

ESTRATÉGIAS PARA A RETIFICAÇÃO DE ESPELHOS DE VIRABREQUINS AUTOMOTIVOS UTILIZANDO-SE REBOLOS DE CBN

Eraldo Jannone da Silva

Universidade de São Paulo - USP – Escola de Engenharia de São Carlos – EESC - 13560-250 - São Carlos, SP, Brasil. e-mail: eraldojs@sc.usp.br

João Fernando Gomes de Oliveira

Universidade de São Paulo - USP – Escola de Engenharia de São Carlos – EESC - 13560-250 - São Carlos, SP, Brasil. e-mail: jfgo@sc.usp.br

Resumo. *Este trabalho analisa, de forma comparativa, duas estratégias de retificação a alta velocidade de espelhos de virabrequins automotivos, utilizando-se rebolos de CBN: mergulho e axial. A primeira é a estratégia atualmente empregada e axial é a variante do processo. Uma metodologia de experimentação foi desenvolvida, onde os parâmetros de análise foram: energia de corte específica, rugosidade e desgaste radial do rebolo para cada variante do processo. Através da realização dos ensaios, verificou-se a viabilidade da utilização de ambas as estratégias para a realização da operação em questão. Todavia, em virtude da maior área de contato rebolo-peça quando da utilização da variante do processo (retificação axial) mecanismos devem ser utilizados visando-se eliminar e prevenir o empastamento prematuro do rebolo e a inviabilidade da retificação axial. Dentre estes, destacam-se a execução de uma dressagem efetiva buscando-se obter uma agressividade necessária, bem como a utilização de bicos lavadores a alta pressão, os quais permitem a limpeza das porosidades do ligante do rebolo, evitando o seu empastamento.*

Palavras-chave: *retificação, CBN, virabrequins, alta velocidade de corte.*

1. INTRODUÇÃO

Durante os últimos anos, a racionalização da produção através da otimização individual dos processos de fabricação teve como objetivo a redução da seqüência produtiva. Esta se inicia na concepção teórica do produto e encerra-se nos procedimentos para seu descarte. O potencial de redução encontra-se na aglutinação de diferentes estágios de fabricação e na substituição de outros.

Um outro impulsionador sustentável para o desenvolvimento dos processos de fabricação tem sido a demanda crescente por flexibilidade de produção, resultado da diversidade de componentes a serem produzidos, menor prazo de entrega e as constantes alterações das necessidades dos mercados. Todavia o ganho de flexibilidade através de reduções na qualidade e na produtividade não é desejado (Hegener⁽¹⁾).

Eixos virabrequim são elementos críticos para todos os motores a pistão. As suas propriedades, tais como precisão de forma, qualidade superficial e comportamento quando excitados influenciam diretamente a qualidade na conversão de força, na taxa de exaustão e no nível de ruído do motor (Tonshöff et al.⁽²⁾). Na indústria automotiva, numerosas variantes de eixos virabrequim são produzidas para a utilização em motores automotivos.

Um dos objetivos principais atuais é a redução da seqüência produtiva tecnológica da produção de eixos virabrequim. No caso de eixos para motores de caminhões, 85% do custo total de fabricação refere-se aos custos de usinagem. Isto caracteriza os virabrequim como peças cujo custo essencial de fabricação é o de usinagem (Tönshoff et al.⁽²⁾).

A introdução de rebolos de CBN trouxe um avanço tecnológico ao processo. Comparando-se com os convencionais, espera-se obter uma maior vida útil da ferramenta, maiores taxas de remoção, através da possibilidade de atingirem-se maiores velocidades de corte (acima de 125 m/s). A maior condutividade térmica dos grãos de CBN permitem uma maior remoção do calor gerado no processo, o qual flui pela ferramenta. Há uma redução no carregamento térmico da peça, melhorando a sua integridade superficial, conferindo microestruturas e estados de tensões mais favoráveis, aumentando a vida à fadiga dos componentes. O desenvolvimento, a partir de 1985 da retificação cilíndrica externa de forma permitiu que diferentes perfis de peça pudessem ser retificados, sendo estes cilíndricos, cônicos, com chanfros, com faces paralelas e com perfis côncavos e convexos (König e Klocke⁽³⁾). Isto permitiu a flexibilidade necessária para a introdução de novas variantes para o processo de retificação.

Assim, as limitações atuais do processo de retificação de eixos virabrequim incluem a necessidade de uma operação de dressagem controlada quando da utilização de rebolos de CBN, com monitoramento eficaz, principalmente na região lateral do rebolo. Adicionalmente, sistemas de aplicação de fluido de corte com eficiência melhorada são requeridos a fim de se evitar a queima no espelho. Sistemas de limpeza a alta pressão são necessários para evitar o empastamento do rebolo. As estratégias atuais de retificação, combinadas com o baixo poder lubrificante de fluidos de corte de base aquosa, levam a um desgaste excessivo do canto do rebolo de CBN. Adicionalmente, existe uma rápida degradação do perfil gerado durante a operação de dressagem. O número de peças produzidas por dressagem é reduzido e as operações de dressagem se tornam mais frequentes. Isto reduz as vantagens da utilização de rebolos de CBN, aumentando os custos de retificação.

