

Torneamento do ferro fundido nodular GGG40: estudo sobre a influência de variáveis essenciais

Christianne Lacerda Soares (UFMG) chrislacerda3@hotmail.com
Juan Carlos Campos Rubio (UFMG) juan@ufmg.br

Resumo:

Os processos industriais mecânicos tornaram-se, ao longo do tempo, ferramentas indispensáveis ao avanço do homem moderno. Dentre os processos de fabricação, principalmente nos metais, aqueles denominados de usinagem ganharam destaque por sua versatilidade e grande aplicabilidade industrial. Procurando compreender os fenômenos intrínsecos que ligam o monitoramento das variáveis essenciais: emissão acústica, força de usinagem e temperatura, neste estudo foi torneado a seco um corpo de prova cilíndrico nodular GGG40. No experimento, 16 configurações diferentes foram instituídas variando-se a velocidade de corte e o avanço. Os resultados assinalam que as relações entre as variáveis de entrada estão essencialmente conectadas de forma que o correto acompanhamento e o estabelecimento adequado de suas taxas de variação são capazes de proporcionar um sistema eficaz de monitoramento, auxiliando na redução de custos com quebra de ferramentas, melhores acabamentos superficiais e redução de não conformidades nos processos.

Palavras chave: Torneamento, ferro fundido, monitoramento, emissão acústica, temperatura.

Turning of nodular cast iron GGG40: an analysis about essential variables influence

Abstract

Mechanical industrial processes have become, within time, imperative tools to help modern humankind progress. Among fabrication processes, mainly metal ones, machining is featured for its versatility and great industrial applicability. Seeking for understanding the inner phenomena that connect the monitoring of essential variables: acoustic emission, machining force and temperature, in this study a cylindrical nodular cast iron GGG40 body of proof was dry turned. In the experiment, 16 different configurations were established, with various cutting speeds and feed rates. Results show that the relationships among the input variables are essentially connected in a way that the correct follow-up and suitable settlement of its variations rates are capable to provide a effective monitoring system, aiding on cost reduction such as tool breakage, better surface finishes and reduction of process non-conformities.

Key words: Turning, cast iron, monitoring, acoustic emission, temperature.

1. Introdução

Os processos industriais mecânicos tornaram-se, ao longo do tempo, ferramentas indispensáveis ao avanço do homem moderno. Dentre os processos de fabricação, principalmente nos metais, aqueles denominados de usinagem ganharam destaque por sua versatilidade e grande aplicabilidade industrial.

Contudo, estes processos não apresentam somente benefícios; algumas desvantagens puderam ser caracterizadas levando em consideração a busca humana pelo mais e pelo melhor. Com a submissão destes sistemas a elevadas cargas de trabalho e de força, diversos inconvenientes surgiram, tais como quebra e desgaste das ferramentas de corte, e, conseqüentemente, defeitos

visuais, dimensionais e de acabamento superficial no produto acabado.

Novamente, o homem com sua perspicácia foi capaz de adequar-se a essa nova realidade e começou a estudar detalhadamente determinados fenômenos, que, por sua vez, auxiliam a explicar a causa de alguns defeitos relacionados ao processo de usinagem e por meio do monitoramento de algumas variáveis, percebeu a possibilidade de minimizar e, por vezes, eliminar os mesmos. As relações que regem as entradas dos processos de usinagem foram então estudadas de forma mais íntima de modo a se entender suas inter-relações e determinar parâmetros ótimos no processo.

Assim, neste trabalho será contemplado um estudo de torneamento realizado em uma peça de ferro fundido GGG40, procurando compreender os fenômenos intrínsecos que ligam o monitoramento das variáveis essenciais: emissão acústica, força de usinagem e temperatura.

1.1 Objetivos

Este estudo tem como principal objetivo caracterizar um sistema de monitoramento das variáveis essenciais – emissão acústica, força de usinagem e temperatura – no torneamento a seco de um corpo de prova cilíndrico nodular GGG40 e avaliar as relações de variação existentes entre essas variáveis.

2. Referencial teórico

2.1 Características do ferro fundido

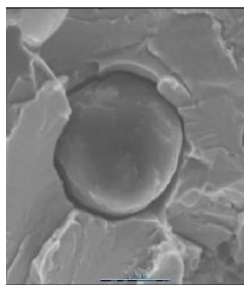
O ferro fundido é um material que tem grande aplicabilidade na indústria moderna. Juntamente com o aço, apresenta grande versatilidade e uso nas indústrias automotiva, de mineração, mecânica, petrolífera, agrícola e de equipamentos. O ferro fundido é utilizado em cascos de navio, caixas de engrenagens, rolamentos, cilindros, conexões para tubulações, pás-carregadeiras, aplicações estruturais, etc. Torna-se, juntamente com o aço, um dos materiais mais utilizados pela indústria (Teles, 2007).

