

COMPARAÇÃO DA USINABILIDADE DE FERRO FUNDIDO AUSTEMPERADO E FERRO FUNDIDO NODULAR PERLÍTICO PELO TESTE DE PRESSÃO COSNTANTE (F_F)

Patrícia Alves Barbosa, patricia026_eng@hotmail.com¹

Wilson Luiz Guesser, wguesser@tupy.com.br²

José R. Gamarra, jose.gamarra@sandvik.com³

Álison Rocha Machado, alissonm@mecanica.ufu.br¹

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem - Campus Santa Mônica - 38408-902 - Uberlândia – MG – Brasil

² Tupy S.A., R Albano Schmidt 3400 CEP: 89206-900, Joinville, SC – Brasil e FEJ/ UDESC, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Prof. Avelino Marcante s/n - Bairro Bom Retiro, CEP 89223-100- Joinville-SC - Brasil

³ Sandvik do Brasil S.A., Av. das Nações Unidas, 21732 – Bairro Santo Amaro, CEP 04795-914- São Paulo – SP - Brasil

Resumo: O ADI (austempered ductile iron) é um ferro fundido nodular tratado termicamente, que surgiu recentemente como um dos principais materiais de engenharia, devido as suas propriedades atrativas tais como boa ductilidade, tenacidade e alta resistência mecânica, ao desgaste e a fadiga. Comparado com o ferro fundido nodular o ADI apresenta uma maior dificuldade de usinagem por se tratar de um material endurecido, e este grau de dureza é influenciado pela temperatura de austêmpera em que o material é submetido. Outro fator que reduz a usinabilidade do ADI é atribuído a austenita retida que pode se transformar em martensita durante a usinagem. Devido a estes motivos têm-se intensificado pesquisas sobre a usinabilidade do ADI. O objetivo deste trabalho foi comparar a usinabilidade de três materiais: o ferro fundido nodular perlítico bruto-de-fundição (DI), e dois tipos de ferro dúctil austemperado, um DI austenitizado a 900°C por 2h e austemperado a 360°C por 2h (ADI I) e outro DI austenitizado dentro da zona crítica (austenitizado a 780°C por 5h e austemperado a 360°C por 2h) (ADI II), no processo de furação. Para comparar a usinabilidade dos materiais propostos foi realizado Teste de Pressão Constante (F_f), segundo um planejamento fatorial 2³. Os resultados mostraram que o DI foi o material com a melhor usinabilidade, seguido pelo ADI II e o ADI I se mostrou como o material mais difícil de se usar.

Palavras-chave: usinabilidade, teste de pressão constante, ferro fundido nodular perlítico, ferro fundido nodular austemperado.

1. INTRODUÇÃO

Na indústria, o aumento na demanda pela busca de novos materiais está relacionado com o custo e a “eficiência/peso”. No esforço de alcançar estas exigências empregam-se novos materiais com resistência similar, mas com baixa densidade ou aumenta-se a resistência de materiais tradicionais através da adição de elementos de liga ou por tratamento térmico. A escolha depende de parâmetros tais como carregamentos mecânico e térmico ou condições de contorno como custos de manufatura, reciclagem, aceitação do público e usinabilidade (Klocke et al, 2007). Nesta lista englobam-se os ferros fundidos que quase sempre oferecem boa usinabilidade e baixo custo de produção.

A história do ferro fundido dúctil, também conhecido como nodular, tem sido influenciada por um número de desenvolvimentos técnicos que tem resultado nas novas oportunidades de negócios para as indústrias de fundição. Estes possuem boa fundibilidade, capacidade de amortecimento e propriedades mecânicas (ductilidade, tenacidade e resistência) e usinabilidade apropriada. Devido a estas vantagens têm sido utilizados em muitas aplicações estruturais. Cames, virabrequins, carcaça de bombas, válvulas e articulações de direção são exemplos importantes da utilização de ferro dúctil em veículos (Toktas et al, 2006).

