

ESTUDO DA USINABILIDADE DOS AÇOS MICROLIGADOS

Alexandre M. Reis

Márcio B. da Silva

Álison R. Machado

Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica

Cep: 38408 – 100 – Uberlândia, MG, Brasil

Resumo. Os aços microligados (AM) são aços carbono que adquirem suas propriedades de alta resistência mecânica, tenacidade, e ductilidade, decorrentes do efeito combinado de composição e tratamento termomecânico, ou seja, sem sofrer tratamento térmico de tempera ou revenido. Eles se caracterizam pelas pequenas adições ($\leq 0,25\text{wt } \%$) (Cline et al., 1986) dos chamados elementos microligantes (V, Nb, Ti), ou uma combinação deles, à uma composição básica de Fe-C. Foram desenvolvidos como alternativa econômica aos aços temperados e revenidos (aços TR), pois apresentam um aumento de economia e de produtividade resultantes de menos etapas de processamento, menos gastos de energia devido a eliminação dos tratamentos térmicos, diminuição dos custos de desempenho e eliminação das trincas de tempera. O estudo da usinabilidade dos AM é bastante importante pois todo material forjado (principal aplicação dos AM) deve passar previamente por um processo de usinagem considerável após o forjamento para se produzir a peça final. Apesar disto, existem poucos estudos sobre este assunto, sendo mais raro ainda a existência na literatura de artigos que trate especificamente da usinagem dos AM. O presente trabalho apresenta uma revisão sobre a usinagem dos AM, nos processos de torneamento, fresamento, e furação, realizados nas últimas décadas.

Palavras-chaves : Usinabilidade, Aços microligados

1. INTRODUÇÃO

O termo usinabilidade pode ser usado para indicar a facilidade ou a dificuldade de se usinar um material afim de se obter tamanho, forma e acabamento superficial desejado (ASM Handbook, 1990). São muitas as variáveis que podem ser consideradas como medidas da usinabilidade de um material, como por exemplo: o acabamento superficial, a força de corte, a temperatura de corte, a vida da ferramenta, o controle do cavaco, a produtividade entre outros. O conhecimento da usinabilidade para os mais variados tipos de materiais utilizados em construção mecânica é de extrema importância. Contudo, é preciso tomar cuidados especiais na determinação da usinabilidade de um material específico, pois, em diferentes condições, um grupo de materiais pode não ter a mesma classificação, ou seja, um material que tenha sido classificado como possuindo uma excelente usinabilidade, em comparação com outros

materiais, quando utilizando uma determinada variável, pode não ter tão boa classificação quando for obtida considerando-se outra variável (Ferraresi, 1970). Assim a usinabilidade é considerada como uma função do teste, e qualquer número de usinabilidade deve acompanhar uma descrição completa do teste (Machado & da Silva, 1993).

Os aços microligados (AM) são aços carbono que adquirem suas propriedades de alta resistência mecânica, tenacidade, e ductilidade, decorrentes do efeito combinado de composição e tratamento termo-mecânico, ou seja, sem sofrer tratamento térmico de tempera ou revenido. Estes aços se caracterizam pelas pequenas adições ($\leq 0,25\text{wt } \%$) (Cline *et al.*, 1986) dos chamados elementos microligantes, tais como V, Nb, Ti, ou uma combinação deles, à uma composição básica de Fe-C. Foram desenvolvidos para servirem como alternativa econômica aos aços temperados e revenidos (aços TR), pois eles apresentam um aumento de economia e de produtividade resultantes de um menor número de etapas de processamento, menos gastos de energia devido a eliminação dos tratamentos térmicos, diminuição dos custos de desempenho e eliminação das trincas de têmpera.

Os principais mecanismos de aumento da resistência dos AM são refinamento de grão e precipitação (Yang *et al.* (Part I), 1996). O controle das propriedades mecânicas é feito portanto através da manipulação destas variáveis microestruturais. A perda de resistência mecânica devido ao baixo teor de carbono é compensado pelo aumento de resistência por precipitação e refino de grão causado pela adição do elemento microligante.

