

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

AValiação DA USINABILIDADE EM AÇO AISI 4340 REVENIDO EM DIFERENTES TEMPERATURAS

Marlon Mendes de Oliveira, marlongan@bol.com.br¹

Ítalo do valle Tomaz, italovtomaz@gmail.com²

Alexandre Peixoto do carmo, peixotodocarmo@gmail.com³

Luiz Antônio Fonseca Peçanha Jr., luizantoniofpjunior@gmail.com⁴

¹²³⁴ Instituto Federal Fluminense – IFF, Núcleo de Ciência e Tecnologia dos Materiais – NCTecMat, Campus Cabo Frio, Estrada Cabo-Frio/Búzios s/nº - Baía Formosa - Cabo Frio-RJ CEP 28909-971, Cabo Frio – RJ.

Resumo: No decorrer dos últimos anos a engenharia tem sido desafiada no sentido de atender a crescente demanda de fabricação, deparando-se com a necessidade de usar materiais altamente resistentes ao corte com excelente acabamento superficial e em curto espaço de tempo. Necessidades que tornam o processo de usinagem ainda mais complexo e reduz a vida útil de suas ferramentas. Este trabalho avalia a usinabilidade do aço AISI 4340 submetido ao tratamento térmico de têmpera e posteriormente ao tratamento de revenimento em diferentes temperaturas (500°C, 550°C e 600°C) e tempos de encharque (30 e 60 minutos). Foram realizados ensaios de torneamento com alta velocidade em condição de corte a seco usando inserto de metal duro com cobertura de (TiAl)N e parâmetros de corte constante. Os efeitos que o tratamento térmico pode causar na usinabilidade de um aço foram avaliados utilizando: Potência de usinagem, desgaste da ferramenta de corte e rugosidade média do corpo usinado (Ra). A análise dos resultados mostrou que a variação da temperatura de revenimento e o tempo de encharque dos corpos de prova não influenciaram significativamente a potência de usinagem e a rugosidade do material usinado. A ferramenta de corte não apresentou desgaste durante os ensaios.

Palavras-chave: Usinabilidade, tratamento térmico, AISI 4340.

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavaco cerca de 10% de toda a produção de metais, além de empregar dezenas de milhões de pessoas (Trent e Wright, 2000). Trata-se de um processo consideravelmente imprevisível, com o paradoxo de ser complexo e simples ao mesmo tempo. Complexo devido às dificuldades para determinar condições ideais de corte, principalmente pelo grande número de variáveis envolvidas. Simples porque, uma vez determinadas essas condições o cavaco se forma corretamente, dispensando intervenções do operador (Machado *et. al.*, 2011). Entre os processos convencionais de usinagem, o torneamento é um dos mais utilizados dentro da indústria, por ser de fácil operação e economicamente viável, apresentando expressiva participação na fabricação de peças usinadas (Machado *et. al.*, 2011).

No decorrer dos últimos anos a engenharia tem sido desafiada no sentido de atender a crescente demanda de fabricação, deparando-se com a necessidade de usar materiais altamente resistentes ao corte com excelente acabamento superficial e em curto espaço de tempo. Um exemplo são os aços tratados termicamente, que tornam o processo de usinagem ainda mais complexo e reduz a vida útil de suas ferramentas.

O aço AISI 4340, ligado ao cromo, níquel e molibdênio, é amplamente empregado em peças com alta solicitação mecânica na indústria aeroespacial, automobilística, de máquinas e equipamentos (Bhattacharya, 2011). Um dos tratamentos térmicos mais empregados a esses aços são a têmpera e o revenimento que, normalmente, conduz a microestrutura com melhor relação de resistência e tenacidade. O termo têmpera define o tratamento que após aquecimento para austenitização necessita de resfriamento em meio apropriado para formação da martensita. Entretanto, a martensita obtida da têmpera em geral possui elevados níveis de tensões residuais e baixa tenacidade, sendo necessária a realização de tratamento subsequente, conhecido como revenimento, para obter alterações microestruturais e alívio de tensões provenientes da têmpera (Colpaert H., 2008).

Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a usinabilidade do aço AISI 4340 submetido ao tratamento térmico de têmpera e posteriormente ao tratamento de revenimento em diferentes temperaturas e tempos de encharque.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho utilizou-se uma barra redonda de aço AISI 4340 com 19,2 mm de diâmetro, fornecida na condição laminada bruta, foram preparadas amostras com 120 mm de comprimento e o diâmetro foi mantendo no estado recebido. Todas as amostras (exceto a de referência) foram submetidas ao tratamento térmico de têmpera em óleo, em que permaneceram 29 min (1,5 min/1 mm de espessura) na temperatura de encharque de 860 °C em forno mufla. Posteriormente foram submetidas ao tratamento térmico de revenido, em que variou-se tanto a temperatura quanto o tempo de encharque. Ao término do revenimento as amostras foram retiradas do forno e resfriadas ao ar. Em todos os tratamentos térmicos respeitou-se uma taxa de aquecimento de 9 °C/min. A Tabela 1 apresenta as amostras e as condições dos tratamentos térmicos às quais foram submetidas.

Tabela 1. Tratamento térmico das amostras.

Amostra	Tratamento Térmico
A5-a-30	Têmpera em óleo (860 °C / 29 min) e Revenido (500 °C / 30 min)
A5-b-30	Têmpera em óleo (860 °C / 29 min) e Revenido (550 °C / 30 min)
A6-a-30	Têmpera em óleo (860 °C / 29 min) e Revenido (600 °C / 30 min)
A5-a-60	Têmpera em óleo (860 °C / 29 min) e Revenido (500 °C / 60 min)
A5-b-60	Têmpera em óleo (860 °C / 29 min) e Revenido (550 °C / 60 min)
A6-a-60	Têmpera em óleo (860 °C / 29 min) e Revenido (600 °C / 60 min)

Todas as amostras foram caracterizadas através de um ensaio de dureza Rockwell C, foi utilizado um durômetro digital de bancada com pré carga de 10 kgf e carga de 150 kgf. A fim de garantir a confiabilidade dos dados, a dureza foi medida em 3 pontos em cada uma das amostras.

Para avaliação da influência do tratamento térmico de têmpera seguido do tratamento de revenido na usinabilidade do aço AISI 4340 fez-se uma análise de variância (ANOVA) dos resultados experimentais obtidos após a usinagem em torno convencional utilizando inserto de Metal Duro com cobertura de (TiAl)N, mantendo os parâmetros de corte constante. Os parâmetros de corte utilizados nos ensaios estão apresentados na Tab. 2.

Tabela 2. Parâmetros de corte utilizados nos ensaios de usinagem.

Avanço (f)	0,157 mm/rotação
Rotação (n)	1255 RPM
Profundidade de corte (ap)	2mm

Para a avaliação deste processo, foram definidas como variáveis de resposta a potência de usinagem, o desgaste da ferramenta de corte e a rugosidade média do corpo usinado (Ra). A máquina-ferramenta utilizada nos ensaios foi um torno convencional, possuindo cabeçote com faixa de velocidade de 70 à 1255 RPM, motor C.A. da árvore com 2,5 CV e potência total instalada de 1,5 KVA. Para a realização dos ensaios de torneamento foi selecionada uma ferramenta de metal duro com cobertura de nitreto de titânio alumínio (TiAl)N. A usinagem foi feita utilizando o contraponto conforme mostrado na Fig. 1. A aresta de corte foi substituída por uma nova para cada amostra usinada.



Figura 1. Fixação do corpo de prova.

A potência de usinagem foi monitorada com auxílio de 2 multímetros digitais conforme se mostra na Fig. 2 (Machado, 2012). Em seguida, a rugosidade média das amostras foi caracterizada utilizando um rugosímetro digital Mitutoyo modelo sj-210.



Figura 2. Multímetros.

Com o objetivo de avaliar a microestrutura do aço AISI 4340 em cada uma das condições de tratamento térmico, utilizou-se uma cortadora metalográfica para cortar seções das amostras, que foram embutidas em baquelite para o preparo metalográfico. No preparo metalográfico foi realizado o lixamento das amostras em uma politriz, com lixas d'água de granulometria 100, 220, 360, 400, 600 e 1200. Após o lixamento, as amostras foram polidas com pastas de micro esferas de diamante de granulometria 3, 1 e 0,25 μm . Para revelar a microestrutura do material utilizado, as amostras polidas foram submetidas ao ataque metalográfico utilizando Nital 2% (solução com 2% de ácido nítrico e 98% de álcool etílico), com tempo de exposição de aproximadamente oito segundos. Após o ataque, as amostras foram analisadas em um microscópio óptico utilizando aumento original de 1000X.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como pode ser observado na Tab. 3, o aço utilizado registrou dureza de 27,5 HRC antes dos processos de tratamento térmico. Como já esperado, após tempera o material atingiu 43HRC, demonstrando a eficiência do tratamento realizado a formação de estrutura martensítica com níveis de tensões residuais excessivos. O resultado obtido é similar ao encontrado por Lee e Su (1999).

