

## FORMAÇÃO DA CAMADA AFETADA PELO CALOR NA SUPERFÍCIE DE PEÇAS RETIFICADAS

**Milton Vieira Junior**

**Rodolfo Libardi**

**Honório Alberto Cancilieri**

**André de Lima**

Universidade Metodista de Piracicaba – Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção  
Rod. Santa Bárbara – Iracemápolis, Km 01, Santa Bárbara D'Oeste – SP. CEP 13450-000

**Resumo.** *O processo de retificação tem entre seus objetivos a melhora do acabamento superficial e a garantia da integridade superficial de peças acabadas, sejam elas tratadas termicamente ou não. No entanto, durante a operação de retificação, as temperaturas na região de contato entre ferramenta e peça (grão abrasivo e peça) são elevadas, podendo atingir até 1000°C. Esse patamar de temperatura já seria suficiente para provocar alterações na camada superficial das peças retificadas. Porém, além disso, ainda ocorre outro problema nas operações de retificação: a falta de lubri-refrigeração adequada na região de contato entre rebolo e peça, que leva ao resfriamento da peça instantes após o aquecimento, e não durante a remoção de material. Esse resfriamento realizado de maneira inadequada também pode afetar a camada superficial das peças retificadas. O presente trabalho propõe o estudo da Camada Afetada pelo Calor (“Heat Affected Zone” - CAC) em peças retificadas para identificar a possibilidade de ocorrência de danos à integridade superficial dessas peças. Para tanto é feita a análise de corpos de prova retificados sob diversas condições de operação e de dressagem, e com diferentes tratamentos.*

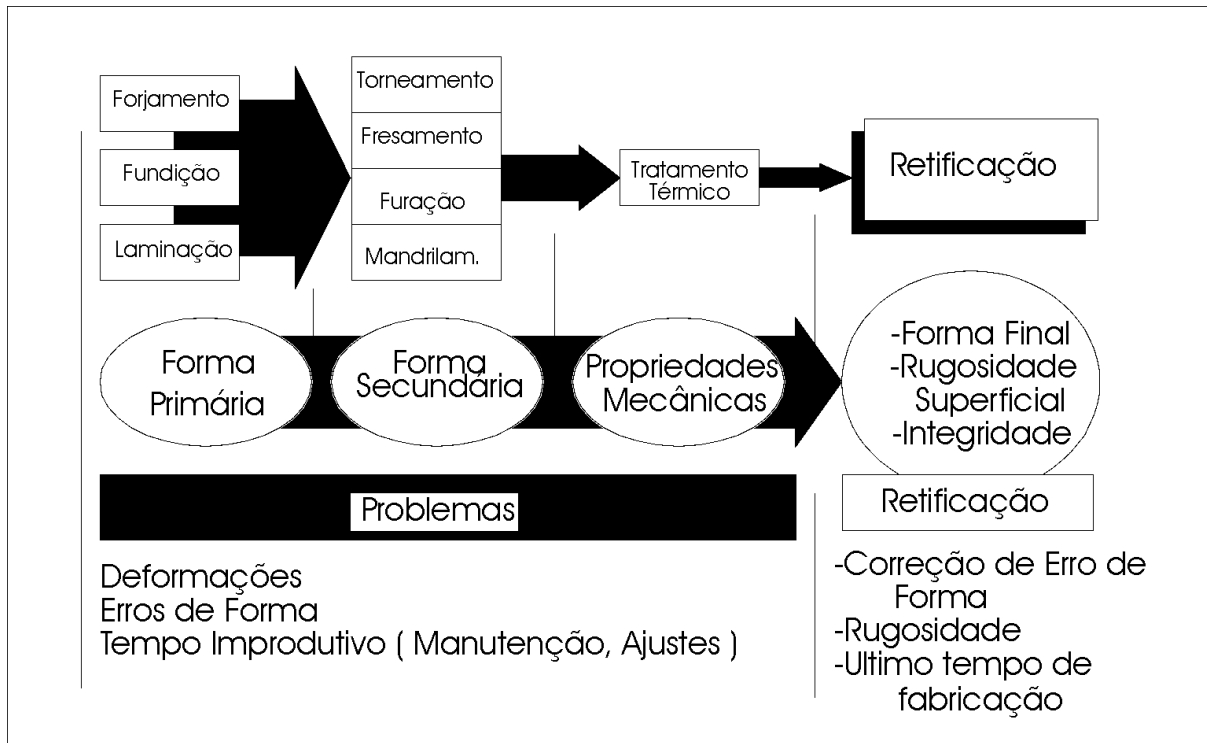
**Palavras-chave:** *integridade superficial; camada afetada pelo calor; retificação.*

