



DESEMPENHO DE FERRAMENTAS DE AÇO-RÁPIDO TRATADAS CRIOGENICAMENTE

Flávio J. da Silva¹, **Alisson Rocha Machado**²

Universidade Federal de Uberlândia ; Faculdade de Engenharia Mecânica - LEPU

(1) fjsilva@mecanica.ufu.br, (2) Alissonm@mecanica.ufu.br – Uberlândia, MG, Brasil

Antônio M. de S. Júnior

FIAT Automóveis

fermec@fiat.com.br - Betim, MG, Brasil

Resumo: Estudos feitos em ferramentas tratadas criogenicamente verificaram mudanças microestruturais no material que podem influenciar significativamente na vida das ferramentas, e conseqüentemente na produtividade. Resultados obtidos na literatura mostram aumentos que variam de 92% a 817% na vida de ferramentas usadas na indústria. Porém, a falta de um consenso metalúrgico sobre os mecanismos envolvidos e alguns resultados contraditórios encontrados na literatura, exigem maiores investigações sobre o assunto. Este trabalho teve como objetivo verificar o efeito do tratamento criogênico no desempenho de ferramentas de aço rápido M2 (fresas de perfil e brocas helicoidais) através de testes específicos de usinagem (fresamento e furação), realizados em laboratório e na linha de produção de autopeças, e análises microestruturais. Os resultados mostraram vantagens para as ferramentas tratadas em alguns testes.

Palavras-chave: Aço rápido, Tratamento criogênico, Vida de ferramenta, Furação, Fresamento.

1. INTRODUÇÃO

A exigência do avanço tecnológico visando sempre o aumento da produtividade e economia no corte resultou em um gradual progresso dos materiais de ferramentas. Além disso, o desenvolvimento de novos materiais de alta resistência, o que na maioria das vezes implica em baixa usinabilidade, exige o contínuo desenvolvimento de outros materiais de ferramentas e a melhora das propriedades dos já existentes, tais como aço rápido (HSS), metal duro, cermets, cerâmicas, e ultraduros (CBN,PCBN,PCD). O tratamento criogênico, neste contexto, surge como uma alternativa da melhoria das propriedades do aço rápido através de mudanças microestruturais, como a transformação da austenita retida em martensita, normalmente presente nos aços e a precipitação de finos carbonetos, sendo este segundo considerado o mais influente no aumento da resistência ao desgaste e conseqüentemente na vida da ferramenta. Segundo Collins (1996), a transformação da austenita retida proporciona aumento na dureza (quanto maior a quantidade de austenita transformada, maior o aumento na dureza), redução na tenacidade, um modesto aumento ou efeito desprezível na resistência ao

