

APLICABILIDADE DO ENSAIO DE FURAÇÃO COM APLICAÇÃO DE PRESSÃO CONSTANTE NO ESTUDO DA USINABILIDADE DE AÇOS ¹

Ayrton Rodrigues Moreira ²
Sandro Cardoso Santos ³
Ivete Peixoto Pinheiro ⁴

Resumo

A avaliação do ensaio de furação com aplicação de pressão constante foi proposta nesse trabalho devido sua simplicidade e confiabilidade dos resultados. Apesar deste teste ser conhecido desde 1950, sua aplicação não foi completamente estudada. O objetivo deste trabalho é apresentar uma contribuição na aplicação do ensaio de furação com pressão constante para estudar a influência da microestrutura/dureza do material nos resultados do teste. Neste trabalho utiliza-se um aço, produzido pela empresa Usiminas, USI-ABRA-L, devido sua boa temperabilidade. O material foi temperado e revendido para obter diferentes durezas e submetido ao teste de usinabilidade. O equipamento de furação consiste em uma furadeira adaptada com uma polia e pesos para aplicação de pressão constante. O intervalo de tempo requerido para furar 20mm de profundidade é adotado como parâmetro de usinabilidade. Diferentes tipos de broca foram usados. O ensaio de furação com aplicação de pressão constante demonstrou aplicabilidade para determinar a usinabilidade aço USI-ABRA-L com diferentes durezas/microestruturas.

Palavras-chave: Usinagem; Usinabilidade; Ensaio de furação.

EVALUATION OF THE MACHINABILITY TEST OF DRILLING WITH APPLICATION OF CONSTANT PRESSURE IN THE STUDY OF MACHINABILITY OF STEELS

Abstract

The evaluation of constant pressure drilling machinability test was adopted in this work due its simplicity and reliability of results. Despite this test is known since 1950's, its applicability wasn't fully studied. The aim of this paper is to present a contribution on the applicability of the constant pressure drilling test to study the influence of the microstructure/hardness of the workpiece material on results of the test. In this work was adopted the steel USI-ABRA-L, produced by Usiminas due its good quenching characteristics. The material was quenched and tempered to different hardness and submitted to the machinability test. The test consists in drill a blind hole with 20mm of depth. A constant pressure is applied on the drill by a weight coupled in pulley that moves the drill. The time interval required to the drill complete this feed length is adopted as a machinability parameter. Different drill types were used. The machinability test showed applicability to establish differences in the machinability of the USI-ABRA-L steel with different hardness.

Key words: Machinability; Constant pressure machinability test; Drilling test.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Bolsista PIBIC, aluno do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG. ayrtonrmeng@yahoo.com.br*

³ *Dr., Prof. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Mecânica, Belo Horizonte-MG. sandro@des.cefetmg.br*

⁴ *Dra., Profª. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Mecânica, Belo Horizonte. ivetepinheiro @deii.cefetmg.br.*

1 INTRODUÇÃO

A busca pela qualidade dos produtos e a redução dos custos de produção são fatores determinantes para o bom desempenho das empresas em um mercado competitivo. No que diz respeito às empresas que utilizam processos de usinagem na fabricação de seus produtos, esse aspecto é especialmente marcante, devido à velocidade com que evoluem as ferramentas de corte, os materiais utilizados como matéria prima a ser usinada, os fluidos de corte, os revestimentos para ferramentas de corte e as máquinas-ferramenta. Em meio a todo esse ambiente competitivo, as empresas que trabalham com processos de fabricação por usinagem têm à disposição uma grande quantidade de recursos que podem contribuir para o aumento da produtividade e/ou redução dos custos de fabricação. A seleção da melhor opção, porém, depende de resultados de testes que demandam tempo considerável para a realização.

O ensaio de usinabilidade de furação com aplicação de pressão constante é capaz de avaliar a vida da ferramenta de maneira rápida, sendo ele classificado como um teste de ranqueamento de curta duração. Este ensaio possui facilidades na construção do equipamento, na realização dos ensaios e na rapidez de obtenção dos resultados. Sua utilização não é muito difundida e esse ensaio não possui padrões para a realização dos testes. Sendo um procedimento promissor para a obtenção de informações a respeito do desempenho de materiais, ferramentas e fluidos de corte na usinagem deve-se desenvolver uma padronização para utilização do ensaio. Este trabalho propõe a abordagem da influência do fator dureza/microestrutura do material nos resultados do ensaio de usinabilidade com aplicação de pressão constante.