Chiaverini (1990) define o ferro fundido como a liga ferro-carbono-silício, com teor de carbono, geralmente, acima de 2,0%, podendo ser retida em solução sólida na austenita, gerando carbono parcialmente livre na forma de veios (lamelas) ou nódulos de grafita.

Os ferros fundidos podem ser classificados como: cinzento, branco, mesclado, maleável, nodular e vermicular. O ferro fundido cinzento possui o carbono e o silício como elementos de liga fundamentais; nele, grande parte do carbono está no estado livre (grafita lamelar) e outra parcela no estado combinado Fe_3C (cementita). O ferro fundido branco também possui o carbono e o silício como elementos de liga fundamentais, porém apresenta o carbono quase inteiramente combinado Fe_3C devido ao menor teor de silício. O ferro fundido mesclado, por sua vez, é caracterizado igualmente por uma mescla de proporções variáveis de ferro fundido branco e ferro fundido cinzento. Já o ferro fundido maleável é obtido pelo tratamento térmico (maleabilização) do ferro branco. Este processo resulta em uma transformação de praticamente todo o ferro combinado Fe_3C em grafita em forma de nódulos. A presença de carbono livre na forma de grafita esferoidal devido a um tratamento realizado no estado líquido é característica do ferro fundido nodular apresenta. Por isso, este tipo de ferro apresenta uma boa ductilidade. Por fim, no ferro fundido vermicular, a presença de titânio reduz a formação de grafita esferoidal. Ele é intermediário entre o ferro cinzento e o nodular e possui a fundibilidade do ferro fundido cinzento com melhores resistências mecânicas e alguma ductilidade (Teles, 2007).

De acordo com Silva et al (2005), o ferro fundido nodular recebe este nome pois em sua

micrografia é possível perceber nódulos em formatos esferoidal, como mostrado na Figura 1.



Fonte: Xavier (2003, p. 24)

Figura 1 – Micrografia do ferro fundido nodular

Ainda segundo Silva et al (2005), o tratamento dado ao ferro fundido nodular garante a este material uma boa ductilidade, aumento da tenacidade e maior resistência mecânica. Este último proporciona ao material um maior limite de escoamento que o dos ferros fundidos cinzento e maleável, garantindo assim maior resistência à tração.

2.2. Usinabilidade do ferro fundido

A usinabilidade de um material é definida como o grau de dificuldade de usar este material (DINIZ et al, 2006 apud TELES, 2007). Machado e Silva (2004) definem usinabilidade como a indicação da dificuldade ou da facilidade de se usar um material. A usinabilidade poderá sofrer alterações dependendo do desempenho de outras variáveis do processo: força de usinagem, acabamento superficial, desgaste da ferramenta, temperatura de corte e controle do cavaco. Estas também são consideradas como medidas de usinabilidade (SILVA et al, 2005).

Os ferros fundidos apresentam-se como materiais fáceis de usar dependendo da distribuição de seus constituintes (BOEHS, AGUIAR E FERREIRA, 2000). Teles (2007) apresenta ainda apontamentos sobre a composição dos ferros fundidos e como os elementos químicos influenciam sua usinabilidade. Em geral, os elementos carbono e silício (os principais) melhoram a usinabilidade. O manganês e o enxofre auxiliam no aumento da vida da ferramenta, pois o sulfeto de manganês tem efeito lubrificante, reduzindo o atrito e a temperatura de corte. Já grandes quantidades de enxofre são responsáveis pela ruptura do cavaco em pequenos fragmentos. Por último, o fósforo gera a formação de steadita, composto por partículas de fosfeto de ferro e carboneto de ferro, que são prejudiciais ao processo de usinagem, pois é dura e quebradiça. O autor destaca ainda outros elementos que podem constar na estrutura do ferro fundido, como níquel, telúrio, titânio e nióbio.

2.3. Torneamento de ferro fundido nodular

O torneamento pode ser classificado como um processo de corte onde “[...] a peça gira enquanto a ferramenta se desloca para cortar continuamente o material. ” (DINIZ, MARCONDES E COPPINI, 2000). No torneamento, Xavier (2003) afirma que na penetração da ferramenta na peça, pequenas porções do material são deformadas elástica e plasticamente, aumentando as tensões até que ocorra o cisalhamento do material, gerando o cavaco. O torneamento pode ser realizado em perfis, roscas, formas, para o faceamento de peças ou longitudinalmente.

O processo de torneamento, segundo Souza (2004) dependerá das variáveis independentes: material da peça, geometria da peça, material da ferramenta, geometria da ferramenta, parâmetros de corte, meios lubri-refrigerantes e máquina ferramenta; e também das variáveis dependentes: tipo do cavaco, força e potência de usinagem, temperatura na região de corte,

vibrações, falhas na ferramenta de corte e acabamento da superfície usinada.