Pesquisas iniciais no desenvolvimento dos AM se concentraram na melhoria da soldabilidade e conformabilidade de chapas planas laminadas a quente e a frio. A adição de microligantes e o controle do processo termomecânico possibilitaram um decréscimo do teor de carbono nestes aços, o que resultou em uma melhora destas propriedades. Além de menores teores de carbono e conteúdo racionalizado dos microligantes, o controle da morfologia destes elementos possibilitaram a produção de aços com adequada soldabilidade e conformabilidade (Bernard, 1977).

O desenvolvimento de barras de AM (produtos processados por conformação e usinagem) foi um pouco mais lento. A maioria dos materiais para aplicação em usinagem possuem um teor de carbono mais elevado do que os materiais que compõem chapas. A estrutura neste caso é basicamente composta de ferrita e perlita. Algumas aplicações envolvem aços com uma estrutura bainítica de baixo carbono (Naylor, 1989).

Existem poucas pesquisas nesta área indicando vantagens na utilização dos AM nas operações de usinagem. Alguns resultados indicam que a usinabilidade (em termos de vida de ferramenta) é igual ou superior aos aços ligas tratados termicamente para idênticas aplicações (Bhattacharya, 1987). Como a principal vantagem da utilização dos AM está na economia devido a eliminação de certas etapas, principalmente com relação ao tratamento térmico e considerando que os custos de usinagem de um componente representam de 50 a 60% do custo total (Bhattacharya, 1994), como está mostrado esquematicamente na Fig. 1, a usinabilidade é um parâmetro importante a ser avaliado.

Este artigo tem por objetivo rever os principais resultados obtidos nos estudos realizados sobre a usinagem dos AM nas últimas décadas.

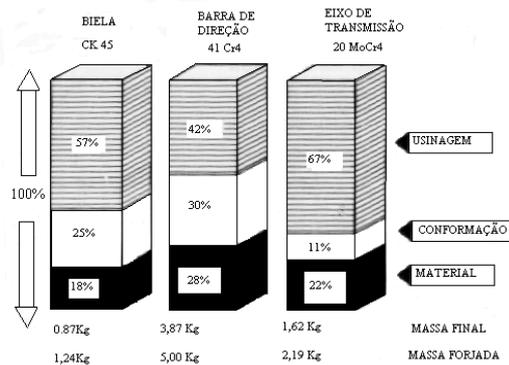


Figura 1 – Custos de produção de peças de um caminhão (Chambers *et al.*, 1984)

2. COMPARAÇÃO DA USINABILIDADE ENTRE OS AM E OS AÇOS TR.

Nas duas últimas décadas, alguns testes de torneamento, furação e fresamento foram realizados com o objetivo de se determinar as características de usinabilidade dos AM e compará-las com as dos aços TR. Nos itens seguintes são apresentados resultados e conclusões obtidos em alguns destes testes.

2.1 Torneamento

Vários testes de torneamento (Niwa *et al.*, 1981; Hashimoto *et al.*, 1982; Ollilainen *et al.*, 1984; Chambers *et al.*, 1984; Kondo *et al.*, 1986; Cline *et al.*, 1986; Osuzu *et al.*, 1986; Nomura *et al.*, 1989) foram realizados nas últimas décadas, com o objetivo de se estudar a usinabilidade dos AM. Os resultados mostraram, de uma maneira geral, que os AM possuem uma usinabilidade comparável ou superior a dos aços TR. Um típico resultado de usinabilidade é mostrado na Fig. 2, onde o resultado de um teste de torneamento para o AM 1045 é comparado com o do aço 4140 TR para o mesmo nível de resistência, através da vida da ferramenta em função da velocidade de corte.

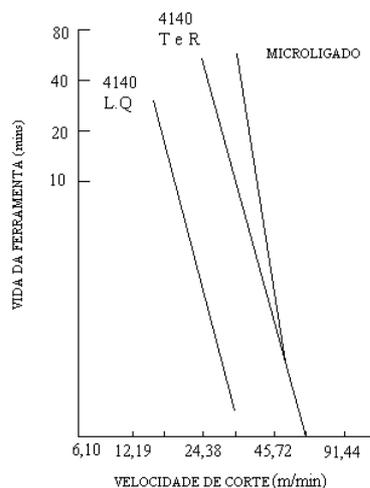


Figura 2 – Vida da ferramenta vs. Velocidade de corte : Curvas para 4140 temperado (T) e revenido (R), 4140 laminado a quente (L.Q.), e 1045 microligado (Yang. (Part II), 1996).

