

## O EMPREGO DE ROBÔ COM CONTROLE DE FORÇA NA USINAGEM A VERDE DE CERÂMICA

G.J.G. Lahr; G.A.P. Caurin; C.A. Fortulan.  
Av. Trabalhador São-carlense, 400 – 13566-590 – São Carlos - SP  
cfortula@sc.usp.br  
Escola de Engenharia de São Carlos – USP

### RESUMO

*É estudado o emprego de robô na usinagem à verde de cerâmica, especificamente, na usinagem de isoladores de porcelana de alta alumina. O estado à verde, tem por característica uma muito baixa resistência mecânica e alta fragilidade onde as forças aplicadas em sua usinagem podem gerar/desenvolver defeitos na peça que diminuirão suas propriedades. Este trabalho objetiva o estudo da usinagem por robô de modelos de isoladores em escala 1:10 com a medição dos esforços na operação de usinagem. Foram conformados tarugos em porcelana de alta alumina por prensagem isostática e usinados à verde com uma retífica manual fixada no robô. Foi empregado o robô Kuka, modelo KR16. Após usinagem, foram analisadas as distorções no formato idealizado do isolador. Foram usinados com sucesso isoladores em gesso, que foi considerado padrão referencial da programação, nele foi obtido a usinagem com profundidade de corte 0,87 mm e avanço de 20 mm/s, a qual é a mínima para este modelo de robô, a transcrição desses parâmetros de usinagem para a porcelana a verde gerou trincas excessivas nas pontas das aletas e distorções de 0,1 mm no perfil idealizado. Profundidade de corte para valores próximos de 0,25 mm, valor de sucesso na usinagem CNC, manteve alguns dos defeitos o que permitiu concluir que a insuficiente rigidez do robô aliada a sua alta velocidade de avanço e vibração excessiva da retífica limita seu emprego para pequenas espessuras, porém com potencial para melhoria.*

Palavras-chave: robô KUKA, controle de força, usinagem a verde, isoladores de porcelana.

### INTRODUÇÃO

O setor cerâmico representa no Brasil vantagem competitiva, onde o país possui consolidada participação, o macrossetor cerâmico que envolve as áreas de: cerâmica vermelha, cerâmica branca, cerâmica de revestimento, isolantes térmicos, refratários, especiais, abrasivos, vidro, cimento e cal representa aproximadamente 1,0% do PIB brasileiro. <sup>(01)</sup>

O microssetor de isoladores não faz diferente, porém, a competitividade industrial internacional está fazendo com que esta área perca muito de suas

exportações: em 2006, o setor de isoladores exportou 55.000 toneladas no ano, com um faturamento de US\$ 114 milhões e importou apenas 19.000 toneladas, gastando um total de US\$ 14 milhões. Mas os dados de 2010 impressionam: o setor de isoladores conseguiu exportar apenas 11.000 toneladas, com um faturamento de US\$ 30 milhões, enquanto que a importação total foi de 9.000 toneladas, gastando US\$ 53 milhões. <sup>(02)</sup>

A perda de competitividade não está apenas relacionada com o baixo custo dos países emergentes, é também devido ao crescente emprego de tecnologia de ponta no processo de manufatura. A substituição do processo de extrusão de isoladores de grande seção como os *station post solid core* pela prensagem isostática traz vantagens nas propriedades e no custo.

A prensagem isostática é uma opção atrativa por apresentar alto nível de compactação e uniformidade, melhorando as qualidades finais do produto. Após conformada, a peça é então usinada e sinterizada e pode reduzir o ciclo de produção de 40 dias (por extrusão) para menos de 7 dias. Este processo de usinagem antes da sinterização é denominado de usinagem à verde (*green machining*) e permite o trabalho com massas de baixa plasticidade, em palavras diretas com a introdução de alumina em sua formulação para reforço estrutural.

No processo de seleção de um sistema de usinagem, que está altamente relacionado com o projeto do produto, deve-se prever a rigidez, a precisão, a acuracidade, a produtividade, a flexibilidade e o controle, fatores estes que diferenciam a qualidade e viabilidade dos modos de produção e a inserção dos produtos no mercado.

