

ANÁLISE DE CAPACIDADE PARA AVALIAR A INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE BROCAS HELICOIDAIS EM FURAÇÃO PROFUNDA DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO – UM ESTUDO DE CASO

Allan Coutinho Pereira¹, allan.coutinho@bol.com.br
Fabrício J. Nóbrega Cavalcante¹, fabricao.nobrega@bol.com.br
Paulo André de Camargo Beltrão, Ph.D.¹, beltrao@utfpr.edu.br

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Avenida Sete de Setembro, 3165. Rebouças. Curitiba. Paraná.

Resumo: A furação é um dos processos mais importantes de toda manufatura. Apesar de toda essa importância, estudos antigos e contemporâneos destacam falta de conhecimento deste processo para aplicação da indústria na usinagem de determinados materiais. Dentre estes materiais que requerem mais estudos destacam-se as ligas de alumínio que hoje em dia são largamente utilizadas devido as suas características físicas e químicas. Neste trabalho, pretende-se estudar a influência da geometria de brocas helicoidais em uma furação profunda de uma liga de AlSiCu utilizada em uma linha de produção. Brocas helicoidais são as ferramentas mais versáteis e difundidas na usinagem. Normalmente, são utilizadas para usinagem de furos curtos devido a problemas de rigidez, refrigeração e escoamento dos cavacos. As ferramentas utilizadas neste estudo foram brocas helicoidais convencionais inteiriças de metal duro. O principal problema enfrentado no processo estudado foi a repetibilidade da localização do centro do furo. O objetivo do trabalho foi o de avaliar a função dos ângulos de ponta e de incidência na centragem do processo de furação. Na primeira etapa da pesquisa, foram utilizadas técnicas estatísticas no planejamento e na análise dos fatores de controle. Na segunda fase, foram realizados testes de longa duração para verificação das respostas estimadas. Para análise da estabilidade e conformidade do processo foi controlada a distância de centro e para verificação da ferramenta foi observado o desgaste. Verificou-se que há influência da geometria da ponta da broca na repetibilidade do processo, e que o fator mais relevante é o ângulo de incidência. A aderência de material na ponta esteve presente durante toda vida da ferramenta, e o mecanismo de desgaste predominante foi o abrasivo.

Palavras-chave: Capacidade, Geometria de brocas, Furação profunda, Vida útil de ferramentas.

1. INTRODUÇÃO

No âmbito da usinagem, o processo de furação requer atenção muito especial, pois é um dos processos mais utilizados. Normalmente, a furação é aplicada para os considerados furos curtos (com $L/D < 5$), mas há na indústria um grande número de furos que tem sua profundidade maior que cinco vezes seu diâmetro. Este tipo de furação é considerada profunda e, obviamente, requer mais cuidado por ser mais complexa e envolver condições severas de usinagem.

Os processos que utilizam brocas helicoidais, dependendo da relação comprimento-diâmetro (L/D), estão sujeitos à geração de excentricidades. No entanto, para alguns tipos de furação profunda o uso deste tipo de ferramenta é justificado pela sua grande versatilidade, pois também podem ser utilizadas para realização de furos curtos, são de baixo custo, possuem uma grande faixa de diâmetros, são aplicáveis na usinagem de vários materiais (aços, ferros fundido e não ferrosos), e são as ferramentas mais fabricadas e difundidas para usinagem e por isso mais facilmente encontradas.

O estudo foi realizado em uma linha de produção seriada de uma fábrica de motocicletas, em particular numa furação em cheio e passante de $5^{+0,2}_0$ mm de diâmetro (5H13) com 42 mm de profundidade (portanto furação profunda, pois $L/D > 8$), feito com uma broca inteiriça de metal duro helicoidal sem revestimento, que deve ser concêntrico a um alargamento com $6^{+0,05}_0$ mm de diâmetro produzido em outra máquina.

Estes dois processos fazem parte do sistema de lubrificação do motor de uma moto e, constantemente, ocorre deslocamento entre ambos. Desta forma, a centragem da ferramenta é o principal problema enfrentado no processo. Por sua vez, Castillo (2005) afirma que há relação direta da centragem com o ângulo de ponta da broca. Na Figura 1 pode-se ver esquematicamente o processo em questão.

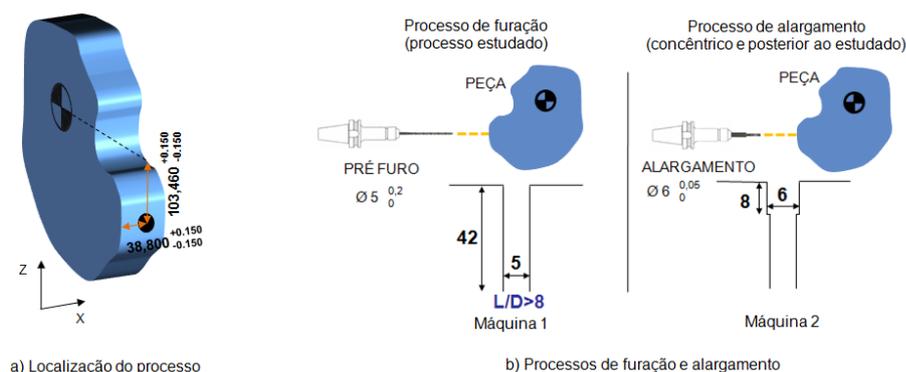


Figura 1 – Esquema do processo estudado.

O problema foi abordado com o auxílio do Controle Estatístico do Processo (CEP) que auxilia na detecção de ocorrências de variações por causas sistemáticas, evitando problemas de qualidade e custos desnecessários, e do modelo de delineamento de experimentos (DOE - *Design of Experiments*) em particular o fatorial, pois este modelo pode analisar os dois tipos de fatores (ângulo e ponta e de incidência) de forma organizada e confiável, para mostrar o efeito destes na centragem e no desgaste da ferramenta.

