

2.6 Processos de Formação de Cavaco com Altíssima Velocidade de Corte

A maior parte dos modelos de mecanismos de corte em HSM para metais baseiam-se através da determinação da temperatura, ou a distribuição desta durante o processo do corte, e então têm-se a chave para determinar outros fatores.

A viabilização da temperatura como agente principal de novos conceitos de usinagem é, curiosamente, o início de todo o estudo da usinagem com altíssima velocidade de corte: Salomon (1931) sugeriu o estudo neste sentido por imaginar que as temperaturas envolvidas diminuiriam após um máximo, quando se aumentasse a velocidade de corte; McGee (1979) o contradisse, provando que a temperatura simplesmente aumentava. Todavia, ambos imaginavam, a princípio, que a temperatura seria a chave que conduziria a compreensão deste novo processo de remoção de material.

Shaw (1986) sugere em sua obra clássica, que a temperatura no plano de cisalhamento seja a mais importante para todas as usinagens. Os motivos para tal seriam que esta influi na temperatura da face da ferramenta e também na temperatura de superfície de alívio.

Este mesmo autor segue afirmando que "toda a energia associada à formação do cavaco é convertida em energia térmica" e que a "energia retida nos cavacos e aquela associada com a geração de uma nova superfície são negligíveis quando comparadas à energia associada à formação do cavaco".

Portanto, culmina sua teoria sobre a temperatura na usinagem de metais com a seguinte expressão para a temperatura média:

$$\Delta T \propto u \sqrt{\frac{V_c \cdot a}{k \cdot r \cdot C}} \quad (1)$$

Esta expressão foi largamente utilizada por outros autores em seus ensaios e provou-se válida para diversas condições com velocidades de corte convencionais. Entretanto, sugere que valores baixos do produto $k \cdot r \cdot C$ fariam a temperatura subir em velocidades e avanços relativamente baixos.

Obras mais recentes, como a de Kitagawa et al. (1997), sugerem que o fator dominante na análise da temperatura em um processo de HSM não seria a temperatura média sugerida por Shaw, mas valores de temperatura discretos obtidos a partir de modelos numéricos, utilizando a seguinte expressão para a transferência de calor:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \mathbf{k} \cdot \nabla^2 T - \vec{V} \cdot \nabla T + \frac{q}{\mathbf{r} \cdot C} \quad (2)$$

Através do método de Bishop obtêm-se as seguintes expressões para variação de temperatura no plano de cisalhamento e da temperatura na interface cavaco-ferramenta:

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_{CIS} &= \frac{t_{PLA} \cdot V_{CIS} \cdot \Delta t}{J \cdot \mathbf{r} \cdot C \cdot h} \\ \Delta T_{INT} &= \frac{t_{FER} \cdot V_{CAV} \cdot \Delta t}{J \cdot \mathbf{r} \cdot C \cdot h} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

O produto $\overline{\mathbf{r} \cdot C}$ indica uma média entre os diferentes meios. Este tipo de modelagem, aliado a conceitos de mecanismos de abrasão e outras formas de desgaste, contribuem não somente para criar modelos de formação de cavaco em HSM, mas também para entender critérios de vida útil de ferramentas para este tipo de processo.

O que tem sido observado é a tendência das últimas publicações por modelagens utilizando elementos finitos para a compreensão deste fenômeno. Toenshoff et al. (1999) defendem em suas pesquisas que a HSM se caracteriza por forças de corte

constantes, formações de cavaco segmentadas, taxas de compressão do cavaco baixas e profundidade de deformações mínimas.

Sandstrom & Hodowany (1998) propõem que as forças de corte tenham um comportamento dinâmico, contrariando Toenshoff et al. (1999), além de escoamento plástico não restringido durante a formação do cavaco, que pode ser considerado uma observação equivalente às baixas taxas de compressão sugeridas por Toenshoff et al.