desgaste e estabilidade dimensional. A Precipitação de finos carbonetos resulta em aumento na resistência ao desgaste, aumento na tenacidade e pequeno aumento ou efeito desprezível na dureza. Apesar da dureza ser pouco afetada pela precipitação dos finos carbonetos, Yun et al. (1998) reporta que a resistência mecânica e a dureza a quente são consideravelmente aumentadas. A mudança ou não de algumas destas propriedades irá depender das condições do material antes de ser submetido ao tratamento criogênico, isto é, sua composição química e tratamentos térmicos sofridos anteriormente. Antes de qualquer aplicação do tratamento criogênico, deve-se levar em consideração estes fatores. Dos mecanismos verificados, a precipitação dos finos carbonetos precisa de maiores estudos. Um melhor entendimento das transformações na microestrutura dos materiais quando submetidos a baixas temperaturas e como estas mudanças se interagem para aumentar a resistência ao desgaste, ou qualquer outra propriedade tomada como objeto de estudo faz-se essencial para um perfeito domínio desta técnica. Enquanto nos EUA a criogenia já vem sendo usada por algumas empresas com resultados satisfatórios, no Brasil muito pouco ou quase nada tem sido explorado sobre o assunto. Com o objetivo de iniciar pesquisas sobre este tema em nível nacional este trabalho verificou o desempenho de ferramentas de aço-rápido após o tratamento criogênico (fresas de perfil revestidas e brocas helicoidais) comparando-se com ferramentas tratadas convencionalmente. Fez-se também a análise microestrutural das ferramentas para verificar as mudanças ocorridas com o tratamento.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As ferramentas testadas foram tratadas pela Cryo Quality Ltda. O ciclo térmico recomendado e utilizado consistiu de um resfriamento a temperaturas que variaram de -196°C a $+196^{\circ}\text{C}$, resultando um total de 43 horas de tratamento. O Resfriamento para -196°C é realizado a uma taxa de $1^{\circ}\text{C}/\text{mim}$ (4 horas em média), ficando nesta temperatura durante 20 horas. Durante esta etapa do ciclo ocorre a transformação da austenita retida em martensita. Depois disso realiza-se um aquecimento também a $1^{\circ}\text{C}/\text{mim}$ até $+196^{\circ}\text{C}$ (8 horas em média), mantendo-se nesta temperatura por duas horas seguido de resfriamento até a temperatura ambiente e mais três ciclos de revenimentos a $+196^{\circ}\text{C}$. Nestas etapas de aquecimento ocorre a precipitação dos finos carbonetos.

As ferramentas submetidas ao tratamento criogênico foram adquiridas prontas para o uso, isto é, já tinham sido tratadas por processos térmicos convencionais. O tratamento criogênico foi realizado então depois da têmpera e do revenimento com endurecimento secundário. Segundo Yun et all (1998) o tratamento criogênico usado para melhorar as propriedades mecânicas do aço rápido M2 pode ser aplicado após a têmpera e o revenido ou logo após a têmpera. Os resultados obtidos quando o tratamento criogênico é feito após a têmpera são aparentemente melhores que quando feito após a têmpera e revenido.

A fração volumétrica de austenita retida entre amostras das ferramentas foi determinada por difração de raios(x) em um equipamento Rigaku, modelo Strainflex MSF 2M, pelo método de comparação direta.

2.1 Teste de laboratório

Os testes de laboratório foram feitos na furação com brocas helicoidais de 10 mm de diâmetro realizados em uma fresadora ROMI Interact IV. Utilizou-se como material da peça barras de aço ABNT 8640 ($\text{HV}=290 \text{ kgf}/\text{mm}^2$). Utilizou-se um fluido de corte emulsionável a base de óleo mineral com concentração 5% e vazão ajustada em 5 [l/mim]. O critério de fim de vida adotado para o processo de furação foi a falha catastrófica. Este procedimento é recomendado pela norma *NORDTEST NT MECHE 038(1997)*. Segundo esta

norma, a vida da ferramenta é determinada pelo número de furos usinados até imediatamente antes da falha ocorrer. Entretanto, para maior controle do comportamento, os desgastes de flanco médio (VB_B) e máximo ($VB_{B\text{máx}}$) foram freqüentemente medidos. Isto permitiu determinar a vida das ferramentas em diferentes critérios, como por exemplo $VB_B=0.3\text{mm}$ e $VB_{B\text{máx}}=0.7\text{ mm}$. Foi fixado um limite de 144 furos por ensaio, caso a falha catastrófica não ocorra antes. Durante os ensaios a potência consumida foi medida.

2.2 Testes no chão de fábrica

Os testes de chão de fábrica foram feitos com fresas de perfil de aço-rápido M2 revestida com nitreto de titânio (TiN) em uma máquina chanfradora de dentes utilizadas na fabricação de luvas de engates de caixas de câmbio. O material da engrenagem é um aço 19MnCr5G conforme a norma DIN 17006. Durante a operação são utilizadas duas fresas de perfil, uma direita para a usinagem do lado direito do perfil e outra esquerda para a usinagem do lado esquerdo do perfil (Figura 1). Numa primeira etapa de testes utilizou-se um par de ferramentas tratadas criogenicamente e um outro de ferramentas não tratadas criogenicamente, todas com afiação original de fábrica. Adotou-se um número de 200 peças como referencial do fim de teste, valor este tomado conforme a média de produção para um par de fresas novas, conforme o diário de produção da empresa onde os testes foram realizados. Ao final do teste o desgaste da ferramenta foi analisado em um microscópio eletrônico de varredura Carl Zeiss e a rugosidade (R_a) da peça medida.

