



DIVERSAS ESTRATÉGIAS PARA MONITORAMENTO DA OPERAÇÃO DE REBARBAÇÃO ROBÓTICA

Carlos Magno de Oliveira Valente¹

Joao Fernando Gomes de Oliveira²

Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Núcleo de Manufatura Avançada

Av. Trabalhador Saocarlense, 400, CEP: 13566-590

¹cmov@sc.usp.br, ²jfgo@sc.usp.br

Resumo. Este trabalho visa desenvolver um sistema de rebarbação utilizando robôs industriais a partir do monitoramento e controle da trajetória da ferramenta. O processo de rebarbação vem assumindo cada vez mais importância nas indústrias de manufatura, devido a aspectos relacionados com segurança da operação, qualidade e custo do produto. A rebarbação manual, empregada em larga escala, é lenta, custosa, perigosa e bastante susceptível a erros. Diversas vantagens apontam para a aplicação de robôs industriais. Contudo, a aplicação de robôs industriais para rebarbação é uma tarefa extremamente complexa, uma vez que a grande interação entre a ferramenta de rebarbação e a peça dificulta uma simples programação de posições (teach-in). As soluções apontam para um maior monitoramento do processo, realimentando o sistema com maiores informações sobre o processo em execução. Neste trabalho, propõe-se a utilização conjunta dos sinais de potência consumida pelo motor e emissão acústica do processo. A fusão destes dois sinais resulta em um novo parâmetro, FAP (Fast Abrasive Power), que representa uma modulação do sinal original de potência pela razão entre a emissão acústica instantânea e a emissão acústica média em um determinado tempo. Este novo parâmetro FAP conserva a confiabilidade do sinal original e incorpora a dinâmica do sinal de emissão acústica.

Palavras-chaves: Rebarbação, Robótica, Monitoramento, Fusão de sensores

1. INTRODUCAO

Apesar de ser uma operação extremamente insegura e anti-ergonômica, as indústrias de manufatura ainda utilizam amplamente o trabalho de rebarbação manual. A operação de rebarbação é um processo perigoso (ruídos, poluição e vibrações), lento, difícil e bastante susceptível a erros, que são muito caros porque podem danificar uma peça em fase final de produção. As desvantagens desta operação manual sugerem uma automação do processo. Este é o nicho ideal para a aplicação de robôs, aproveitando toda a flexibilidade de operação dos mesmos. Porém, a utilização comercial de robôs em operações de rebarbação ainda está aquém do esperado. A grande interação robô e peça, aliada à grande inconsistência da operação (é impossível prever com exatidão a ocorrência e o tamanho da rebarba), representa um desafio para a programação e controle da operação. A solução definitiva deste problema aponta para um maior monitoramento do processo, realimentando o sistema com maiores informações sobre a tarefa em execução (Craig, 1986).

Neste contexto, surgiram pesquisas na busca de sensores adequados. Foram propostos sensores de força, sensores visuais, sensores óticos (infravermelho), sensores de emissão acústica, entre outros. Her e Kazerooni (1991) propuseram um controle ativo da força de contato. Contudo, Bone et al (1991) alerta que existem limitações do controle de força quando este atua de forma isolada.

Assim, outras abordagens para realimentação do sistema foram propostas em adição ao controle de força. Estas incluem ferramentas especializadas para ajudar a seguir o contorno da peça ou a aplicação de outros sensores para aprimorar o monitoramento da rebarbação. Seliger e Hsieh (1991) implementaram um sistema de rastreamento a laser para medir o perfil da rebarba e planejar *off-line* a trajetória do robô. Bone e Elbestawi (1994) acrescentam que a combinação das informações visuais e de força permite um maior controle, sensibilidade e segurança da operação. Dornfeld e Erickson (1989) propuseram um sistema de rebarbação realimentado pelo nível acústico, porém este apresentava algumas limitações como operar apenas em pequenas profundidades.