2 USINABILIDADE

Usinabilidade é uma propriedade dependente da interação entre o processo de fabricação e as características do material da peça. Nos aços, a composição química, a microestrutura e os tratamentos térmicos e mecânicos que os materiais possuem caracterizam a sua usinabilidade.⁽¹⁾ Quando um material é submetido a um trabalho de corte (furação, fresamento, entre outros) é avaliado o seu desempenho na usinagem. Essa reação a usinagem é a usinabilidade. Associa-se essa propriedade à facilidade ou à dificuldade de se usinar um material. Mas a definição é muito mais complexa, pois existem fatores como: cavaco formado; força e potência de usinagem; temperatura de corte; vida da ferramenta; integridade superficial da peça usinada; formação de rebarbas, que devem ser considerados. Além de propriedades relacionadas ao material, fatores como geometria ou revestimento da ferramenta^(2,3) e aplicação de fluido de corte⁽³⁾ influenciam os resultados de avaliação da usinabilidade.

Cada material apresenta condições particulares que ditam as normas mais adequadas para sua usinagem. É difícil afirmar que um material é melhor que outro, pois cada um possui suas vantagens e desvantagens que dependerão da finalidade que ele será utilizado. No caso de avaliação da usinabilidade de um material, o mais indicado é estabelecer um parâmetro para comparação e a partir dele chegar a conclusões sobre a usinabilidade dos materiais.

Pode-se então, avaliar a usinabilidade através de critérios como condições de usinagem, processos mecânicos e material da peça. Os procedimentos experimentais utilizados para a determinação da usinabilidade constituem os *ensaios de usinabilidade*. Mills e Redford⁽²⁾ classificam os ensaios de usinabilidade em duas categorias: ensaios que requerem usinagem e ensaios que não requerem usinagem.

Nos ensaios que não requerem usinagem, a usinabilidade é obtida com base na composição química, propriedades físicas ou na microestrutura do material da peça usinada. Quanto à natureza dos resultados obtidos, os ensaios de usinabilidade são classificados em: testes de ranqueamento (*ranking tests*) e testes absolutos. Nos testes de ranqueamento determina-se a usinabilidade relativa entre duas ou mais combinações peça-ferramenta, em condições de corte estabelecidas. Os testes absolutos fornecem a usinabilidade relativa em faixas de condições de corte. Os ensaios de usinabilidade podem ser classificados quanto ao tempo de duração em testes de longa duração e de curta duração. Apesar dos diferentes critérios de classificação, os ensaios de usinagem apresentam certa relação entre si. Os testes absolutos são sempre de longa duração.

O ensaio de furação com força de avanço constante foi desenvolvido por Bouguer et al. na década de 1950 e é considerado um dos testes de ranqueamento mais conhecidos.⁽⁴⁾ Este consiste em aplicar uma força constante na direção de avanço e na medição do intervalo de tempo para a ferramenta realizar um determinado deslocamento. Nesse caso o intervalo de tempo é tomado como parâmetro de usinabilidade. O percurso descrito pela ferramenta em um intervalo de tempo pré-fixado também pode ser tomado como parâmetro de usinabilidade. O ensaio pode ser aplicado nos processos de torneamento e furação.

3 METODOLGIA

Os ensaios que serão realizados são caracterizados da seguinte forma: ensaios que requerem usinagem (as amostras serão furadas); ensaios de curta duração (por ser de fácil e rápida obtenção de resultados) e ensaios de ranqueamento (*Ranking tests*), que fixa condições como: ferramenta, força de avanço, velocidade de corte e comprimento de avanço, variando apenas os tratamentos térmicos realizados nas amostras. Para realização desse trabalho foram feitos três tipos de tratamentos térmicos nos corpos de prova: recozimento; têmpera e revenimento. O material utilizado foi conseguido por meio de doação da Usiminas. O USI-ABRA-L possui dureza de 480 HB e apresenta boa temperabilidade, principal característica para ser utilizada nos ensaios de tratamentos térmicos.

As ferramentas utilizadas são brocas de 8, 7 e 6mm. A furadeira possui uma rotação real verificada, medida, de 850rpm, o que possibilitou velocidades de corte de 21,36m/min, 18,69m/min e 16,02m/min para os diâmetros de 8, 7 e 6mm, respectivamente. Os avanços resultantes estavam na faixa de 0,15mm/volta a 0,20mm/volta. O percurso de avanço foi estipulado como sendo de 20mm.

O corpo de prova doado pela Usiminas possuía as seguintes dimensões: 70 x 200 x 50mm. A superfície superior foi dividida em quatro seções com 17,5mm de largura, (70mm de largura dividido por quatro), formando duas regiões centrais e duas nas bordas. Em cada um dos corpos de prova foram realizados 40 furos na superfície superior, dez furos em cada região.

