

## **DANOS TÉRMICOS NA RETIFICAÇÃO DECORRENTES DO PAR FLUIDO-FERRAMENTA ADOTADO**

**Eraldo Jannone da Silva**

**Eduardo Carlos Bianchi**

**Paulo Roberto de Aguiar**

Univ. Estadual Paulista, Depto. de Engenharia Mecânica, CEP - 17033-360-Bauru, SP, Brasil

### **Resumo**

O presente trabalho tem por objetivo, primeiramente, caracterizar, para uma operação de retificação, as trocas térmicas que ocorrem durante o processo de corte com ferramentas de geometria não-definida, através da apresentação das mais significativas pesquisas realizadas na caracterização do balanço de energia que ocorre neste processo. É estudado o papel desempenhado pelo fluido de corte, bem como a sua eficácia durante a usinagem, seu efetivo papel refrigerante e/ou lubrificante na zona de retificação e nas demais regiões da peça a ser usinada, em função da operação de corte desempenhada. Paralelamente a isto é apresentado como o tipo de ferramenta abrasiva utilizada influencia nas trocas térmicas e na resistência mecânica das peças produzidas.

**Palavras-chave:** Retificação, Fluido de corte, Temperatura, Rebolo

### **1. INTRODUÇÃO**

Segundo Malkin (1989), o processo de retificação requer uma quantidade significativa de energia, por unidade de volume, para a remoção de material. Virtualmente, toda esta energia é transformada em calor, o qual é concentrado dentro da região de corte. As elevadas temperaturas podem produzir vários tipos de danos térmicos à peça, tais como: queima superficial, transformações microestruturais, aquecimento superficial e subsuperficial da mesma, gerando tensões residuais de tração indesejáveis, reduzindo o limite de resistência à fadiga do componente usinado. Além disso, a expansão térmica da peça durante a retificação contribui para erros dimensionais e de forma no componente final. As taxas de retificação hoje utilizadas são limitadas pelas temperaturas máximas permissíveis no processo de retificação, as quais, quando ultrapassadas, podem levar à deterioração da qualidade final da peça produzida.

Segundo Kohli, Guo e Malkin (1995), o calor gerado na zona de retificação é dissipado através da peça, do rebolo, do cavaco gerado e pelo fluido de corte, sendo que a partição de energia que flui por cada um desses elementos tem sido o objeto de estudo e, de modo particular, aquela que flui pela peça, pois o aumento de temperatura em sua superfície é decorrente de uma maior partição de energia para a mesma. Este aumento leva a uma maior incidência dos danos térmicos acima descritos. O controle dos danos térmicos requer um conhecimento detalhado desta partição de energia, do controle da energia introduzida na peça pelo processo de retificação através da otimização das condições de usinagem e da escolha correta do par fluido-ferramenta (Guo e Malkin, 1992).

O presente trabalho tem por objetivo apresentar um estudo detalhado da influência do tipo de fluido de corte e da ferramenta abrasiva na incidência dos danos térmicos mais comuns, resultantes do processo de retificação.

## **2. DANOS TÉRMICOS ORIUNDOS DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO**

Excessivas temperaturas geradas durante o processo de retificação podem causar danos térmicos às peças. O calor gerado no processo de retificação, função do mecanismo de remoção do cavaco, é resultado da transformação da energia mecânica envolvida no processo em energia térmica. Esta energia pode levar ao surgimento de uma camada de material afetada termicamente, dependendo das temperaturas envolvidas e da taxa de resfriamento imposta.

### **2.1 Queima superficial da peça**

Segundo Malkin (1989), a queima visível da peça é caracterizada pela presença de tons azulados na sua superfície, os quais são consequência da formação de uma camada de óxidos. A queima pode levar ao aumento da perda diametral do rebolo, função do crescimento da adesão de partículas metálicas nos grãos do mesmo, elevando assim os esforços de corte.

A queima superficial, quando da retificação de aços temperados e revenidos, provoca um aumento da dureza superficial, em função da retêmpera do material, a qual é consequência da reaustenitização do mesmo, seguido da formação da martensita não-revenida. Isto traz um aspecto adverso quanto ao limite de resistência à fadiga do material, pela formação de uma microestrutura não-favorável. Para os mesmos aços retificados sem a incidência da queima superficial, geralmente existe um amolecimento do material, devido a terem sido atingidas temperaturas inferiores à de austenitização.