Porém, cada alternativa apresenta pontos positivos e negativos. Surgiu, então, a necessidade de pesquisar a utilização conjunta de dois ou mais sensores. A fusão de sensores é apontada como uma solução promissora para os problemas da rebarbação robótica.

2. NOVO PARAMETRO DE CONTROLE (*FAST ABRASIVE POWER*)

Este trabalho propõe um novo parâmetro para controle da trajetória da ferramenta do robô utilizando a combinação do nível de emissão acústica (EA) da operação e da potência consumida no processo. A emissão acústica e a potência são hoje os parâmetros mais utilizados no monitoramento e controle de processos abrasivos.

Contudo, Oliveira e Dornfeld (2001) acrescentam que a EA apresenta uma baixa repetibilidade do valor RMS (*Root Mean Square*) do sinal, que apresenta um comportamento randômico e extremamente influenciado por pequenas alterações na montagem do sensor, na fixação da peça, na topologia da ferramenta e da peça, entre outras. Desta forma, o monitoramento isolado do nível acústico não fornece informações suficientes para correção da trajetória da ferramenta. Contudo, a grande aplicação do sinal acústico está na avaliação da existência de contato entre superfícies móveis, com uma velocidade de resposta bastante alta. Numa operação de rebarbação por robôs, a EA pode ser utilizada em conjunto com outros sinais, tendo a função de detectar a presença de rebarbas e alterar a velocidade de avanço da ferramenta. Já a potência consumida pelos motores é outra informação de grande valia para o processo de rebarbação. O nível de potência oferece uma informação bastante confiável sobre a energia consumida no processo, sendo proporcional à quantidade de material removido pela ferramenta abrasiva. O lado negativo deste sinal é a sua lentidão de resposta, diretamente relacionada à inércia do motor, o que induz um certo amortecimento o sistema. Assim, a fim de melhor aproveitar o conteúdo destas informações, foi proposta uma fusão destes sinais através da seguinte equação:

$$FAP = K \cdot \frac{EA}{EA_n} \cdot (P - P_0) \quad (1)$$

sendo:

FAP = *Fast Abrasive Power*

K = ganho do sinal

P = potência instantânea

P₀ = potência em vazio

EA = emissão acústica instantânea

EA_n = emissão acústica média dos últimos *n* pontos

O sinal resultante, FAP (*Fast Abrasive Power*), representa uma modulação do sinal original de potência pela razão entre a emissão acústica instantânea e a emissão acústica média calculada a partir de uma janela dos últimos *n* pontos. Esta razão busca anular o comportamento variante da emissão acústica durante a borda da peça, conservando apenas o ganho relativo do sinal. O grau de influência da emissão acústica sobre o sinal resultante pode ser ajustado a partir de variações no

tamanho n da janela de pontos. Utilizando esta metodologia, o novo sinal FAP conserva a confiabilidade do sinal original de potência e incorpora a dinâmica do sinal de emissão acústica. Maiores informações sobre a definição e vantagens deste parâmetro são apresentadas em Valente e Oliveira (2001).

3. CALIBRAÇÃO DO PARÂMETRO FAP

Uma vez definido o novo parâmetro de controle da trajetória do robô, tornou-se necessário conhecer a relação entre o nível FAP e a quantidade de material removida da peça. Para tal, foi proposto o experimento apresentado nesta seção (Fig. 1), que tinha por objetivo usinar chanfros de diferentes dimensões e correlacioná-los com o nível FAP calculado.