O ferro nodular austemperado (ADI), é um ferro fundido nodular tratado termicamente, que surgiu recentemente como um dos principais materiais de engenharia, devido as suas propriedades atrativas tais como boa ductilidade,

tenacidade e alta resistência mecânica, ao desgaste e a fadiga. Por estas propriedades únicas, o ADI é agora usado extensivamente em muitas aplicações estruturais na indústria automotiva, bélica, maquinários agrícolas entre outras.

Comparado com o ferro fundido nodular o ADI apresenta uma maior dificuldade de usinagem por se tratar de um material endurecido, e este grau de dureza é influenciado pela temperatura de austêmpera em que o material é submetido. Outro fator que reduz a usinabilidade do ADI é atribuído a austenita retida que pode se transformar em martensita durante a usinagem (Seah e Sharma, 1994). Devido a estes motivos têm-se intensificado pesquisas sobre a usinabilidade do ADI.

Para a determinação da usinabilidade de um material empregam-se testes de usinabilidade classificados em dois grupos, os que requerem e os que não requerem usinagem, e em dois subgrupos, os testes classificatórios e os testes absolutos, que por sua vez distinguem-se em ensaios de curta e longa duração (Ferraresi, 1977).

O Teste de Pressão Constante (F_f) é um ensaio usinabilidade de curta duração que consiste, no processo de furação, em aplicar uma força de avanço constante e medir o tempo para se furar uma chapa de espessura fixa, ou medir o percurso de avanço em um tempo pré-determinado, que serão os indicadores de usinabilidade. A força de avanço constante pode ser facilmente conseguida em uma furadeira de coluna ou de bancada, por meio de uma roldana com um cabo de aço e um prato com pesos adaptado no eixo de avanço da máquina (Machado e da Silva, 2004), como mostrado na Fig. (1).

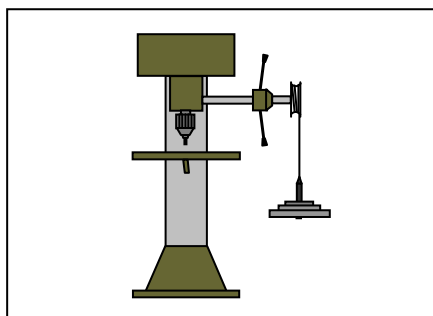


Figura 1. Esquema do equipamento utilizado no teste de pressão constante.

O objetivo deste trabalho foi comparar a usinabilidade de três materiais: o ferro fundido nodular perlítico bruto-de-fundição (DI) e dois tipos de ferro dúctil austemperado, um DI austenitizado a 900°C por 2h e austemperado a 360°C por 2h (ADI I) e outro DI austenitizado dentro da zona crítica (austenitizado a 780°C por 5h e austemperado a 360°C por 2h) (ADI II), através do Teste de Pressão Constante (F_f).

2. MÉTODO PROPOSTO

Para a comparação da usinabilidade, foi realizado um teste de Pressão Constante (F_f). O ensaio consiste basicamente, em furar uma amostra de material aplicando uma força de avanço constante, através de suporte com massas conhecidas, durante um tempo fixo pré-determinado, sendo o critério de usinabilidade monitorado a profundidade de penetração da broca (L_f), e portanto, o material que obtiver o maior comprimento de penetração possuirá a usinabilidade melhor.

O teste foi realizado, segundo um planejamento fatorial 2^3 , que consiste de três fatores (rotação, peso e material) variados em dois níveis, dos quais dois são fatores quantitativos (rotação e peso) e um fator é qualitativo (material). Foi realizado primeiramente, um planejamento para comparar os dois tipos de ADI, e o melhor deles foi comparado com o Nodular Perlítico, ou seja, foram executados dois planejamentos 2^3 , sendo que para a última comparação foram realizados apenas quatro ensaios referentes ao Nodular Perlítico, já que se puderam utilizar os resultados referentes ao melhor ADI comparado anteriormente. Foram necessárias mais uma réplica dos ensaios, para avaliar a reprodutividade dos resultados. O tempo de usinagem foi fixado em 20 segundos. A Tabela (1) mostra a configuração do planejamento utilizado e a Tab. (2) apresenta os fatores, que foram variados em dois níveis.