Uma metodologia muito útil para estimar a tensão de escoamento e o atrito no contato cavaco-ferramenta é sugerida por Fallböhmer et al. (2000): na usinagem com altíssimas velocidades de corte atingem-se taxas de deformação e temperaturas extremamente altas e o comportamento da tensão de escoamento do material nestes regimes geralmente é desconhecido (assim como as condições de atrito no contato cavaco-ferramenta são difíceis de prever, uma vez que atritos de deslizamento e de adesão ocorrem simultaneamente), com isso adota-se a seqüência da Figura 16.

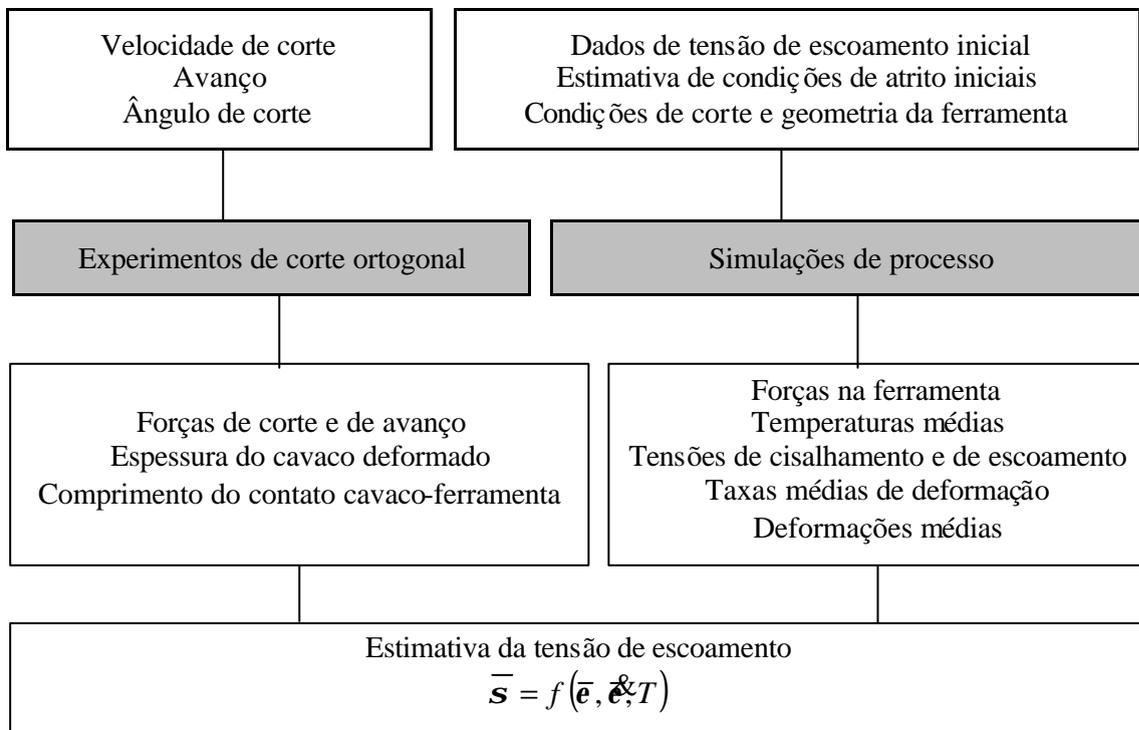


Figura 16: Metodologia para determinação da tensão de escoamento na peça e do atrito na interface cavaco-ferramenta (adaptado de Fallböhmer et al., 2000).

Os autores em questão utilizam o seguinte modelo matemático para representar a tensão de escoamento sob as condições de usinagem:

$$\bar{\sigma} = K \cdot \left(e^{a \cdot T} + A \cdot e^{b \cdot (T - T_0)^2} \right) \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_R} \right)^c \cdot (\bar{\epsilon})^d \quad (4)$$

Neste caso, os coeficientes a, b, c, A, K e T_0 são identificados através da aplicação do método dos mínimos quadrados sob diferentes parâmetros obtidos.