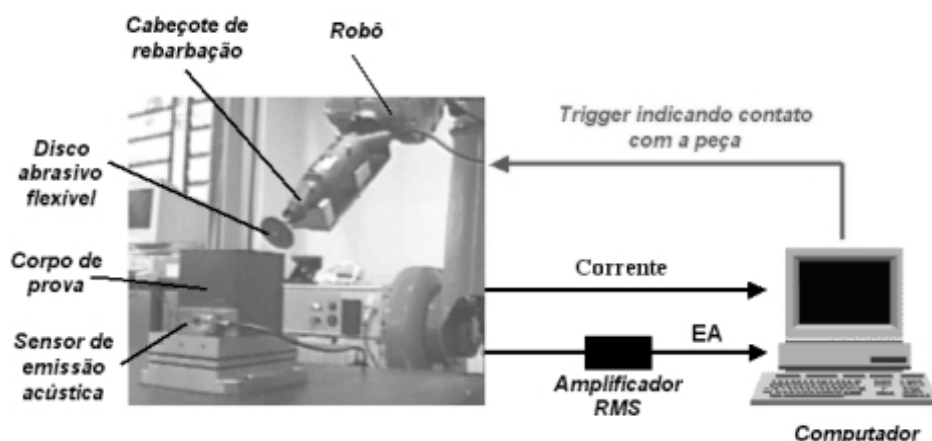


Figura 1. Configuração do sistema de monitoramento e controle da operação de rebarbação robótica, baseado nas informações de potência e emissão acústica.

Este sistema de monitoramento utilizava o próprio robô industrial ABB modelo IRB 2400/10 para executar a operação. Ao punho do robô, foi acoplado um cabeçote elétrico de rebarbação (25.000 rpm), utilizando um disco abrasivo flexível como ferramenta. Como corpos de prova, foram utilizadas diversas chapas de aço ABNT 1020 com espessura de 1/8" e cortadas nas dimensões 180 x 35 mm. A corrente consumida pelo cabeçote foi monitorada através de um sensor de efeito Hall. À placa suporte, foi acoplado o sensor de emissão acústica. Após condicionamento, os sinais de EA e corrente são conectados ao microcomputador através de uma placa de aquisição de dados. Utilizando o *software* LabView 5.1 da National Instruments, estas informações são capturadas, processadas e apresentadas na tela.

A fim de se realizar um chanfro o mais homogêneo possível, o robô foi inicialmente programado identificar dois pontos (B1 e B2) da borda a ser chanfrada, a fim de garantir o alinhamento da mesma. O primeiro passo adotado foi avançar a ferramenta de rebarbação contra uma das extremidades da borda da peça e monitorar o nível do parâmetro FAP. Considerava-se como ponto da borda (ponto B1) a posição do disco abrasivo quando o nível FAP alcançava um limite estipulado ($FAP > 0,3$ V). Uma vez identificado o primeiro ponto, o procedimento era repetido para a outra extremidade da borda, a fim de se identificar o segundo ponto. Identificados os pontos de borda B1 e B2, o robô poderia traçar uma trajetória alinhada em relação à borda da peça, simplesmente executando um movimento linear do ponto B1 até o ponto B2. Contudo, para chanfrar a peça, esta trajetória deveria ser aprofundada em relação à borda. Assim, a dimensão do chanfro poderia ser controlada a partir dos parâmetros x_1 e x_2 , que representavam as distâncias (perpendicular à borda da peça) que o robô avançava além dos pontos P1 e P2 respectivamente. Em resumo, o robô poderia traçar uma trajetória do ponto $B1 + x_1$ até o ponto $B2 + x_2$. Os ensaios

foram realizados variando-se as distâncias x_1 e x_2 e a velocidade do robô, sempre considerando uma nova borda da peça para que o chanfro fosse gerado sobre um canto vivo.

Foram realizados diversos ensaios para diferentes combinações de velocidade de avanço do robô e distâncias x_1 e x_2 . O resultado destes ensaios é apresentado na Fig. 2, mediante um gráfico de calibração, que relaciona a potência consumida pelo motor com a dimensão do chanfro usinado. O valores de potência neste gráfico foram estabelecidos através de uma média dos gráficos de potência para cada condição testada. Para estabelecer o tamanho médio do chanfro, todas as bordas usinadas foram medidas em quatro diferentes pontos. Estas medidas foram realizadas em um projetor de perfis.