O objetivo deste trabalho é análise comparativa de duas estratégias de retificação a alta velocidade com rebolos de CBN a serem aplicadas na retificação das faces planas (espelhos) de virabrequins automotivos. As características das estratégias e a metodologia de experimentação são apresentadas a seguir.

2. ESTRATÉGIAS PARA A RETIFICAÇÃO DE FACES PLANAS (ESPELHOS) DE EIXOS VIRABREQUIM

A operação de retificação de virabrequins utilizados em motores veiculares, estacionários ou marítimos envolve a retificação do diâmetro e das paredes (espelhos) dos colos (munhão e moente) (Figura 1).

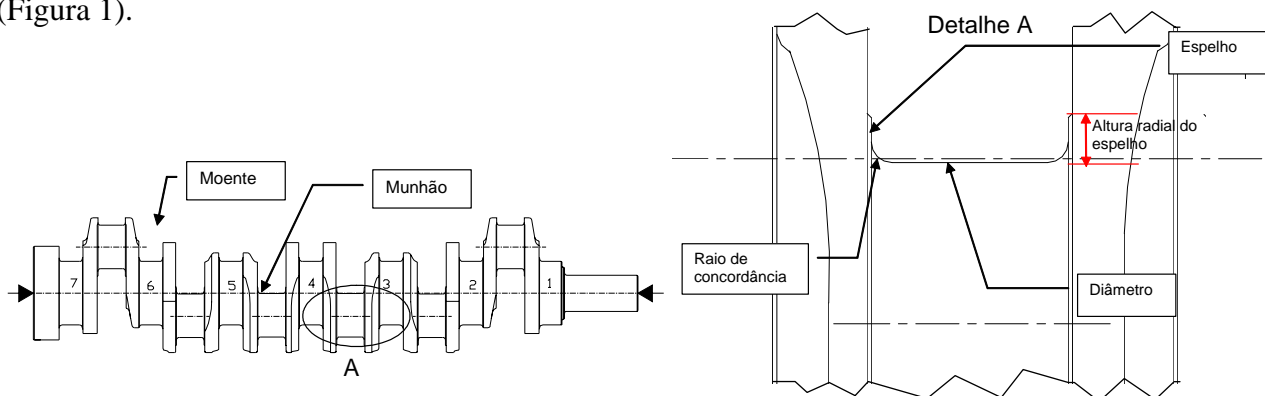


Figura 1. Partes constituintes de um virabrequim – Detalhe de um munhão.

As forças associadas com a retificação dos diâmetros são moderadas não se apresentando como limitação para o desempenho da operação. Já a retificação dos espelhos sim, resultado da solicitação extrema dos cantos do rebolo. A elevada pressão de contato proporciona uma excessiva liberação de grãos, causando a degradação de seu perfil, gerando erros de forma na peça retificada.

As dimensões e a qualidade superficial do raio de concordância entre o espelho e o diâmetro do colo são essenciais para a resistência mecânica e para o desempenho dos virabrequins. A altura radial dos espelhos podem atingir valores acima de 6 mm e o sobremetal a ser removido pode variar

entre 0,2 e 0,6 mm ao longo de todo o perfil, dependendo do tipo e tamanho do virabrequim e/ou motor (Sheldon e Liu⁽⁴⁾).

O método preferencial para a retificação dos espelhos é através de mergulho utilizando-se avanços radiais elevados, muitas vezes superiores aos utilizados para a retificação do diâmetro do colo. As altas taxas de remoção específica (Q'_w) e os requisitos de um raio de arredondamento suave entre o espelho e o diâmetro do colo levam a uma condição de sobrecarga ao canto do rebolo.

O surgimento de um ressalto ou de um “ombro” no raio de arredondamento, resultado do desgaste não-uniforme do rebolo é a maior causa da rejeição do virabrequim retificado, de danos metalúrgicos na peça e de erros de forma. Nestes casos, o rebolo deve ser dressado a fim de se restabelecer o perfil desejado. Dentre as alternativas para a otimização da retificação dos espelhos, duas variantes podem ser utilizadas, conforme apresentado na Figura 2.

A estratégia de retificação de mergulho é a estratégia usualmente aplicada (Variante A). Nesta utiliza-se um rebolo com todo o perfil do colo (raios de arredondamento) copiado em sua superfície, o qual é gerado durante a operação de dressagem. Neste caso, existe apenas uma operação de mergulho, usinando-se todo o perfil. O avanço de usinagem é na direção radial (v_{fr}). Nesta configuração existe a concentração da taxa de remoção específica de material nas extremidades do rebolo, conforme apresentado na Figura 3.

