

USINABILIDADE DE PERFIS CONTÍNUOS DE FERROS FUNDIDOS NODULARES DAS CLASSES FE-45012 E FE-50007

Wilson Luiz Guesser; Dilço C. Júnior

Fundação Tupy e FEJ/UEDESC
Rua Albano Schmidt, 3400
89206-900 - Joinville - SC - Brasil
Fone: (47) 441.8265
e-mail: wguesser@tupy.com.br
dilcojr@tupy.com.br

Lourival Boehs; Delmonte N. Friedrich

Departamento de Engenharia Mecânica
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
88049 – 900 – Florianópolis – SC – Brasil
Fone: (48) 331.9387 r.201; Fax: (48) 234.1519
e-mail: lb@grucon.ufsc.br
delmonte@mbox1.ufsc.br

Resumo - Perfis cilíndricos, retangulares e quadrados, de ferro fundido nodular, obtidos por fundição contínua, são fortes concorrentes de perfis de aços com propriedades mecânicas similares. Dado essas propriedades e as características geométricas desses perfis, estes são aplicados vantajosamente na fabricação de ampla gama de componentes mecânicos e elementos de máquinas. Visando a otimização dos processos de usinagem, o presente trabalho tem como objetivo estudar a usinabilidade de perfis das classes FE-45012 e FE-50007, com diferentes percentuais de silício em suas composições químicas e, conseqüentemente, distintas microestruturas. Para realizar esse estudo tratou-se a seção transversal desses perfis por camadas, o que permitiu avaliar a influência, na usinabilidade, das diferentes microestruturas resultantes das velocidades de solidificação e resfriamento em cada posição ao longo da seção transversal. A pesquisa foi realizada através de ensaios de torneamento de longa duração, tendo como parâmetro para avaliação da usinabilidade o desgaste no flanco das ferramentas de metal duro com múltiplas camadas de revestimento. Os resultados são discutidos, correlacionando-se a influência do teor de silício na microestrutura presente ao longo da seção transversal desses perfis e, também, a interação dessa microestrutura com a evolução do desgaste observado no flanco das ferramentas de usinagem.

Palavras-chave: Ferro fundido nodular, usinabilidade, ferramenta de metal duro, desgaste de flanco.

Abstract - Cylindrical, rectangular and squares profiles of nodular cast iron obtained by continuous casting are strong competitors of steel profiles with similar mechanical properties. Because of these properties and the geometric characteristics of these profiles, they are being applied to advantage in the manufacturing of many mechanical components and machine elements. Seeking the optimization of machining process, this research has an objective of the studying the machinability of the profiles of FE-45012 and FE-50007 grades. Spheroidal Graphite Cast Irons with different chemical compositions and different microstructures were researched by studying the machinability in different microstructures that are resultants of the distinct velocities of solidification and quenching in each position along the cross-section of these profiles. The machinability was evaluated by long duration turning tests by measuring the flank wear of hard metal tools with multiple layers of chemical coats during the time of the machining. The results are discussed, by correlating the chemical composition and the microstructure present in profiles with the evolution of the wear observed in the flanks of the machining tools.

Key-words: Nodular cast iron, machinability, hard metal tool, flank wear.

INTRODUÇÃO

O processo de fundição contínua representa uma interessante alternativa para a fabricação de peças de ferros fundidos, produzindo-se um perfil de ferro fundido que posteriormente é usinado [4]. Por este processo são fabricadas diversas classes de ferros fundidos cinzentos e nodulares, produzindo-se peças tais como engrenagens, moldes para vidraria, comandos hidráulicos, êmbolos de pistões hidráulicos, buchas, polias, capas de mancal e peças diversas para manutenção [5]. Devido à extensa usinagem que o componente sofre, é importante que a usinabilidade do material do perfil seja compatível com as necessidades de custo e produtividade. Deste modo, a Fundação Tupy e o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina vêm realizando estudos para caracterizar o efeito da composição química e da microestrutura de ferros fundidos nodulares, obtidos por fundição contínua, sobre a usinabilidade dos mesmos, objetivando fornecer informações otimizadas de usinagem aos usuários de perfis desses ferros fundidos.

