

INVESTIGAÇÃO DE DESVIOS GEOMÉTRICOS NO ALARGAMENTO DO FERRO FUNDIDO CINZENTO

Déborah Oliveira Almeida

deborah@mecanica.ufu.br

Álison Rocha Machado

alissonm@mecanica.ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2.121, Uberlândia, MG, 38.408-100, Brasil.

Resumo: Durante a produção de um bloco de motor a execução de furos é a operação de usinagem mais comum, e exige operações posteriores a fim de melhorar a qualidade superficial, a precisão de forma e dimensional. Isso é conseguido empregando-se, entre outras, a operação de alargamento. Este trabalho visa utilizar um Planejamento de Experimentos Estatístico para investigar a influência da variação na geometria do alargador (guia cilíndrico), dos parâmetros de corte (sobremetal, velocidade de corte e avanço), e de vários revestimentos da ferramenta (Alcrona, Hélica e TiAlN) na operação de alargamento cilíndrico de ferro fundido cinzento sobre os desvios geométricos (rugosidade da superfície, cilindricidade, circularidade) de furos produzidos em um corpo de prova. Pretende-se com isso identificar as variáveis de corte mais significativas nesta operação e conseqüentemente oferecer diretrizes (modelos estatísticos) para o alargamento de ferros fundidos cinzento.

Palavras-chave: alargamento, desvios geométricos, metal duro revestido, planejamento experimental.

1. INTRODUÇÃO

A produção de um bloco de motor é uma seqüência de várias operações de usinagem até chegar totalmente pronto ao final do processo. Dentre essas operações a execução de furos é a mais comum, e exige operações posteriores a fim de melhorar a qualidade superficial, a precisão de forma e dimensional. Isso é conseguido empregando-se, entre outras, a operação de alargamento.

O alargamento é um processo de usinagem onde uma ferramenta rotativa com geometria especial, faz um leve corte nos furos cilíndricos ou cônicos, a fim de reduzir a rugosidade superficial e melhorar acabamento dos mesmos [Metals Handbook, 1989]. Essa operação também pode ser definida, segundo a norma DIN 8589, como um tipo de furação que utiliza uma ferramenta de alargar (alargadores) para produzir pequenas espessuras de cavacos e criar superfícies com alta qualidade dimensional e de forma [Da Silva, 2001].

Com a necessidade cada vez maior de se diminuir os custos de produção evitando prejuízos com refugos e retrabalhos na produção de furos, tem-se exigido muito das operações de usinagem, principalmente do alargamento, no sentido de otimização do processo produtivo.

Este trabalho visa utilizar um planejamento estatístico de experimentos para investigar a influência da variação na geometria do alargador (guia cilíndrico), dos parâmetros de corte (sobremetal, velocidade de corte e avanço), e de vários revestimentos da ferramenta (Alcrona, Hélica e TiAlN) na operação de alargamento cilíndrico de ferro fundido cinzento sobre os desvios micro-geométricos (rugosidade da superfície) e desvios macro-geométricos (cilindricidade, circularidade) de furos produzidos em ferro fundido cinzento. Pretende-se com isso identificar as variáveis de corte mais significativas nesta operação e conseqüentemente oferecer diretrizes (modelos estatísticos) para o alargamento de ferros fundidos cinzento.

Dentro deste contexto, sabe-se que existem na literatura poucos trabalhos técnico-científicos sobre alargamento, embora várias recomendações práticas sejam oferecidas pelos fabricantes de ferramentas, as quais são às vezes conflitantes entre os concorrentes ou se confrontadas com resultados de testes práticos [Da Silva, 2001]. Além disso os trabalhos encontrados na literatura, incluindo catálogos de fabricantes e artigos científicos, ainda não respondem a todas as dúvidas e problemas encontrados durante a operação de alargamento que na maioria das vezes implicam em prejuízos ou redução de lucro para empresas.

Dentre os componentes mecânicos que sofrem operações de alargamento, se destacam os blocos de motores de combustão, que normalmente são feitos de ferro fundido cinzento, embora hoje exista no mercado a utilização de ferros fundidos vermiculares e até mesmo os blocos de motores feitos de ligas de alumínio. Este trabalho será desenvolvido utilizando o ferro fundido cinzento.