### 1. INTRODUÇÃO

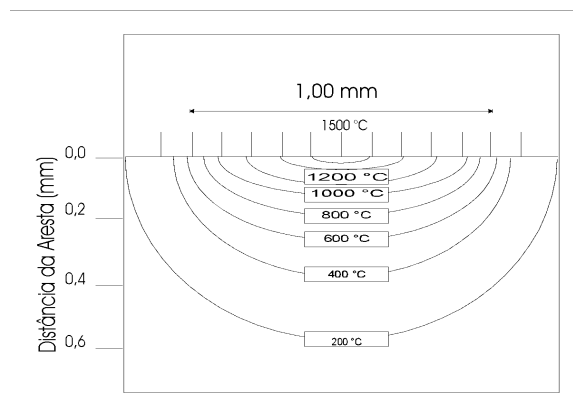
Nas indústrias do ramo metal-mecânico o processo de retificação é utilizado para a correção de falhas em peças originadas em fases anteriores da sua sequência de fabricação. De modo geral, é justamente nos processos de retificação que requisitos de tolerância dimensional, acabamento e integridade superficial devem ser atingidos no caso de existirem desvios devido a fases anteriores, conforme mostra a Fig.1 (Vieira, 1992).

No entanto, durante a operação de retificação, as temperaturas na região de contato entre ferramenta e peça (grão abrasivo e peça) são elevadas, podendo atingir níveis superiores a 1000°C e atingir profundidades da ordem de décimos de milímetro, conforme constatou (Snoeys, apud Abrão, 1991) (Fig. 2).

Essa situação motivou alguns autores a estudarem como esse patamar poderia provocar alterações na camada superficial das peças retificadas, identificando a ocorrência da “camada afetada pelo calor” (“heat-affected zone”) (Brinksmeier et al, 1982; Shaw, 1994). De acordo com (Shaw, 1994), é possível identificar a ocorrência de danos à camada superficial da peça em operações de retificação sem controle ou mal elaboradas. Em (Vieira et al, 1998), foi identificada a necessidade de maior controle sobre algumas das variáveis envolvidas nas operações de retificação plana e que podem ter grande influência na formação da camada afetada pelo calor. Apresentaram-se com maior destaque a dressagem e o avanço, além, é claro, das condições de lubri-refrigeração .



**Figura 1 – Identificação da retificação dentro da sequência de fabricação de uma peça (Vieira, 1992).**



**Figura 2 – Perfil do gradiente de temperaturas na região de contato entre rebolo e peça no processo de retificação (Snoeys, apud Abrão, 1991)**

No presente trabalho os autores procuram identificar como esse tipo de influência se dá nas operações de retificação cilíndrica e como a formação da camada afetada pelo calor pode se comportar ao longo da vida do rebolo.

## 2. INTEGRIDADE SUPERFICIAL E O SURGIMENTO DA CAMADA AFETADA PELO CALOR (CAC) EM PEÇAS RETIFICADAS

A ocorrência de danos à integridade superficial de uma peça pode levar à aceleração do processo de fadiga da peça, alterar a resistência à abrasão e à corrosão, ou ainda provocar o surgimento e crescimento de trincas. Além disso, peças danificadas superficialmente impossibilitam o acoplamento adequado entre eixos e cubos, por exemplo. É notório, portanto, que a integridade superficial de uma peça tem extrema importância funcional. Porém, a elevação da temperatura na região de contato entre rebolo e peça pode prejudicar a integridade.

O mecanismo de remoção do cavaco na retificação tem três fases distintas que foram caracterizadas por (König, 1980):

- fase I, onde ocorrem deformação elástica e atrito entre o grão abrasivo e a peça;
- fase II, onde ocorrem deformações elástica e plástica, atrito entre o grão abrasivo e a peça e atrito interno entre os grãos da estrutura do material;
- fase III, onde ocorrem as deformações elástica e plástica, o atrito entre grão abrasivo e peça, o atrito interno do material e, finalmente, a separação do material que origina o cavaco.

Essas três fases são fontes de transformação de parte da energia mecânica envolvida no processo em energia térmica (calor), e provocam a elevação abrupta da temperatura na região de contato entre rebolo e peça. A duração de cada uma dessas fases depende, principalmente, de fatores relacionados às características de agressividade do rebolo (grau de afiação do grão abrasivo) e aos parâmetros de operação utilizados (avanço e velocidades de corte e da peça).

Uma análise do diagrama parcial Fe-C mostrado na Fig. 3 indica que a linha  $A_{e3}$ , relativa à temperatura na qual ocorre completa austenitização durante o aquecimento de uma peça, pode ser ultrapassada na região de contato entre rebolo e peça.

