

ANÁLISE DA USINABILIDADE NA FURAÇÃO DE FERROS FUNDIDOS NODULARES PRODUZIDOS POR FUNDIÇÃO CONTÍNUA

Matheus Carrara Martins

Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Av. João Naves de Ávila, 2160, Campus Santa Mônica – Bloco 1M, CEP 38.400-902, Uberlândia- MG
matheuscarrara@hotmail.com

Fabio Antonio Xavier

Rolf Bertrand Schroeter

Departamento de Engenharia Mecânica -Bloco B- Campus Universitário Reitor João David Ferreira Lima, Trindade CEP 88040-900 Florianópolis – SC.
f.xavier@ufsc.br e rolf.schroeter@ufsc.br

Cássio Luiz Francisco de Andrade

Wilson Luiz Guesser (in memorian)

Tupy S. A., Rua Albano Schmidt, 3400, CEP 89227-901, Joinville – SC, Brasil.
cassio@tupy.com.br

Resumo. O processo de fundição contínua permite a fabricação de diferentes perfis em ferros fundidos cinzento e nodular, com qualidade igual ou superior aos processos convencionais, além de maior produtividade e redução nos custos de produção. No entanto, devido às diferentes taxas de resfriamento ao longo de sua seção, os materiais produzidos por esse processo podem apresentar diferentes microestruturas e, consequentemente, diferente usinabilidade. Assim, o objetivo do trabalho foi verificar a usinabilidade no processo de furação ao longo da seção transversal em ligas de ferro fundido nodular, com diferentes teores de silício, produzidas por fundição contínua. Foram avaliados a força de avanço (F_f) e o momento de corte (M_c), e os parâmetros de rugosidade R_a e R_t . Os ensaios foram realizados segundo planejamento fatorial completo, tendo como fatores: o material (baixo, médio e alto silício); a região (núcleo, médio raio e periferia); a velocidade de corte (80 e 130 m/min) e o avanço (0,15 e 0,25 mm). O material com médio teor de silício foi o que apresentou melhor usinabilidade, em termos dos esforços, e resultados intermediários aos demais materiais, em termo dos parâmetros de rugosidade. O material com maior teor de silício foi o que apresentou as menores diferenças microestruturais entre as regiões e melhor acabamento, no entanto acarretou os maiores esforços de corte.

Palavras-chave: Ferros fundidos nodulares. Fundição contínua. Furação. Esforços de usinagem. Qualidade de furos.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos materiais ou a atualização tecnológica de ligas surgem da necessidade das aplicações, da busca pela redução dos custos de manufatura e produção ou da relação “eficiência/peso” do material (Klocke *et al.*, 2007; Nayyar *et al.*, 2012). Tratando-se de ferros fundidos produzidos por fundição contínua, o desenvolvimento de novas ligas surge como uma opção à substituição aos aços. Além disso, são aplicados vantajosamente na fabricação de uma ampla gama de componentes mecânicos e elementos de máquinas, representando redução nos custos de fabricação do material e de usinagem, além de apresentar menor densidade (Guesser *et al.*, 2000; Barbosa *et al.*, 2014; TUPY, 2018).

De acordo com Guesser (2009), caracterizar o efeito de novas composições químicas sobre a usinabilidade é de fundamental importância para empresas de fundição e manufatura, pois possibilita fornecer informações otimizadas aos consumidores, o que por sua vez, se torna uma vantagem competitiva para ambos os parceiros.

A composição química, a velocidade de resfriamento e a distribuição de grafita são as variáveis que definem a matriz, ferrítica ou perlítica (Guesser, 2009). Faz-se oportuno, portanto, avaliar variações no teor de silício que, do ponto de vista tecnológico, podem garantir a aplicabilidade de novas ligas de ferro fundido nodular, com maior homogeneidade ao longo de sua seção, com menores custos de produção e usinagem, uma vez que o elemento age diretamente sobre a composição química da matriz.

O silício é considerado um elemento grafitizante, dentro dos limites de composição normal, quantidades crescentes de silício promovem estruturas com maior número de nódulos e maiores teores de ferrita, com maiores níveis de dureza, fazendo com que esta seja tão resistente quanto a perlita (Davis, Mills e Lampman, 1990; Guesser, 2009; Callister e Rethwisch, 2016). Melleras (2001) avaliou teores de silício de 4 e 5%, em ferros fundidos nodulares brutos de fundição.

O autor aponta que o aumento do teor de silício acarretou no aumento da dureza, do limite de resistência à tração e escoamento e da resistência oxidação e na redução do alongamento.