A produção de ferros fundidos cresceu muito nos últimos anos, e representa boa parte do mercado dos materiais utilizados na indústria metal-mecânica e, por isso, a busca contínua pelas melhorias de propriedades tem levado várias indústrias siderúrgicas e centros de pesquisas ao aprimoramento dos materiais a fim de se manterem competitivas no mercado. Um maior controle nos teores de elementos tais como o silício, magnésio, cromo, molibdênio e cobre, e também a aplicação de tratamentos térmicos adequados tem contribuído muito para a melhoria das propriedades mecânicas destes materiais como, por exemplo, a rigidez e a ductilidade, tornando viável o emprego do ferro fundido em certas aplicações que eram até então exclusivas dos aços médio teor de carbono. Alguns resultados obtidos abrangem as classes de ferros fundidos com dureza na faixa de 150 e 300 HB (aproximadamente 176 e 318 HV). Entretanto, os teores destes elementos influenciam a usinabilidade dos ferros fundidos [Da Silva, 2005].

2. O PROCESSO DE ALARGAMENTO

A operação de alargamento pode ser realizada no mesmo tipo de máquinas-ferramenta usadas para a operação de furação. Empregando-se condições apropriadas e parâmetros de corte adequados é possível atingir tolerâncias apertadas e boa qualidade superficial [Schroeter, 1989].

A quantidade mínima de metal a ser removido é influenciada pela composição e dureza da peça de trabalho. Por ser uma operação de usinagem, a formação do cavaco é um fator importante para a eficiência da operação. Se for pouco material a ser removido, a ferramenta irá apenas atritar a peça, ao invés de cortá-la, o que resulta em danos tanto para o alargador como para a superfície usinada. Para “metais moles”, a remoção de 0,20 mm do diâmetro por passe é próximo do mínimo, dependendo do comprimento do furo e da rigidez da máquina. Se a ferramenta for de metal duro essa diferença pode ser reduzida para 0,13mm. Para remoção menor do que 0,13mm de metal, o brunimento ou outro processo de usinagem é preferível [Metals Handbook, 1989].

A ocorrência de vibrações durante o alargamento é prejudicial sobre a vida da ferramenta e sobre o acabamento do furo. Elas podem ser conseqüências de vários fatores, como o avanço excessivo ou insuficiente, a rigidez insuficiente da máquina ou da fixação da ferramenta e/ou da peça, o comprimento excessivo do alargador ou uma folga no cabeçote. [Bezerra, 1998].

A dureza dos aços ao carbono e aços de baixa liga tem um efeito maior que a composição desses materiais sobre a facilidade de serem alargados, de acordo com o Metals Handbook (1989). Metais moles como alumínio ou latão podem ser alargados a velocidades cinco a dez vezes maiores que as velocidades usadas para aços recozidos.

O resultado da operação de alargamento vai depender de vários fatores, entre eles a aplicação manual ou mecânica do alargador, o tipo, a profundidade e a qualidade do furo após a operação de furação, tipo e rigidez da máquina-ferramenta, fixações da ferramenta e da peça, propriedades do material do alargador, propriedades do material da peça, condições de usinagem (velocidade, avanço, profundidade de corte), efeitos térmicos, etc.

2.1. Geometria dos Alargadores

Os alargadores são ferramentas multicortantes que servem para alargar os furos. Possuem duas ou mais arestas cortantes, que podem ser retas (paralelas ao eixo da ferramenta) ou helicoidais. Estas arestas estão dispostas em um único conjunto e encontram-se em contato com a peça simultaneamente, e a usinagem é subdividida em duas operações básicas: corte pelas arestas principais e alisamento pelas arestas laterais, sendo que estas últimas influenciam mais fortemente no resultado final da operação de alargamento [Bezerra, 1998].

As características geométricas dos alargadores tais como o tipo de haste, canal, sentido da hélice de um alargador, ângulos de saída e de folga, do guia cilíndrico e do número de lâminas interferem na qualidade do furo alargado, principalmente nos valores dos desvios geométricos (cilindricidade e circularidade) [Da Silva, 2001].

De acordo com o Metals Handbook (1989) os alargadores geralmente possuem uma haste de aço-rápido ou de um aço-ferramenta de baixa liga e arestas de corte de metal duro. Como a carga imposta sobre a ferramenta durante o alargamento é menor que a carga na furação, os alargadores requerem uma menor tenacidade que as brocas; ao contrário, os alargadores devem possuir uma dureza máxima para que o acabamento superficial e a vida da ferramenta sejam ótimos.