Outro modelo de mecanismo de formação de cavaco para aços em HSM é o proposto por Poulachon & Moisan (1998). Este é sumariamente descrito abaixo:

Para uma ferramenta de largura suficiente e ângulo de corte negativo, o estado de deformação na peça imediatamente atrás da ferramenta pode ser considerado como um estado plano quando se encontra em uma situação de corte ortogonal. Os níveis de constrição mais elevados se encontram em uma zona ao redor do raio da ferramenta. Na superfície da peça antes do "chanfro" gerado pela ferramenta a constrição desaparece (submetida somente a pressão atmosférica).

Os níveis baixos de tensão de compressão logo abaixo da superfície em conjunto com grandes tensões de cisalhamento provocam uma trinca que se desenvolve em direção à superfície, onde a constrição crítica de cisalhamento alcançou primeiro.

Esta trinca propaga-se em direção ao corte da ferramenta até o momento no qual esta ruptura evolui para uma distorção plástica. As diferentes fases de geração de um cavaco segundo este modelo são apresentadas nas figuras seguintes:

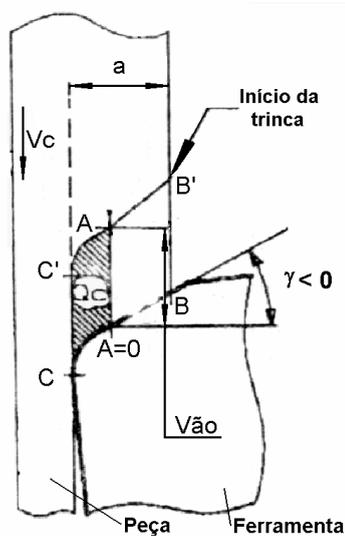


Figura 17: Primeira fase da formação de um cavaco segundo o modelo de Poulachon & Moisan (adaptado de Poulachon & Moisan, 1998).

Para a primeira fase, quando a constrição de cisalhamento crítica é alcançada, uma trinca surge de repente. Esta se desenvolve seguindo o ataque da ferramenta. Seu comprimento relativamente importante corresponde à parte do cavaco que não foi submetida a praticamente nenhuma distorção.

Micrografias efetuadas durante um teste de corte interrompido provam que realmente existe uma trinca antes da aparição do segmento do cavaco.

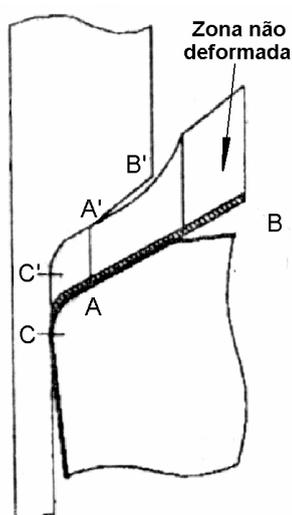


Figura 18: Segunda fase da formação de um cavaco segundo o modelo de Poulachon & Moisan.

Após o aparecimento da trinca, entrando na segunda fase, o volume do cavaco AA'BB' situado entre a trinca e o chanfro da aresta é ejetado para fora praticamente sem deformação.

Este então se desloca de forma que o vão AA' se fecha novamente conforme avança a ferramenta, fazendo neste caso a altura do cavaco diminuir assim como o vão AA'.

As velocidades de deslizamento do cavaco sobre a face de corte e à junção da trinca no ponto A' gerarão uma elevação de temperatura importante. Esta elevação de temperatura irá produzir a martensita de contato ou de atrito, comum em casos como as superfícies geradas através de HSM: o atrito intenso entre a face em repouso e a superfície fabricada acusam a importância do esforço da força de avanço neste modelo.

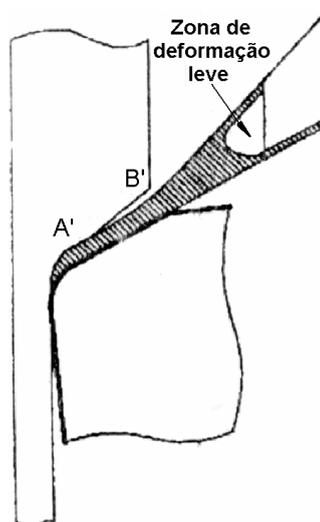


Figura 19: Terceira fase da formação de um cavaco segundo o modelo de Poulachon & Moisan.