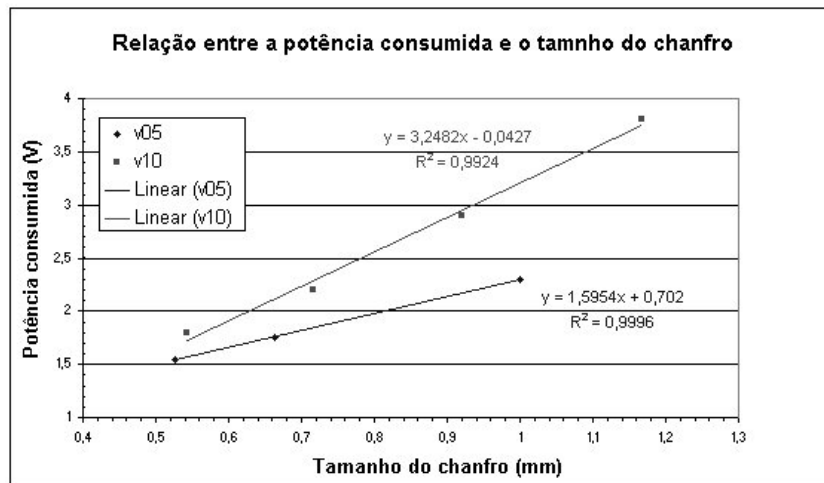


Figura 2. Relação entre a potência e o tamanho do chanfro para uma dada velocidade de avanço do robô.

4. SISTEMA DE CONTROLE DA TRAJETÓRIA DA ROBÔ PARA REBARBAÇÃO

Para o monitoramento e controle da operação, foi basicamente utilizado o mesmo sistema apresentado anteriormente para calibração do parâmetro FAP, exceto no conteúdo das informações de realimentação do robô. Neste novo sistema, foram passadas as informações de estado do contato (intenso ou fraco) e um erro R a ser utilizado para correção da trajetória quando necessário.

Para controlar a dimensão do chanfro a ser usinado na peça, foram utilizados os resultados da calibração do parâmetro FAP apresentados na seção anterior. Assim, uma vez estabelecida a dimensão nominal do chanfro a ser usinado, as equações de calibração apresentadas na Fig. 2 eram utilizadas para se definir o nível correspondente do FAP para esta dimensão. Contudo, como este valor alvo foi estabelecido a partir de uma média de vários gráficos, torna-se desnecessário controlar o nível FAP com relação a um valor específico. Seria mais adequado controlá-lo em relação a uma faixa de valores, estabelecido em torno do valor médio definido.

Desta forma, através de uma programação realizada no software LabView 5.1, o nível FAP é comparado com dois valores que determinam os limites superiores e inferior da faixa adequada de trabalho: T1 e T2. Assim, sempre que o nível FAP exceder o limite T2, um sinal de controle é enviado para o robô (via interfaces digitais) indicando um contato muito intenso entre a ferramenta e a peça. De forma contrária, sempre que o nível FAP cair abaixo do limite T1, outro sinal de controle é enviado para o robô indicando um contato muito fraco. Utilizando esta configuração, a seguinte estratégia de controle foi definida:

- A ferramenta é avançada em direção à peça. O contato é determinado quando o nível FAP excede o limite T1. Esta informação é repassada ao robô mediante o sinal digital de controle correspondente. A partir deste ponto de contato (P_c), a ferramenta avança na direção do ponto

P1. Este ponto P1 pode ser passado para o robô a partir de um sistema de programação off-line, assumindo que a geometria da peça seja conhecida. Durante o movimento, o sistema estará continuamente monitorando o nível FAP e corrigindo a trajetória da ferramenta a fim de manter o nível FAP dentro dos limites estabelecidos. Esta correção segue os passos abaixo.

- Se o nível FAP estiver entre os limites T1 e T2: o contato entre a ferramenta e a peça está adequado. Desta forma, a ferramenta continua avançando em direção ao ponto P1.
- Se o nível FAP estiver abaixo do limite T1: a ferramenta está perdendo contato com a peça e deve ser avançada em sua direção até que o nível FAP retorne à faixa de trabalho. Esta ação é conseguida através de um deslocamento Δ do ponto P1 na direção da peça, de forma a assumir um novo valor P1'. Esta ação é ilustrada na Fig. 3.
- Se o nível de emissão acústica estiver acima do limite 2: o contato excedeu as condições adequadas, o que pode danificar a ferramenta e a peça. A ferramenta deve então ser afastada da peça até que o nível FAP retorne à faixa de trabalho. Para tal, o ponto P1 deve ser deslocado na direção oposta à peça, de forma a assumir uma nova posição P1''.