2. CONFORMIDADE E CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO

Alta qualidade na produção fornece algumas vantagens tais como aumento da satisfação dos clientes, redução de rejeição ou retrabalho e aumento do “*market share*”. Isto resultou na ênfase renovada das técnicas de estatística para o desenvolvimento de qualidade dos produtos e para a identificação de problemas de qualidade em vários estágios da produção (Motorcu; Güllü, 2006).

No método tradicional de controle de qualidade, o produto é fabricado primeiro, e então é checado o atendimento das especificações de qualidade. Se o produto não atender as especificações é rejeitado ou recuperado. Se muitos produtos defeituosos forem produzidos, é preciso eliminar as causas sistemáticas fazendo correções no sistema produtivo.

No controle estatístico do processo a checagem do produto é aplicada em determinados momentos da produção. Se a produção está sob controle estatístico segue normalmente, pois, neste caso, há previsibilidade do comportamento do processo. No entanto, quando falhas sistemáticas são evidenciadas suas causas devem ser descobertas e eliminadas.

Em qualquer operação de manufatura, existe variabilidade na saída do processo. Os processos de fabricação dificilmente reproduzem exatamente uma mesma grandeza em quaisquer características do produto (Groover, 2007).

O controle estatístico do processo foi desenvolvido para detectar a ocorrência de causas sistemáticas, ajudando a mensurar o potencial e o desempenho de processos na indústria, evitando problemas de qualidade e custos desnecessários (Shiau et al 2006).

As técnicas estatísticas são utilizadas para melhorar a qualidade do processo continuamente. Para tomadas de decisão imparciais, principalmente em processos produtivos seriados, é necessário utilizar técnicas estatísticas baseadas em informações obtidas no produto ou no processo. Cartas de controle, definição de capacidade do processo e *Design of Experiments* tem sido utilizados há anos (Motorcu; Güllü, 2006).

A informação sobre o nível de variabilidade do processo é muito importante para avaliar a sua conformidade. Isso leva a necessidade de ter indicadores de nível de variabilidade e dispersão do processo, pois quanto menor o nível de variabilidade do processo maior a sua uniformidade.

A medição da variabilidade do processo dá as medidas de dispersão do processo. Contudo somente pela relação entre estes indicadores do processo encontrados pelo Controle Estatístico do Processo (CEP) com as tolerâncias permitidas definidas em projeto, é que são gerados indicadores que expressam o nível de capacidade em produzir dentro das tolerâncias ou requisitos pré-estabelecidos (Bulba, 1998).

Gráficos de controle são utilizados extensivamente na indústria como uma técnica de diagnóstico para o monitoramento dos processos de produção a fim de detectar instabilidades e circunstâncias não usuais (Devore, 2006).

O atendimento dos requisitos ou outras exigências é que definirá a conformidade do processo, portanto estes índices de capacidade (ou índice de capacidade do neologismo vindo do inglês “*capability*”) contribuem diretamente para validação da conformidade do processo. O estudo da capacidade do processo é a quantificação da situação atual e da expectativa futura com relação à atuação de causas comuns de variação (Stoumbos, 2002 apud Matos, 2003).

2.1. Índices de capacidade

O estudo de capacidade fornece informações sobre mudanças e tendências do sistema durante a produção, e sua análise ajuda a determinar a habilidade de fabricar peças dentro dos limites de tolerância (Deleryd, 1997).

Motorcu e Güllü (2006) mostraram que o controle estatístico e a capacidade são métodos efetivos para determinar e melhorar a qualidade do processo. Eles verificaram os índices de capacidade de várias linhas de produção seriada e

observaram que algumas estavam com índices de capacidade inaceitáveis. A produção em alguns momentos foi interrompida para ajustes e logo após a sua retomada, novos estudos eram realizados para verificar os efeitos das melhorias. Os resultados obtidos com o estudo foram bastante positivos, as peças passaram a ser produzidas dentro dos limites de tolerância e os problemas crônicos foram eliminados.

Há quatro grandes passos para o estudo da capacidade, e esses estão mostrados na Figura 2.

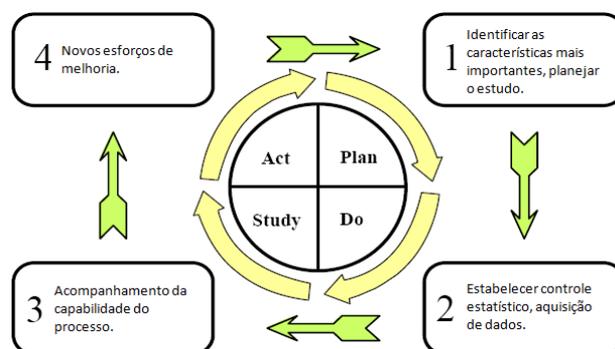


Figura 2 - Os passos básicos para estudos de capacidade de processos (Deleryd, 1997).

Passo 1 (*Plan*): um produto sempre possui muitas características que são possíveis de monitorar, e essas características devem ser identificadas. Antes de iniciar o estudo de capacidade deve ser feito um planejamento cuidadoso, por exemplo, deve-se saber o que medir e como medir.

Passo 2 (*Do*): antes de fazer o acompanhamento da capacidade do processo, ele deve mostrar um razoável grau de controle estatístico e deve estar estável. Se o processo está instável nada pode ser dito sobre seu passado ou seu futuro. O estudo da capacidade de um processo fora de controle expressa a capacidade do processo em um determinado momento, e qualquer ação tomada em tais estudos pode conduzir a uma degradação ao invés de melhoria. Uma forma bastante utilizada para verificar o controle do processo é a plotagem de gráficos de controle como, por exemplo, cartas de controle das médias e amplitudes $\bar{X} - R$, que permitem fazer uma estimativa da variabilidade do processo, informando sua estabilidade ao longo do tempo.