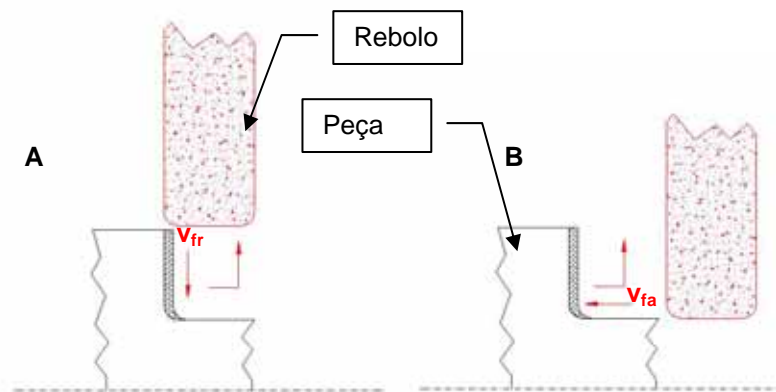


Figura 2. Variantes de retificação utilizadas nos testes (A – estratégia tradicional; B – variante do processo)

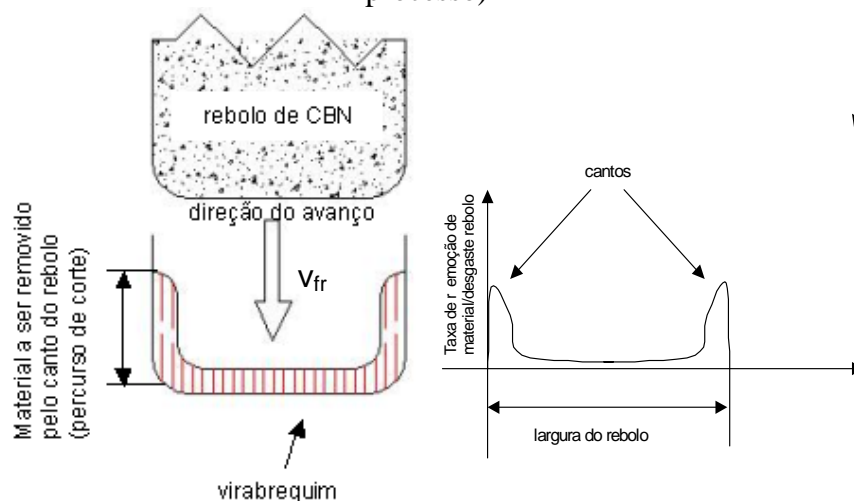


Figura 3. Variante de retificação A – estratégia tradicional

A variante B caracteriza-se pela usinagem do espelho do virabrequim com avanço de usinagem na direção axial (v_{fa}). O objetivo da utilização desta variante é a distribuição do sobremetal a ser removido ao longo de toda a região de contato rebolo-peça, conforme apresentado de forma

esquemática na Figura 4, onde: a_f = avanço axial por volta; α_1 = ângulo complementar; α_2 = ângulo de engajamento peça-rebolo; β = ângulo de hélice; d_s = diâmetro externo do rebolo; d_{w1} = diâmetro interno do colo; d_{w2} = diâmetro externo do colo; Δ_{tc} = tempo de corte; F = avanço axial; $h_{m\acute{a}x}$ = espessura máxima do cavaco; L = espaçamento médio entre os grãos; l_c = comprimento de contato; n_w = rotação da peça; v_s = velocidade de corte; v_w = velocidade da peça.