### **2.2 Têmpera superficial**

Segundo Malkin (1989), os aços são geralmente retificados em seu estado temperado-revenido. Dependendo da intensidade do aquecimento gerado durante o processo de retificação e da taxa de resfriamento imposta à peça retificada pela ação do fluido de corte, pode-se obter uma diminuição da dureza superficial da peça, bem como levar à formação de estruturas martensíticas não-revenidas, quando se atinge a temperatura de austenitização do material, seguindo de um processo de resfriamento rápido. A formação ou não desta estrutura martensítica, a qual é regida por mecanismos de difusão de carbono é um processo complexo, dependente da temperatura, do tempo de aquecimento e das velocidades de resfriamento impostas pelo fluido de corte.

### **2.3 Tensões residuais**

O processo de retificação invariavelmente leva à tensões residuais nas adjacências da superfície acabada, as quais podem afetar o comportamento mecânico do material. As tensões residuais são induzidas por deformações plásticas não-uniformes nas proximidades da superfície da peça. Interações mecânicas dos grão abrasivos com a peça resultam, predominantemente, em tensões residuais de compressão, resultado de deslocamentos plásticos localizados, comparado ao processo de “shot peening”. Segundo Malkin (1989), as tensões residuais de tração são causadas, principalmente, por tensões induzidas termicamente e deformações associadas com as temperaturas de retificação e o seu gradiente da superfície ao interior da peça.

No processo produtivo, a maioria das tensões residuais de retificação são de tração, as quais indicam que as mesmas são, predominantemente de origem térmica. Tensões residuais de compressão são consideradas benéficas nas propriedades mecânicas dos materiais, aumentando a resistência à fadiga, enquanto as tensões de tração são prejudiciais quanto à resistência mecânica, à corrosão e ao desgaste (abrasão à altas temperaturas).

## **2.4 Trincas**

Segundo Johnson (1986), as trincas superficiais são resultado do excessivo aquecimento durante a retificação. A severidade das trincas pode variar, sendo que as mesmas podem não ser visíveis, imediatamente após a retificação, tornando-se aparentes, algum tempo depois. Em algumas superfícies submetidas à elevadas tensões residuais de tração, as trincas irão formar-se abaixo da superfície, não sendo visíveis, até que o topo das mesmas seja atacado eletricamente. As trincas reduzem o limite de resistência à fadiga do material, ao mesmo tempo que aumenta a susceptibilidade da superfície do material à ataque por processos corrosivos.

## **3. INFLUÊNCIA DA FERRAMENTA E DO FLUIDO DE CORTE NAS TROCAS TÉRMICAS**

### **3.1 Introdução**

A maioria dos danos observados no processo de retificação são de origem térmica. Das várias técnicas utilizadas na determinação das temperaturas envolvidas na região de corte (Ueda et al., 1993 e Ueda et al., 1995), somente com a utilização de termopares “embutidos” nas peças a serem retificadas, foi possível obter-se indicações satisfatórias das temperaturas nas proximidades da região de corte, as quais podem ser efetivamente correlacionadas com os danos térmicos (Kohli, Guo e Malkin, 1995).

As temperaturas geradas durante o processo de retificação são consequência direta da energia introduzida no processo. Os métodos de medição de temperatura não permitem identificar e controlar, de forma prática, as variações de temperatura, sendo estes métodos restritos a testes laboratoriais, os quais não podem ser diretamente aplicados dentro de um processo produtivo de larga escala. Deve-se então adotar métodos indiretos de controle da temperatura e do dano térmico induzido à peça através do monitoramento dos esforços de corte, da rugosidade superficial, da tensão residual, além do conhecimento teórico de como cada variável envolvida no processo de retificação afeta a geração e a dissipação do calor produzido, permitindo a otimização do processo. Esta otimização deve englobar todos os componentes do processo, ou seja, a ferramenta, o fluido de corte e as condições de usinagem.