É bom destacar que os limites superior e inferior de controle, que são utilizados nas cartas de controle, são diferentes dos limites superior e inferior de especificação.

Passo 3 (*Study*): a forma mais fácil de avaliar a capacidade de um processo estável é através dos índices de capacidade, que representam funções adimensionais do processo e do produto e são utilizados para medir o desempenho dos processos. O desenvolvimento dos índices de capacidade iniciou-se com a introdução do índice CP feito por Juran, que leva em conta apenas a dispersão do processo.

A capacidade é dada pela variabilidade apresentada no processo igual a $6\sigma_{\text{processo}}$, e este valor é estimado por $6\bar{R}/d_2$, onde \bar{R} é a amplitude média da amostra e d_2 é um fator estatístico. Por sua vez o índice de capacidade é estimado como uma relação entre a variação permitida na especificação (tolerâncias), pela capacidade estimada do processo:

$$CP = \frac{\text{variação permitida pela especificação}}{\text{variação estimada do processo}} = \frac{\text{TOLERÂNCIA}}{\text{CAPACIDADE}} = \frac{\text{LSE-LIE}}{6\bar{R}/d_2} = \frac{\text{LSE-LIE}}{6\sigma} \quad (1)$$

Onde LSE e LIE são os limites superiores e inferiores de especificação, respectivamente.

O índice de capacidade de um processo depende dos valores da tolerância. O objetivo é julgar se o mesmo é capaz de produzir dentro da especificação.

Entretanto, se o processo não for bem centralizado, onde a dimensão média coincide com a média das especificações, o índice CP terá que ser auxiliado por outro índice para detectar esta descentralização. O índice de capacidade CPk vem suprir essa necessidade não satisfeita pelo índice CP, acrescentando para isto o estimador da média μ , estimado por \bar{X} . Ele é o menor valor encontrado entre as duas relações que seguem:

$$CP_k = \frac{\bar{X} - \text{LIE}}{3\bar{R}/d_2} \text{ ou } CP_k = \frac{\text{LSE} - \bar{X}}{3\bar{R}/d_2} \quad (2)$$

O índice CPk mede a distância entre o valor esperado da característica estudada, μ , e o limite de especificação mais próximo e relaciona esta distância com metade da dispersão, 3σ .

Quanto mais a distribuição se distancia do valor central do projeto, menor o valor de CPk. Para não haver unidades fora da especificação, CPk deve ser maior ou igual a um. Quando o processo é centralizado CP=CPk.

Quando o índice de capacidade é maior que a unidade não há produção de não conformidades. Entretanto com valores iguais ou menores que a unidade há probabilidade de produção de peças não conformes.

Hsiang e Taguchi 1985 *apud* Deleryd (1997), propuseram o índice CPm que não leva em conta apenas os limites e a dispersão do processo, mas considera também os valores que devem ser atingidos pelo processo. Este é definido como:

$$CP_m = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \quad (3)$$

Onde T é o valor alvo do processo.

Existe o equivalente do CPk em relação ao CP, para o CPm que é o Cpmk e é definido como:

$$CP_{mk} = \frac{\text{Min}(LSE - \mu, \mu - LIE)}{3\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \quad (4)$$

Para unificar os quatro índices básicos, quais sejam: CP, CPk, CPm e Cpmk, Vännman definiu uma classe de índices que dependem de dois parâmetros, u e v, e é definido como (Albing, 2008):

$$CP_{(u,v)} = \frac{d - u|\mu - M|}{3\sqrt{\sigma^2 + v(\mu - T)^2}} \quad (5)$$

Onde d = (LSE-LIE)/2 é a metade do intervalo de especificação. Na fórmula M representa o ponto médio do intervalo de especificação, dado por M = (LSE+LIE)/2.

Os índices CP, CPk, CPm e Cpmk são casos especiais de CP(u,v) obtidos pelas seguintes combinações: CP(0,0) = CP, CP(1,0) = CPk, CP(0,1) = CPm, CP(1,1) = Cpmk.

Passo 4 (*Act*): finalmente as atividades de melhoria devem ser iniciadas, a fim de obter um processo mais capaz do que antes. Assim como os outros métodos utilizados para melhoria de processos, é importante saber que o estudo não resolve o problema. No entanto, ele irá fornecer algumas sugestões de como agir para alcançar melhorias.

3. METODOLOGIA

A liga usinada é AlSiCu fundida sob pressão, que tem como característica principal a boa resistência mecânica e é constituída pelos elementos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química da liga estudada.

Si%	Cu%	Femax%	Mgmax%	Znmax%	Mnmax%	Timax%	Nimax%
8,5 - 11	1 - 2,5	0,2	0,2	1	0,3	0,1	0,3

A metodologia proposta neste trabalho, por ser aplicada a uma linha de produção seriada em atividade, foi considerada simples, economicamente viável e exequível para realidade do chão de fábrica.

O delineamento de experimentos DOE será utilizado, pois este método permite resolver um problema de qualidade proporcionando a oportunidade de controlar e planejar as variáveis utilizando a experiência. A metodologia utilizada será a proposta por Montgomery (2001).

Para melhoria do processo são combinados diferentes ângulos de ponta e de incidência. Para usinagem de ligas de alumínio podem ser utilizados, dependendo da quantidade de silício presente na liga e do tipo de furação, ângulos de ponta entre 90° e 150° (Weingaertner; Schroeter, 1991). A ferramenta atualmente utilizada no processo tem ângulo de ponta igual a 118°, e este será o valor de referência para escolha dos outros ângulos testados.

Conforme padrão de fabricação e disponibilidade do fornecedor, os valores de ângulo de ponta imediatamente superior e inferior ao valor de referência são 130° e 110°.

Para usinagem de ligas de alumínio fundido sob pressão com teor de silício de até 12% recomenda-se a utilização de ângulos de incidência entre 12° e 15° (Weingaertner; Schroeter, 1991). A ferramenta original do processo utiliza ângulo de incidência igual a 12°.