Um estudo realizado por Bhattacharya (1986), além de comprovar que a usinabilidade dos AM é superior a dos aços TR, também mostrou que os AM apresentaram cavacos com espessuras menores levando à menores comprimentos de contato o que no torneamento

resulta em menores forças de corte, melhorando a usinabilidade. Para explicar o mecanismo pelo qual se dá esta diferença, Battacharya utilizou-se da observação microscópica do cavaco (Fig. 3). Observando-se esta figura percebe-se que o cavaco do AM apresenta duas camadas finas, uma bastante deformada (μ) e outra com fluxo cisalhante heterogêneo (λ), sugerindo que a estrutura perlítica e ferrítica concentra a deformação dentro de uma fina região localizada. Já a estrutura martensítica dos aços TR, possui uma grande zona de fluxo cisalhante, que resulta em um ângulo de cisalhamento (ϕ) menor, cavacos grosseiros e forças de corte elevadas. Este estudo também mostrou que os AM apresentam APC estável (facilidade de formação de microtrincas) e baixa resistência ao fluxo. Desta maneira pode ser estabelecido que a estrutura ferrítica e perlítica dos AM reage diferentemente com relação à usinagem quando comparada com a estrutura martensítica temperada e revenida dos aços liga em termos de fluxo cisalhante, formação da APC, comprimento de contato e força de corte de maneira a melhorar a usinabilidade.

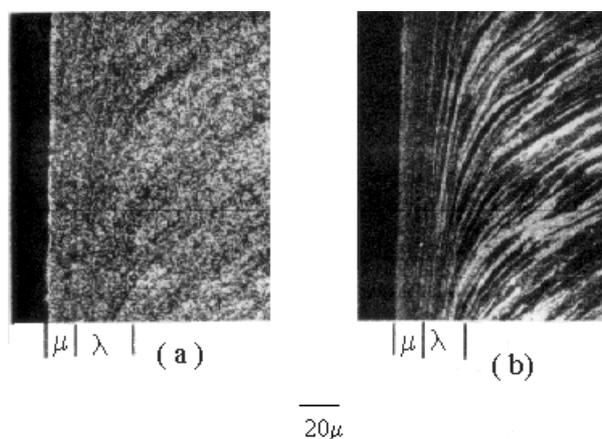


Figura 3 – Microestrutura do cavaco de um aço microligado (b) e de um aço 4140 temperado e revenido (a), após o torneamento (Bhattacharya, 1988).

Um estudo (Chambers *et al.*, 1984) mostrou que a usinabilidade dos AM é comparável a dos aços TR de baixa liga, quando usinando com ferramenta de metal duro. Os resultados sugerem ainda que a usinabilidade de um AM de alta resistência ($>1000 \text{ MN/m}^2$) pode até mesmo ser inferior a de um aço TR de baixa liga de igual resistência, quando usinando com ferramenta de aço rápido. Isto ocorre por dois motivos principais :

- A usinabilidade dos AM sofre uma maior influência do aumento de dureza, que a dos aços de baixa liga (Fig.4);

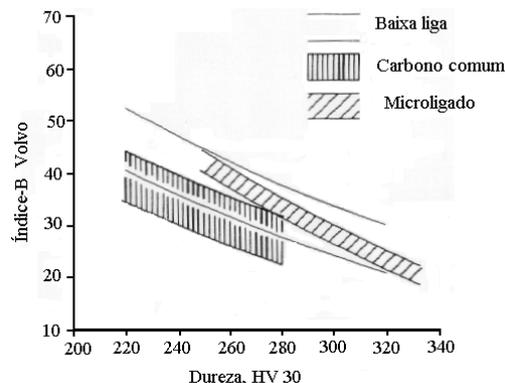


Figura 4 – Efeito da dureza do aço carbono comum, do aço de baixa liga e do aço microligado na usinabilidade dos mesmos, durante a usinagem com ferramenta de aço rápido (Chambers *et al.*, 1984).