No processo de torneamento do ferro fundido nodular, devido à microestrutura do material, tendo a grafita no formato de nódulos, a ferramenta exerce ação de compressão antes da separação do cavaco (Xavier, 2003). Isso possibilita um maior escoamento e ductilidade que o ferro fundido cinzento, por exemplo, resultando em um cavaco contínuo sobre o gume da ferramenta, similar ao cavaco de um aço (GEORGIU, 2002 apud Xavier, 2003).

2.4. Monitoramento de variáveis no torneamento

O monitoramento de diversas variáveis nos processos industriais tem se mostrado como ferramenta importante e indispensável ao correto planejamento do negócio frente à boa previsibilidade de quebra de ferramentas, por exemplo. Para se ter um processo de fabricação industrial como o torneamento totalmente automatizado, “[...] é necessário o uso de sistemas de monitoração que possam estabelecer o momento de troca da ferramenta em tempo real e realizar automaticamente esta troca” (DEMEC, 2004).

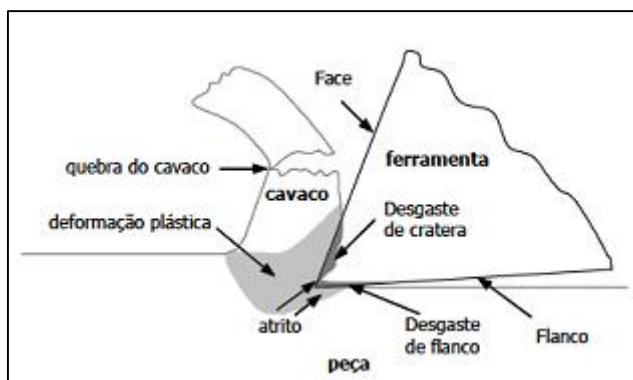
Souza (2004) assevera que oscilações na força de usinagem são causadas pela deformação plástica e o atrito entre o cavaco, a ferramenta de corte e a peça, produzindo vibrações de alta e baixa frequência. Com o tempo e o desgaste da ferramenta, esses sinais também apresentam variações. Assim, um sistema que possibilite estabelecer relações entre as variações das amplitudes das componentes da força de usinagem com o desgaste da ferramenta pode ser útil no monitoramento da vida da ferramenta em tempo real (SOUZA, 2004).

Na tentativa de encontrar o momento ótimo de troca da ferramenta, surgem os vários sensores, como os de emissão acústica. O monitoramento da emissão acústica no processo de torneamento apresenta-se como uma forma indireta e contínua de monitoramento, que auxilia na previsão de desgaste da ferramenta de corte. Outras variáveis importantes de monitoramento são a força de usinagem, a temperatura na interface ferramenta-peça e a rugosidade superficial.

2.4.1. Emissão acústica

O termo emissão acústica refere-se, usualmente, à onda de propagação elástica na frequência ultrassônica entre ~20-2000kHz (DORNFELD e HELU, 2008). Garcia et al (2013) assevera que emissão acústica se refere à propagação de uma onda de tensão em alta frequência por meio da rede cristalina de um material, proporcionando o rearranjo de suas estruturas internas, que libera energia de deformação, gerando ondas elásticas e provocando deslocamento da superfície do material. Devido à sua faixa de frequência, os ruídos oriundos do ambiente ou de fontes externas, que geralmente contaminariam o sinal requerido, podem ser minimizados usando filtros e o torneamento monitorado de forma mais eficaz (DORNFELD e HELU, 2008).

A geração do sinal de emissão acústica durante o processo de corte em metais está relacionada a quatro áreas distintas. Na zona primária, localizada à frente da ferramenta, ocorre deformação plástica do material durante a formação do cavaco com o cisalhamento do material. Na zona secundária, ao longo da face da ferramenta, ocorre a maior taxa de deformação do cavaco (zona de escorregamento), gerando o desgaste de cratera. No flanco da ferramenta localiza-se a zona terciária. Devido ao atrito com a peça, nesta zona gera-se o desgaste frontal. Por fim, na zona de fratura do cavaco ocorre a formação de fragmentos descontínuos do material. As quatro zonas estão elucidadas na Figura 2.



Fonte: Souza (2004, p. 84)

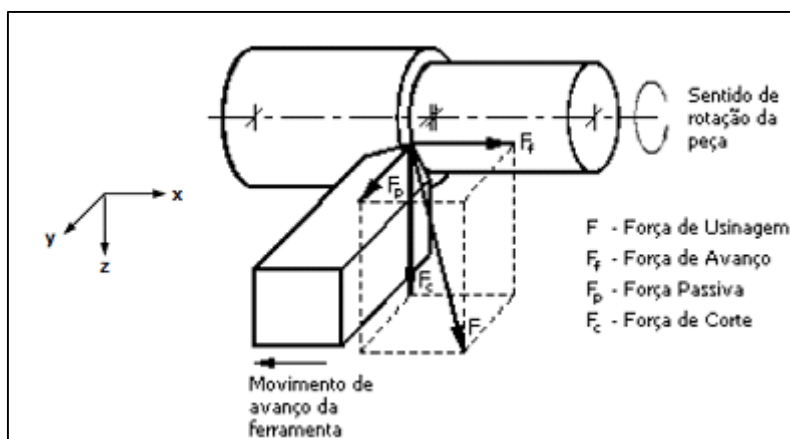
Figura 2 – Regiões de geração do sinal de emissão acústica

Pigari (2005) coloca ainda a possibilidade de se colocar um filtro tipo passa-banda quando uma determinada faixa de frequência é de maior interesse, visto que sinais de baixa frequência (vibração mecânica e ruídos do ambiente) podem ser filtrados.