Em trabalho anterior [3], com ferro fundido nodular da classe FE-50007, foi possível caracterizar que dentre vários tipos de ferramentas de metal duro, utilizadas na referida pesquisa, a que apresentou melhor desempenho foi a GC 3015-Sandvik, com revestimento de nitreto de titânio [8]. Além disso, para o material estudado, não se constatou efeito significativo da variação dos microconstituintes e da dureza ao longo da seção do perfil, tanto sobre o desgaste de flanco como sobre as forças de corte e de avanço.

No presente trabalho, objetiva-se estudar o efeito do teor de silício do ferro fundido nodular (classes FE-45012 e FE-50007) sobre o desgaste da ferramenta, em operação de torneamento.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios de torneamento longitudinal, externo, de longa duração e a seco, foram realizados em um torno universal rígido, potência de acionamento de 22 kW e dotado de um variador contínuo de velocidade, o qual permitiu o emprego da velocidade de 250 m/min constante, independentemente do diâmetro do perfil usinado [2]. Nesta mesma máquina também realizou-se a pré-usinagem dos corpos-de-prova, removendo destes a camada externa, "carepa", com espessura da ordem de 1,5 mm, pois esta geralmente apresenta características bem diferentes do restante do material, principalmente no tocante à dureza. O avanço e a profundidade de corte empregados foram de 0,2 mm e 2,5 mm, respectivamente.

A seção transversal de cada corpo-de-prova foi tratada por camadas. Foram traçados gráficos "tempo de usinagem x desgaste de flanco" [2] para cada uma dessas três camadas de cada barra, sendo o experimento de usinagem interrompido quando o valor desse desgaste atingia 0,3 mm [5] ou quando esgotava o material disponível para os experimentos.

Foram utilizadas ferramentas de metal duro com revestimento de titânio SNMA120408, sem quebra-cavacos, da classe ISO K10 (GC3015). Utilizou-se o suporte SANDVIK de referência PSBNR 2525M 12 indicado para tais ferramentas [8].

O comportamento do desgaste das ferramentas foi acompanhado através da medição do desgaste de flanco das mesmas, figura 1, de acordo com a norma ISO [6] utilizando-se para tal um microscópio de ferramentaria. Com um microscópio eletrônico de varredura (Philips, modelo XL 30) foram documentados tanto os desgastes das pastilhas quanto os cavacos gerados na usinagem de cada classe de ferro fundido.

Para comparar o desgaste de flanco entre diferentes ferramentas foi utilizado um método estatístico denominado teste "t" para duas amostras supondo igualdade entre as variâncias de suas médias, com confiabilidade de 95% [7].

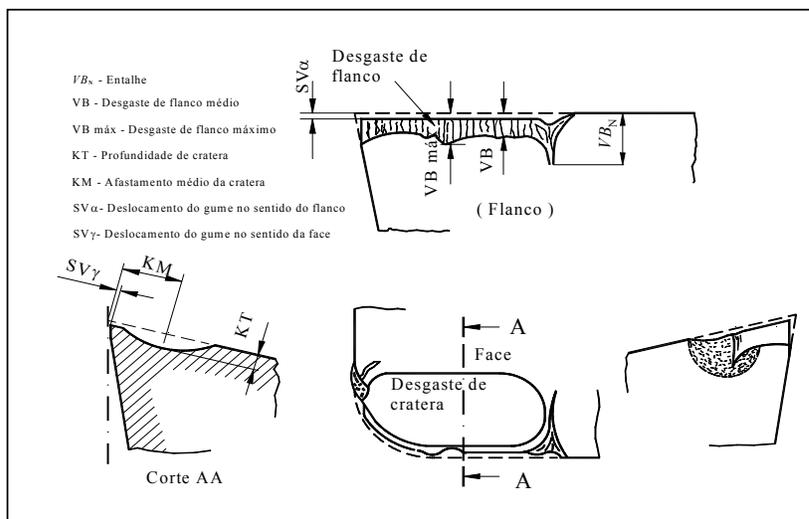


Figura 1. Desgaste no flanco e na face de uma ferramenta [6].