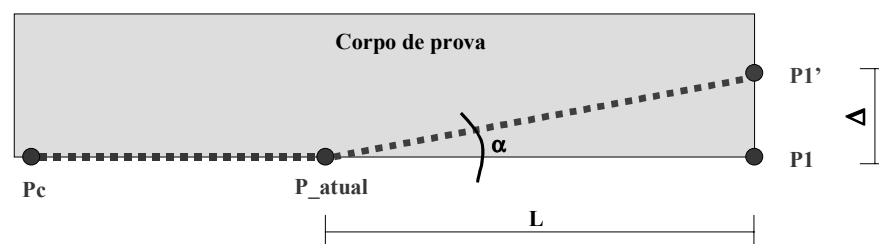


Figura 3 - Estratégia de controle proporcional adotada para correção da trajetória da ferramenta de rebarbação. Este caso representa uma ação de aproximação da ferramenta em relação à borda da peça, que ocorre sempre que o nível FAP estiver abaixo do limite T1.

Contudo, um dos fatores mais importantes para o sucesso do sistema de correção da trajetória é exatamente definir qual será o valor do deslocamento Δ do ponto P1. Para isto, foi inicialmente implementado um controle proporcional. Assim, sempre que o nível FAP ultrapassa algum dos limites, define-se um valor de correção angular (α) através da seguinte equação de controle.

$$\alpha = K * (R+1) \quad (2)$$

sendo K correspondente ao valor do ganho proporcional e R correspondente ao erro, que é determinado pela razão entre o nível FAP e os limites T1 ou T2 (para uma correção de aproximação ou de avatamento respectivamente). Estabelecido o valor de correção angular, pode-se calcular o deslocamento Δ necessário, a ser realizado numa direção perpendicular à trajetória atual (Pc para P1).

$$\Delta = L * \tan(\alpha) \quad (3)$$

sendo L correspondente ao comprimento da trajetória restante para se atingir o ponto P1.

Os resultados da estratégia de controle são apresentados a seguir. Em todos estes testes, o parâmetro FAP foi calculado mediante uma janela $n = 3$ pontos. A Fig. 4a apresenta os resultados da usinagem de um chanfro de dimensão desejada igual a 0,65 mm e utilizando uma velocidade de avanço de 5 mm/seg. Os limites T1 e T2 foram escolhidos através dos gráficos de calibração da Fig. 2. Desta forma, foram utilizados os valores T1 = 1,65 V e T2 = 1,80 V. Analisando os resultados, nota-se que o algoritmo de controle obteve sucesso na conservação do nível FAP dentro

da faixa de trabalho. Por fim, as medições dos chanfros comprovam o cumprimento das dimensões alvo definidas iniciais, sendo 0,72 mm o valor médio encontrado.