De acordo com Guesser *et al.*(2000), a diminuição do teor de silício em ferros fundidos nodulares das classes FE-45012 e FE-50007, obtidos por fundição contínua, resulta na diminuição da microdureza da ferrita e na presença de cementita residual junto à periferia dos perfis. Os autores citam que no processo de torneamento os ferros fundidos nodulares, com menores teores de silício, apresentaram melhor usinabilidade, tendo como critério o desgaste de flanco. O autor conclui que o endurecimento da ferrita através do silício aumenta a taxa de desgaste da ferramenta.

De Souza (2014, 2017) avaliou o comportamento da usinabilidade do ferro fundido nodular FE 45012, produzido por fundição contínua, o que confere ao material diferentes estruturas ao longo da seção transversal. Para o processo de torneamento o autor aponta que a maior vida da ferramenta, os menores esforços, a menor potência de usinagem e melhor acabamento para as diferentes bitolas são provenientes da região da periferia, seguidas da região intermediária e região do núcleo. O autor correlaciona os resultados com a variação do teor de perlita ao longo das seções. Para os diferentes perfis a região do núcleo apresenta maiores teores de perlita e, portanto, maior dureza e resistência mecânica.

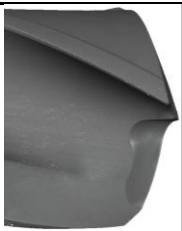
Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo verificar o comportamento da usinabilidade, em termos dos esforços de usinagem e dos parâmetros de rugosidade, no processo de furação ao longo da seção transversal, em ligas de ferro fundido nodular, com diferentes teores de silício, produzidas pelo processo de fundição contínua. A seguir são descritos os equipamentos, materiais e métodos empregados.

2. EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de furação foram realizados em um centro de usinagem 2,5 eixos, da marca Charles modelo MVC 955, com comando numérico (CNC) Siemens Sinumerik 840Di, potência do motor principal de 7,5 kW e rotação máxima de 8000 rpm, instalado nas dependências do Laboratório de Mecânica de Precisão- LMP/UFSC.

Para a realização dos ensaios foram utilizadas brocas helicoidais de metal-duro, Ø 8 mm, da fabricante Kennametal, os principais ângulos da ferramenta e a geometria da ponta das brocas utilizadas são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1. Principais ângulos da ferramenta empregada nos ensaios e geometria da ponta: vista frontal e vista lateral.

a)		b)	
Ângulo	Ponta (σ)	140°	
	Cunha (β)	47°	
	Hélice (δ)	30°	
	Gume Transversal (Ψ)	60°	
Classe Metal-Duro		K15	
Revestimento		TiAlN	

O material empregado neste trabalho foi o ferro fundido nodular FE 45012 produzido pelo processo de fundição contínua, fornecido pela empresa TUPY S.A. O material é produzido em forma de barras longas com diâmetro de Ø 88,9 mm. Para a obtenção dos corpos de prova, as barras foram serradas e, posteriormente, faceadas nas dimensões Ø 88,9 mm x 50 mm.

Tratou-se a seção transversal desses perfis por diferentes regiões: núcleo (NU), médio raio (MR) e periferia (PE), o que permitiu avaliar a influência na usinabilidade das diferentes microestruturas para as diferentes regiões. As regiões foram dimensionadas pela divisão do diâmetro, como apresentado na Fig. 1.

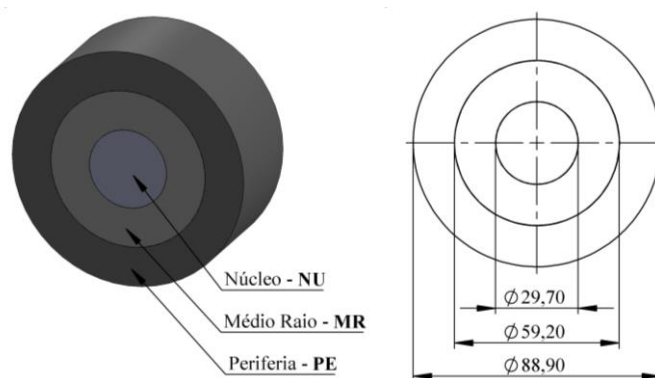


Figura 1. Geometria dos corpos de prova com as diferentes regiões e a dimensão em mm de cada uma das regiões.

Em cada corpo de prova foram executados 12 furos, sendo que este número foi condicionado à região do núcleo, menor região dentre as três, que permitiu a realização de 4 furos. Os testes foram realizados respeitando-se a distância entre centros de 1,5 vezes o diâmetro furo, resultando em uma distância entre centros de 12 mm.

Foram analisadas três composições químicas: com alto, médio e baixo teor de silício, denominadas neste trabalho de 135, 131 e 126, respectivamente.

Na Figura 2 são apresentadas as micrografias, com ampliação de 100x, dos diferentes materiais e diferentes regiões avaliadas no microscópio óptico. A Tabela 2 encontram-se os resultados das análises metalográficas realizadas ao longo das diferentes regiões analisadas para os diferentes materiais ensaiados.