### **3.2 Importância da determinação das temperaturas na região de corte e da fração da energia gerada que flui pela peça ( $\epsilon$ )**

Com o intuito de permitir o modelamento das trocas térmicas originárias do processo de retificação várias pesquisas vem sendo realizadas nas últimas décadas. As análises térmicas da operação de retificação são baseadas no modelo clássico da teoria de banda de calor de Jaeger (1942). Sendo assim, modelamentos matemáticos foram sendo desenvolvidos (Lavine, 1988; Malkin, 1989; Kohli, Guo e Malkin, 1995) a fim de se permitir o cálculo das temperaturas de retificação e a partição ou fração da energia gerada no processo que é levada em forma de calor para a peça ( $\epsilon$ ). As temperaturas calculadas são geralmente proporcionais ao produto da energia total introduzida no processo e à fração ( $\epsilon$ ). Segundo Kohli, Guo e Malkin (1995), uma atenção especial tem sido dada ao estudo desta fração de energia, a qual está relacionada diretamente com o aumento da temperatura da peça retificada, podendo isto levar a incidência de danos térmicos.

Segundo Malkin (1989), a retificação ocorre através de interações entre os grãos abrasivos e a peça a ser retificada. De acordo com o modelo de análise dos mecanismos de geração do cavaco, a energia total de retificação ( $u$ ) inclui as energias referentes a remoção do cavaco

propriamente dita ( $u_{ch}$ ), ao deslizamento dos grãos abrasivos de áreas de topo de grãos desgastadas com a peça ( $u_{sl}$ ), e a energia referente ao deslocamento de material por deformação plástica (“plowing”) sem a remoção do mesmo ( $u_{pl}$ ), conforme a Eq.(1) (Kannappan e Malkin, 1972).

$$u = u_{ch} + u_{pl} + u_{sl} \quad (1)$$

Determinou-se de forma teórica e experimental que, segundo Malkin e Anderson (1974) aproximadamente toda energia referente ao deslizamento e ao “plowing” é conduzida na forma de calor para a peça, sendo que por volta de 55% da energia relativa a formação do cavaco propriamente dita é conduzida na forma de calor para a peça, sendo que a partição de energia para a peça ( $\varepsilon$ ), pode ser escrita conforme a Eq. (2):

$$\varepsilon = (0,55 u_{ch} + u_{pl} + u_{sl}) / u \quad (2)$$

ou, combinando as Eq. (1) e (2):

$$\varepsilon = (u - 0,45 u_{ch}) / u \quad (3)$$

### **3.3 Influência do tipo de ferramenta e fluido de corte na determinação das temperaturas na região de corte e da fração da energia gerada que flui pela peça ( $\varepsilon$ )**

Segundo Malkin (1985), os danos térmicos gerados quando da retificação com rebolos superabrasivos de CBN são, geralmente, inferiores aos que ocorrem quando da retificação com rebolos convencionais. Quando da retificação de aços utilizando-se rebolos de CBN, a queima da peça raramente ocorre, as tensões residuais são, predominantemente de compressão (Tönshoff e Grabner, 1984; Vansevenat, 1989). Isto indica que menores temperaturas de retificação são geradas na zona de retificação. Estas menores temperaturas, segundo Kohli, Guo e Malkin (1995), são atribuídas, parcialmente, a menor energia gasta para a retificação com rebolos de CBN devido a maior dureza de seus grãos (dureza Knoop do grão de CBN é de 4.500 e do grão de  $Al_2O_3$  é de  $2.500\text{kg/mm}^2$ ). Isto mantém a capacidade de corte do rebolo durante tempos maiores diminuindo o desgaste dos mesmos, reduzindo as parcelas de energia relativas ao “plowing” ( $u_{pl}$ ) e ao deslizamento de grãos cegos ( $u_{sl}$ ). Todavia, tem-se atribuído as menores temperaturas geradas na retificação com rebolos de CBN à maior condutibilidade térmica de seus grãos abrasivos quando comparadas com os de óxido de alumínio (condutibilidade térmica do grão de CBN é de 3,3 e do grão de  $Al_2O_3$  é de  $0,08\text{cal/}^\circ\text{C.cm.s}$ ). Sendo assim uma fração muito maior do calor gerado é transportado para fora da zona de retificação pela ferramenta abrasiva, ao invés do mesmo fluir pela peça. (Lavine, Malkin e Jen, 1989).