O isolador de alta tensão tem em seu projeto aletas para dissipação de calor e com perfil que impede a formação de um filme contínuo de água em condições ambientais úmidas. Estas aletas apresentam ângulos em sua superfície que torna a usinagem a verde por ferramenta perfilada impossibilitada e com CNC dificultada exigindo um mínimo de 4 graus de liberdade.

Centros de usinagem de controle numéricos computadorizados (CNC) é uma primeira opção, porém têm custo alto com guias lineares de precisão e fuso de esferas recirculantes acionados por servos motores, pouco indicado para pós cerâmicos. Como alternativa, a aplicação de um braço de robô atende às necessidades de precisão, rigidez e flexibilidade requeridas na usinagem à verde.

A utilização de robôs em tarefas como rebarbação e usinagem, despertam interesse há muito tempo (meados década de 1980).<sup>(03)</sup> Nas aplicações industriais, há grande diversidade potencial existente, no entanto, há restrições relacionadas: à rigidez do sistema robô/meio externo; a complexidade das interfaces de programação e controle de posição; as fortes limitações ainda hoje de velocidade de resposta do sistema e o alto custo de sensores reduzem até hoje o número de sistemas em funcionamento pleno, excluídos os dispositivos de demonstração, de ensino e pesquisa. Alguns casos de sucesso podem ser encontrados em poucos nichos, como fabricação de flaps de aviões, em compósitos, pranchas de surf, em fibras de vidro, prototipagem em madeira, etc. Em sua grande maioria de aplicações que não envolvem material de alta rigidez.

Na operação de usinagem à verde, se as forças aplicadas pela ferramenta forem controladas e mantidas abaixo de um valor limite, será evitada a geração defeitos críticos. A fonte de variações de esforços pode ser devido a possíveis aglomerados e/ou concentração de orgânicos presentes na estrutura do material ou ainda devido ao aumento do comprimento da aresta efetiva em posições de transição no perfil. A utilização de um controle de força pela ferramenta de usinagem pode compensar a demanda de potência, pela alteração da velocidade de corte ou por uma subdivisão incremental do número de passes de usinagem. Alguns equipamentos CNC são equipados com medidores de torque pela leitura da corrente do motor do eixo árvore, porém é altamente desejável ter assegurada as componentes individuais de forças (tangencial, axial e radial) durante a usinagem.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo foram usinados modelos de isoladores de alta tensão do tipo station post solid core em escala 1:10. Foram conformados tarugos em porcelana por prensagem isostática e usinados à verde com uma retífica fixada no robô como ferramenta de trabalho. Foi utilizado o robô Kuka, modelo KR16, que mede as forças atuantes em sua garra com o auxílio de um sensor de força.

Uma bancada para auxílio do robô foi desenvolvida resultando na montagem ilustrada pela Figura 01. A Figura 02 ilustra o detalhe da bancada motora do corpo de prova. O controle do sensor de torque e acionamento do servo motor foram projetados por Margarido *et al.* (2011)<sup>(04)</sup>, onde foi criado um programa em *LabView*

para a aquisição dos dados das entradas de torque e controle da velocidade de rotação do servo motor.