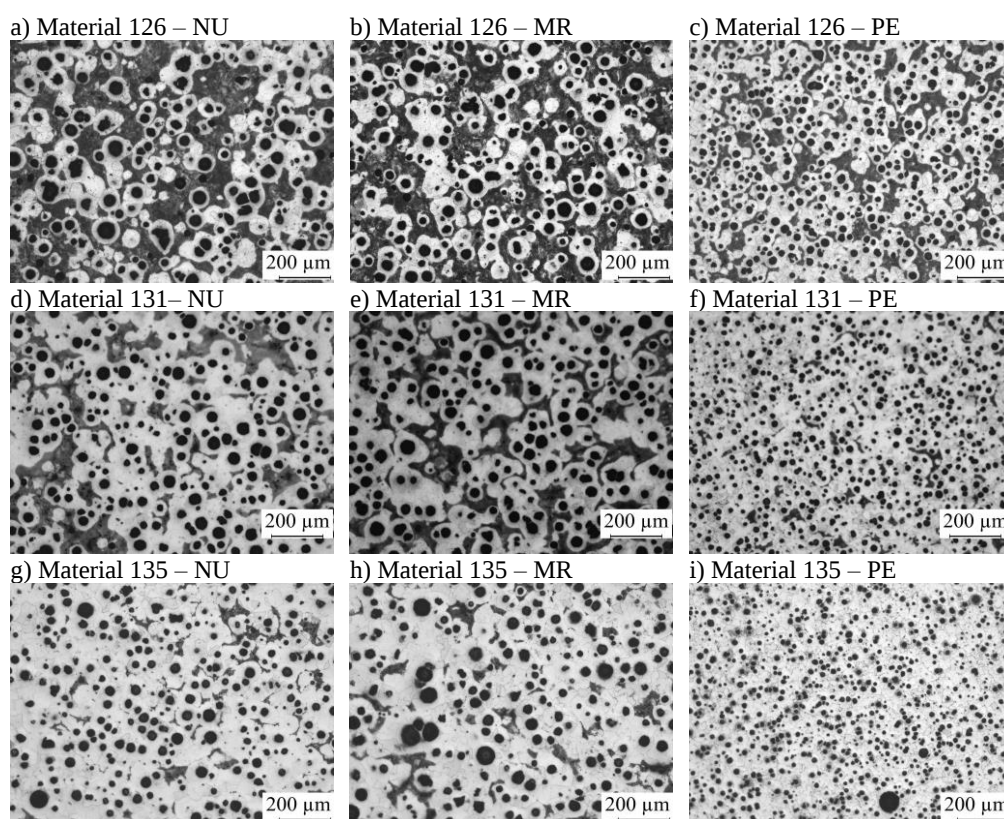


Figura 2. Microestrutura das diferentes ligas e regiões, ampliação de 100x.

Tabela 2. Propriedades metalúrgicas das diferentes regiões e diferentes ligas.

Material/ Região	Teor de Perlita [%]	Grafita Nodular		Microdureza HV (0,05)	Dureza Brinell	Propriedades Mecânicas						
						LR [MPa]		LE [MPa]		A [%]		
		Tamanho	Nódulos /mm²	Ferrita		Amostra		Amostra		Amostra		
						A	B	A	B	A	B	
126	NU	44	6-7	166	191	191						
	MR	45	6-7	183	190	192	588	608	462	377	10,30	10,80
	PE	15	7-8 (6)	462	188	180						
131	NU	19	6-7-5	178	224	173						
	MR	23	6-7	183	227	195	579	594	384	394	14,5	16,2
	PE	3	7-8	507	231	186						
135	NU	5	6-7	252	278	203						
	MR	7	6-7-5	232	275	207	611	584	490	462	17,9	16,3
	PE	0	7-8 (6)	617	262	201						

Os ensaios para avaliação dos esforços de corte e qualidade da superfície foram desenvolvidos segundo um planejamento fatorial completo. Para avaliar o comportamento dos esforços F_f e M_c , foram adotadas duas variáveis qualitativas (Material e Região) e duas variáveis quantitativas (Velocidade de Corte e Avanço). As variáveis de entrada

utilizadas nos ensaios e, seus respectivos níveis, são descritas na Tabela 3. Para cada ensaio foram realizadas duas réplicas. A influência das variáveis foi avaliada por meio da análise da variância. Por esse método é possível avaliar os efeitos acarretados pela variação dos níveis de cada fator nas variáveis de resposta

Tabela 3. Variáveis de entrada, e seus respectivos níveis, avaliadas.