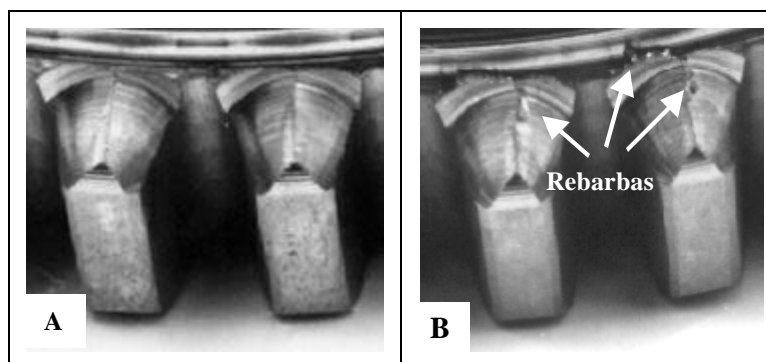


Figura 1 - Acabamento superficial do perfil das engrenagens
(a) Acabamento sem rebarbas- ferramenta com pouco desgaste,
(b) Acabamento com rebarbas - ferramenta com desgaste acentuado.

Em uma segunda etapa, foram utilizadas nos testes ferramentas reafiadas pela retífica da superfície de saída das cunhas obtendo-se uma ferramenta com uma superfície de folga revestida e sem desgaste, e uma superfície de saída sem revestimento, o que leva a um menor desempenho das ferramentas reafiadas com relação às ferramentas novas. Neste caso, o critério de fim de vida adotado foi o acabamento superficial das peças analisando-se a presença de rebarbas sobre a superfície dos dentes (Figura 1), que podem comprometer a qualidade das peças produzidas. A inspeção visual do acabamento foi feita criteriosamente por um mesmo operador.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A maior diferença do teor de austenita retida entre as amostras analisadas de ferramentas tratadas e não tratadas criogenicamente foi inferior a 3,6 %. A resolução do método de difração de raios X (\bullet 2 %) e possíveis variações microestruturais entre ferramentas de um

mesmo lote de fabricação podem ser responsáveis pelas diferenças encontradas e, portanto, pode-se concluir que, neste caso o tratamento criogênico não foi eficiente na transformação da austenita retida em martensita. As ferramentas testadas já haviam sido submetida a ciclos de revenimento após a têmpera antes de serem tratadas criogenicamente, o que pode ter transformado boa parte da austenita. Além disso, torna-se mais difícil ocorrer a transformação da austenita retida em martensita quando o tratamento é feito após o revenimento do que quando este é feito diretamente depois do tratamento de têmpera (Yun et al., 1998). Os resultados de dureza também não foram alterados com o tratamento criogênico o que, de certa forma, já era esperado visto que a dureza é afetada principalmente quando ocorre a transformação de austenita retida em martensita, o que não foi observado nas análises.

3.1 Testes de laboratório (brocas helicoidais)

A Tabela 1 mostra um resumo dos resultados dos ensaios para a broca de 10mm de diâmetro considerando-se simultaneamente VB_B , $VB_{B\text{máx}}$, falha catastrófica e um limite de furos (144). Para a condição de 10 m/min o teste foi interrompido com o critério de vida de $VB_{B\text{max}} = 0.70$ mm, resultando em um melhor desempenho da broca tratada criogenicamente de 80 % (Figura 2a). Para a condição de 20 m/min, na qual observou-se a menor taxa de desgaste das brocas em relação às outras condições, o teste foi interrompido com o limite de furos estabelecido de 144, tanto para a broca tratada como para a não tratada criogenicamente, sem atingir os outros critérios de fim de vida estabelecidos. Desta forma, a comparação de desempenho entre as ferramentas nesta condição (20 m/min), com 144 furos realizados não permitiu a superação de uma sobre a outra, sem a medição do desgaste.