No DOE o efeito do fator é definido pela mudança da resposta produzida pela mudança do nível do fator, que é chamado efeito principal por ser causado pelo fator de mais interesse do experimento. O fator ângulo de ponta teve três níveis, quais sejam: 110°, 118° e 130°, enquanto o fator ângulo de incidência teve dois níveis 12° e 15°. Foram realizadas repetições em todos os experimentos (n=2) para obtenção de uma estimativa do erro experimental a fim de obter uma resposta mais precisa dos efeitos dos fatores estudados (Montgomery, 2001).

A resposta selecionada para avaliar a relação do ângulo de ponta e de incidência foi o índice de capacidade CP, já que a centragem é o problema de qualidade mais grave do processo e é possível obtê-lo em ensaios de curta duração. Este índice fornece informações sobre a dispersão do processo e é utilizado para determinar a localização do sistema dentro dos limites de tolerância.

Os experimentos foram divididos em duas grandes etapas: primeiramente seis ensaios de curta duração com uma réplica de cada totalizando doze ensaios. Estes ensaios definiram os índices de capacidade CP de cada geometria, e

permitiram a construção de gráficos para verificação da influência do ângulo de ponta e de incidência no processo. Na segunda etapa foi realizado um ensaio de longa duração para a geometria que obteve o melhor resultado na primeira etapa, e outro para a ferramenta até então utilizada no processo. O objetivo foi comparar o comportamento das duas geometrias.

Por sua vez, o processo de análise de capacidade, que foi a primeira etapa do trabalho, foi conduzido conforme modelo proposto com Deleryd (1997), ver Figura 2. Este modelo é composto por quatro fases. A primeira é a identificação da característica mais importante, que no caso deste estudo foi a localização do processo realizado.

A segunda fase da análise de capacidade foi a verificação da estabilidade e da forma de distribuição do processo para posterior aquisição de dados. Normalmente, antes da realização da análise de capacidade, cartas de controle são geradas com dados obtidos do processo para verificar se o sistema é estável (Motorcu; Güllü, 2006).

A terceira fase foi a verificação da capacidade do processo, onde são realizados e analisados os cálculos estatísticos e, por fim, a quarta etapa que foi a escolha da melhor geometria para utilização no processo.

A ferramenta utilizada no processo é uma broca inteira de metal duro com canais helicoidais. As suas características fixas são: \varnothing da broca = $5_{-0,018}^0$ mm, \varnothing da haste = $9_{-0,015}^0$ mm, Comprimento total da broca = 140 mm, Tipo de haste = reta, Comprimento do canal = 50 mm, Comprimento da haste = 80 mm, Espessura do núcleo = 2 mm, Largura da guia = 0,55 mm, Ângulo de hélice = 36° .

A classe de metal duro da ferramenta foi a K 10, que indicada para usinagem de Al-Si com teores de silício iguais a da liga usinada, tanto em operações de desbaste quanto de acabamento (Stemmer, 2005). A afiação da ponta da broca escolhida foi a do tipo cruzada. Este tipo de afiação é aplicada tanto em furação geral como profunda (Stemmer, 2005).

O processo foi realizado em um centro de usinagem CNC Robodrill modelo α T21iEL, com rotação máxima de 8000 rpm, potência instalada de 15,9 kVA e quatro eixos. O equipamento possui um tanque do sistema de lubrificação com 200 litros de capacidade. O fluido utilizado foi o semissintético Dairol SCF-380 produzido pela Daido Química do Brasil LTDA, diluído em água em concentrações que variam de 6 a 12% e com pH entre 8,8 e 9,8 com vazão de 1230 l/h. A máquina possui um comando Fanuc 31i – Model A5 e o eixo-árvore (*spindle*) possui potência de 3,7 kW. A fixação da peça no dispositivo foi feita por meio de grampeamento hidráulico.

Valores de CP menores que 1,00 são inaceitáveis, e foi considerado que o processo é centrado não necessitando por isso, a avaliação do índice CPk, pois nesta condição CP=CPk. O centro controlado foi o do círculo distante 3 mm do início do processo nas duas direções, quais sejam: x e z, para obtenção da localização do processo.

Os parâmetros de corte utilizados são provenientes de catálogo e validados pelo próprio fabricante das ferramentas. Seus valores são: $f = 0,20$ mm/rot; $V_{cinicial}$ (3mm prof) = 80 m/min; $V_c = 110$ m/min; $S = 7000$ rpm. O escopo do trabalho foi a comparação do comportamento de ferramentas com geometrias diferentes. Desta forma estes valores foram mantidos constantes.

Os testes de longa duração não excederam a usinagem de 7000 peças para não comprometer o cronograma de troca periódica de ferramentas e de paradas programadas da produção, conforme procedimento interno da empresa onde este estudo foi realizado.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Todos os ensaios da primeira fase de testes (testes de curta duração) foram seguidos das suas respectivas réplicas e executados sempre no mesmo turno pelo mesmo operador, a fim de minimizar a possibilidade de variações aleatórias do processo e, desta forma, tornar o sistema estável.

Para evidenciar o estado do controle estatístico e a variabilidade do processo, foram elaboradas cartas de controle das médias e das amplitudes das distâncias de centro especificadas (ver Figura 1). Estas cartas foram elaboradas para as direções x e z, com a utilização da ferramenta com a geometria $118^\circ \times 12^\circ$ ($\gamma \times \alpha$), pois esta é a original do processo.

Para elaboração de cartas de controle de médias e amplitudes recomenda-se utilizar de 20 a 25 amostras. Tipicamente o tamanho de cada amostra n varia entre 4 e 6 (Montgomery; Runger, 2003).