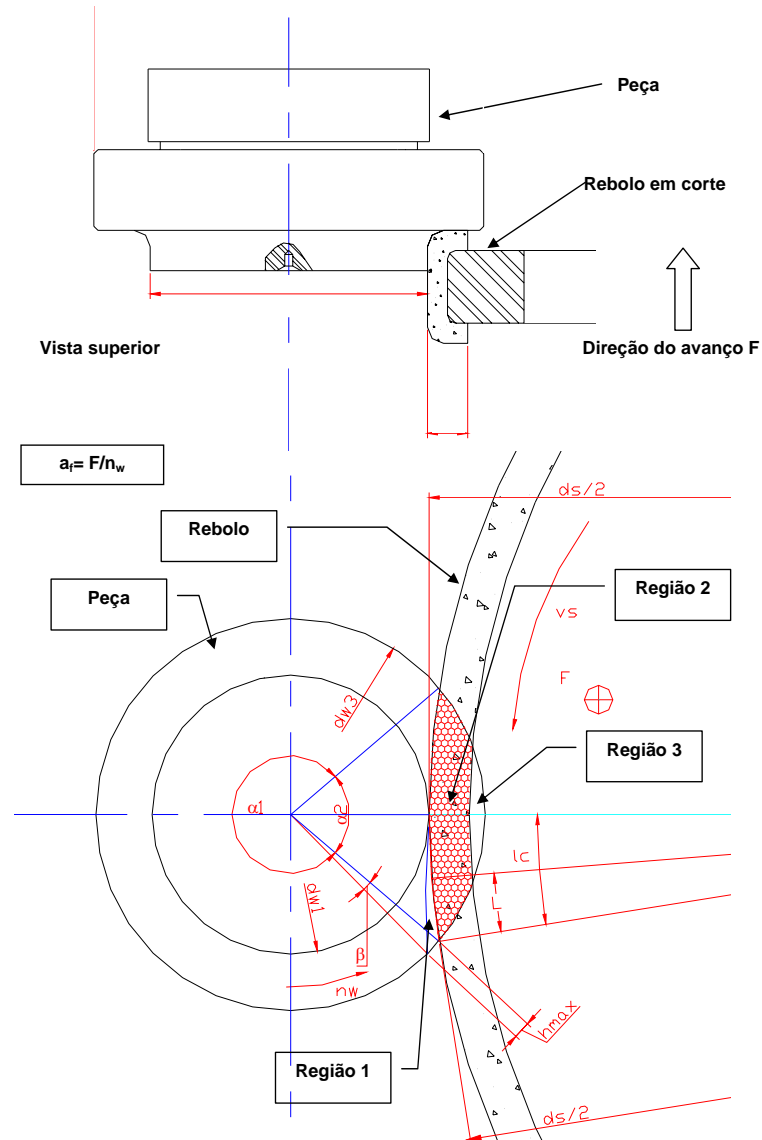


Figura 4. Variante de retificação B – estratégia proposta

3. METODOLOGIA DE EXPERIMENTAÇÃO

Os testes de retificação foram realizados utilizando-se uma retificadora cilíndrica externa, marca Junker, modelo Quickpoint 5002/20, alocada no Laboratório WZL - *Werkzeugmaschinenlabor* – da Universidade RWTH - Aachen – Alemanha. Dentre as características principais destacam-se: máxima velocidade de corte v_s igual a 140 m/s, sistema de balanceamento eletrônico do rebolo e monitor de emissão acústica, duas unidades dressadoras distintas, com discos diamantados, sendo um sistema para a dressagem do diâmetro do rebolo e outro para a dressagem da lateral do mesmo. O sistema de aplicação do fluido de corte consta de dois bocais de aplicação, um inferior e outro superior, com pressão máxima de aplicação de 20 bar. A retificadora possui ainda: sistema de limpeza da superfície do rebolo, com máxima pressão igual a 60 bar; sistema eletrostático de

filtragem de névoa, com capacidade de 1900 m³/h e sistema de filtragem do fluido de corte, com vazão máxima de 210 l/min, com tamanho mínimo da partícula filtrada de 3 µm.

O objetivo dos testes foi a avaliação comparativa das estratégias de retificação de espelhos e o estudo da influência da utilização dos bocais de limpeza do rebolo à alta pressão, quando da utilização da estratégia de retificação axial.

Os parâmetros de avaliação foram: energia de corte específica (determinada através da potência elétrica consumida durante a usinagem); rugosidade R_z e desgaste radial do rebolo (avaliação do perfil gerado na retificação de uma chapa plana, antes e depois dos testes). As condições de final de ensaio foram: detecção de queima na superfície usinada da peça ou a usinagem de volume específico de material removido (V'_w) para o teste em questão.

As estratégias de retificação testadas foram: variante A (mergulho) e variante B (retificação axial). Devido à impossibilidade da usinagem dos espelhos excêntricos de eixos virabrequins na retificadora de alta velocidade em questão optou-se pela usinagem de corpos-de-prova com geometria igual à de um colo de virabrequim. O corpo-de-prova utilizado permite a usinagem de diversos colos numa única peça. O material dos mesmos é o aço 16MnCr5 (61 HR_c, 1 mm de camada temperada), com diâmetro interno do colo igual a 50 mm e altura radial do espelho igual a 5 mm.

O rebolo de CBN com ligante vitrificado utilizado tem a seguinte especificação: B126VSS 2804 J1 SC V 360, com diâmetro externo $d_s = 400$ mm, com largura 6,5 mm e altura segmento 5 mm, com raio de canto (r_{sk}) igual a 1 mm. As condições de dressagem foram: velocidade periférica do rebolo durante a dressagem ($v_{cd} = v_s = 100$ m/s; razão de velocidades durante a dressagem: $q_d = +0,9$; profundidade de dressagem ($a_d = 3$ µm; passo de dressagem: 0,369 mm/rot.

As condições de usinagem foram:

- Velocidade de corte $v_s = 100$ m/s; rotação da peça: $n_w = 120$ rpm; relação de velocidades ($q = \pm v_s/v_w$) = -265; tempo de spark-out: 3 s; retificação dos espelhos utilizando-se apenas a lateral esquerda do rebolo.
- Variante A:
 - Para $\varnothing d_{w2}$ (diâmetro externo = 60 mm):
 - $Q'_w = 157,0$ mm³/mm.s; tempo de corte (t_c) = 6s; $V_{fr} = 50$ mm/min
 - Para $\varnothing d_{w1}$ (diâmetro interno = 50 mm):
 - $Q'_w = 130,9$ mm³/mm.s; $t_c = 6$ s; $V_{fr} = 50$ mm/min
- Variante B
 - Altura radial do espelho em cada estágio: 5 mm
 - $V_{fa} = 3$ mm/min
 - $t_c = 6$ s
- Sobremetal removido por ciclo: 0,3 mm
- Número de ciclos por colo: 3
- Total de colos retificados: 18
- Volume específico de material removido (V'_w) por ciclo: 2592 mm³/mm
- Volume específico de material removido (V'_w) por ensaio: 46656 mm³/mm

As pressões do sistema de aplicação de fluido de corte e do sistema de limpeza do rebolo foram de 17 e 60 bar, respectivamente.