Tabela 3. Dureza do aço ensaio como recebido e temperado.

Condição	Dureza (HRC)	Desvio Padrão
Recebido	27,5	0,8
Temperado	43,0	1,7

A Figura 3 registra a dureza dos corpos de prova após processo de revenimento em diferentes temperaturas e tempos de encharque. Estes valores são semelhantes ao obtidos por Llaneza e Belzunce (2015) que realizaram o revenido de aço AISI 4340 em diferentes temperaturas. Observa-se uma queda significativa de dureza, para todas as amostras revenidas, quando comparadas as amostras apenas temperadas. Este fato ocorreu, uma vez que, as temperaturas utilizadas para os tratamentos de revenido foram suficientes para acionar diferentes fenômenos responsáveis pela queda da dureza. Entre estes fenômenos destaca-se a recuperação e recristalização da martensita (eliminando discordâncias), e a precipitação do carbono em formas de carboneto. Fenômenos que associado a outros mecanismos são responsáveis pela redução de dureza e aumento da tenacidade com os tratamentos de revenido.

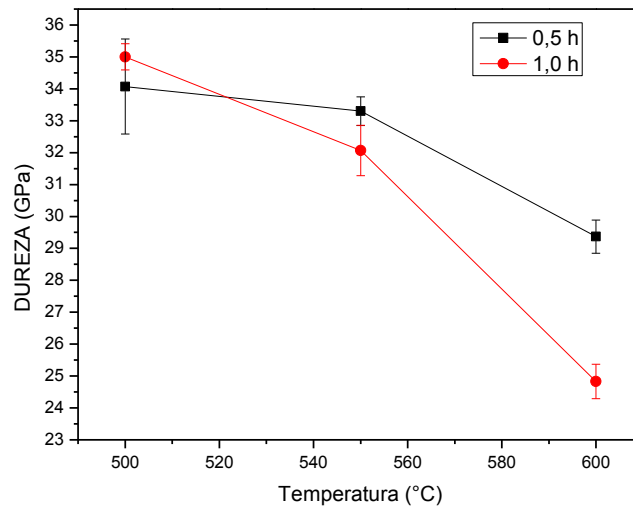


Figura 3. Dureza das amostras após tratamento de revenido.

A Figura 4 apresenta as imagens da microestrutura, obtidas após preparação metalográfica, do aço AISI 4340, das amostras tratadas termicamente. Após o processo de têmpera, como pode ser observado na Fig. 4(a), é possível observar martensita em pacotes de “ripas”, característica de aços com até cerca de 0,6% de carbono, e concentração de carbonetos. Estrutura típica da martensita proveniente do tratamento de têmpera convencional. Esta estrutura apresenta grande concentração de tensões residuais elevada dureza e baixa tenacidade que dificulta sua aplicação na indústria. Já as demais imagens, apresentam a microestrutura dos aços revenidos em diferentes temperaturas. Com o aumento da temperatura de revenimento é possível observar a diluição de carbonetos e recuperação e recristalização da martensita (Colpaert H., 2008). Estes fenômenos são os principais responsáveis pela queda de dureza com o tratamento de revenimento.