Foram obtidas 25 médias de amostras de quatro peças, obtidas aleatoriamente dentro de intervalos regulares de 100 peças, para a elaboração das cartas de controle preliminares. Estas cartas preliminares são elaboradas para estabelecer os limites superiores e inferiores de controle. De posse desses limites, foram elaboradas novas cartas para verificação do controle estatístico do processo utilizando os mesmos padrões das cartas preliminares. As cartas para verificação da estabilidade do processo estão mostradas nas Figuras 3 e 4.

Western Electric Handbook 1956 *apud* Montgomery (2003) sugere um conjunto de regras para detecção de padrões anormais em cartas de controle de médias. Não foi detectado nenhum padrão anormal e todos os valores ficaram entre os limites de controle superior e inferior, tanto do gráfico das médias quanto das amplitudes. Desta forma, o processo foi considerado sob controle estatístico e pôde ser realizada a análise de capacidade com confiabilidade.

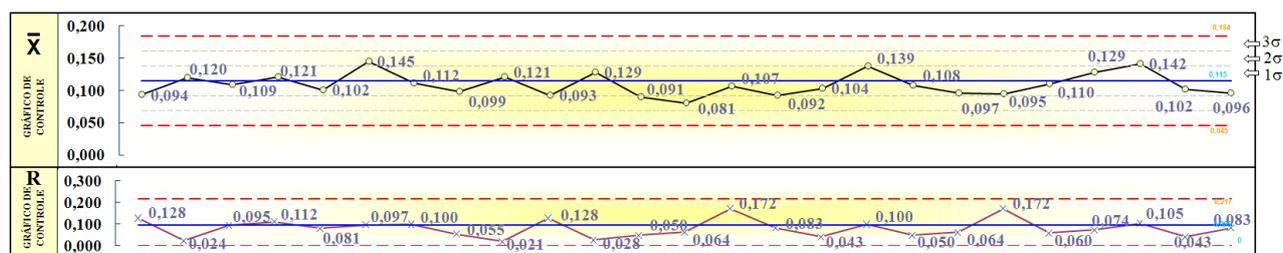


Figura 3 – Gráfico de controle das médias e das amplitudes da amostra piloto na direção x.

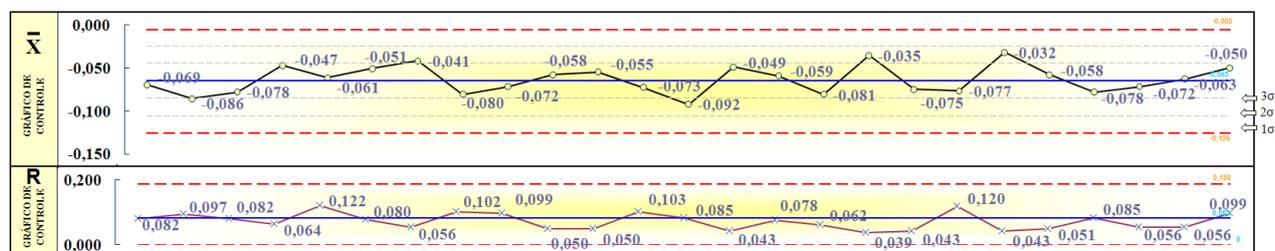


Figura 4 – Gráfico de controle das médias e das amplitudes da amostra piloto na direção z.

A norma ISO 3685 (1993), apesar de ser para ferramentas monocortantes, em alguns casos pode ser adaptada para testes de furação. Esta norma estabelece que para obter testes representativos, o comprimento usinado deverá variar de 1 a 10 m. Sendo a profundidade do processo igual a 42 mm, as ferramentas e as peças foram analisadas, para o estudo de capacidade, em intervalos regulares de 230 peças (aproximadamente 10 m).

O tamanho das amostras para o cálculo do índice CP de cada ferramenta foi de 30 medições sucessivas retiradas após a usinagem de 230 peças. Pela teoria da amostragem pode-se, conhecendo a média da amostra \bar{x} , estimar a média da população μ . O erro $E = |\bar{x} - \mu|$ deve ser menor ou igual a $z_{\alpha/2}\sigma/\sqrt{n}$ desta forma pode-se considerar o tamanho da amostra igual a (Montgomery; Runger, 2003):

$$n = \left(\frac{z_{\alpha/2}\sigma}{E} \right)^2 \quad (6)$$

Considerou-se a diferença entre as médias da amostra e da população a metade do desvio padrão da distribuição teórica (considerada normal) contida entre os limites superior e inferior de controle, desta forma $E=0,025$. Para um intervalo de confiança de 95% $z_{0,025} = 1,96$ e sendo $\sigma=0,05$ ($\frac{LSE-LIE}{6\sigma} = \frac{0,300}{6\sigma}$), tem-se que o tamanho da amostra poderia ser igual a 16, desta forma, sendo 30 o tamanho anteriormente escolhido, pode-se utilizar os resultados do teste com segurança.

Os dados devem ter distribuição normal para poderem ser realizados os cálculos de análise de capacidade (Motorcu; Güllü, 2006). O modo de distribuição pôde ser considerado normal após um teste de adequação Qui-quadrado realizado com os valores das distâncias de centro nas direções x e z.

Para garantir a qualidade dos dados coletados, da análise e a isenção de participação da máquina nos valores dos índices de capacidade, foi solicitado ao fornecedor da máquina um relatório de seguridade de qualidade e repetibilidade. Este relatório assegura excelente repetibilidade de posicionamento da máquina e, desta forma, os índices de capacidade correspondem apenas ao processo.

De posse destes resultados que confirmam a estabilidade do processo, foram calculados os índices CP com as 30 medições (tamanho da amostra estabelecida) realizadas para cada geometria testada, tanto para o primeiro teste quanto para sua respectiva réplica, totalizando 720 medições de distância de centro para realização do estudo. Também foram elaborados gráficos de dispersão para visualização do comportamento de cada geometria utilizando estes valores.

Na segunda etapa da experimentação, acompanhou-se o desgaste da ferramenta original do processo e o desgaste da ferramenta que obteve melhor desempenho na primeira etapa da pesquisa.

