

Influência do tratamento criogênico na usinabilidade do aço rolamento ABNT 52100 temperado

MOREIRA, J.C.^I; ÁVILA, R.F.^{II}; GODOY, G.C.D.^{III}; ABRÃO, A.M.^{IV}

^I Furnas Centrais Elétricas S/A, Av. Afonso Pena, 1964, Funcionários, 30130-005, Belo Horizonte, MG
e-mail: calixtoec@yahoo.com.br

^{II} Colégio Técnico Universitário, Universidade Federal de Juiz de Fora Campus Universitário S/N, Martelos, 36036-900, Juiz de Fora, MG
e-mail: rfavila1@yahoo.com.br

^{III} Departamento de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Espírito Santo, 35, Centro, 31160-030, Belo Horizonte, MG
e-mail: gcgodoy@demet.ufmg.br

^{IV} Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, 31.270-901, Belo Horizonte, MG
e-mail: abrao@ufmg.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do tratamento criogênico sobre a usinabilidade do aço rolamento ABNT 52100 temperado e revenido para uma dureza média entre 64 e 65 HRC. Testes de torneamento contínuo a seco foram realizados com ferramentas de corte de alumina mista. Além da influência do tratamento criogênico, o efeito da velocidade de corte e do avanço sobre a vida da ferramenta e acabamento da superfície usinada foi investigado. Não foram encontradas diferenças significativas entre os valores de microdureza das amostras tratadas criogenicamente por 4 e 24 horas e, de uma maneira geral, a amostra tratada por 24 horas apresentou menor rugosidade e propiciou vida mais longa à ferramenta de corte. Finalmente, os índices S_{bi} e S_{ci} indicam que o aço ABNT 52100 tratado por criogenia em 24h apresenta notáveis resultados para aplicações de deslizamento e retenção de filmes lubrificantes.

Palavras-chaves: torneamento, aço temperado, tratamento criogênico, ferramenta cerâmica.

The effect of the cryogenic treatment on the machinability of hardened AISI 52100 bearing steel

ABSTRACT

This paper is focused on the influence of the cryogenic treatment on the machinability of hardened and quenched AISI 52100 bearing steel (average hardness of 64 - 65 HRC) when turning with mixed alumina tools. The effect of cutting speed, feed rate and time for cryogenic treatment on tool life and surface finish was investigated. The microhardness values of the samples were not drastically affected by the duration of the cryogenic treatment. In general, the samples subjected to cryogenic treatment for 24 hours presented lower roughness values and promoted longer tool lives. Additionally, noteworthy values for the S_{bi} and S_{ci} parameters were obtained after turning the samples treated cryogenically for 24 hours.

Keywords: hard turning, cryogenic treatment, ceramic tool.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, um interesse especial tem sido demonstrado pelo efeito de baixas temperaturas no tratamento térmico dos aços. Alguns trabalhos indicam que, dentre outros benefícios, a vida das ferramentas de corte pode aumentar significativamente após estas serem submetidas ao tratamento térmico subzero. Diferentemente dos revestimentos, o tratamento criogênico é aplicado em todo o volume e não apenas superficialmente, o que garante a manutenção de suas propriedades ao longo de toda vida da ferramenta. Porém, a falta de consenso sobre os fenômenos metalúrgicos envolvidos no aumento da resistência ao desgaste e alguns resultados contraditórios encontrados na literatura colocam em dúvida os reais benefícios deste tratamento.

Pesquisas sobre o tratamento criogênico são escassas e, conseqüentemente, poucos artigos científicos têm sido publicados [1]. Não obstante, os aços-ferramenta AISI D2, M2 e T1 submetidos ao tratamento criogênico têm sido objeto de estudo de vários pesquisadores [1-6]. Um ponto relevante e com grandes possibilidades de aplicações industriais é a utilização da técnica de criogenia nos aços inoxidáveis, ferros fundidos, materiais compósitos e, principalmente, em aços para mancais de rolamento. Contudo, torna-se necessário um melhor entendimento sobre o tratamento criogênico, visando assegurar uma maior eficácia na aplicação desta técnica. Mudanças microestruturais no material da peça atribuídas ao tratamento criogênico resultam em diferentes efeitos. A transformação da austenita retida, presente nos aços de alto carbono e aços-ferramenta, em martensita e a precipitação de microcarbonetos são os mecanismos responsáveis pelo aumento da dureza e resistência ao desgaste dos componentes processados [2].

