

## **TORNEAMENTO A QUENTE DE UM AÇO DE DIFÍCIL USINAGEM AUXILIADO POR RADIAÇÃO INFRAVERMELHA**

**Luiz Eduardo de Angelo Sanchez<sup>1</sup>, sanchez@feb.unesp.br**  
**Hamilton José de Mello<sup>2</sup>, hamilton@feb.unesp.br**  
**Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves<sup>3</sup>, gilberto@feb.unesp.br**  
**Arthur Alves Fiochi<sup>4</sup>, arthuraf@feb.unesp.br**

<sup>1,2,3,4</sup>Universidade Estadual Paulista - Unesp, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CEP 17033-360, Bauru-SP

**Resumo:** Um dos grandes problemas encontrados na usinagem relaciona-se ao desgaste da ferramenta de corte, uma vez que a redução de sua vida acarreta aumento dos custos de fabricação, não só pelo valor unitário da ferramenta, mas também pelo tempo consumido na interrupção da operação. Um dos importantes caminhos para o aumento da vida da ferramenta aponta para o desenvolvimento de materiais mais resistentes ao desgaste, como as pastilhas de PCBN. No entanto, o custo unitário destas ferramentas é consideravelmente alto, cerca de 10 a 20 vezes ao da pastilha de metal duro revestida, além de que seu melhor desempenho se dá à altas velocidades exigindo modernas máquinas-ferramentas. Outra opção, menos estudada, é o aquecimento da peça com a finalidade de diminuir as tensões de cisalhamento e conseqüentemente reduzir as forças de usinagem, o que permite um aumento da vida da ferramenta. Neste trabalho são utilizadas resistências elétricas em quartzo, de baixo custo, colocadas em torno da peça aquecendo-a durante a operação de torneamento. Nos ensaios é utilizado um aço inoxidável austenítico nitrogenado resistente ao calor e endurecível por precipitação para uso na fabricação de válvulas de exaustão de motores de combustão interna. Como parâmetros de saída são obtidos o comportamento da força de usinagem em função da profundidade de corte, avanço e velocidade de corte. Também são analisados o desgaste da ferramenta e a rugosidade dos corpos-de-prova. De maneira geral, os resultados mostram que na usinagem a quente tem-se um aumento na vida da ferramenta e uma melhora no acabamento superficial da peça, enfatizando ainda que a força e potência de usinagem na operação a quente são mais baixas do que na operação convencional, especialmente sob condições mais severas de torneamento, ou seja, sob maiores taxas de remoção de material. Adicionalmente, são comparadas as microestruturas e os cavacos formados nas peças usinadas a quente e de maneira convencional sendo encontradas algumas diferenças na deformação da estrutura do material na camada mais externa da peça.

**Palavras-chave:** usinagem a quente, vida de ferramenta, força de usinagem, rugosidade

### **1. INTRODUÇÃO**

A crescente busca da indústria metal-mecânica por materiais metálicos de melhores propriedades mecânicas têm levado ao desenvolvimento de aços especiais, os aços ligas, de elevada resistência mecânica, alta dureza, resistência a quente, resistência à corrosão, entre outras. Apesar das diversas características positivas, esses materiais geralmente apresentam grandes dificuldades em serem usinados, causando acentuado desgaste das ferramentas de corte, alta força de usinagem e baixa taxa de remoção de material (Chen & Lo, 1974). Para contornar esses problemas a peça pode ser submetida a processos de tratamentos térmicos antes e depois da usinagem visando o coalescimento e refinamento dos grãos, respectivamente ou, então, tentar empregar ferramentas de corte superabrasivas na usinagem, o que exige máquinas mais rígidas. Em ambas alternativas os custos de fabricação da peça podem inibir ou mesmo inviabilizar o emprego desses materiais (Chou, 1988).

Além da dificuldade na usinagem, a peça acabada pode conter defeitos superficiais e/ou subsuperficiais como microtrincas, aliadas à queima superficial, decorrentes das transformações microestruturais na camada mais externa da peça e invariavelmente atingindo também regiões abaixo dela. Tais defeitos são deletérios tanto à resistência mecânica da peça quanto ao acabamento superficial podendo, naturalmente, comprometer ou mesmo inviabilizar a peça em serviço (Sullivan & Smith, 1977 e Yen, 1986).

Na tentativa de melhorar a usinabilidade dos materiais de difícil usinagem, alguns pesquisadores como Salem et al. (1995), Vali et al. (1998) e Wang (2002), utilizam a técnica de aquecimento de uma camada da peça imediatamente antes de sua remoção pela ferramenta de corte com o auxílio da energia laser incidindo sobre a superfície da peça. Com

o feixe luminoso de alta densidade de energia consegue-se o amolecimento do material e sua fácil remoção pela ferramenta de corte, com menor esforço do que na usinagem convencional e conseqüente aumentos da vida da ferramenta e taxa de remoção de material. Em contrapartida, o alto custo da técnica de usinagem a laser praticamente inviabiliza seu uso, além de exigir grande espaço físico ao redor da máquina-ferramenta.

Na tentativa de diminuir o custo da usinagem a quente alguns pesquisadores como Hinds & De Almeida (1981), Kitagawa & Maekawa (1990) e Madhavulu & Ahmed (1994) utilizam a energia produzida por um plasma com atmosfera de argônio para aquecimento da peça. Ao que pese o menor custo em relação ao laser esta técnica exige equipamento de alto consumo de energia, como uma fonte de gás e um sistema de refrigeração, além de também exigir um considerável espaço físico em torno da máquina-ferramenta.

Segundo Mielnik (1994), a usinagem a quente pode ser definida como um processo de remoção de material, com ferramenta de corte sólida, no qual a peça é cortada depois de aquecida a centenas de graus Celsius acima da temperatura ambiente por uma fonte de calor externa. Com isso, são abaixadas as tensões de cisalhamento de materiais de alta resistência mecânica e de difícil usinagem.

Mielnik (1994) acrescenta que esta definição exclui os processos nos quais não ocorrem formações de cavacos, não utilizam ferramentas de cortes, ou a remoção ocorre sem contato físico. Também se excluem os processos de usinagem de alta velocidade, no qual a geração de calor é generalizada na peça. Neste caso, a ação da ferramenta é a causa da elevação de temperatura, e ela sofre a conseqüência através da aceleração do seu desgaste, enquanto que na usinagem a quente existe uma fonte externa que auxilia na elevação da temperatura.

O processo de usinagem a quente pode ser considerado antigo. Mielnik (1994) cita que uma patente da idéia de aquecer a peça antes da usinagem por uma corrente elétrica de alta intensidade entre a peça e a ferramenta foi concedida a B. C. Tilghman em 1889. Uma segunda patente sobre usinagem a quente foi emitida a M. Berliner em 1946.

