

## USINABILIDADE DO AÇO SAE 4340 EM DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS

Luiz Eduardo Rodrigues Vieira, [luizeduardoodrigues@gmail.com](mailto:luizeduardoodrigues@gmail.com)<sup>1</sup>  
Danilo dos Santos Oliveira, [unbdanilo@gmail.com](mailto:unbdanilo@gmail.com)<sup>2</sup>  
Rhanderviana, [rhanderviana@gmail.com](mailto:rhanderviana@gmail.com)<sup>2</sup>  
José Gomes de Sousa, [aeciosousa@yahoo.com.br](mailto:aeciosousa@yahoo.com.br)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia-UFU, Santa Mônica, CEP: 38400-902

<sup>2</sup>Universidade de Brasília, Campus Gama, CEP: 72444-240

<sup>3</sup>Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Av. dos Pioneiros, 3131, Londrina-PR, CEP: 86036-370

**Resumo.** Este trabalho teve como objetivo principal estudar a usinabilidade do aço SAE 4340 sob o efeito de diferentes tratamentos térmicos - recozimento, normalização e têmpera, utilizando como medida da usinabilidade do material a potência elétrica ativa adquirida durante o torneamento. Foram realizados ensaios de caracterização das amostras tratadas termicamente, metalografia e durezas Rockwell B e C, e ensaios de potência elétrica ativa no torneamento. Os resultados mostraram que o efeito do tratamento térmico realizado influencia diretamente na usinabilidade do material, sendo que a amostra de aço SAE 4340 recozida foi a que apresentou melhor usinabilidade, e a amostra de aço SAE 4340 temperada a pior usinabilidade, levando à ferramenta de corte a falha catastrófica.

**Palavras chave:** Usinabilidade, Aço SAE 4340, Torneamento, Potência Elétrica Ativa.

### 1. INTRODUÇÃO

Na usinagem é muito comum utilizar um banco de dados contendo informações úteis para o ponto de partida de uma determinada aplicação. Desta maneira é possível identificar quais as condições de corte mais adequadas para uma ferramenta na usinagem de um determinado material. No entanto, não se pode confiar integralmente nas informações contidas em banco de dados. Em virtude disso, uma maneira seria realizar ensaios de usinabilidade para uma determinada classe de materiais e ferramentas, com os resultados obtidos são geradas informações práticas de muita utilidade para um chão de fábrica.

Segundo Ferraresi (1977) a usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica, que mostra por meio de um valor numérico comparativo (índice ou porcentagem) um conjunto de propriedades de usinagem do material, em relação a outro tido como padrão. As propriedades de usinagem são àquelas que expressam o seu efeito sobre grandezas mensuráveis intrínsecas ao processo de usinagem, tais como vida da ferramenta, força de usinagem, potência de corte, acabamento superficial, temperatura de corte, produtividade e as características do cavaco formado. A usinabilidade não é, ao contrário do que acontece com a resistência à tração, por exemplo, a propriedade de um único material, mas sim a propriedade resultante da combinação de dois materiais; isto é, da combinação ferramenta-peça usinada. Por isso, é uma grandeza que interessa tanto aos fabricantes de materiais de usinagem e ferramentas de corte quanto aos consumidores.

Para Trent e Wright (2000) a usinabilidade pode ser considerada uma propriedade do material, mas a medida da usinabilidade depende dos parâmetros considerados. Em outras palavras, a ordem no *ranking* de usinabilidade de um número de materiais pode não ser o mesmo, quando obtidos em condições diferentes. Ele então sugere que a usinabilidade não é uma propriedade, mas o “modo” do material se comportar durante a usinagem. Desta forma, usinabilidade é muito mais uma função do teste e não uma função de uma ou mais propriedades do material. “Em termos gerais, usinabilidade pode ser definida como sendo uma grandeza que indica a facilidade ou dificuldade de se usar um material”.

Pelo exposto anteriormente, é de se concordar com Ferraresi (1977) que a usinabilidade não é uma grandeza ou uma propriedade ainda bem definida na usinagem.