Tabela 1 – Número de furos para critério de vida $VB_B=0.3\text{mm}$, $VB_{B\text{máx}}=0.7\text{mm}$, falha catastrófica e limite de 144 furos realizados. (*) Não atingiu o critério **NT** – Não tratada criogenicamente; **TR** – Tratada criogenicamente

| v_c [m/min] | 10 | | 20 | | 40 | |
|------------------------------|--------------------------|-----|-----|-----|----|----|
| Critério de Fim de vida | Número de furos usinados | | | | | |
| | NT | TR | NT | TR | NT | TR |
| $VB_B = 0.30$ mm | * | * | * | * | * | * |
| $VB_{B\text{max}} = 0.70$ mm | 50 | 92 | * | * | 16 | 20 |
| Falha catastrófica | * | * | * | * | 20 | 56 |
| Limite de num. furos | 144 | 144 | 144 | 144 | * | * |

Para a condição de 40m/min, a broca tratada criogenicamente apresentou melhor desempenho, levando-se em consideração dois critérios de fim de vida: o desgaste de flanco máximo e a falha catastrófica (Tabela 1). Observa-se na Figura 2(a) o melhor desempenho da broca tratada criogenicamente (considerando-se a desgaste de flanco máximo) para a velocidade de 40m/min, com um aumento de 25 % sobre a broca não tratada.

A Figura 2(b) apresenta o consumo de potência durante os ensaios. Para a velocidade de 20 m/min o consumo médio de potência entre a broca tratada e não tratada é bastante similar. Observa-se que para as velocidades de corte de 10 e 40 m/min, condições de corte extremas, a potência média consumida foi maior e a diferença de desempenho entre as brocas tratadas e não tratadas também, embora os desvios padrões apresentados reduzem a diferença entre elas. Como a potência é muito mais influenciada pelo material da peça, estes resultados estão coerentes, e ainda se for considerar o material da ferramenta, as análises micrográficas não mostraram variações significativas.

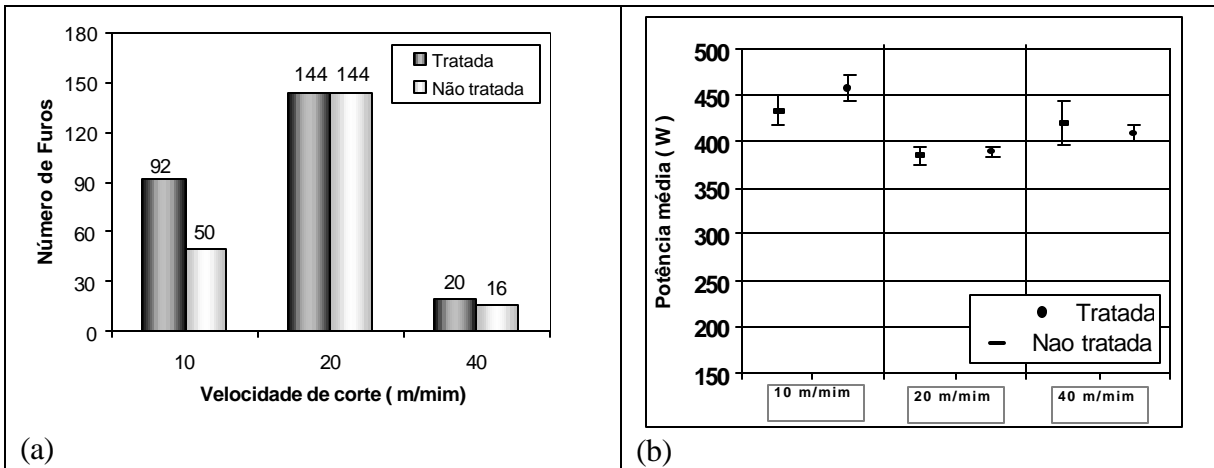


Figura 2 – (a) Número de furos para critérios de vida de desgaste de flanco máximo $VB_{Bmax}=0.7$ mm, falha catastrófica e limite de 144 furos, (b) Potência média consumida.