- As temperaturas máximas atingidas no processo de formação do cavaco na usinagem dos AM são cerca de 25 a 50 K maiores que aquelas geradas na usinagem de aços de baixa liga com resistência equivalente. Além disso, estas temperaturas máximas, na usinagem dos AM, estão localizadas próximas à aresta cortante, em uma posição onde a tensão de compressão atuante sobre a ferramenta é maior. Isto aumenta a interação entre a tensão e a temperatura, resultando no começo de uma deformação plástica e desgaste por cratera que ocorrem em baixas velocidades para os AM de alta resistência.

Com AM de baixa resistência ($< 1000 \text{ MN/m}^2$), a temperatura máxima está localizada a uma maior distância da aresta de corte. A interação entre as elevadas temperaturas e elevadas tensões serão reduzidas, e como resultado estes aços serão usinados de maneira similar aos aços de baixa liga e igual resistência.

Estudos da usinabilidade de AM com teores de enxofre de 0,002%, 0,010%, 0,038% (Tonshoff *et al.*, 1998), usando pastilhas de metal duro com diferentes composições, mostrou que o aumento no teor de enxofre melhorou a usinabilidade independente do material da ferramenta (Fig. 5). Neste mesmo estudo a usinabilidade à seco foi comparada com a usinabilidade usando uma emulsão 5%. Os resultados mostraram que a diferença na usinabilidade é maior nos aços com menores teores de enxofre, provavelmente porque a melhora na usinabilidade devido à aplicação do fluido de corte não é significativa, se comparada à melhora da usinabilidade devido à adição de enxofre. Segundo a Fig. 5, o revestimento é de fundamental importância na vida da mesma.

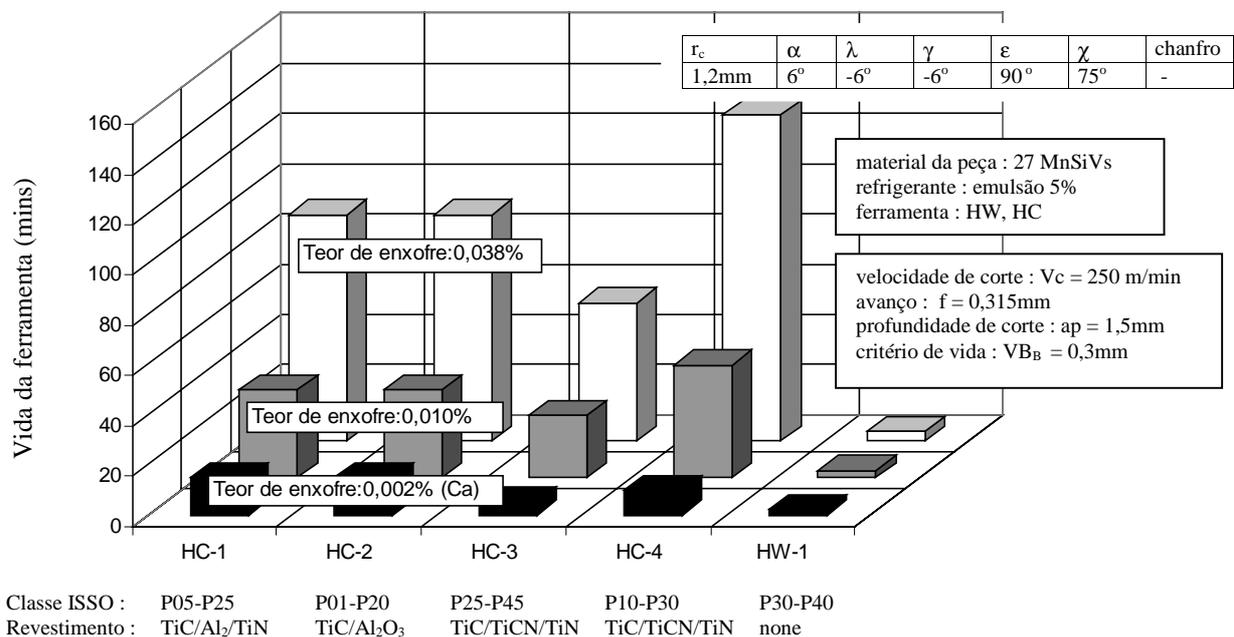


Figura 5 – Vida da ferramenta dependendo do material da peça e da ferramenta (Tonshoff *et al.*, 1998).