A Tabela 1 apresenta a classificação dos ensaios realizados.

Tabela 1 – Nomenclatura dos ensaios realizados

Nº do teste	Código da peça	Estratégia de retificação	Limpeza do rebolo	Tempo total de corte (s)
1	1	Axial (B)	COM	6
2	5	Axial (B)	SEM	6
3	7	Mergulho (A)	COM	6

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Preliminarmente verificou-se que a condição de dressagem da lateral do rebolo é fator fundamental para a obtenção de peças com qualidade superficial desejada. Verificou-se que a geometria dos discos dressadores conferia uma largura de atuação excessiva durante a dressagem das laterais do rebolo. Para ambas estratégias de retificação obtiveram-se peças com queima e uma rugosidade extremamente baixa ($R_a = 0,06 \mu\text{m}$ e $0,14 \mu\text{m}$ para as variantes A e B respectivamente). As condições de dressagem eram as seguintes: $q_d = + 0,9$; $v_s=100\text{m/s}$; profundidade de dressagem (a_d) = $3 \mu\text{m}$; Passo de dressagem S_d : $0,105 \text{ mm/rot}$. Os avanços de usinagem foram: $v_{fr} = 5 \text{ mm/min}$ e $v_{fa} = 0,3 \text{ mm/min}$ para as variantes A e B respectivamente ($n_w = 120 \text{ rpm}$; $v_s = 100\text{m/s}$). A solução adotada foi o aumento do passo de dressagem para $0,369 \text{ mm/rot}$, o que implicou num avanço de dressagem de 1750 mm/min .

4.1 Influência do sistema de limpeza do rebolo

A influência da utilização do sistema de limpeza a alta pressão da superfície do rebolo foi analisado nos testes utilizando-se a variante B de retificação. Verificou-se uma ligeira redução dos valores de energia de corte específica e de rugosidade quando da utilização do sistema de limpeza (Figura 5).

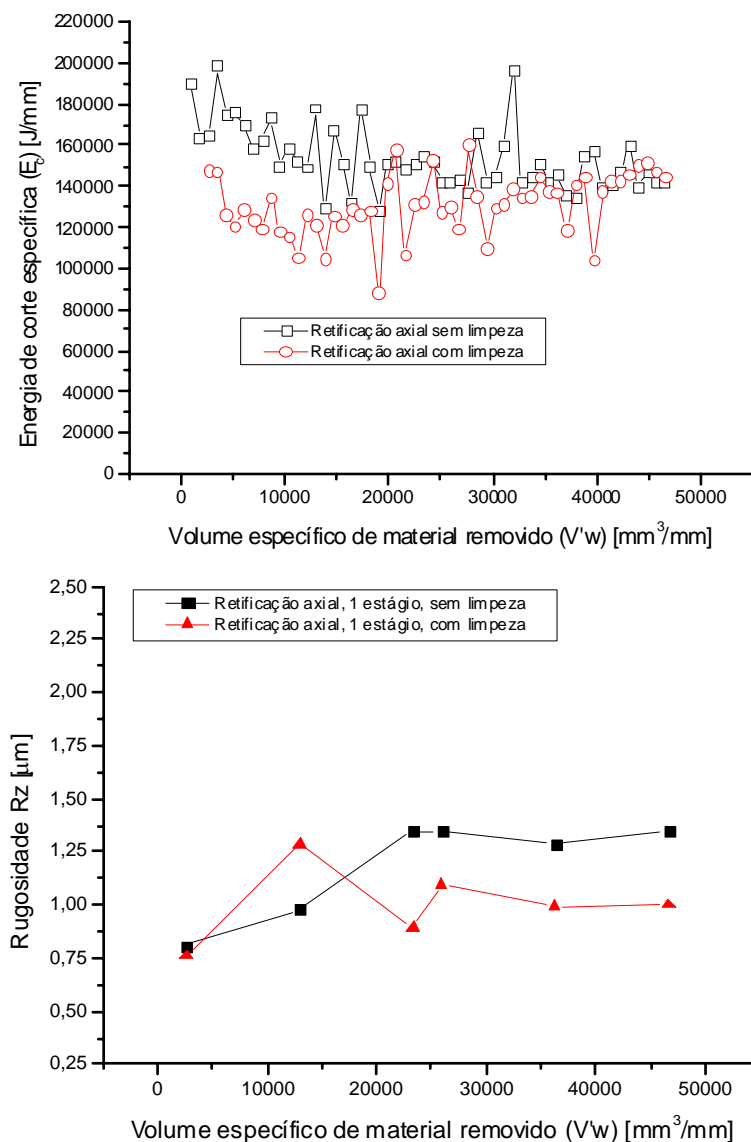


Figura 5 – Resultados de energia de retificação e rugosidade com e sem limpeza a alta pressão

Para o volume de material removido, verificou-se uma alteração na dimensão do raio do rebolo, resultado da ação do sistema de limpeza (Tabela 2). Todavia, a utilização deste contribuiu para a redução da tendência de formação de material aderido na superfície do rebolo, conforme apresentado na Figura 6.