Variáveis	Níveis		
Materiais	126	131	135
Regiões	NU	MR	PE
Velocidade de corte	80 m/min		
Avanço	0,15 mm		
	0,25 mm		

Para todos os ensaios realizados os furos foram não passantes, sem pré-furo ou furo de centro, sem parada da máquina ou retorno para quebra do cavaco. A relação comprimento/diâmetro do furo $L/D = 5$ ($L_f = 40$ mm) foi mantida constante.

O fluido de corte empregado foi Ecocool Durant 71 BF, na concentração de 7%, aplicado externamente na forma de jorro, por meio de dois bicos, utilizando o sistema de aplicação da máquina-ferramenta. Para a realização dos ensaios foram medidos os valores dos batimentos radial e axial, adotando como critério o valor máximo de 20 μ m para o batimento radial e 10 μ m para o batimento axial. As medições foram realizadas por um relógio comparador analógico do fabricante Mitutoyo, com resolução de 0,001 mm e faixa nominal de 1 mm. Para as medições dos batimentos o equipamento foi fixado na mesa da máquina-ferramenta por meio de base magnética.

A medição dos esforços durante o processo de furação (F_f e M_c) foi realizada empregando-se um sistema composto pelo dinamômetro rotativo 9123C, um estator 5221B1, um condicionador de sinais modelo 5223B1, e cabos de conexão 1500B19, sendo todos os componentes do sistema de medição fabricados pela empresa Kistler Instruments. O condicionador de sinais é conectado ao computador, e através do software DynoWare®, também fabricado pela Kistler Instruments, os sinais são adquiridos e armazenados no computador.

Para este trabalho foi utilizado o intervalo de medição “Range 1”, onde a faixa de medição varia de ± 20 kN para F_f e de ± 200 Nm para M_c . O sistema de medição foi programado para operar com uma taxa de aquisição de 6 kHz para ambos os sinais. Os esforços F_f e M_c foram monitorados durante a realização dos três furos representativos de cada ensaio. O valor dos esforços de corte atribuído ao ensaio foi a média aritmética dos três testes.

Para a medição dos parâmetros de rugosidade foi utilizado o perfilômetro Form Talysurf i120, fabricado pela empresa Taylor Hobson. O instrumento possui apalpador cone esférico com ponta de diamante com raio de 2 μ m, resolução 16 nm e carga de 1 mN. O procedimento de medição foi amparado na norma ABNT ISO 4288 (2008). Foram mensurados os valores de R_a , e R_t , apenas para os ensaios com $v_c = 130$ m/min e $f = 0,25$ mm sendo estes a média aritmética das 06 amostras representativas de cada furo.

A seguir são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios conforme o planejamento apresentado.

3. RESULTADOS

As Figuras 2 e 3 apresentam os valores médios obtidos para F_f e o M_c , com seus respectivos intervalos de confiança, com nível de significância de 0,05, para as diferentes regiões e condições de corte no Material 126 e Material 131, respectivamente.

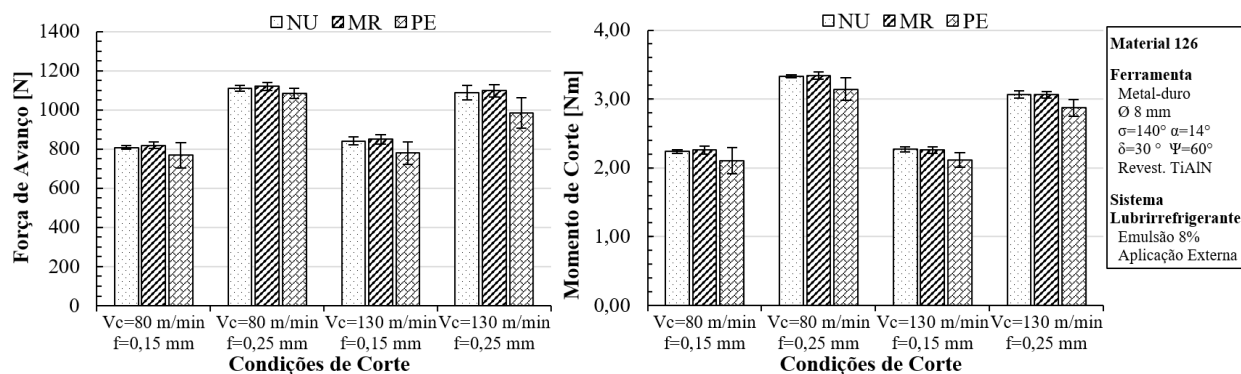


Figura 2. Força de avanço e Momento de corte para as diferentes regiões e condições de corte material 126.