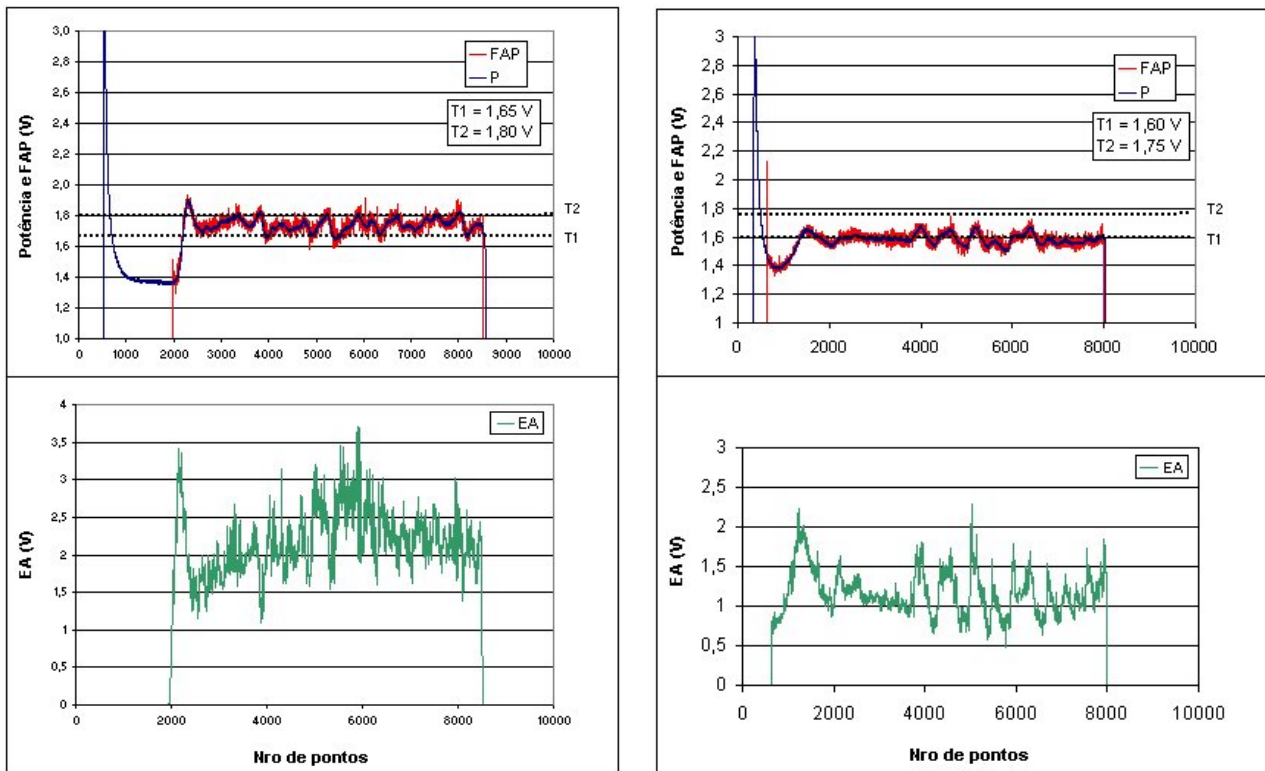


Figura 4. Resultados da estratégia de controle da trajetória da ferramenta durante a operação de rebarbação robótica: (a) usinagem de um chanfro de dimensão desejada igual a 0,65 mm; (b) usinagem de um chanfro na condição de desalinhamento da chapa em relação à posição programada.

A fim de se testar a estratégia de controle de trajetória sob circunstâncias mais adversas, foi fixada à placa suporte uma chapa rotacionada com relação a sua posição original em 30 graus. O resultado deste teste é apresentado na Fig. 4b. Apesar da complexidade da situação, o sistema foi capaz de controlar adequadamente o nível FAP. É possível perceber que o controle de trajetória manteve o nível FAP sempre em torno do limite inferior. Tal fato ocorre porque neste caso a ferramenta sempre tende a afastar-se da peça ao seguir a trajetória programada, enquanto o sistema de controle sempre busca retornar ao contato para um valor de FAP dentro da faixa de trabalho.

Para finalizar esta seção de resultados, foram implementadas duas outras estratégias de controle da trajetória baseadas somente no sinal de potência ou somente de emissão acústica, com o objetivo de compará-las com a estratégia baseada no parâmetro FAP.

A Fig. 5a apresenta o resultado da estratégia baseada na potência. O teste foi realizado nas mesmas condições de peça desalinhada utilizadas no teste apresentado na Fig.5b. Nota-se uma grande oscilação do sinal de potência, que corresponde às bruscas alterações de intensidade do contato entre ferramenta e peça. Estas alterações podem ser melhor visualizadas pelo comportamento extremamente variante do sinal de EA. Este fato é resultado da lentidão de resposta do sistema de controle, devido principalmente ao atraso do sinal de potência. Com isto, o chanfro apresentou marcas acentuadas, consequência direta das alterações bruscas da intensidade do contato.