Krabacher & Merchant (1951) notaram em seus testes o aumento na vida da ferramenta quando se aumentava a temperatura da superfície da peça usinada. Geralmente, observava-se que o aumento da vida ocorria até uma determinada temperatura limite, e que em temperaturas acima desta a vida da ferramenta diminuía. (Mukherjee & Basu, 1973). A Figura (1) demonstra a relação entre a vida da ferramenta e a temperatura na peça. Krabacher & Merchant (1951) justificaram que acima da temperatura crítica o material da ferramenta de corte perdeu dureza facilitando o seu desgaste. Enquanto que Shaw (1951) atribuiu essa diminuição da vida à tendência do material endurecer. Ele observou que o coeficiente de encruamento, bem como a tensão de escoamento, diminui com o aumento da temperatura.

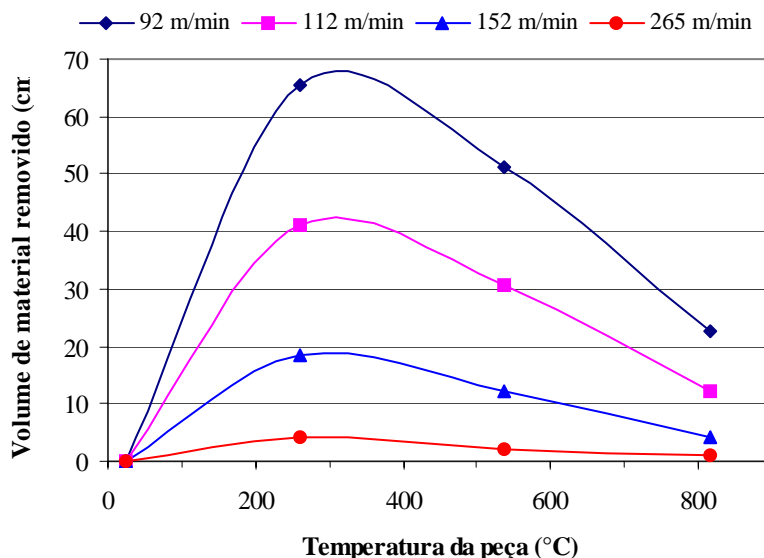


Figura 1. Vida da ferramenta em função da temperatura da peça (Krabacher & Merchant, 1951).

Quanto à fonte de aquecimento da peça, os tipos encontrados são: forno; resistência elétrica; chama; indução eletromagnética; arco elétrico; corrente elétrica entre a ferramenta e a peça; arco de plasma; e Laser (LAM – “Laser Assisted Machining”). O aquecimento com feixe de elétrons tem sido proposto, mas o seu uso ainda é inviabilizado pelo alto custo do equipamento que obriga a formação de vácuo ao redor da peça (Rozzi et al 2000).

Atualmente, nota-se que os processos mais utilizados são: corrente elétrica entre a peça e a ferramenta, principalmente para baixas taxas de remoção de material; arco de plasma, para operações com altas taxas de remoção; e laser (LAM).

Barrow (1969) divide as técnicas de aquecimento em dois grupos: aquecimento distribuído; e aquecimento localizado. No aquecimento distribuído, a peça toda ou uma parte considerável dela é aquecida, quando se utiliza como fonte de calor um forno, chama, ou resistências, por exemplo. As principais desvantagens destas técnicas são as distorções provocadas pela dilatação térmica do material durante o resfriamento, o aquecimento lento e os riscos aos operadores. Estas técnicas são relativamente baratas e simples, e têm sido utilizadas em aplicações restritas na indústria. Já no aquecimento localizado, o calor é concentrado numa camada da peça imediatamente antes da sua remoção pela

ferramenta de corte. Neste tipo é que estão concentradas as pesquisas mais recentes, nas quais estão incluídos os processos indutivos, o arco de plasma ou de carbono. Em geral, estas técnicas obtêm melhores resultados que as de aquecimento distribuído, porém tendem a serem mais caras e difíceis de aplicar nas condições industriais.

O alvo da usinagem a quente é sua aplicação em materiais de difícil usinagem como: materiais duros, materiais frágeis, peças recobertas com deposição metálica, ou aços que absorveram em suas superfícies sílica ou escórias. Estes tipos de materiais são extremamente prejudiciais às ferramentas em processos de usinagem convencional.

Para aquecimento das peças usinadas nos experimentos, os pesquisadores utilizaram diversos tipos de fontes de calor, sendo que cada uma delas apresentou suas vantagens e desvantagens. Uma constatação comum aos métodos utilizados é que cada material usinado possui um valor limite de temperatura até o qual verifica-se aumento da vida da ferramenta e acima deste valor a vida diminui. O que determina este valor limite são as propriedades de cada material da peça.

Apesar do número considerável de pesquisas sobre os métodos de usinagem a quente, as suas aplicações na indústria são limitadas, pois o alto custo dos dispositivos para aquecimento e o espaço necessário em torno das máquinas-ferramentas não estimulam a adoção deste método. Porém, a quantidade de pesquisas neste assunto vem aumentando significativamente, principalmente com a adoção do arco de plasma e do laser, a fim de viabilizar a fabricação de peças com materiais de difícil usinabilidade, como as cerâmicas avançadas e os aços de alta resistência. Atualmente, estes materiais são usinados preferencialmente por processos abrasivos, que apresentam baixa taxa de remoção de material em relação à usinagem com ferramenta de geometria definida, como no torneamento.

Como alternativa aos sistemas de usinagem auxiliados pelo aquecimento da peça desenvolvidos até o momento, busca-se um que dentre suas características tenha simplicidade de funcionamento, baixo custo e pequena intrusividade, ou seja, uma menor ocupação de espaço sobre a máquina-ferramenta e ao redor dela. Atualmente, existe a possibilidade de empregar uma fonte de calor gerada por resistência elétrica feitas em quartzo, a qual emite exclusivamente radiação infravermelha, tendo a importante propriedade de aquecer somente corpos opacos e não a atmosfera transparente, ou mesmo translúcida, ao seu redor.

Este trabalho tem como objetivo geral a avaliação do emprego de resistências elétricas em quartzo no torneamento a quente de um aço de difícil usinagem. Para isso são analisados o desgaste da ferramenta de corte, a força de usinagem, a rugosidade, a microestrutura dos corpos-de-prova usinados e a formação de cavaco em diversas condições de usinagem.