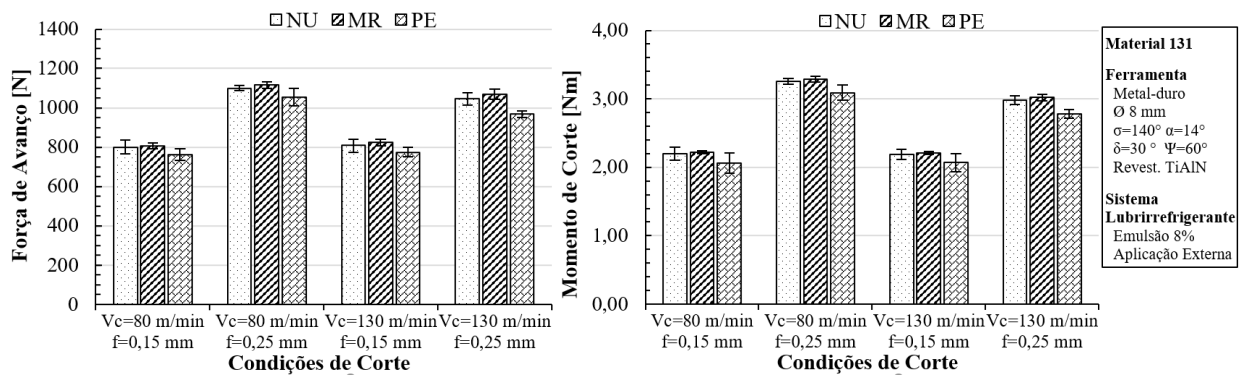


Figura 3. Força de avanço e Momento de corte para as diferentes regiões e condições de corte material 131.

Analisando o intervalo de confiança associado a cada uma das medições, percebe-se que os valores médios dos esforços associados às regiões do NU e MR, para os Materiais 126 e 131, de forma geral, não possuem diferenças significativas. Ainda assim, avaliando a média dos esforços, verifica-se que a região do MR apresenta resultados marginalmente superiores. Pode-se associar os resultados à dureza média das regiões. Conforme apresentado na Tab. 2, a região do MR apresenta dureza média de 192 HB, enquanto as regiões do NU e PE apresentam dureza média de 191 e 180 HB, respectivamente. Ou seja, maiores valores de dureza ocasionaram maiores valores para F_f e M_c , seguindo resultados de Şeker *et al.* (2003) e Cakir *et al.* (2011).

O aumento da dureza no material, ao longo da seção transversal, pode ser associado à variação do percentual de perlita da matriz, efeito das diferentes taxas de resfriamento da seção transversal, conforme proposto por Guesser (2009) e observado nos resultados De Souza (2014). Como pode ser observado Tab. 2, para o material 126, o percentual de perlita parte de um valor médio de 15% na região PE, para valores médios de 45% e 44% para regiões do MR e NU, respectivamente. Para o Material 131, a região da PE apresenta em média 3% enquanto as regiões MR e NU, apresentam, em média, 23% e 19%, respectivamente. Compreende-se então que maiores valores F_f e M_c podem ser associados a maiores valores de dureza, efeito da variação do teor de perlita da matriz.

Em relação à região da PE, é importante ressaltar que os menores esforços associados a essa região não deve ser associado apenas aos menores teores de perlita. Como proposto por Marwanga, *et al.* (2000), os nódulos de grafita atuam como concentradores de tensão e apresentam maior deformabilidade, resultando em microtrincas ao longo do plano de corte. Pode-se, assim, supor que as microtrincas coalescem ao longo do plano de cisalhamento, facilitando a fratura do cavaco. Assim, além do menor teor de perlita e, consequentemente menor dureza, pode-se associar os menores esforços da região da PE ao número de nódulos de grafita, superior nesta região comparada ao NU e ao MR. Como exposto na Tab. 2 a região da PE apresenta maiores quantidades de nódulos que as demais regiões. Para o material 135, conforme apresentado na Fig. 4, nota-se que, em geral, não há diferenças entre os valores médios dos esforços nas diferentes regiões. Como apresentado na Tab. 2, para a região do NU o teor de perlita é da ordem de 5% e para região do MR é na ordem de 7%, sendo que na região da PE não há teores consideráveis. Assim, tem-se neste caso um material mais homogêneo, em termos da matriz, o que acarretou menores variações entre as regiões.

Neste caso, faz-se relevante a análise da microdureza da ferrita, visto que, para este material, a matriz é considerada ferrítica, podendo-se desprezar os efeitos do teor de perlita. A avaliação da microdureza da ferrita, Tab. 2, mostra maiores valores atribuídos à região do NU, na ordem de 278 HV, para a região do MR e PE, os valores estão na ordem de 275 e 262 HV, respectivamente. Pode-se correlacionar então, neste caso, os esforços de corte à microdureza da ferrita, verificando-se que maiores esforços de corte são provenientes da região com maior microdureza da ferrita.