Considerando o teor de austenita retida das amostras, a resistência das ferramentas seria praticamente a mesma, não justificando a diferença de desempenho entre elas nos testes de vida. Entretanto, foi observado que na maioria dos casos as brocas tratadas criogenicamente foram mais resistentes, principalmente quando o critério de fim de vida foi a falha catastrófica. O principal mecanismo proposto para o aumento da resistência das ferramentas com o tratamento criogênico é a precipitação de finos carbonetos na matriz martensítica a $+196^{\circ}$ C, o que, possivelmente deve ter acontecido com as ferramentas usadas nos testes. Apesar de não ter sido feito o levantamento da presença destes finos carbonetos ou até mesmo a quantificação dos mesmo. Acredita-se, que, conforme a literatura, o tratamento criogênico das ferramentas tenha proporcionado a precipitação dos finos carbonetos e que eles tenham colaborado para que o desempenho das brocas tratadas criogenicamente tenha sido melhor. Observou-se que, para diferentes condições de teste, a diferença de desempenho não foi mesma, como verificado, também, em resultados obtidos por Da Silva (1999). Acredita-se que este comportamento se deve a diferentes respostas obtidas quando os finos carbonetos são submetidos a diferentes condições de teste. Em testes específicos de desgaste feitos por Kamody (1998) e Meng et al. (1994), foi verificado que os parâmetros de teste influenciam fortemente os resultados, chegando a eliminar totalmente a diferença de resistência ao desgaste entre amostras tratadas e não tratadas criogenicamente.

3.2 Testes de chão de fábrica

A Figura 3(a) apresenta os valores de desgaste de flanco médio das arestas de corte “1 e 2” de cada fresa, tratada e não tratada criogenicamente (ferramentas novas). Observa-se que as ferramentas tratadas criogenicamente apresentaram um desgaste de flanco médio superior para todas as arestas de corte quando comparado às não tratadas criogenicamente.

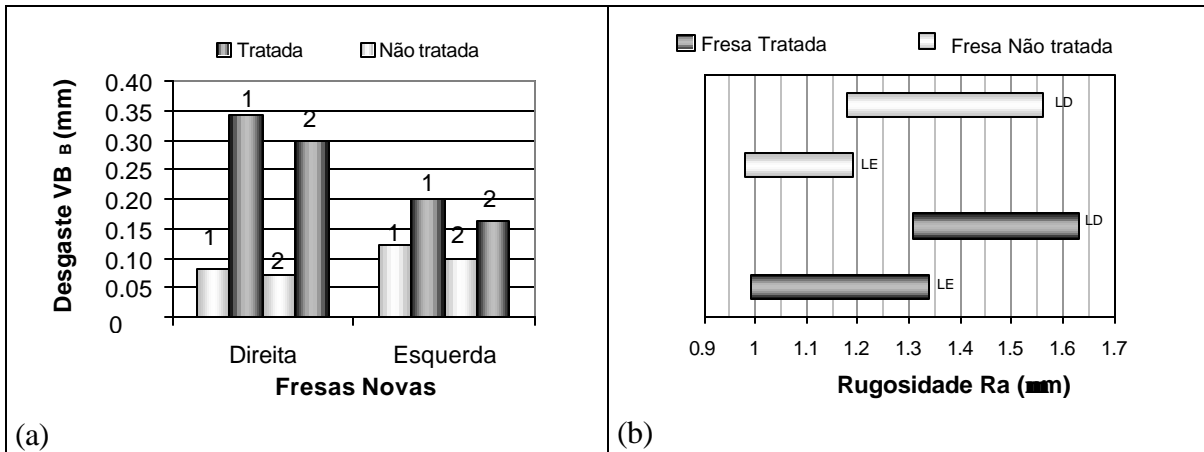


Figura 3 – (a) Desgaste das fresas com afiação original (200 peças); (b) Rugosidade das superfícies dos dentes da engrenagem lado esquerdo (LE) e lado direito (LD).

