

ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE A FORMAÇÃO DO CAVACO, VIBRAÇÃO DA FERRAMENTA E DESVIO DE FORMA NO PROCESSO DE TORNEAMENTO

Carlos Eiji Hirata Ventura

carlos.ehv@gmail.com

Amauri Hassui

ahassui@fem.unicamp.br

Resumo. Os ferros fundidos constituem um grupo de ligas de importância fundamental para a indústria, estando suas principais aplicações em motores Diesel, coletores de escapamento e discos de freio. O ferro fundido cinzento, embora possua uma boa usinabilidade, é pouco resistente e frágil, enquanto o vermicular é caracterizado por alta resistência mecânica e boa tenacidade. Assim, verifica-se que o ferro fundido cinzento apresenta um cavaco mais curto e com maior frequência de formação, quando comparado ao vermicular. A periodicidade do processo de formação do cavaco e o auto-excitamento do sistema causam a oscilação dos esforços de corte, o que provoca o deslocamento da ferramenta na direção radial, prejudicando a circularidade da superfície usinada. O presente trabalho avaliou a influência do tipo de cavaco formado na qualidade superficial da peça, o que foi feito a partir da verificação das frequências fundamentais calculadas por meio da análise espectral dos sinais de vibração da ferramenta e das medições de circularidade. A partir dos resultados, observaram-se poucas diferenças entre os materiais estudados, mas foram obtidas informações relevantes quanto à influência dos parâmetros de corte no desvio de forma das peças usinadas. Observou-se ainda uma relação entre o perfil de circularidade e a vibração da ferramenta.

Palavras-chave: torneamento, vibração, circularidade.

1. Introdução

A falta de exatidão é uma das maiores limitações da qualidade do produto na usinagem. Em relação ao processo de torneamento, um dos fatores que mais contribuem para o desvio de forma na peça são as forças de usinagem, que podem produzir um alto grau de vibração durante o processo. A oscilação destas forças durante o corte é decorrente, dentre outros fatores, das diferentes fases do processo de formação do cavaco.

Acredita-se que existe uma relação direta entre o tipo de cavaco formado (curto ou longo) e a frequência de oscilação da ferramenta. O caso estudado é caracterizado por vibrações forçadas (decorrentes dos esforços de corte e rigidez da máquina) e pelo aparecimento de vibrações auto-excitadas (efeito regenerativo em função de ondulações na peça). Assim, serão avaliadas três características: tipo de cavaco (função da característica do material), vibração do porta-ferramenta na direção radial (passiva) e circularidade.

O presente trabalho tem como objetivo correlacionar a frequência de vibração da ferramenta com a frequência de ondulação do perfil da peça, considerando-se o tipo de cavaco de cada material. Dessa forma, obter-se-á um maior entendimento da influência do tipo de cavaco na dinâmica de corte, colaborando para a possibilidade de atuação sobre os erros de forma no processo de torneamento.

2. Revisão da Literatura

A fim de se compreender as relações propostas entre os parâmetros estudados, nos seguintes tópicos será exposta uma revisão da teoria relevante ao assunto tratado.

2.1. Formação do cavaco x Material

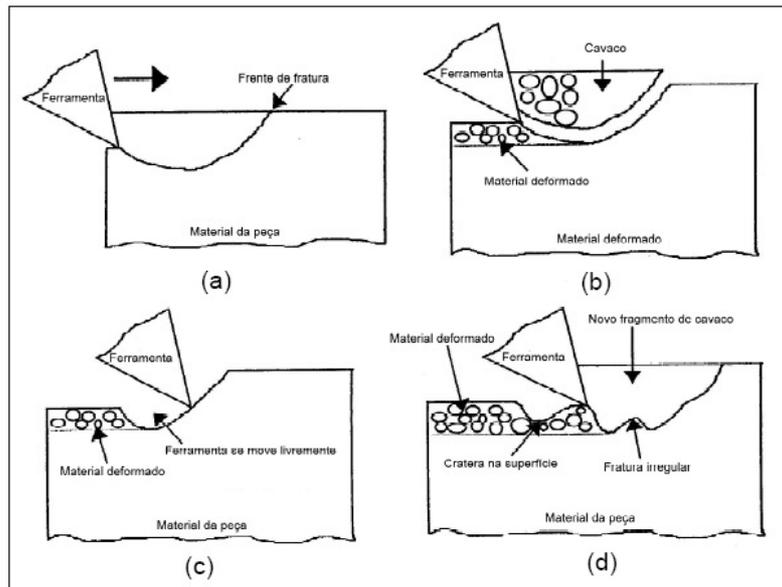
Segundo Shaw (1986), diversas variáveis podem influenciar a natureza e a extensão da fratura que ocorre durante o processo de formação de cavaco. Entre estas estão as características do material (número, tamanho, forma e dureza relativa das heterogeneidades, dureza produzida por tratamento térmico ou por encruamento) e a geometria da ferramenta, sendo que, segundo Klose (1993), ângulos de saída negativos ou arredondamentos da ponta da ferramenta aumentam a deformação plástica durante a formação do cavaco.

A importância das heterogeneidades no corte de metais é evidente quando as características de diferentes ferros fundidos são comparadas. No caso dos ferros fundidos cinzento e vermicular, devem ser consideradas as diferentes formas assumidas pela grafita na microestrutura. Alguns pesquisadores dizem que a grafita atua aumentando a tensão durante a formação do cavaco, o que facilita a usinagem, enquanto outros defendem que a grafita fragiliza a liga e

facilita a produção do cavaco. Foi também proposta a lubrificação interna pela grafita, facilitando o cisalhamento, mas ainda não se chegou a um consenso (Marwanga *et al.*, 2000).

No ferro fundido cinzento, durante a usinagem, a ferramenta primeiro comprime o material, e como as suas grafitas possuem lamelas afiadas em forma de veios, ocorre uma concentração de tensão nas suas extremidades e, devido ao fato de elas serem interconectadas, cria-se um plano de propagação de trincas à frente da aresta de corte (Fig. 1-a). Com o avanço da ferramenta, o material é removido completamente com uma menor força de corte (Fig. 1-b). Durante a usinagem, a ferramenta de corte não permanece sempre em contato com o material, pois uma porção desse é removida à frente da ferramenta, gerando crateras (Fig. 1-c). O arrancamento do material contribui para a liberação da grafita, que age como lubrificante e piora a rugosidade da superfície usinada (Fig. 1-d) (Cohen *et al.*, 2000; Georgiou, 2002).