## 2. CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

O experimento consistiu, basicamente, no torneamento de um corpo-de-prova aquecido por três resistências elétricas em quartzo. Sob diferentes condições de usinagem foram analisados o desgaste da ferramenta de corte, a rugosidade, as componentes da força de usinagem, a microestrutura dos corpos-de-prova usinados e a forma dos cavacos gerados. Inicialmente, antes da usinagem com cada condição selecionada, o corpo-de-prova foi mantido em rotação e aquecido o tempo suficiente para atingir a temperatura de ensaio. Com a temperatura estabilizada, procedeu-se o torneamento, no qual ao final de cada passe mediu-se o desgaste da ferramenta, a rugosidade e coletado os cavacos produzidos. A Figura 2 ilustra esquematicamente o experimento.

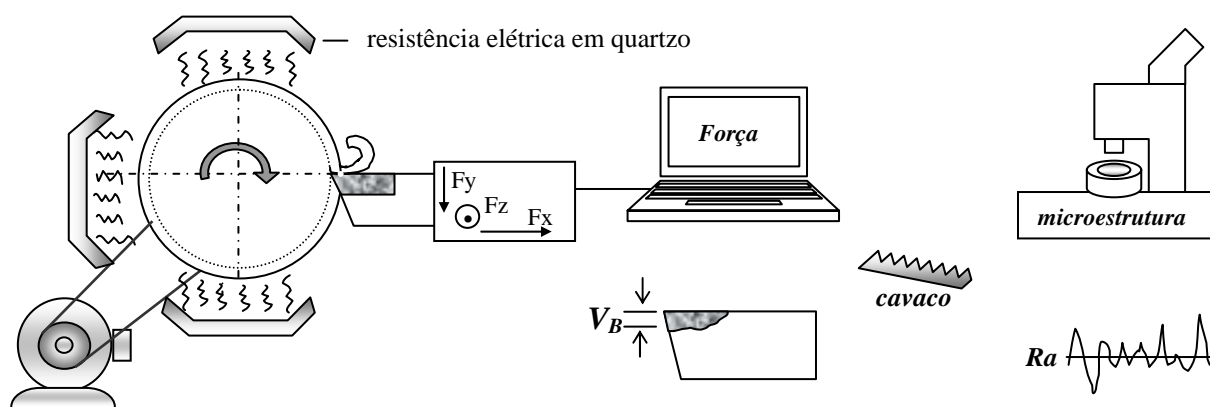


Figura 2. Esquema ilustrativo do experimento.

### 2.1 Recursos materiais

A máquina ferramenta usada foi um torno convencional com potência de 7,5 kW e faixa de rotação de 45 a 2240 rpm. Nesta máquina foi montado um dinamômetro piezelétrico Kistler, modelo 9257BA, que mede três componentes da força de usinagem. O amplificador de carga do dinamômetro foi conectado a uma placa de aquisição A/D e os dados lidos pelo “software” LabView 6.1, no qual selecionou-se uma taxa de amostragem de 200 pontos/segundos.

Para o aquecimento do corpo-de-prova utilizou-se três resistências em quartzo de 500 Watts de potência cada uma, modelo FTRZ 500/125 da Eletrothermo. As resistências, que produzem radiação infravermelha, foram montadas a uma distância de 10 mm da superfície do corpo-de-prova. A Figura 3 mostra a operação de torneamento com o sistema de aquecimento, que conta com uma proteção contra a entrada de cavacos a fim de não danificar as resistências instaladas.

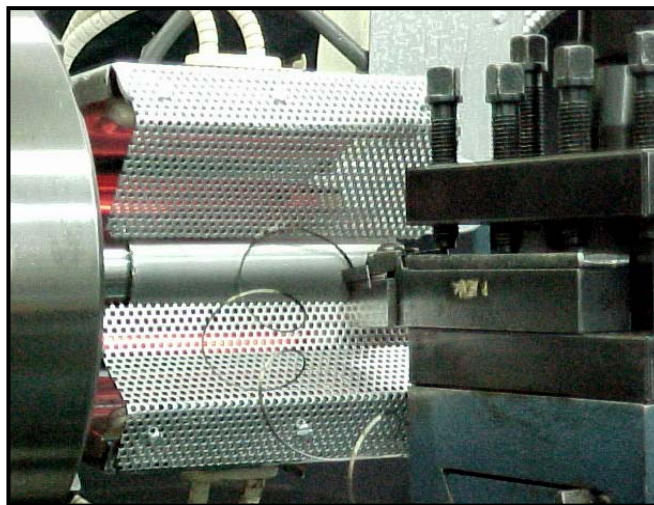


Figura 3. Montagem das resistências elétricas de quartzo no torneamento.

Inicialmente, antes dos ensaios em cada condição selecionada, o corpo-de-prova foi mantido em uma rotação mais baixa no torno (80 rpm) e aquecido o tempo suficiente para que sua superfície pudesse alcançar a temperatura de estabilização, encontrada em torno de 230 °C. Para a medição dessa temperatura foi usado um termômetro de radiação infravermelho da Raytek, modelo Raynger MX4, posicionado em frente ao corpo-de-prova nas imediações da máquina ferramenta. Este instrumento apresenta uma saída analógica (1mV/°C) cujo valor é amplificado e lido pelo software LabView que fornece os correspondente valores de temperatura. Em seguida, procedeu-se o torneamento, no qual ao final de cada passe mediou-se o desgaste da ferramenta, a rugosidade e coletado os cavacos produzidos.

Após testadas diversas ferramentas de corte de metal duro selecionou-se uma com triplo revestimento (TiCN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiN), triangular e sem quebra-cavacos, designação TNMA 160408, Classe IC 9015 (ISO P10-P30 e K10-K25), da Iscar. Além dessa ferramenta ter demonstrado bom desempenho em testes preliminares, a ausência de quebra cavacos possibilitou a simplificação da análise e minimização da interferência do quebra cavaco sobre a formação do cavaco, bem como da região desgastada da ferramenta.

O porta-ferramenta empregado, de especificação ISO MTJNR 2020K-16M1, proporciona a seguinte geometria para a ferramenta: ângulo de posição ( $\chi_r$ ) 93 °; ângulo de saída ( $\gamma_o$ ) - 6°; ângulo de folga ( $\alpha_o$ ) + 6°; e ângulo de inclinação ( $\lambda_s$ ) - 6°.

Tanto o desgaste da ferramenta quanto o cavaco formado foram analisados por um estereoscópio óptico Nikon, SMZ 800, acoplado a uma câmera digital. Para cada condição de corte, foi medido o desgaste da ferramenta depois de cada passe dado ao longo do corpo-de-prova (75 mm). O critério de fim de vida estabelecido para a ferramenta foi o do desgaste de flanco médio (VB<sub>B</sub>) quando alcançado 0,3 mm. Nesta interrupção momentânea do ensaio, efetuou-se também a medição da rugosidade na região central do corpo-de-prova em três posições de seu perímetro, obtendo-se um valor médio. O parâmetro de rugosidade escolhido foi o da média aritmética (Ra) ajustado para um comprimento de amostragem (“cut-off”) de 0,8 mm, usando um rugosímetro Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+ com raio de ponta do apalpador de 0,5 µm.