Neste trabalho o objetivo principal é justamente estudar a usinabilidade de um aço SAE 4340 sob o efeito de diferentes tratamentos térmicos, recozimento, normalização e têmpera, utilizando como medida da usinabilidade do material a potência ativa adquirida durante o torneamento.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Tratamentos térmicos

Para os diferentes tratamentos térmicos do aço SAE 4340, com composição química nominal de 0,38-0,43 % C, 0,6-0,8 % Mn, 0,15-0,35 % Si, 0,7-0,9 % Cr, 1,65-2,00 % Ni, 0,2-0,3 % Mo, 0,035 % P e 0,04 % S (ASM Handbook Vol. 1, 1990), foram utilizados tarugos cilíndricos com comprimento de 110 mm e diâmetro de 25,4 mm. Foram confeccionados quatro corpos de prova, sendo um sem tratamento térmico, ou seja, como recebido, e as três amostras restantes sofreram tratamentos térmicos de recozimento, normalização e têmpera. As quatro amostras tratadas foram aquecidas em um forno da marca JUNG a uma temperatura de 900°C por 72 minutos, posteriormente, a amostra temperada foi resfriada em óleo, a normalizada resfriada ao ar e a amostra recozida resfriada lentamente dentro do forno por 12 horas.

### 2.2. Aquisição do sinal de potência elétrica ativa

As três amostras tratadas termicamente e a amostra não tratada foram ensaiadas com o propósito de obter a potência elétrica ativa durante o torneamento cilíndrico externo, a seco, sem aplicação de fluido de corte. A aquisição da potência elétrica ativa foi tomada como uma medida da usinabilidade do aço SAE 4340 sob diferentes condições de tratamentos térmicos. As condições de corte foram mantidas constantes utilizando-se um torno CNC Diplomat 195 VS, sendo a velocidade de corte de 200 m/min, avanço de corte de 0,2 mm/rot, profundidade de corte de 1,0 mm e comprimento de usinagem de 50 mm. As ferramentas utilizadas nos ensaios foram insertos de metal duro da classe P para usinagem de aços. Foram realizados três ensaios para cada condição de tratamento térmico das amostras, sendo utilizada para cada repetição uma aresta de corte nova. Como resultado é mostrado apenas uma curva de aquisição, uma vez que houve sobreposição das curvas. A potência elétrica ativa foi adquirida por meio de um sistema de aquisição e processamento de dados composto por um sensor de efeito *Hall*, ligado em uma das fases do torno CNC para aquisição da corrente elétrica, e uma plataforma eletrônica de *hardware* livre com placa simples, Arduino®. Geralmente, a aquisição de dados usando o microcontrolador Arduino é realizada na forma serial. Contudo, a maneira mais adequada de efetuar o tratamento de dados, dá-se sempre na forma paralela. Visando a conversão dos dados coletados em série para paralelo, um programa de computação escrito na linguagem de programação *Python* foi utilizado, tendo como objetivo, além da conversão série-paralela, o armazenamento dessa informação em um arquivo de texto. O arquivo de texto escrito na linguagem *Python* é carregado no *software Matlab* para a apresentação dos dados finais.

### 2.3. Análise metalográfica e dureza

Para visualização da microestrutura e fases presentes nas amostras de aço SAE 4340 foram realizadas análises metalográficas, e para obtenção da resistência mecânica foram realizados ensaios de dureza Rockwell B e Rockwell C. Foram utilizados nestes ensaios corpos de prova retirados dos tarugos ensaiados no torneamento para obtenção da potência elétrica ativa. Para a análise metalográfica as amostras passaram por embutimento, lixamento com lixas, 220, 400, 600, 800, 1000 e 1200 *mesh*, polimento com alumina de 0,5 microns, ataque químico com Nital a 3% e visualização das microestruturas por meio de um microscópio metalográfico Olympus.

Os ensaios de dureza foram realizados num durômetro de bancada Rockwell modelo Durotwin HR-D da Mitutoyo. Para realização dos experimentos foram utilizadas as escalas B e C. As medições das durezas Rockwell B e Rockwell C foram realizadas nas duas faces das amostras, no centro, meio entre borda e centro e na borda das peças, obtendo-se uma média.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Potência elétrica ativa, análise metalográfica e dureza