A ferramenta com a geometria $118^\circ \times 12^\circ$ foi analisada após a usinagem de 500, 2000, 3500 e 7000 peças. Foi verificado que até 3500 peças não houve desgaste significativo, e por este motivo a próxima análise ocorreu depois da usinagem de 7000 peças.

Para o teste de longa duração da outra geometria ($118^\circ \times 15^\circ$) foi levado em consideração o comportamento do primeiro teste. Desta forma a avaliação do desgaste desta ferramenta foi realizada após a usinagem de 3500 e 7000 peças.

Foi empregado como critério para determinar o final da vida e avaliar o desempenho da ferramenta o desgaste de frontal ($V_b = 0,3\text{mm}$). As medições foram realizadas com resolução de 30 e 40x em um microscópio ótico Olympus GX51, com resolução máxima de 1000x.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para as condições de corte estabelecidas, obtiveram-se os resultados dos índices CP com as distâncias de centro obtidas nos ensaios de todas as ferramentas utilizadas no experimento nas direções x e z. , estes índices estão mostrados na Tabela 2. Para que a análise dos resultados obtidos fosse confiável, foi realizada uma análise de significância, apresentada na Tabela 3.

Verifica-se que alguns valores de CP ficaram abaixo do permitido (valor mínimo é igual a um). Sendo os valores-P para o ângulo de incidência e para a interação dos fatores menores que 0,05, para uma confiabilidade de 95% e 5% de nível de significância ($\alpha=0,05$), conclui-se que há significância estatística devido ao ângulo de incidência e a interação dos ângulos de ponta e de incidência.

O fator que apresentou maior relevância na repetibilidade do processo foi o ângulo de incidência, provavelmente devido ao alívio promovido ao processo pela diminuição da fricção entre o flanco principal e a peça. Na Figura 5 pode-se verificar a média do CP para todas as geometrias testadas. Pode-se ver que a ferramenta original do processo ($118^\circ \times 12^\circ$) obteve o segundo pior desempenho, com resultado muito próximo ao valor mínimo aceitável. A melhor ferramenta foi a broca com ângulo de ponta de 118° e ângulo de incidência de 15° , pois esta produziu com maior estabilidade e, desta forma, obteve o maior valores do CP médio.

Tabela 2 – Índices CP obtidos nas direções x e z.

Em x e z		Ângulo de ponta γ					
		110°		118°		130°	
Ângulo de incidência α	12°	1,39	1,32	1,15	1,31	1,18	0,87
		1,53	1,36	0,81	0,85	0,65	1,01
	15°	1,05	1,38	1,66	2,37	1,18	1,51
		1,07	1,67	1,23	2,16	1,54	1,83

Tabela 3 – Análise de variância dos índices CP obtidos nas direções x e z.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Ângulo de incidência	1,13535	1	1,13535	12,71745	0,002207	4,413873
Ângulo de ponta	0,196908	2	0,098454	1,102819	0,353345	3,554557
Interações	0,939325	2	0,469663	5,260851	0,015881	3,554557
Total	3,878533	23				

Estas duas ferramentas foram testadas nos ensaios de longa duração para verificação e comparação das vidas das duas geometrias.

Na Tabela 4 podem-se ver as representações gráficas do comportamento para os índices CP obtidos da Tabela 2. Ao lado das curvas pode-se observar também a probabilidade de valores de distância de centro ficarem fora dos limites de especificação. Verifica-se que várias geometrias apresentam probabilidade estatística de produção de peças não conformes, isto é, de atingirem valores de distância de centro fora dos limites superiores e inferiores de especificação. Entre estas geometrias merece destaque a ferramenta com $118^\circ \times 12^\circ$, pois esta é a original do processo.

Várias geometrias conseguiram elevados valores de CP, mas destacou-se a geometria $118^\circ \times 15^\circ$, que tem as curvas de distribuição mais distantes dos limites de controles.

No teste de longa duração, a ferramenta com ângulo de ponta igual a 118° e de incidência igual a 12° apresentou desgaste significativo apenas na superfície de incidência, caracterizando desta forma um desgaste de flanco proveniente de abrasão. O desgaste de flanco desta ferramenta pode ser visto na Figura 6.

Nas duas fotos da Figura 6 o desgaste de flanco foi de 0,16 mm, este valor está bem abaixo do valor de referência que, conforme ISO 3685 é $V_{BB} = 0,3$ mm.

A Figura 7 mostra o desgaste da ferramenta com ângulo de ponta igual a 118° e de incidência igual a 15° . No flanco A o V_{Bmax} foi igual a 0,27mm. Já no flanco B esse valor foi igual a 0,37mm, bem superior ao valor do desgaste apresentado pela outra ferramenta após a usinagem de 7000 peças. Pode-se verificar, devido às irregularidades bastante evidentes, que ao contrário do desgaste frontal que retirou partículas muito pequenas durante toda extensão do teste com a geometria $118^\circ \times 12^\circ$, ocorreu com a geometria $118^\circ \times 15^\circ$ à quebra de pedaços do gume, produzindo desta forma superfícies ásperas e irregulares. Este tipo de falha, conhecido como lascamento, ocorre devido à sobrecargas de origem mecânica ou térmica (Stemmer, 2005). Em particular este lascamento ocorreu devido ao enfraquecimento da resistência da aresta cortante em consequência da diminuição do ângulo de cunha.