Tabela 1. Planejamento Fatorial 2^3 .

Ensaio	N (RPM)	F_f (Kgf)	Material
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1

Tabela 2. Variáveis de entrada à dois níveis.

Variável	nível(-1)	nível(+1)
Rotação (n) [RPM]	1107	1925
Força de Avanço (F_f) [Kgf]	7,426	16,340
Material da peça	ADI I / DI	ADI II / DI

2.1. Aparato Experimental

Para a execução do trabalho foi necessária a utilização dos seguintes equipamentos:

- Furadeira de coluna adaptada com sistema de aplicação de uma força de avanço constante;
- Tacômetro, para o monitoramento e controle da rotação real da máquina-ferramenta;
- Balança para calibração dos pesos a serem utilizados;
- Cronômetro para monitoramento do tempo de usinagem;
- Estéreo Microscópio SZ6145TR – Olympus e Analisador de imagens – Image Pró-Express, para acompanhamento do desgaste da ferramenta.

2.2. Ferramenta e Material de Trabalho

As ferramentas e os materiais utilizados no trabalho estão relacionados a seguir:

- Ferramenta: broca helicoidal de metal duro, K20, com revestimento multicamadas TiN/TiAlN e $\varnothing = 10$ mm. A Figura (2) apresenta as características da ferramenta utilizada e a Fig. (3) o tipo de revestimento.

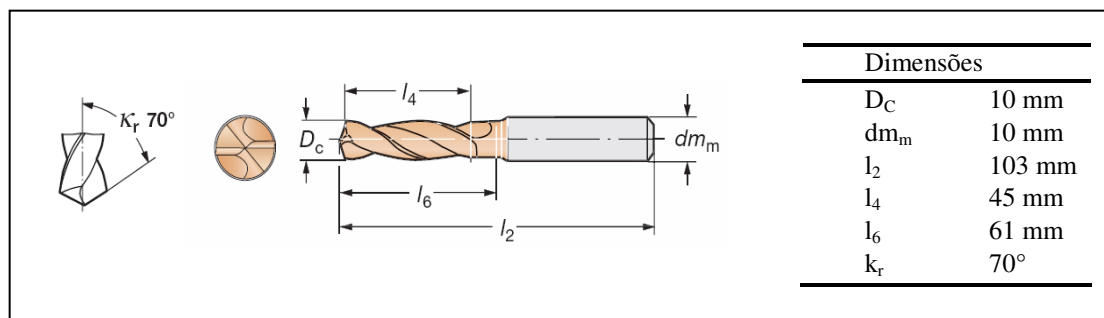


Figura 2. Broca CoroDrill® Delta C-840 (Sandvik) – K20

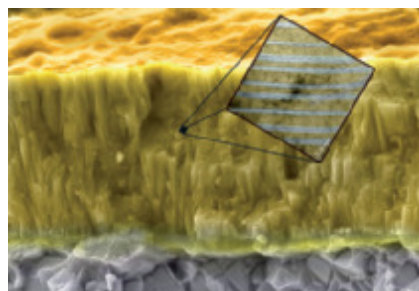


Figura 3. Revestimento TiN/TiAlN multicamada.

- Material de trabalho:
 - DI (classe FE 70003): Ferro Fundido Nodular Perlítico bruto-de-fundição;
 - ADI I (classe ISO 1.050-6): DI austenitizado a 900°C por 2h e austemperado a 360°C por 2h;
 - ADI II (classe ISO 800-10): DI austenitizado dentro da zona crítica (austenitizado a 780°C por 5h e austemperado a 360°C por 2h).

Os corpos de prova utilizados possuíam a forma de bolachas com 104 mm de diâmetro e 30 mm de espessura. A Tabela (3) apresenta a composição da microestrutura e dureza dos materiais estudados.