A composição química do aço USI-ABRA-L (%) é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do aço USI-ABRA-L, fornecida pela USIMINAS.

C	P	Si	Cr	Mn	S	Ni	Mo	Al	Cu	N	B
0,26	0,020	0,92	0,72	1,13	0,0010	0,18	0,29	0,094	0,17	0,0052	0,0016

Fonte: Empresa USIMINAS

Foi feito um corte na seção transversal em um dos corpos de prova para a análise da microestrutura do material. A face representada pelo número 1 é externa e paralela à direção de laminação. A face indicada pelo número 2, também, externa, é perpendicular à direção de laminação. As faces seguintes são internas, sendo a

número 3 paralela à direção de laminação e a face 4, é perpendicular à direção de laminação (Figura 1).

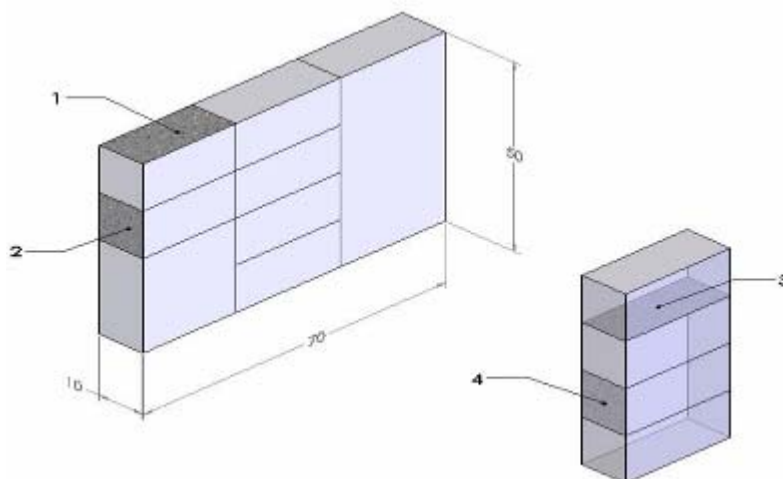


Figura 1. Desenho esquemático das faces que foram analisadas a microestrutura do aço USI-ABRA-L.

Alguns corpos de prova foram submetidos ao tratamento de recozimento, com a temperatura estabilizada em 870°C, os corpos de prova foram deixados no forno por 40 minutos. Após esse tempo, o forno foi desligado e as peças permaneceram nele por 12 horas. A temperatura para têmpera foi de 900°C e as peças ficaram no forno por 30 minutos e depois resfriadas no óleo. No revenimento, um corpo de prova ficou em um forno a 500°C e outro ficou em um forno a 650°C durante 2 horas. Após esse tempo, os fornos foram desligados e os corpos de prova permaneceram dentro deles aproximadamente 12 horas. As peças foram revenidas em temperaturas diferentes para obter duas durezas diferentes.

A primeira etapa dos procedimentos para o ensaio de usinabilidade consiste na seleção da carga a ser usada no equipamento de modo que uma força de avanço seja suficiente para garantir que a broca tenha avanço compatível com a faixa recomendada para o par ferramenta-peça. A força limite é aplicada por meio de um cabo ligado a um sistema de pesos e polia, que permite variar a intensidade da força normal aplicada no ensaio e possibilita regular o equipamento (duas anilhas de 5 kg e cinco anilhas de 1 kg, permitindo regulagem de 1 em 1 kg até o limite de 15 kg). O aspecto geral do equipamento para realização do ensaio é mostrado na Figura 2. Os pesos localizados na parte inferior da bancada são acoplados à polia, que por sua vez transmite torque para movimentar o mandril. Para os experimentos desse trabalho foi utilizada a máxima carga constante de 15Kg, o que é suficiente como força de avanço para o par ferramenta-peça utilizado.

Um sensor ótico foi ligado ao circuito de acionamento e parada de um cronômetro comercial. A placa de acionamento (Figura 3) possui dois rasgos, espaçados entre si de 20mm e uma linha horizontal foi construída 5mm abaixo do rasgo inferior. Com essa montagem a ferramenta penetra 5mm na peça. No instante em que o primeiro rasgo passa pelo sensor ótico, o cronômetro é acionado e no instante em que o segundo rasgo passa pelo sensor ótico – percurso correspondente a 20mm descrito desde o início da contagem do tempo - o cronômetro é parado e é tomada a leitura do tempo. A placa é fixada à furadeira de modo que ela se movimenta junto com a ferramenta. Na Figura 4 é mostrada a posição da placa de acionamento do sensor relacionada com a posição da broca na peça.

Os ensaios micrográficos das faces mostradas na Figura 1 foram realizados com ataque por aplicação, com Nital 4% (solução de ácido nítrico em álcool etílico) durante aproximadamente 5 segundos.