Figura 1. Formação do cavaco no ferro fundido (Cohen *et al.*, 2000)



No vermicular, como as arestas das lamelas das grafitas são arredondadas, o corte requer uma maior força, já que o formato do cavaco é muito mais parecido com o gerado na usinagem do ferro fundido nodular. Apesar da forma da grafita tornar o modo de ruptura do cavaco dúctil, o ferro fundido vermicular é usinado da mesma maneira que o cinzento, através de uma trinca no plano da grafita que possui uma menor resistência aos esforços de corte (Xavier, 2003; Machado *et al.*, 2005).

Além disso, considerando a fragilidade do ferro fundido cinzento e a maior resistência e tenacidade do vermicular (maior quantidade de ferrita e menor de perlita na matriz aumenta a plasticidade do material (Marwanga *et al.*, 2000)), pode-se afirmar que aquele forma um cavaco mais curto (de ruptura) como resultado da concentração de tensão associada com os veios de grafita que compõem o material, ocorrendo a ruptura em um curto espaço de tempo, enquanto o vermicular forma um cavaco mais longo, aumentando o período do ciclo de formação deste.

Em seus estudos, Andrade (2005) mostra que o cavaco produzido na furação do ferro fundido vermicular apresenta tipo e forma aproximada do cavaco gerado a partir do ferro fundido cinzento na mesma operação, ou seja, cavaco arrancado. Já no fresamento e torneamento, as diferenças são mais nítidas, revelando a maior ductilidade do ferro fundido vermicular.

2.2. Vibração x Formação do cavaco

A dinâmica de formação do cavaco tem estreita relação com a oscilação dos esforços de corte. Em seus estudos, Dimla Sr. (2004) observou que os picos de amplitude no sinal da força durante o processo apresentam correspondência com a frequência natural do porta-ferramenta ou são provenientes do processo de formação do cavaco. Astakhov (1999) defende que o fenômeno da periodicidade da formação do cavaco deveria ser incorporado na análise dinâmica do processo de corte. A partir da análise espectral das forças medidas durante um processo de corte ortogonal, ele observou que as maiores amplitudes são as avaliadas nas frequências correspondentes às de formação do cavaco.

No caso do cavaco descontínuo, nota-se que o maior valor absoluto da força de usinagem ocorre quando do cisalhamento do material e o valor mais baixo quando começa a propagação da trinca e o desprendimento do cavaco (Guo *et al.*, 2004). Devido ao ciclo de formação deste tipo de cavaco ser curto, observa-se uma elevada frequência de oscilação dos esforços de corte, podendo implicar em uma alta frequência de vibração da ferramenta. Nota-se então que o cavaco contínuo apresenta valores de frequência menores, em função do maior tempo sem ocorrência de ruptura.

Bäker (2003) e Jaspers e Dautzenberg (2002) verificaram que muitas ligas formam cavacos segmentados a altas velocidades, onde a deformação do cavaco é heterogênea e regiões de alta e baixa deformação se alternam, levando a

um serrilhado na parte posterior do cavaco. Com isso, notaram que a flutuação das forças de corte devido ao cavaco serrilhado pode levar a vibrações da ferramenta dependendo da rigidez da máquina.

As vibrações ocorridas tanto no caso do cavaco serrilhado, como a partir dos altos valores dos esforços de corte no processo de formação deste ocasionam o deslocamento da ferramenta nas direções onde atuam as componentes da força de usinagem (corte, avanço e passiva). Devido a estas forças serem ortogonais, elas podem ser consideradas separadamente, causando então movimentos regidos por equações diferenciais desacopladas. Assim, pode-se avaliar o efeito de cada uma delas de forma independente. O presente trabalho propõe o estudo da influência da força passiva, já que seu deslocamento periódico aliado à ondulação, também periódica, na peça, altera os valores da circularidade na superfície.

2.3. Vibração x Circularidade

Erros podem ser classificados em duas categorias: quase-estáticos e dinâmicos. Erros quase-estáticos são aqueles entre a ferramenta e a peça, que variam lentamente com o tempo e se relacionam com a estrutura da máquina. Essas fontes incluem os erros geométricos / cinemáticos, erros devidos a componentes da máquina e aqueles devidos a deformações termicamente induzidas na estrutura da máquina. Erros dinâmicos, por outro lado, são causados por fontes como erro de movimentação do fuso, vibrações da estrutura da máquina, erros do controlador, etc. Estes últimos são mais dependentes de condições particulares de operação da máquina (Ramesh *et al.*, 2000).

O erro induzido pelas forças de usinagem pode ser classificado como um erro dinâmico e contribui para a maioria dos erros reportados, restringindo as indústrias a trabalharem com reduzidas taxas de remoção de material (Topal *et al.*, 2005).

Estudos feitos por Mayer *et al.* (2000) avaliaram o erro no diâmetro final da peça (que se reflete no diferente valor da profundidade de corte) em função de deflexões ocorridas devido aos esforços de corte. Foi observado que essas deflexões dizem respeito ao sistema peça-ferramenta-máquina, não sendo, portanto devidas apenas ao deslocamento radial da ferramenta durante o processo, apesar deste último ser de grande importância no desvio de forma da peça.

Um fator relevante de influência nestes erros é a vibração composta pela vibração da própria máquina e das oscilações dos esforços de corte ocorridas durante o processo, originadas da formação do cavaco e da auto-excitação produzida a partir do efeito regenerativo proveniente da ondulação da superfície da peça (Weck *et al.*, 2006). As amplitudes do deslocamento da ferramenta provocadas por essa vibração prejudicam a qualidade do acabamento da superfície da peça, o que é mais especificamente notado pelas medições de circularidade, haja vista a combinação de movimentos radiais gerados pela vibração com os movimentos de avanço. Neste trabalho, o corpo de prova utilizado possui uma relação de fixação L/D (comprimento/diâmetro) suficiente para que possam ser desconsiderados os efeitos de deflexão da peça, além do que o porta-ferramentas é tratado como sendo excitado por forças variáveis, o que gera movimentos oscilatórios deste em relação à peça, havendo componentes de amortecimento e de aceleração de massa. Foi avaliado apenas o deslocamento na direção radial, o que corresponde à ação da força passiva.