O vão AA' está praticamente fechado na fase 3, deixando pouco espaço para a evacuação do volume de cavaco restante. Neste estágio verificam-se grandes deformações plásticas e altas velocidades de ejeção do cavaco.

A elevação de temperatura é muito importante, permitindo que as duas faixas de martensita que vão de encontro se juntem para formar a segunda parte do cavaco, que representa um terço do volume total.

Em alguns casos, a espessura do cavaco, por ser muito fraca, admite um resfriamento excessivamente rápido, podendo levar a uma zona de transformação adiabática.

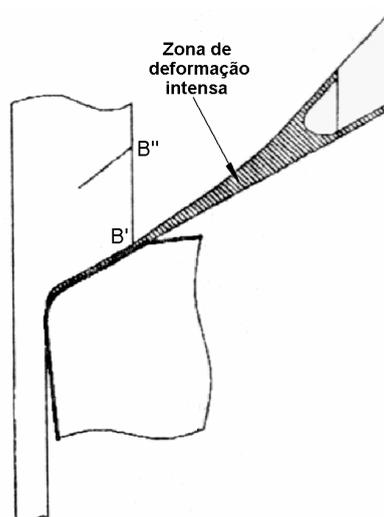


Figura 20: Quarta fase da formação de um cavaco segundo o modelo de Poulachon & Moisan.

Na quarta e última fase de formação de cavaco deste modelo, o segmento de cavaco é formado e é praticamente barrado no intervalo livre que existia entre a trinca e o interior do cavaco, devido à deformação plástica elevada.

O campo de tensões de compressão que havia diminuído durante as fases dois e três se torna máximo novamente, gerando uma nova trinca e o fenômeno cíclico se repete.

Outros estudos para outros mecanismos de formação de cavaco também são compatíveis entre si e com os apresentados anteriormente. Sutter et al. (1998), através de estudos experimentais de formação do cavaco em HSM, em condições

quasi-estacionárias, propõe a existência de uma velocidade de corte ótima, em que o consumo de energia seja mínimo.

Outros autores vão mais além na concepção de seus modelos. Marusich & Ortiz (1995), enquanto estudavam a formação do cavaco gerado por altíssimas velocidades de corte através de um modelo Lagrangeano de elementos finitos, consideram inícios de trincas tanto dúcteis como frágeis.

Estes últimos autores defendem a criação de um critério de fratura para o material usinado, propondo que o material possa se deformar e escoar livremente ao redor do raio da ferramenta, fraturando somente ao satisfazer o critério.

Por fim, uma consideração interessante sobre mecanismos de formação de cavaco em HSM é ressaltada por Hamann et al. (1994), quando estudavam a formação e a estabilidade da transferência seletiva de camadas postiças de sulfeto de manganês (MnS) para melhoria da usinabilidade de aços inoxidáveis austeníticos resulfurizados. A camada do composto MnS age como um lubrificante no contato da ferramenta com a peça.

Diferentemente do fenômeno conhecido como "aresta postiça", o mecanismo de transferência seletiva de camadas postiças ocorre dentro da camada de fluxo, e no caso estudado por estes autores, a espessura da camada presa na ferramenta é razoavelmente constante e muito menor que uma aresta postiça. Além disso, não existe um espaço entre a face da ferramenta e o fundo do cavaco, caracterizando uma camada postiça.

Hamann et al., ainda que utilizassem hipóteses conservadoras para análise da formação do cavaco sob altíssima velocidade de corte, concluem que, além da transferência seletiva de camadas postiças reduzir o atrito na interface ferramenta-peça, pode-se estabelecer uma analogia entre três grandezas neste caso da usinagem.

O coeficiente de atrito da face da ferramenta, a transferência seletiva de camadas postiças (e arestas postiças) e as regiões lubrificadas através de fluidos podem ser agrupadas e correlacionadas, variando-se a velocidade de corte.