Os alargadores podem ser classificados de várias formas, sendo uma delas quanto ao tipo de canais (dentes), que podem ser retos ou helicoidais, de acordo com a figura 1 abaixo. Os alargadores com canais helicoidais podem ter hélice à esquerda ou à direita. Algumas aplicações destes tipos de alargadores são:

- Alargadores com canais retos: são usados para usinagem de furos passantes;
- Alargadores com hélice à esquerda: mais usados na usinagem de furos passantes com corte interrompido, como rasgos de chaveta ou canais de lubrificação, por exemplo.
- Alargadores com hélice à direita: usados na usinagem de furos cegos, onde se deseja “tirar o cavaco para fora” do furo. Este tipo de alargador facilita o corte e exige uma força menor que a ferramenta com hélice à esquerda [Da Silva, 2001].

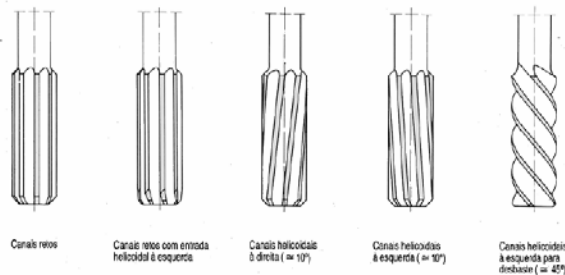


Figura 1: Tipos de canais dos alargadores [SKF, 1987]

Quanto à fixação, podem possuir haste cônica ou cilíndrica. Quanto ao uso, podem ser manuais ou mecânicos (usados em máquinas). Quanto à geometria do furo, podem ser cônicos ou cilíndricos. [Bezerra, 1998]. Quanto à regulação podem ser fixos ou ajustáveis, cujo diâmetro pode ser variado através de uma regulação radial dos dentes. Segundo o fabricante SKF [apud Bezerra, 1998], a terminologia usada para os alargadores é detalhada conforme mostra a figura 2.

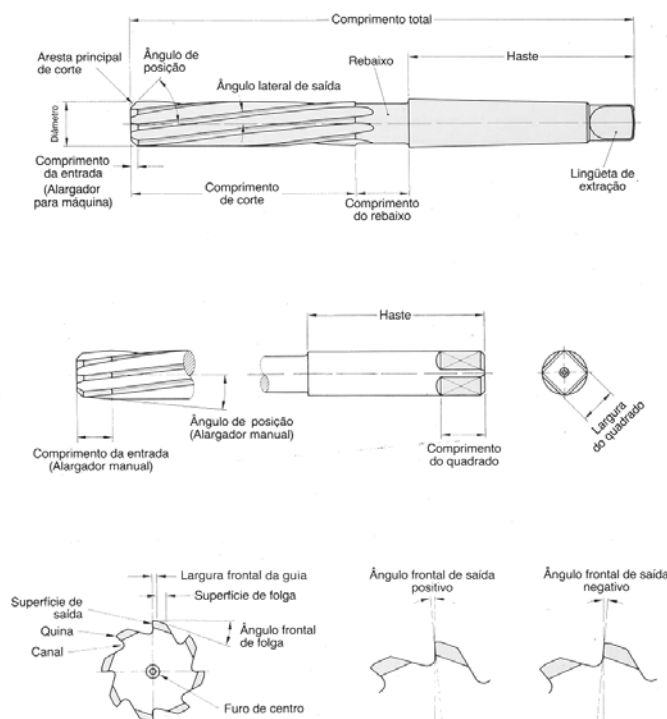


Figura 2: Terminologia dos alargadores segundo SKF [apud Bezerra, 1998]

De um modo geral, preferem-se ângulos de saída (γ_0) e de folga (α_0) mais elevados, mas isso só pode ser encontrado nos alargadores de aço rápido. Os alargadores de metal duro, cerâmica e outros materiais mais duros possuem pequenos ângulos a fim de garantir maior resistência das arestas de corte, evitando, desta forma a ocorrência de fratura. Segundo Machado e da Silva (2004), para a maioria das ferramentas o ângulo mais influente é o de saída. Uma redução deste ângulo tende a aumentar a área de contato cavaco-ferramenta e impor uma maior restrição ao escorregamento do cavaco sobre a superfície de saída, aumentando a força de usinagem. Recomenda-se utilizar $\gamma_0 = 3^\circ$ na operação de alargamento do ferro fundido nodular, e $\gamma_0 = 5^\circ$ no alargamento do ferro fundido maleável e aços com médio teor de carbono [Pollack, 1988]. Segundo Metals Handbook (1989), $\gamma_0 = 3^\circ$ produz valores de rugosidade (R_a) entre 1,0 e 1,2 μm usinando furos de 13 mm em aço baixa liga com alargadores de aço rápido. Quanto ao ângulo de folga, recomenda-se utilizar $\alpha_0 = 15^\circ$ para alargadores com diâmetros menores que 7 mm, e $\alpha_0 = 7^\circ$ para alargadores com diâmetro superior a este [Metals Handbook, 1989].

