

# DESENVOLVIMENTO DE UMA RETIFICADORA ELETROQUÍMICA A PARTIR DE UMA RETIFICADORA CILÍNDRICA UNIVERSAL

**João Cirilo da Silva Neto**  
**Claudionor Cruz**

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus Santa Mônica, Bloco M, 38400-902, Uberlândia, MG, Brasil. E-mail: [jcirilos@mecanica.ufu.br](mailto:jcirilos@mecanica.ufu.br) e [ccruz@mecanica.ufu.br](mailto:ccruz@mecanica.ufu.br).

## Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma retificadora eletroquímica, a partir de uma retificadora cilíndrica universal. Alguns componentes foram criados, como por exemplo, a cuba eletrolítica, os sistemas de conexão e isolamento elétrico da máquina. Outros componentes foram simplesmente incorporados à retificadora, como por exemplo, uma fonte de potência e um circuito eletrolítico, disponíveis no laboratório. Ensaios preliminares com a retificadora eletroquímica usinando aço rápido ABNT M6 com rebolo CBN na operação plana tangencial de mergulho com a mesa parada, permitiram a obtenção de vários resultados característicos do processo de retificação eletroquímica. Esses resultados podem ser considerados indicadores de que o trabalho atingiu os seus objetivos. Os principais resultados foram: queima nula de todas as peças usinadas, pequena formação de rebarbas e ausência de cantos vivos. Pelos resultados obtidos, também, pode-se concluir que no novo processo predominou a ação eletroquímica sobre a ação de abrasão.

**Palavras-chave:** Retificação eletroquímica, Nitreto de Boro Cúbico(CBN) e Aço Rápido.

## 1. INTRODUÇÃO

Como é do conhecimento geral, a retificação convencional está associada a grandes taxas de energia para remoção do material, principalmente quando materiais muito resistentes são usinados. Apesar do desenvolvimento dos superabrasivos em determinadas condições de usinagem e em alguns materiais ainda podem ser observadas altas temperaturas na interface peça-rebolo, que podem causar danos térmicos à peça [Shaw(1997)].

Conforme Ferraresi (1977), os aços rápidos podem ser caracterizados como esses materiais que apresentam dificuldades de retificação devido suas principais propriedades como: resistência

ao desgaste, dureza a quente e tenacidade. Paradoxalmente, estas propriedades são entraves para a retificação, visto que as mesmas dificultam a operação no que se refere às forças de corte, desgaste do rebolo, acabamento superficial, tensões residuais, entre outros.

Para tentar encontrar uma solução prática para estes problemas é que surgiu a possibilidade de se desenvolver uma retificadora eletroquímica a partir de uma retificadora cilíndrica universal, com a criação de componentes como: uma cuba eletrolítica, um sistema de acoplamento e isolamento elétrico da peça (anodo) e do rebolo (catodo), além da incorporação à retificadora de um circuito eletrolítico, uma fonte de potência e um rebolo condutor de nitreto de boro cúbico (CBN).

Segundo Kozak and Oczos (1998), a retificação eletroquímica é caracterizada como um dos processos híbridos de usinagem e a integração destes processos, tal como a retificação eletroquímica, facilita a remoção do material e propicia maior produtividade, além de causar efeitos positivos a respeito do acabamento superficial e desgaste do rebolo. Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de uma retificadora eletroquímica, partindo de uma retificadora convencional. Além das vantagens do processo de retificação eletroquímica, ou *Electrochemical Grinding* (ECG), em inglês, o trabalho se justifica pelo alto custo dos equipamentos que podem custar até um milhão de dólares, [Cruz et al (1999)]. No entanto, com esta pesquisa foi possível desenvolver um equipamento com custo baixo e aproveitando uma máquina convencional disponível no laboratório.

Após o desenvolvimento da retificadora, foram realizados ensaios preliminares de retificação eletroquímica em barras redondas de aço rápido ABNT M6, na operação plana tangencial de mergulho com a mesa parada. Analisando os resultados desta operação, em comparação com outros resultados realizados por retificação convencional (superabrasiva com próprio rebolo de CBN e usando fluido de corte), permitiram a obtenção de vários resultados característicos do processo de retificação eletroquímica.