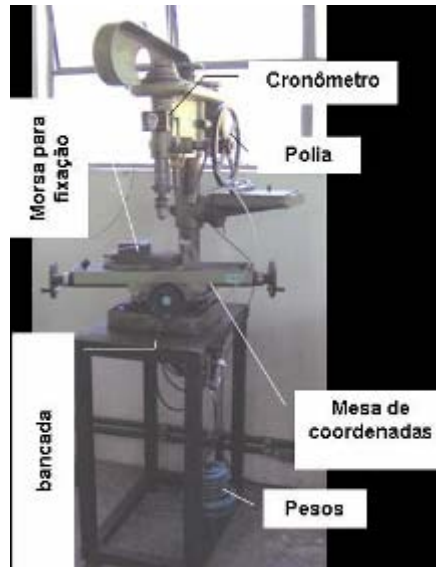


Figura 2. Equipamento de aplicação de pressão constante.

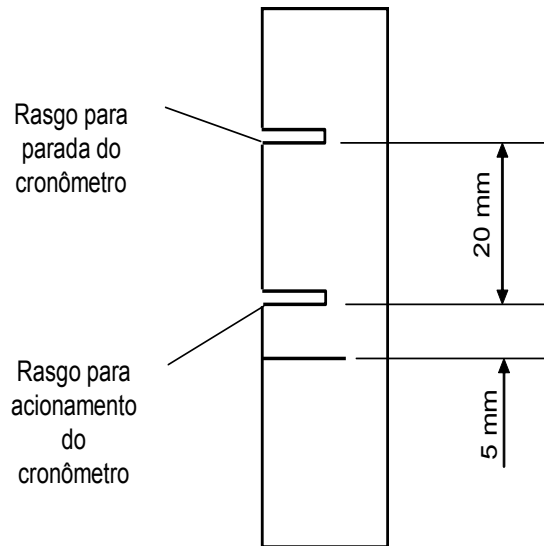


Figura 3. Placa de acionamento do cronômetro.

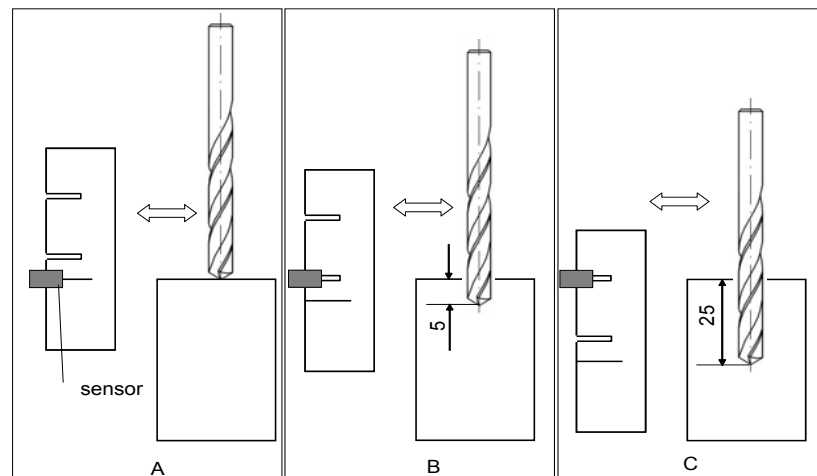


Figura 4. Posição da ferramenta relacionada com a posição da placa de acionamento do cronômetro.

4 RESULTADOS

Ensaio de dureza e estudos das microestruturas foram feitos em amostras de cada peça utilizada nos ensaios de furação (recozidas, temperadas e revenidas). Na Tabela 2 estão representadas as diferentes durezas dos corpos de prova. Em cada amostra foram feitos dez ensaios de dureza para que fosse possível chegar a uma média confiável.

Tabela 2. Materiais utilizados nos ensaios de furação com suas respectivas durezas médias (HRC) e seus tratamentos térmicos.

USI-ABRA-L	Durezas médias (HRC)
Estado original	47
Temperado e revenido a 500°C	39,5
Temperado e revenido a 650°C	22
Recozido	4,5*

**esta escala não é recomendada para este nível de dureza do material, entretanto, o resultado é apresentado para efeito comparativo.*

As brocas não foram capazes de furar o aço com dureza média de 47 HRC e encontraram muita dificuldade para furar os corpos de prova com dureza média de 39,5 HRC (temperados e revenidos a 500°C).

A microestrutura do aço foi analisada nas seções representadas na Figura 1. Na Figura 5 é possível observar, na face externa paralela à direção de laminação (1), a presença da bainita, constituinte presente no aço USI-ABRA-L no estado original (como recebido da Usiminas). Já era prevista a presença desse constituinte devido à grande dureza que o material doado apresentava e a presença do boro. Na Figura 6, que representa a face perpendicular à direção de laminação (2), observa-se a bainita e a textura de laminação.