2.2 Furação

Resultados de testes experimentais (Niwa *et al.*, 1981) mostraram que a usinabilidade de um AM na furação, com brocas de aço rápido e velocidade de corte igual a 40m/min, é equivalente a de um aço carbono TR convencional (Fig.6), e é controlada pelo teor total dos elementos de livre corte (Pb + S), que atuam melhorando a usinabilidade. A ação do chumbo,

no melhoramento da usinabilidade dos aços, se dá através de dois mecanismos : 1) Redução da potência de corte através da formação de uma camada de lubrificante líquido na interface cavaco – ferramenta (Nead *et al.*, 1939; Shaw *et al.*, 1961; Thompson *et al.*, 1974); 2) O Pb é um potente fragilizador de metal líquido, e na combinação com este metal líquido (no caso o aço) ele atua como um iniciador de trinca, que reduz a potência necessária para a deformação e fratura (Quinto *et al.*, 1977). O S junta-se com o Mn presentes netes aços para formar partículas de MnS, que se deformam plasticamente e sofrem um alongamento muito grande dentro da zona de fluxo. As explicações de como as partículas de MnS atuam para melhorar a usinabilidade ainda não são completas, mas existem evidências suficientes para verificar a formação de uma camada de material com resistência ao cisalhamento menor que a do metal de base, o que garante uma menor área de contato cavaco ferramenta (Trent, 1984).

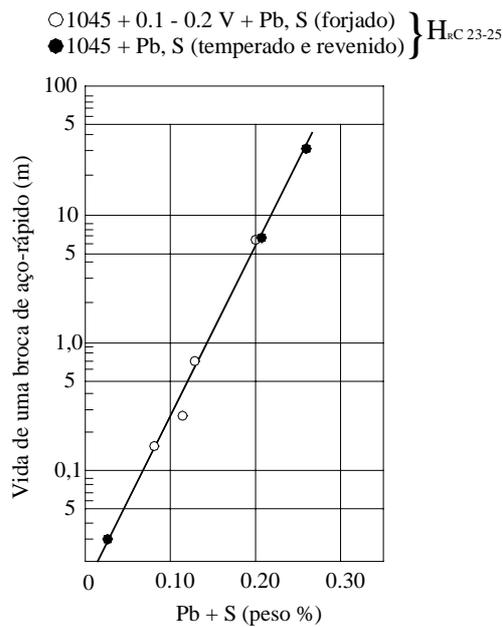


Figura 6 – Efeitos da adição de Pb e S na usinabilidade de um aço com médio teor de carbono com e sem elementos microligantes (teste de furação) (Niwa *et al.*, 1981).

Cline *et al.* (1986) mostrou, em termos de força e torque na furação, que o AM apresenta uma usinabilidade superior a de um aço TR 4140 (Fig.7).

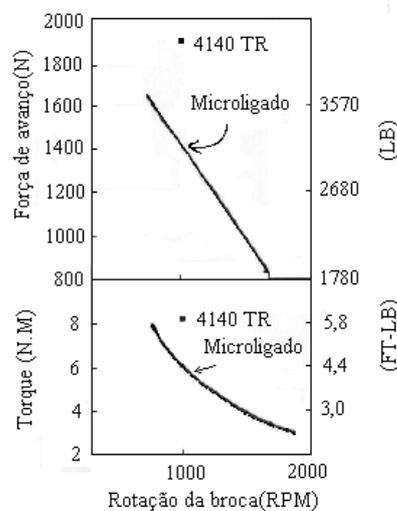


Figura 7 - Resultados de testes com brocas de aço rápido (Cline *et al.*, 1986).