O tratamento criogênico é um tipo de tratamento que consiste na utilização de temperaturas próximas à do nitrogênio líquido (-196 °C), com o propósito de se obter determinadas propriedades, tais como elevadas resistência ao desgaste, tenacidade, dureza e dureza a quente, tensões residuais compressivas, dentre outras. No caso particular da resistência ao desgaste, este é reconhecidamente um fenômeno complexo, uma vez que muitos fatores influenciam o desgaste de um componente em serviço e várias combinações dos quatro mecanismos básicos (adesivo, abrasivo, por fadiga e corrosivo) podem estar envolvidos em uma situação particular [3]. Este fato aumenta de importância deste tratamento em aços para mancais de rolamentos devido às condições especiais de utilização, durante as quais os elementos são submetidos a pressões de contato muito altas associadas a temperaturas relativamente elevadas.

Alguns dos resultados encontrados na literatura são conflitantes, causando uma certa confusão e dúvidas sobre as mudanças microestruturais envolvidas e propriedades modificadas pelo tratamento criogênico. Isto pode ser atribuído à existência de técnicas variadas de tratamento criogênico e à falta de um melhor detalhamento de como estas foram aplicadas, considerando-se que diversas variáveis podem influenciar nos efeitos do tratamento.

Vários procedimentos para tratamento criogênico são citados na literatura. Estes procedimentos são diferenciados principalmente pela temperatura, tempo de tratamento e forma de resfriamento. Geralmente o tratamento subzero é classificado em duas categorias, adotando-se como referência a temperatura de tratamento: tratamento a frio e tratamento criogênico.

O tratamento a frio (*cold treatment*) consiste no resfriamento da peça a temperaturas na faixa de -60° C a -80° C, de acordo com o material e os parâmetros de têmpera, do tempo de permanência à temperatura escolhida e do reaquecimento natural até a temperatura ambiente [2, 6, 7]. Juste *et al.* [8] relatam que o sistema de transferência de calor é do tipo sólido-sólido e geralmente as peças são resfriadas por algumas poucas horas em gelo seco (CO₂). Este tratamento minimiza o teor de austenita residual pelo abaixamento da temperatura da peça em direção à temperatura de fim da transformação martensítica (M_f), sendo que a dureza do aço aumenta com a elevação do percentual de martensita na estrutura.

O tratamento criogênico (*cryogenic treatment*), também conhecido como tratamento ultra subzero, consiste no resfriamento da peça em temperaturas na faixa de -125° C a -196° C, melhorando determinadas propriedades além das obtidas pelo tratamento a frio normal [7, 9].

Barron [10] cita que na década de 1960 algumas empresas começaram a desenvolver procedimentos práticos de tratamento criogênico para melhorar a resistência ao desgaste de ferramentas de corte, engrenagens e facas de guilhotina. O autor cita ainda que foi desenvolvido um processo chamado *Perm-O-Bonding* no qual se conseguia os melhores resultados no aumento da vida dos aços ferramenta. Este processo consiste de um resfriamento bem lento até -196 °C (a uma velocidade de 2,5° C/min), mantendo-se esta temperatura por 20 horas, seguido de um aquecimento lento até a temperatura ambiente e posterior aquecimento a 196 °C. Durante o tratamento, as peças não entram em contato com o nitrogênio.

Em geral, devido ao alto custo, o tratamento criogênico é executado em etapa única, utilizando o nitrogênio líquido e baixa velocidade de resfriamento. Mesmo com a possibilidade de choque térmico no processo de imersão em nitrogênio líquido, resultados satisfatórios como o aumento na resistência ao desgaste e na vida de ferramentas de 42 a 211 % foram encontrados [11].

1.1 Mecanismos envolvidos no tratamento criogênico

O propósito inicial do uso da técnica de criogenia foi atribuído ao aumento na resistência ao desgaste devido à transformação da austenita retida em martensita e à obtenção de uma estrutura mais estável [4]. Entretanto, Collins [2] afirma que a transformação da austenita não é o único mecanismo predominante no aumento da resistência ao desgaste. Ele verificou que o tratamento criogênico tem efeito principalmente sobre a martensita, causando mudanças cristalográficas e microestruturais que resultam na precipitação de carbonetos finos na microestrutura revenida e, conseqüentemente, no aumento na tenacidade e resistência ao desgaste.

Em 1974, Barron verificou que os materiais submetidos de forma eficiente a tratamentos térmicos convencionais apresentavam pouco teor de austenita retida. Ele também notou que os materiais submetidos ao tratamento criogênico apresentavam desempenho ainda melhor que os materiais não tratados criogenicamente. Este mecanismo seria dependente do tempo e da temperatura de tratamento devido ao longo período de exposição a temperaturas criogênicas (acima de 8 horas). Barron atribuiu a maior resistência ao desgaste à transformação da austenita retida em martensita e à presença de pequenas e duras partículas de carbonetos dentro da martensita. Após tratar criogenicamente vários materiais a $-84\text{ }^{\circ}\text{C}$ (mantendo nesta temperatura por 24 horas), Barron [3] observou um aumento significativo na resistência ao desgaste abrasivo quando comparado com o tratamento térmico convencional de têmpera e revenido. Quando a temperatura do tratamento criogênico foi reduzida para $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ se obteve uma resistência ainda maior.