Na Figura 7 é possível ver a bainita na face interna e paralela à direção de laminação (3), disposta de forma bem semelhante à da Figura 5, face externa paralela à direção de laminação (1). A Figura 8, face 4, é semelhante à Figura 6, face 2, pois também mostra a textura de laminação.

As amostras dos aços que passaram por beneficiamento (têmpera e revenimento), Figuras 9 e 10, revelam martensita em suas microestruturas. A microestrutura do aço USI-ABRA-L recozido é mostrada na Figura 11, pode-se notar a disposição da ferrita em regiões mais concentradas com cor clara característica e entre essas regiões há presença da perlita, que é caracterizada pelas regiões de cor mais escura.

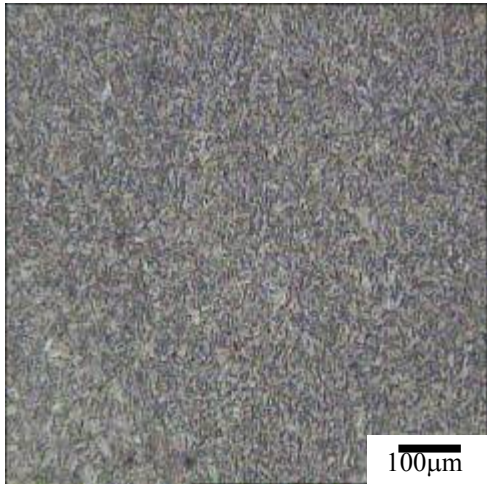


Figura 5. Face externa paralela à direção de laminação (1), do aço USI-ABRA-L, no seu estado original. Ataque com Nital 4%.

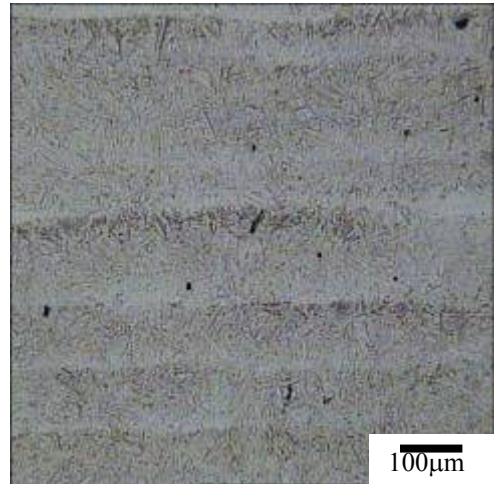


Figura 6. Face externa e perpendicular à direção de laminação (2), do aço USI-ABRA-L, no seu estado original. Ataque com Nital 4%.

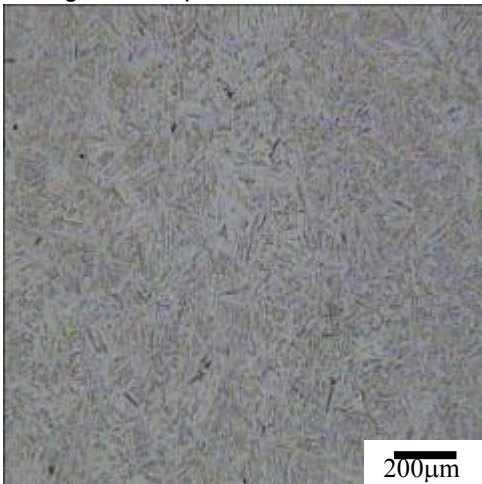


Figura 7. Face interna e paralela a direção de laminação (3), do aço USI-ABRA-L no seu estado original. Ataque com Nital 4%.

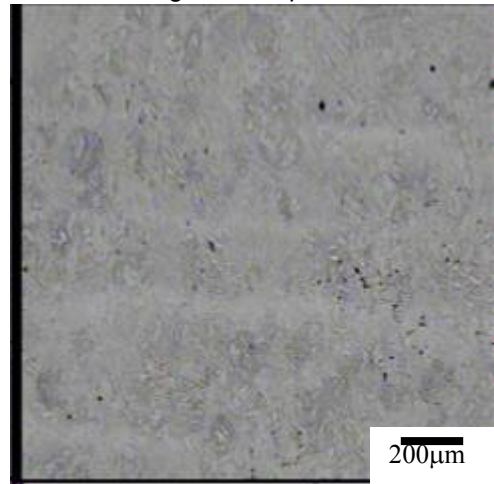


Figura 8. Face interna e perpendicular à direção de laminação (4), do aço USI-ABRA-L, no seu estado original. Ataque com Nital 4%.