Foram ensaiados os materiais constantes da tabela I. O material A pertence à classe FE-45012, e apresenta composição química usual desta classe. Da mesma forma, o material C foi obtido em condições industriais de fabricação de perfis da classe FE-50007. Ambos materiais apresentam um teor de silício relativamente elevado, comum em produtos obtidos em fundição contínua. Os materiais B e D representam novos produtos das classes FE-45012 e FE-50007, respectivamente, com uma diminuição drástica no teor de silício. Desta forma procurou-se diminuir o endurecimento da ferrita por solução sólida e examinar o efeito desta alteração sobre a usinabilidade dos ferros fundidos nodulares destas classes.

Tabela I – Composições químicas dos materiais estudados.

Classe	Material	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Mg %	Cu %
FE-45012	A	3,57	3,39	0,10	0,08	0,001	0,034	0,01
	*B	3,75	2,45	0,21	0,065	0,013	0,035	0,02
FE-50007	C	3,52	3,45	0,13	0,040	0,001	0,048	0,80
	*D	3,75	2,40	0,20	0,060	0,014	0,039	0,41

* materiais modificados

Estas composições químicas foram obtidas por fusão em forno cubilô industrial (8 t/h), sendo que o ajuste de composição e temperatura em forno de indução a cadinho (2,5 t), empregando-se nodulização com panela coberta e inoculação na transferência para a máquina de fundição contínua. Com estes materiais foram produzidas barras com diâmetro de 100 mm, empregando-se o processo de fundição contínua, com solidificação em matriz de grafita, refrigerada externamente com camisa d'água, figura 2.

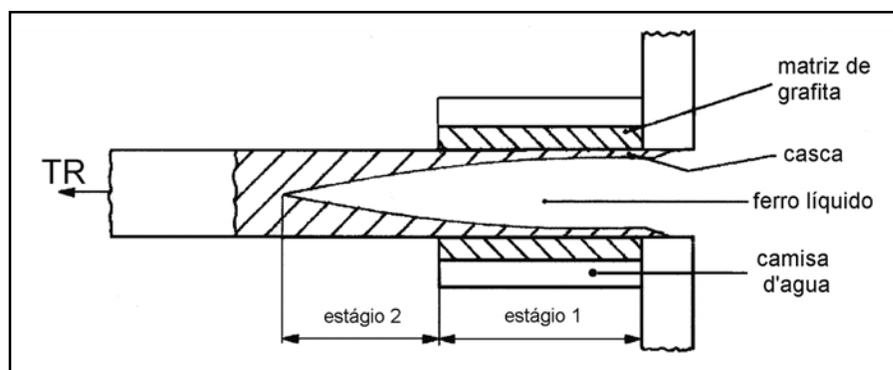


Figura 2. Esquema do processo de fundição contínua [3]

Foram efetuados ensaios metalográficos em diversas espessuras, isto é, diâmetros, a partir da superfície da barra, nas mesmas posições dos ensaios de usinabilidade. Deste modo, foram caracterizadas as microestruturas nas seguintes regiões:

- 1ª camada - 1 a 8,5 mm a partir da superfície
- 2ª camada - 8,5 a 16 mm a partir da superfície
- 3ª camada - 16 a 23,5 mm a partir da superfície

Além dos ensaios metalográficos, foram também caracterizadas as microdurezas nestas mesmas regiões, empregando-se ensaio Vickers, com carga de 100 g (média de 5 valores).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Microestrutura. Na tabela II encontram-se os resultados das análises metalográficas, realizadas em diversas posições das barras ensaiadas. Verifica-se que em todos os materiais o número de nódulos de grafita diminui quando se caminha da periferia em direção ao centro da barra, motivado por diferenças na velocidade de solidificação. Isto resulta em que, nos materiais predominantemente ferríticos (classe FE 45012, A e B), existe a tendência de aumentar a quantidade de perlita da periferia para o centro da barra.

Tabela II – Resultados de dureza e de ensaios metalográficos dos materiais ensaiados.