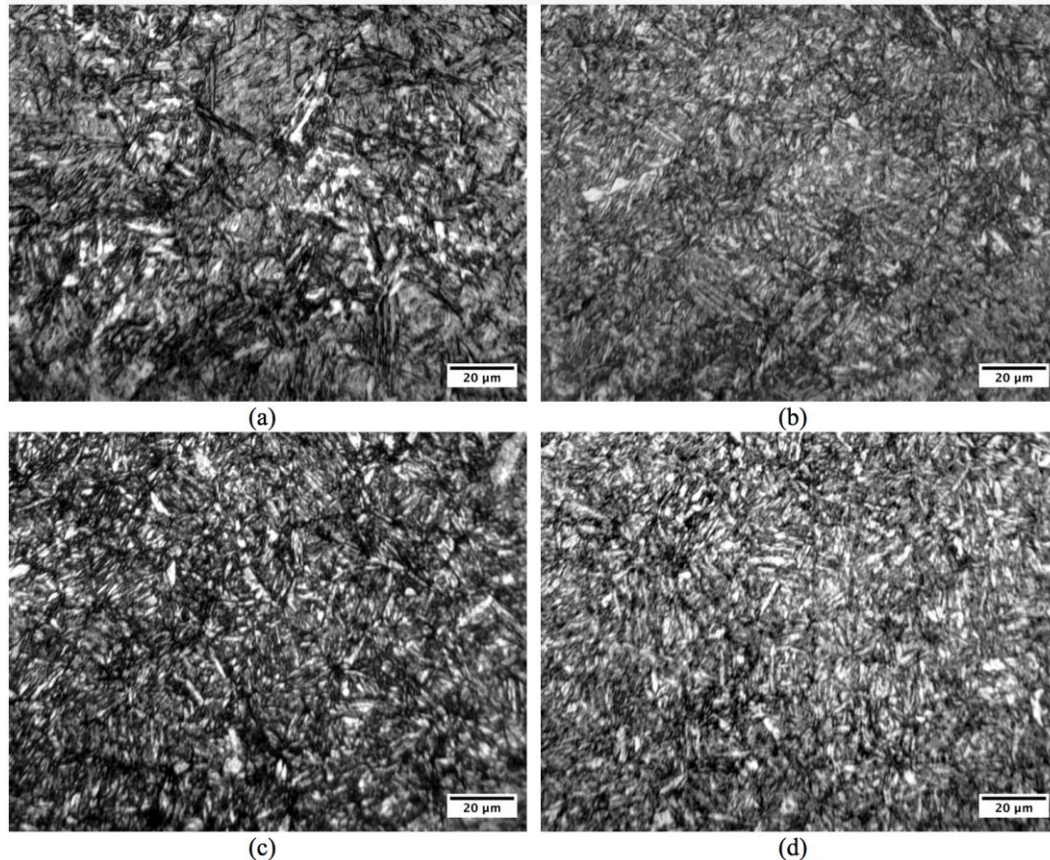


Figura 4. Microestrutura das amostras de aço AISI 4340: (a) Temperada em óleo (860 °C / 29 min), (b) A5-a-30, (c) A5-b-30, (d) A6-a-30. Aumento 1000X

Em todos os ensaios de usinagem realizados foram utilizadas arestas de corte novas. O curto intervalo de tempo de usinagem não foi suficiente para provocar desgaste significativo nas pastilhas utilizadas, conforme Figura 5.



Figura 5. Imagem da pastilha utilizada no ensaio de usinagem para amostra A5-b-30. Microscopia Óptica, aumento de 15X.

A Figura 6 mostra a rugosidade Ra dos corpos de prova após o ensaio de usinagem. As amostras A5-a-30 e A5-a-60 registraram rugosidade média Ra de 2,53 μm e 2,3 μm respectivamente após processo de usinagem. Já as amostras A5-b-30 e A5-b-60 atingiram após usinagem, rugosidade média Ra de 2,42 μm e 2,37 μm respectivamente. Por fim, as amostras A6-a-30 e A6-a-60 registraram rugosidade média Ra de 2,46 μm e 2,26 μm .

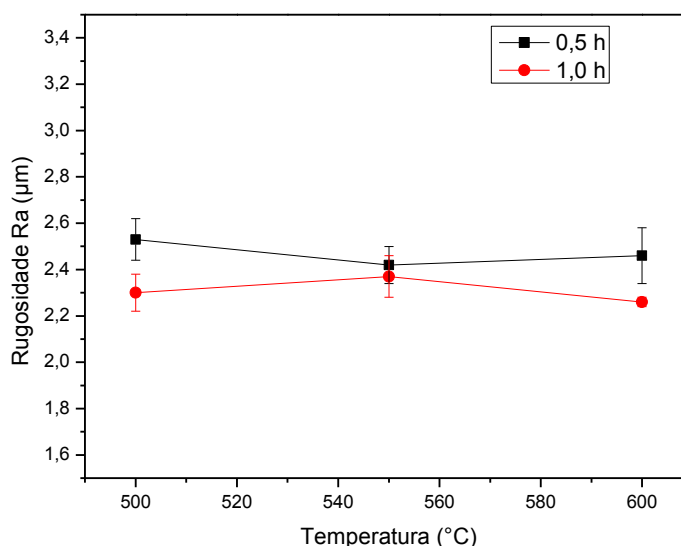


Figura 6. Rugosidade Superficial das amostras usinadas.

