, não paginado.
- Lopes, J. C. O. Furação por escoamento e rosqueamento por conformação. Florianópolis, UFSC, 1994. 212 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.
- Duarte Filho, O. C. Estudo microestrutural e de capacidade de carga na furação por escoamento com condições de trabalho variáveis em processo. Florianópolis, UFSC, 1998. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.
- Heiler, R. Fließlochformen und Gewindefurchen auf CNC-Werkzeugmaschinen. In: Seminar - Fließlochformen und Gewinden: Berichte aus Wissenschaft und Praxis, 1, 12 out., 1995, Kassel, Alemanha, Anais..., Kassel : IPL, 1995, não paginado.

## **FLOWDRILLING KINEMATIC EVOLUTION**

**Abstract.** *The flowdrill kinematics has undertaken important alterations since its introduction as a manufacturing process in the industries. The kinematic is characterized by the behavior of the feed force and moment generated during the flowdrilling, in dependence of variables entrance. The kinematic can be classified in three different cases. These cases are a function of the tool penetration movement in the workpiece. The first one consisted of a constant feed force and rotation. The second case refers to the use of constant feed rate and rotation, resulting on a variable feed force and moment during flowdrilling. The third case has variable feed rates and rotation on process, which implies in a variation of the efforts during flowdrilling execution. The characteristic phases of each case and its influence on the behavior of feed forces and moments are described in this paper.*

**Keywords:** *Flowdrilling, Plastic deformation, Kinematics.*