A fim de serem evitados desvios tanto dimensionais, como de forma na peça, estudos têm sido feitos e diversos modelos têm sido desenvolvidos para a avaliação da vibração no torneamento (Dimla, 2004) e até dispositivos para o controle desta, assim como para o controle da precisão dimensional (El-Sinawi *et al.*, 2005). Da mesma forma, o objetivo aqui corresponde ao estudo do deslocamento periódico da ferramenta na direção radial e sua relação com o desvio de forma na peça. Com o entendimento do processo, há a possibilidade de serem criados mecanismos de controle para a melhora da eficiência nos processos de torneamento visando um acabamento superficial adequado.

3. Materiais e Métodos

Foi utilizado para a realização dos ensaios um torno CNC Romi Galaxy 20 com rotação máxima de 4500 rpm e potência nominal de 15 kW. Nele tornaram-se a seco corpos de prova de ferro fundido vermicular e cinzento com diâmetros de 90 mm e 80 mm de comprimento. Os parâmetros de corte foram definidos em função da seleção da ferramenta para o acabamento de ferros fundidos e constam na Tab. (1).

Tabela 1. Parâmetros de corte para ferro fundido vermicular e cinzento

Ferro fundido vermicular								
Ensaio	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
a_p (10^{-3} m)	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
v_c (m/s)	3,5	3,5	2,9	2,9	3,5	3,5	2,9	2,9
f (10^{-3} m/rot)	0,30	0,24	0,30	0,24	0,30	0,24	0,30	0,24
Ferro fundido cinzento								
Ensaio	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
a_p (10^{-3} m)	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
v_c (m/s)	3,5	3,5	2,9	2,9	3,5	3,5	2,9	2,9
f (10^{-3} m/rot)	0,30	0,24	0,30	0,24	0,30	0,24	0,30	0,24

Para o torneamento do ferro fundido vermicular as pastilhas utilizadas foram WNMG 080408-GN, classe IC5010 com revestimentos TiCN MTCVD e Al_2O_3 CVD com quebra-cavacos. No corte do ferro fundido cinzento, as pastilhas são WNMA 080408, classe IC9007 com cobertura TiCN / Al_2O_3 / TiN multicamadas CVD. O porta-ferramenta corresponde ao modelo MWLNL 2525M-08W.

Para a aquisição dos sinais de vibração foi acoplado à parte traseira do porta-ferramenta um acelerômetro Kistler ligado a um filtro passa-baixa da mesma empresa com frequência de corte de 1 kHz, sendo considerado, dentro de aproximações, apenas o sinal referente à oscilação do porta-ferramenta. Este filtro foi conectado a um microcomputador. Os sinais foram adquiridos por meio do programa Labview e placa de aquisição da National Instruments.

O tratamento matemático dos sinais adquiridos (transformada de Fourier para a análise das frequências fundamentais) procedeu-se com o software Scilab.

Para se evitar a influência do desgaste da ferramenta, a cada passe no corpo de prova efetuava-se a troca da aresta e avaliava-se o desvio de circularidade da peça. Essa medição foi feita por um circularímetro Taylor Hobson modelo Talyrond 265, com uma janela de frequência de 1-500 Hz e com amplitudes limitadas acima de $0,1\mu\text{m}$.

4. Resultados e Discussões

Após a realização dos ensaios de acordo com a Tab. (1), foram obtidos gráficos do comportamento vibracional da ferramenta e do perfil de circularidade das peças usinadas. As Fig. (2), (3), (4) e (5) mostram casos representativos dos resultados obtidos (ensaios C1, C8, V1 e V8, respectivamente).

Figura 2. Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade para ferro fundido cinzento. Condições de corte: $a_p = 1,0 \cdot 10^{-3}$ m; $v_c = 3,5$ m/s; $f = 0,30 \cdot 10^{-3}$ m/rot

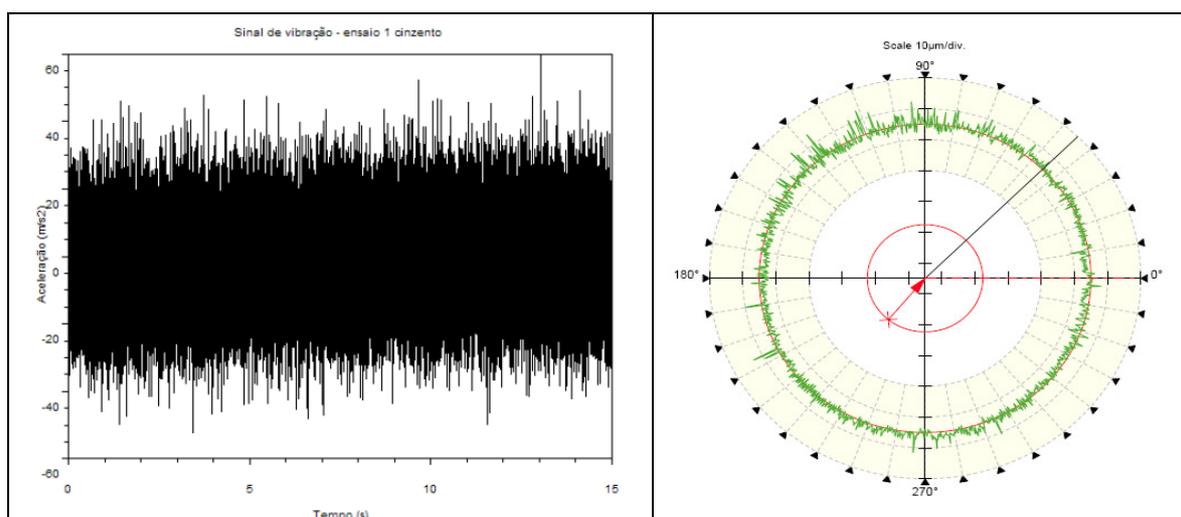


Figura 3. Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade para ferro fundido cinzento. Condições de corte: $a_p = 0,5 \cdot 10^{-3}$ m; $v_c = 2,9$ m/s; $f = 0,24 \cdot 10^{-3}$ m/rot