Tabela 2 – Influência do sistema de limpeza nas modificações do perfil do rebolo

Nº de estágios	Limpeza do rebolo	Raio (mm)		Ângulo entre a face e a lateral do rebolo	
		Antes	Depois	Antes	Depois
1	COM	0,793	0,765	90 ^o 02'04"	90 ^o 02'03"
1	SEM	0,762	0,768	90 ^o 04'42"	89 ^o 54'16"

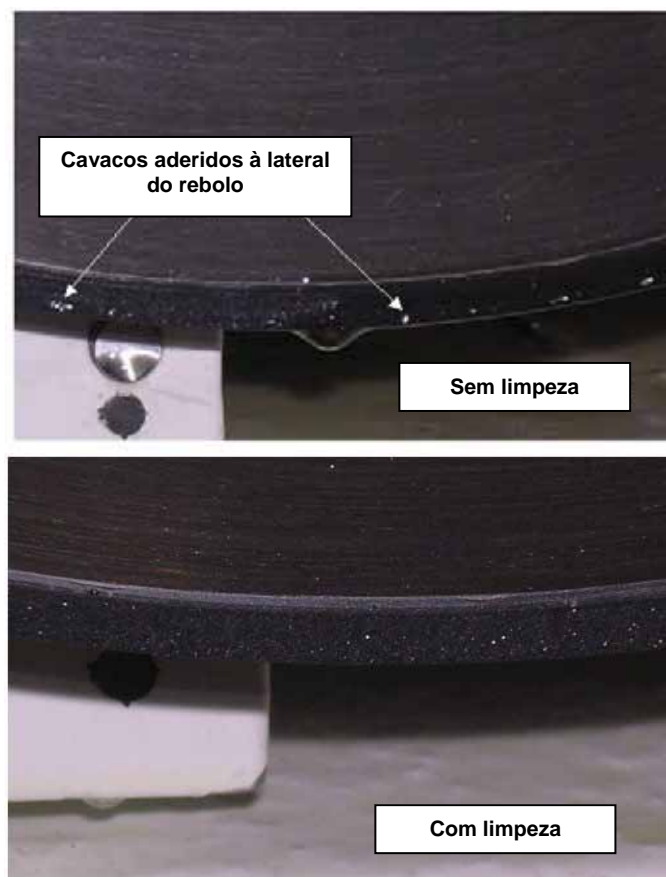


Figura 6 - Aspecto visual da superfície do rebolo após a retificação – variante B

4.2 Análise comparativa entre as estratégias de retificação

Os resultados de energia de corte e de rugosidade para as variantes A (mergulho) e B (axial) são apresentados na Figura 7. Nos testes, o sistema de limpeza do rebolo foi utilizado durante todo o ensaio.

Para as estratégias testadas, o tempo de corte foi idêntico (igual a 6 s). Verificou-se que os menores valores de energia de corte foram observados para a variante A (mergulho). Isto se deve ao fato da menor área de contato rebolo-peça quando da utilização desta variante. O aumento da força de corte quando da utilização da variante B também foi verificado por Merbecks⁽⁵⁾, obtendo-se valores até 15 vezes maiores. Os resultados de rugosidade (Figura 7) apresentam uma ligeira vantagem a favor da utilização da variante B. As estratégias testadas resultaram em valores inferiores a 2 µm, valor este limite desejado para a operação efetuada. Os resultados obtidos para o

desgaste do rebolo são apresentados na Tabela 3. Para o volume de material removido não foram detectados desvios geométricos do perfil do rebolo como aqueles que poderiam causar o surgimento de “ombros” no raio de concordância da peça. Pequenas variações foram detectadas no valor do raio do rebolo antes e depois do ensaio, sendo iguais a 28 μm no raio para a variante B e 11 μm para a variante A.