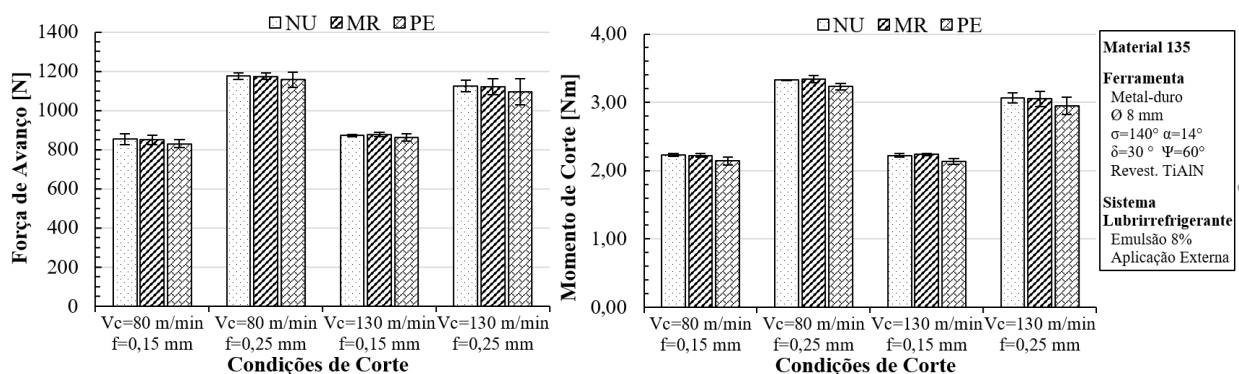


Figura 4. Força de avanço e Momento de corte para as diferentes regiões e condições de corte material 135.

De forma a comparar os diferentes materiais, regiões e condições de corte, são apresentados na Tab. 2 o efeito médio, proporcionados pela mudança de nível para cada uma das variáveis e níveis avaliados, e os valores p para todas as estatísticas de teste.

Como apresentado, a F_f e o M_c tiveram uma redução média de 2% com a variação do material 126 para o material 131. O material 126, considerando as diferentes regiões, apresentou teores de perlita superiores aos do material 131, o que acarretou o aumento dos esforços. Quando comparado ao material 135, a F_f apresentou um aumento médio de 6 %, sendo que para o M_c os materiais não apresentaram diferença significativa entre si. Com a variação do material 131 para o material 135, a F_f e o M_c tiveram um aumento médio de 7% e 2%, respectivamente. O material 131 foi o que acarretou os menores esforços de corte, para as condições avaliadas.

Em relação às regiões analisadas, para os diferentes materiais, nota-se que a variação da região do NU para o MR acarretou um aumento de 1% na F_f , para o M_c , por sua vez, não foi verificado um efeito significativo. Na região da PE ocorreu redução da F_f e do M_c , em média de 4% e 5%, respectivamente, quando comparados ao NU, e 5 % e 6%, respectivamente, quando comparados à região MR.

Para as condições de usinagem, os resultados confirmaram o que é fundamentado pela literatura, ou seja, uma redução dos esforços pelo aumento da velocidade de corte e um aumento dos esforços de corte acarretado pelo aumento do avanço (Wright e Trent, 2000; Klocke, 2011; MACHADO *et al.*, 2015). Como apresentado, com o aumento da v_c de 80 m/min para 130 m/min ocorreu redução de F_f e M_c em média 2% e 5%, respectivamente. O aumento do avanço acarretou um aumento médio 28% e 35% para a F_f e M_c , respectivamente.

Tabela 2. Análise da variância para os resultados da Força de Avanço e Momento de Corte.

Variáveis	Força de Avanço - F_f			Momento de Corte - M_c		
	Efeito [N]	(%)	p	Efeito [Nm]	(%)	p
Média Geral	957	-	-	2,65	-	-
Material (126→131)	-18	-2%	0,000000	-0,06	-2%	0,000000
Material (126→135)	54	6%	0,000000	0,01	-	<u>0,209825</u>
Material (131→135)	72	7%	0,000000	0,07	2%	0,000000
Região (NU→MR)	8	1%	0,008979	0,01	-	<u>0,187577</u>
Região (NU→PE)	-42	-4%	0,000000	-0,14	-5%	0,000000
Região (MR→PE)	-50	-5%	0,000000	-0,15	-6%	0,000000
v_c (80 → 130 m/min)	-17	-2%	0,000002	-0,14	-5%	0,000000
f (0,15 → 0,25 mm)	272	28%	0,000000	0,93	35%	0,000000

Os resultados dos parâmetros R_a e R_t são apresentados na Figura 5. Para os parâmetros de rugosidade, como mencionado, foram analisados apenas os ensaios com $v_c = 130$ m/min e $f = 0,25$ mm. A partir dos resultados apresentados, analisando-se o intervalo de confiança associado à medição, é possível observar que não há diferença significativa entre os valores médios das regiões.