2.4.2. Força de usinagem

Por meio da força de usinagem, pode-se determinar a potência necessária para realizar a operação e monitorar a condição da ferramenta (Garcia et al, 2013).

Souza (2004) coloca que a força de usinagem é aquela que atua sobre o gume durante a operação de corte. A Força de Usinagem (F) é uma resultante das componentes ortogonais Força de Avanço (F_f), Força Passiva (F_p) e Força de Corte (F_c), conforme mostrado na Figura 3 (SOUZA, 2004).



Fonte: Souza (2004, p. 77)

Figura 3 – Componentes ortogonais da força de usinagem no torneamento

Para se obter a força de usinagem, pode-se correlaciona-la com a potência e/ou corrente elétrica consumida pela máquina-ferramenta, pois a última é proporcional à primeira (SOUZA, 2004). Essa força é afetada pelo material da peça, material da ferramenta, velocidade, avanço e profundidade de corte, geometria da ferramenta e uso ou não de fluido de corte (TELES, 2007).

Pigari (2005) afirma que a força de usinagem se altera com o desgaste, quebra ou lascamento da ferramenta e, por isso, é um dos primeiros parâmetros utilizados no monitoramento indireto no processo de usinagem. Garcia et al (2013) coloca que o aumento da força de usinagem pode ser ocasionado por materiais que possuem maior resistência ao cisalhamento, alterações na

geometria da ferramenta (causado pelo desgaste) e aumento da área de contato entre peça e ferramenta. Já a diminuição da força de usinagem pode ocorrer devido ao aumento do ângulo de saída causado pelo aumento do desgaste de cratera (GARCIA et al, 2013).

2.4.3. Temperatura

A área de contato entre a ferramenta e a peça aumenta à medida que a ferramenta se desgasta, ampliando a região de atrito e consequentemente, elevando a temperatura de corte, conforme Pigari (2005). Teles (2007) coloca que ferramentas de corte revestidas são capazes de oferecer resistência ao ataque químico pelo material usinado em altas temperaturas. Dornfeld e Helu (2008) citam as vantagens do controle utilizando sensores de temperatura, afirmando que esses demonstraram reduzir erros térmicos, que são a maior fonte de erros de posicionamento em máquinas-ferramenta tradicionais e de precisão.

Entretanto, obter a temperatura de corte com precisão e exatidão é extremamente complexo devido ao difícil acesso à região do corte (SOUZA, 2004). O mesmo autor cita alguns métodos para se obter a temperatura de corte, como aplicação de termopares e medição da radiação infravermelho, sendo a primeira a mais utilizada (PIGARI, 2005).

Quanto ao calor gerado no corte, praticamente 60% é absorvido pela peça e os 40% restantes são transferidos para o cavaco (Boothroyd et al, 1967 apud Pigari, 2005), sendo somente uma pequena parte absorvida pela ferramenta. Teles (2007) coloca que determinados materiais como metal duro, cerâmica e cermets são ideais para usinagem a seco por sua resistência ao desgaste.

3. Metodologia do experimento

Neste estudo, foi torneado longitudinalmente e a seco um corpo de prova cilíndrico de ferro fundido nodular GGG40. O torno ROMI® modelo CENTUR 305 pertencente ao Laboratório de Usinagem e Automação da UFMG foi utilizado. A ferramenta de corte empregada é feita de metal duro revestido e possui raio de ponta de 0,8 mm, tipo S, com os quatro ângulos de 90°. As variáveis de entrada avanço (f) e velocidade de corte (V_c) sofreram variações para se avaliar o efeito nas saídas temperatura (t), emissão acústica (EA) e rugosidade (R_a). Foram monitorados ainda os dados da corrente elétrica do motor para se definir a força de corte (F_c) em cada teste.

Na montagem do experimento (Figura 4), foram instalados equipamentos para a captação do sinal de emissão acústica, da temperatura na interface ferramenta-peça e da corrente do motor.