Meng *et al.* [9] realizaram tratamentos criogênicos em aços-ferramenta e, através de técnicas de difração de raios-X e microscopia eletrônica de transmissão, verificaram a presença de microcarbonetos do tipo η com dimensões que variavam de 0,02 a 0,04 mm de comprimento e 0,005 a 0,01 mm de largura da seção. A estes carbonetos foi atribuída a maior resistência ao desgaste devido ao aumento da resistência e tenacidade da matriz martensítica (ao invés da transformação da austenita retida em martensita, conforme citado em muitas pesquisas). Estes autores propuseram um modelo para o mecanismo de precipitação dos carbonetos η no qual, resumidamente, átomos de carbono trocariam de posição rapidamente devido as deformações (contração e expansão) da rede causada pelo ciclo de tratamento criogênico.

Yun *et al.* [4] verificaram mudanças nas propriedades do aço-rápido M2 submetido a diferentes ciclos de tratamento criogênico a $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Em seus estudos, foram comparados o ciclo tradicional de têmpera e revenido com ciclos de tratamento criogênico, observando-se um aumento de 11,5 % na resistência à flexão, 43 % na tenacidade de fratura, além de mudanças na dureza à temperatura ambiente e na dureza a quente. Os resultados também foram atribuídos à transformação da austenita retida em martensita e à precipitação de carbonetos ultrafinos.

Em testes realizados em brocas de aço rápido AISI M2, Silva [5] comparou o desempenho de brocas tratadas criogenicamente e convencionalmente e constatou mudanças microestruturais no material que podem influenciar significativamente a vida das ferramentas e, conseqüentemente, na produtividade. As brocas de aço-rápido M2 apresentaram um aumento no desempenho após o tratamento criogênico que variou de 65 % a 343 % sob diferentes condições de corte, adotando-se como critério de fim de vida a falha catastrófica.

Molinari *et al.* [6] realizaram estudos com o objetivo de verificar o efeito do tratamento criogênico sobre algumas propriedades mecânicas e sobre a resistência ao desgaste dos aços AISI M2 e H13. Os aços foram submetidos a dois ciclos de têmpera e posterior tratamento criogênico à $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os autores observaram que no caso do aço AISI M2, o aumento na resistência ao desgaste pôde ser atribuído ao aumento na dureza e, no caso do aço AISI H13, o aumento na resistência ao desgaste foi correlacionado ao aumento na tenacidade. Os resultados obtidos para o aço AISI H13 mostram que o tratamento criogênico executado após o tratamento térmico aumenta a tenacidade mas não causa a redução da dureza. Esse efeito pode ser importante sobre o desempenho dos aços, em particular aqueles usados para extrusão de alumínio e para forjamento a quente de peças de aço, onde resistência ao desgaste e tenacidade são propriedades críticas.

Finalmente, o objetivo deste trabalho é investigar a influência dos tratamentos criogênicos com duração de 4 e 24 horas sobre a vida de ferramenta, forças de usinagem e acabamento de peças de aço rolamento ABNT 52100 (temperado e revenido para uma dureza média entre 64 e 65 HRC) durante a operação de torneamento contínuo a seco com ferramenta cerâmica de alumina mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$)

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material escolhido como corpo de prova foi o aço ABNT 52100 (DIN 100Cr6) temperado e revenido. Anteriormente à realização dos testes, os corpos de prova foram submetidos ao tratamento térmico convencional de têmpera e revenido, seguido do tratamento criogênico. Após estes tratamentos, os corpos de prova apresentaram dureza média entre 64 e 65 HRC.

As etapas do tratamento térmico convencional foram:

- Aquecimento à temperatura de $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1 hora);
- Aquecimento até a temperatura de austenitização de $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ (20 minutos);
- Resfriamento em solução de 3% de sais em água mantido a $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (martêmpera);
- Aquecimento (revenido) a $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1 hora);
- Resfriamento até a temperatura ambiente.

O tratamento criogênico consistiu de um resfriamento a temperaturas de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ seguido de um ciclo de aquecimento. Com o objetivo de se investigar a influência do tratamento criogênico sobre o comportamento durante a operação de usinagem, realizou-se este tratamento em dois lotes distintos de corpos de prova, como mostra a Tabela 1:

Tabela 1: Sequência de tratamentos criogênicos utilizados.