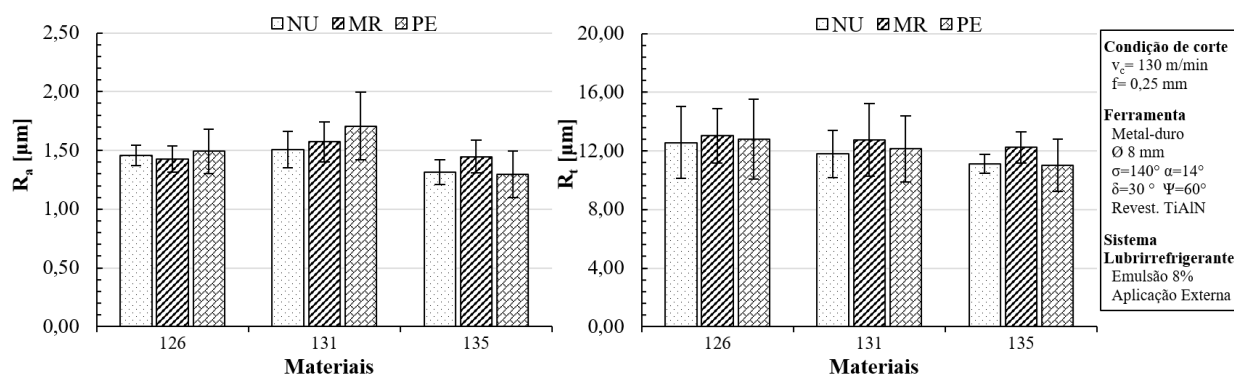


Figura 5. Resultado dos parâmetros R_a e R_t para os diferentes materiais e regiões.

Os resultados convergem com os relatados por De Souza (2014), que também comparou diferentes regiões ao longo da seção transversal, de diferentes perfis produzidos por fundição contínua. O autor aponta em seus resultados não haver diferença significativa entre os valores médios dos parâmetros R_a , R_z e R_q para as diferentes regiões e perfis, avaliadas no fresamento de topo e torneamento.

Quando comparado os materiais é possível identificar que, em geral, o material 135 apresenta resultados marginalmente inferiores ao material 126 e 131.

4. CONCLUSÕES

A redução do teor de silício em ferros fundidos nodulares, obtidos por fundição contínua, resultou na diminuição da microdureza da ferrita e no aumento da porcentagem de perlita na matriz, e uma redução na ductilidade do material.

Em relação aos materiais, a liga com maior teor de silício, material 135, apresentou pior usinabilidade em termos dos esforços de corte F_f e M_c , efeito este atribuído ao endurecimento da ferrita, mesmo apresentando menores teores de perlita. Este material resultou nos maiores esforços de corte, sendo os aumentos de até 7% na F_f , e de até 2% no M_c . Por outro lado, o material com maior teor de silício é o que apresenta maior homogeneidade, devido à pequena variação do teor de perlita ao longo das regiões. Além disso, o material apresenta as menores médias para os parâmetros de rugosidade.

Dado o exposto, levando-se em consideração os critérios avaliados neste trabalho, pode-se concluir que o material 131, com médio teor de silício, apresenta os melhores resultados, este resultado é atribuído ao fato de que esse material apresenta os valores intermediários de microdureza da ferrita e, também, aos teores de perlita.