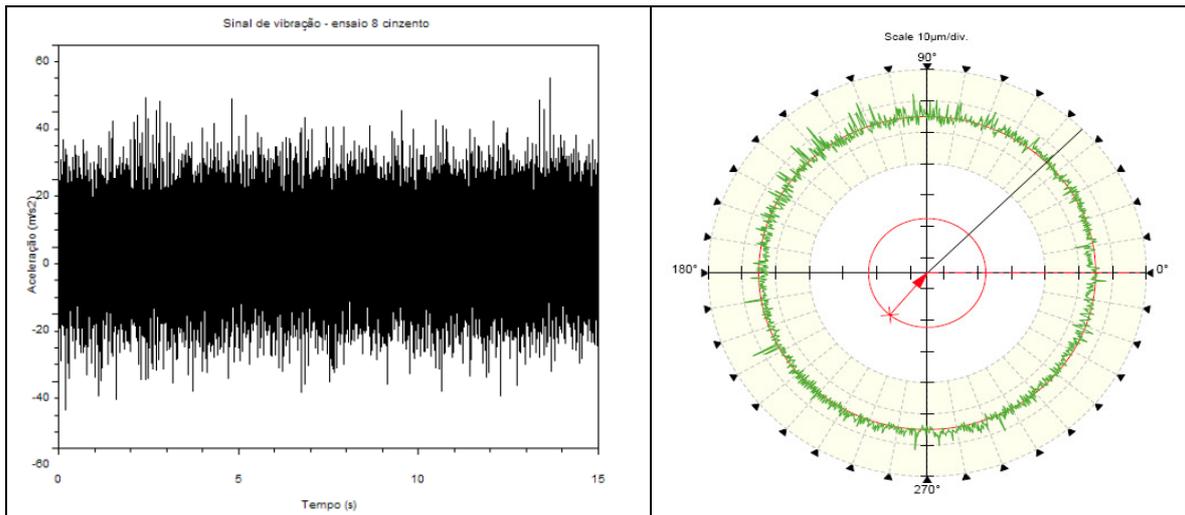


Figura 4. Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade para ferro fundido vermicular. Condições de corte: $a_p = 1,0 \cdot 10^{-3}$ m; $v_c = 3,5$ m/s; $f = 0,30 \cdot 10^{-3}$ m/rot

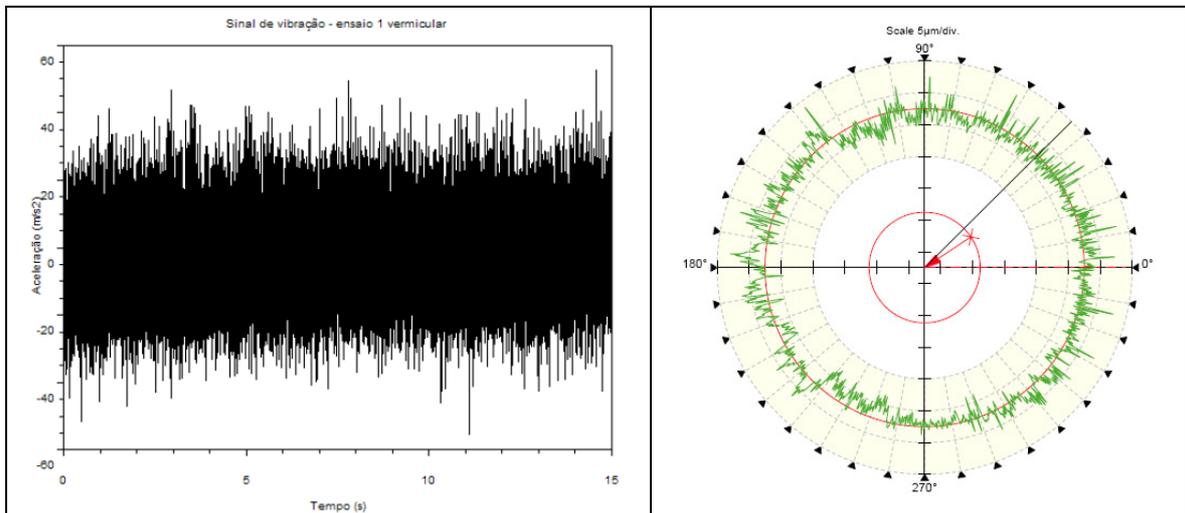
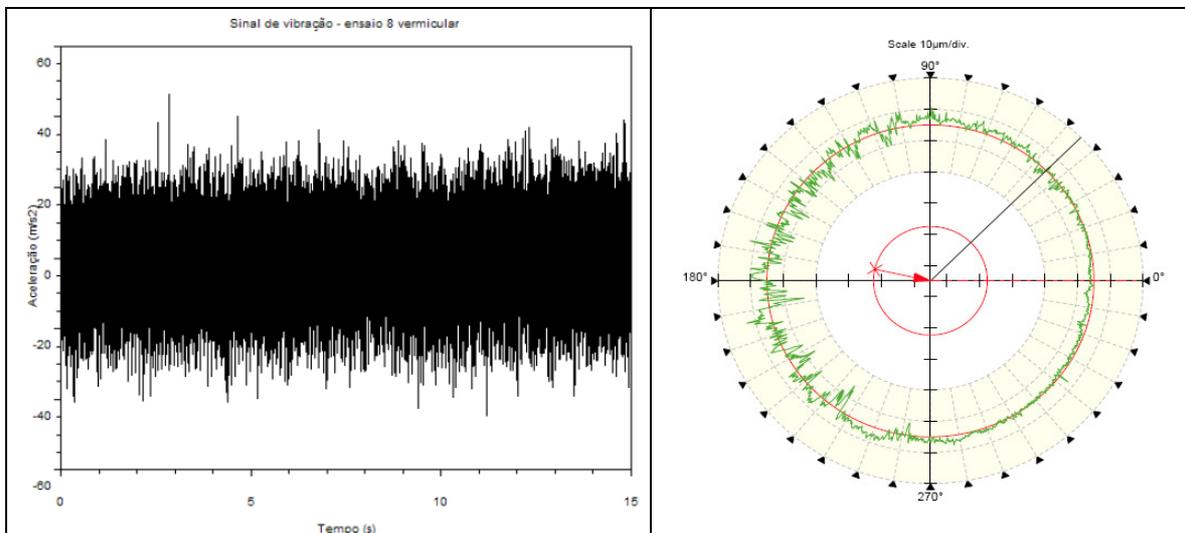


Figura 5. Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade para ferro fundido vermicular. Condições de corte: $a_p = 0,5 \cdot 10^{-3}$ m; $v_c = 2,9$ m/s; $f = 0,24 \cdot 10^{-3}$ m/rot



A partir de uma avaliação dos valores rms e das medições de circularidade, foi possível a elaboração das tabelas 2 e 3, com o objetivo apenas de se resumir os principais dados, sendo que esses não podem ser comparados, pois o valor de circularidade é medido em uma seção do cilindro, enquanto o valor rms da vibração da ferramenta é influenciado por todo o sinal.

