

COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE FERRAMENTAS DE Si_3N_4 E Al_2O_3 NO TORNEAMENTO DO FERRO FUNDIDO NODULAR AUSTEMPERADO

Fábio Assunção Rosa, fabiorosa@ufsj.edu.br¹

Frederico Ozanan Neves, fred@ufsj.edu.br¹

Kurt Strecker, strecker@ufsj.edu.br¹

Tatiane Oliveira Rosa, oliveirarosatiane@gmail.com¹

Guilherme Germano Braga, guilhermebraga@ufsj.edu.br¹

UFSJ, Universidade Federal de São João Del Rei, DEMEC Campus Santo Antônio(CSA), Praça Frei Orlando, 170
Centro CEP: 36.307-352 São João del Rei - MG

Resumo: A especificação de ferramentas de usinagem, além de associar aspectos relacionados com a evolução tecnológica quanto aos seus materiais, projetos, texturas, também está relacionada à produtividade, redução de custos e com a qualidade dos produtos fabricados. Esta pesquisa teve por objetivo avaliar o desempenho de duas ferramentas cerâmicas, sendo uma a base de alumina e a outra de nitreto de silício, no torneamento longitudinal do ferro fundido nodular austemperado. Para os experimentos, utilizou-se um planejamento aleatorizado por níveis, modelo de efeito fixo, para dois níveis das variáveis de influência do processo, como o avanço da ferramenta (f) e a velocidade de corte (v_c). Na primeira fase, as variáveis de respostas foram a força de corte (F_c) e a rugosidade média (R_a), avaliados na condição da ferramenta nova. Como principal resultado desta fase, destaca-se que a ferramenta a base de alumina apresentou menores forças de corte, independente da condição de corte, enquanto que a ferramenta de nitreto de silício apresentou as menores rugosidades. Dando continuidade aos experimentos, optou-se por avaliar a integridade das superfícies das ferramentas nos níveis máximos de avanço da ferramenta e velocidade de corte, avaliando a rugosidade da peça usinada e os desgastes e/ou avarias da ferramenta para um comprimento de corte total de 256 metros. A ferramenta a base de alumina apresentou maior resistência ao desgaste, no entanto, em alguns ensaios, a mesma apresentou lascamento e quebra da aresta de corte no comprimento de corte de 34 metros. Como a ferramenta a base de alumina apresentou maior resistência ao desgaste, os valores de rugosidades não sofreram grandes alterações em função do mesmo. No entanto, os valores de rugosidade, utilizando-se ferramenta de nitreto de silício, sofreram forte influência do desgaste da ferramenta, alterando seus valores ao longo do processo.

Palavras-chave: ferramentas cerâmicas, esforços de usinagem, rugosidade, desgastes de ferramentas

1. INTRODUÇÃO

Considera-se ferro fundido a liga ferrosa ternária composta, principalmente, por ferro, carbono e silício sendo que, o teor de carbono presente nesta liga está acima de, aproximadamente, 2% e a quantidade de silício pode variar de 1 a 3% (GUESSER, 2009). Juntamente com os aços, os ferros fundidos são os materiais mais utilizados pela indústria, pois podem apresentar diversas propriedades mecânicas dependendo dos elementos de ligas presentes ou do tratamento térmico submetido.

De acordo com Guesser (2009), os ferros fundidos são classificados como: cinzento, nodular, maleável, vermicular e branco. Tal classificação é feita, principalmente, de acordo com a forma da grafita (nodular ou vermicular), outras vezes tem relação com o aspecto da fratura (cinzenta ou branca) ou com alguma propriedade mecânica relevante.

O ferro fundido nodular recebe este nome por apresentar a grafita em formas de nódulos ou esferas, tal processo ocorre devido à adição de magnésio (Mg) e/ou cério (Ce) que são capazes de modificar a forma e o crescimento da grafita, Figura 1.

Chiaverini (2012) ressalta que os ferros fundidos nodulares são caracterizados pela elevada dureza, pela ductilidade razoável, excelente resistência e pela boa usinabilidade. O destaque das propriedades do ferro fundido nodular está no limite de escoamento que é superior comparado com o ferro fundido cinzento e até mesmo aços-carbono comuns.

Os primeiros experimentos realizados com ferro fundido nodular austemperado, mas conhecido como ADI, da sigla em inglês (Austempered Ductile Iron), foram publicados nos anos 60 pela International Harvester (produtores de máquinas agrícolas e veículos). Por possuir como característica, a melhoria de propriedades mecânicas como: resistência ao desgaste, dureza e tenacidade, o ferro fundido nodular austemperado vem sendo utilizado em substituição aos outros ferros fundidos (GOLDBERG *et al.*, 2002).

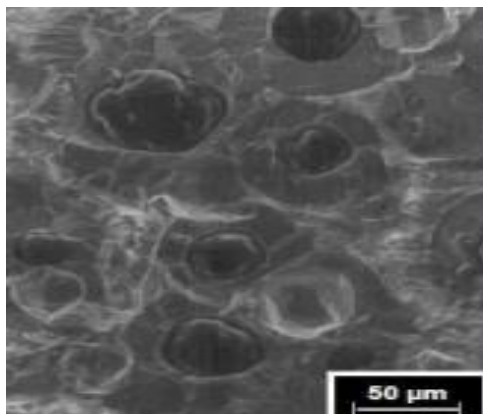


Figura 1. Morfologia da grafita do ferro fundido nodular (GUESSER, 2002).