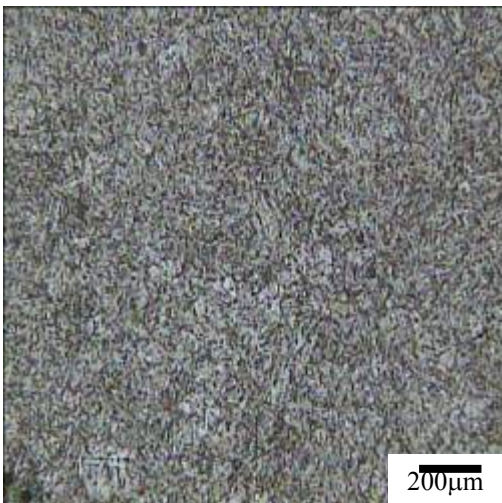


Figura 9. Microestrutura do aço USI-ABRA-L após têmpera e revenimento a temperatura de 500°C. Ataque com Nital 4%.

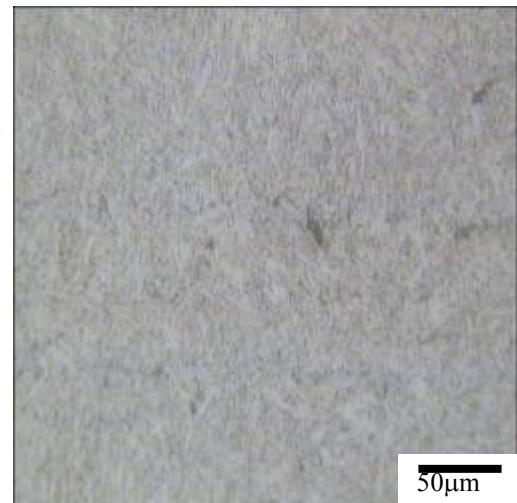


Figura 10. Microestrutura do aço USI-ABRA-L após têmpera e revenimento a temperatura de 650°C. Ataque com Nital 4%.

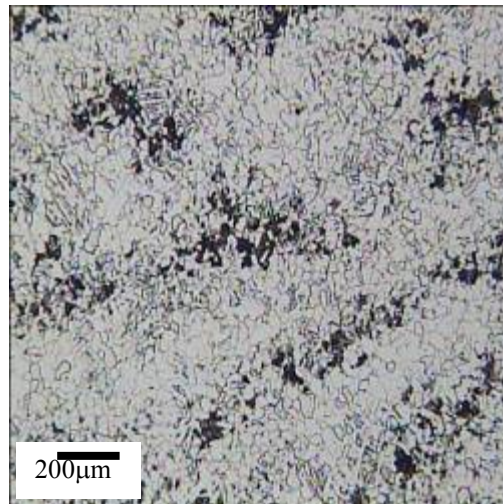


Figura 11. Microestrutura do aço USI-ABRA-L recozido a temperatura de 870°C, por 40 minutos. Ataque com Nital 4%.

A matriz de ensaios de usinagem é composta da seguinte forma: ferramentas com afiação especial (tipo A) e afiação cônica com ângulo de ponta 118° (tipo B); brocas com três diâmetros diferentes (8, 7 e 6mm) e materiais que sofreram três tipos de tratamentos térmicos (recozimento; temperado e revenido a 500° C; temperado e revenido a 600° C). Seria empregada a análise de variância (ANOVA) para a verificação da diferença entre as médias dos resultados obtidos, mas foi observado que os tempos não variaram em torno de uma média, apresentando uma tendência, sendo portanto, mais viável analisar os ensaios comparando os coeficientes angulares das retas de regressão descritas pelos valores dos tempos de usinagem. Nos primeiros ensaios foram comparados os tempos de usinagem para materiais de durezas/microestruturas diferentes usinados por brocas que tinham características semelhantes. Os resultados mostram tempos mais elevados de furação para materiais com durezas maiores. Além desse resultado, verificou-se que a taxa de crescimento dos tempos para os materiais temperados e revenidos é mais elevada do que a do material recozido. Quanto mais duro o material, maior a taxa de crescimento do tempo. Na Figura 12 essa afirmação é confirmada e na Tabela 3 têm-se os coeficientes angulares das retas de regressão descritas pelos pontos que representam os tempos de furação dos ensaios. Sendo o coeficiente angular da reta de regressão descrita pelos pontos do material mais duro muito maior que os outros coeficientes.

Tabela 3. Coeficientes angulares das retas de regressão descritas pelos pontos representados no gráfico da Figura 12.