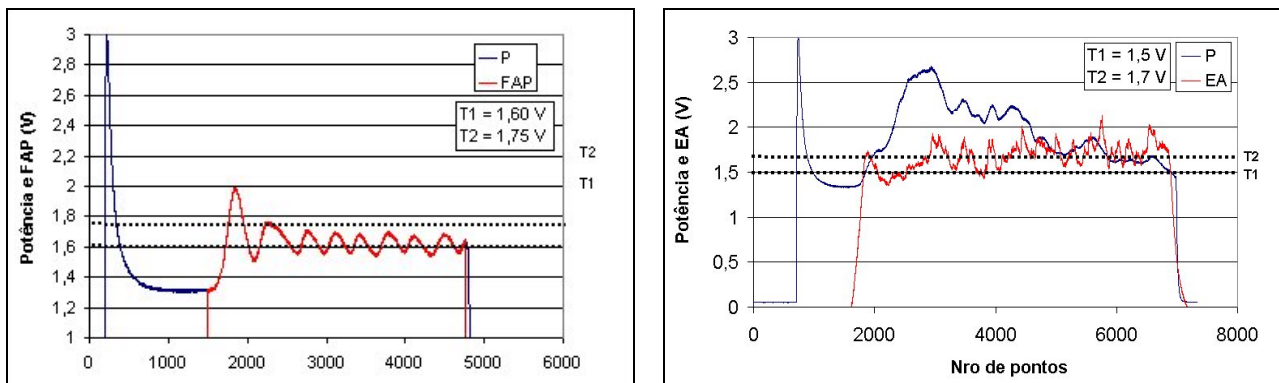


Figura 5. Resultados de duas estratégias distintas para controle da trajetória: (a) estratégia baseada somente na potência; (b) estratégia baseada somente na emissão acústica.

A Fig. 5b apresenta o resultado da estratégia baseada na emissão acústica, sendo utilizada a montagem da chapa alinhada com a borda da placa suporte (mesma setup da Fig. 4a). É possível notar que o sistema obteve sucesso no controle do nível EA entre os limites T1 e T2. Contudo, nota-se que este comportamento controlado não foi seguido pelo gráfico de potência. O valor de potência estava bastante alto (2,7 V) no início da operação, ao passo que apresentou uma queda significativa até o final, concluindo a operação com um consumo no nível de 1,5 V. Isto afetou diretamente o tamanho do chanfro, que apresentou uma dimensão muito maior no início do contato (1,1 mm) do que no final (0,6 mm). A explicação para esta queda do sinal de potência está na alteração da posição relativa entre o contato e o sensor de EA. O sensor estava posicionado no centro da placa suporte, enquanto o contato ferramenta-chapa se movia de uma extremidade da chapa para o centro. Assim, como a posição relativa entre o contato e o sensor ia diminuindo, o nível de EA medido pelo sensor naturalmente tendia a aumentar. Contudo, como este nível estava limitado pelo valor T2, uma correção de trajetória era imposta no sentido de afastar o robô da peça. A consequência imediata era a queda do sinal de potência e a redução do tamanho do chanfro usinado. Desta forma, conclui-se que estratégia de controle baseada na emissão acústica não obteve sucesso no controle da dimensão do chanfro, principalmente porque foi influenciada pela posição do sensor. Estes resultados vêm comprovar que a emissão acústica apresenta uma grande velocidade de resposta, porém o nível do sinal depende de uma série de variáveis não relacionadas diretamente com a operação em si. No caso estudado, a operação foi influenciada pela posição do sensor. Outros fatores são: geometria da peça, montagem do sensor, fixação da peça (no caso estudado, isto significaria variações na fixação do corpo de prova sobre a placa suporte), entre outras.