## 2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO ELETROQUÍMICA

O processo de retificação eletroquímica, que surgiu na Rússia no início da década de 50, é a combinação da usinagem eletroquímica com a retificação convencional para remoção de materiais duros ou resistentes e condutores de eletricidade. De acordo com Benedict (1987), as retificadoras eletroquímicas são semelhantes às retificadoras convencionais. Contudo, há diferenças fundamentais entre elas, como por exemplo, os rebolos da retificação eletroquímica se parecem com os convencionais, contudo, usam aglomerantes condutores de eletricidade, porém o abrasivo deve possuir baixa condutibilidade elétrica.

A figura 1 mostra um esquema simplificado do processo de retificação eletroquímica. No referido esquema, (3) representa o rebolo condutor ligado ao polo negativo da fonte, (4) representa a peça ligada ao polo positivo da mesma. A fonte (1) de baixa tensão e alta corrente (contínua ou pulsada) provoca na interface rebolo-peça reações de dissociação anódica e catódica nas regiões da peça e do rebolo respectivamente. O fluido eletrolítico é conduzido do reservatório (6) pela bomba (9), passando através do filtro (8) e medidor de vazão (10) até ser introduzido na área de trabalho, provocando e preenchendo um pequeno volume entre a ferramenta e a peça, permitindo a ação eletrolítica e a remoção do material.

A remoção eletroquímica obedece a lei de Faraday da eletrólise, que é a dissolução anódica de um metal condutor numa solução salina, ou seja, quando o ferro (anodo) é mergulhado em uma solução aquosa de NaCl, por exemplo, e uma diferença de potencial é

aplicada entre ele e o cobre (catodo), pode ocorrer a desintegração do ferro pela sua dissociação, que se transforma em precipitados de hidróxidos de ferro [(McGeough, 1988)]. Esta dissociação é função da intensidade da corrente, ou seja, quanto maior a intensidade de corrente elétrica, maior será a remoção do material.

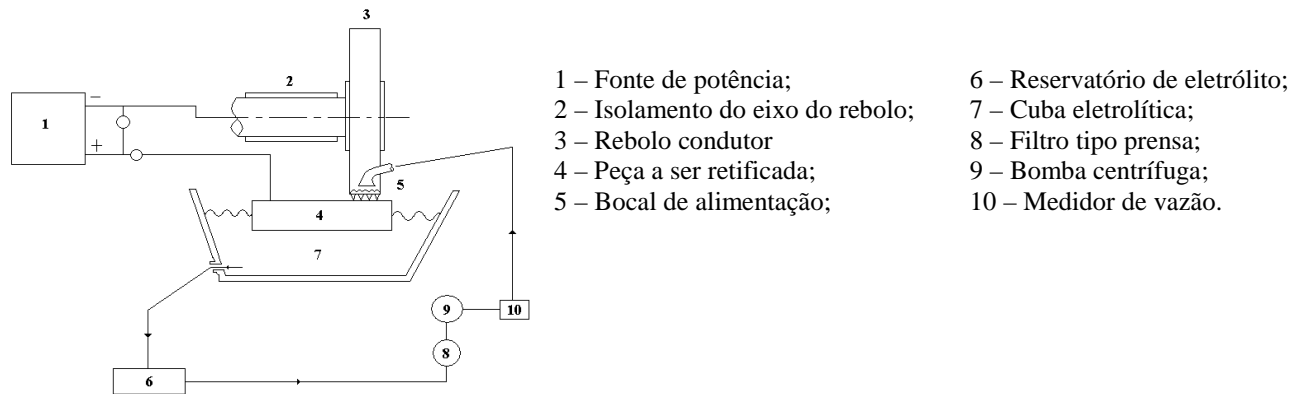


Figura 1: Esquema simplificado do processo de retificação eletroquímica.