## 2.2 Informações sobre o corpo-de-prova

O material dos corpos-de-prova utilizado nos ensaios é um aço do tipo austenítico resistente ao calor, endurecível por precipitação, designação SAE XEV-F, (VV50 Villares Metals), cuja composição química consta na Tabela 1. Este material tem utilização abrangente podendo ser aplicado na indústria automobilística, aeronáutica, química e nuclear. É particularmente indicado na fabricação de válvulas de exaustão de motores de combustão interna de média e alta solicitação, sendo cerca de 750 °C sua máxima temperatura de operação. Na condição normalizada apresenta uma dureza de 40 HRC. As dimensões dos corpos-de-prova no qual se deu a usinagem foi de Ø50,0 mm por 75,0 mm de comprimento.

Tabela 1. Composição química do corpo-de-prova.

C	Si	Mn	Cr	Ni	N	W	Nb	P
0,45/0,55	0,45 máx	8,0/10,0	20,0/22,0	3,50/5,50	0,40/0,60	0,80/1,50	1,80/2,50	0,05 máx
				S	Fe			
				0,030 máx	Restante			

Para a análise da microestrutura do material após a usinagem, foram confeccionados corpos-de-prova escalonados em elementos (Fig.4a). Cada elemento foi usinado em três passes consecutivos segundo uma das condições de ensaio empregando uma aresta de corte nova. Depois, os elementos foram individualmente cortados e de suas faces laterais preparadas amostras metalográficas (Fig. 4b). Com este procedimento pôde-se simular uma situação real dos ensaios e também evitar ao máximo a influência do processo de preparação de amostras sobre a microestrutura usinada. Uma vez prontas, as amostras foram observadas em microscópio eletrônico de varredura.

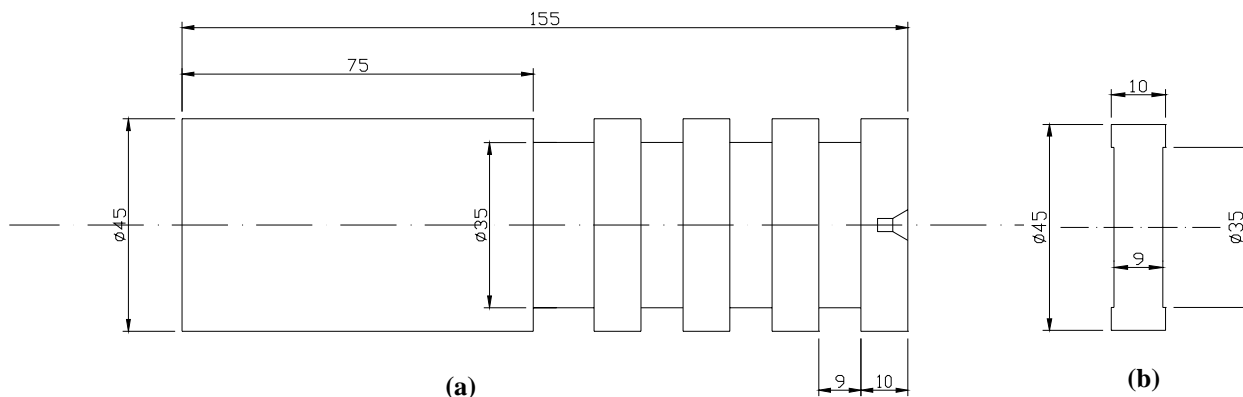


Figura 4. Corpo-de-prova do qual foram retiradas amostras para análise da microestrutura usinada.

### 2.3 Parâmetros de usinagem

Os parâmetros de corte foram selecionados em ensaios preliminares de tal forma que o critério de fim de vida da ferramenta não fosse atingido antes de pelo menos dois passes no corpo-de-prova. Essa condição limite foi encontrada para uma velocidade de corte de 216 m/min, avanço de 0,232 mm/volta e 0,5 mm de profundidade de usinagem. A partir disso, estabeleceu-se mais outras três velocidades de corte, mantidos os outros parâmetros constantes. Uma vez identificada a velocidade de corte que proporcionou a maior vida variou-se o avanço, mantendo constante a profundidade de usinagem. Com a velocidade de corte e o avanço estabelecido em função da maior vida de ferramenta, variou-se, por fim a profundidade de usinagem. A matriz de experimento originada desse procedimento é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2. Planejamento das condições de usinagem dos ensaios.

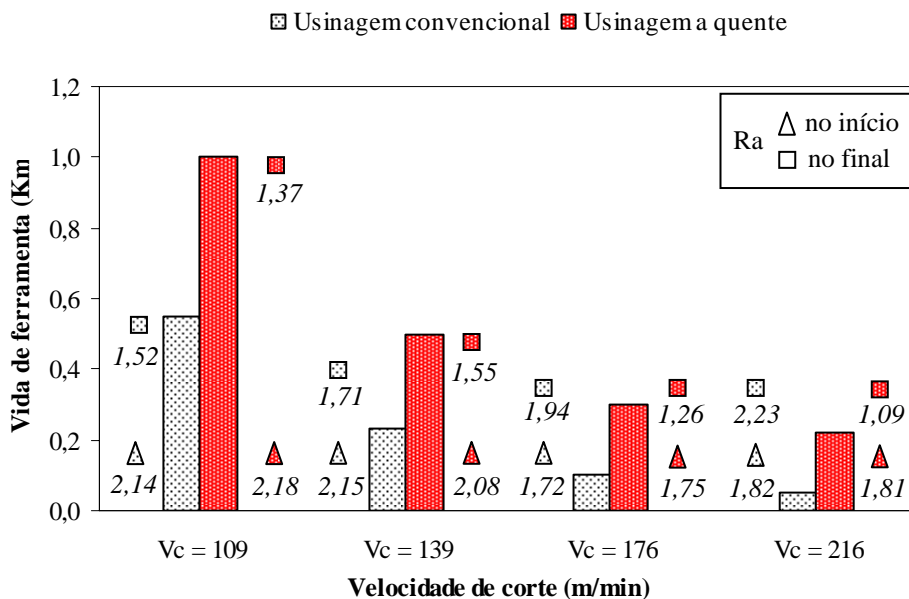
$V_c$ (m/min)	Avanço (mm/volta)	Prof. de usinagem (mm)	Torneamento
109	0,232	0,5	convencional
109	0,232	0,5	aquecido
139	0,232	0,5	convencional
139	0,232	0,5	aquecido
176	0,232	0,5	convencional
176	0,232	0,5	aquecido
216	0,232	0,5	convencional
216	0,232	0,5	aquecido
109	0,433	0,5	convencional
109	0,433	0,5	aquecido
109	0,523	0,5	convencional
109	0,523	0,5	aquecido
109	0,232	1,0	convencional
109	0,232	1,0	aquecido
109	0,232	1,5	convencional
109	0,232	1,5	aquecido



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5, traz o comportamento da vida da ferramenta no torneamento a quente e sem aquecimento, neste trabalho também chamado de convencional, em diferentes velocidades de corte sob avanço e profundidade de usinagem constantes, de 0,232 mm/volta e 0,5 mm, respectivamente. Pode-se notar que nesta mesma figura são dispostos os valores da rugosidade ao final do primeiro e do último passe em cada condição de ensaio.