Resultados de testes de furação com brocas de aço rápido (Ollilainen *et al.*,1984) mostraram que nenhuma diferença foi encontrada no desgaste da ferramenta quando usinando um AM de alta resistência ou um aço TR ligado com CrMo com dureza equivalente (Fig.8). Neste mesmo artigo o autor chama atenção para o comportamento do AM na furação profunda (L=10d). Nesta situação o AM apresentou cavacos em forma de lascas, causando grandes problemas na remoção do cavaco. Em um outro estudo (Ollilainen *et al.*, 1987) foi relatado que a vida da broca na usinagem do AM é menor que na usinagem do aço TR no caso da furação profunda. Uma das grandes aplicações dos AM é na fabricação de virabrequins e bielas. Nestes casos os custos de usinagem representam 50% do custo total de fabricação. Um dos grandes problemas durante a usinagem é justamente a furação dos canais de lubrificação. A operação neste caso é uma furação profunda, onde a profundidade do furo é maior do que cinco vezes o diâmetro da broca. Nestas condições a operação de usinagem fica prejudicada, ou mesmo impossível, devido à forma do cavaco. É necessário um recurso para a retirada do cavaco de dentro do furo para que a operação possa prosseguir.

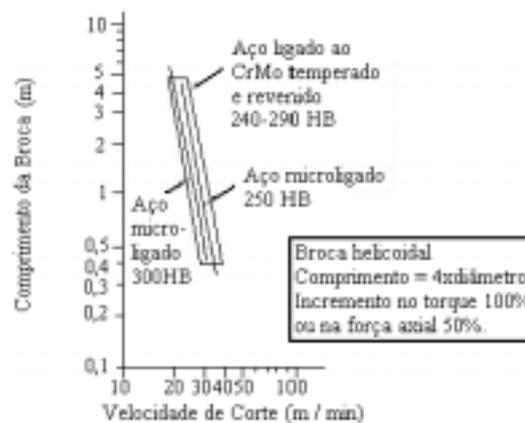


Figura 8 – Usinabilidade (na furação) de um aço microligado e de um aço temperado e revenido (Ollilainem *et al.*, 1984).

Testes de vida de brocas na usinagem de AM ao vanádio com médio teor de carbono e aços TR foram realizados em laboratórios e em linha de produção em massa (Matsushina *et al.*, 1994). Estes testes tiveram como objetivo : 1) descobrir a razão pela qual a broca apresenta, na usinagem de um AM (nas condições de linha de produção em massa), uma vida menor que na usinagem de um aço TR (Fig.9); 2) Investigar os métodos para o melhoramento da vida da ferramenta na usinagem de AM.

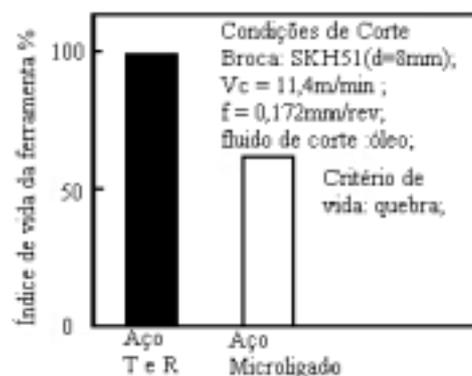


Figura 9 – Resultados de um teste de furação na produção em massa(Matsushina *et al.*,1994).

Estes testes apresentaram os seguintes resultados:

- A razão para a menor vida da broca para o AM é que a margem desgastada não pode ser completamente removida pela retificação da broca.
- A longa margem desgastada no AM (Fig.10) pode ser atribuída ao atrito entre a broca e a superfície do furo devido ao menor alargamento do diâmetro do furo, que é atribuído à menor tenacidade do AM.
- O emprego de AM de baixo carbono e com alta tenacidade, tem se mostrado efetivo no melhoramento da vida da broca.
- O uso de brocas com revestimentos especiais, com excelente resistência ao desgaste se mostraram efetivas no aumento da vida da broca.