As “Figuras 1 e 2” mostram os resultados dos ensaios de potência elétrica para as amostras sem tratamento térmico, recozida, normalizada e temperada. É importante ressaltar que a região efetiva de corte equivale ao sinal adquirido no intervalo de 6 a 11 segundos, e os “picos suaves” mostrados no início das curvas, equivalem à partida do motor do torno CNC. Outro aspecto significativo mostrado nas “Fig(s). 1 e 2”, é a nítida variação da potência ativa no início da aquisição dos dados, com a máquina em vazio, isso se dá, provavelmente, pela instabilidade da rede elétrica utilizada. Observa-se ainda nos gráficos adquiridos que o maior sinal da potência elétrica ativa foi no torneamento da amostra temperada, seguida pelas amostras normalizada, sem tratamento térmico, e por fim, recozida. A maior potência ativa para a amostra temperada pode ser justificada, essencialmente, pela maior resistência ao cisalhamento do aço SAE 4340 temperado, nos planos de cisalhamentos primário e secundário durante o corte. Essa maior resistência ao cisalhamento do aço SAE 4340 fica evidente nos resultados obtidos das medições de dureza Rockwell C, com dureza média de 54,2 HRC. A maior dureza da amostra temperada fica evidente pela própria escolha da escala de dureza utilizada, Rockwell

C. Para as amostras sem tratamento térmico, recozida e normalizada, as medições de dureza foram realizadas na escala Rockwell B, em função da baixa resistência a penetração do indentedor na amostra em relação a amostra temperada. Foi verificado também que os valores de dureza Rockwell B obtidos nestas amostras não possibilitaram uma conversão para Rockwell C.

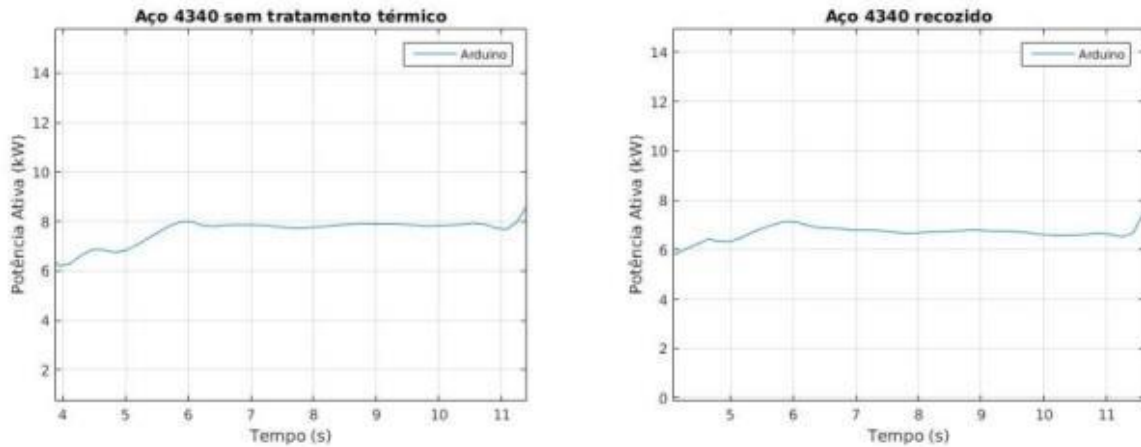


Figura 1. Resultados dos ensaios de potência elétrica ativa para as amostras de aço SAE 4340 sem tratamento térmico e recozida. (Fonte: Próprio Autor)