Material/ Camada	Dureza HB 2,5	%	%	Espaçamento	Microdureza HV		Grafita		
					Perlita	Ferrita	forma	% noduliz	Nód/mm2
A/1	191	0	<5	0,8	306	214	VI	90	156
A/2	199	0	5-10	0,6	316	208	VI	90	145
A/3	195	0	10	0,7	327	213	VI	90	109
B/1	180	1	5	0,7	290	193	VI	95	522
B/2	180	0	15	0,6	307	179	VI	95	228
B/3	195	0	35	0,7	301	181	VI	95	138
C/1	292	0	60	0,7	277	ND	VI	95	575
C/2	285	0	60	0,7	277	ND	VI	95	330
C/3	285	0	70	0,7	277	ND	VI	95	123
D/1	244	2	60	0,7	270	158	VI	95	584
D/2	229	0	50	0,7	274	167	VI	95	275
D/3	234	0	40	0,7	278	167	VI	95	193

Já o espaçamento interlamelar praticamente não se alterou com a posição sobre o diâmetro da barra (tabela II), indicando que a velocidade de resfriamento durante a transformação eutetóide não foi sensivelmente distinta entre os diversos pontos da barra. As variações de composição química também não revelaram efeito sobre o refinamento da perlita. A microdureza da ferrita apresentou correlação com o teor de silício, sendo menor nos materiais com menores teores de silício. Ressalte-se ainda que foi verificada a presença de cementita eutética apenas nas ligas com baixos teores de silício (B e D), em pequeno percentual, nas regiões próximas à periferia da barra que estão submetidas à maiores velocidades de solidificação.

De um modo geral, a macrodureza foi menor nos materiais com baixos teores de silício, resultado do menor endurecimento da ferrita por solução sólida.

Na tabela III registram-se valores de propriedades mecânicas dos materiais ensaiados. Observa-se que, na classe FE-45012, de matriz ferrítica, a redução do teor de silício aumentou sensivelmente o alongamento.

Tabela III – Propriedades mecânicas. Corpos-de-prova retirados a meio-raio.

Material	LR (MPa)	A (%)
A	510	12,0
B	530	22,2
C	707	9,7
D	635	11,7

Usinabilidade dos ferros fundidos da classe FE-45012. Os resultados dos ensaios de usinabilidade constam das figuras 3 a 13. Para os materiais da classe FE-45012, pode-se verificar que o material B, com menor teor de silício, apresenta taxas de desgaste da ferramenta inferiores ao material A, em especial na usinagem das regiões mais periféricas da barra, 1ª e 2ª camadas, conforme ilustram as figuras 3, 4 e 5.

Na figura 3 verifica-se que para o material A a ferramenta atingiu um desgaste de flanco de 0,3 mm, conforme o estabelecido pela norma ISO 3685, antes dos 30 min de usinagem, enquanto que para o material B a ferramenta ainda apresentava um baixo valor de desgaste, na ordem de 0,12 mm, evidenciando, assim, que o material A, para esta primeira camada, apresentou pior usinabilidade comparativamente ao material B.

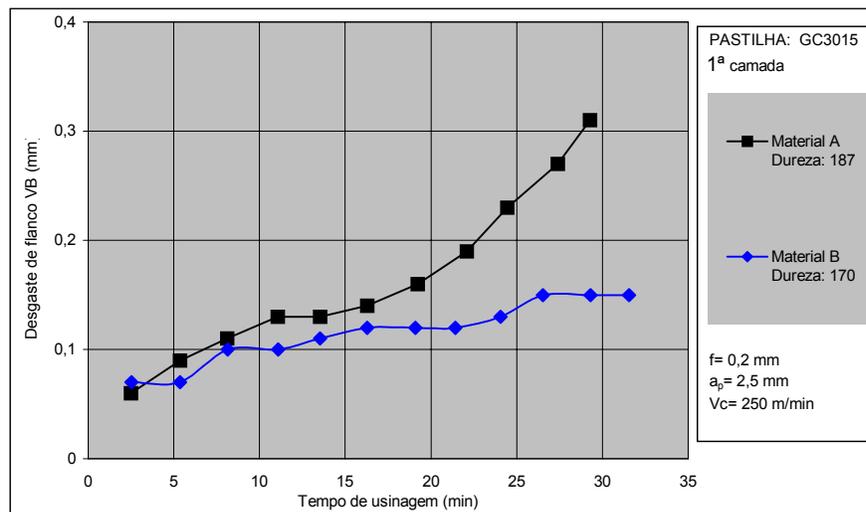


Figura 3 - "Tempo de usinagem x desgaste de flanco" para os materiais A e B, 1ª camada