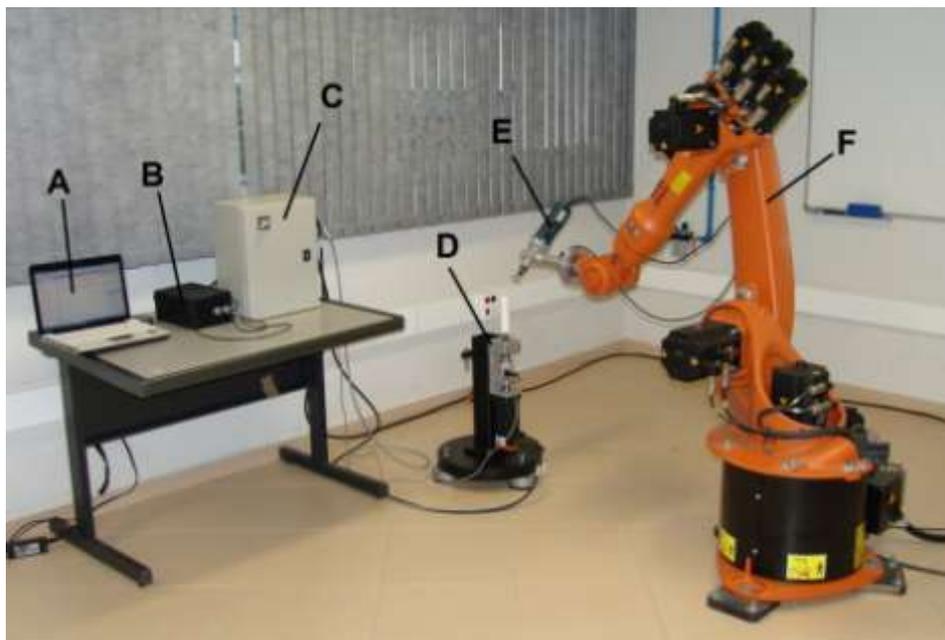


Figura 01- Montagem da bancada e robô, em A) computador; em B) placa Módulo de aquisição de dados e fontes AC; em C) driver para servo motor, D) porta ferramenta, em E) cabeçote de retificação e em F) robô Kuka.

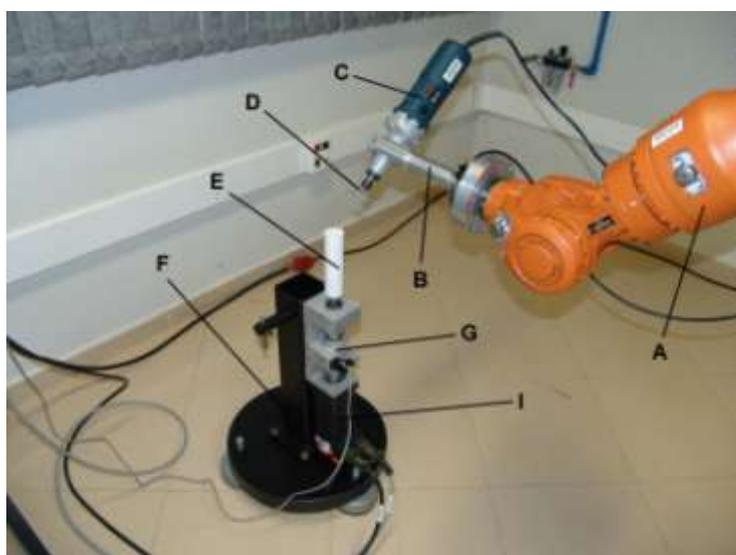
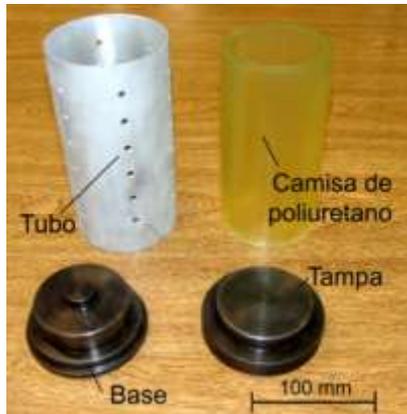


Figura 02 Detalhe final da bancada, em (A) o robô, (B), o acoplamento do *spindle*, (C), o próprio *spindle*, (D), o disco de alumina para usinagem, (E) tarugo de gesso para testes preliminares, (F) a suporta, (G) o porta ferramenta e (I).o servo motor.

### Molde isostático

Para realizar a prensagem dos *blanks* de porcelana, foi projetado um molde de prensagem isostática. Tal molde possui uma camisa elástica de poliuretano dureza shore 90A, um tubo de alumínio perfurado para entrada do fluido, tampas e base em

Aços ABNT 1045. Uma protuberância na base foi projetada para que após prensagem deixasse um furo para centralização e fixação do *blank* no suporte de usinagem. A Figura 03a mostra as peças prontas do molde e na Figura 03b tem-se o molde montado e com pó cerâmico em seu interior.



a)

b)

Figura 03- Molde Isostático, em a) partes do molde e em b) molde montado, carregado com pó e aberto

#### Setup do robô

Foi fixada ao robô um cabeçote de usinagem, um cabeçote de retificação Bosch, modelo GGS 27L, de 500 watts de rotação de 27.000 rpm equipado com pinça de fixação. O disco utilizado para retificação foi de grãos de alumina fundida marrons, #100 mesh, liga vítrea, com um diâmetro externo de 40 mm e espessura de 1,5 mm.