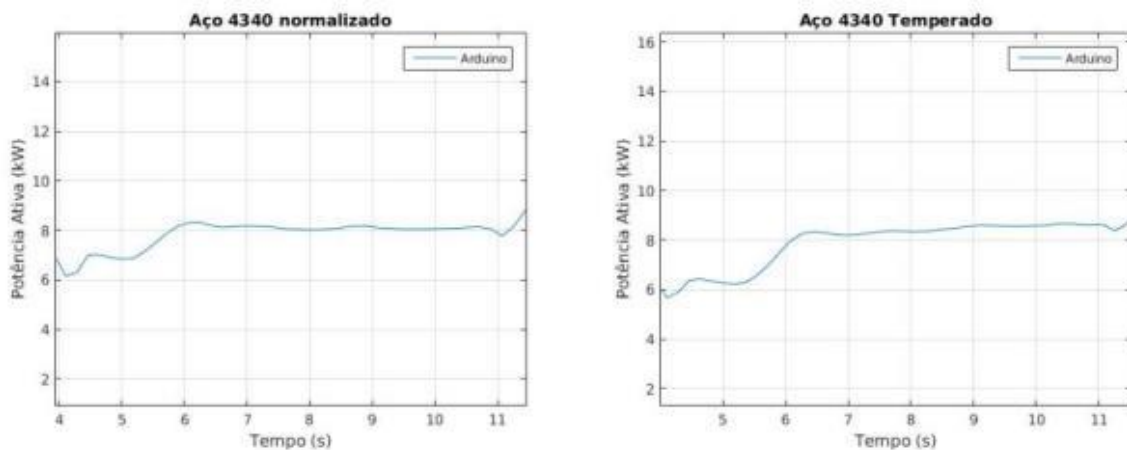


Figura 2. Resultados dos ensaios de potência elétrica ativa para as amostras de aço SAE 4340 normalizada e temperada. (Fonte: Próprio Autor).

A “Figura 3” mostra os resultados da potência média líquida consumida para as amostras de aço SAE 4340 sem tratamento, recozida, normalizada e temperada. A média da potência líquida consumida representa apenas a região de corte durante o torneamento das amostras, com a aquisição de 1000 pontos para uma região mais estável. Os pontos de análise foram tomados a partir do valor de 6,5 kW, menor valor de potência líquida consumida para a amostra recozida. Os resultados evidenciam claramente a maior potência necessária para o corte da amostra temperada, e menor potência para a amostra recozida.

Em termos de usinabilidade, observa-se que a amostra recozida apresenta uma maior facilidade de usinagem, demonstrada pela menor energia necessária para o cisalhamento do material na região de corte, evidentemente, uma menor dureza, em média de 63,8 HRB, e maior ductilidade, uma vez que a microestrutura obtida mostra a presença de fases distintas e tonalidades diferentes, caracterizadas por perlita e ferrita grossas (Callister e Rethwisch, 2016), como evidencia a “Fig. 4”.

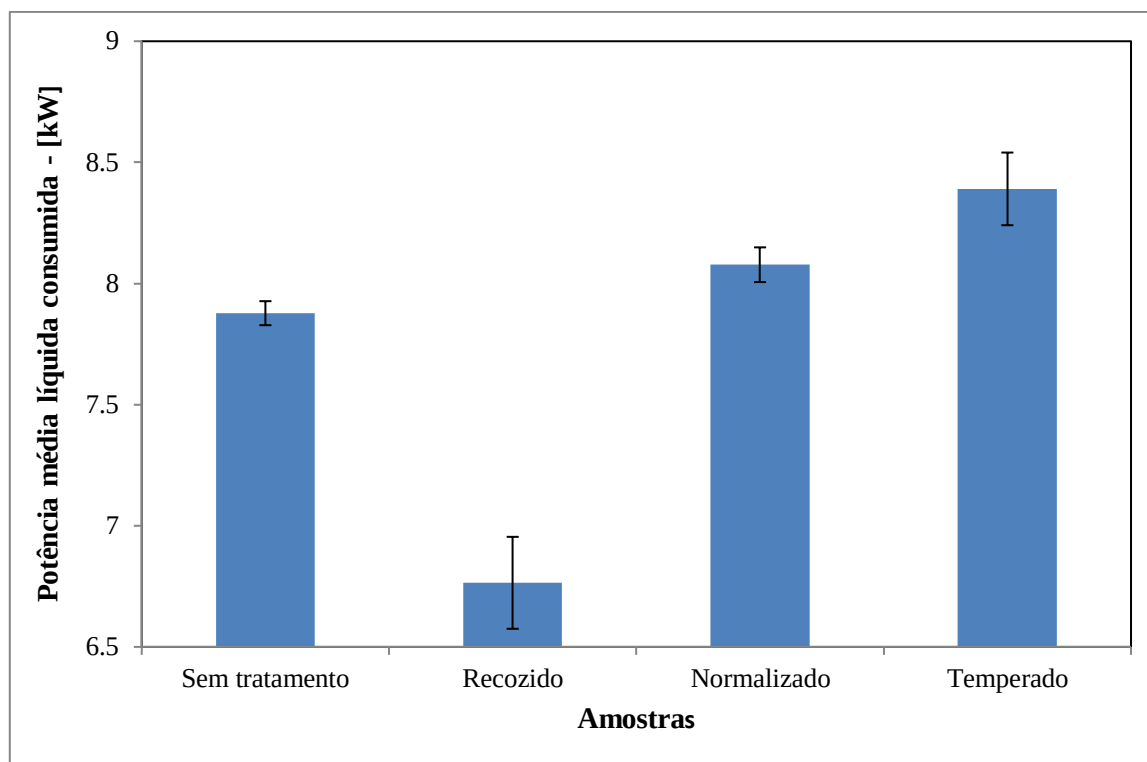
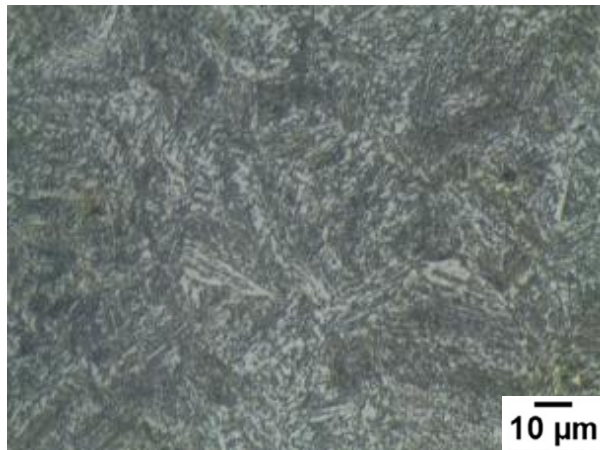