Comparando-se a usinabilidade destes dois materiais na segunda camada, conforme mostra a figura 4, verifica-se que até aproximadamente 12 min de usinagem eles apresentaram um comportamento muito semelhante. A partir desse momento o material A proporcionou um desgaste bem mais acentuado à ferramenta, a qual foi utilizada durante 27 min, momento em que o desgaste no seu flanco atingiu 0,3 mm. Novamente, o material B, para o mesmo tempo de usinagem, proporcionou à ferramenta um desgaste de flanco de apenas 0,16 mm. Este fato evidencia a melhor usinabilidade do material B também quando analisado na segunda camada.

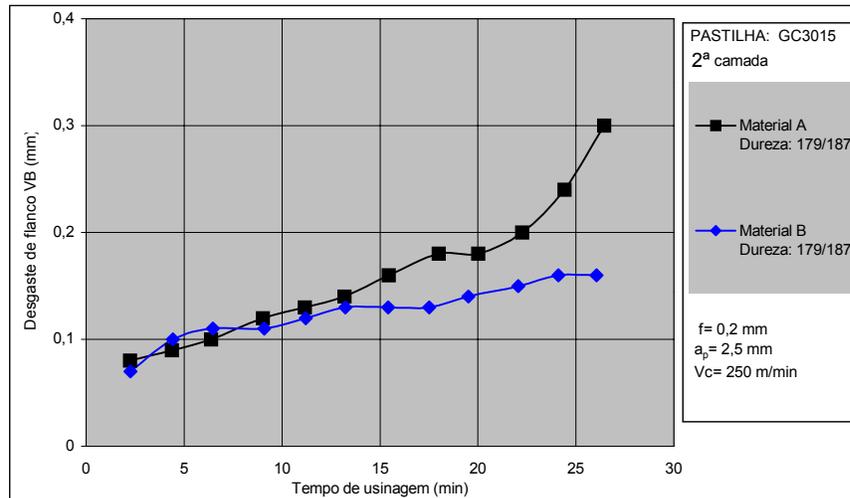


Figura 4 - "Tempo de usinagem x desgaste de flanco" para os materiais A e B, 2ª camada

Através da figura 5 pode-se verificar que até o tempo de 22 min e para um desgaste de flanco de aproximadamente 0,18 mm os materiais A e B apresentaram o mesmo comportamento no tocante à usinabilidade.

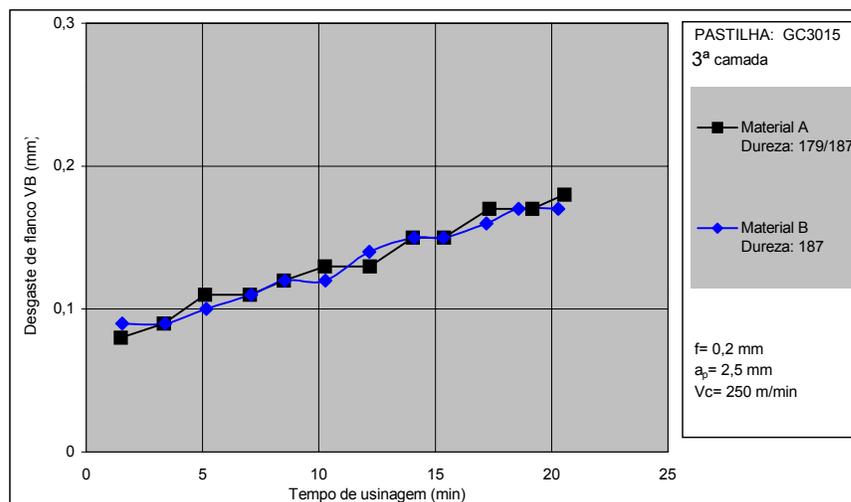


Figura 5 - "Tempo de usinagem x desgaste de flanco" para os materiais A e B, 3ª camada