Segundo Franco (2010), o ADI apresenta elevada resistência mecânica, superior a dos aços carbonos e forjados, ductilidade inferior a dos aços, mas muito superior às demais classe de ferros fundidos. Para Meena e Mansori (2011), estas propriedades conferidas ao ferro fundido nodular após austêmpera estão fazendo com que diversas peças produzidas anteriormente por aços forjados e outras classes de ferro fundido sejam produzidos em ADI.

A principal limitação técnica do ferro fundido nodular austemperado é atribuída a sua usinabilidade relativamente baixa. De acordo com Katuku *et al.*, (2010), em muitas classes de ADI, os componentes são geralmente pré-usinados antes do tratamento térmico de austêmpera e após tratamento térmico é realizado o acabamento. A usinagem do ADI após o tratamento de austêmpera é altamente desejável, porque pode economizar tempo e reduzir os custos de usinagem.

A principal dificuldade da usinagem do ferro fundido nodular austemperado está na sua elevada dureza e na sua microestrutura, pois, devido à presença de austenita com alto teor de carbono, ao sofrer deformação durante a usinagem a mesma se transforma em martensita (MEENA e MANSORI, 2011). No entanto, atualmente o desenvolvimento de ferramentas com elevadas resistências permite a usinagem de materiais com elevadas durezas. Materiais cerâmicos e o nitreto de boro cúbico (CBN) estão sendo empregados na indústria em usinagem de materiais endurecidos como o ADI devido suas propriedades, como elevada dureza à quente e resistência ao desgaste.

Atualmente tem-se disponível no mercado uma grande quantidade de materiais para ferramentas de corte. Com base nas características químicas, os principais materiais podem ser agrupados da seguinte maneira: aço rápido, aço rápido com cobertura, metal duro, metal duro com cobertura, cerâmica, nitreto de boro cúbico (CBC) e diamante (PCD), (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

Em se tratando de ferramentas de usinagem, características como, resistência ao desgaste, alta dureza em elevadas temperaturas, resistência ao lascamento e à fadiga, baixa reatividade com os materiais em usinagem e boa condutividade térmica são determinantes para o processo de torneamento (MACHADO *et al.*, 2009).

Ferramentas de usinagem fabricadas de metal duro, cerâmica e CBN são largamente utilizadas na usinagem do ferro fundido. Quando comparados com outros tipos de materiais para ferramentas, todos apresentam bons tempos de vida, mesmo utilizando maiores velocidades, avanços e profundidade de corte (XAVIER, 2003).

O material cerâmico é considerado ferramenta de usinagem desde a década de 50, quando as primeiras ferramentas foram utilizadas, mas só passou a ser um material com uma porcentagem não desprezível do mercado de ferramentas de usinagem na década de 80, depois dos desenvolvimentos conseguidos no campo das propriedades de cerâmica (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

A baixa tenacidade, propriedade inerente aos insertos cerâmicos, é o motivo pelo qual as ferramentas cerâmicas não fazem parte do mercado a mais tempo. No entanto, nos últimos anos, grandes esforços, em se tratando de pesquisa, têm sido feito com o objetivo de aumentar a tenacidade de insertos cerâmicos e bons resultados estão sendo obtidos.

A classe de ferramentas de usinagem confeccionadas a base de materiais cerâmicos é formada por várias classes de pastilhas, as quais estão divididas em dois grandes grupos em função do material empregado como matriz, que são o óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3) e o nitreto de silício (Si_3N_4) e diferem entre si de acordo com suas características e propriedades.

Pastilhas cerâmicas, a base de nitreto de silício (Si_3N_4) possuem melhor tenacidade quando comparado com as ferramentas à base de alumina. Além de possuir excelentes propriedades, tais como alta dureza a quente, resistência ao choque térmico, porém é inferior com relação à estabilidade química. Possui maior aplicação na usinagem de ferro fundido em desbaste onde, o cavaco curto não tende a causar difusão na superfície de saída da ferramenta e a dureza a quente, resistência ao choque térmico e a tenacidade são fundamentais (TRENT; WHIGHT 2000).

Sendo o ferro fundido nodular austemperado de vasta utilização na produção metal-mecânica, desde a indústria automotiva, ferroviária e bélica até em equipamentos para mineração e terraplanagem, optou-se por desenvolver esta pesquisa científica para investigar o desempenho de duas ferramentas cerâmicas, sendo uma a base de nitreto de silício

(Si_3N_4), e outra a base de alumina (Al_2O_3), na operação de torneamento, analisando a rugosidade e os esforços de usinagem para diferentes avanços da ferramenta e velocidade de corte.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Equipamentos Utilizados

Os ensaios foram realizados em um Centro de torneamento ROMI GL 240M com velocidade de avanço rápido longitudinal e transversal de 30 m/min, potência máxima na árvore de 15 kW, rotação máxima de 6000 rpm e CNC Fanuc Oi TD, conforme Figura 2.