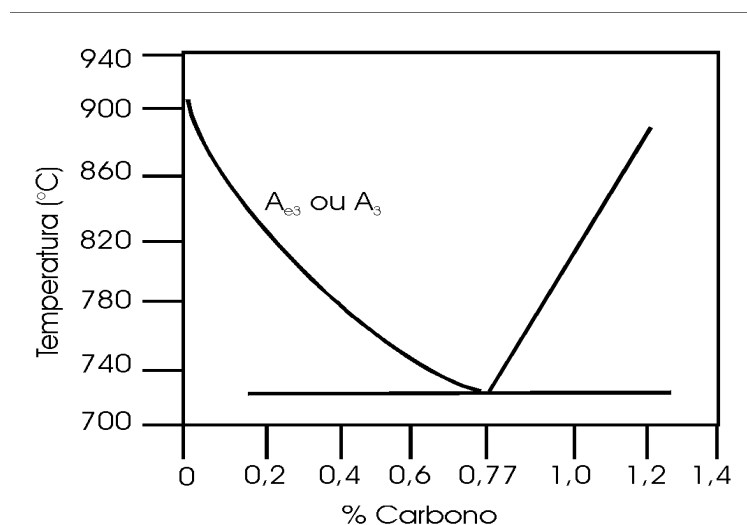


Figura 3 – Diagrama parcial Fe-C.

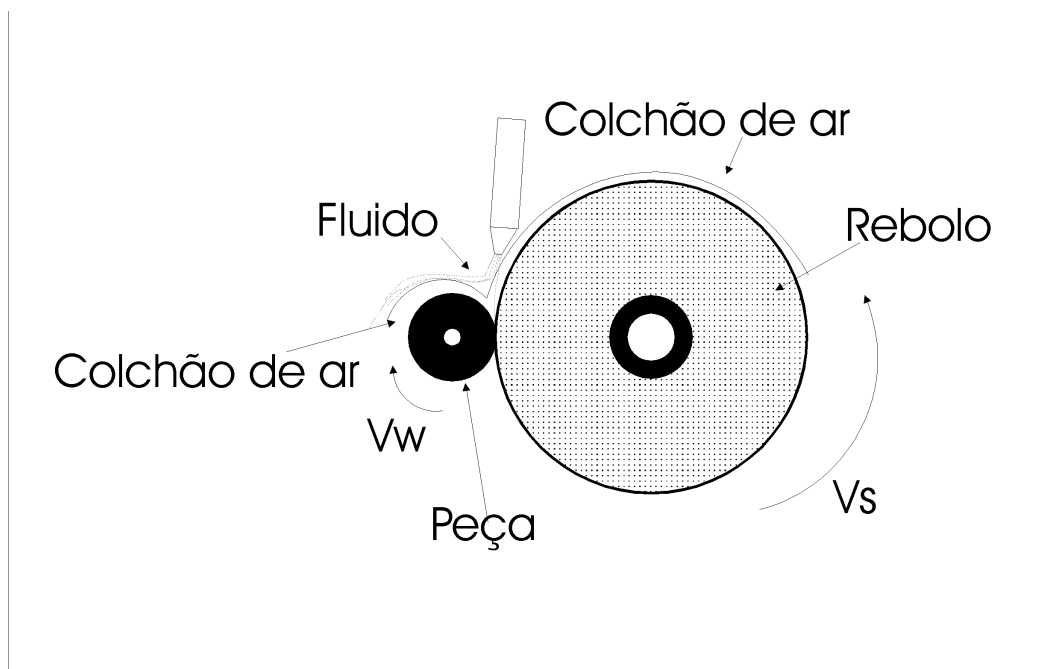
Dependendo do tipo de material, das características do rebolo e das condições de operação utilizadas no processo de retificação, esta temperatura pode ser superior à necessária para induzir alterações estruturais no material. Entretanto, num aquecimento rápido, esta temperatura aumenta com o aumento da velocidade de aquecimento, como é o caso observado na região de contato entre rebolo e peça no processo de retificação. Uma vez atingidas tais temperaturas, e devido ao rápido resfriamento durante as operações de retificação (provocado geralmente pela lubri-refrigeração inadequada), podem aparecer camadas de martensita ( $\alpha'$ ) que, por serem extremamente frágeis e metaestáveis, são indesejadas e podem originar defeitos como trincas e variações dimensionais e de propriedades mecânicas. (Shaw, 1994), afirma que o surgimento da fase  $\alpha'$  não se deve à exposição do material a elevadas temperaturas por um longo período de tempo, como ocorre nos tratamentos térmicos, mas devido ao fato de que a matriz do material não se encontra em estado estacionário, sendo deformada plasticamente ao mesmo tempo em que é momentaneamente aquecida. Nesse caso não ocorre a difusão, mas uma mudança coordenada dos átomos em curto espaço de tempo (Nishiyama, 1978).

Desse modo, nas operações de retificação, se as condições de trabalho utilizadas forem “leves”, a influência sobre a camada superficial deverá ser pequena. Por outro lado, se as condições de trabalho forem “pesadas”, a influência sobre a camada superficial deverá ser mais acentuada.