De acordo com os resultados, verifica-se que a usinagem a quente permitiu aumento significativo na vida da ferramenta em relação à usinagem convencional. Para as velocidades de corte de 109, 139, 176, e 216 m/min, os correspondentes aumentos percentuais foram de 80, 117, 200 e 340%. De maneira geral e como seria esperado, a vida da ferramenta diminui com o aumento da velocidade de corte em ambas as condições de usinagem, convencional e aquecida. No entanto, nota-se que a diminuição da vida entre as sucessivas velocidades de corte é mais acentuada no caso da usinagem convencional. Assim, pode-se constatar que a diminuição da vida entre as velocidades de corte de 109 m/min e 139 m/min é de 58% na usinagem convencional frente a 50% na usinagem a quente; de 56% frente a 40% nas velocidades de 139 m/min e 176 m/min; e 50% frente a 27% nas velocidades de 176 m/min e 216 m/min.



**Figura 5. Vida da ferramenta e rugosidade para diferentes velocidades de corte.**

Estes resultados podem ser atribuídos, principalmente, ao abaixamento da tensão limite de escoamento do material da peça provocado pelo seu aquecimento, ainda que em temperatura inferior a necessária para mudanças microestruturais. Juntamente com a tensão limite de escoamento, a resistência mecânica do material da peça diminui contribuindo na redução da resistência ao cisalhamento levando, com isso, ao aumento da vida da ferramenta em relação à usinagem sem aquecimento. No caso do crescente aumento percentual da diferença da vida entre as correspondentes condições a quente e convencional com o aumento da velocidade de corte, tem-se que o calor gerado na ferramenta é progressivamente maior para ambas as condições. No entanto, a esse calor intrínseco gerado na usinagem, soma-se a parcela de calor oriunda das resistências, fazendo com que na condição a quente se produza uma perda adicional de resistência mecânica do material e conseqüentemente maior vida da ferramenta. Muitos materiais, dentre os quais o utilizado neste trabalho, possui uma relação entre resistência mecânica e temperatura em que se verifica a contida diminuição da resistência em temperaturas menores, mas sua abrupta caída com a progressiva elevação da temperatura. Assim, em velocidades mais elevadas, onde as temperaturas são mais altas, a diferença na perda de resistência mecânica entre a condição aquecida e convencional é maior do que em velocidades menores, onde a temperatura também é menor e a diferença na perda da resistência mecânica é mais moderada.

Quanto à rugosidade verifica-se, no final de vida das ferramentas, que os valores na condição aquecida são menores do que na convencional em cada velocidade de corte ensaiada. Também se observa que a diferença entre as rugosidades finais é relativamente pequena nas duas velocidades de corte mais baixas e progressivamente crescente nas duas velocidades maiores. Em 109 m/min tem-se uma diferença de 0,15 μm (1,52-1,37), em 139 m/min de 0,16 μm, em 176m/min de 0,68 μm e em 216 m/min de 1,14 μm.

O comportamento da rugosidade relatado pode ser creditado à maior deterioração da ferramenta de corte no seu final de vida na condição convencional, fazendo com que a geometria da ponta da ferramenta seja substancialmente alterada em relação à sua forma original e com isso produzindo superfícies usinadas de pior qualidade. Este fato é bastante significativo nas velocidades de corte mais altas, nas quais o desgaste é mais severo. Além da maior manutenção da geometria da ferramenta nas velocidades de corte mais baixas, a técnica do aquecimento no torneamento também contribui nesta direção. A Figura 6a mostra, como exemplo, o aspecto do desgaste da ferramenta nas regiões do flanco e da superfície de saída, para a velocidade de corte de 109 m/min, quando é atingido o fim de vida no

torneamento convencional. Transcorrido este mesmo tempo de usinagem, nota-se que a ferramenta na usinagem a quente ainda está em condições bastante satisfatórias de utilização (Fig.6b).

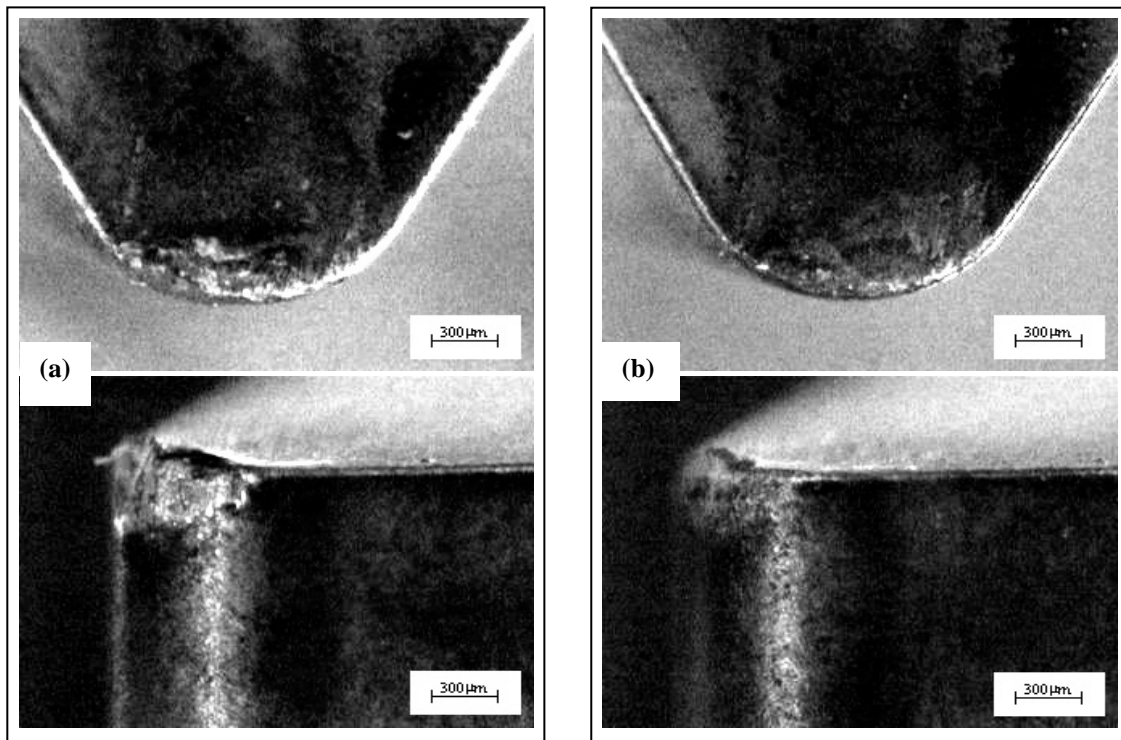


Figura 6. Ferramenta no fim de vida para a usinagem convencional (a) e com o mesmo tempo para a usinagem a quente (b) em 109 m/mim.