Relacionando-se o desgaste com a rugosidade, apenas entre as fresas não tratadas criogenicamente, percebe-se que o desgaste menor observado nas arestas da fresa direita resultou em maiores valores e maior variação de rugosidade nas superfícies usinadas (LD) comparados à fresa esquerda (LE). Comparando-se apenas as ferramentas tratadas criogenicamente, este comportamento já muda. O desgaste menor observado nas arestas da fresa esquerda (1 e 2) resultou em menores valores e variação de rugosidade na superfície usinada (LE) muito semelhante àquelas geradas pela fresa direita (LD). Percebe-se, portanto, que a rugosidade neste caso não pode ser tomada como referencial de maior ou menor desgaste e vice versa.

A Figura 4 apresenta os resultados de produção adotando-se como critério de fim de vida a presença das rebarbas na superfície dos dentes das engrenagens.

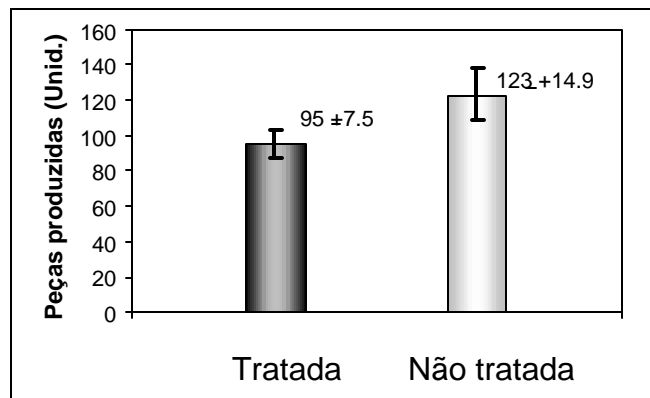


Figura 4 – Média de peças feitas em um total de quatro reafiações adotando o critério de fim de vida a presença de rebarbas.

Nesta etapa as ferramentas foram reafiadas quatro vezes, resultando em um total de produção de 491 peças para as ferramentas não tratadas, e 380 para ferramentas tratadas com média de 123 e 95 peças, respectivamente, por vida. A Figura 5 ilustra as arestas de corte para as fresas direita tratadas e não tratadas criogenicamente (ferramentas novas) após a usinagem de 200 peças. Observa-se o maior desgaste de flanco médio para as ferramentas tratadas. A característica irregular do desgaste de flanco apresentado por estas ferramentas sugere a presença de *attrition*, abrasão e até mesmo microlascamentos. Percebe-se que o

tratamento criogênico de certa forma prejudicou o desempenho das ferramentas. Segundo Paulin (1993) o tratamento criogênico também pode ser aplicado a ferramentas revestidas.

Cohen e Kamody (1998), verificaram um aumento de 42 % em brochas M4 revestidas com (TiCN) e tratadas criogenicamente com relação a uma somente revestida. Não foi especificado, entretanto, se o tratamento criogênico foi aplicado à ferramenta já revestida, como no presente trabalho, o que pode causar alguma tensão entre o revestimento e o substrato devido aos diferentes coeficientes de dilatação entre eles, prejudicando a aderência do revestimento. O coeficiente de dilatação térmica do aço-rápido é $12 \cdot 10^{-6} \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$, contra $9,4 \cdot 10^{-6} \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$ do TiN. Isto pode, durante o tratamento criogênico, criar um estado triaxial de tensão na interface do substrato com o revestimento de TiN, que pode causar a fragmentação e o desgaste acelerado da camada revestida durante o corte. Isto pode ter sido responsável pelo pior desempenho das ferramentas tratadas criogenicamente.