O guia cilíndrico tem como função alisar a parede do furo, evitando engripamento da aresta lateral de corte e guiar o alargador durante a operação. Uma perfeita condição do guia minimiza os desvios geométricos de circularidade e cilindridade, ajudando a garantir um bom acabamento. Segundo Gabor (1982), ao se aumentar a largura do guia até certo valor e diminuir o ângulo de folga, dependendo do material a ser usinado, menores desvios de circularidade poderão ser obtidos. O Metals Handbook (1989) recomenda a utilização de guias cilíndricos mais estreitos, a fim de minimizar o atrito entre peça e ferramenta. Para tanto, sabe-se que quanto melhor a qualidade de reafiação do guia, melhor será o acabamento da superfície. Ao utilizar alargador de aço rápido com largura de guia, $bf = 0,23$ mm na usinagem do ferro fundido cinzento, obteve-se valor de R_a em torno de 1 μm . Bezerra (1998), utilizando alargadores de metal duro, verificou que o menor valor de guia ($bf = 0,2$ mm) produziu os menores valores de R_a no alargamento de uma liga de alumínio-silício.

O número de lâminas ou de arestas, que geralmente varia de 4 a 20, depende do diâmetro e do tipo de alargador. Quanto mais lâminas possuir um alargador, melhor será acabamento da superfície e menores desvios geométricos ele produzirá. Porém, se um alargador tem várias lâminas ele não possuirá espaço suficiente para a saída do cavaco. Por outro lado, se um alargador possui poucas lâminas, poderá induzir vibrações, principalmente se for um alargador de canal reto. Para se minimizar alguns erros no processo irregular de corte das lâminas, geralmente fabricam-se alargadores multicortantes com distribuição não uniforme das lâminas para reduzir vibrações auto-excitadas. Uma distribuição uniforme das lâminas faz com que as mesmas cortem sempre no mesmo lugar usinado anteriormente. Portanto, para que os desvios geométricos sejam minimizados e para que sejam atingidas as tolerâncias especificadas, é necessário que as arestas de corte estejam isentas de fissuras e retificadas à mesma altura da aresta de corte. Furos com má qualidade de acabamento são muitas vezes consequência de uma geometria de corte escolhida incorretamente [Da Silva, 2001].

3. QUALIDADE SUPERFICIAL

Sempre que uma operação de usinagem é realizada, o objetivo principal é produzir componentes com o máximo de funcionabilidade e intercambialidade a baixo custo e alta produção. Em outras palavras, isso significa que cada peça ou conjunto de um produto final seja feito de acordo com as especificações definidas quanto às dimensões, forma e acabamento da superfície. Entretanto, esse objetivo não é tão fácil de ser alcançado e vários problemas ocorrem porque muitas variáveis do processo produtivo são ainda desconhecidas ou pouco exploradas. Dentre elas se destacam as características e usinabilidade do material da peça, seleção correta do material da ferramenta e os parâmetros de corte [Da Silva, 2001].

Para resolver os problemas de intercambialidade, principalmente os decorrentes das operações de furação e alargamento, torna-se necessário conhecer as particularidades e os parâmetros que estão relacionados com a qualidade das superfícies usinadas e, também, os conceitos e desenvolvimento dos sistemas de tolerâncias.

Em aplicações mecânicas onde é requerida elevada exatidão, as tolerâncias dimensionais nem sempre são suficientes para garantir os requisitos de funcionabilidade das peças [Rosas, 1983]. As medidas do diâmetro, por exemplo, não são suficientes para assegurar que um furo seja totalmente cilíndrico. Na maioria dos casos, as peças são compostas por elementos geométricos, ligados entre si por superfícies de formatos simples, tais como, superfícies planas, cilíndricas ou cônicas, as quais têm formas definidas e são posicionadas entre si. Durante a fabricação, a forma e o posicionamento relativo desses elementos geométricos são desviados da situação ideal. Se estes desvios puderem comprometer a funcionabilidade da peça, tolerâncias deverão ser aplicadas aos mesmos. As tolerâncias desses desvios (tolerância de forma, de orientação, de posição e de batimento) constituem as chamadas “tolerâncias geométricas”.