5. AGRADECIMENTOS

À empresa TUPY S.A e aos seus funcionários envolvidos no trabalho, especialmente ao M. Eng. Cássio Luiz Francisco de Andrade ao Dr. Eng. Fabiano Mocellin e, em especial, ao Prof. Dr. Eng. Wilson Luiz Guesser (*in memoriam*) pelos diversos ensinamentos ao longo deste trabalho. À CAPES pelo financiamento da pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- ABNT ISO 4288 (2008) Especificações geométricas do produto (GPS) — Rugosidade: Método do perfil — Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade.
- Barbosa, P. A. et al. (2014) “Comparative study of the machinability of austempered and pearlitic ductile irons in drilling process”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. Springer Verlag, 37(1), p. 115–122. doi: 10.1007/s40430-014-0161-z.
- Cakir, M. C. et al. (2011) “Effects of microstructure on machinability of ductile iron”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(2), p. 297–304. doi: 10.1177/2041297510394101.
- Callister, W. D. e Rethwisch, D. (2016) *Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução*. 9o ed, Computing in Science & Engineering. 9o ed. Organizado por LTC. Rio de Janeiro: LTC.
- Davis, J. R., Mills, K. M. e Lampman, S. R. (1990) “Metals handbook. Vol. 1. Properties and selection: Irons, steels, and high-performance alloys”, ASM International, Materials Park, Ohio 44073, USA, 1990. 1063.
- Guesser, W. L. et al. (2000) “Usinabilidade de Perfis Contínuos de Ferros Fundidos Nodulares das Classes FE-45012 e FE-50007”, in *SULMAT*. Joinville -SC.
- Guesser, W. L. (2009) *Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos*. São Paulo: Blucher.
- Klocke, F. et al. (2007) “Fundamental wear mechanisms when machining austempered ductile iron (ADI)”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(1), p. 73–76. doi: 10.1016/j.cirp.2007.05.020.
- Klocke, F. (2011) *Manufacturing Processes 1*. RWTH, Rwthedition. RWTH. Organizado por Springer. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Rwthedition). doi: 10.1007/978-3-642-11979-8.
- MACHADO, Á. R. et al. (2015) *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 3a. Organizado por E. Blucher. São Paulo: Blucher.
- Marwanga, R. O., Voigt, R. C. e Cohen, P. H. (2000) “Influence of Graphite Morphology and Matrix Structure on Chip Formation During Machining of Continuously Cast Ductile Irons”, *AFS Transactions*, 108, p. 651–661.
- Melleras, E. (2001) *Influência do Silício e do Molibdênio nas Propriedades dos Ferros Fundidos Nodulares Ferríticos Brutos de Fusão*. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- Nayyar, V. et al. (2012) “An Experimental Investigation of Machinability of Graphitic Cast Iron Grades; Flake, Compacted and Spheroidal Graphite Iron in Continuous Machining Operations”, *Procedia CIRP*, 1(1), p. 488–493. doi: 10.1016/j.procir.2012.04.087.
- Şeker, U., Çiftçi, I. e Hasirci, H. (2003) “The effect of alloying elements on surface roughness and cutting forces during machining of ductile iron”, *Materials and Design*, 24, p. 47–51.
- de Sousa, J. A. G. (2014) *Influência da Microestrutura na Usinabilidade do Ferro Fundido Nodular FE 45012 em Diferentes Bitolas, Obtdos por Fundição Contínua*. Tese (Doutorado Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG.
- de Sousa, J. A. G. et al. (2017) “Study of the Variability of the Machinability along the Cross Section of Ductile Iron Produced by Continuous Casting”, *Procedia Manufacturing*, 10, p. 307–318. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.062.

TUPY (2018) Catálogo Técnico - CT 0614 - FUCO® Perfis Fundidos., www.tupy.com.br. Joinville -SC. Available at: <http://www.tupy.com.br> (Acessado: 29 de maio de 2018).

Wright, P. K. e Trent, E. M. (2000) Metal Cutting. 4a. Boston: Butterworth-Heinemann.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Analysis of Machinability in The Drilling of Nodular Cast Irons Produced by Continuous Casting

Matheus Carrara Martins

Faculty of Mechanical Engineering – Federal University of Uberlândia - UFU, Av. João Naves de Ávila, 2160, Campus Santa Mônica – Bloco 1M, CEP 38.400-902, Uberlândia- MG
matheuscarrara@hotmail.com

Fabio Antonio Xavier

Rolf Bertrand Schroeter

Department of Mechanical Engineering - Block B - Campus University Rector João David Ferreira Lima, Trindade CEP 88040-900 Florianópolis - SC.
f.xavier@ufsc.br e rolf.schroeter@ufsc.br

Cássio Luiz Francisco de Andrade

Wilson Luiz Guesser (in memorian)

Tupy S. A., Rua Albano Schmidt, 3400, CEP 89227-901, Joinville – SC, Brasil.
cassio@tupy.com.br

Abstract. The continuous casting process allows the manufacture of different profiles in grey and nodular cast irons, with quality equal to or higher than conventional processes, in addition to increasing productivity and reduction in production costs. However, due to the different cooling rates throughout its section, the materials produced by this process may present different microstructures and, consequently, different machinability. Thus, the objective of this work was to verify the machinability in the drilling process along the cross-section in nodular cast iron alloys, with different silicon contents, produced by continuous casting. The thrust force (F_f) and the cutting moment (M_c) and the roughness parameters R_a and R_t were evaluated. The tests were performed according to full factorial design, having as factors: the material (low, medium and high silicon); the region (nucleus, medium radius and periphery); cutting speed (80 and 130 m/min) and feed (0.15 and 0.25 mm). The material with medium silicon content was the one that presented the best machinability, in terms of efforts, and intermediate results to the other materials, term of roughness parameters. The material with the highest silicon content showed the lowest microstructural differences between the regions and better finish, however it led to the highest cutting efforts.

Keywords: Nodular cast iron, Continuous casting, Drilling, Cutting forces, Hole quality.

RESPONSIBILITY NOTICE

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