Também deve ser considerado que o calor existente na região de contato entre rebolo e peça resulta da transformação da maior parte da energia mecânica envolvida no processo (energia cinética oriunda das velocidades do rebolo e da peça, energia de separação do material, atrito, etc.) em energia térmica. Quanto maiores forem as condições que induzam energia mecânica ao processo, maiores as possibilidades de transformação dessa energia em energia térmica (calor), que deve ser dissipada pelos elementos envolvidos no processo (rebolo, peça, cavaco e lubri-refrigerante). No entanto, a falta de lubri-refrigeração adequada na região de contato entre rebolo e peça, leva ao resfriamento da peça instantes após o aquecimento, e não durante a remoção de material, e também pode afetar a camada superficial das peças retificadas. Esse problema mostra-se ainda mais crítico quando a operação realizada é a retificação cilíndrica, na qual o “colchão” de ar formado devido ao movimento de rotação do rebolo cria uma espécie de “camada de proteção” que impede a chegada do fluido lubri-refrigerante à região de contato entre rebolo e peça (Fig. 4). Essa barreira faz com que o resfriamento se dê apenas quando a região retificada já não esteja em contato com o rebolo, ou seja, na volta seguinte da peça. Caso a velocidade de rotação da peça seja elevada o resfriamento será feito pelo fluido lubri-refrigerante e provocará uma espécie de re-têmpera na peça. Mas caso a velocidade de rotação seja extremamente baixa (em torno de 5 RPM), pode ocorrer um outro tipo de recristalização da camada superficial da peça que não seja a formação da martensita transformada observada por (Shaw, 1984), e por (Vieira et al, 1998).

### **3. EXPERIMENTAÇÃO REALIZADA PARA IDENTIFICAR A CAC E OS FATORES QUE CONTRIBUEM PARA O SEU SURGIMENTO NA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA**

Para identificar as influências das condições de retificação e da vida do rebolo sobre a camada superficial das peças na retificação cilíndrica foram realizados diversos ensaios em corpos de prova de aço 4340 temperado e revenido (dureza aproximada de 45HRC). Os corpos de prova apresentavam diâmetro de 32 mm e a retificação foi sempre realizada em mergulho utilizando-se toda a largura do rebolo. O sobremetal retirado variou entre 0,05 mm e 0,2 mm. A dressagem foi mantida constante.



**Figura 4 – Formação do “colchão” de ar na retificação cilíndrica.**

Inicialmente os corpos de prova foram retificados utilizando-se rotação elevada para a peça (100 e 150 RPM) e variando-se a velocidade de corte (30 e 45 m/s), a velocidade de avanço em mergulho (1,0 e 1,3 mm/min) e o sobremetal retificado. Essas condições apresentaram-se insuficientes para provocar uma alteração na camada superficial. Mais adiante será feita uma análise dessa situação.

Numa segunda etapa foram alteradas as velocidades de avanço em mergulho (2,0; 1,0 e 0,5 mm/min) e reduziu-se a rotação da peça (50; 10 e 2 RPM). As velocidades de corte utilizadas foram 30 e 45 m/s.

A lubri-refrigeração utilizada foi a máxima permitida pela máquina e procurou-se direcionar o bico de saída do fluido para a região de contato entre rebolo e peça. Entretanto, a pressão do fluido mostrou-se insuficiente para romper o “colchão” de ar formado pelo movimento de rotação do rebolo.

Nas duas etapas de ensaios as condições de trabalho foram combinadas de forma aleatória.

A máquina utilizada foi uma retificadora CNC Ferdimat, com controle de rotação no eixo porta-peça e com variação de velocidade no rebolo programável.

A análise dos resultados foi realizada com o auxílio de um “software” de aquisição e análise de imagens (“Global Lab Image View”), a partir de aquisições feitas por uma câmara CCD acoplada a um microscópio metalográfico. Esses resultados serão apresentados e discutidos a seguir.

Para a medição da profundidade da camada afetada foi realizada uma calibração pelo “software” com o auxílio de uma lente com marcação micrométrica colocada no microscópio metalográfico. Essa calibração, feita tanto na direção horizontal, como na direção vertical, possibilita a conversão de distâncias medidas em números de “píxels” que compõem a imagem no “Global Lab” em milímetros ou outra unidade calibrada.

#### 4. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Os ensaios realizados na primeira etapa não apresentaram alteração na camada superficial que pudesse ser identificada durante a análise metalográfica das amostras. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que a combinação entre as velocidades de avanço em mergulho ( $f$ ) e as rotações ( $n$ ) utilizadas nessa primeira etapa resultavam em uma profundidade de corte ( $a_p$ ) relativamente pequena a cada volta da peça. A Tabela 1 mostra os valores de  $a$  nos quais as combinações entre  $f$  e  $n$  resultaram.

**Tabela 1 – Combinações entre  $f$  (mm/min) e  $n$  (RPM) e os valores de  $a$  (mm/rot) resultantes.**

$f$ (mm/min)	$n$ (RPM)	$a_p$ (mm/rotação)
1,3	150	0,0086
1,3	100	0,013
1,0	150	0,006
1,0	100	0,01

Os valores de  $a_p$  obtidos não são elevados, traçando-se uma comparação entre as operações de retificação cilíndrica e plana. Assim, pode-se afirmar que as condições de retificação utilizadas nessa etapa de testes foram “leves”, independente do valor de velocidade de corte utilizado, e que por esse motivo não foi possível a identificação do surgimento de uma camada afetada pelo calor. As situações em que as condições de retificação poderiam ser um pouco mais elevadas foram nas combinação  $f = 1,0$  mm/min x  $n = 100$  RPM, e  $f = 1,3$  mm/min x  $n = 100$  RPM, quando o avanço por volta foi da ordem de centésimo de milímetro.