No caso da retificação eletroquímica o anodo é a peça e o catodo é o rebole. Desta forma, o rebole não sofre desgaste considerável por ação eletrolítica. Apesar de existir ação mecânica, esta é bastante reduzida devido a redução do arco do contato entre a peça e o rebole. Com isso propicia uma longa vida do rebole, pois a formação de gases de hidrogênio nas proximidades do mesmo não contribui substancialmente para o seu desgaste. Entretanto, se não for feita uma limpeza química ou mecânica da peça após a retificação a mesma poderá ser atacada pela ação corrosiva do eletrólito.

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Em função das características deste trabalho, antes do procedimento experimental, que se refere ao desenvolvimento da retificadora eletroquímica e na seqüência aos ensaios preliminares com a retificadora desenvolvida, foi necessário conhecer a capacidade e a qualidade dos trabalhos da retificadora convencional. Para tanto, foram realizados ensaios de retificação superabrasiva em barras de aço rápido ABNT M6, usando um rebole condutor de CBN, na operação plana tangencial de mergulho com a mesa parada. As peças usinadas por este processo foram usadas para se fazer comparações com aquelas usinadas por retificação eletroquímica.

Inicialmente, o experimento consistiu na criação de uma cuba eletrolítica, que é o local onde ocorre a usinagem. Sendo o ambiente dentro desta cuba muito corrosivo, pois o eletrólito é uma solução aquosa de água e sal, a mesma foi feita de chapas de acrílico transparente de espessura 6 mm e com volume de 25 litros. Esta cuba foi projetada para conter o rebole e a peça e foi montada no cabeçote porta-rebole, de modo que a mesma acompanhava o movimento de avanço do rebole. Desta forma, por questões de funcionalidade do projeto, optou-se por uma cuba solidária ao cabeçote porta-rebole.

A retificadora eletroquímica trabalha com um rebolo condutor de eletricidade, cujo material abrasivo neste caso é nitreto de boro cúbico (CBN) de aglomerante metálico. Neste trabalho, a energização do eixo do rebolo, que funciona como catodo, foi feita através de escovas coletoras de cobre, que possuíam uma capacidade de 200 A.

A opção por escovas de cobre levou em consideração as características da fonte de potência disponível no Laboratório de Usinagem Não Tradicional, que também foi projetada para alta corrente e baixa tensão. A tensão foi conectada diretamente nestas escovas de cobre para energizar o rebolo condutor.

Para ligar as escovas ao eixo do rebolo condutor de eletricidade foi usado um porta-escovas do motor de partida de motores de combustão interna a diesel, com capacidade de 150 A em regime contínuo ou até 1600 A para corrente de pico. Tal intensidade de corrente seria superior àquela a ser usada nos testes com retificadora eletroquímica que não ultrapassou 50 A. Para o contato das escovas foi construído um flange de cobre roscado com diâmetros escalonados (80, 50 e 42 mm e comprimento igual a 75 mm).

A figura 2 mostra o porta-escovas usado na conexão elétrica do eixo do rebolo. Tomou-se o cuidado de se fazer o diâmetro do flange de contato com as escovas com medidas semelhantes àsquelas contidas no eixo do motor de partida de motores a diesel, com o objetivo de se evitar pressão exagerada nas molas que empurravam as escovas.

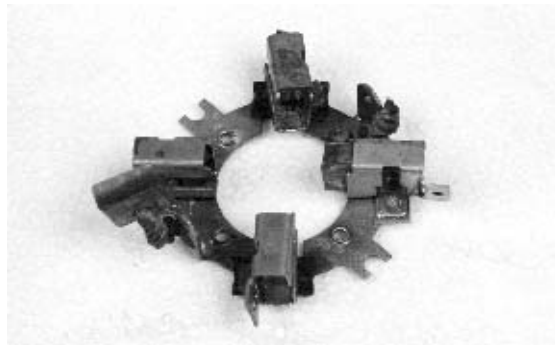


Figura 2 - Porta-escovas do motor de partida de motores de combustão interna a diesel usado na transmissão de energia para o eixo do rebolo.