Comprovando o melhor desempenho dos rebolos de CBN, estudos realizados por Kohli, Guo e Malkin (1995) permitiram determinar a partição da energia gerada energia quando da realização de operações de retificação com rebolos de  $Al_2O_3$  e CBN. Utilizando-se a técnica dos termopares embutidos, onde as temperaturas medidas foram comparadas com àquelas obtidas pelas formulações teóricas propostas por Malkin (1989) com distribuição triangular de fluxo de calor, observou-se que entre 60 - 75% da energia gerada durante o processo de retificação é transportada na forma de calor para a peça, quando da utilização de rebolos convencionais de óxido de alumínio. Para rebolos superabrasivos de CBN, os valores observados foram em torno de 20%. A menor partição de energia, quando da utilização de rebolos de CBN permite uma diminuição das temperaturas na região de corte

(aproximadamente 400 °C quando utilizados rebolos de óxido de alumínio e 100 °C para rebolos de CBN) e uma menor tendência de indução de danos térmicos à peça.

Os modelamentos apresentados por Malkin (1989) negligenciam a influência do fluido de corte nas temperaturas ocorridas na zona de retificação. A peça foi modelada como sendo um sólido adiabático de comprimento semi-infinito, com superfície perfeitamente isolada, exceto na região de localização da banda de calor. A maioria das operações de retificação são realizadas com a utilização de fluidos de corte, os quais lubrificam e refrigeram a peça. Para que o fluido refrigerante refrigere efetivamente a região de corte, é necessário que o calor seja removido de dentro da mesma. Na maioria dos casos o fluido refrigerante, segundo Malkin (1989), não reduz significativamente as temperaturas na região de corte, devido as dificuldades de penetração dos mesmos nesta região, devido ao pequeno comprimento de contato e devido, muitas vezes a barreira hidrodinâmica gerada pelo rebolo dotado de velocidade  $v_s$ , onde o fluido deve apresentar velocidade de saída do jato igual a velocidade de corte do rebolo, para conseguir atingir a região de corte (Webster, 1995). A refrigeração da zona de corte é efetiva somente em operações de “creep-feed”, onde as elevadas penetrações e as baixas velocidades da peça geram grandes comprimentos de contato, permitindo assim que o fluido seja levado na região de corte, sendo a refrigeração mais efetiva. Entretanto os fluidos de corte, quando corretamente aplicados, permitem a refrigeração da peça como um todo (exceto na posição instantânea da região de corte), ajudando a controlar os erros dimensionais e os erros de forma devido a menor sollicitação térmica da peça. Os fluidos de corte diminuem as temperaturas na região de corte de forma indireta, através de suas propriedades lubrificantes, diminuindo o atrito e, conseqüentemente, diminuindo o desgaste do topo dos grãos do rebolo, gerando menos calor, devido a diminuição da energia despendida no deslizamento e no “plowing”.

Guo e Malkin (1995) investigaram o efeito do fluido de corte em distintas posições da peça a ser retificada, para uma operação de retificação plana, sendo estudado seu efeito na região de corte, à frente e atrás da zona de retificação. Foi possível determinar, segundo os pesquisadores, que o efeito refrigerante, exercido pelo fluido dentro da região de corte é crítico para operações de “creep-feed”, porém ineficaz para operações tradicionais de retificação, devido ao efeito da evaporação do filme de fluido de corte, devido as temperaturas geradas. O pequeno percentual de fluido de corte que atinge a região de corte, percentual este que é função da estrutura do rebolo e da forma de aplicação (Guo e Malkin, 1992; Engineer, Guo e Makin, 1992; Krishnan, Guo e Malkin, 1995), tem papel ineficiente na refrigeração da região de corte, pois a medida que a temperatura crítica de evaporação do filme de lubrificante é atingida, ocorre um aumento catastrófico da temperatura e dos esforços de corte (Shafto, Howes e Andrew, 1975; Lavine e Malkin, 1990; Guo e Malkin, 1994). Segundo Yasui e Tsukuda (1983), a ocorrência do fenômeno de evaporação do filme de fluido de corte, para óleos solúveis, diminui o coeficiente de película à valores próximos ao encontrados para a refrigeração utilizando-se o ar como fluido de corte. Como resultado, tem-se que a desempenho do fluido de corte iguala-se à uma operação de retificação a seco. Como as propriedades físicas do óleo solúvel são, basicamente, as mesmas da água, a evaporação do filme de fluido de corte, para estes fluidos ocorre à temperaturas acima de 100 °C. Já para os óleos integrais, esta temperatura é da ordem de 300 °C. Estas temperaturas, na região de corte são facilmente ultrapassadas, chegando a valores da ordem de 500 °C, quando da utilização de rebolos convencionais de óxido de alumínio (Kohli, Guo e Malkin, 1995), sendo desprezível o efeito refrigerante na região de corte, em função da ocorrência deste fato (Malkin, 1974). Estes resultados foram comprovados, para rebolos de óxido de alumínio, utilizando-se a técnica dos termopares embutidos, para a determinação das temperaturas na região de corte, na subsuperfície da peça, para operações de retificação com e sem fluido de corte (Kohli, Guo e Malkin, 1995).