Tabela 3. Microestrutura e dureza Brinell.

Material	Microestrutura	Dureza Brinell (HB 5/750)
DI	Perlita c/ ~4% de ferrita	263
ADI I	Ausferrita	288
ADI II	Ausferrita c/ Ferrita e resíduos de perlita fina	207

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados obtidos foi realizada através de gráficos, tabelas comparativas e análise de significância. A Tabela (4) apresenta os valores médios obtidos do comprimento de penetração (L_f), durante um tempo de furação de 20 s.

Tabela 4. Resultados obtidos.

Material	F_f [Kgf]	Rotação [RPM]	L_f médio [mm]
DI	7,426	1107	4,9
DI	7,426	1925	12,15
DI	16,34	1107	10,53
DI	16,34	1925	19,43
ADI I	7,426	1107	3,7
ADI I	7,426	1925	3,85
ADI I	16,34	1107	7,73
ADI I	16,34	1925	5,85
ADI II	7,426	1107	4,9
ADI II	7,426	1925	10,5
ADI II	16,34	1107	10,33
ADI II	16,34	1925	18,38

Pode-se observar através dos dados obtidos da Tab. (4), que o ADI I foi o material que apresentou a pior usinabilidade, em todas as condições de corte utilizadas, e os comprimentos médios de penetração encontrados para o ADI II se aproximaram muito aos valores obtidos para o DI.

As Figuras (4) a (7) apresentam comparações entre os materiais estudados em condições mínimas e máximas de rotação e força de avanço.

A partir do gráfico da Fig. (4) observou-se que com o aumento da força de avanço (F_f), o comprimento médio de penetração (L_f) aumentou, isto é, a usinabilidade de todos os materiais foi melhorada. Foi observado que para ambas as condições o DI e o ADI II, com resultados semelhantes, apresentaram os melhores índices de usinabilidade, enquanto que o ADI I mostrou-se como o material mais difícil de usar. Estes resultados se devem ao grau de dureza dos materiais. Apesar do ADI II apresentar uma dureza inferior ao DI, sua usinabilidade não foi superior a este devido a sua microestrutura contendo ausferrita (austenita de alto carbono e ferrita bainítica), a qual pode sofrer transformação martensítica devido ao trabalho mecânico em que o material foi submetido durante a usinagem.

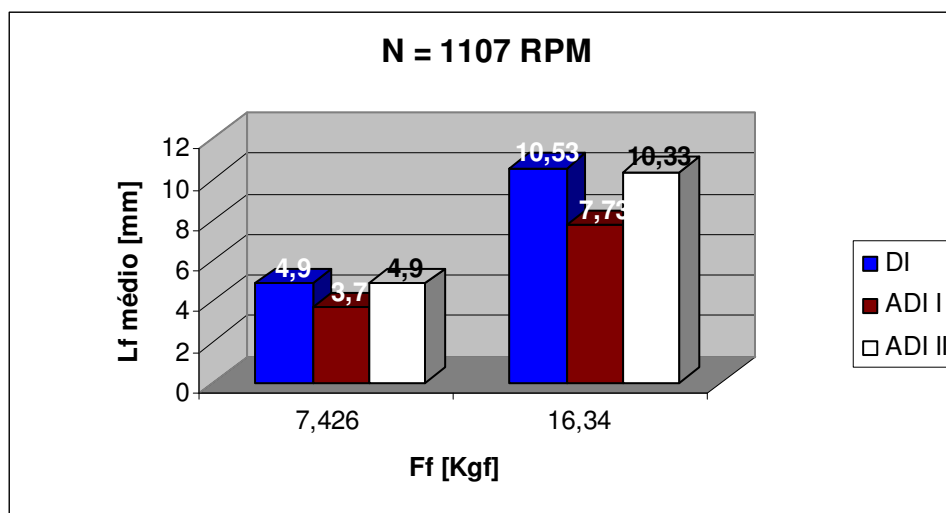


Figura 4. Comprimento médio de Penetração (L_f médio) em função da força de avanço (F_f) para a menor rotação.