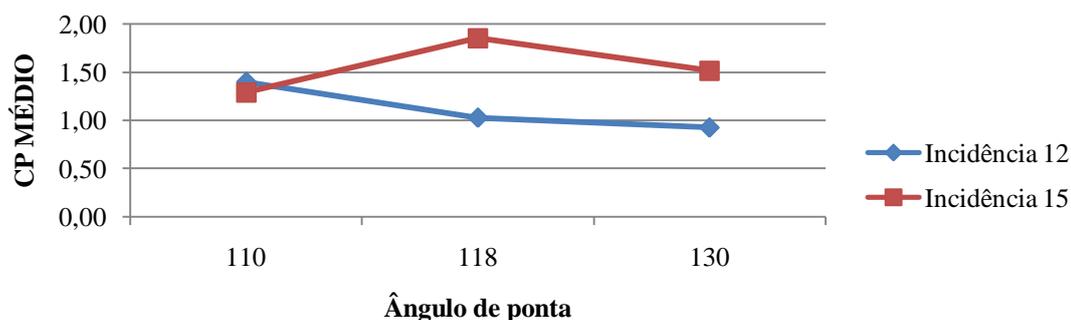


Figura 5 – Gráfico do CP médio obtido por cada geometria.

Na figura 8 observam-se os valores médios do índice de capacidade comparados com o valor mínimo admissível em três instantes. Verifica-se que os comportamentos das duas geometrias não são tão distintos. A ferramenta atualmente utilizada no processo (118° x 12°) manteve-se, apesar do valor próximo ao mínimo admissível, com sua dispersão praticamente imutável, mas piorado com o aumento do desgaste da ferramenta.

Por outro lado, a ferramenta que conseguiu o melhor resultado na primeira etapa dos testes, apresentou bastante sensibilidade ao desgaste, pois ocorreu aumento da dispersão até valores muito abaixo do admissível.

Tabela 4 – Resultados dos testes de cada geometria.

GEOMETRIA	TESTE	DISPERSÃO EM X	CP X	REJEIÇÃO X	DISPERSÃO EM Z	CP Z	REJEIÇÃO Z
110x12	1		1,39	0,0%		1,32	0,0%
110x12	2		1,53	0,0%		1,36	0,0%
110x15	1		1,05	0,2%		1,38	0,0%
110x15	2		1,07	0,1%		1,67	0,0%
118x12	1		1,15	0,1%		1,31	0,0%
118x12	2		0,81	1,5%		0,85	1,1%
118x15	1		1,66	0,0%		2,37	0,0%
118x15	2		1,23	0,0%		2,16	0,0%
130x12	1		0,87	0,9%		1,18	0,0%
130x12	2		1,01	0,3%		0,65	5,0%
130x15	1		1,51	0,0%		1,18	0,0%
130x15	2		1,83	0,0%		1,54	0,0%

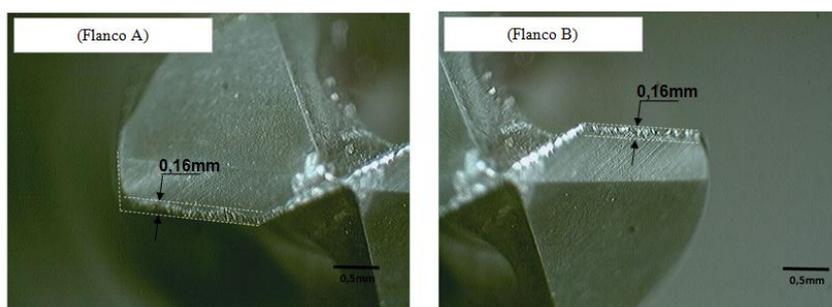


Figura 6 – Desgaste de flanco após 7000 peças com ângulo de ponta de 118° e de incidência de 12° com 30x.

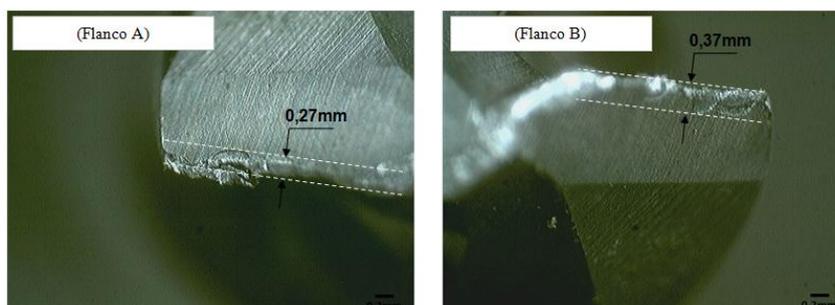


Figura 7 – Desgaste de flanco após 7000 peças com ângulo de ponta de 118° e de incidência de 15° com 40x.

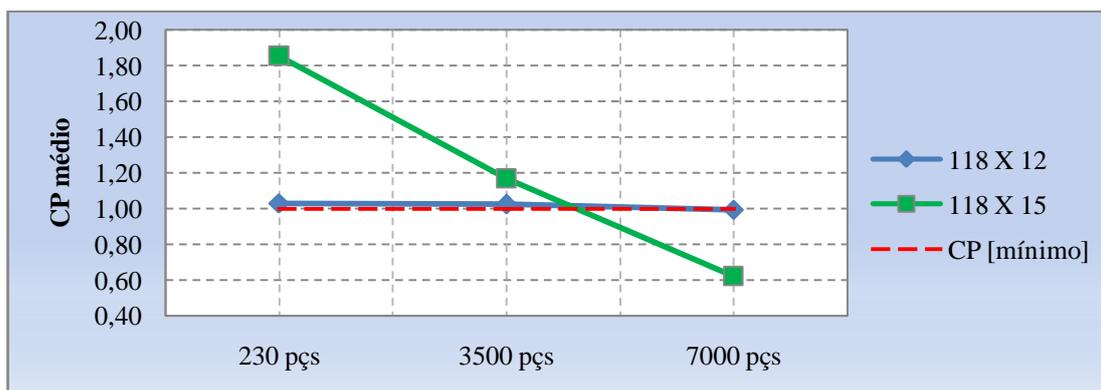


Figura 8 – Valores de CP em 230, 3500 e 7000 peças.