5. CONCLUSÕES

Como base na estratégia adotada para controle da trajetória do robô durante a operação de rebarbação, foi criado um novo parâmetro de controle (FAP), baseado na fusão das informações de emissão acústica e potência. O resultados comprovam a possibilidade de extrair do FAP tanto as informações de contato inicial entre a ferramenta de rebarbação e a peça (característica típicas da emissão acústica) como a quantidade de material removida da peça (através do sinal de potência). Os resultados comprovam ainda a possibilidade de se estabelecer uma relação entre o nível FAE e a quantidade de material removida da peça, e de se utilizar esta relação para manter o contato ferramenta-peça dentro de padrões adequados. Estas estratégia apresentou sucesso ao controlar a trajetória da ferramenta e usinar um chanfro dentro das dimensões estabelecidas.

Os resultados comprovam ainda que o nível do sinal de emissão acústica depende de uma série de variáveis não relacionadas diretamente com a operação em si: posição do sensor, montagem do sensor, fixação da peça e geometria da peça. Desta forma, não se recomenda a aplicação isolada da

emissão acústica para controlar a intensidade do contato devido à baixa repetibilidade do valor RMS (*Root Mean Square*) do sinal, que apresenta um comportamento randômico.

Os testes realizados com diversas arquiteturas de controle de trajetória possibilitaram obter informações a respeito do sistema de controle do robô, das velocidades de resposta do mesmo e da dinâmica do processo de rebarbação robótica. A velocidade de avanço utilizada nos experimentos, 5 mm/seg. está condizente com os valores encontrados na bibliografia.

6. AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa é financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP.

7. REFERÊNCIAS

- Bone, G.M., Elbestawi, M.A., Lingarkar, R., Liu, L., 1991, "Force control for robotic deburring", *Journal of Dynamic Systems, Meas. and Control*, Vol. 113, pp. 395-400.
- Bone, G.M.; Elbestawi, M.A., 1994 "Sensing and control for automated robotic edge deburring", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.41, No.2, pp.137-146.
- Craig, J.J., 1986, "Introduction to robotics, mechanics and control", 2ª Edição, John Wiley & Sons, Inc, EUA.
- Dornfeld, D.A.; Erickson, E., 1989, "Robotic Deburring with real time acoustic emission feedback control", *PED, ASME.*, Vol.38, pp.13-25.
- Her, M.G.; Kazerooni, H., 1991, "Automated robotic deburring of parts using compliance control", *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol.113, pp.60-66.
- Oliveira, J.F.G., Dornfeld, D.A., 2001, "Application of AE Contact Sensing in Reliable Grinding Monitoring", *CIRP Annals*, Vol.50, No1, pp.217-220.
- Seliger, G.; Hsieh, H.L., 1991, "Sensor-aided programming and movement adaptation for robot-guided deburring of castings", *Annals of the CIRP*, Vol.40, No.1, pp.487-490.
- Valente, C.M.O.; Oliveira, J.F.G., 2001, "Fusão dos sinais de potência e emissão acústica para o controle da operação de rebarbação robótica", *Abrasives Magazine*, June/July.

SEVERAL STRATEGIES FOR MONITORING ROBOTIC DEBURRING SYSTEM

Abstract. *This work aims to develop a robotic deburring system, based on the monitoring and control of the tool path. Industries have been recognizing the importance of the deburring process, due to aspects related to security, quality and costs. However, the manual deburring is still broadly used by industries, despite of being slow, hard, and dangerous. The application of industrial robots on deburring process is an extremely complex issue, because a simple position programming (teach-in) is impractical due to the high interaction between the deburring tool and the workpiece. The solution points to a real time control system in order to evaluate and control the contact between the tool and the part during the operation. In this work, a new monitoring and control system based on power and acoustic emission feedback will be proposed. These signals are combined into a new parameter, Fast Abrasive Power, FAP, which represents a modularization of the power level by the ratio of instantaneous AE and average AE over the last n point. The new FAP parameter maintains the reliability of the original signal and incorporates the dynamics of the AE signal.*

Keywords: *Deburring, Robotics, Monitoring, Sensor fusion*