Figura 2. Centro de torneamento Romi GL 240M.

Para o monitoramento das forças de usinagem, utilizou-se um dinamômetro piezoelétrico estacionário com quatro componentes Kistler 9272, um amplificador de sinais Kistler 5070A e o software DynoWare também fornecido pela Kistler. O sistema de aquisição de forças composto por estes equipamentos foi interligado em um microcomputador com processador Intel Pentium Dual Core 2.2GHz com 2GB de memória RAM. As Fig. 3 (a), 3 (b) e 3(c) ilustram tais equipamentos.

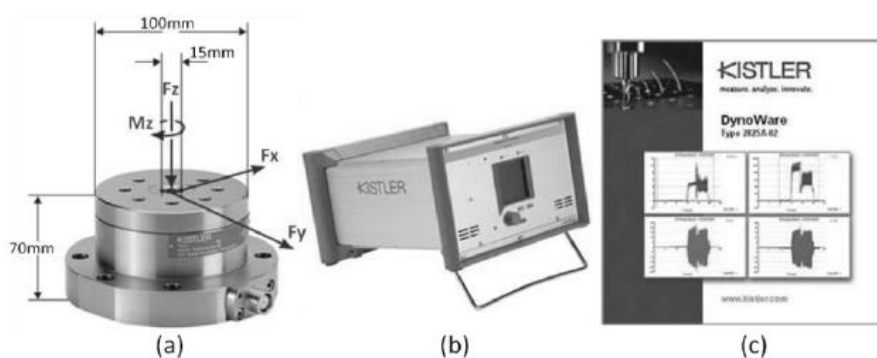


Figura 3. (a) Dinamômetro Kistler 9272; (b) amplificador de carga Kistler 5070A e (c) Software kistler DynoWare.

A rugosidade dos corpos de prova usinados foi obtida utilizando-se o rugosímetro Surftest SJ-400 Mitutoyo conforme Fig. 4 (a). Para análise, avaliação e fotos das superfícies das pastilhas utilizou-se um microscópio Mitutoyo TM-500 com câmera Moticam 2300, 3.0 MPixels e software de processamento de imagens Motic Images Plus 2.0, conforme Fig. 4 (b).



Figura 4. (a) Rugosímetro surftest SJ-400 Mitutoyo; (b) Microscópio Mitutoyo TM-500 com câmera Moticam 2300.

2.2. Ferramentas de Usinagem

O suporte e as pastilhas utilizadas nos ensaios foram adquiridos da Sandvik do Brasil S/A. Utilizaram-se duas pastilhas cerâmicas nos ensaios, sendo uma com matriz a base de Alumina (Al_2O_3) e a outra tendo como base o Nitreto de Silício (Si_3N_4), conforme mostrado na Fig. 5 (a). Utilizou-se um porta ferramenta convencional esquerdo para torneamento externo com ângulo de posição da aresta de corte ($-\chi_r$) de 95° , com fixação rígida e de seção transversal de 16mm x 16mm. Trata-se de um modelo Coroturn para torneamento longitudinal cujo código ISO é DCLNL 1616H12-2, conforme a Fig. 5 (b).

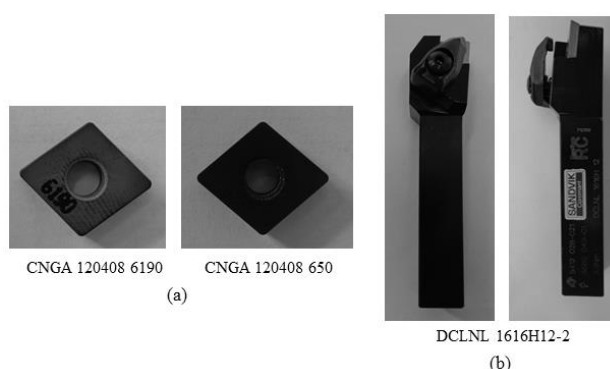


Figura 5. (a) Ferramentas de usinagem; (b) Porta ferramentas.

2.3. Metodologia

Os fatores de controle (variáveis de entrada) avaliados no torneamento das peças, bem como seus respectivos níveis são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1. Fatores de controle e níveis adotados.

Fatores de Controle	Unidade	Níveis (3réplicas)	Especificações
Ferramentas	-	2	Si_3N_4 e Al_2O_3
Tipo de material	-	1	FoFo nodular austemperado
Fluido de corte	-	1	Sem fluido
Avanço (f)	mm/rot	2	0,10; 0,20
Prof. de corte (ap)	mm	1	1
Velocidade de corte (v_c)	m/min	2	350; 450

As variáveis de resposta do processo de torneamento avaliadas nesta pesquisa foram força de corte (Fc) e rugosidade média (Ra). A usinagem foi realizada longitudinalmente em um comprimento de 20 mm. As forças foram monitoradas em todos os experimentos e os parâmetros de rugosidade medidos na região central do corpo de prova usinado e em três posições equidistantes de 120° cada. A Fig. 6 ilustra a montagem do dinamômetro na máquina.