A refrigeração à frente e atrás da zona de retificação tem pequena influência no máximo aumento de temperatura na região de corte, exceto nas operações de “creep-feed” (Guo e Malkin, 1994), permitindo a sua redução (Guo e Malkin, 1995a). A análise das temperaturas transientes e seu comportamento no processo de retificação foi estudado por Guo e Malkin (1995b). Em seus estudos Kohli, Guo e Malkin (1995) verificaram que o efeito da refrigeração na região de corte, efetuada pelo fluido de corte é desprezível. Porém, para as regiões na peça afastadas da região de corte, a influência do fluido de corte é significativa, devendo-se considerar as trocas térmicas por convecção na formulação das temperaturas geradas.

### **3.4 Influência do tipo de ferramenta e fluido de corte nas tensões residuais verificadas em peças retificadas**

Segundo Brinksmeier (1986), as diferenças básicas entre os estados de tensão residual conferidos quando da utilização de rebolos de CBN e de  $Al_2O_3$ , tem suas razões básicas nas propriedades físicas de seus abrasivos, sendo elas:

a) O grão de CBN é mais duro que o de  $Al_2O_3$ , o que permite um menor desgaste do grão e menores forças de retificação, menor geração de calor.

b) A condutibilidade térmica dos grãos de CBN é 40 vezes maior que a do grão de  $Al_2O_3$ , o que permite uma menor partição da energia gerada para a peça.

c) Após o perfilamento, os grãos de CBN apresentam uma superfície de estrutura fina, com arestas de corte secundárias. Estas favorecem os mecanismos de formação do cavaco, aos invés do “plowing”. Os grãos de  $Al_2O_3$  após a dressagem, apresentam, freqüentemente, grãos com arestas de corte achatadas, as quais levam ao aumento de suas áreas de corte e, conseqüentemente, do calor induzido por fricção.

Os rebolos de CBN produzem, na maioria dos casos, tensões de compressão (Brinksmeier, 1982). Entretanto, os rebolos  $Al_2O_3$  também estão aptos a gerar tensões residuais de compressão, mas somente logo após a dressagem. Com o aumento do volume de material removido, a tensão residual tende a ser de tração e de maior intensidade. De forma oposta, o rebolo de CBN é muito menos sensível à variações na quantidade de material removido, garantindo tensões residuais de compressão, mesmo após longos períodos de retificação (Brinksmeier, 1986).

Brinksmeier (1986) ainda verificou que o tipo de ligante influencia na tensão residual imposta à peça, sendo que as maiores tensões de compressão foram obtidas utilizando-se rebolo de CBN com ligante metálico. A influência da granulometria do rebolo na tensão residual também foi verificada. Rebolos de CBN com tamanho de grãos maiores produzem aproximadamente a mesma quantidade de calor que um rebolo de  $Al_2O_3$  produziria, devido a tendência de cegamento dos grãos após a realização da operação de perfilamento. Isto leva a um aumento das forças de corte, menor penetração do fluido, mais calor gerado. Todavia, ainda são geradas tensões de compressão, porém de menor intensidade, às quais são atribuídas à melhor condutibilidade térmica dos grãos de CBN. Quanto menor o tamanho do grão de CBN, maiores serão os níveis de tensão de compressão.