Tabela 2. Valores rms do sinal de aceleração e medições de circularidade para o ferro fundido cinzento

Ensaio	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
RMS (m/s^2)	9,93	9,08	10,39	10,96	9,18	8,51	8,04	8,78
Circularidade (10^{-6} m)	14,38	14,37	20,64	24,1	12,98	16,81	53,44	18,00

Tabela 3. Valores rms do sinal de aceleração e medições de circularidade para o ferro fundido vermicular

Ensaio	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
RMS (m/s^2)	9,56	10,38	10,27	10,03	9,83	7,61	7,68	9,07
Circularidade (10^{-6} m)	11,43	9,93	13,34	22,46	14,12	14,32	29,82	18,78

Como é periódico o movimento da ferramenta em relação à peça, pode-se aproximá-lo por uma série de Fourier. Assim, integrando-se o sinal de aceleração duas vezes, obtém-se o deslocamento da ferramenta, o qual possui o mesmo comportamento do sinal obtido por meio dos acelerômetros, mas oposto e com valores de amplitude proporcionais e menores. Assim, torna-se possível abstrair o comportamento vibracional da ferramenta a partir dos gráficos de aceleração, os quais demonstram altas amplitudes e variações em torno da posição de equilíbrio.

A diminuição da oscilação da ferramenta (deslocamento) no trecho correspondente à medição de circularidade causa uma redução deste valor, o que foi observado para os dois materiais na condição de maior velocidade de corte ($v_c = 210$ m/min – ensaios 1, 2, 5 e 6). Isso se justifica pelo fato de que o aumento da velocidade de corte induz um aumento da velocidade de cisalhamento, diminuindo assim a deformação do cavaco antes da ruptura (Degner *et al.*, 2002). Isso provoca uma diminuição das forças de corte, reduzindo a amplitude de deslocamento da ferramenta.

Notou-se ainda a influência da profundidade de corte na amplitude da aceleração da ferramenta observando que os ensaios de 1 a 4 ($a_p = 1,0$ mm) possuem maiores valores rms, o que confirma a tendência à trepidação apresentada quando da usinagem acima de uma profundidade de corte crítica (Weck *et al.*, 2006).

Nos ensaios C7 e V7, notaram-se irregularidades nas superfícies das peças, sendo estas devidas a ‘rechupes’ decorrentes do processo de fundição. Esse fato provocou a obtenção de valores de circularidade discrepantes em relação às outras peças, como pode ser visto nas tabelas 2 e 3. Além disso, é importante ressaltar que esses problemas na superfície podem causar um aumento da frequência de vibração da ferramenta.

Para a verificação da qualidade de trabalho a partir dos valores de circularidade, partiu-se do fato de que a diferença entre o maior e o menor diâmetro na mesma seção transversal não deve exceder a metade da tolerância do diâmetro nominal. Dessa maneira, excetuando-se os ensaios C7 e V7, foram obtidas qualidades de trabalho entre IT8 e IT10, as quais estão dentro da faixa de tolerâncias utilizada em acoplamentos na mecânica corrente.

Nas Fig. de (6) a (9), são mostrados os gráficos correspondentes às Fig. de (2) a (5) da transformada de Fourier para as análises de frequência do sinal de aceleração e do perfil de circularidade da peça.

Figura 6. Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça para o ferro fundido cinzento. Condições de corte: $a_p = 1,0 \cdot 10^{-3}$ m; $v_c = 3,5$ m/s; $f = 0,30 \cdot 10^{-3}$ m/rot

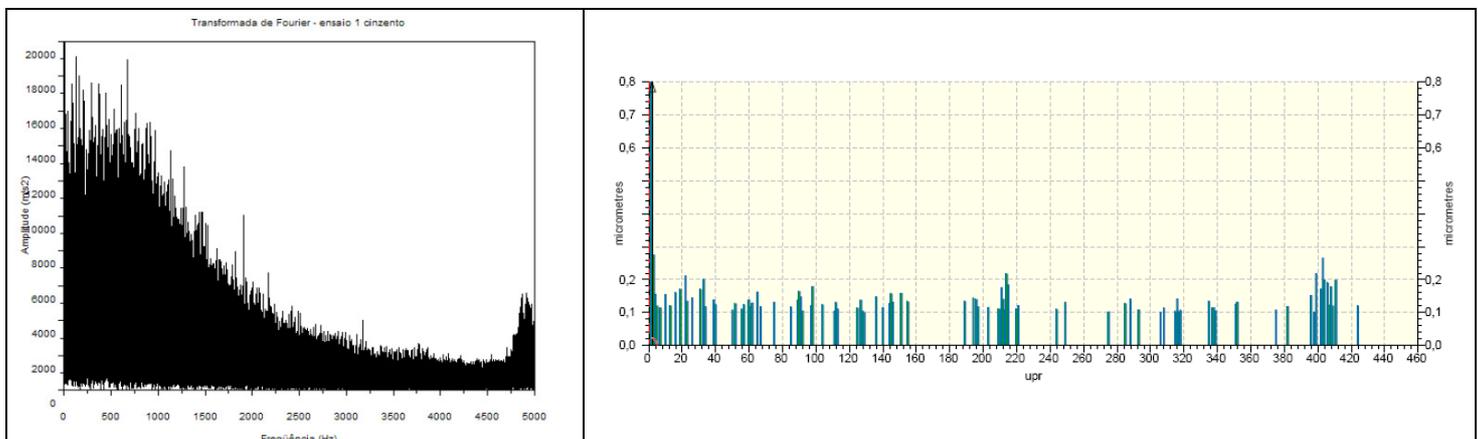


Figura 7. Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça para o ferro fundido cinzento. Condições de corte: $a_p = 0,5 \cdot 10^{-3}$ m; $v_c = 2,9$ m/s; $f = 0,24 \cdot 10^{-3}$ m/rot