A Figura 7 mostra a vida da ferramenta para diferentes valores de avanços no torneamento com e sem aquecimento da peça. De modo geral, aqui também se observa que a usinagem a quente produziu vida da ferramenta maior do que na usinagem convencional e que a vida em ambas as condições diminui com o aumento do avanço. Nota-se que com o menor dos avanços, a vida da ferramenta na usinagem a quente é 80% maior em relação à usinagem sem aquecimento. Para o avanço intermediário, o aumento da vida é de cerca de 150%. No entanto, para o maior dos avanços, houve um aumento mais moderado, de 40%. A respeito da diminuição da vida da ferramenta com os sucessivos aumentos dos avanços, constata-se que entre 0,232 mm/volta e 0,432 mm/volta há um decréscimo de 45% na usinagem convencional e de 24% na usinagem a quente, mas de apenas 6% na convencional frente a 48% na usinagem a quente nos avanços de 0,432 mm/volta e 0,523 mm/volta. Portanto, neste último caso, verifica-se a única situação ensaiada na qual a vida da ferramenta na usinagem a quente cai mais acentuadamente do que na convencional, fazendo com que os valores das vidas no maior dos avanços se aproximem.

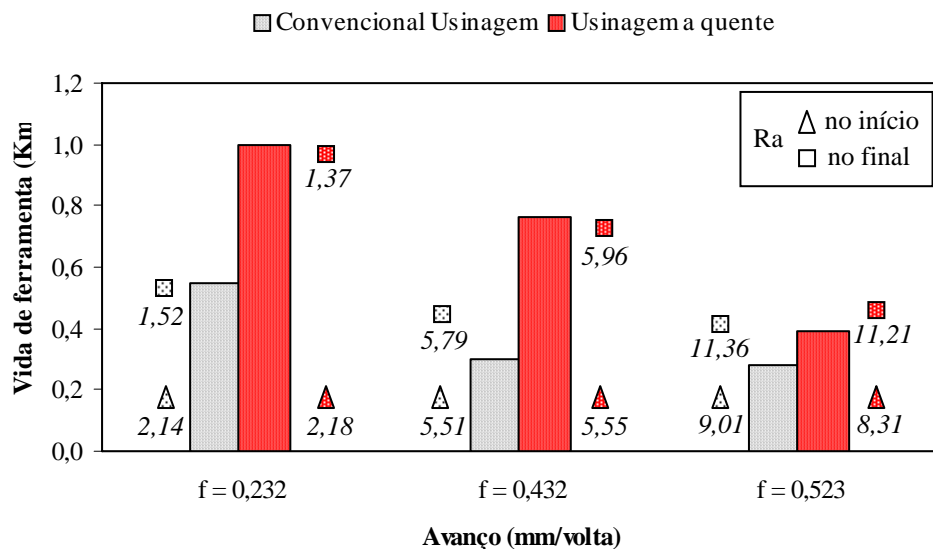


Figura 7. Vida da ferramenta e rugosidade em diferentes avanços para as condições aquecida e convencional.

Tais resultados podem ser creditados aos maiores esforços de corte com o aumento do avanço e a menor resistência ao cisalhamento no caso do material aquecido. Entretanto, ressalta-se que no maior dos avanços (0,523 mm/volta), encontrou-se os valores de vida da ferramenta mais próximos entre o torneamento a quente e convencional, de 40%, ao longo de todo o ensaio. Este resultado parece indicar que em seções transversais de corte avantajadas, o aquecimento total da área é limitado e o efeito da redução da resistência ao cisalhamento é relativamente pequeno frente ao encontrada na usinagem convencional. Com relação à rugosidade, notam-se valores próximos e tendências parecidas tanto na usinagem a quente quanto na convencional, neste caso em que a variável é o avanço.

A Figura 8 mostra a vida da ferramenta para diferentes profundidades de usinagem. Novamente se observa vidas mais elevadas para a condição aquecida e sua diminuição com o aumento da profundidade. Nota-se que a vida na condição a quente é superior à convencional em 80% na menor das profundidades, 100% para a profundidade intermediária, e 120% para a menor delas. Com relação à progressiva redução da vida com o aumento da profundidade nas duas condições, verifica-se uma diminuição de 50% entre 0,5 e 1,0 mm com a usinagem a quente e de 54% com a convencional, bem como um decréscimo de 20% entre 1,0 e 1,5 mm na usinagem a quente e de 28% na convencional.

Ao contrário de todos os outros resultados de rugosidade, no caso da variação da profundidade de usinagem, não se verificou um comportamento que se pudesse fazer uma análise mais detida entre as condições a quente e convencional.

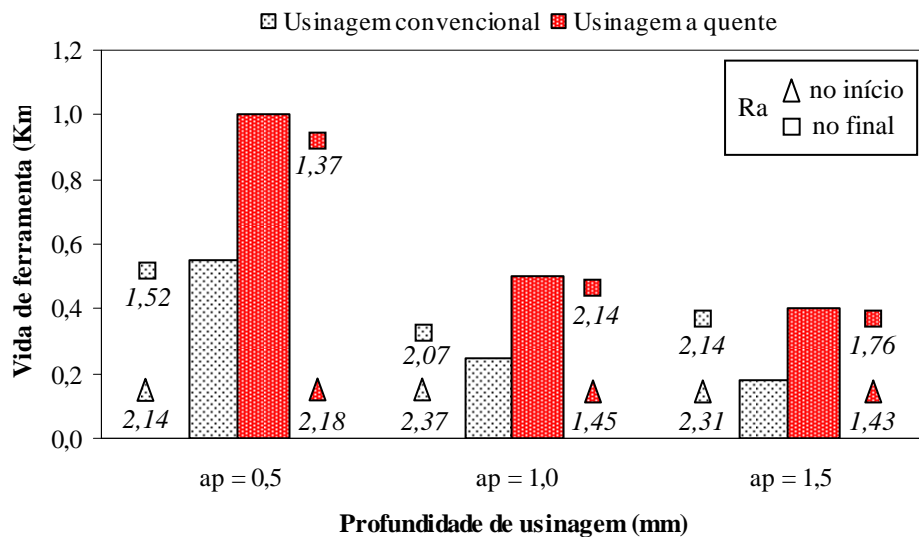


Figura 8. Vida e rugosidade em diferentes profundidades para as condições aquecida e convencional.