Figura 3. Potência média na região de usinagem para as amostras de aço SAE 4340 sem tratamento, recozida, normalizada e temperada. (Fonte: Próprio Autor).

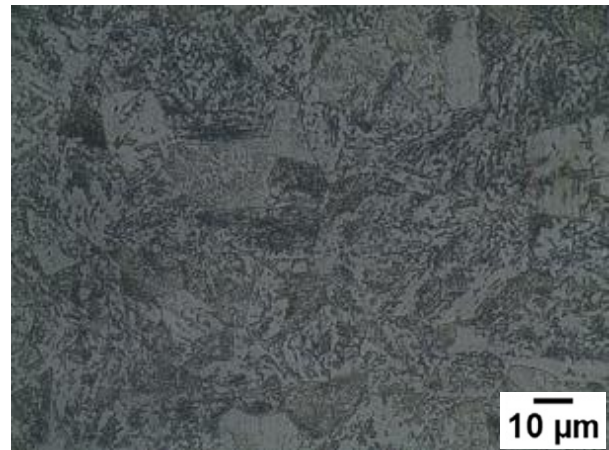
A amostra sem tratamento térmico do SAE 4340 apresentou uma dureza média de 75 HRB, e uma microestrutura com muitas fases presentes, na qual as fases claras podem ser ferrita e austenita, e as escuras perlita, como também constituintes do aço, elementos de liga, “Fig. 4”. Assim como a amostra recozida, a amostra normalizada, com dureza média de 76,4 HRC, também apresenta fases bem distintas de fase clara, ferrita, e fase escura, perlita. A estrutura resultante é de grãos menores mais definidos de ferrita e perlita fina, assegurando, possivelmente, maior homogeneidade de propriedades, “Fig. 4”. A normalização ao contrário do recozimento, não garante ductilidade, e consequentemente, uma usinabilidade homogênea em toda a peça, pois a velocidade de resfriamento não é uniforme como no recozimento. Já a micrografia da amostra temperada, “Fig. 4”, mostra fortemente a presença de uma microestrutura martensítica, formada por agulhas ou placas muito finas, de alta dureza e baixa tenacidade (Callister e Rethwisch, 2016), como fica evidente pela dureza média de 54,2 HRC obtida.

Fica evidente que com a dureza obtida na amostra temperada, o torneamento realizado pode ser considerado como um “torneamento duro”, caracterizada pelo torneamento de aço endurecido com durezas da ordem de 40 - 65 HRC (Kumar *et al.*, 2018). Essa dureza elevada da amostra temperada, fica evidente no aumento do sinal de potência ativa em relação às outras amostras, assim como no desgaste da ferramenta. A imagem de microscopia eletrônica realizada por MEV da marca JEOL JSM-6610, “Fig. 5”, mostra o fim de vida de um inserto após uma passada. Evidentemente, ao se considerar o torneamento da amostra temperada como torneamento duro, seria interessante para o melhor desempenho no corte, a utilização de insertos de materiais ultraduros, como o PCBN (Nitreto Cúbico de Boro Policristalino), que apresenta excelente dureza a quente, e pode ser utilizado em velocidades de corte elevadas na usinagem de aços endurecidos.