Os desvios de forma são definidos como o grau de variação das superfícies reais com relação aos sólidos geométricos que os definem, e podem ser classificados em:

- Desvios macrogeométricos: retilineidade, circularidade, cilíndricidade, planicidade, etc, conforme mostra a figura 3;
- Desvio microgeométrico: rugosidade da superfície.

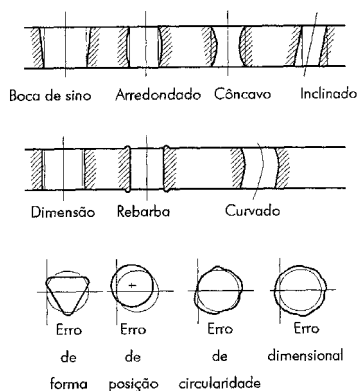


Figura 3: Desvios geométricos e dimensionais na furação [Tool and Manufacturing, 1983]

4. PARÂMETROS DE CORTE

A correta escolha dos parâmetros de corte na operação de alargamento é muito importante para que se consiga alcançar um melhor acabamento e menores desvios dimensionais e geométricos do furo alargado.

Como a maioria dos alargadores são mais facilmente danificados que as brocas devido à sua geometria, recomenda-se utilizar velocidades de corte no alargamento de cerca de 66% das utilizadas na furação [Metals Handbook, 1989]. Soratgar [apud Bezerra, 1998] recomenda que para a operação de alargamento o ideal é se trabalhar com velocidades de corte entre 60 e 70% menores que na furação, e utilizar avanço cerca de 2 a 3 vezes maior. Quanto ao avanço, além das variáveis que também regem a velocidade de corte (dureza da peça e do material da ferramenta), este também é dependente das características dimensionais e quantidade de material a ser removido, e por isso acredita-se que um baixo valor de avanço resulta num bom acabamento da superfície. Geralmente o avanço é um parâmetro mais influente que a velocidade de corte em termos de acabamento. Por exemplo, ao usinar o ferro fundido cinzento com alargadores de metal duro utilizando fluido de corte, Ohgo et al. [1979] verificaram que ao aumentar a velocidade de corte de 8 m/min para 40 m/min a rugosidade da superfície praticamente não foi alterada, mas ao diminuir o avanço de 0,25 mm/rot para 0,065 mm/rot obteve-se um melhor acabamento. Segundo Stemmer [1995], em geral obtém-se um melhor acabamento da superfície com menores taxas de avanço e recomenda-se que, para furos em ferros fundidos com diâmetro até 20 mm sejam utilizadas velocidades de corte (vc) entre 6 m/min e 18 m/min, e avanço (f) entre 0,30 e 0,50 mm/rot. Hurth Infer [1998] recomenda $vc = 19$ m/min para ferramentas de aço rápido e $vc = 27$ m/min para o metal duro (ambas com $f = 0,15$ mm/rot) durante o alargamento de acabamento de ferro fundido nodular.

Shunmugam et al. [1990] ao realizarem seus testes com três velocidades de corte (7,9 - 9,8 e 12,06 m/min) e três valores de avanço (0,30 mm/rot, 0,48 mm/rot e 0,62 mm/rot) verificaram que $vc = 9,8$ m/min e $f = 0,48$ mm/rot produziram os melhores resultados de acabamento da superfície e menores desvios de circularidade, além de boa exatidão do diâmetro. Bezerra [1998] conseguiu valores de Ra abaixo de 3 μm para $vc = 25$ m/min e $f = 0,1$ mm/rot utilizando alargadores de metal duro para a usinagem de uma liga de alumínio-silício. Il'in [1975], ao utilizar metal duro com $vc = 78,4$ m/min e $f = 0,62$ mm/rot (considerados valores elevados) observou que as arestas de corte apresentavam lascamento ou até mesmo fratura súbita. Ao reduzir a velocidade de corte pela metade e mantendo o avanço constante, notou o aparecimento de desgaste mais uniforme na superfície de folga da ferramenta, sem a ocorrência de lascamento. Mari et al. [1993] ao analisarem a influência da velocidade de corte na vida de ferramentas de metal duro em operações de corte contínuo e interrompido verificaram que a vida destas ferramentas decresceu levemente se utilizadas baixas velocidades de corte, em virtude do aparecimento da aresta postiça de corte (APC). Ao utilizarem uma velocidade mais elevada, perceberam que a vida da ferramenta decresceu rapidamente por causa de fatores associados à temperatura de usinagem. Para valores intermediários

de velocidade de corte a vida da ferramenta foi mais longa. Na Tabela 1 Kress [1987] apresenta os parâmetros de corte em função da dureza do ferro fundido cinzento