Um dos problemas existentes na retificação eletroquímica se refere ao isolamento elétrico. O isolamento da peça (polo positivo) e do rebolo (polo negativo) foi feito de material plástico (*nylon*). Para a peça foi projetado um suporte com diâmetro e comprimento suficientes para encaixe da amostra, tomando-se o cuidado de se deixar um comprimento suficiente para a retificação. No isolamento do eixo do rebolo foi utilizada uma bucha cônica montada com ajuste por interferência no eixo do rebolo. A análise do isolamento elétrico foi feita com um multímetro, onde se verificou que não houve passagem de corrente entre os componentes isolados eletricamente.

Conforme exposto anteriormente, para o desenvolvimento da retificadora eletroquímica foi necessária a incorporação de alguns componentes mais importantes como: uma fonte de potência, um circuito eletrolítico e um rebolo condutor de CBN.

A fonte de potência utilizada neste trabalho tem a seguinte especificação:

- Entrada: 220 volts, 167 A, 3 fases e frequência de 60 Hz;
- Saída: 0 a 25 volts, 0 a 2000 A com corrente pulsada.

A tensão de saída da fonte deve ser regulada de acordo com o tipo de material da peça a ser usinada. Conforme Benedict (1987), o limite máximo da tensão não deve ser tão alto de modo que possa afetar a qualidade da peça a ser retificada e que venha danificar o rebolo. Tipicamente, a tensão é ajustada pela presença do faiscamento entre a peça e o rebolo.

Outro componente importante incorporado à retificadora foi o circuito do eletrólito. Este eletrólito tem três funções básicas: agir como condutor para facilitar a passagem de corrente elétrica entre a peça e ferramenta (neste caso é o rebolo), remover os detritos formados devidos as reações químicas que ocorrem durante o processo na região de trabalho e resfriar a região de usinagem. Assim sendo, o circuito do eletrólito deverá conter: um reservatório onde este será armazenado, uma bomba que fornecerá a pressão e velocidade necessárias para que o eletrólito possa varrer os detritos formados na usinagem, um sistema de limpeza e filtragem, controle de temperatura, concentração e pH [Malaquias (1996)].

Finalmente, ainda visando a criação da retificadora eletroquímica, foi solicitado um rebolo à Winter do Brasil Ltda., de acordo com as características exigidas na montagem da máquina existente. O rebolo cedido pela referida empresa foi de nitreto de boro cúbico (CBN), com ligante metálico, cuja especificação é CBN 150 N 7 M. De acordo com a NBR 6166 da ABNT (1995), CBN (abrasivo de nitreto de boro cúbico), 150 (granulação fina), N (dureza média), 7 (estrutura fechada) e M (aglomerante ou ligante metálico).

Após a criação e incorporação de componentes, foi possível concluir o desenvolvimento da retificadora eletroquímica a partir de uma retificadora cilíndrica universal, cujos componentes principais podem ser observados na figura 3.