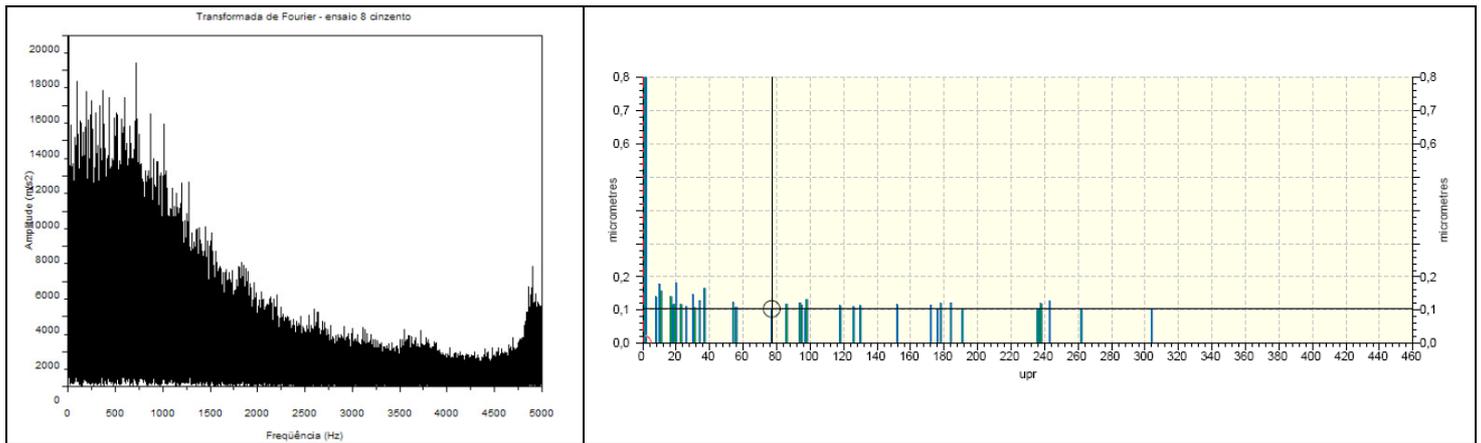


Figura 8. Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça para o ferro fundido vermicular. Condições de corte: $a_p = 1,0 \cdot 10^{-3}$ m; $v_c = 3,5$ m/s; $f = 0,30 \cdot 10^{-3}$ m/rot

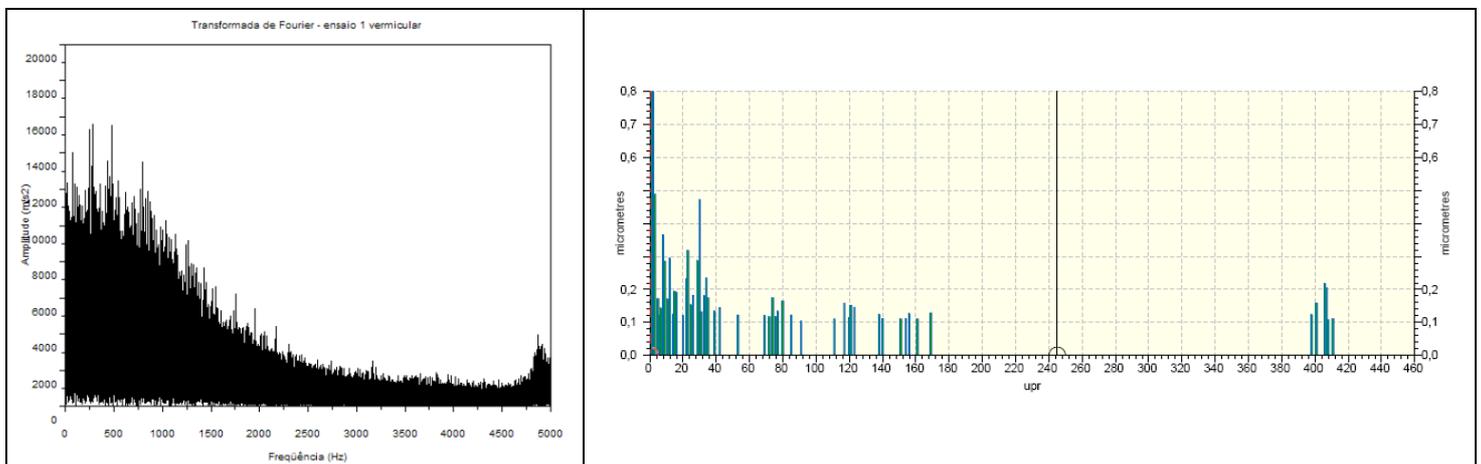
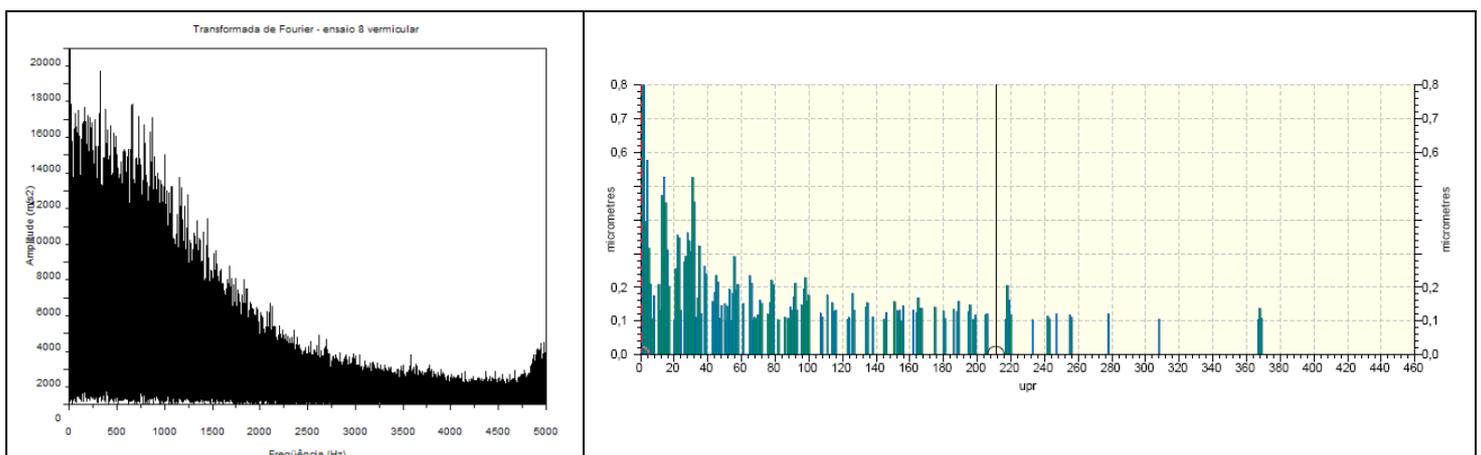


Figura 9. Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça para o ferro fundido vermicular. Condições de corte: $a_p = 0,5 \cdot 10^{-3}$ m; $v_c = 2,9$ m/s; $f = 0,24 \cdot 10^{-3}$ m/rot



A irregularidade dos períodos de oscilação nos sinais de vibração devido aos ruídos e influências da máquina causou ‘espalhamento’ de energia no cálculo das transformadas de Fourier. Esse fato prejudicou a observação clara dos picos de amplitude, dificultando a análise.