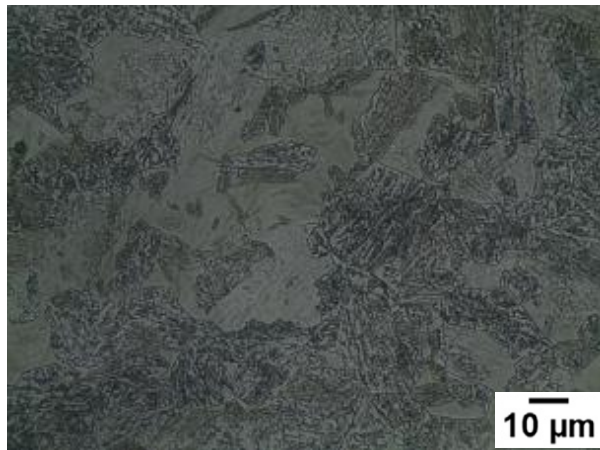
A “Figura 5” mostra que a integridade da ponta da ferramenta é comprometida em virtude da severidade do desgaste na superfície de saída do inserto, evoluindo para uma cratera, que leva a falha catastrófica da ferramenta. As imagens mostram também a presença de material do aço SAE 4340 aderido na ponta da ferramenta. Em virtude dessa evidência, provavelmente, o mecanismo de desgaste atuante foi o *attrition*, caracterizado pela aderência de material da peça e arrastamento de material da ferramenta de corte, deixando a superfície desgastada da ferramenta com uma “aparência áspera” (Trent e Wright, 2000).



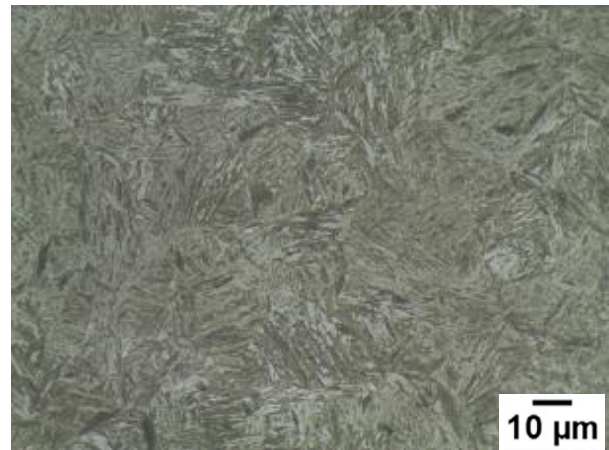
**Sem Tratamento Térmico**



**Recozida**



**Normalizada**



**Temperada**

Figura 4. Micrografia das amostras de aço SAE 4340 sem tratamento térmico, recozida, normalizada e temperada (Fonte: Próprio Autor)

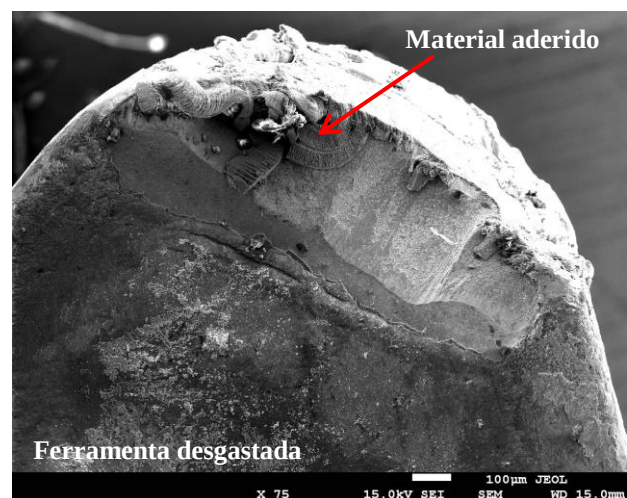
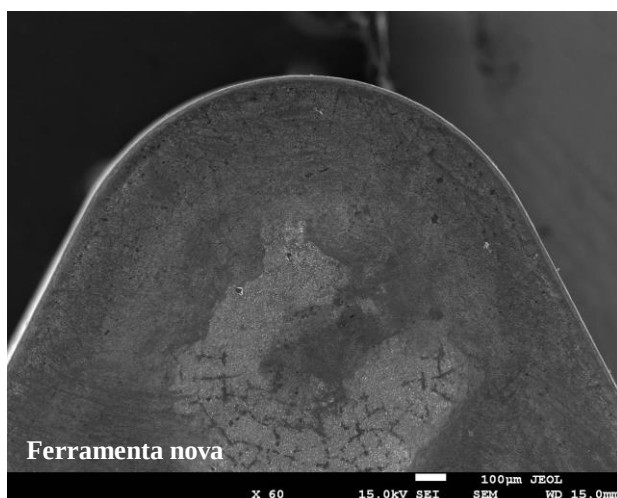