Por sua vez, na figura 6, observa-se que o material A praticamente apresentou a mesma usinabilidade nas três camadas, similarmente ao verificado em trabalho anterior [3]. Por outro lado, figura 7, para o material B aumenta a taxa de desgaste da ferramenta à medida que se usinam camadas cada vez mais internas da barra, fato que caracteriza uma pior

usinabilidade. Atribui-se esta diferença de comportamentos à distribuição de perlita na microestrutura, que praticamente não se alterou ao longo do diâmetro no material A, enquanto no material B verifica-se um aumento na quantidade de perlita, e na macrodureza, à medida que se desloca para o centro da barra. Entretanto, na usinagem da camada mais interna ou 3ª camada, figura 5, verifica-se que o material B, apesar de apresentar cerca de 35% perlita, ainda mostra valores de usinabilidade similares ao do material A, com apenas 10% perlita, o que evidencia a importância do endurecimento da ferrita, através do aumento do teor de silício, no aumento da taxa de desgaste da ferramenta. Não se constatou um efeito sensível da presença de cementita residual sobre a usinabilidade, fato também já registrado em trabalho anterior [3].

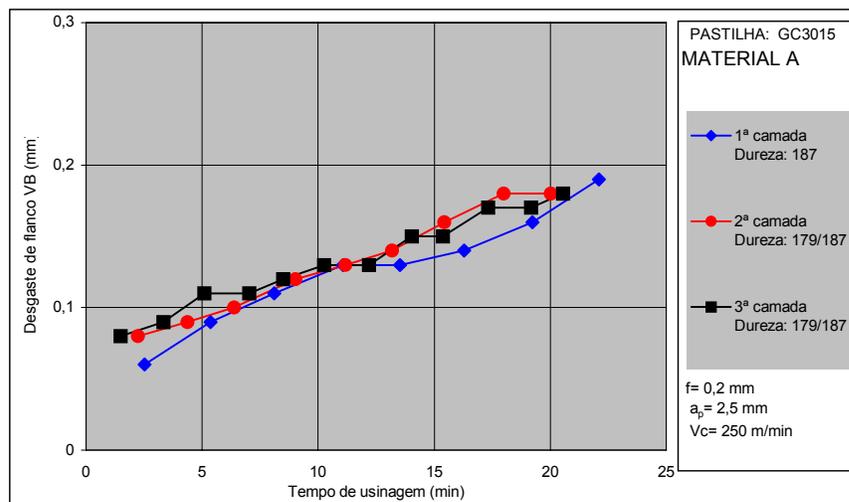


Figura 6 - "Tempo de usinagem x desgaste de flanco" para as três camadas do material A.

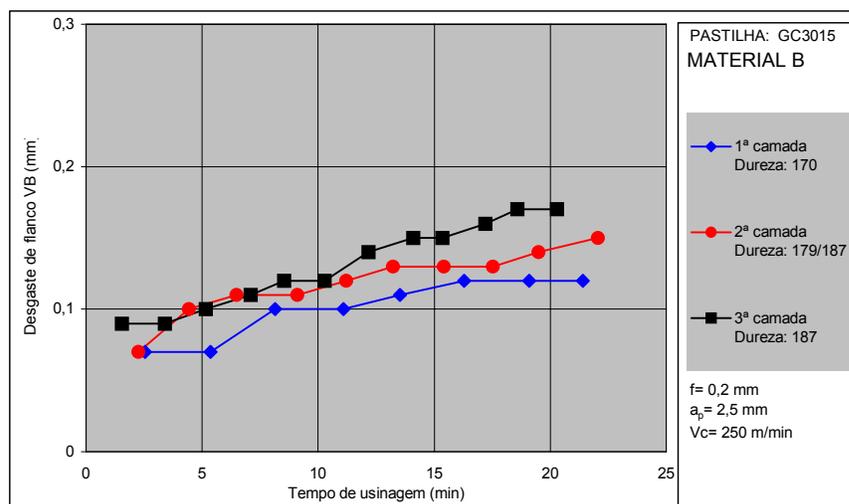


Figura 7 - "Tempo de usinagem x desgaste de flanco" para as três camadas do material B.