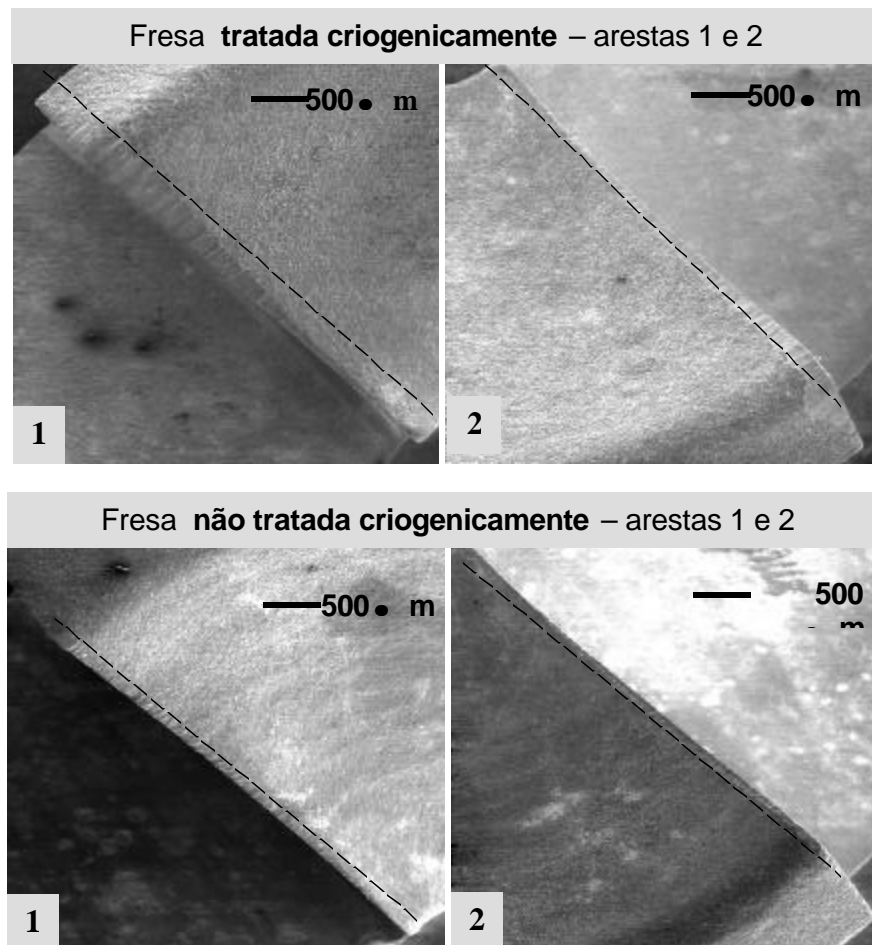


Figura 5 – Arestas de corte das fresas direita após usar 200 peças.

Uma vez constatado que houve a perda do revestimento das ferramentas devido ao desgaste ou devido à reafiação, significa que a resistência ao desgaste do substrato, também, é importante nesta análise. Novamente seria relevante verificar se o tratamento criogênico foi realmente efetivo, isto é, se a precipitação de carbonetos finos durante o tratamento criogênico foi suficiente para garantir um aumento na resistência do desgaste das ferramentas nas condições de teste usadas, visto que não houve alteração no teor de austenita retida. A maior resistência ao desgaste garantida pela presença de finos carbonetos da ferramenta tratada

criogenicamente pode ter sido ofuscada pela menor aderência da camada revestida nestas ferramentas.