Esse resultado nos dá a indicação de que na retificação cilíndrica o parâmetro *rotação da peça* ( $n$ ) pode ter maior influência sobre a formação da camada afetada do que o parâmetro *velocidade de avanço* ( $f$ ). Por esse motivo a segunda etapa de ensaios foi realizada com rotações menores (50 RPM, 10 RPM e 2 RPM) e com velocidades de avanço que eram de ordem menor (caso de  $f = 0,5$  mm/min), igual (caso de  $f = 1,0$  mm/min) ou maior (caso de  $f = 2,0$  mm/min) que aquelas utilizadas na primeira etapa.

Nessa segunda etapa de ensaios a combinação de parâmetros utilizada foi a descrita pela Tabela 2.

**Tabela 2 – Combinação de parâmetros utilizados na Segunda etapa de ensaios**

$v_s$ (m/s)	$n$ (RPM)	$f$ (mm/min)	$a_p$ (mm/rotação)
45	50	2,0	0,04
45	10	2,0	0,2
30	50	2,0	0,04
30	10	2,0	0,2
45	50	1,0	0,02
45	10	1,0	0,1
30	50	1,0	0,02
30	10	1,0	0,1
45	2	0,5	0,25

As amostras das figuras 5 a 9 apresentam a formação da camada afetada pelo calor.

Na Fig. 5 observa-se a ocorrência da alteração na camada superficial através da análise do perfil de tonalidade da amostra obtida em fim de vida na parte superior da figura. Os dois perfis superiores têm distribuição de tonalidade diferentes dos perfis inferiores. Esses perfis de tonalidade foram obtidos em pontos diferentes da amostra que está à esquerda da figura.