Usinabilidade dos ferros fundidos da classe FE-50007. Para os materiais da classe FE-50007, materiais C e D, também verificou-se que o nodular com menor teor de silício,

material D, apresentou melhor usinabilidade, conforme ilustram as figuras 8, 9 e 10. A menor diferença de usinabilidade entre esses dois materiais foi constatada na região junto à superfície, ou 1ª camada, figura 8. Tal constatação foi associada à maior quantidade de perlita nesta parte do material D, bem como à presença de pequena quantidade de cementita junto à superfície. Deste modo fica igualmente evidente o efeito benéfico da diminuição do teor de silício sobre a vida da ferramenta também nesta classe de ferro fundido nodular.

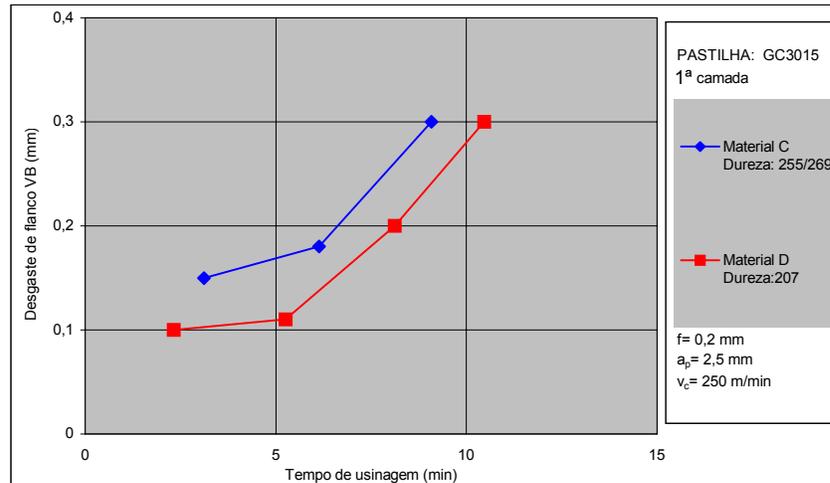


Figura 8 - "Tempo de usinagem x desgaste de flanco" para os materiais C e D, 1ª camada.

O desgaste no flanco da ferramenta empregada na usinagem da 2ª camada do material C atingiu o valor estabelecido pela norma, 0,3 mm, em um período de tempo bem inferior ao verificado com a usinagem do material D, ou seja, 8 min, conforme ilustra a figura 9. O mesmo ocorreu para a 3ª camada destes materiais, figura 10, onde o material C proporcionou o emprego da ferramenta também por apenas 8 min.

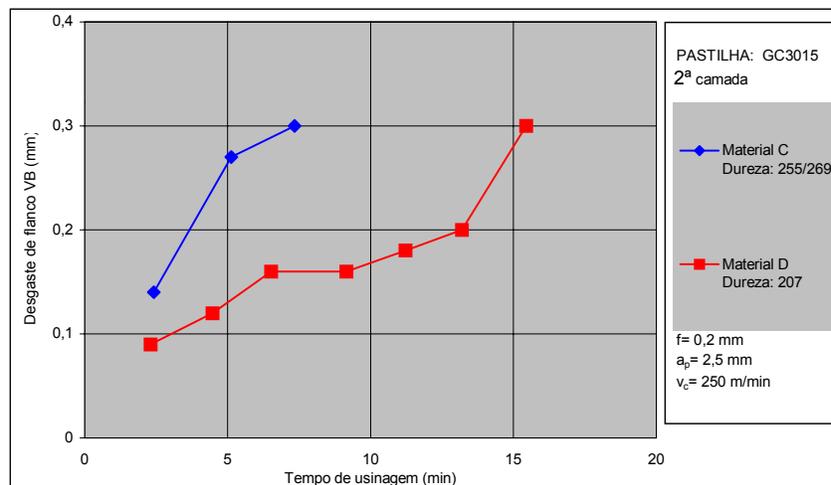


Figura 9 - "Tempo de usinagem x desgaste de flanco" para os materiais C e D, 2ª camada.