A fotografia da Figura 9 mostra as microestruturas do material torneado na condição de corte mais branda dos ensaios, mas representativo para as demais condições. As imagens privilegiam a camada subsuperficial do corpo-de-prova suscetível a mudanças microestruturais, formado na usinagem convencional (Fig. 9a) e a quente (Fig. 9b).

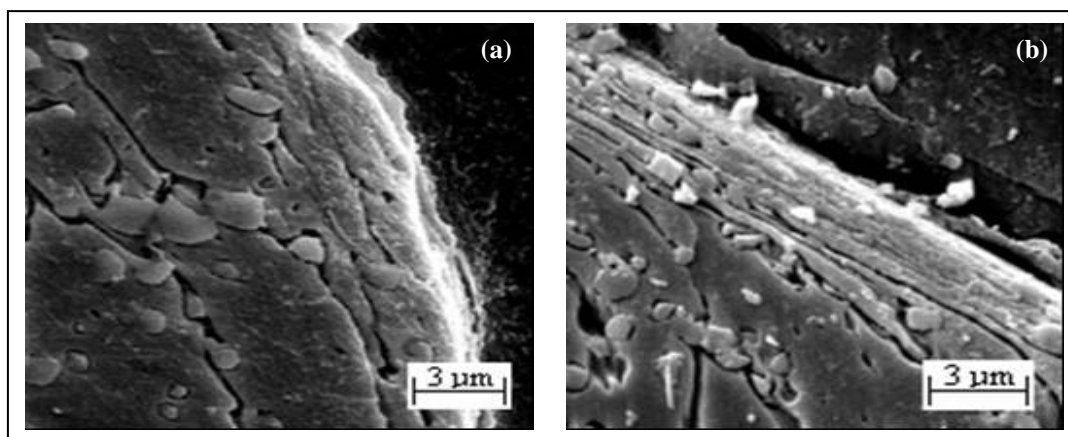


Figura 9. Microestruturas obtidas após o torneamento convencional (a) e aquecido (b).

Percebe-se, nas fotografias, que a usinagem produz uma camada de material deformado, com grãos alongados, de intensidade decrescente em direção ao interior da peça. No entanto, nota-se que a usinagem a quente produz uma camada mais profunda de grãos modificados, de forma mais alongada, do que na usinagem convencional. Observa-se que a usinagem a quente, ao contrário da convencional, deixou uma camada remanescente de material deformado plasticamente, sugerindo que a temperatura de aquecimento foi suficiente para diminuir o limite de tensão de



escoamento do material e com isso reduzir as forças de usinagem e minorar o desgaste da ferramenta de corte. Entre outros aspectos positivos, a camada modificada deixada após a usinagem, que se encontra agora encruada, pode melhorar as propriedades mecânicas gerais da peça.

A Figura 10 apresenta os valores médios da força de usinagem, que representa a soma das forças de corte, avanço e de profundidade, medidas no início da operação onde as ferramentas ainda estão sem desgaste. De modo geral, observa-se similaridade entre as curvas de força na usinagem a quente e convencional, sendo que em todas as condições ensaiadas a usinagem a quente produziu os menores esforços. Estes resultados podem ser creditados ao abaixamento do limite de escoamento do material com o aquecimento, bem como à provável diminuição da pressão específica de corte com o aumento do avanço e profundidade de usinagem em proporções maiores na condição a quente do que na convencional.

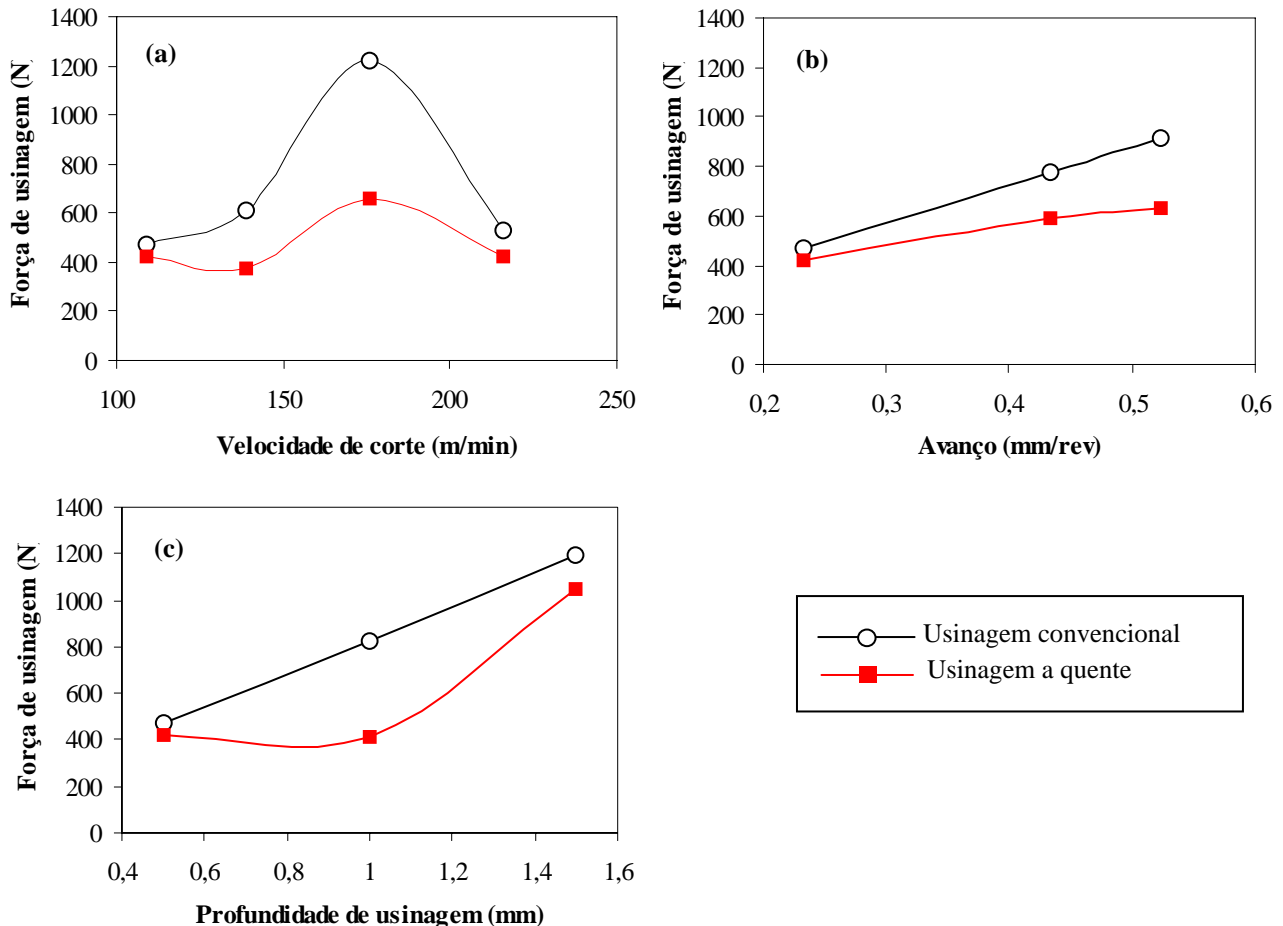


Figura 10. Força na usinagem a quente e convencional para diferentes velocidades de corte (a), avanços (b) e profundidades de usinagem (c).