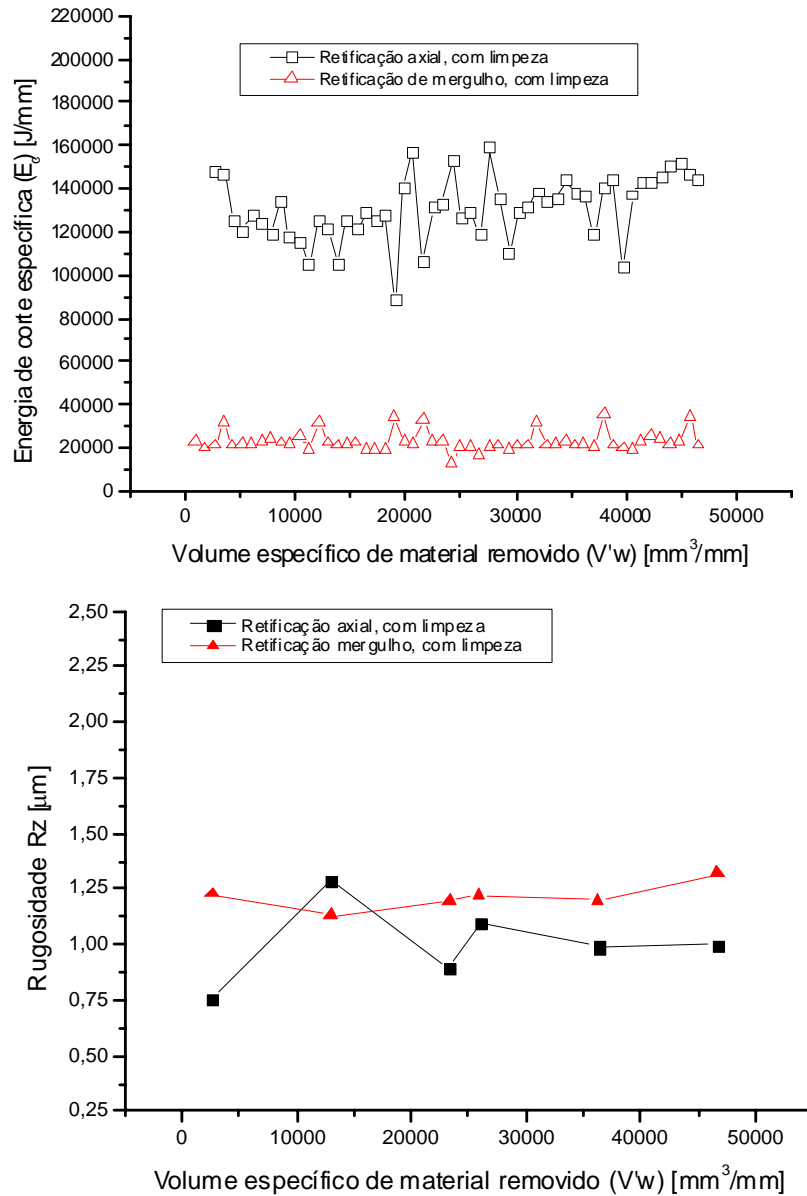


Figura 7 – Resultados de energia de retificação e rugosidade para as variantes A e B

Tabela 3 – Influência do sistema de limpeza nas modificações do perfil do rebolo

Variante	Estágios	Raio (mm)		Ângulo da chapa	
		Antes	Depois	Antes	Depois
A	-	0,761	0,750	89°50'56"	89°46'19"
B	1	0,793	0,765	90°02'04"	90°02'03"

A análise da microestrutura do último colo retificado revelou a formação de um leve dano térmico, com camada afetada termicamente nas proximidades do raio, para ambas estratégias (Figuras 8 e 9).

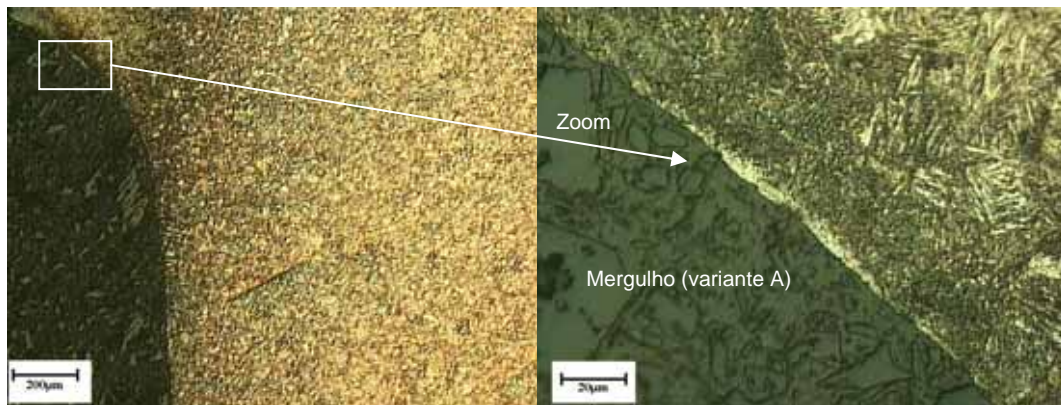


Figura 8 – Análise da microestrutura para as variantes A após $V'_w = 46.656 \text{ mm}^3/\text{mm}$ (aço 16MnCr5 Nital 1%)