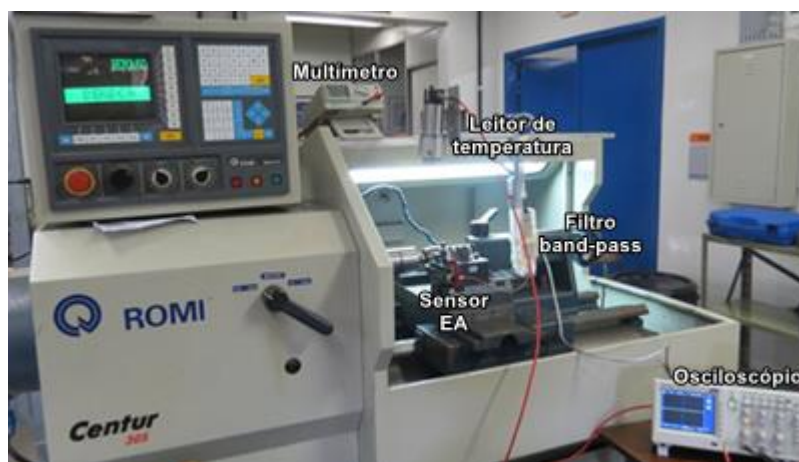


Figura 4 – Montagem do experimento

O sensor de emissão acústica (EA) de cerâmica piezoelétrica da Wyde Inc. modelo PSA300 foi

posicionado, por meio de um sargento, na base inferior da mesa sobre o eixo longitudinal para uma captação efetiva do sinal, já que a mesma acompanha a movimentação da ferramenta de corte. Conectado ao sensor de EA encontra-se o filtro band-pass tipo RC, que trabalha numa frequência de 150KHz. Interligado ao primeiro, encontra-se um segundo filtro amplificado linear de alta resolução DFF-01, utilizados para reduzir os ruídos ou outras perturbações indesejáveis (SOUZA, 2004). Acoplado ao segundo filtro encontra-se a fonte de alimentação 28V e o osciloscópio marca Tektronix® modelo TDS1001C-EDU. Por meio do osciloscópio, foi possível obter a variação do sinal de EA em RMS (Root Mean Square) ou Valor Quadrático Médio, que é um modo de avaliar a energia contida no sinal de EA (PIGARI, 2005) com a configuração de uma média de 64 amostragens. O modelo esquemático da captação e passagem do sinal de EA encontra-se na Figura 5.

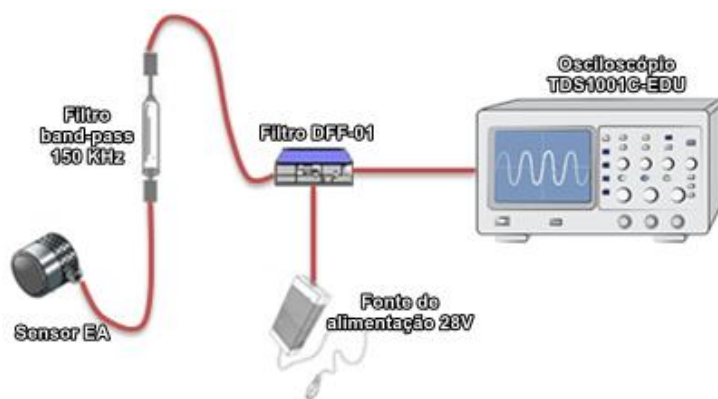


Figura 5 – Esquema de montagem para a captação do sinal de EA

Para se medir a temperatura na interface ferramenta-peça, foi posicionado um leitor de temperatura Raytek no suporte fixado no torno. O leitor envia o sinal para o computador, sendo o mesmo adquirido e mostrado numa linha contínua de tempo por meio do software DataTemp® Multidrop Rev. 5.3.1. A variável de interesse é a temperatura máxima obtida durante um determinado teste e assim foi configurado no software. A Figura 6 elucida o posicionamento do laser do leitor.

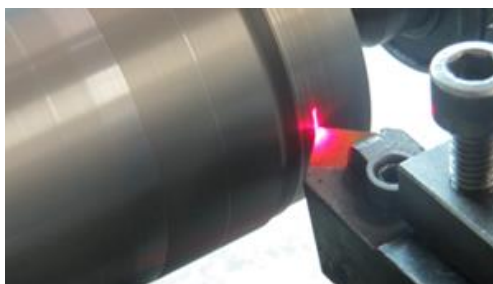


Figura 6 – Laser para leitura da temperatura na interface ferramenta-peça

A corrente do motor eixo-árvore do torno foi medida com um sensor de corrente LTS 25NP resolução 25 mVAC para cada Ampère (A) conectado ao cabo de força do motor. Ao sensor de corrente conectou-se um multímetro POLIMED® modelo PM-4650 ligado na escala 200mV.