#### 4. CONCLUSÕES

Considerando-se os resultados obtidos, pode-se apresentar as seguintes conclusões a respeito deste trabalho:

O incremento de temperatura produzido pelas resistências elétricas em quartzo mostraram-se suficientemente capazes de melhorar a usinagem do material empregado nos corpos-de-prova;

O desgaste da ferramenta no torneamento a quente diminuiu, em todas as condições empregadas, frente ao torneamento convencional. Nota-se que, para um mesmo valor de desgaste de flanco, é possível empregar taxas de remoção sensivelmente mais altas com a usinagem a quente;

As forças de usinagem em todas as condições ensaiadas apresentaram-se menores no torneamento a quente em relação à convencional;

Em geral, as menores rugosidades foram obtidas no torneamento a quente, fato que pode ser creditado a maior facilidade de corte, visto que a força e a potência de usinagem são mais moderadas do que no torneamento convencional;

De modo geral, as microestruturas do material usinado sugerem que o torneamento a quente deixou uma camada subsuperficial de grãos deformados mais intensa do que no torneamento convencional, indicando que o calor introduzido pelas resistências elétricas foi capaz de baixar a tensão de escoamento do material.

## 5. AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos à Eletrothermo Com. Ind. Ltda pela doação das resistências elétricas em quartzo e à Villares Metals pela doação do aço VV50 (designação Villares) para a confecção dos corpos-de-prova do trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS

- Barrow, G., 1969, "Use of Electric Current for Hot Machining of High Strength Steels", Machinery and Production Engineering, Vol. 114, p. 370-374.
- Basu, S. K., Ramamurthy, M., 1979, "Evaluation of Machining Parameters in Hot Machining", Mechanical Engineering Bulletin, Vol. 10, n. 1 & 2, p. 2-6.
- Bhattacharyya, B., Scrutton, R. F., 1971, "Plastic Flow at the Chip-Tool Interface During Hot Machining", Journal of Engineering for Industry, p. 437-440.
- Chen, N. N. S. and Lo, K. C., 1974, "Factors affecting tool life in hot machining of alloy steels", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 14, pp 161-173.
- Chou, J. G., 1988, "On line estimation of tool/chip interface temperatures for a turning operation", Trans. ASME Journal of Engineering Industry, Vol. 110 (1), pp. 56-64.
- Ellis, J., Barrow, G., 1971, "Some Observations on the Contact Resistance Hot Machining Process", Annals of the CIRP, Vol. 19, p. 775-785.
- Hinds, B. K., De Almeida, S. M., 1981, "Plasma Arc Heating for Hot Machining", International Journal of Machining Tool Design and Research, Vol. 21, n. 2, p. 143-152.
- Kitagawa T., Maekawa, K., 1990, "Plasma Hot Machining for New Engineering Materials", Wear, Vol. 139, p. 251-267.
- Krabacher, E. J., Merchant M. E., 1951, "Basics Factors in Hot-Machining of Metals", Trans. ASME, n. 73, p. 761-769.
- Madhavulu, G. and Ahmed, B., 1994, "Hot machining process for improved metal removal rates in turning operations", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 44, pp. 199-206.
- Mielnik, E. M., 1994, "Hot Machining in Retrospect and Review", SME Technical Paper, p. 64-75.
- Mukherjee, P. N., Basu, S. K., 1973, "Statistical Evaluation of Metal-Cutting Parameters in Hot Machining", Int. J. Prod. Res., Vol. 11, n. 1, p. 21-36.
- Rozzi, J. C., Pfefferkorn, F. E., Incropera, F. P., Shin, Y. C., 2000, "Transient, Three-Dimensional Heat Transfer Model for the Laser Assisted Machining of Silicon Nitride: I. Comparison of Predictions With Measured Surface Temperature Histories", International Journal of Heat and Mass Transfer, n. 43, p. 1409-1424.
- Salem, W. B., Melhaoui, A., Cohen, P., Ahdad, F., Longuemard, J.-P., 1995, "Usinage Assisté Par Laser = Laser Assisted Machining", Mécanique Industrielle et Matériaux, Vol. 48, n. 1, p. 29-30.
- Shaw, M. C., 1951, "Discussion to Krabacher and Merchant, above", Trans. Am. Soc. Mech. Eng., n. 17, p. 761.
- Vali, A., Longuemard, J. P., Marot, G., Litwin, J., 1998, "État des Contraintes résiduelles en Usinage Assisté Laser", Soudage et Techniques Connexes, Vol. 52, n. 3-4, Paris, p. 11-16.
- Wang, Y., Yang, L. J., Wang, N. J., 2002, "An Investigation of Laser-Assisted Machining of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particle Reinforced Aluminum Matrix Composite", Journal of Processing Technology, Vol. 129, p. 268-272.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

# HOT TURNING OF A HARD MACHINABILITY STEEL AIDED BY INFRARED RADIATION

Luiz Eduardo de Angelo Sanchez<sup>1</sup>, sanchez@feb.unesp.br

Hamilton José de Mello<sup>2</sup>, hamilton@feb.unesp.br

Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves<sup>3</sup>, gilberto@feb.unesp.br

Arthur Alves Fiocchi<sup>4</sup>, arthuraf@feb.unesp.br

<sup>1,2,3</sup>Universidade Estadual Paulista - Unesp, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CEP 17033-360, Bauru-SP

**Abstract.** *One of the options little studied for obtaining less tool cutting wear is heating of the workpiece with the purpose of decreasing the shear stress and hence to reduce the machining force, resulting in better tool life. In this paper quartz electric resistances are settled around the workpiece to heat it during the turning operation. In this experiment was used a heat-resistant austenitic steel and the flank wear, surface roughness and machining force were measured. In general, the results showed that the hot turning produces better tool life and surface roughness.*

**Keywords:** hot turning, machinability, tool life, surface roughness