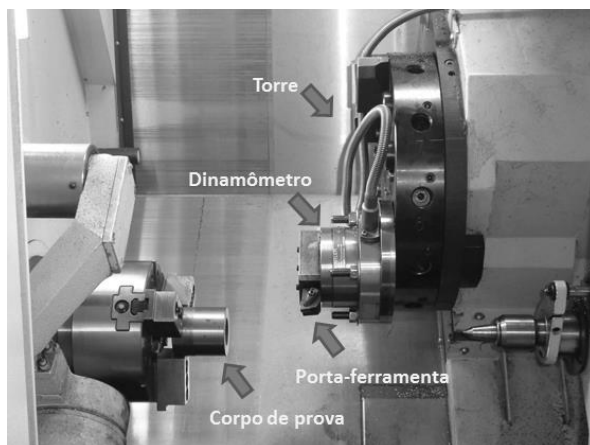


Figura 6. Porta-ferramentas e dinamômetro montados na torre do centro de torneamento.

Para a integridade dos resultados das forças de usinagem e da rugosidade das peças, em cada ensaio, ou corpo de prova, utilizou-se uma nova aresta da pastilha. Os resultados foram analisados desconsiderando-se o regime transiente (início) da operação, durante o qual os valores das forças de usinagem apresentam oscilações. Cada ensaio teve uma taxa de amostragem de 1000 Hz, resultando em 10000 aquisições por ensaio, com obtenção de valores médios e limites das componentes da força de usinagem.

Foram feitas três réplicas de cada ensaio para se obter uma estimativa de como o erro experimental afetava os resultados e se os mesmos eram estatisticamente confiáveis. Os experimentos seguem o planejamento fatorial do tipo $1^3 \times 2^3 \times 3$, totalizando 24 ensaios. A ordem de execução dos ensaios foi aleatorizada, garantindo que as variáveis pesquisadas e os erros experimentais observados apresentem caráter também aleatório. A Tab. 2 apresenta todas as variáveis de resposta estudadas.

Tabelas 2. Variáveis de resposta estudadas no experimento de torneamento.

Variáveis de resposta	Unidade	Tipo
Força de corte (F_c)	N	Quantitativa
Rugosidade média (R_a)	μm	Quantitativa
Desgastes/avarias	μm	Quantitativa

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Força de corte

Para análise da força de corte envolvida no processo de torneamento do ferro fundido nodular austemperado foi aplicada a ferramenta ANOVA nos dados coletados nos 24 ensaios. Obtiveram-se os resultados da relação F_{calc} (F calculado) encontrados na Tab. 3 entre a somatória dos quadrados dos tratamentos (i) ferramenta, (j) velocidade de corte e (k) avanço, assim como suas interações (ij), (ik), (jk) e (ijk), pelo dos erros, passíveis de afirmar com confiança de 95% sobre as diferenças significativas das variáveis de influência para a de resposta do processo.

Tabela 3. Análise de variância para a força de corte (F_c).

	GL	MSS	F_{calc}	F_{tab}	Resultado
SS Ferramenta (i)	1	25096,49	334,15	4,49	A Var (i) influencia
SS Velocidade de corte (j)	1	2399,00	31,94	4,49	A Var (j) influencia
SS Avanço (k)	1	176942,01	2355,92	4,49	A Var (k) influencia
SSint Fmta x Vc (ij)	1	34,87	0,46	4,49	Não existe interação das Var (ij)
SSint Fmta x Avanço (ik)	1	424,62	5,65	4,49	Existe interação das Var (ik)
SSint Vc x Avanço (jk)	1	809,33	10,78	4,49	Existe interação das Var (jk)
SS int Fmta x Vc x Avanço (ijk)	1	798,91	10,64	4,49	Existe interação das Var (ijk)

Da análise dos resultados do torneamento longitudinal do ferro fundido nodular austemperado quando utilizado duas ferramentas cerâmicas, sendo uma a base de Alumina e outra com matriz a base de Nitreto de Silício, duas velocidades de corte e dois avanços, pode-se afirmar estatisticamente e com 95% de confiança que, para as condições analisadas, todas as variáveis influenciam na força de corte. Sendo o avanço (k) f1 (0,1 mm/rot), a ferramenta (i) F2 (CNGA 120408) e a velocidade de corte (j) v_c2 (450 m/min) a ordem de parâmetros que, independentemente uma das outras, menos diferenças aferem a força de corte (F_c).

Pode-se afirmar ainda, que, existe interação entre as variáveis ferramenta e avanço, velocidade de corte e avanço e entre ambas variáveis. Apenas não existe interação entre as variáveis ferramenta e velocidade de corte.

Para avaliar as melhores condições de usinagem com relação à força de corte, ou seja, avaliar quais são os parâmetros em que se têm menores forças de corte, foi realizado o teste estatístico de contraste entre as variáveis que possuem interação no processo.