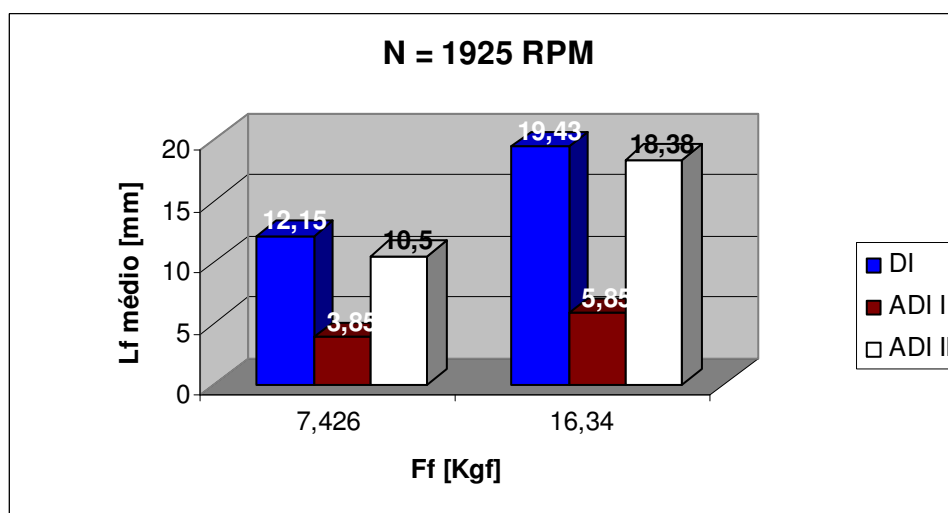


Figura 5. Comprimento médio de Penetração (L_f médio) em função da Força de Avanço (F_f) para a maior rotação.

Para a maior rotação empregada, Fig. (5), observou-se que o aumento da força de avanço (F_f) também melhorou a usinabilidade de todos os materiais, pelo aumento do comprimento médio de penetração (L_f). No entanto, o ADI I, que apresentou a pior usinabilidade entre os três materiais, não apresentou uma melhora significativa. O material que obteve a melhor usinabilidade foi o DI, seguido bem de perto pelo ADI II. Estes resultados, como discutido anteriormente, se devem à dureza e a microestrutura dos materiais.

Quando se aumenta a rotação de 1107 para 1925 rpm há um aumento na velocidade de avanço para a mesma força de penetração e, em consequência, um maior percurso de avanço é esperado. Ao se comparar os resultados das Figs. (4) e (5) nota-se que isto ocorreu para todos os materiais, exceto no caso do ADI I na maior força de avanço aplicada, quando o aumento da rotação reduziu o percurso de avanço médio de 7,73 para 5,85 mm. É importante citar que durante os ensaios com o ADI I nas máximas condições de rotação e força de avanço, observou-se um maior aquecimento da broca e mudança de coloração do cavaco de cinza para azulado. O motivo pelo qual o ADI I sofreu uma mudança de comportamento deve-se ao fato de que com as condições máximas de usinagem o material pode ter sofrido uma transformação martensítica durante a usinagem devido a sua microestrutura completamente ausferrítica, e dessa forma uma maior dificuldade no corte. Esta explicação ganha força quando se observa os lascamentos da aresta transversal da ferramenta utilizada na furação do ADI I, apresentada nas Figs. (6) e (7).

Para se ter uma confiabilidade nos resultados obtidos foi feita uma análise de significância, apresentada nas Tabs. (5) a (7).

A Tabela (5) mostra, com uma confiabilidade de 95% e 5% de nível de significância, que existe diferença significativa entre o ADI I e o ADI II, e que tanto a força de avanço quanto a interação do material com a rotação influenciaram significativamente os resultados. Comprovando estatisticamente os resultados apresentados anteriormente na Tab. (4) e nos gráficos das Figs. (4) e (5).