Conforme Garcia et al (2013), é possível determinar a força de usinagem por meio da corrente do motor adquirida em cada etapa, utilizando a equação abaixo:

$$F_c = \frac{(\Delta I \cdot V \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \Phi \cdot \eta) \times 60}{V_c}$$

Onde:

F_c = Força de corte (N)

ΔI = Variação na corrente do motor (A)

V = Tensão de alimentação (220V)

$\cos \Phi$ = Fator de potência (0,95)

η = Rendimento para mecanismo (0,80)

V_c = Velocidade de corte (m/min)

Por fim, foram medidas as rugosidades em cada teste realizado. A rugosidade apresenta-se com uma medida de qualidade de uma superfície usinada (SOUZA, 2004). Assim, a rugosidade foi computada em R_a – *Roughness Average* ou rugosidade média, utilizando um rugosímetro Taylor-Robson modelo Surtronic 25. A rugosidade foi medida alinhando-se o rugosímetro com a castanha, obtendo-se 3 medições afastadas em 120°. Os dados coletados foram elencados em tabelas e gráficos gerados pelo software Excel® 2013.

4. Resultados e Discussão

A Tabela 1 mostra todos os dados coletados nos testes.

Teste	V_c [m/min]	f [mm/rot]	E_{ARMS} [mV]	Corrente inicial [A]	Corrente final [A]	T max [°C]	R_a média [μm]	F_c (N)
1	120	0,10	501	12,30	13,30	323,10	2,53	88,66
2		0,15	569	12,40	14,00	328,30	2,93	141,86
3		0,20	604	12,30	14,70	327,40	3,49	212,78
4		0,25	644	12,30	15,50	348,50	4,27	283,71
5	160	0,10	516	13,10	14,30	374,80	2,71	79,79
6		0,15	582	13,20	14,80	422,20	2,80	106,39
7		0,20	607	13,20	15,50	459,50	3,43	152,94
8		0,25	667	13,20	16,00	477,50	4,26	186,19
9	200	0,10	533	13,60	14,80	431,00	1,97	63,84
10		0,15	590	13,60	15,40	455,20	2,37	95,75
11		0,20	635	13,60	15,70	460,60	2,74	111,71
12		0,25	673	13,70	16,90	482,40	3,59	170,23
13	240	0,10	573	13,90	15,40	450,70	1,69	66,50
14		0,15	612	14,10	16,10	496,60	1,93	88,66
15		0,20	627	14,10	16,30	544,30	2,49	97,53
16		0,25	641	14,00	16,90	500,30	3,06	128,56

Tabela 1 – Resultados dos testes de torneamento

4.1. Emissão acústica

Cada teste da Tabela 1 gerou um gráfico no osciloscópio conforme exemplo da Figura 7.

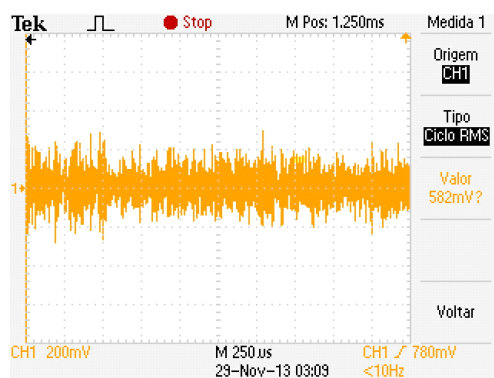


Figura 7 – Gráfico gerado pelo osciloscópio para o teste 6

Com os dados da variação da emissão acústica, foi gerado o gráfico apresentado na Figura 8.

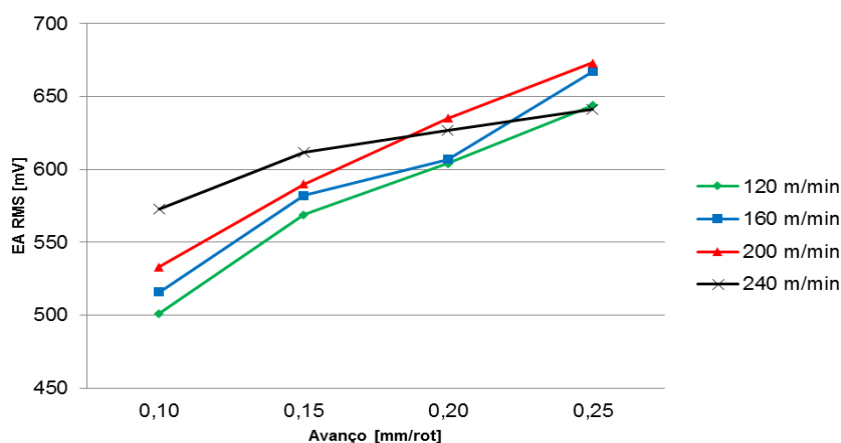


Figura 8 – Influência do avanço sobre o sinal de emissão acústica

À medida que a velocidade de corte aumenta, também aumenta o sinal de EA (SOUZA, 2004; PIGARI, 2005) relacionando o aumento do sinal com o acréscimo na quantidade de material deformado por unidade de tempo.