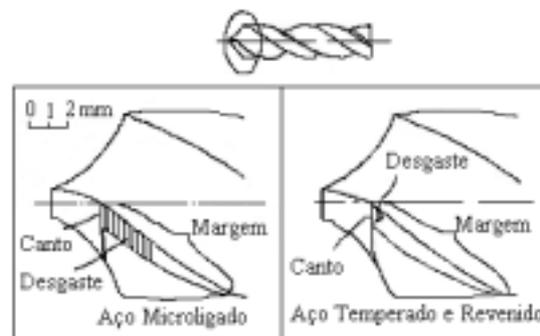


Figura 10 – Morfologia da margem de desgaste (Matsushina *et al.*, 1994)

2.3 Fresamento

Ollilainem *et al.* (1984) verificou a usinabilidade no fresamento de um AM de alta resistência, usando para isso, um teste padrão Volvo de fresamento de topo com ferramentas de aço rápido. Os resultados (Fig.11) mostraram que, em baixos níveis de dureza, a usinabilidade no fresamento dos aços TR ligados com CrMo é inferior a dos AM. Em altos níveis de dureza correspondente à classe dos aços de alta resistência, a diferença desaparece gradualmente. Todavia, a usinabilidade no fresamento da classe de AM de alta resistência é no mínimo equivalente à dos aços TR ligados com CrMo.

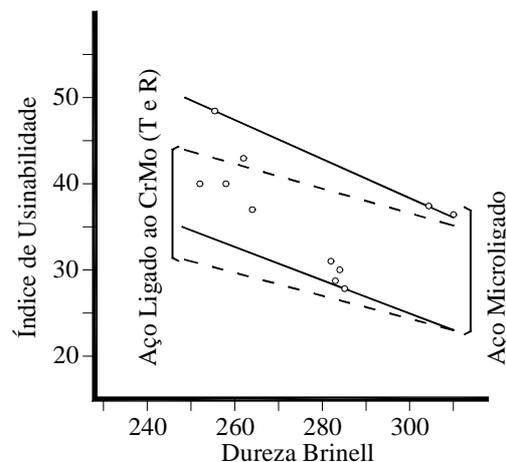


Figura 11 – Usinabilidade (no fresamento) do aço Micriligado e do aço temperado e revenido (Ollilainem *et al.*, 1984).

3 CONCLUSÃO

O desenvolvimento dos aços microligados, de uma certa forma, ainda é recente, e por isso, os estudos de sua usinabilidade são escassos. Os poucos estudos existentes mostram de uma maneira geral, que a usinabilidade dos aços microligados é superior ou no mínimo equivalente a dos aços temperados e revenidos.

REFERÊNCIAS

- ASM International, 1990, Metals Handbook, 10th Edition, Vol 1, Properties and Selection: Iron, Steels, and High-Performance Alloys, USA .
- Bernard, G., 1977, A Viewpoint on the Weldability of Carbon. Manganese and Microalloyed Structural Steels”, Microalloyins 75, Korchynsky, M. , Editor, Union Carbide Corp., New York, Ny, 1977, pp. 552-565.
- Bhattacharya, D., 1986, Fundamentals of Microalloying Forging Steels, Metallurgical Society of AIME, Warrendale, PA, pp. 475 - 490.
- Bhattacharya, D., 1988, Developments in the Machinability of Steels, First International Conference on the Behaviour of Material in Machining, 8-10 november, pp. 10.1-10.7 .
- Bhattacharya, D., 1994, Effect of Reduction Ratio on the Machinability of a Medium Carbon Microalloyed Steel, Journal of Materials Engineering and Performance, August, vol. 3(4), pp. 484-489.
- Chambers, A.R. *et al.*, 1984, Machining Characteristics of Microalloyed Forging Steels, Metals Tecnology, august, Vol.11, pp. 323-333.
- Cline, R. S., Heitmann, W. E and Bhattacharya, D., 1986, Microalloyed Steel Bars and Forgings, Journal of Metals, may, pp. 26-30.
- Ferraresi, D., 1970, Fundamentos da Usinagem dos Metais, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo.
- Hashimoto, H. *et al.*, 1982 Non Heat-Treated Vanadium Alloyed Steel CranKshaft, SAE Technical Paper Series, N^o 820125, International Congress Exposition - Detroit Michigan, february.
- Kondo,N. *et al.*, 1985, Properties of Microalloyed Medium Carbon Steel, Kawasaki Steel Tecnical Report, N^o 11, march, pp. 80-89.
- Machado, A.; da Siva, M. B., 1993, Usinagem dos Metais, Apostila, DEEME - UFU,Uberlândia.
- Matsushina, Y. *et al.*, 1994, Improvement of Drilling Machinability of Microalloyed Steel, Kobelco Technology Review, No. 17, pp. 38-44.
- Naylor, D.J., 1989, Review of International Activity on Microalloyed Engineerings Steels”, Ironmaking and Steelmaking, vol 16, No. 4, pp. 246- 252.
- Nead, J. H., Sims, C. E. and Harder, O. E., 1939, Metals and Alloys, Vol. 10, pp.68-109.
- Niwa, S. *et al.*, 1981, Research and Development of Microalloyed Medium Carbon Steels, SAE Paper, No. 810426.
- Nomura, I. *et al.*, 1989, High Toughness Microalloyed Steels for Vital Automotive Parts, SAE Paper, No. 890511, International Congress and Exposition Detroit, Michigan, February 27 – March 3, pp. 1- 7.
- Ollilainen, V. *et al.*, 1987, Fundamentals of Microalloying, TMS – AIME.
- Ollilainem, V., Hurmola, H. and Pontenem, H., 1984, Mechanical Properties and Machinability of a High – Strength, Medium –Carbon, Microalloyed Steel, J. Materials for Energy Systems, March, vol 5, No 4, pp. 222 – 232.