Os resultados mostram não haver diferenças das análises já sugeridas acima, ou seja, de acordo com o contraste realizado entre velocidade de corte e avanço é possível afirmar que todas as interações possuem valores diferentes sendo que, a condição que apresentou melhores resultados foi a interação entre a velocidade de corte 2 (450 m/min) juntamente com avanço 1 (0,1mm/rot). Já, com relação ao teste contraste realizando entre as variáveis ferramenta e avanço pode-se concluir que, a condição que apresentou menores esforços de corte foi a interação entre a ferramenta 2 (ferramenta com matriz a base de Al_2O_3) juntamente com o avanço 1 (0,1 mm/rot).

Nota-se que o resultado das forças de corte nos mostra diferenças ocasionadas para as variáveis de influência do processo, conforme visto na Fig. 7 (a) e na Fig. 7 (b), percebendo o melhor desempenho da ferramenta F2: ferramenta com matriz a base de Alumina (Al_2O_3). Este comportamento pode ser atribuído ao fato da ferramenta cerâmica à base de Alumina possuir menor tenacidade e maior resistência ao desgaste e por isso não absorver as vibrações e oscilações geradas durante o torneamento.

Percebe-se, também, que, com o aumento do avanço, tem-se no processo de usinagem um aumento da força de corte, tal fato ocorre devido ao aumento da área de corte e, conseqüentemente, um aumento da taxa de material removida durante o processo.

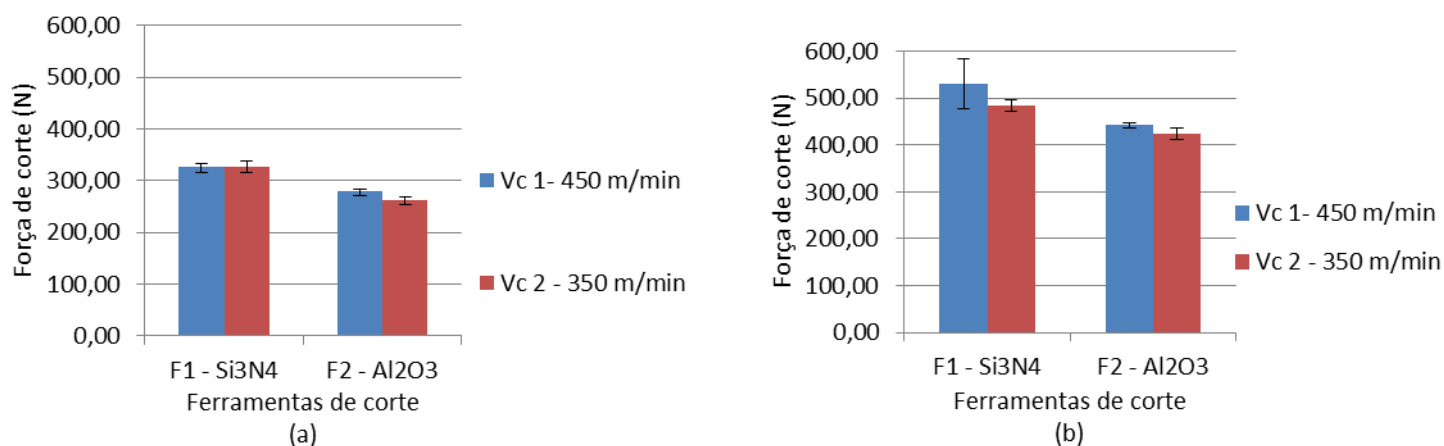


Figura 7. (a) Forças de corte média com avanço de 0,1 mm/rotação. (b) Forças de corte média com avanço de 0,2 mm/rotação.

3.2. Rugosidade média (R_a)

Através da análise de variância (ANOVA), também foi possível avaliar os parâmetros de rugosidade média, sendo que, as variáveis ferramenta de usinagem, velocidade de corte e avanço exercem influência sobre o processo. É possível, também, afirmar que, existe interação entre todas as variáveis. A Tabela 4 apresenta os resultados da análise de variância para a rugosidade média.

Tabela 4. Análise de variância para a rugosidade média (Ra).

	GL	MSS	Fcalc	Ftab	Resultado
SS Ferramenta (i)	1	2,19	502,12	4,49	A Var (i) influencia
SS Velocidade de corte (j)	1	0,66	150,67	4,49	A Var (j) influencia
SS Avanço (k)	1	7,19	1646,19	4,49	A Var (k) influencia
SSint Fmta x Vc (ij)	1	0,26	60,61	4,49	Existe interação das Var (ij)
SSint Fmta x Avanço (ik)	1	0,63	144,67	4,49	Existe interação das Var (ik)
SSint Vc x Avanço (jk)	1	0,46	105,20	4,49	Existe interação das Var (jk)
SS int Fmta x Vc x Avanço (ijk)	1	0,42	96,92	4,49	Existe interação das Var (ijk)

Com relação à rugosidade média, pode-se observar através da Fig. 8 (a) e Fig. 8 (b), que Ra cresce com o aumento do avanço, tal fato ocorre devido às contribuições geométricas do avanço. No entanto, de acordo com Diniz *et al.* (2013), com o aumento do avanço, a pressão de corte diminui tornando mais fácil a formação do cavaco e consequentemente tem-se uma melhora na rugosidade. Acredita-se que esse comportamento atípico ocorreu devido ao aumento da vibração do conjunto máquina-ferramenta em função do aumento do avanço.