Material	Coeficiente angular
Recozido	0,098
Temperado e revenido (650°C)	0,823
Temperado e revenido (500°C)	3,390

Na Figura 12 deve ser destacado o comportamento da broca do ensaio realizado no material temperado e revenido a 500°C, por não conseguir realizar mais que três furos no corpo de prova. Lembrando que esse material possui uma dureza média de 39,5 HRC (Tabela 2). A Figura 13 mostra três ensaios realizados, utilizando brocas semelhantes do tipo A de 8mm na borda dos mesmos corpos de prova.

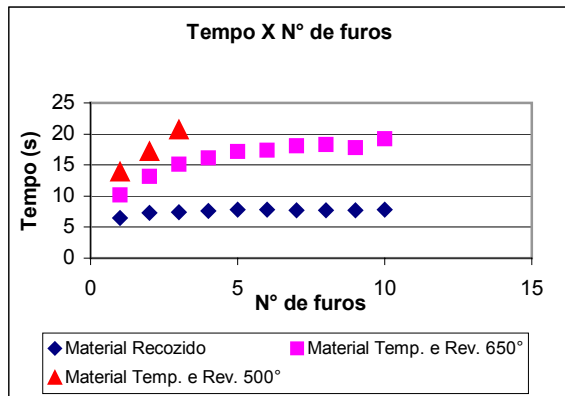


Figura 12. Ensaio realizado com a broca do tipo A, 7mm, nas bordas de materiais com diferentes durezas.

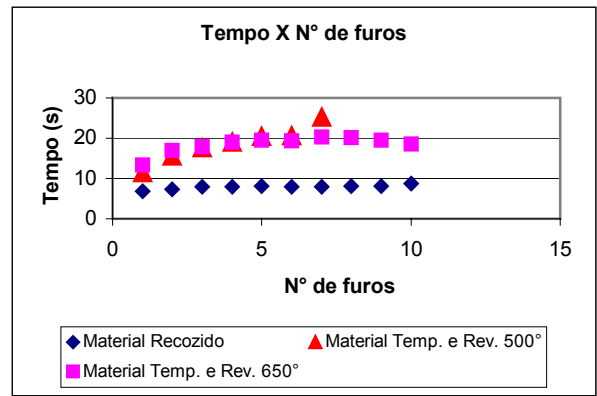


Figura 13. Ensaio realizado com brocas do tipo A, 8mm, nas bordas de materiais com diferentes durezas.

Nesses testes da Figura 13 nota-se uma capacidade maior de realizar mais furos das brocas de 8mm no material de maior dureza, mas os tempos foram um pouco maiores que os tempos da ferramenta de 7mm. Outro detalhe é que pouco antes de chegar ao fim de vida os tempos para furação desse material aumentaram muito, dando uma diferença de quase 14 segundos entre o primeiro e o último tempo de furação nesse ensaio. A característica que mais chamou atenção nesse gráfico da Figura 13 foi a semelhança da distribuição dos pontos com as curvas de desgaste de ferramentas em função do tempo. Essa semelhança deve-se pela disposição dos pontos, pois, nos primeiros ensaios os tempos são um pouco menores, nos ensaios intermediários os pontos se distribuem de maneira mais constante atingindo picos nos ensaios finais. Essas características descritas acima também estão presentes nas Figuras 14 e 15. Na Figura 14, as brocas de 6mm do tipo A não foram capazes de realizar mais que sete furos e no último furo o tempo de furação foi superior ao da tendência de crescimento, o que pode ser atribuído ao desgaste da ferramenta. O mesmo comportamento foi observado em ensaios realizados com a broca tipo B, conforme mostrado na Figura 15.

A Figura 16 mostra as curvas de desgaste ao longo do tempo de vida de ferramentas e como mencionado alguns gráficos obtidos nos resultados dos ensaios possuem uma semelhança com essas curvas. Essa semelhança se dá devido aos tempos de usinagem que nos primeiros ensaios são pequenos e depois tendem a aumentar muito quanto mais perto do fim de vida da ferramenta.

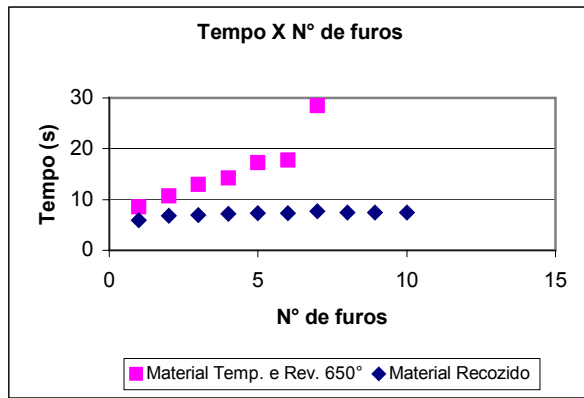


Figura 14. Ensaios realizados com brocas do tipo A, 6mm, no centro dos materiais: recozido e temperado e revenido a 650°C.