Em relação às frequências obtidas, não se notaram diferenças quando variados os parâmetros de corte. Assim, verifica-se que a frequência de vibração da ferramenta não apresentou relação clara com a velocidade de corte e, portanto, com a rotação da peça.

Na abordagem do problema foram levadas em consideração as diferenças entre as características dos materiais usinados (o ferro fundido cinzento possui uma estrutura mais heterogênea e a grafita age como um concentrador de tensões, enquanto o vermicular apresenta a grafita fortemente aderida na matriz de ferro e suas extremidades arredondadas, o que não produz o fator de entalhe), as quais influenciam a periodicidade da ruptura do cavaco, sendo esse fenômeno comprovado por meio da variação da intensidade da força de usinagem (Ferraresi, 1990; Time, 1880). Apesar disso, nos gráficos obtidos a partir dos sinais de aceleração (Fig. de (6) a (9)), não se verificaram diferenças significativas para os dois materiais, não sendo possível a distinção entre eles a partir da observação das componentes de frequência. Isso pode ter ocorrido em função da composição e fabricação dos corpos de prova, não permitindo uma distinção clara entre o comprimento dos cavacos durante o corte, o que acarretou períodos de ruptura muito próximos. Tal problema pode ter sido agravado pela utilização de uma ferramenta com quebra-cavacos na usinagem do ferro fundido vermicular. As frequências de maiores amplitudes observadas foram semelhantes para os dois tipos de ferro fundido, ficando em faixas de 0-1000 Hz e 4000-5000 Hz.

De acordo com os gráficos de circularidade nas Fig. de (6) a (9), notou-se uma concentração de picos na região de baixas frequências, sendo escassa a existência de picos com amplitudes maiores que 0,1µm em altas frequências. Essa análise é indicativa de que o processo de corte acarretou componentes mais significativos de oscilação da ferramenta a menores frequências.

Ademais, foi possível perceber que as análises de Fourier da vibração e da circularidade são análogas para cada caso, ocorrendo maiores amplitudes a baixas frequências, além da tendência a um aumento de amplitude a altas frequências. Comparando-se os gráficos, pôde-se verificar uma relação de aproximadamente 10 vezes, tanto entre as frequências mais baixas (faixa de 0-1000 Hz para a aceleração e faixa de 0-100 picos/volta para a circularidade), como entre as relativas aos últimos picos significativos de cada gráfico (faixa de 4000-5000 Hz para a aceleração e faixa de 400 a 500 picos/volta para a circularidade). Devido ao fato de as amplitudes e frequências de aceleração serem muito altas, deve-se notar que as inversões de movimento da ferramenta são pequenas, ou quase nulas, o que não possibilita o aparecimento de maiores frequências na circularidade, levando em conta que os gráficos de frequência relativos aos picos da peça foram feitos com um filtro que só considerou amplitudes acima de 0,1µm. Dessa maneira, é válida a relação entre os gráficos da análise de Fourier da vibração e da circularidade.

É importante ressaltar que devido ao tipo de microestrutura dos materiais, a ferramenta não está sempre em contato com a peça em função da geração de crateras quando do arrancamento de partículas durante a remoção do material, ocasionando intermitência durante o corte. Isso justifica a não existência de um padrão exato quando da comparação dos gráficos, já que o sinal de aceleração é irregular.

Os últimos picos referentes aos sinais de aceleração podem estar ligados à frequência de formação do cavaco, já que esse fenômeno é caracterizado por frequências superiores a 1500 Hz (Ferraresi, 1990), além do que, segundo Cook (1966), a altas frequências, o efeito regenerativo possui pouca importância na vibração da ferramenta. Já as altas amplitudes observadas a baixas frequências, podem estar relacionadas ao processo de vibração regenerativa, fenômeno que ocorre a partir da excitação da ferramenta pelas ondulações na superfície da peça, essas causadas a partir da variação da largura do cavaco durante o corte, nesse caso, oblíquo. Esse processo forma um ciclo fechado quando considerado que a variação da espessura do cavaco provoca oscilações na força passiva, o que altera a amplitude de oscilação da ferramenta e provoca desvios na profundidade de corte, alimentando novamente o ciclo.

Assim, conclui-se que os desvios de maiores amplitudes na circularidade das peças correspondem ao processo de vibração regenerativa e em menor intensidade e com maiores frequências à formação do cavaco.

5. Conclusões

A partir da revisão da literatura, verificou-se a influência do tipo de cavaco formado na frequência de oscilação das forças de corte. Sendo finita a rigidez do sistema máquina-ferramenta, conclui-se que a oscilação da ferramenta ocorre em função dos esforços atuantes, os quais também consideram a influência do auto-excitamento causado pela ondulação na superfície da peça. A variação da amplitude de vibração tende a alterar o valor da profundidade de corte durante o processo, fazendo com que haja desvios de forma na superfície das peças usinadas.

Os resultados obtidos inicialmente demonstraram a influência da profundidade de corte e da velocidade de corte na dinâmica do processo. Altos valores do primeiro parâmetro implicam em maiores amplitudes de vibração, enquanto um aumento da velocidade de corte causa um decréscimo nas medidas de circularidade, mas não influencia claramente a frequência de vibração da ferramenta.

Por meio da análise de Fourier, foi possível a verificação das frequências fundamentais, tanto da oscilação da ferramenta, como da ondulação na superfície da peça. A comparação destas frequências possibilitou avaliar a relação entre a aceleração da ferramenta e as ondulações produzidas na superfície dos corpos de prova torneados, sendo encontrada uma relação aproximada de 10 vezes entre as baixas frequências dos sinais de vibração (0-1000 Hz) e dos sinais de circularidade (0-100 picos/volta), e entre as altas frequências correspondentes ao último pico significativo da transformada dos sinais de vibração (4000-5000 Hz) e de circularidade (400-500 picos/volta). Em função das altas acelerações, o movimento oscilatório da ferramenta é pequeno, causando baixas amplitudes na superfície da peça e não contribuindo para o perfil de circularidade, o que justifica as menores frequências nesses últimos gráficos.