Tabela 5. Análise de significância do Planejamento 2³ comparando ADI I e ADI II.

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	8,155000	0,397716	0,002370
Material	5,745000	0,795432	0,018636
F_f [Kgf]	4,835000	0,795432	0,026014
Rotação [RPM]	2,980000	0,795432	0,064438
Material x F_f	1,820000	0,795432	0,149368
Material x Rotação	3,845000	0,795432	0,040232

A Tabela (6) abaixo, mostra, com uma confiabilidade de 95% e 5% de nível de significância, que não existe diferença significativa entre o ADI II e o DI, e que tanto a força de avanço quanto a rotação influenciaram significativamente os resultados. Comprovando novamente de maneira estatística os resultados apresentados anteriormente na Tab. (4) e nos gráficos das Figs. (4) e (5).

Tabela 6. Análise de significância do Planejamento 2³ comparando ADI II e DI.

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	11,39000	0,100000	0,005589
Material	0,72500	0,200000	0,171357
F_f [Kgf]	6,55500	0,200000	0,019418
Rotação [RPM]	7,45000	0,200000	0,017086
Material x F_f	-0,10000	0,200000	0,704833
Material x Rotação	0,62500	0,200000	0,197163
F_f x Rotação	1,02500	0,200000	0,122677

Tabela 7. Análise de significância do Planejamento 2³ comparando ADI I e DI.

	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	8,517500	0,326999	0,001471
Material	6,470000	0,653997	0,010063
F_f [Kgf]	4,735000	0,653997	0,018548
Rotação [RPM]	3,605000	0,653997	0,031371
Material x F_f	1,720000	0,653997	0,119259
Material x Rotação	4,470000	0,653997	0,020742

A Tabela (7) mostra, com uma confiabilidade de 95% e 5% de nível de significância, que existe diferença significativa entre o ADI I e o DI, e que tanto a força de avanço quanto a interação do material com a rotação influenciaram significativamente os resultados. Comprovando estatisticamente os resultados apresentados anteriormente na Tab. (4) e nos gráficos das Figs. (4) e (5).

As Figuras (6) e (7) mostram que houve lascamento na aresta transversal de corte quando se iniciou o teste com o ADI I, permanecendo este estável durante os ensaios. Este dano na ferramenta se repetiu quando se realizou novo teste.

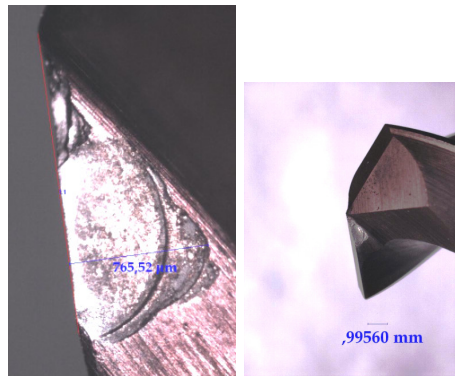


Figura 6. Desgaste da aresta transversal da ferramenta após furar o material ADI I

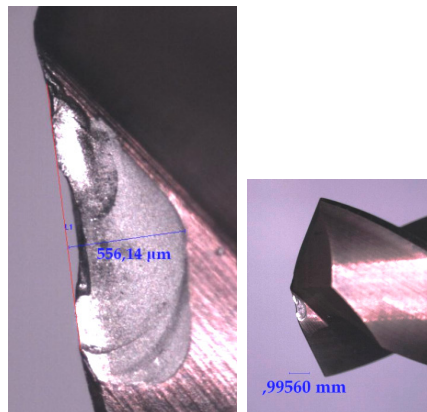


Figura 7. Desgaste da aresta transversal da ferramenta após furar o material ADI I em réplica.