Conforme a Figura 8, em geral, o sinal de EA também apresentou comportamento crescente em relação ao aumento do avanço, com uma observação para a velocidade de 240 m/min que nos avanços de 0,20 e 0,25 não cresceu na mesma proporção que as demais velocidades. Pigari (2005) apresenta uma série de trabalhos em que a variação do sinal de EA não foi sensível à variação do avanço. Entretanto, o mesmo autor justifica a semelhança do comportamento do sinal de EA com o avanço e a velocidade de corte à medida que o processo de corte se aproxima do ideal, com ferramentas com arestas afiadas e pouco atrito, por exemplo, o que justifica o comportamento observado neste estudo.

4.2. Força de usinagem

A variação da força de usinagem é apresentada na Figura 9.

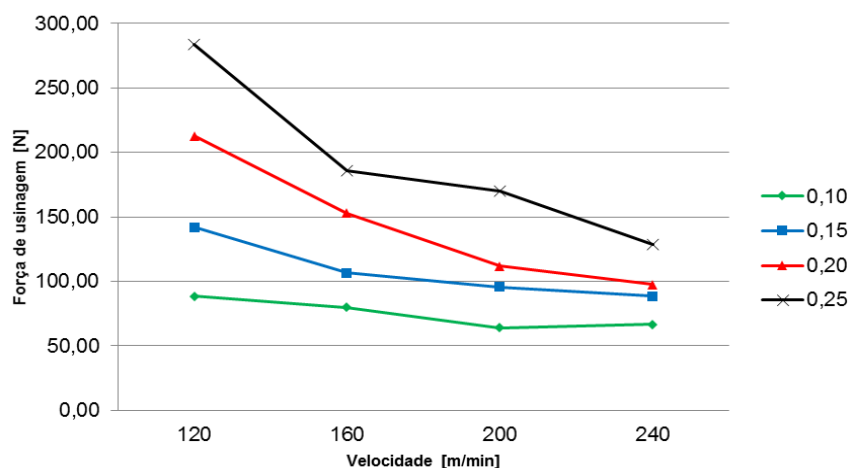


Figura 9 – Influência da velocidade de corte sobre a força de usinagem

Com o aumento da velocidade de corte, a tendência é que as forças de usinagem diminuam numa relação inversa segundo Teles (2007, p. 57): “O aumento da velocidade de corte normalmente tende a contribuir para reduzir a força de usinagem pela redução da resistência ao cisalhamento do material, devido ao calor gerado durante o corte”. Assim, o comportamento observado no gráfico está em conformidade com a teoria.

4.3. Temperatura

Os efeitos da velocidade de corte sobre a temperatura podem ser vistos na Figura 10.

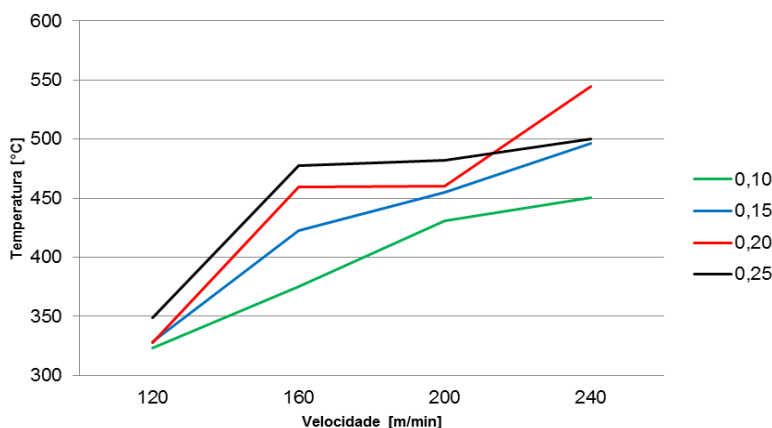


Figura 10 – Influência da velocidade de corte sobre a temperatura

O aumento da temperatura à medida que a velocidade cresce é um fenômeno natural já que o aumento da velocidade aumenta o atrito entre ferramenta-peça. No gráfico acima esta relação não é linear, sendo o aumento de temperatura (menor em relação à maior) para cada faixa de velocidade de 7%, 22%, 11% e 10%, respectivamente.

O fenômeno de variação da temperatura está mais intimamente associado ao desgaste da ferramenta do que ao aumento da velocidade de corte. Segundo Teles (2007) a temperatura de usinagem tem influência crítica no desgaste e na vida da ferramenta de corte pois a evolução do desgaste de cratera, por exemplo, é governada pela distribuição de temperatura ao longo da interface. Contudo, este item não está sendo avaliado diretamente neste estudo.

4.4. Rugosidade

A Figura 11 mostra a avaliação da rugosidade superficial para cada configuração testada.