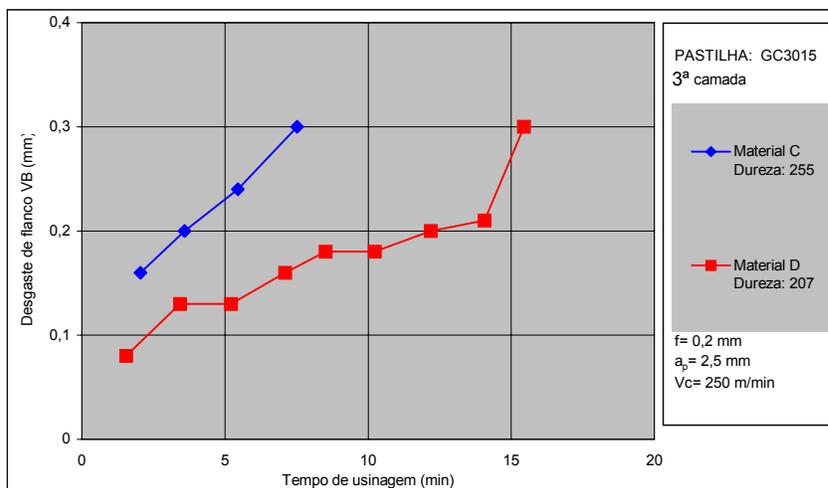


Figura 10 - "Tempo de usinagem x desgaste de flanco" para os materiais C e D, 3ª camada.

Este conjunto de resultados mostra que, em ferros fundidos nodulares obtidos por fundição contínua, o endurecimento da ferrita através do silício aumenta a taxa de desgaste da ferramenta em operações de torneamento. Os materiais de menores teores de silício revelaram sempre melhor usinabilidade que os de teores de silício elevado, mesmo apresentando, às vezes, presença de residuais de cementita junto à periferia e maiores quantidades de perlita no núcleo.

Supondo-se, ainda, uma vida de ferramenta correspondente a um desgaste de flanco de 0,15 - 0,2 mm, estima-se que estas diferenças de usinabilidade traduzam-se em aumento de vida de ferramentas em cerca de 70 % para a classe FE-45012 e de 100 % para a classe FE-50007.

Esta observação, que se refere ao aumento da vida de ferramentas através da diminuição do teor de silício presente nos ferros fundidos, condiz com o verificado em bibliografia especializada, como por exemplo, no trabalho realizado por Bates [1] foi constatado que com a redução de aditivos de inoculação, FeSi de 0,5-0,2%, a vida útil da ferramenta pode aumentar em até 100%.

CONCLUSÕES

A diminuição do teor de silício em ferros fundidos nodulares das classes FE-45012 e FE-50007, obtidos por fundição contínua, resultou em diminuição da microdureza da ferrita e presença de cementita residual junto à periferia dos perfis. No material ferrítico, classe FE-45012, verificou-se aumento da quantidade de perlita no núcleo do perfil.

Em operações de torneamento, os ferros fundidos nodulares já referidos e que têm menores teores de silício apresentaram melhor usinabilidade, avaliada pelo desgaste de flanco de ferramentas de metal duro. Tal efeito é atribuído principalmente à diminuição do endurecimento da ferrita por solução sólida.

Para a usinagem com ferramentas de metal duro revestidas de nitreto de titânio [8], estima-se que o aumento da usinabilidade, obtida com a diminuição do teor de silício, possa representar aumento na vida da ferramenta de 70 a 100%, para os nodulares FE-45012 e FE-50007, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- [1] BATES, Charles E. Study examines influences on machinability of iron castings - Modern Casting, 1996.
- [2] BOEHS, L. Influência do sulfeto de manganês na usinabilidade do ferro fundido maleável preto ferrítico. Florianópolis, 1979. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. 105 p.
- [3] DE AGUIAR, Cícero G. Análise da usinabilidade do ferro fundido nodular de fundição contínua ABNT FE-50007. Florianópolis, 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. 107 p.
- [4] FATAHALLA, N., and BAHI, S. Metallurgical parameters, mechanical properties and machinability of ductile cast iron. Chapman & Hall, 1996.
- [5] FUCO Manual técnico. Perfis de fundição contínua. Joinville: Indústria de fundição tupy, 1998.
- [6] ISO 3685. Internacional Organization for Standardization tool life testing with single point turning tools. Switzerland: 1977.
- [7] MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments. 4th edition ISBN 0-471-15746-5, QA279.M66, p. 703, 1996.
- [8] SANDVIK COROMANT. Catálogo de ferramentas para torneamento. SANDVIK COROMANT, 1995.