- Osuzu, H.; Shiraga, T.; Shiroy, Y.; Taniguchi, Y.; Tsujimura, K.; Kido, H., 1987, Application of Microalloyed Steels to Achieve High Toughness in Hot Forged Components without Further Heat Treatments”, SAE Paper No. 860131, , pp. 1.701-1.711.
- Quinto, D. T., Bhattacharya, D. and Thompson, R. W., 1977, An Investigation of Cutting Energy and Metallurgical Properties in Lead and Non-Lead AISI 1215 Steels, Proc. Int. Sym.. Influence of Metallurgy on Machinability of Steel, ASM – ISIJ, Tokyo, p. 433.
- Shaw, M. C., Usui, E. and Smith, P. A., 1961, Trans, ASME, Vol. B83, p. 181.
- Thompson, R. W., Quinto, D. T. and Levy, B. S., 1974, Scanning Electron Microscopy and Electron Spectroscopy Observations on the Role of lead in the Machining of Steel, Proc. Namrc-II, p.545.
- Tönshoff, H. K. *et al.*, 1998, Steels for Dry Machining (The Influence of Sulphur Content on the machinability of Steels), 4TH International Conference on Behaviour of Materials in Machining : Opportunities and Prospects for Improved Operations, 12-13 November, pp. 144-155.
- Trent, E. M., 1984, Metal Cutting, Second Edition, Butterworths & Co, London.
- Yang, I., Fatemi, A., Rhoda, A. and Tripp, J. E., 1996, An Overview of Microalloyed Steels, Part I: Their Mechanical Behavior, SAE Paper, No 960309, pp.343-354.
- Yang, I., Fatemi, A., Rhoda, A. and Tripp, J. E., 1996, An Overview of Microalloyed Steels, Part II: Their Mechanical Behavior, SAE Paper, No 960309, pp.343-354.

A STUDY OF MACHINABILITY OF THE MICROALLOYED STEELS

ABSTRACT. Microalloyed steels are carbon steels which acquire their high mechanical resistance properties, toughness and ductility, from combined effect of composition and thermomechanical treatment, without quenching and tempering treatment. These steels are characterized by the small additions ($\leq 0,25\text{wt}\%$) (Cline et al., 1986) of microalloying elements, such as V, Nb, Ti, or a combination of them, to a basic composition of F-C. They were developed as an economic alternative to the quenched and tempered steels, as a result of less processing stages, less expenses of energy due to elimination of the thermal treatments, decrease of the flattening costs and elimination of the quenching crack. The study of machinability of microalloyed steels is quite important because all wrought material (main application of microalloyed steels) are machined after the forging to produce the final piece. In spite of this, few studies exist on this subject, being still rare the existence in the literature of publications specifically about machining of microalloyed steels. The present work presents a review on machining of microalloyed steels, in turning, milling and drilling processes, accomplished in the last decades.

Keywords: Machinability, Microalloyed Steels