Considerando o desvio padrão em cada rugosidade determinada nota-se que os corpos usinados não obtiveram uma variação de rugosidade significativa quando comparadas as diferentes temperaturas de revenimento. Este resultado pode ser justificado uma vez que a rugosidade sofre a influência de diferentes variáveis do processo de usinagem, como por exemplo: parâmetros de corte, condições de corte e geometria da ferramenta (Machado, 2012). Entretanto, tais condições foram mantidas praticamente constante em todos os ensaios, minimizando desta forma a variação do acabamento superficial. Concluindo que a dureza e a microestrutura (principais diferenças entre as amostras usinadas) não influenciaram consideravelmente o acabamento superficial dos usinados. Além disso, todos os ensaios registraram rugosidade abaixo de 6,3 μm , valor máximo de rugosidade aceitável para operações de torneamento simples (Ferraresi, 1970; ISO 3685, 1993). A Tabela 4 mostra os resultados da análise ANOVA realizada para os valores de rugosidade média. Este resultado confirma que realmente não houve diferença de rugosidade significativa entre as amostras.

Tabela 4. Análise ANOVA da rugosidade média Ra.

	Variabilidade	Graus de liberdade	Média da variabilidade	F	F _c
Entre grupos	0,142	5	0,0284	0,326	3,106
Dentro dos grupos	1,044	12	0,0870	-	-
Total	1,186	17	-	-	-

A Tabela 5 registra a potência induzida média durante o processo de usinagem para todas as amostras ensaiadas.

Tabela 5. Potência induzida média durante a usinagem.

Amostra	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Potência (W)
Recebido	-	-	1763 ± 2
A5-a-30	500	30	1862 ± 5
A5-b-30	500	60	1814 ± 1
A6-a-30	550	30	1922 ± 2
A5-a-60	550	60	1832 ± 2
A5-b-60	600	30	1713 ± 1
A6-a-60	600	60	1722 ± 2

Para facilitar a comparação e análise dos resultados apontados na tab. 5, a fig. 7 registra a potência induzida média em função da temperatura e tempo de revenido. É possível perceber que a potência induzida na usinagem das amostras revenidas nas temperaturas de 500 °C e 550 °C é superior à potência induzida na usinagem da amostra no estado como recebida. Esse aumento pode ser justificado pelo aumento da dureza e principalmente pelo aumento da resistência mecânica provocado pelo tratamento de revenido. Porém, na usinagem das amostras revenidas a 600 °C, a potência induzida foi ligeiramente inferior à potência induzida medida na amostra no estado como recebida. Este resultado pode ser atribuído à queda de dureza e resistência mecânica provocadas pelo revenido nesta temperatura.

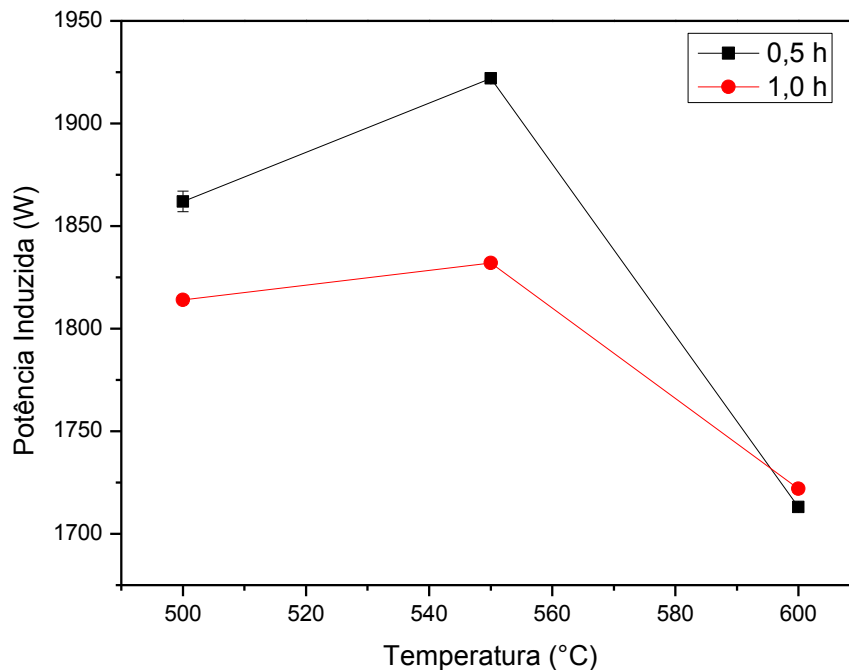


Figura 7. Comparativo da potência média durante a usinagem com a temperatura e tempo de revenido

4. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados obtidos neste trabalho é possível concluir que:

- Os parâmetros utilizados para o tratamento de têmpera obtiveram sucesso e alcançaram estrutura martensítica de alta dureza.
- Todas as temperaturas e tempos de encharque utilizadas para os tratamentos de revenimento reduziram a dureza dos aços temperados.
- Os ensaios de usinagem não foram suficientes para gerar desgaste significativo nas pastilhas utilizadas.
- Os diferentes tratamentos térmicos realizados não influenciaram rugosidade, determinada por Ra, dos aços usinados.
- A potência induzida durante a usinagem das amostras revenidas a 550 °C foi ligeiramente superior à potência induzida durante a usinagem das amostras revenidas a 500 °C. Além disso, foi possível perceber que a potência induzida durante a usinagem das amostras revenidas a 600 °C foi semelhante à obtida na usinagem da amostra no estado como recebida.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, Capes e Faperj, pelo apoio financeiro, que permitiu a realização do presente trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Bhattacharya, S.; Dinda, G.P.; Dasgupta, A.K.; Mazumder, J., "Microstructural evolution of AISI 4340 steel during Direct Metal Deposition process", *Materials Science and Engineering A* 528, pp.2309-2318, 2011.
- Colpaert, H., 2008, "Metalografia dos Produtos Siderurgicos Comuns", 4º edição, São Paulo: Editora Edgard Blucher, p652.
- Ferraresi, D., 1970, "Fundamentos da Usinagem dos Metais", 1º edição, Editora Edgard Blucher.
- ISO, ISO 3685:1993, Tool-life testing with single-point turning tools, 1993.
- Lee, W.; Su, T., "Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions", *Journal of Materials Processing Technology* 87, pp.198-206, 1999.
- Llaneza, V.; Belzunce F. J., "Study of the effects produced by shot peening on the surface of quenched and tempered steels: roughness, residual stresses and work hardening", *Applied Surface Science* 356, pp. 475–485, 2015.
- Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B., 2011, "Teoria da Usinagem dos materiais", 2º edição, São Paulo: Editora Edgard Blucher, p397.
- Trent, E.M., Wright, P.K., 2000, "Metal Cutting", 4th Edition, *Butterworths- Heinemann Ltd*, 446 pg., ISBN 0-7506-7069-X.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

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

MACHINABILITY EVALUATION STEEL AISI 4340 TEMPERING AT DIFFERENT TEMPERATURES

Marlon Mendes de Oliveira, marlongan@bol.com.br¹

Ítalo do valle Tomaz, italovtomaz@gmail.com²

Alexandre Peixoto do carmo, peixotodocarmo@gmail.com³

Luiz Antônio Fonseca Peçanha Jr., luizantoniofpjunior@gmail.com⁴

¹²³⁴ Instituto Federal Fluminense – IFF, Núcleo de Ciência e Tecnologia dos Materiais – NCTecMat, Campus Cabo Frio, Estrada Cabo-Frio/Búzios s/nº - Baía Formosa - Cabo Frio-RJ CEP 28909-971, Cabo Frio – RJ.

Abstract. In the last few years engineering has been challenged to attend industry demand to machine high resistant materials with high quality finishing in short periods of time. These requirements increase machining process complexity and reduce tool's lifetime. This work evaluates the machinability of AISI 4340 steel when subjected to quenching and tempering in different temperatures (500°C, 550°C e 600°C) and treating time (30 and 60 minutes). The samples were subjected to high speed dry turning with constant cutting parameter using hard metal insert with (TiAl)N coating. The effects of heat treatment on steel machinability were evaluated using the following parameters: turning power, cutting tool wear and surface average roughness (Ra). The results shown that tempering time and temperature have significantly influenced turning power. It was also possible to notice that the surface average roughness (Ra) was reduced in samples tempered for 60 minutes. The cutting tools did not wear out during the tests.

Keywords: Machinability, Heat treatment, AISI 4340.