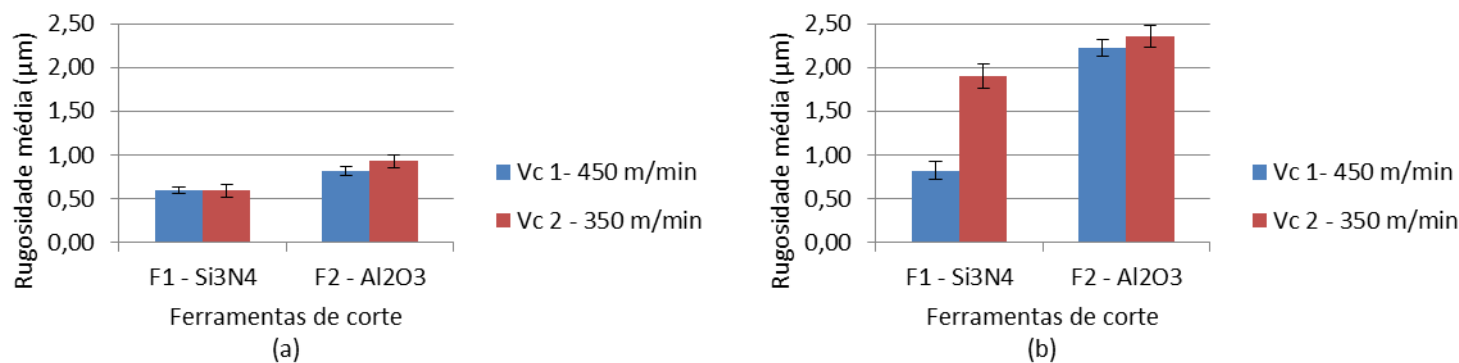


Figura 8. (a) Rugosidade média com avanço de 0,1 mm/rotação. (b) Rugosidade média com avanço de 0,2 mm/rotação.

3.3. Desgastes/avarias

Foi possível observar através das imagens feitas no microscópio Mitutoyo TM-500 que, tanto a ferramenta de nitreto de silício (F1), quanto à ferramenta a base de alumina (F2), apresentaram desgaste de flanco e desgaste de entalhe. A Figura 9 apresenta a evolução do desgaste de flanco em função do aumento do comprimento de corte para a ferramenta de nitreto de silício (F1) e para a ferramenta a base de alumina (F2). Nota-se uma maior resistência da ferramenta a base de alumina ao desgaste de flanco. Tal comportamento já era esperado, pois, de acordo com o fabricante e com a revisão da literatura, ferramentas cerâmicas a base de alumina possuem maior resistência ao desgaste. Observa-se que no comprimento de corte (Lc) de 256 metros a ferramenta F2 apresenta desgaste de flanco de 131,1 μm, enquanto a ferramenta F1 apresenta apenas 350 μm de desgaste de flanco.

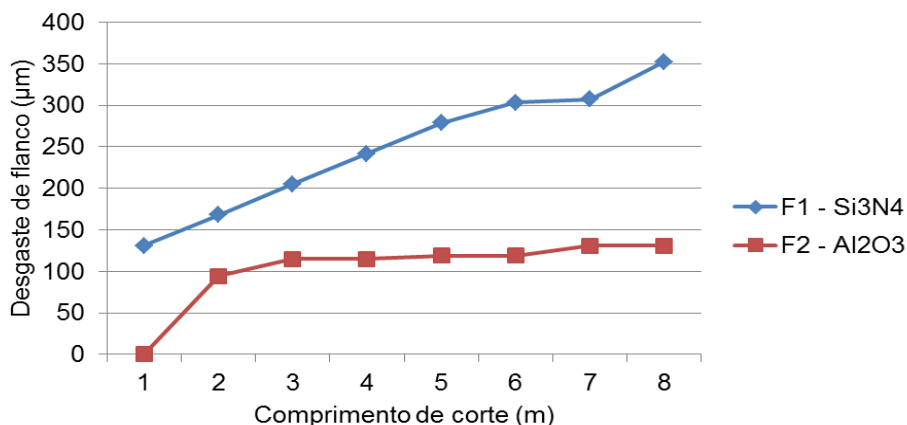


Figura 9. Evolução do desgaste de flanco.

O comportamento das ferramentas cerâmicas com relação ao desgaste de entalhe foi semelhante ao comportamento das mesmas com relação ao desgaste de flanco. A ferramenta a base de alumina apresentou melhor desempenho, ou seja, desgaste de entalhe com valores inferiores. Observa-se também, através da Fig. 10, que o desgaste de entalhe começou a aparecer na ferramenta F2 apenas a partir do comprimento de corte de 68 metros.