Neste caso estudado por Hamann et al. há a conveniência da possibilidade da formação do composto MnS, todavia ilustra como é o comportamento da grande magnitude da movimentação de massa em usinagens deste tipo.

Este fenômeno pode ser melhor compreendido ao se observar a figura 21.

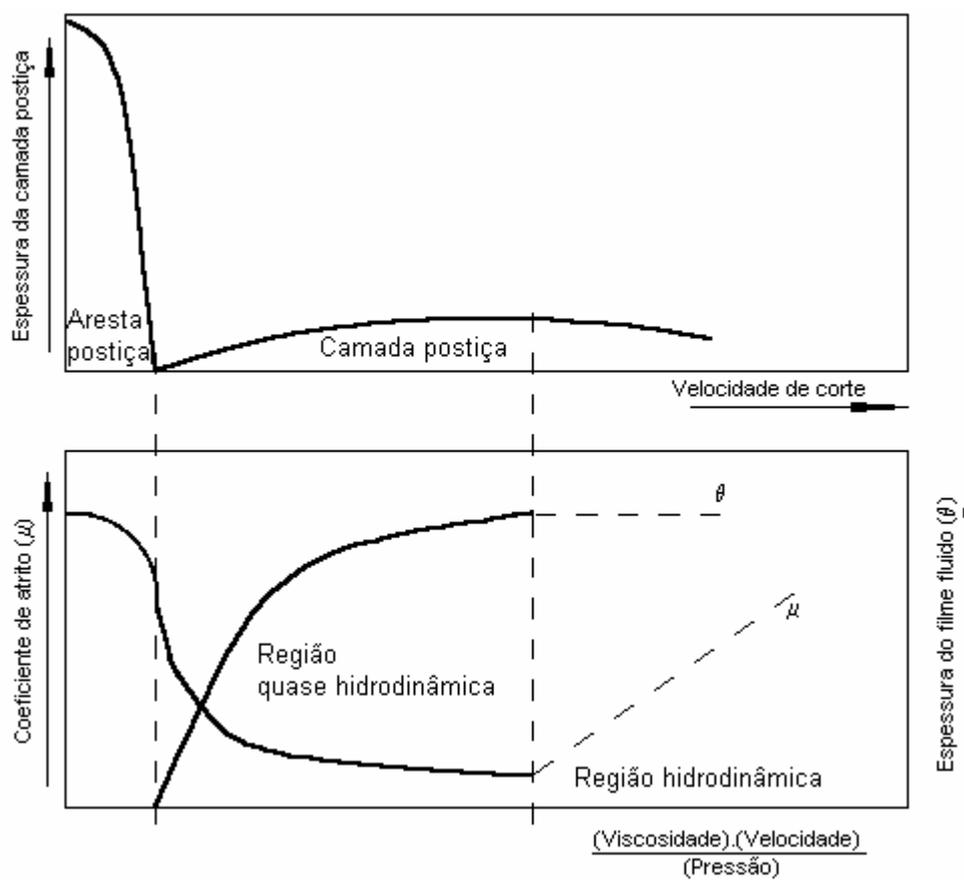


Figura 21: Analogia entre espessura da transferência seletiva de camadas postiças e das regiões lubrificadas pelo filme fluido (adaptado de Hamann et al., 1994).

Sob altas velocidades de corte, estes autores defendem que, para o material ensaiado, pode-se uma condição de lubrificação hidrodinâmica para o corte, que

caracteriza um baixo atrito e baixo desgaste de ferramenta. Mais ainda, existe uma extensa região quase hidrodinâmica de lubrificação que também pode ser aproveitada para obtenção de parâmetros otimizados de usinagem.

Desta maneira, assim como os outros modelos de processos de formação de cavaco para este tipo de usinagem, vantagens únicas de processo podem ser viabilizadas e diversos fenômenos podem ser explicados. A importância da criação e aplicação destes mecanismos é cada vez maior, por envolver todos os itens de processo da usinagem em seu momento mais elementar.