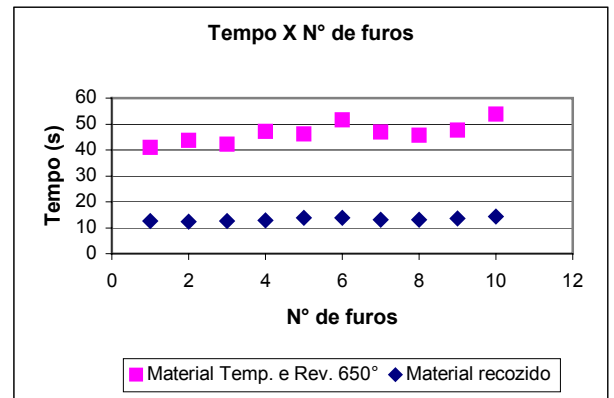


Figura 15. Ensaios realizados com brocas do tipo B, 7mm, no centro dos materiais: recozido e temperado e revenido a 650°C.

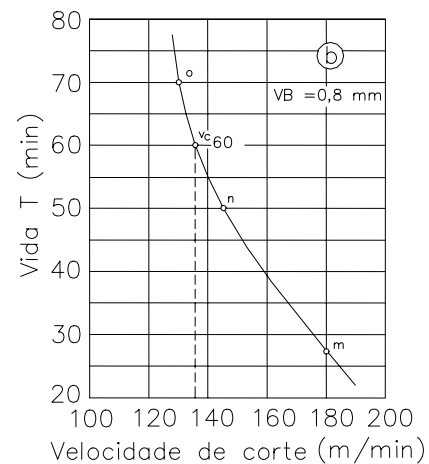
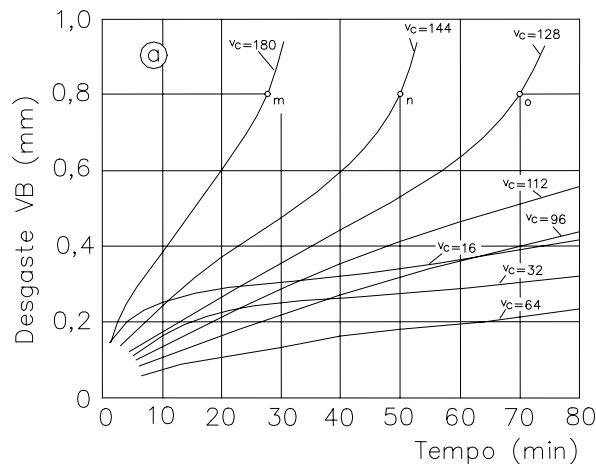


Figura 16. Curvas típicas de evolução de desgaste ao longo do tempo e de vida de ferramentas em função da velocidade de corte (Ferraresi, D.).

5 CONCLUSÕES

O material utilizado nos ensaios é de difícil usinagem, portanto, o método de análise de variância (ANOVA) não se mostrou adequado para a análise dos resultados devido à elevada solicitação das ferramentas e conseqüentemente ao desgaste sofrido por elas. Assim, a análise foi feita tomando como parâmetro o coeficiente angular das retas de regressão apresentadas pela disposição dos tempos de usinagem. Os resultados foram mais influenciados pelo tipo de broca utilizado do que pela variação do diâmetro das brocas, sendo a ferramenta do tipo A, com afiação especial, de melhor desempenho do que a do tipo B, com ângulo de ponta 118°. O ensaio de furação com aplicação de pressão constante demonstrou aplicabilidade para determinar a influência da dureza/microestrutura na usinabilidade do aço USI-ABRA-L.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio por meio da bolsa de iniciação científica PIBIC e à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais) pelo apoio financeiro na construção do equipamento por meio do Programa Jovens Doutores.

REFERÊNCIAS

- 1 MILAN, J. C. G. Usinabilidade de aços para moldes para plástico, 1999. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil.
- 2 SANTOS, J. A. B. O. Estudo da aplicação de revestimentos em fresas caracol. 2004. Dissertação de Mestrado apresentada à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- 3 SANTOS, S.C. Estudo da influência de revestimento e da aplicação de fluido de corte no desempenho de brocas de aço rápido e de metal duro integral na usinagem de ferro fundido cinzento. 2002. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- 4 MILLS, B.; REDFORD, A.H. Machinability of engineering materials. 1983. 174p. Applied Science Publishers, England.