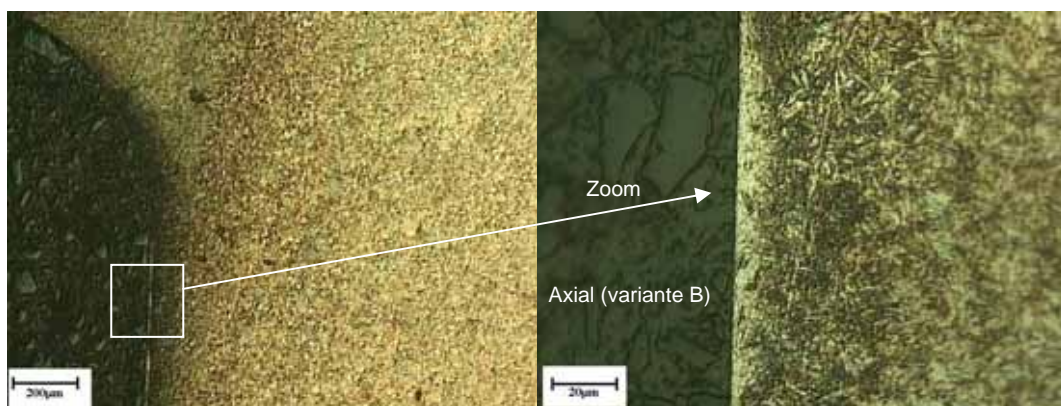


Figura 9 – Análise da microestrutura para as variantes B após $V'_w = 46.656 \text{ mm}^3/\text{mm}$ (aço 16MnCr5 Nital 1%)

5. CONCLUSÕES

- O condicionamento inicial do rebolo de CBN através de uma operação de dressagem otimizada é fundamental para o desempenho da retificação de espelhos. Os discos dressadores utilizados nos testes apresentavam largura de atuação excessiva, o que levava a obtenção de uma superfície ativa do rebolo extremamente fechada, resultando em valores de rugosidade da peça extremamente baixos. Isto causa a limitação dos avanços de usinagem e a tendência de queima da peça, verificada para ambas estratégias. Somente com avanços de dressagem superiores ao padronizado para a máquina foi possível obter-se espelhos retificados isentos de queima.
- O sistema de limpeza do rebolo resultou em alterações na energia de corte específica, rugosidade e desgaste do rebolo para o volume de material removido e combinação tipo de rebolo - peça. O aumento do desgaste do rebolo pode ser associado à própria atuação do sistema de limpeza. Obteve-se menor aderência de cavacos nas proximidades do raio do rebolo.
- Da análise comparativa entre as estratégias verificou-se a possibilidade da utilização de ambas. Todavia, os menores valores de energia de corte específica e de incidência de danos térmicos foram observados para a estratégia de mergulho. Para as condições de usinagem adotadas, o volume de material removido não proporcionou um desgaste no rebolo significativo.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório WZL – *Werkzeugmaschinenlabor*- da Universidade RWTH-Aachen – Alemanha, às empresas ZEMA, GE-FANUC, SAINT-GOBAIN ABRASIVES pelo suporte técnico-financeiro, à FAPESP pela concessão da bolsa de Doutorado, ao CNPq pelo concessão da bolsa de Doutorado Sanduíche e ao IFM - Instituto Fábrica do Milênio.

7. REFERÊNCIAS

1. HEGENER, G. **Technologische Grundlagen des Hochleistungs-Aussenrund-Formschleifen**. 1999. 147p. Dissertation, RWTH-WZL – Aachen, Shaker Verlag, 1999.
2. TÖNSHOFF, H. K.; FREIMUTH, J. C., BECKER, J. C. Continuous Path Controlled Grinding of Crankshafts. **Abrasives Magazine**, Dec/Jan, p. 25-29, 2000.
3. KÖNIG, W., KLOCKE, F. Schleifen mit Schleifscheiben In: **Fertigungsverfahren Band 2 – Schleifen, Honen, Läppen**, 1996, 3. Auflage VDI – Verlag, p. 133-138.
4. SHELDON, D., LIU, S. Innovative bond Technology for corner/form holding. **Automotive Manufacturing International '95**, 3p, 1995.
5. MERBECKS, T. **Prozessauslegung des Hochleistungs-Aussenrund-Formschleifens beliebiger Werkstückkonturen**. Abschlussbericht, 2002, 157p. RWTH-WZL – Aachen

GRINDING STRATEGIES FOR CBN HIGH SPEED GRINDING OF ENGINE CRANKSHAFTS

Eraldo Jannone da Silva

University of São Paulo - USP – São Carlos Engineering School – EESC - 13560-250 - São Carlos, SP, Brazil. e-mail: eraldojs@sc.usp.br

João Fernando Gomes de Oliveira

University of São Paulo - USP – São Carlos Engineering School – EESC - 13560-250 - São Carlos, SP, Brazil. e-mail: jfgo@sc.usp.br

***Abstract.** This paper presents a comparative study of two different high-speed grinding strategies of crankshafts using CBN wheels. The strategies were nominated as plunge (currently used) and axial (the alternative one). A test methodology was developed in which the evaluating parameters were: specific cutting energy, roughness and wheel wear. The grinding tests indicated that both strategies could be adopted. Although, due to the higher contact area when using the axial strategy, special mechanisms must be used in order to avoid wheel loading. They include an effective dressing operation and the use of high pressure cleaning nozzles.*

***Keywords:** grinding, CBN, crankshaft, high-speed*