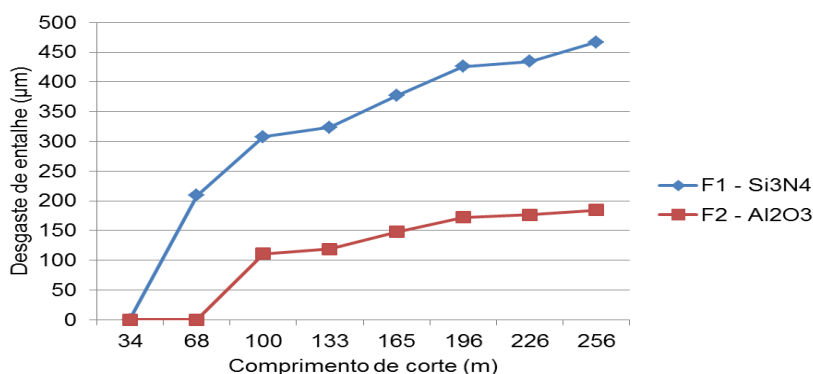


Figura 10. Evolução do desgaste de entalhe.

A Figura 11 apresenta os valores da rugosidade média mensurada após cada comprimento de corte (cada passe). Sendo assim, através da mesma, é possível avaliar o comportamento da rugosidade média, em função da evolução dos desgastes das ferramentas de corte.

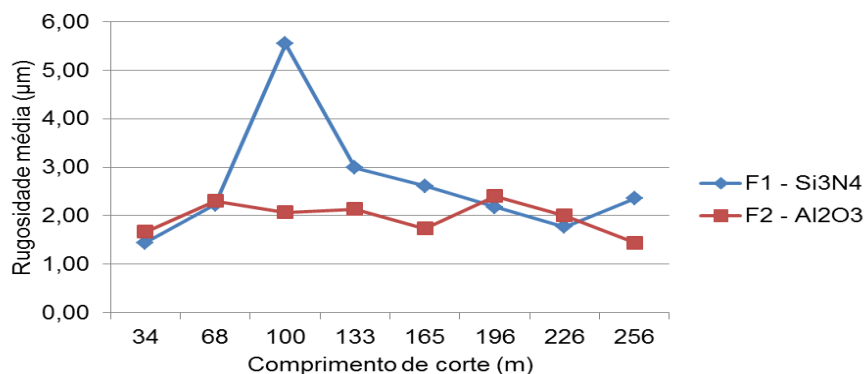


Figura 11. Rugosidade média em função do comprimento de corte.

Nota-se através do gráfico apresentado na Fig. 11 que no comprimento de corte de 34 metros os valores da rugosidade média apresentado pela ferramenta F1 (Si₃N₄) é menor do que o valor apresentado pela ferramenta F2

(Al_2O_3). No entanto, a partir do próximo passe da ferramenta de corte F1, o acabamento superficial da peça começa a piorar em decorrência do desgaste.

A rugosidade superficial aumenta seu valor com o aumento do desgaste de flanco até o comprimento de corte 100 metros. Entretanto, a partir desse ponto o comportamento da rugosidade sofre uma inversão, ou seja, com o aumento do desgaste de flanco (aumento do comprimento de corte) a rugosidade superficial apresentou menores valores, proporcionando um melhor acabamento superficial a peça trabalhada. Tal fenômeno pode ser associado ao arredondamento da aresta de corte ocorrido no comprimento de corte de 100 m. Com o arredondamento da aresta de corte o atrito na interface ferramenta-peça diminui provocando uma melhora no acabamento superficial. Esse fenômeno também é conhecido como aresta alisadora.

Como a ferramenta a base de alumina possui uma maior resistência ao desgaste, à rugosidade superficial deixada pela mesma apresenta um comportamento mais homogêneo, onde a evolução do desgaste de flanco não exerce grandes influências no acabamento superficial da peça trabalhada.

Conforme visto acima, a ferramenta a base de alumina (F2) apresentou menores desgastes de flanco e de entalhe em função do comprimento de corte quando comparado com a ferramenta F1 (nitreto de silício). No entanto para que a curva desgaste x comprimento de corte fosse levantada para a ferramenta F1 foram necessárias quatro tentativas. Em três das tentativas, por se tratar de uma ferramenta com menor tenacidade, a mesma sofreu avarias como lascamento e quebra da aresta de corte. As avarias sofridas pela ferramenta a base de alumina podem estar associadas com o grau de vibração do sistema. Dessa forma, ao optar trabalhar com a ferramenta de corte F2 faz-se necessário uma condição estável de corte, onde as vibrações do sistema sejam mínimas.

4. CONCLUSÕES

Do torneamento do ferro fundido nodular austemperado, onde foram utilizadas ferramentas cerâmicas em dois níveis, dois níveis de velocidade de corte e também dois níveis de avanço, para avaliação dos esforços de corte e rugosidade média, pode-se concluir que:

- Todas as variáveis exercem influência sobre os esforços de corte.
- Com relação à força de corte, só não existe interação entre as variáveis ferramenta de usinagem e velocidade e corte.
- A variável avanço da ferramenta foi a que maior resíduo apresentou para a diferença das médias das forças de corte encontradas.
- Os valores encontrados para rugosidade média (R_a) são influenciados por todas as variáveis estudadas e existe interação entre as mesmas.
- A variável avanço da ferramenta foi a que maior resíduo apresentou com relação à rugosidade média.