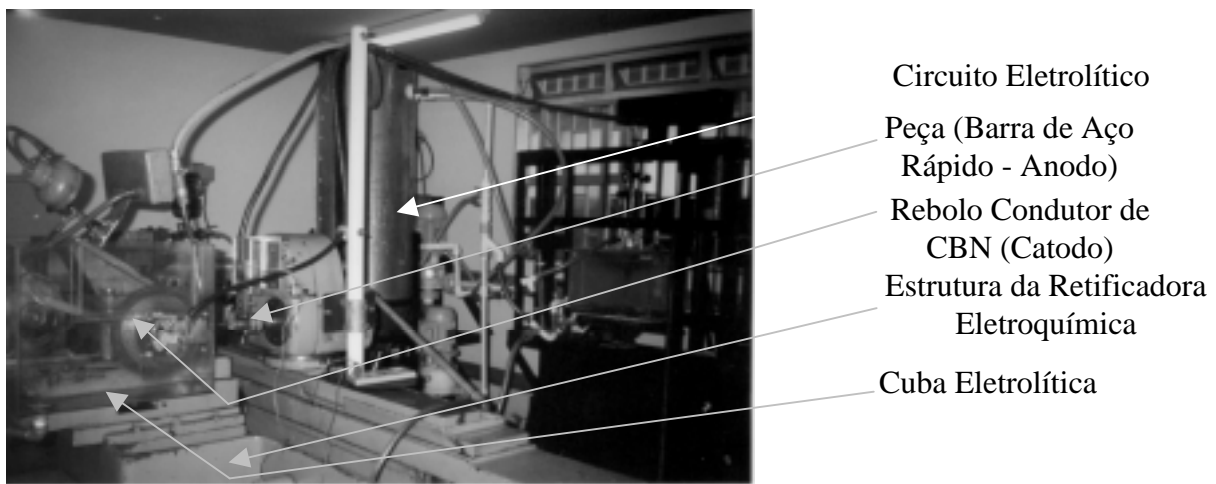


Figura 3 - Vista principal e final da retificadora eletroquímica desenvolvida a partir de uma retificadora cilíndrica universal.

Após os testes preliminares e ajustes do equipamento, preparou-se para a execução dos ensaios definitivos. A figura 4 mostra o esquema final e simplificado da retificadora eletroquímica desenvolvida a partir de uma retificadora cilíndrica universal, em condições de executar operações de retificação eletroquímica de mergulho com a mesa parada.

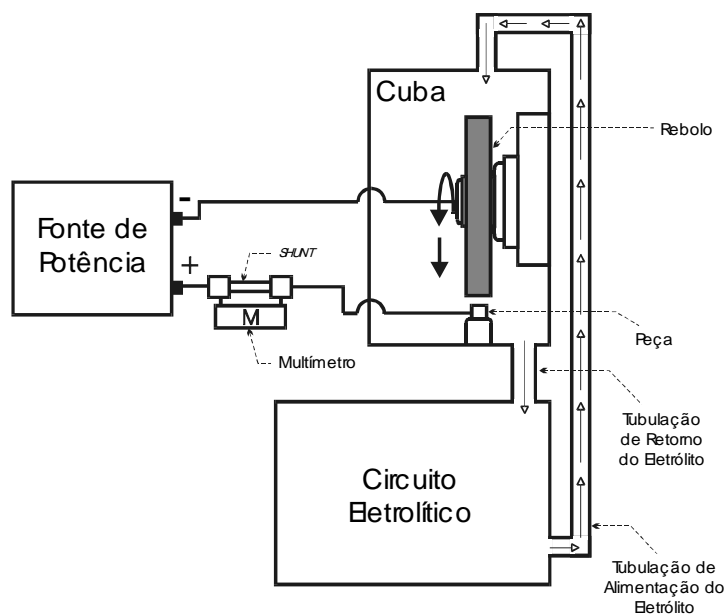


Figura 4 – Esquema final e simplificado da retificadora eletroquímica para execução da operação de retificação plana tangencial de mergulho com a mesa parada.

Conforme a figura 4, a referida operação foi executada com a peça já montada no cabeçote porta-peça. Aproximava-se dela o rebolo através do movimento de avanço rápido do cabeçote porta-rebolo. Neste ponto, desligava-se o avanço automático do rebolo, deixando uma distância de aproximadamente 1 mm para ajustar a operação. A seguir, ligavam-se o eletrólito do circuito eletrólito e a fonte de potência. Acionava-se o avanço automático do rebolo. No momento em que o multímetro **M** começava a registrar corrente fornecida pela fonte de potência através do *shunt*, começava-se a cronometrar o tempo. Após 5 voltas completas do anel graduado do avanço automático do cabeçote porta-rebolo (que correspondia a 5 mm de comprimento de retificação), desligavam-se a fonte de potência, a alimentação do eletrólito, recuava-se e finalmente desligava-se o rebolo. Retirava-se, então a peça para limpeza e proteção em banho de óleo para minimizar os possíveis efeitos da corrosão causada pelo eletrólito.