#### Programação do Perfil

O software utilizado foi o *KRC*, desenvolvido pelo fabricante do robô, *Kuka Roboter GmbH*. A lógica de programação adotada foi o *PTP (point-to-point)* onde o robô realiza a movimentação de seus eixos de um ponto inicial até o segundo ponto definido de acordo com a melhor rota definida pelo programa, sendo seus movimentos imprevisíveis. A decisão que o programa faz sobre a melhor rota não é a da menor distância, mas assim aquela que o robô de melhor aproveitamento dos torques. Deste modo trata-se da trajetória mais rápida, mas não a mais curta. Outras opções de programação são possíveis, a saber: Definição de movimento *LIN (linear)* que obriga o robô a desenvolver um movimento em linha reta entre o ponto atual e o ponto desejado; Definição de movimento *CIRC (circular)*; Definição de movimento *lin\_rel (linear\_relative)*; Definição de movimento *circ\_rel (circular\_relative)*.

Inicialmente foi definido um ponto de partida no espaço relativo no envelope de trabalho no robô dado pelo toque em x-y-z no topo do tarugo, o programa segue programação relativa. A Figura 03 exemplifica a primeira parte da usinagem do perfil em vermelho - linhas 16 e 25 da Figura 04, que segue até a primeira curva da primeira aleta, pois a partir dela, todo o perfil será repetido.

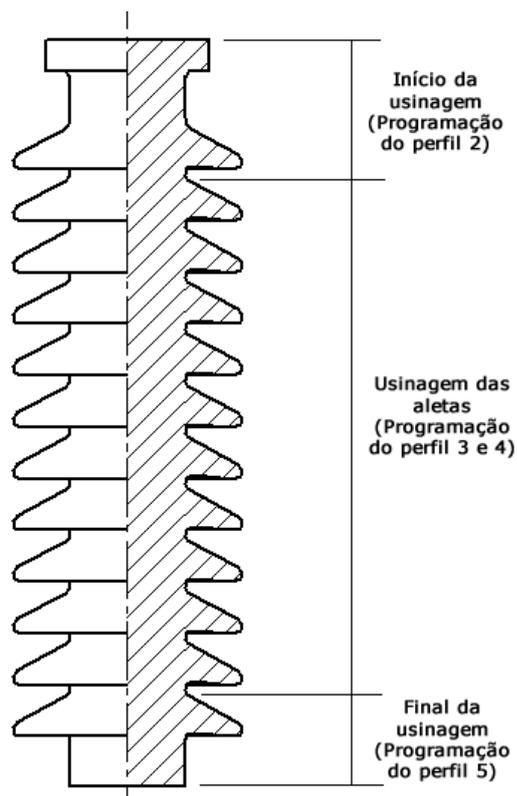


Figura 03 - Perfil do isolador a ser usinado na primeira parte da programação

```
14 ; inicio da usinagem
15
16 lin_rel {z -12.5}
17 lin_rel {y 5}
18 lin_rel {z 3}
19 circ_rel {y 0.22, z 0.53}, {y 0.75, z 0.75}
20 lin_rel {y 6.24}
21 circ_rel {y 1.24, z -0.34}, {y 2.12, z -1.27}
22 lin_rel {y 3.64, z -6.84}
23 circ_rel {y 1.4, z -0.59}, {y 2.25, z 0.67}
24 lin_rel {y -0.54, z 6.14}
25 circ_rel {y 0.85, z 1.26}, {y 2.25, z 0.67}
```

Figura 04- Programação do perfil 2

A partir do último ponto do percurso é possível que se crie um laço de repetição dado o perfil repetitivo do isolador. Tal laço executa repetições do perfil definidas pelo valor do *loop* controlado com o valor de *k*. A chamada da função ocorre logo após o início da primeira parte de usinagem, mostrado na Figura 05. Com a chamada da função, o compilador busca os comandos definidos fora do programa principal, na sub-rotina como mostrados na Figura 06. Por fim do perfil é usada entre as linhas 33 e 38. A retirada da ferramenta das proximidades da peça (linha