Tabela 1: Valores de velocidade de corte e avanço recomendados para alargamento do ferro fundido cinzento [Kress, 1987]

Dureza (HB)	Vc (m/min)	f (mm/rot)
≤ 200	10 a 15	0,3 a 0,8
> 200	5 a 7	0,2 a 0,6

Segundo Machado e da Silva [1999], ao se aumentar a velocidade de corte as forças de corte diminuem, produzindo um melhor acabamento da superfície. Para materiais considerados dúcteis, esta melhoria é rápida até certa velocidade crítica, devido à contínua redução das dimensões da aresta postiça de corte (APC). Sabe-se que os ferros fundidos cinzento e maleável produzem cavacos curtos e estão propensos à formação da APC quando usinados sob baixas velocidade de corte, favorecendo o desenvolvimento do desgaste de flanco na ferramenta através do mecanismo da abrasão. Por isso recomenda-se trabalhar com velocidades de corte mais elevadas e empregar fluido refrigerante de forma abundante. O ferro fundido nodular por sua vez, é mais resistente e tenaz que o cinzento e produz cavacos da classe contínua. Desta forma, pode ocorrer o lascamento das arestas de corte da ferramenta quando usinando a baixa velocidade de corte devido também à formação da APC. Para o ferro fundido nodular, recomenda-se utilizar velocidades de corte mais baixas que para o cinzento [de Benedictis, 1997].

Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros de corte utilizados na operação de alargamento de desbaste e de acabamento de furos com 12 mm de diâmetro de vários tipos de ferros fundidos, utilizando ferramentas de aço rápido das classes M1, M2 e M7; e metal duro integral da classe K20 [Metals Handbook, 1989].

Para operações de alargamento onde não se tem prévia experiência sobre qual velocidade de corte e avanço utilizar, o bom senso recomenda que se utilize inicialmente velocidade de corte e avanço moderados, de forma a observar se houve sinais de trepidação da ferramenta ou qualquer outro sinal anormal nas condições de usinagem. Caso não seja observado nenhum problema pode-se aumentar um dos dois (ou ambos) parâmetros até que se note presença de vibração. Chegando-se a este ponto, então ele será o referencial, e recomenda-se manter a velocidade de corte e avanço abaixo dos valores pré-determinados para que se obtenha o melhor acabamento da superfície e vida da ferramenta mais longa.

Tabela 2: Parâmetros de corte para operação de alargamento de desbaste e de acabamento de ferros fundidos com ferramentas de aço rápido e metal duro [Metals Handbook, 1989]

Tipo de ferro fundido	Dureza (HB)	Condição	Material da ferramenta	Desbaste		Acabamento	
				Vc (m/min)	f (mm/rot)	Vc (m/min)	f (mm/rot)
Cinzento ferrítico	120-150	Recozido	M1, M2, M7	37	0,30	20	0,40
			K20	60		27	0,25
Cinzento perlítico	190-220	Estado bruto fusão	M1, M2, M7	27	0,25	12	0,30
			K20	37		20	
Nodular ferrítico	140-190	Recozido	M1, M2, M7	21		14	
			K20	37		18	
Nodular ferrítico / perlítico	190-225	Estado bruto fusão	M1, M2, M7	20	0,20	12	0,25
			K20	34		15	
	225-260	Estado bruto fusão	M1, M2, M7	18		11	
			K20	30		14	
Maleável ferrítico	110-160	Maleabilizado	M1, M2, M7	26	0,30	17	0,40
			K20	43		24	0,30

Maleável perlítico	160- 200	Maleabilizado e com tratamento térmico	M1, M2, M7	24	0,25	14	
			K20	41		21	
	200- 240	Maleabilizado e com tratamento térmico	M1, M2, M7	18	0,20	11	0,25
			K20	30		18	0,20