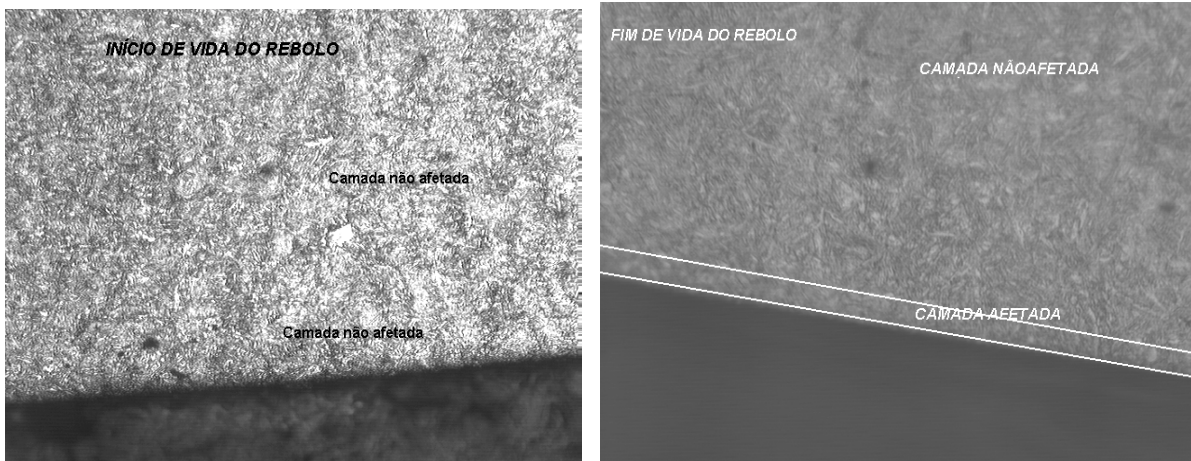
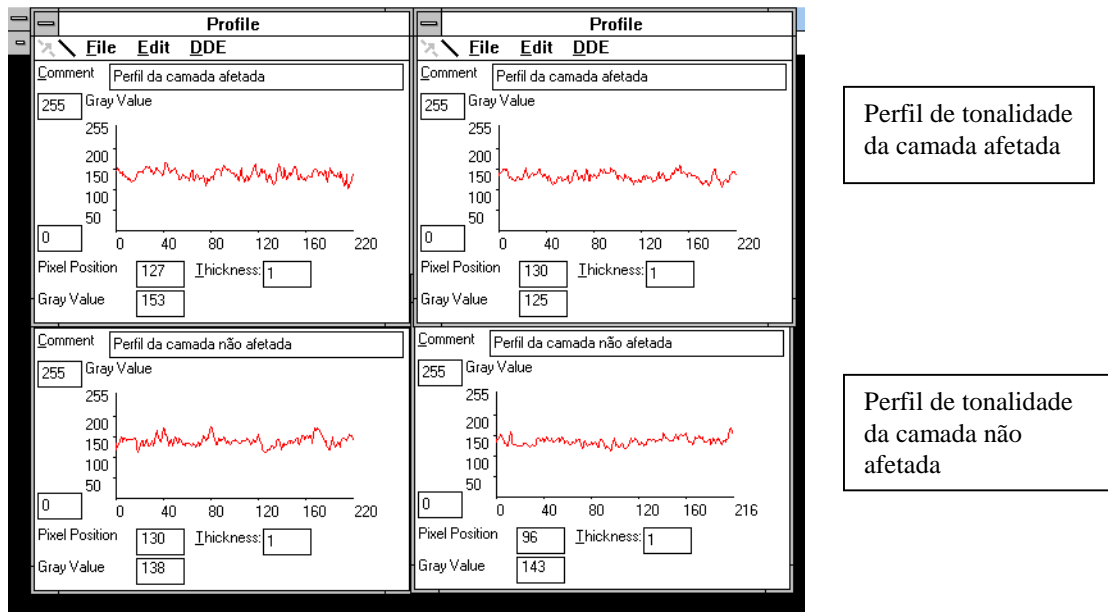
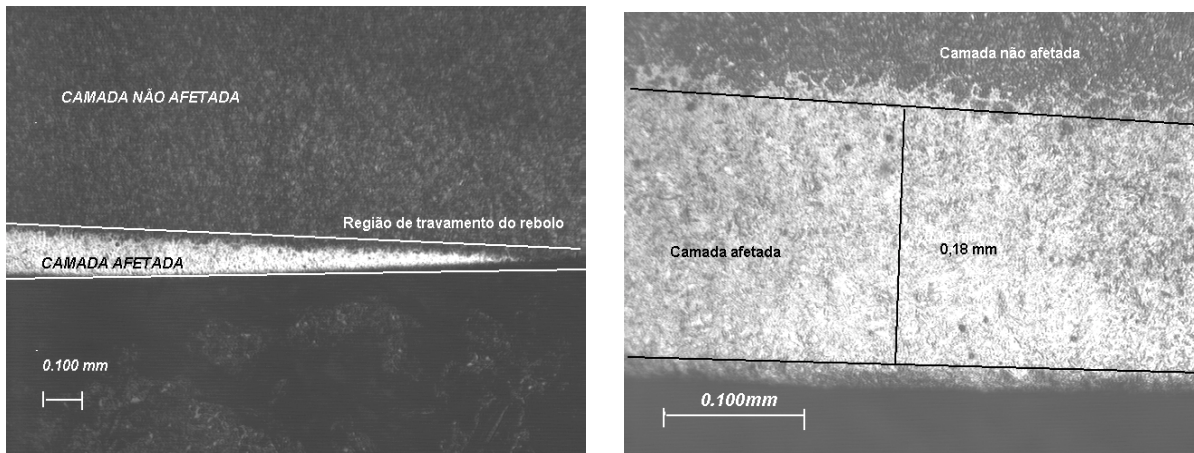


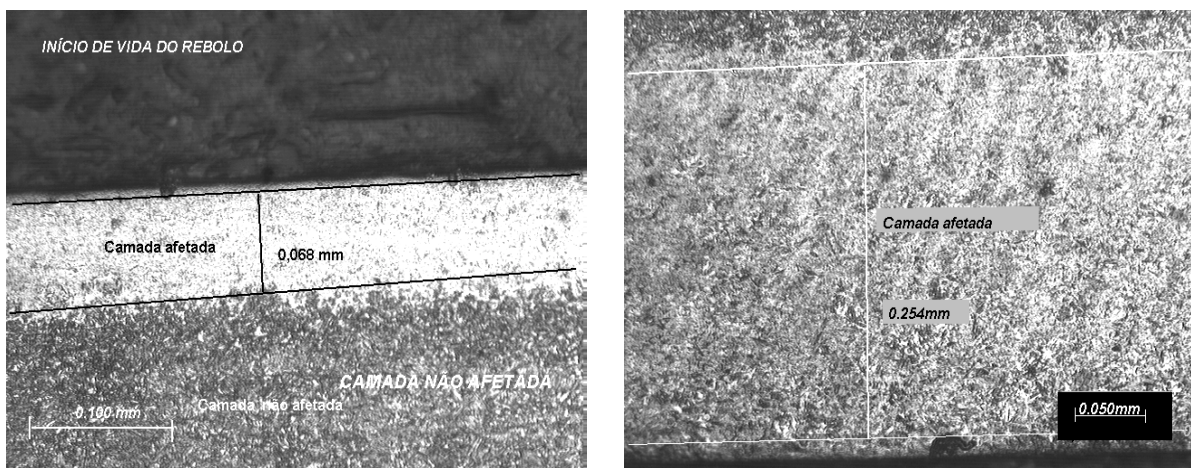
Figura 5 – Amostras do corpo de prova retificado com  $v_s = 45$  m/s,  $n = 50$  RPM,  $f = 2,0$  mm/min em início de vida do rebolo (à esquerda) e em fim de vida do rebolo (à direita). Na parte de cima observa-se o perfil de tonalidade da amostra obtida após a retificação em início e em final de vida, indicando o surgimento de alterações na camada superficial da peça (maior concentração de tonalidade de cinza).