Dos experimentos realizados, com velocidade de corte (450 m/min), avanço (0,2 mm/rot) e profundidade de corte (1 mm) constantes, para avaliação dos desgastes das ferramentas em função do comprimento de corte, pode-se concluir que:

- Foi observado que, no comprimento de corte de 256 metros, tanto a ferramenta F1 (Si_3N_4) quanto a ferramenta F2 (Al_2O_3) apresentaram desgastes de flanco e de cratera.
- Apesar de apresentar maior resistência ao desgaste, a ferramenta F2 apresentou, durante a execução dos ensaios, avarias como lascamento e quebra da aresta de corte.
- A partir do comprimento de corte de 100 metros, para a ferramenta F1, a rugosidade média (R_a) começou a reduzir em função do aumento do comprimento de corte (aumento do desgaste de flanco).
- O acabamento superficial deixado pela ferramenta F2 não sofreu grandes influências em função do aumento do desgaste de flanco.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a FAPEMIG, pelo apoio financeiro concedido para a execução deste trabalho e a SANDVIK pela doação das ferramentas de usinagem utilizadas nos experimentos.

6. REFERÊNCIAS

- Chiaverini, V. Aços e Ferros Fundidos. 7^a ed. São Paulo, Ed. ABM, 518p, 2012.
- Diniz, A.S.; Marcondes, F.C.; Coppini, N.L.; Tecnologia da usinagem dos materiais. 5 ed, São Paulo, Ed Artliber Ltda, 255p, 2013.
- Franco, F. J. S. Influência da deformação superficial induzida na resistência à fadiga do ferro fundido nodular austemperado. 2010. 116 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Ufmg, Belo Horizonte, 2010.

- Goldberg, M.; Berry, J.T.; Littlefair, G.; Smith, G. A Study of the Machinability of an ASTM Grade 3 Austempered Ductile Iron. World International Conference on Austempered Ductile Iron, Mississippi State, USA. 2002.
- Guesser, W. L. Propriedades mecânicas dos ferros fundidos. São Paulo, Ed. Blucher, 336p, 2009.
- Guesser, W. L. Ferro fundido com grafita compactada. Metalurgia e Materiais. Publicação Técnica, Junho, 2002.
- Katuku, K; A Koursaris,; Sigalas, I. Wear Mechanisms of PcBN cutting tools when dry turning ASTM Grade 2 austempered ductile iron under finishing conditions. Elsevier Wear, n. 268, p.294-301, 2010.
- Machado, A.R.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; Sila, M. B.; Teoria da usinagem dos materiais. Ed Blucher, São Paulo, 371p, 2009.
- Meena, A.; Mansori, M El. Study of dry and minimum quantity lubrication drilling of novel austempered ductile iron (ADI) for automotive applications. Elsevier Wear, n. 271, p.2412-2416, 2011.
- Trent, E; Wright, P. Metal Cutting. 4th ed. Boston, USA: Butterworth Heinemann, 2000.
- Xavier, F. A. Aspectos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal-Duro, Cerâmica e CBN. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2003.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

COMPARISON OF PERFORMANCE OF Si₃N₄ AND Al₂O₃ TOOLS IN TURNING THE AUSTEMPERED DUCTILE IRON

Fábio Assunção Rosa, fabiorosa@ufs.br¹
Frederico Ozanan Neves, fred@ufs.br¹
Kurt Strecker, strecker@ufs.br¹
Tatiane Oliveira Rosa, oliveirarosatiane@gmail.com¹
Guilherme Germano Braga, guilhermebraga@ufs.br¹

Federal University of São João del Rei - UFSJ, São João del Rei, MG, Brazil

Abstract. The machining tools specification, in addition to associate aspects of technological evolution as its materials, designs and textures, is also related to productivity, cost reduction and the quality of manufactured products. This research aimed to evaluate the performance of two ceramic tools, alumina- and pure silicon nitride-based, in longitudinal turning of austempering nodular cast iron. In the experiments, we used a randomized planning per levels, fixed effect model, for two levels of the influence variables of the process such as the tool feeding (f) and the cutting speed (v_c). At this phase, the response variables were the machining, represented by the cutting force (F_c) and the average roughness (Ra) assessed in the condition of the new tool. The main result of this first phase, it is emphasized that the alumina-based tool presented less machining effort, regardless of cutting condition, while pure silicon nitride tool had the lowest roughness. Continuing the experiments, we chose to evaluate the integrity of the surfaces of the tools at optimum levels of tool feed and cutting speed by evaluating the roughness of the machined part and the wear and tear and/or damage of the tool for a total cutting length of 256 meters. The alumina-based tool showed higher wear and tear resistance, however, in some tests, it showed chipping and breakage of the cutting edge on the cutting length of 34 meters. Since the alumina-based tool showed higher wear and tear resistance, the roughness values did not suffer considerable changes as a result of it. However, the roughness values when used the pure silicon nitride tool have been strongly influenced due to wear and tear of the tool, changing their values throughout the process.

Keywords: ceramic tools, machining efforts, roughness, wear and tear of the tools.

1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.