Figura 5. Falha de um inserto após a usinagem da amostra temperada (Fonte: Próprio Autor)



#### 4. CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados e das discussões desenvolvidas, pode-se concluir que os diversos tratamentos térmicos realizados no aço SAE 4340 foram muito bem sucedidos, uma vez que as microestruturas e durezas obtidas nas amostras estão de acordo com a literatura.

A aquisição do sinal da potência elétrica ativa se mostrou um ótimo indicador da usinabilidade do aço SAE 4340 para diferentes tratamentos térmicos.

A amostra de aço SAE 4340 recozida necessitou de menos energia para sua usinagem, ao passo que a amostra de aço SAE 4340 temperada necessitou de mais energia para sua usinagem, caracterizando uma pior usinabilidade em relação a amostra recozida.

A forma de desgaste predominante nos insertos de metal duro da classe P utilizados no torneamento do aço SAE 4340 temperado foi o desgaste de cratera. Provavelmente, essa forma de desgaste foi originada pelo mecanismo de *attrition*.

#### 5. AGRADECIMENTOS

A Universidade de Brasília Campus Gama.

#### 6. REFERÊNCIAS

- ASM Handbook, 1990. Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys. ASM International, 10ª Edição, Metals Handbook.
- Callister, W.D. e Rethwisch, D.G., 2016. *Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução*. Editora LTC, 9ª Edição.
- Ferraresi, D., 1977. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. Editora Edgard Blucher, 2ª Edição.
- Kumar, S.A., Yoganath, V.G. e Krishna, P., 2018. "Machinability of Hardened Alloy Steel Using Cryogenic Machining". *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, p. 8159 - 8167.
- Trent, E.M. e Wright, P.K., 2000. *Metal Cutting*. Editora Butterworth-Heinemann, 4ª Edição.
- Sandvik, 2017. < <https://www.home.sandvik.br/> >.

#### 5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

## MACHINABILITY OF SAE 4340 STEEL IN DIFFERENT THERMAL TREATMENTS

Luiz Eduardo Rodrigues Vieira, [luizeduardoodrigues@gmail.com](mailto:luizeduardoodrigues@gmail.com)<sup>1</sup>

Danilo dos Santos Oliveira, [unbdanilo@gmail.com](mailto:unbdanilo@gmail.com)<sup>2</sup>

Rhander Viana, [rhanderviana@gmail.com](mailto:rhanderviana@gmail.com)<sup>2</sup>

José Gomes de Sousa, [aeciosousa@yahoo.com.br](mailto:aeciosousa@yahoo.com.br)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia-UFU, Santa Mônica, CEP: 38400-902

<sup>2</sup>Universidade de Brasília, Campus Gama, CEP: 72444-240

<sup>3</sup>Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Av. dos Pioneiros, 3131, Londrina-PR, CEP: 86036-370

**Abstract.** The main objective of this work was to study the machinability of the SAE 4340 steel under the effect of different thermal treatments - annealed, normalized and quenching using the active electrical power acquired during turning as a measure of the machinability of the material. Characterization tests of the thermally treated samples, metallography and Rockwell B and C hardness, and tests of electric power in the turning were carried out. The results showed that the heat treatment effect had a direct influence on the machinability of the material, and SAE 4340 annealed steel sample was the one with the best machinability and the SAE 4340 tempered steel sample was the worst machinability, leading to the cutting tool the catastrophic failure.

**Keywords:** Machinability, SAE 4340 Steel, Turning, Active Electric Power.

#### RESPONSIBILITY NOTICE

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