Além disso, foi verificado que os gráficos de frequência elaborados a partir do perfil de circularidade e do sinal de aceleração apresentaram uma concentração de altas amplitudes a baixas frequências, demonstrando que os maiores deslocamentos da ferramenta possuem componentes de menores frequências. Como o processo de formação do cavaco

normalmente ocorre a altas frequências e os cavacos dos materiais usinados se apresentaram de forma segmentada, conclui-se que as faixas correspondentes aos últimos picos significativos se relacionam a esse fenômeno. Assim, as maiores amplitudes, que mais afetam a circularidade, não estão diretamente ligadas ao processo de formação do cavaco, podendo estar relacionadas ao processo de vibração regenerativa. Conclui-se dessa forma que a força passiva oscila com maiores amplitudes e menores frequências em função do efeito regenerativo, enquanto a formação do cavaco causa menores deslocamentos a maiores frequências.

Durante o corte, não foram notadas diferenças entre o comprimento dos cavacos dos materiais usinados, não sendo possível a observação de variações de frequência dos picos significativos quando da alteração do material.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à Iscar do Brasil pela doação das ferramentas, às Indústrias Romi pela doação dos corpos de prova e à Taylor Hobson e à Sandvik Hard Materials pela disponibilização do aparelho para medição da circularidade.

7. Referências

- ANDRADE, C. L. F. de, 2005, “Análise da furação do ferro fundido vermicular com brocas de metal-duro com canais retos revestidas com TiN e TiAlN”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina.
- ASTAKHOV, V. P., 1999, “Metal Cutting Mechanics”. Boca Raton: CRC Press LLC. 297p.
- BÄKER, M., 2003, “The influence of plastic properties on chip formation”. *Computational Materials Science*, v.28, p. 556-562.
- COHEN, P. H.; VOGT, R. C. e MARWANGA, R. O., 2000, “Influence of graphite morphology and matrix structure on chip formation during machining of ductile irons”. In: AFS Casting Congress, Pittsburg. American Foundrymen’s Society *apud* MOCELLIN, 2002.
- COOK, N. H., 1966, “Manufacturing Analysis”. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 229p.
- DEGNER, W.; LUTZE, H.; SMEJKAL, E., 2002, “Spanende Formung – Theorie, Berechnung, Richtwerte”. 15. Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag. 396S.
- DIMLA SR., D. E., 2004, “The impact of cutting conditions on cutting forces and vibration signals in turning with plane face geometry inserts”. *Journal of Materials Processing Technology*, v.155-156, p.1708-1715.
- EL-SINAWI, A. H., KASHANI, R., 2005, “Improving surface roughness in turning using optimal control of tool’s radial position”. *Journal of Materials Processing Technology*, v.167, p.54-61.
- FERRARESI, D., 1990, “Usinagem dos Metais; Fundamentos da Usinagem dos Metais”. 8.ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda. 751p.
- GEORGIOU, G., 2002, “CGI high speed machine tool solutions”. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 5, 2002. Darmstadt. Anais...Darmstadt: PTW – Institute of Production and Machine Tools.
- GUO, Y. B., YEN, D. W., 2004, “A FEM study on mechanisms of discontinuous chip formation in hard machining”. *Journal of Materials Processing Technology*, v.155-156, p.1350-1356.
- JASPERS, S. P. F. C., DAUTZENBERG, J. H., 2002, “Material behavior in metal cutting: strains, strain rates and temperatures in chip formation”. *Journal of Materials Processing Technology*, v.121, p.123-135.
- KLOSE, Hans-Jürgen, 1993, “Einfluss der Werkstoffmorphologie auf die Zerspanbarkeit niedriglegierter Gusseisen”. *Berichte aus dem Institut für Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen – Universität Hannover*. Düsseldorf: VDI Verlag, nº 297. 174S.
- MACHADO, A. R., BOEHS, L., SANTOS, M. T. dos, GUESSER, W. L., 2005, “Usinagem de Ferros Fundidos Cinzento, Nodular e Vermicular”. *Tecnologias Avançadas de Manufatura*. Cap. 4 – Coleção Fábrica do Milênio, v.1. 1.ed. Jaboticabal: Editora Novos Talentos. 169p.
- MARWANGA, R. O., VOGT, R. C., COHEN, P. H., 2000, “Influence of graphite morphology and matrix structure on chip formation during machining of continuously cast ductile irons”. *AFS Transactions*, p. 651-661.
- MAYER, J. R. R., PHAN, A-V., CLOUTIER, G., 2000, “Prediction of diameter errors in bar turning: a computationally effective model”. *Applied Mathematical Modelling*, v. 24, p.943-956.
- RAMESH, R., MANNAN, M. A., POO, A. N., 2000, “Error compensation in machine tools – a review. Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 40, p. 1235-1256.
- SHAW, M. C., 1986, “Metal Cutting Principles”. 2.ed. New York: Oxford University Press. 594p.
- TIME, I. I., 1880, “On the Resistance of Metals and Wood to Cutting”. *Dermaconv*, St. Petersburg, 1880 (em russo). *apud* Astakhov, V. P.; Shvets, S. V.; Osman, M. O. M. Chip structure classification based on mechanics of its formation. *Journal of Materials Processing Technology*, v.71, p. 247-257, 1997.
- TOPAL, E. S., COGUN, C., 2005, “A cutting force induced error elimination method for turning operations”. *Journal of Materials Processing Technology*, v.170, p. 192-203.
- WECK, M., BRECHER, C., 2006, “Werkzeugmaschinen 5 – Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität”. 7. Auflage. Berlin: Springer Verlag. 474S.
- XAVIER, F. A., 2003, “Aspectos tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina.

8. Direitos autorais

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

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN CHIP FORMATION, TOOL VIBRATION AND FORM DEVIATION IN THE TURNING PROCESS

Carlos Eiji Hirata Ventura

carlos.ehv@gmail.com

Amauri Hassui

ahassui@fem.unicamp.br

Abstract. The cast irons constitute a group of fundamental importance to the industry with their main applications in manufacturing of Diesel motors, exhaust collectors and brake discs. Despite of its good machinability, the gray cast iron is less resistant and brittle, while its high mechanical resistance and good toughness characterize the CGI. Due to these mechanical properties, it can be verified in comparison that the gray cast iron presents a shorter chip with a bigger frequency of formation. The periodicity of the chip formation process and the self-excited vibration of the system cause oscillation on the cutting forces, promoting a displacement of the tool in the radial direction, which damages the roundness of the machined workpiece. The present work evaluated the influence of the chip type in the quality of the manufactured surface through the verification of the fundamental frequencies calculated by the spectral analysis of the vibration signals and the roundness measurements. With the results, it could not be noted substantial differences between the studied materials, but it was possible to obtain important information about the influence of the cutting parameters in the form deviation of the turned workpieces. Moreover, one could note a relationship between the roundness profile and the tool vibration during the process.

Keywords: *turning, vibration, roundness.*