Como se tratava de uma retificadora eletroquímica desenvolvida a partir de uma máquina convencional, os parâmetros de usinagem foram ajustados para atender às particularidades da nova retificadora, mas sem descaracterizar o processo de retificação eletroquímica. Desta forma, os parâmetros de usinagem foram baseados em vários autores, entre eles, Benedict (1987), Vidosic (1989), Mello (1969), Phillips (1989) e Malaquias (1996).

Os principais parâmetros de usinagem podem ser observados resumidamente na tabela 1.

**Tabela 1 - Parâmetros de corte da retificação eletroquímica**

Parâmetros	Valores
Tipo de operação	Retificação plana tangencial de mergulho com a mesa parada
Velocidade de avanço do rebolo $V_f$ (mm/min)	0,5 e 1,00
Rotação do rebolo (rpm)	1850
Diâmetro externo do rebolo (mm)	250
Velocidade periférica do rebolo (m/s)	25
Material do rebolo: nitreto de boro cúbico (CBN)	Especificação: CBN 150 N 7 M
Peça a ser usinada	Barra $\phi$ 8x75 mm (63 a 64 HRc)
Material da peça	Aço rápido ABNT M6 –superkobalt 12%
Composição (elemento de liga-%)	Co-12;Cr-4,25;Mo-5;W-6,2;V-1,9;C-0,9 e Fe-69,75
Área da superfície em contato (cm <sup>2</sup> )	0,5
Eletrólito	Solução aquosa de NaNO <sub>3</sub>
Concentração do eletrólito	300 g por litro de água
Vazão do eletrólito (litros por hora)	400 e 600
Tensão da fonte	8 e 12 V

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a utilização dos parâmetros de usinagem apresentados na tabela 1, foram executados 16 ensaios experimentais de retificação eletroquímica, com o objetivo de avaliar o desempenho preliminar da retificadora desenvolvida. Para avaliação das superfícies geradas durante a retificação convencional e eletroquímica foram escolhidas aleatoriamente duas amostras, uma de cada processo, com o objetivo de se comparar o aspecto geral da superfície gerada em cada amostra retificada.

Nas figuras 5 e 6 são apresentados os perfis das superfícies geradas das duas amostras, escolhidas aleatoriamente, nos processos eletroquímico e convencional, respectivamente, onde pode-se notar que, na retificação eletroquímica a superfície não apresenta riscos deixados em função da ação abrasiva do rebolo. No entanto, na retificação convencional, estes riscos são evidentes e podem ser facilmente notados quando observados no microscópio óptico.

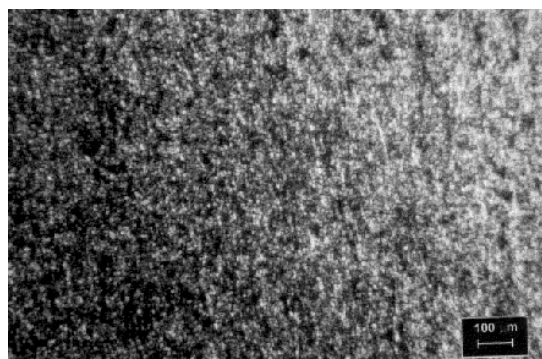


Figura 5 – Superfície gerada por retificação eletroquímica no aço rápido ABNT M6.

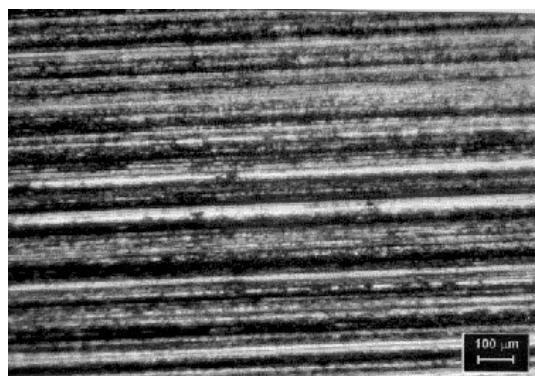


Figura 6 – Superfície gerada por retificação Superabrasiva no aço rápido ABNT M6.