40, *LIN P17*) e o retorno para a posição *HOME* do robô (linha 42), ocorrem após todo o ciclo, conforme ilustra a Figura 07.

```
27 for k=1 to 10 step 1
28
29 CURVAS()
30
31 endfor
```

Figura 05- Programação do perfil 3

```
45 DEF CURVAS()
46
47 lin_rel {y 3.98, z -7.48}
48 circ_rel {y 1.06, z -0.59},{y 2.25, z 0.67}
49 lin_rel {y -0.54, z 6.14}
50 circ_rel {y 0.85, z 1.26},{y 2.25, z 0.67}
51
52 END
```

Figura 06- Programação do perfil 4

```
33 lin_rel {y 3.98, z -7.48}
34 circ_rel {y 1.06, z -0.59},{y 2.25, z 0.67}
35 lin_rel {y -0.54, z 6.14}
36 circ_rel {y 0.32, z 0.92},{y 1.2, z 1.3}
37 lin_rel {y 6.96}
38 lin_rel {z 8.75}
39
40 LIN P17 Vel= 2 m/s CPDAT10 Tool[13]:retif glahr Base[18]:testeglahr
41
42 PTP HOME Vel= 100 % DEFAULT
```

Figura 07- Programação do perfil 5

### Preparação dos corpos de gesso

Para os testes de avanço e programação relativa, foram inicialmente utilizados tarugos de gesso, por serem mais simples de fabricação e apresentar melhor resistência ao impacto comum pelas colisões iniciais de ajuste. O tarugo de gesso com diâmetro de 38 mm e comprimento de 150 mm, usando a relação 70/30 (70% em peso de pó de gesso e 30% em peso de água) foi moldado sobre o suporte de usinagem e aguardado tempo de reação e secagem de 72 horas.

### Preparo e conformação dos corpos de porcelana

Foi processada a formulação A50 descrita por Fortulan et al. 2011<sup>(05)</sup> de acordo com a Tabela 02.

Tabela 1: Formulações A50

Formulação	Alumina (peso %)	Feldspato (peso %)	Argila (peso %)	Caulin (peso %)	Alumina ponderada (peso %)
A50	30.0	31.5	28.5	10.0	50

Para obtenção dos corpos de porcelana foi necessário fazer a moagem e mistura da matéria-prima a úmido em moinho de jarros com elementos de moagem de alumina. O jarro foi rotacionado por 24 horas e descarregado. Após moagem, a barbotina cerâmica foi seca em estufa a 100 °C por 24 horas seguida de granulação mecânica por almofariz e pistilo e, seleção e classificação entre malhas de 60 a 100 *mesh*.

As matérias-primas selecionadas para este estudo foram definidas por Gambale (2008) <sup>(06)</sup>: Argila São Simão (Minasolo, lote 078/92, #325 mesh); feldspato potássico (Minasolo, lote MCK 200, 13.36 wt% de K<sub>2</sub>O, #325 mesh); alumina- $\alpha$  5S-G (Alcan, lote 24, 0.95 m<sup>2</sup>/g de área superficial, 4.08  $\mu$ m de diâmetro equivalente esférico) e caulin (Minasolo, lote MCP-325, 45.5 wt% de SiO<sub>2</sub>, #325 mesh).

O material granulado foi depositado dentro do molde isostático e pressurizado a 70 MPa por 1 minuto. Após a prensagem, o tarugo de porcelana foi seco em estufa a uma temperatura de 100 °C por 12 horas.

O tarugo seco foi aderido num suporte com termocera fundida por soprador de ar quente e placa quente, seguido de resfriamento.

## RESULTADOS

### Usinagem em gesso – ajuste dos parâmetros

As Figuras 8 a, b, c e d mostram imagens que representa a observação dos tarugos em gesso usinados onde foi observada quebra no início do tarugo e. Os vazios (bolhas) foram gerados do processo de produção do gesso. Observam-se ainda deformações no perfil, nas partes inferior (b) e superior (a), onde deveria ser uma trajetória retilínea, evidenciando que o limite de rigidez do robô foi ultrapassado.



a)



b)

c)

Figura 08 – Imagem do isolador em gesso usinado, em a) tarugo usinando; em b) parte inferior do tarugo e em c) parte superior do tarugo.