4. CONCLUSÕES

- Não foi evidenciado transformação de austenita retida em martensita com tratamento criogênico. Possivelmente, a estabilização da austenita retida (citada na literatura) tenha dificultado esta transformação.
- A dureza (HRC) das amostras de aço-rápido M2 não foram afetadas significativamente pelo tratamento criogênico. Mudanças na dureza são dependentes da quantidade de austenita retida transformada em martensita durante o tratamento criogênico. Como não foi observado transformação de austenita com o tratamento criogênico a dureza também não foi alterada.
- O desempenho das brocas de aço-rápido tratadas criogenicamente foi superior ao das não tratadas, com aumento em até 80%, considerando-se como critério de fim de vida o desgaste de flanco médio e máximo e a falha catastrófica simultaneamente. A precipitação de carbonetos finos pode ser o maior responsável por estes resultados.
- Testes de chão de fábrica com fresas de perfil revestidas (TiN) tratadas criogenicamente apresentaram pior desempenho quando comparadas com fresas de perfil revestidas (TiN) não tratadas. O tratamento criogênico pode ter contribuído negativamente na adesão das camadas revestidas, promovendo maior fragmentação e desgaste.
- O tratamento criogênico é uma técnica que exige maiores estudos, não só em ferramentas sem revestimento, mas também em ferramentas revestidas. O resultado do tratamento criogênico, e por conseguinte a eficiência da ferramenta tratada criogenicamente, é bastante influenciado pelo ciclo térmico, incluindo as temperaturas criogênicas envolvidas.
- A otimização deste ciclo individualmente para cada aplicação deve, portanto, ser considerada para o sucesso da aplicação da técnica. Maiores estudos devem ser feitos com ferramentas revestidas para se chegar a conclusões mais precisas sobre o efeito do tratamento neste tipo de ferramenta.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia pela disponibilização dos laboratórios, à *Cryo Quality* Ltda. através do Químico Industrial Edson Monteiro pela realização do tratamento criogênico, à Capes pelo suporte financeiro por meio de bolsas de estudo e à Fiat Automóveis pela parceria na realização da pesquisa, dando subsídios técnico e fornecendo ferramentas de corte.

REFERÊNCIAS

- Cohen P. and Kamody D., Cryogenics Goes Deeper, Cutting Tool Engineering, 1998, Oct., v.150, n.7, p. 46-50
- Collins, D. N., Deep cryogenic Treatment of Tool Steels : a Review, Heat Treatment of Metals, 1996.2, p.40-42

- Da Silva, F. J., Influência Do Tratamento Criogênico no Desempenho de Ferramentas de Aço-Rápido, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1999.
- Kamody, J. D., Using Deep Cryogenics to Advantage, Advanced Materials & Processes, 1998.10, p. 215-218
- Meng, F., Tagashira, K., Azuma, R. and Sohma, H. (1994), "Role of Eta-Carbide Precipitations in the Wear Resistance Improvements of Fe-12Cr-Mo-V-1.4C Tool Steel By Cryogenic treatment", ISIJ International, Vol.34 Num.2, pp. 205-210.
- NODTEST NT MECH 038 (1997), Cutting Fluids for Drilling: Evaluation by Drill Life Test, Nordtest Method, ISSN 0283-7196, Proj. 1242-95/2
- Paulin, P., Frozen Gears, Gear Technology, 1993, p. 26-28.
- Yun, D., Xiaoping, L.e Hongshen, X., Deep Cryogenic Treatment of High-speed Steel and its Mechanism, Heat Treatment of Metals, 1998, March, p.55-59.

***Abstract:** Cryogenic treatment in HSS tools causes microestructural changes and can significantly influence tool life and consequently productivity. Test results shown in the literature certifies up to 871% increasing in tool life after the cryogenic treatment. However the mechanisms that are responsible for theses results are still unclear and must be further investigated. This work aims to study the effects of cryogenic treatment in HSS drills and mills after machining tests both on laboratory and shop floor environments. The results showed some advantages for the cryogenic treated tools in some testes.*

***Keywords :** High speed steel tools, cryogenic treatment, tool life, drilling operation, milling operation.*