Na Fig. 6 observa-se amostras obtidas com a retificação da peça nas condições  $v_s = 45$  m/s,  $n = 10$  RPM e  $f = 2,0$  mm/min, ampliadas 50 vezes e 200 vezes. Nesse ensaio ocorreu a parada do rebolo sobre a peça. Na amostra com menor ampliação nota-se o ponto exato em que ocorreu esse travamento, sendo que nesse ponto a camada afetada foi reduzida. Essa

redução se deu devido à interrupção da retificação da peça. Na parte em que a retificação vinha ocorrendo a camada afetada estava sendo formada e na amostra com maior ampliação identifica-se que chegou a atingir 0,18 mm de profundidade.



**Figura 6 – Amostras do ensaio realizado com  $v_s = 45$  m/s,  $n = 10$  RPM e  $f = 2,0$  mm/min, ampliadas 50 vezes e 200 vezes, respectivamente.**



**Figura 7 – Amostras obtidas após a retificação com  $v_s = 45$  m/s,  $n = 10$  RPM,  $f = 1,0$  mm/min, em início e em final de vida do rebolo, respectivamente.**

Na Fig. 7, identifica-se que dentro de uma mesma condição de retificação,  $v_s = 45$  m/s,  $n = 10$  RPM e  $f = 1,0$  mm/min, a camada aumentou entre o início e o final da vida do rebolo. Esse aumento pode ser creditado ao aumento da força de retificação resultante do desgaste do grão abrasivo com o decorrer da vida do rebolo.

Na Fig. 8 observa-se que a camada afetada formou-se ainda que timidamente. Observa-se ainda que a única condição diferente entre os ensaios que originaram as amostras é a velocidade de avanço em mergulho, o que indica a sua influência sobre a formação da “CAC”. Entretanto, essa influência é bem menor que a observada pela figura 9, que apresenta a formação da camada nas condições de  $v_s = 45$  m/s,  $n = 2$  RPM e  $f = 0,5$  mm/min. Nesse caso, em que novamente ocorreu o travamento do rebolo, observa-se que a formação da camada foi intensa, chegando a atingir 0,22 mm de profundidade. Isso indica que o grande ponto de



influência no surgimento da “CAC” é realmente a rotação da peça e não apenas a velocidade de avanço em mergulho do rebolo ou mesmo a velocidade de corte.

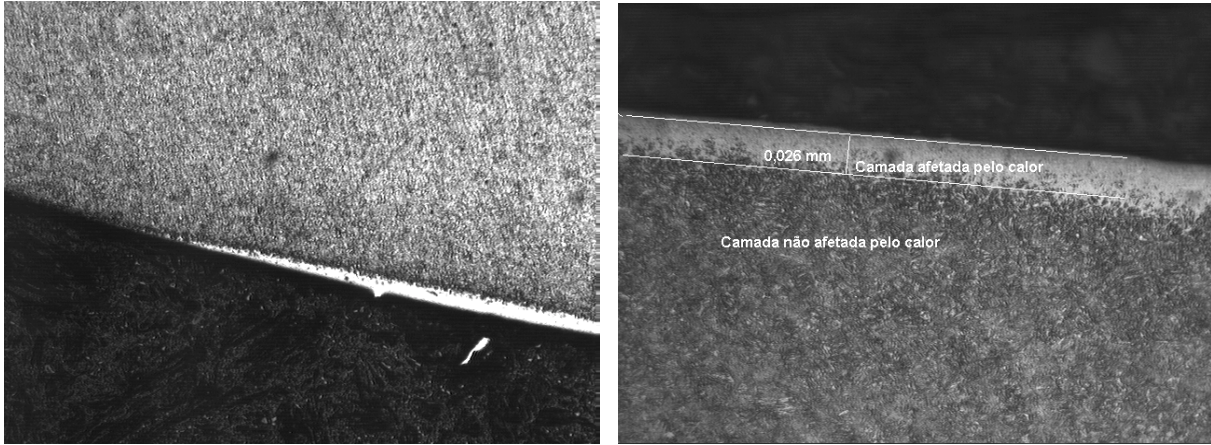


Figura 8 – Amostras obtidas com  $v_s = 30$  m/s,  $n = 10$  RPM e com  $f = 2,0$  mm/min (à esquerda) e com  $f = 1,0$  mm/min (à direita)