### Usinagem em porcelana

O passo seguinte foi a usinagem dos corpos de porcelana nas condições feitas para a usinagem dos tarugos de gesso, sejam: profundidade de corte de 0,87 mm, que soma 1,74 mm no diâmetro do *blank*. Essa medida é muito maior que a utilizada por Gambale (2009) <sup>(7)</sup> que foi de 0,20 mm. Nas Figuras 09a e 09b, podem ser observados estágios do processo de usinagem.

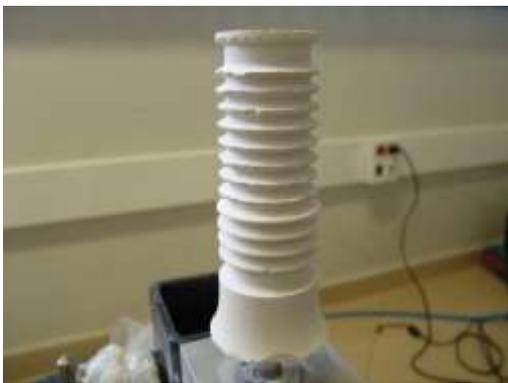


a)

b)

Figura 09 – Usinagem dos tarugos de porcelana, em a) início da operação em b) operação em curso.

Porém, durante o décimo segundo passo, as aletas não suportaram os esforços imprimidos e romperam. A usinagem foi interrompida para que se pudesse comparar as diferenças entre as aletas no passo anterior e as quebradas no passo presente. A Figura 09a mostra o corpo ainda no sistema de usinagem e a Figura 09b mostra o corpo em detalhe. Observando a Figura 09 b nota-se que as quatro aletas do lado direito integras resultante do 11º passo, enquanto que as oito aletas do lado esquerdo (referentes ao 12º) bastante fraturadas.



a)

b)

Figura 09 – Usinagem dos tarugos de porcelana, em a) Início da ruptura em b) imagem em detalhe .

### Esforços na usinagem

Foram medidas as forças da usinagem no sistema referencial do sensor de força que fica na garra do robô. Portanto não reflete as componentes exatas de usinagem. As Figuras 10a e 10b mostram o espectro das forças no eixo z que apresentou os maiores valores, na Figura 10a o espectro total durante o 11º passo e a Figura 10b os 15 primeiros segundos de usinagem. A média dos 100 maiores picos medidos foram: eixo z ( $28 \pm 2$  N); eixo x ( $8 \pm 2$  N) e eixo y ( $16 \pm 2$  N).

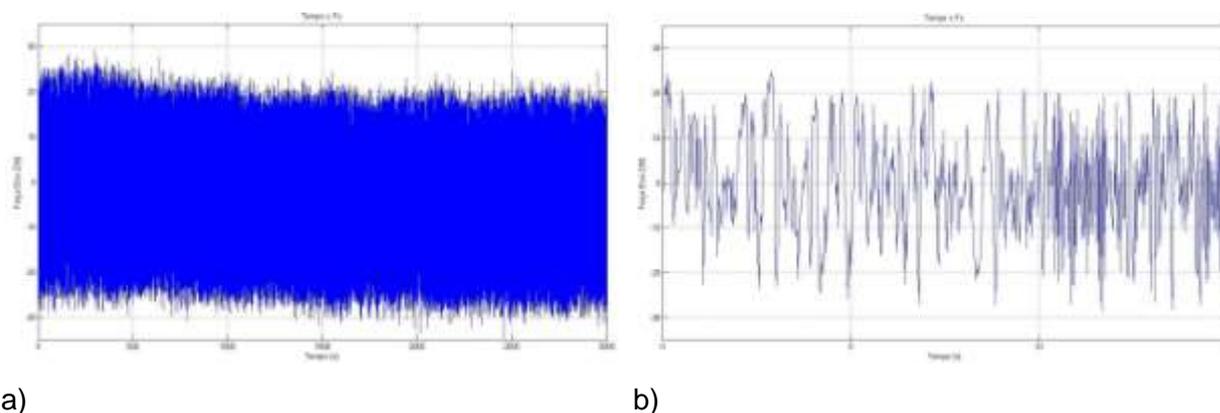


Figura 10 – a) Espectro da força do eixo Z do sensor na garra e b) início da usinagem

## CONCLUSÕES

O estudo mostrou que é viável a utilização de robô manipulador como suporte de *spindle* de corte para usinagem de cerâmica a verde. A baixa força de corte de cerâmicas a verde permite o uso do robô que tem como vantagem principal a flexibilidade de movimentação.