Os fluidos de corte também apresentam influência nas tensões residuais impostas às peças. Segundo Torrance (sd), um fluido de corte não deve apenas promover uma boa refrigeração da peça por convecção. Ele deve promover a predominância dos mecanismos de corte ao invés da deformação plástica sem a remoção de material (“plowing”), pela manutenção da afiação do rebolo e pela diminuição do coeficiente de atrito peça-ferramenta Hitchiner (1990). Desta forma, diminui-se a energia específica de retificação gerada no processo de usinagem (Malkin, 1989), as temperaturas na região de corte e a possível incidência dos danos térmicos. Todavia a redução efetiva das temperaturas na região de corte, pela ação direta do fluido de

corte é ineficaz para operações tradicionais de retificação, devido ao efeito da evaporação do filme de fluido de corte, devido as temperaturas geradas (Guo e Malkin 1995)

Os óleos integrais proporcionam menores forças de retificação, devido ao seu maior poder lubrificante, permitindo a diminuição do coeficiente de atrito e pela manutenção da afiação da ferramenta, gerando menores temperaturas na região de corte (Torrance, sd). Entretanto diferentes combinações fluido-ferramenta-material podem ser utilizadas, devendo-se atentar, principalmente a busca da diminuição da energia gerada na região de corte, gerando menores gradientes a serem removidos pelos fluidos, permitindo assim utilização de fluidos solúveis e/ou sintéticos, pois, devido a pressões ambientais e aos riscos a saúde que os óleos integrais podem trazer, seu uso vem sendo restringido (Webster, 1995).

#### 4. CONCLUSÕES

Sendo assim, verifica-se que, dentre os parâmetros de entrada, além das condições de usinagem, tanto a ferramenta quanto o fluido de corte utilizados influenciam, diretamente, as elevações da temperatura na região de corte e a parcela da energia gerada que flui para a peça em forma de calor. Estes fatos podem levar a uma maior incidência de danos térmicos característicos do processo.

A qualidade final do componente usinado dependerá do controle da energia gasta para a realização da operação de retificação, através da escolha adequada dos parâmetros de entrada. Desta forma deve-se escolher uma ferramenta abrasiva que permita uma menor introdução de calor na região de corte e que necessite de uma menor energia de retificação para a remoção de material. Aliado a isto, deve-se utilizar fluidos de corte, que além de manter a capacidade de corte do rebolo por um maior período de tempo confira a peça uma taxa de resfriamento adequada, evitando a formação de microestruturas indesejadas, que levem ao detrimento das propriedades mecânicas do componente usinado.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Manifestamos nossos agradecimentos à **FAPESP** (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro e pela Bolsa de Mestrado concedida para a realização deste trabalho, e as seguintes empresas: **TRW, Houghton Brasil Ltda., Master Diamond Ferramentas Ltda., De Beers do Brasil Ltda. e Saint-Gobain Abrasives**, as quais também tem contribuído com suportes técnico-financeiro.

#### REFERÊNCIAS

- BRINKSMEIER, E. "Randzonenanalyse geschliffener Werkstücke", VDI-Verlag, Düsseldorf, 1982.
- BRINKSMEIER, E. "A Model for the Development of Residual Stresses in Grinding", In: NIKU-LARI, A. *Advances in Surface Treatments*. 5.ed. Pergamon Press, 1986, vol. 5, p.173 a 189.
- ENGINEER, F.; GUO, C.; MALKIN S., "Experimental Measurement of the Cooling Flow through the Grinding Zone" *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 114, 1992, p.51.
- GUO, C.; MALKIN, S. "Analysis of Fluid Flow through the Grinding Zone", *ASME Journal of Engineering for industry*, Vol. 104, 1992, p.427.
- GUO, C.; MALKIN, S. "Analytical and Experimental Investigation of Burnout in Creep-Feed Grinding", *Annals of the CIRP.*, 43/1, 1994, p. 283-286.
- GUO, C.; MALKIN, S. "Effectiveness of Cooling in Grinding". *CIRP Annual Convention*, STG, Enschede, 1995.