6. CONCLUSÕES

Metodologias estatísticas de controle de qualidade podem ser utilizadas com sucesso para avaliar e acompanhar a conformidade de processos em linhas de produção.

Nos testes de curta duração realizados para verificar a variabilidade média de cada geometria, verificou-se que houve influência na dispersão das localizações dos furos devido ao ângulo de incidência e a interação deste com o ângulo de ponta.

Os resultados dos testes apontaram que a ferramenta com ângulo de ponta de 118° e de incidência de 15°, é a ferramenta com a melhor repetibilidade entre as testadas, pois obteve o maior valor do índice de capacidade CP. Por sua vez, a ferramenta original do processo, que tem ângulo de ponta de 118° e de incidência de 12°, obteve o segundo pior resultado dos testes.

A broca com ângulo de ponta de 118° e de incidência de 15° apresentou excelentes resultados até a usinagem de 3500 peças, conseguindo produzir essa quantidade de peças sem probabilidade de produção de peças defeituosas.

A ferramenta com ângulo de ponta de 118° e de incidência de 12° apresentou bastante uniformidade nos resultados dos índices de capacidade CP em todos os intervalos verificados. Apesar disto, os valores de CP encontrados foram próximos do menor valor admissível e desta forma, desde o início dos testes, esta geometria tende a produzir um número elevado de peças não conformes.

Verificou-se que o aumento do desgaste de flanco é diretamente proporcional a variabilidade do processo e consequentemente inversamente proporcional ao índice de capacidade. Devido às constantes alterações das geometrias das ferramentas de corte testadas, em decorrência de processos abrasivos e de adesão, o índice de capacidade de cada geometria torna-se dinâmico.

O ângulo de incidência igual a 15° diminuiu o ângulo de cunha e consequentemente a resistência da aresta de corte, que, devido à sobrecarga mecânica, acabou sofrendo lascamento.

7. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), a Superintendência da Zona Franca de Manaus (SUFRAMA) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

8. REFERÊNCIAS

Albing, Malin. Contributions to Process Capability Indices and Plots. Tese de doutorado. Department of Mathematics, Luleå University of Technology, Sweden. 2008.

- Bulba, Edivaldo Antônio. Conformidade na manufatura e nível de qualidade. Dissertação de mestrado em engenharia de produção. Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- Castillo, William Jefferson González. Furação de ferro fundido cinzento GC 25 com brocas de metal-duro com canais retos. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. UFSC, Florianópolis, 2005.
- Deleryd, Mats. A pragmatic view on process capability studies. Int. J. Production Economics. v. 58, p. 319–330, 1999.
- Devore, Jay L. Probabilidade e estatística para engenharia e ciências. 6 ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.
- Groover, Mikell P. Fundamentals of manufacturing: materials, processes and systems. 3rd ed. USA: John Wiley & Sons Inc, 2007.
- International organization for standardization. Tool-life testing with single-point turning tools: ISO 3685. 2 ed. Genève, Switzerland, 1993.
- Matos, Jorge da Luz. Implantação de um projeto de melhorias em um processo de reação química em batelada utilizando o método DMAIC. Dissertação de mestrado em engenharia de produção. UFRGS, Porto Alegre, 2003.
- Montgomery, Douglas C. Design and analysis of experiments. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- Montgomery, Douglas C; Runger George C. Applied Statistics and Probability for Engineers. 3th ed. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- Motorcu, Ali Riza; Güllü, Abdulkadir. Statistical process control in machining, a case study for machine tool capability and process capability. Materials and Design. v. 27, p. 364–372, 2006.
- Shiau, Yau-Ren; Lin, Meng-Hung; Chung, I-Ping; Pan, Yen-Ling. Monitoring capability study and genetic economic design of x-bar control chart. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. v. 30, p. 273–278, 2006.
- Stemmer, Caspar Rich. Ferramentas de corte I. 6 ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2005.
- Weingaertner, Walter Lindolfo; Schroeter, Rolf Bertrand. Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas. 2º ed. São Paulo: Editora Alcan Alumínio do Brasil 1991.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

INFLUENCE OF TWIST DRILL GEOMETRIC FEATURES FOR DEEP HOLE DRILLING OF AN ALUMINUM ALLOY: A PROCESS CAPABILITY ANALYSIS APPROACH

Allan Coutinho Pereira¹, allan.coutinho@bol.com.br
Fabrício J. Nóbrega Cavalcante¹, fabricao.nobrega@bol.com.br
Paulo André de Camargo Beltrão, Ph.D.¹, beltrao@utfpr.edu.br

¹Federal University of Technology – Paraná, Avenida Sete de Setembro, 3165. Rebouças. Curitiba. Paraná.

Resumo: *Drilling is one of the most important manufacturing processes. However, despite its importance, previous and current studies highlight the lack of knowledge of this process, mainly for industrial applications when machining certain materials. Among these materials, which require further studies, there are the aluminum alloys that nowadays are widely used in engineering due to its physical and chemical characteristics. In this work it is intended to study the influence of geometric features of a helical drill in a deep drilling of an AlSiCu alloy in a production line. Twist drills are the most versatile and known tools in machining. They are usually utilized for drilling short holes due to problems of rigidity, cooling and chip removal. Particularly the tool examined in this work were an uncoated hard metal twist drill without internal cooling channel. The main problem of this process under study was the repeatability of the hole center location. The goal of this work was to evaluate the function of the point and clearance angles in the center location process. In the first stage of research, statistical techniques were utilized in the design and analysis of the control factors. In the second stage, long-term tests were accomplished in order to verify the likely responses. For the analysis stability and conformity were controlled the repeatability of the tool distance from the center of the hole, additionally, it was observed the tool wear. It was verified that there is influence of the geometry of the drill point in the repeatability process and the most relevance factor on this is the clearance angle. The adhesion on the tool tip was present in all tool life and abrasive wear mechanism was predominant.*

Keywords: *Capability, Geometry of drills, Deep hole drilling, Tool life.*