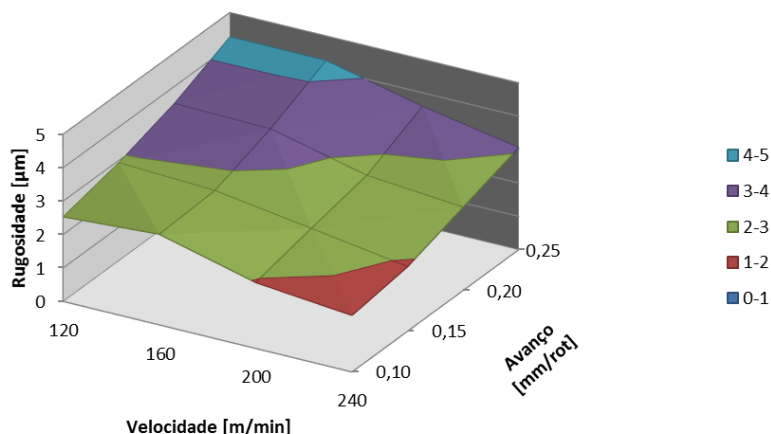


Figura 11 – Influência da velocidade de corte e do avanço sobre a rugosidade

No gráfico de área acima pode-se concluir que à medida que a velocidade aumenta e o avanço diminui, a rugosidade diminui resultando em melhores acabamentos superficiais. Segundo Souza (2004) o acabamento da superfície usinada sofre influência direta quando há um aumento da vibração, diminuindo a qualidade da superfície. Pigari (2005) assevera que em baixas velocidades o acabamento superficial apresenta baixa qualidade pois ocorre a formação de aresta postiça de corte: “[...] o material depositado transitoriamente na superfície de saída da ferramenta, tende a sair sob a forma de partículas, as quais aderem ao cavaco e à superfície da peça usinada” (PIGARI, 2005, p. 51). Assim, com o aumento da velocidade a tendência é que a rugosidade superficial diminua derivando em superfícies com maior qualidade, confirmando o comportamento observado na Figura 11.

5. Considerações finais

O torneamento do ferro fundido nodular GGG40 a seco realizado neste estudo proporcionou uma série de constatações. Dentre elas, uma das mais importantes é a interligação das diversas componentes analisadas e como as variações comportamentais de uma alteram as demais.

Em relação à emissão acústica, foi possível determinar sua correlação principalmente com a velocidade de corte, sendo que a primeira reflete o aumento da segunda; o mesmo comportamento não foi observado para variações de avanço.

O aumento da velocidade, por sua vez, contribui para a diminuição da força de usinagem visto que existe uma redução da resistência ao cisalhamento do material. Em relação à temperatura, o aumento da velocidade causa seu aumento, sendo este um fenômeno mais intimamente ligado ao desgaste da ferramenta de corte. Mais estudos são requeridos para se avaliar essa relação.

Por fim, analisou-se a relação velocidade e rugosidade. Maiores velocidades de corte, em geral, são responsáveis por melhores acabamentos da superfície usinada.

Frente aos resultados, a conexão entre as diversas variáveis envolvidas no torneamento do ferro fundido foi demonstrada. Para se produzir peças com qualidade e produtividade, reduzindo custos com manutenção, quebra de ferramentas e produtos não conformes, a introdução de um sistema que seja capaz de monitorá-las de forma adequada é fundamental, instituindo uma lógica eficaz de sensores inteligentes nas relações de variação existentes no processo.

Referências

- BOEHS, L.; AGUIAR, C. G.; FERREIRA, J.C.** *A Usinagem do ferro fundido nodular de fundição contínua*. Máquinas e Metais, pp.58-72, Jul. 2000.
- CHIAVERINI, V.** *Aços e ferros fundidos*. 6ª edição. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1990. 576 p.
- DEMEC – Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG. (2004)** *Monitoração de Processos*. Disponível em: <<http://www.demec.ufmg.br/Grupos/Usinagem/monitoramento.htm>>. Acesso em: 29 de Novembro de 2013.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.** *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. São Paulo: Editora Artliber, 2000.
- DORNFELD, D. A.; HELU, M. M.** *Precision manufacturing*. New York: Springer, 2008. 775p.
- GARCIA, et al.** *Influência dos parâmetros de usinagem na força de corte e emissão acústica no torneamento de um aço inoxidável 304*. XI Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica: La Plata, 2013.
- MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. D.** *Usinagem dos metais*. EDUFU, 8a versão, Uberlândia: UFU, 2004. 257 p.
- PIGARI, A. C.** *Monitoramento do desgaste da ferramenta no processo de torneamento usando emissão acústica*. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- SILVA, et al.** *Investigação da usinabilidade do ferro fundido nodular: primeira parte*. Uberlândia: 15º Simpósio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, 2005.
- SOUZA, A. J. D.** *Aplicação de multisensores no prognóstico da vida da ferramenta de corte em torneamento*. 226 P. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- TELES, J. M.** *Torneamento do ferro fundido nodular ferritizado com nóbio utilizando ferramentas de metal duro*. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.
- XAVIER, F. A.** *Aspectos tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN*. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.