GUO, C.; MALKIN, S. "Analysis of Energy Partition in Grinding" *ASME Journal of Engineering for Industry* Vol. 117, 1995a, p. 55-61.

GUO, C.; MALKIN, S. "Analysis of Transient Temperature in Grinding" *ASME Journal of Engineering for Industry* Vol. 117, 1995b, p. 571-577.

HITCHINER, M. P. "Precision Grinding Systems for Production Grinding with Vitrified CBN" *SME Technical Paper* MR90-507, 1990, p 1-11.

JAEGER, J. C. "Moving Sources of Heat and the Temperature at Sliding Contacts Proc, *Royal Society of New South Wales*, 76, 1942, p. 203-224

JOHNSON, G. A. "Beneficial Compressive Residual Stress Resulting from CBN Grinding" *SME Second International Grinding Conference*, Philadelphia, Pennsylvania, 1986, p. 1-12.

KANNAPPAN, S.; MALKIN, S. "Effects of the Grain Size and Operation Parameters on the Mechanics of Grinding", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 94, 1972, p.838-842.

KOHLI S.P., GUO, C.; MALKIN, S. "Energy Partition for Grinding with Aluminum Oxide and CBN Abrasive Wheels". *ASME Journal of Engineering for industry*, Vol. 117, 1995, p. 160-168.

KRISHNAN, N.; GUO, C.; MALKIN, S. "Fluid Flow Through the Grinding Zone in Creep-Feed Grinding" *Proceedings of the 1st International Machining and Grinding Conference*, SME, 1995.

LAVINE, A. S.; MALKIN, S. "The Role of Cooling in Creep-Feed Grinding, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol 110, 1990, p. 1.

LAVINE, A.S. "A Simple Model for Convective Cooling During the Grinding Process". *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 110, 1988, p. 1-6.

LAVINE, A.S., MALKIN, S.; JEN, T.C "Thermal Aspects of Grinding with CBN Abrasives", *Annals of the CIRP*, Vol.38/1, 1989, p.557-560.

MALKIN, S. "Thermal Aspects of Grinding, Part 2 – Surface Temperatures and Workpiece Burn", *Trans., ASME, J of Eng. For Ind.*, 96, 1974, p. 482.

MALKIN, S. "Current Trends in CBN Grinding Technology", *Annals of the CIRP.*, 34/1, 1985, p. 557-560.

MALKIN, S. "Grinding Mechanisms" e "Grinding Temperatures and Thermal Damage", In: MALKIN, S. *Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives*. 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989. Cap. 5 e 6, p.108 a 171.

SHAFTO, G. R.; HOWES, T. D.; ANDREW, C. "Thermal Aspects of Creep-Feed Grinding" *Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Machine Tool Design Research Conference*, Manchester, Inglaterra, 1975.

TÖNSHOFF, H. K.; GRABNER, T. "Cylindrical and Profile Grinding with Boron Nitride Wheels" *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering*, Tókió, 1984, p. 326-343.

TORRANCE, A. A. "Cooling and Metalurgic Effects" University of Bristol, Inglaterra, p. 1-5

UEDA, T.; SATO, M; SUGITA, T.; NAKAYAMA, K. "Thermal Behaviour of Cutting Grain in Grinding", *Annals of the CIRP.*, 44/1, 1995, p. 325-328.

UEDA, T.; TANAKA, H. "Measurement of Grinding Temperature of Active Grains Using Infrared Radiation Pyrometer with Optical Fibre", *Annals of the CIRP.*, 42/1, 1993, p. 405-408.

VANSEVENANT, IR. E. "An Improved Mathematical Model to Predict Residual Stresses in Surface Plunge Grinding", *Annals of the CIRP.*, 36, 1989, p. 413-416.

WEBSTER, JOHN, "Selection of coolant type and application technique in grinding". *Supergrind* 1995, p. 205-218, 1995.

YASUI, H.; TSUKUDA, S. "Influence of Fluid Type on Wet Grinding Temperature", *Bull. Japan Soc. of Precision Engineering.*, n.2, vol. 17, 1983, p. 133-134