Em relação ao sobremetal, a quantidade de metal mínima a ser removida para o alargamento é fortemente influenciada pela composição e dureza da peça de trabalho. Como o alargamento é uma operação de corte, a formação do cavaco é um fator importante para a eficiência da operação. Se pouco material está sendo removido, o alargador irá apenas atritar-se na peça ao invés de cortá-la. Isto resultaria em danos para o alargador e para a superfície da peça. Para metais dúcteis, a remoção de 0,20 mm sobre o diâmetro por passe é próximo do mínimo, dependendo do comprimento do furo e da rigidez da ferramenta [Da Silva, 2001]. Para metais mais duros, devido à diferença na formação do cavaco esta quantidade pode ser reduzida para 0,13 mm. Para a remoção de material inferior a 0,13 mm recomenda-se o brunimento como operação mais indicada. Em contraste, para grandes quantidades de remoção de material recomenda-se utilizar um alargador sólido. No alargamento de aços os valores de sobremetal podem variar de 0,25 a 1,00 mm, dependendo da dimensão do alargador e da dureza da peça. Para a operação de alargamento de acabamento da maioria dos metais, Lindberg [1990] recomenda um sobremetal de 0,13 mm para furos com diâmetros inferiores a 12,7 mm, ao passo que para os furos com diâmetros maiores que 12,7 mm o mesmo autor recomenda um sobremetal de 0,38 mm visando com isso manter a tolerância dimensional do furo dentro de $\pm 0,013$ mm.

Zeng [1996], ao analisar a influência de três valores de profundidade de corte (0,1 mm, 0,2 mm e 0,3 mm) sobre a eficiência de fluidos de corte, constatou que $ap = 0,2$ mm foi mais sensível para garantir os menores valores de Ra (em torno de $1 \mu m$). Shunmugam et al. [1990] ao analisarem a influência de três valores de sobremetal (0,25 mm - 0,50 mm e 0,75 mm) sobre o acabamento da superfície e exatidão do furo, verificaram que, em geral, os melhores resultados foram produzidos pelo menor valor.

5. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

É comum aparecerem problemas em que precisamos estudar várias variáveis ao mesmo tempo, e as pesquisas que objetivam fornecer respostas rápidas às dúvidas existentes geralmente demandam muito tempo e muito material de trabalho, tornando seu custo bastante alto. O emprego de planejamentos experimentais baseados em princípios estatísticos ajuda a extrair do sistema em estudo o máximo de informações úteis, fazendo um número mínimo de experimentos, e por esse motivo seu uso vem crescendo e sendo aplicado nas mais variadas atividades científicas e industriais [Barros Neto et al, 2003].

O planejamento fatorial é uma técnica muito utilizada quando se tem duas ou mais variáveis independentes, pois permite uma combinação de todas as variáveis em todos os níveis, obtendo-se assim uma análise de uma variável sujeita a todas as combinações das demais. São muito úteis para medir os efeitos de uma ou mais variáveis na resposta, e o mais comum é utilizar um planejamento com dois níveis (2^n), no máximo três, já que o uso de mais níveis aumentaria muito o número de experimentos a serem realizados [Callado e Montgomery, 2003]. Apesar dessas vantagens, o planejamento fatorial a dois níveis permite apenas uma relação linear entre a resposta e as variáveis independentes, onde cada uma das n variáveis pode assumir apenas dois fatores, chamados nível superior (+) e nível inferior.

6. METODOLOGIA

Será feito um estudo dos principais trabalhos disponíveis nos meios de divulgação científica sobre o tema em questão, utilizando o acervo bibliográfico do LEPU, além da utilização dos serviços da Biblioteca do Campus Santa Mônica da UFU, que consta também de bases de dados, como a Capes disponíveis pela internet.

O material de trabalho será o ferro fundido cinzento GH 190, fornecido pela Teksid, e utilizado para a fabricação de motores de combustão pela Fiat Powertrain. O material da ferramenta (alargador) será de metal duro integral com diâmetro nominal de 12 mm.

Será utilizado um planejamento fatorial completo para avaliar os fatores qualitativos, que são o revestimento da ferramenta (Alcrona, Hélica ou TiAlN) e a aplicação do fluido de corte (MQF) ou não. Este planejamento fornecerá os níveis mais relevantes dos fatores, já que na segunda parte do trabalho esses níveis serão mantidos constantes. Após esses níveis serem definidos, será realizado um novo planejamento fatorial, com 4 fatores, que serão o sobremetal, o guia cilíndrico, a velocidade de corte e o avanço da ferramenta.

A infra-estrutura do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem será utilizada para a realização dos testes experimentais.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU, a Capes pelo apoio financeiro, aos colegas do Laboratório de Pesquisa e Ensino em Usinagem.