Ensaio preliminares na usinagem de um *blank* de gesso, considerado padrão nesse trabalho, foram executados com sucesso fornecendo parâmetros tais como profundidade de corte de 0,87 mm (1,74 mm no diâmetro) e avanço de 20 mm/s, onde nessas condições foi obtido desvio de forma na casa de 0,1 mm, considerado adequado para esse produto.

A transcrição dos parâmetros de corte obtidos na usinagem de gesso para a porcelana a verde gerou trincas excessivas nas pontas das aletas, o que determinou a necessidade da diminuição da profundidade de corte, considerando a referência obtida por Gambale (2009) que foi de 0,25 mm. Salienta-se ainda que a velocidade de avanço aplicada de 20 mm/s não pode ser reduzida, pois é parâmetro deste modelo de robô.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP pela bolsa de Iniciação científica (Processo nº. 2010/18295-9), ao CNPq - projeto Universal (479041/2009-1) e a CAPES projeto Pró Engenharias nº PE 0652008 481500/2007-3.

## REFERÊNCIAS

- 1) Banco do Nordeste. Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste, ETENE. *Informe setorial cerâmica vermelha*. ETENE, 2010.

- 2) SINDILOUÇA, Sindicato da Indústria da Cerâmica de Louça de Pó de Pedra, da Porcelana e da Louça de Barro no Estado de São Paulo. Índices setoriais, Resumo Anual das Exportações e Importações. Disponível em: <<http://www.sindiloucasp.org.br/>>. Acesso em 05 de setembro de 2011.
- 3) KAZEROONI, H., BAUSCH, JJ. e KRAMER, BM. An Approach to Automated Deburring by Robot Manipulators. J. Dyn. Sys., Meas., Control. v.108, n.4, p.354. 1986,
- 4) MARGARIDO, A., RAMOS, D.L.T., RISARDI, J.C., PURQUERIO, B.M. e FORTULAN CA. *Influência das forças de corte nas propriedades mecânicas de corpos de alumina retificados a verde*. Anais do 55º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Porto de Galinhas, 2011, p.1785-1796.
- 5) FORTULAN, C.A., PURQUERIO, B.M., GAMBALE, B.V.V. e CHINELATTO, A.L. Influence of alumina content in green machined electrical porcelain. *Industrial Ceramics*, v31, 2011, p137-143.
- 6) PURQUERIO, B.M. e FORTULAN, C.A. *Green machining of high alumina electrical porcelain*. In: 52º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2008, Florianópolis.
- 7) GAMBALE, B.V.V. Projeto de uma máquina de usinagem á verde de protótipos de isoladores cerâmicos Dissertação de Mestrado EESC-USP. 2009.

## ROBOT WITH CONTROL OF POWER APPLIED IN THE GREEN CERAMIC MACHINING

### ABSTRACT

*Use of robot in the green ceramic machining, specifically, in the machining of high alumina porcelain insulators. The green state has very low resistance and high fragility where the forces applied during machining can generate/develop defects in the part, that will reduce their properties after sintering. This work aims to study the machining by robot models of insulators in 1:10 scale. Blanks were formed in high alumina porcelain by isostatic pressing and machined to the green with a manual grinder attached to the robot. Kuka robot model KR16 was applied. After machining, it was analyzed the distortion of the idealized shape of the insulator. Were successfully machined insulators in gipsum, which was considered the standard for setup of program, it was obtained machining with cutting depth 0.87 mm and feed of 20 mm/s, which is the minimum for this robot model, the transcription of machining parameters for the green porcelain excessive cracks generated at the tips of the fins and distortion of 0.1 mm in idealized profile. Cutting depth to values of 0.25 mm, a value of success in CNC machining, its possible to concluded that insufficient stiffness of the robot together with its high forward speed and excessive vibration of the grinding limits its use for thin thicknesses, although with potential for improvement.*

Key-words: KUKA robot, force control, green machining, porcelain insulators.