Na figura 5, como a remoção do material da peça ocorre simultaneamente em 3 fases, sendo a primeira eletroquímica, a segunda mecânica e a terceira também eletroquímica, diminui-se a possibilidade de formação de riscos e rebarbas, pois a terceira fase teria função de eliminar qualquer risco ou rebarba formados na saída da peça durante o contato com o rebolo, através da ação eletroquímica e pela remoção dos últimos átomos localizados na última camada do material pelo princípio da eletrólise.

Em função da redução da área de contato peça-rebolo, devido à diminuição da profundidade de penetração dos grãos abrasivos em relação à retificação convencional, a melhoria do acabamento superficial pode ser atribuída à remoção do material da peça átomo por átomo, ou seja, por ação eletroquímica..

A retificação eletroquímica apresentou rugosidade média ( $R_a$ ) igual a 0,6  $\mu\text{m}$  embora maior que o valor estabelecido nas referências bibliográficas pesquisadas (de 0,2 a 0,3  $\mu\text{m}$ ). Apesar disso, o resultado encontrado foi menor que o encontrado na retificação convencional com CBN cujo valor foi de 1,28  $\mu\text{m}$ .

## 6. CONCLUSÕES

A meta principal do trabalho, que era o desenvolvimento de uma retificadora eletroquímica a partir de uma retificadora cilíndrica universal foi atingida, pois com o equipamento desenvolvido foi possível retificar peças de aço rápido com melhor acabamento superficial quando comparado com aquelas retificadas por retificação convencional (superabrasiva) na operação plana tangencial de mergulho com a mesa parada.

Além disso, não houve a descaracterização da máquina original porque a mesma pode funcionar como retificadora eletroquímica ou convencional. Para que isto aconteça basta uma simples operação de abertura e fechamento de válvulas para selecionar o fluido eletrolítico ou fluido refrigerante, visto que o rebolo metálico de CBN pode ser usado em ambos processos.

As peças usinadas por retificação eletroquímica tiveram que ser lavadas em banho de água e secas imediatamente, em seguida foram retirados os óxidos formados usando uma escova de aço. Com isso foi possível remover o excesso de resíduos eletrolíticos que poderiam continuar a corroer a peça.

Em função dos resultados encontrados, pode-se concluir que as peças usinadas por retificação eletroquímica não apresentaram rebarbas acentuadas, queimas visíveis e nem cantos vivos, além de apresentarem menor rugosidade média.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT),1995, “Ferramentas abrasivas”, NBR 6166, Rio de Janeiro.
- Benedict, G. F., 1987, “Nontraditional Manufacturing Processes, Electrochemical Grinding”, New York, Marcel Dekker, PP-153-164.
- Cruz, C., Malaquias, E.S., Fernandes, L.A., 1999, “Introdução aos Processos Não Tradicionais de Usinagem”, EDUFU, Uberlândia.



- Ferraresi, D., 1977, “Fundamentos da Usinagem dos Metais”, Editora Edgard Blucher, pp- 305-309, São Paulo.
- Kozak, J., Oczos, E. K., 1998, “Selected Problems of Abrasive Hybrid Machining”, International Conference on Advances in Production Engineering, Polishi, pp- 290-299.
- Malaquias, E. S., 1996, “Contribuição Para o Desenvolvimento de um Protótipo de Equipamento de Usinagem Eletroquímica”, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, 79p.
- McGeough, J . A., 1988, “Advanced Machining Processes”, London, Chapman and Hall.
- Mello, 1969, “Instruções de Operação da Retificadora Hidráulica Universal RHU 600-3 Mello”, São Paulo.
- Phillips, R . E., 1989, “Electrochemical Grinding”, Metal’s Handbook, Volume 16, Everite Machine Products Company, pp. 542-547.
- Shaw, M.C., 1997, “Energy Conversion in Cutting and Grinding”, Annals of the CIRP, USA, vol. 46.
- Vidosic, J., 1989, “Electrolytic Grinding”, U.M.I. Books DN Demand, pp. 118-123.