4. CONCLUSÕES

A partir do Teste de Pressão Constante (F_f) pôde-se fazer uma comparação relativa entre os materiais analisados, de forma que, o DI apresentou a melhor usinabilidade em todas as condições ensaiadas e o ADI II mostrou comportamento muito semelhante a este. Em contrapartida, o ADI I foi o material com a pior usinabilidade. As variações da usinabilidade dos materiais estão atribuídas as suas durezas juntamente com a microestrutura, que no caso dos ADIs podem promover transformações martensíticas durante a usinagem dificultando o corte.

5. AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos às agências de fomento: CAPES, FAPEMIG, CNPq e IFM pelo apoio financeiro oferecido ao LEPU, à Tupy S.A. pelo oferecimento do tema da pesquisa e fornecimento dos corpos de prova e à Sandvik do Brasil S.A. pelo fornecimento das brocas utilizadas.

6. DIREITOS AUTORAIS

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

7. REFERÊNCIAS

- Ferraresi, D., 1977, "Fundamentos da Usinagem dos Metais". São Paulo: Blucher, Vol. 1, p 751.
- Machado, A.R. e da Silva, M.B., 2004, "Usinagem dos Metais", Apostila da disciplina Usinagem dos Metais do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, 8a versão, p 257.
- Klocke, F.; Klöppe, C.; Lung, D. and Essig, C., 2007, "Fundamental Wear Mechanisms when Machining Austempered Ductile Iron (ADI)", CIRP vol. 56, pp 73-76.
- Santos, S.C., 2002, "Estudo da Influência de Resvestimentos e da Aplicação de Fluido de Corte no Desempenho de Brocas de Metal Duro Integral na Usinagem de Ferro Fundido Cinzento", Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

- Seah, K. H. W. and Sharma, S.C., 1994, "Machinability of alloyed austempered ductile iron", *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 35. No. 10., pp 1475-1479.
- Toktas, G.; Tayanç, M. and Toktas, A., 2006, "Effect of matrix structure on the impact properties of an alloyed ductile iron", *Materials Characterization* Vol. 57, pp 290-299.

COMPARISON OF THE MACHINABILITY OF AUSTEMPERED DUCTILE IRON AND PEARLITIC DUCTILE IRON USING CONSTANT PRESSURE TEST (F_f)

Patrícia Alves Barbosa, patricia026_eng@hotmail.com¹

Wilson Luiz Guesser, wguesser@tupy.com.br²

José R. Gamarra, jose.garmarra@sandvik.com³

Álison Rocha Machado, alissonm@mecanica.ufu.br¹

¹ Department of Mechanical Engineering – Federal University of Uberlândia, Campus Santa Mônica, CEP 38408-902

² Tupy S.A., Joinville/ SC – Brazil, CEP: 89206900 and FEJ/ UDESC, Faculty of Mechanical Engineering, University Campus Prof. Avelino Marcante, CEP 89223-100

³ Sandvik do Brasil S.A., São Paulo – SP - Brazil, CEP 04795-914

Abstract. *Austempered ductile iron (ADI) is an alloyed and heat treated nodular cast iron that has emerged as a major engineering material in recent years because of its attractive properties such as good ductility, fracture toughness and high strength, good wear resistance and high fatigue strength. The ADI is more difficult to machine than ductile cast iron due to its higher hardness which is influenced by the austempering temperature. The reduction of the machinability of the ADI is also attributed to the transformation of the retained austenite into martensite during machining. For these reasons research about machinability of ADI has been intensified. The aim of the present work is to compare the machinability in drilling process of three materials: pearlitic ductile iron as-cast (DI) and two types of austempered ductile cast iron, the first one is a DI austenitized at 900°C for 2h and austempered at 360°C for 2h (identified here as ADI I), and the second one a DI austenitized inside of the critical zone (at 780°C for 5h and austempered at 360°C for 2h) (called here ADI II). To compare the machinability of these materials Constant Pressure tests (F_f) was carried out, following a factorial planning 2³. The results showed that the DI was the material with higher machinability, followed very closed by ADI II and by the ADI I which showed the worst machinability.*

Keywords: *machinability, constant pressure test, pearlitic ductile iron, austempered ductile cast iron.*