8. REFERÊNCIAS

- Bezerra, A.A., 1998, “Influência dos principais parâmetros no processo de alargamento de uma liga de alumínio-silício”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 139 pags.
- Chiaverini, V., 1988, “Aços e ferros fundidos”, 6ª edição ampliada e revisada, ABM.
- Costa, E.S., 2004, “Furação de Aços Microligados com Aplicação de Mínima Quantidade de Fluido de Corte – MQF”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 311 pags.
- Da Silva, R.B., 2001, “Alargamento cônico de Ferro Fundido Nodular”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFMG.
- Gabor, H., 1982, “Como atuam os alargadores”, Revista Máquinas e Metais, MM Editora Ltda, Ano XVIII, n. 205, pp. 16-21.
- Hurth-Infer - Indústria de Máquinas e Ferramentas Ltda, 1998, “Processo de furação e alargamento”, apostila, 1ª edição, Sorocaba, SP.
- Kress, D., 1987, “CNC – Tooling for finish machining high precision bores”, Carbide and Tool Journal, vol. 19, n. 5, pp. 10-13.
- Lindberg, R.A., 1990, “Processes and materials of manufacture – Hole making and related operations”, fourth edition, Editora Prentice Hall International, Englewood Cliffs, pp. 264-301.
- Machado, A.R. e Da Silva, M.B., 2004, “Usinagem dos Metais”, apostila, Universidade Federal de Uberlândia – EDUFU, 224 pags.
- Mari, D. & Gonseth, D.R., 1993, “A new look at carbide tool life”, Wear, vol. 165, n. 1, ISSN 0043-1648, pp. 9-17.
- Metals Handbook, 1989, “Machining”, Ninth Edition, ASM International, vol.16.
- Neto, B.B., Scarminio, I.S. e Bruns, R.E., 1995, “Planejamento e Otimização de Experimentos”, Editora da Unicamp, 2a. Edição, Campinas-SP, 229 pags.
- Ohgo, K.; Satoh, A.; Mizuno, T. & Itoh, T., 1979, “Relation between cutting conditions and precision in the reaming of gray iron castings”, Wear, vol. 52, n. 1, pp. 79-88.
- Rosas, N., 1983, “Tolerâncias geométricas”, Apostila de treinamento de empregados da Embraer, 82 pags.

- Santos, S.C., 1999, “Furação de ferro fundido cinzento com brocas de metal duro integral”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFU.
- Schroeter, R.B, 1989, “Alargamento de precisão em alumínio aeronáutico com ferramentas de gume único regulável”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC.
- Shunmugam, M.S. & Somasundaram, G., 1990, “Investigation into reaming processes using a frequency decomposition technique”, International Journal Prod. Res., vol. 28, n. 11, pp. 2065-2074.
- Stemmer, C.E., 1995, “Ferramentas de Corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos”, 2ª. edição, Editora da UFSC, Florianópolis-SC, pp. 33-43.
- Van Vlack, L.H., 1984, “Princípios de ciência e tecnologia dos materiais”, Editora Campus, 5ª. edição, Rio de Janeiro, RJ.
- Weinert, K.; Adams, F.; Biermann, D. & Thamke, F., 1998, “Alargadores de corte único: corte mais eficiente, além de vantagens econômicas”, Máquinas e Metais, Aranda Editora, Ano XXXIV, n. 384, pp. 38-57.
- Zeng, Z., 1996, “Influence of cutting depth on resolving power of cutting fluid efficiency in reaming test”, ICPG - Inst. Conf. on the Progress of cutting grinding, Osaka, Japão, ISPE, pp. 296-300.

INVESTIGATION OF THE GEOMETRIC DEVIATIONS IN THE REAMING OF GREY CAST IRON

Déborah Oliveira Almeida

deborah@mecanica.ufu.br

Álison Rocha Machado

alissonm@mecanica.ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2.121, Uberlândia, MG, 38.408-100, Brasil.

Abstract: During the manufacturing of the cylinder block of a car, the drilling is the most used machining operation, and it requires other operations in the order to improve the surface finish, as the reaming operation. This work aims using a Statistical Experimental Design to investigate the influence of a variation of the reamer geometry (margin width), the cutting parameters (stock removal, cutting speed and feed rate) and of various coatings (Alcrona, Helica and TiAlN) during the reaming of grey cast iron in the micro-geometric deviations (roughness) and macro-geometric deviations (cylindricity and roundness) of holes produced in the workpiece. The objective of this work is to identify the significant variables in the operation, and, consequently to offer directions to the reaming of grey cast iron.

Keywords: reaming, geometric deviations, coated carbide tools, experimental design.