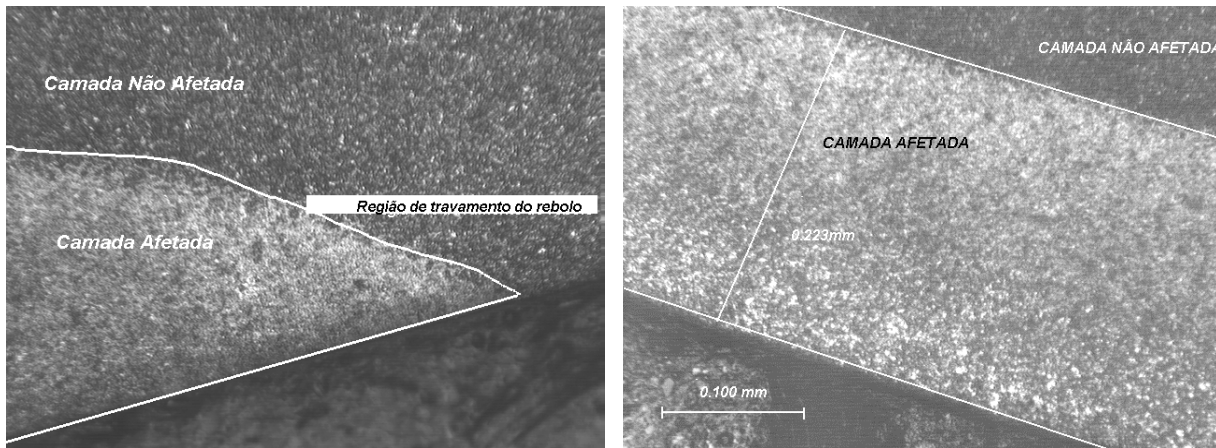


Figura 9 – Amostras obtidas com  $v_s = 45$  m/s,  $n = 2$  RPM e  $f = 0,5$  mm/min, ampliadas 200 vezes.

## 5. CONCLUSÕES

A combinação entre rotação e velocidade de avanço em mergulho tem grande influência sobre a formação da camada afetada pelo calor na retificação cilíndrica. Nessa combinação, entretanto, a rotação mostra-se com maior influência que a velocidade de avanço em mergulho, uma vez que o avanço por volta é mais susceptível a variações devido à rotação do que devido à velocidade de avanço em mergulho.

Durante a vida do rebolo a camada também tende a surgir e crescer, principalmente quando se trata de operações nas quais as condições sejam mais favoráveis ao surgimento da “CAC”. As operações que são realizadas com o rebolo próximo ao fim da vida são também mais susceptíveis a apresentar a camada afetada.

Finalmente, fica outra vez evidente que a lubri-refrigeração é fator fundamental para evitar o surgimento da “CAC”. No caso da retificação cilíndrica essa influência se torna mais

evidente à medida em que o fluido lubri-refrigerante enfrenta maiores dificuldades em atingir a zona de contato entre rebolo e peça devido à formação de um “colchão” de ar que desvia o fluxo do fluido da direção da peça.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Abrão, A.M. *Sistema para Avaliação de Desempenho Térmico de Pares Rebolo-Peça em Retificação*. Dissertação de Mestrado EESC - USP, 1991.
- Brinksmeier, E.; Commett, J.T.; König, W.; Laskovar, P.; Peters, J.; Toenshof, H.K. *Annals of the CIRP*, 31/2, 1982, p.49.
- König, W. *Fertigungstechnologie: Schleifen, Rohning und Lappen*. VDI-Verlag, Düsseldorf, Alemanha, 1980.
- Nishiyama, Z. *Martensitic Transformation*. Acad. Press, 1978
- Shaw, M. *Heat-Affected Zones in Grinding Steel*. *Annals of the CIRP*, v43/1, 1994, pp 279-282.
- Vieira, M., Jr. *Metodologia Para Determinação das Condições de Usinagem e de Operação no Processo de Retificação*. Dissertação de Mestrado, EESC - USP, São Carlos, 1992.
- Vieira, M., Jr.; Lima, A.; Libardi, R.; Cancilieri, H. *Análise da Camada Afetada Pelo Calor na Superfície de Peças Retificadas*. IV Seminário de Desgaste, Associação Brasileira de Metalurgia – ABM, São Paulo, Julho, 1998.

### HEAT AFFECTED ZONE OCURENCE ON THE SURFACE OF GROUND WORKPIECES

**Abstract:** Grinding process aims the increasing of surface finish and to assure the surface integrity of parts termically treated or not. However, during grinding operations the temperature at the contact region between grain and workpiece can achieve about 1000°C. This is enough to change the structure on the surface of the workpiece. Moreover, there is another trouble that occurs on grinding process: lack of coolant at the contact region between wheel and workpiece, that causes an incorrect cooling of the workpiece. This kind of cooling can also affect the surface of the ground workpiece. The present issue purposes the study of the Heat Affected Zone (HAZ) on ground workpieces to identify the possibility of occurrence of damages to the work surface. To do much, the issue has some analysis of workpieces ground under different grinding, dressing and treating conditions.

**Key-words:** surface integrity; heat affected zone; grinding.