Tratamento criogênico por 4 horas	Tratamento criogênico por 24 horas
Resfriamento a -196°C (1 hora) a $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$	Resfriamento a -196°C (4 horas) a $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$
Estabilização a frio: -196°C (3 horas)	Estabilização a frio: -196°C (20 horas)
Aquecimento a temperatura ambiente (1 hora)	Aquecimento a temperatura ambiente (4 horas)
Aquecimento a 180°C (1 hora)	Aquecimento a 180°C (1 hora)
Resfriamento até a temperatura ambiente	Resfriamento até a temperatura ambiente

Antes da realização dos testes de usinagem, amostras dos materiais foram submetidas a uma análise microestrutural com o objetivo de se avaliar as mudanças ocorridas nos materiais submetidos aos dois tratamentos criogênicos. Para tal foi utilizado um microscópio óptico modelo Ortholux II POL BK com ampliação máxima de 1000 vezes acoplado a uma máquina fotográfica com resolução de 640×480 pixels. Para a obtenção dos valores de microdureza foi utilizado um microdurômetro Mitutoyo modelo MVK-H1, com carga de 200 gramas e tempo de aplicação de 30 segundos, considerando a média de trinta e duas indentações para cada amostra.

As amostras das seções transversais dos corpos de prova foram cortadas usando-se uma máquina de eletroerosão a fio. O processo de preparação das amostras consistiu de lixamento a úmido utilizando lixas com granulometrias 200, 320, 400, 600, 1000 e 2000, sendo alterada a direção (180°) em cada mudança de lixa até desaparecerem os traços da lixa anterior. Após o lixamento foram realizadas operações de polimento utilizando feltro de polimento, pó de diamante com granulometria de $3\ \mu\text{m}$ e lubrificante a base de água. As superfícies foram submetidas ao ataque químico por imersão durante 5 segundos, utilizando solução de ácido nítrico (Nital) a 3% em álcool etílico e solução de ácido pícrico (Picral) a 5% em álcool etílico. Após o ataque, as superfícies foram lavadas com álcool e em seguida foi efetuada a secagem com jato de ar quente.

Os testes de usinagem foram executados em um torno equipado com comando numérico computadorizado com potência de 5,5 kW e rotação máxima de 3500 rpm. Insetos de cerâmica mista ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$) de geometria triangular, produzidos pela Sandvik Coromant, foram utilizados como ferramentas de corte. O inserto escolhido pertence à classe CC 650 com geometria ISO TNGN 16 04 08 T 01020, sem quebra cavaco. Esta ferramenta de corte é comumente recomendada para o torneamento de acabamento em aços endurecidos. O porta-ferramenta utilizado, código CTG NR 2525M16 ID, proporcionou a seguinte geometria: ângulo de posição $\chi_r = 91^{\circ}$; ângulo de saída $\gamma_o = -6^{\circ}$; ângulo de inclinação $\lambda_s = -4^{\circ}$ e ângulo de folga de $\alpha_o = 6^{\circ}$.

O desgaste das ferramentas foi medido em um microscópio Mitutoyo modelo TM 505 com resolução de $1\ \mu\text{m}$. Inicialmente, um critério de vida da ferramenta baseado no desgaste de flanco médio de $\text{VBc}=0,3\ \text{mm}$ foi estabelecido. Entretanto, foi observado durante os testes preliminares que ao utilizar uma velocidade de corte de 100 m/min e avanço de 0,06 mm/rot (para a amostra tratada criogenicamente por 24 horas) ocorreu um alto índice de quebra de ferramentas, impossibilitando a análise comparativa dos ensaios. Foi observado que uma condição intermediária ($v_c=80\ \text{m}/\text{min}$) possibilitou a obtenção de resultados mais confiáveis. Uma vez determinada esta condição de usinagem mais adequada, foram estabelecidos valores máximo e mínimo para a realização dos testes. Assim, para a análise da vida da ferramenta de corte, o critério de fim de vida adotado foi a falha catastrófica ou quando um tempo de corte máximo de 40 minutos. Os parâmetros de corte foram ajustados à capacidade da máquina e à faixas de aplicações industriais no acabamento de peças de aços endurecidos. A Tabela 2 apresenta a matriz de testes de usinagem, na qual observa-se que inicialmente foi mantido um avanço constante $f=0,06\ \text{mm}/\text{rot}$ enquanto a velocidade de corte foi variada de 70 a 90 m/min. Em seguida manteve-se a velocidade de corte em 80 m/min variando-se o avanço de 0,06 a 0,12 mm/rot. Em todos os casos a profundidade de corte foi mantida constante em 0,5 mm.

A medição da rugosidade foi feita com um rugosímetro portátil Mitutoyo modelo Surf test 301 série 178 (equipado com detector do tipo agulha apalpadora com raio de ponta de $5\ \mu\text{m}$), configurado para um comprimento de amostragem de 0,8 mm. Para cada condição foram medidos os valores de rugosidade média aritmética (R_a) e rugosidade total (R_t) em três pontos equidistantes no diâmetro (defasados a 120°) do corpo de prova e a uma mesma distância no eixo longitudinal (próxima à placa do torno), sendo considerada a média aritmética dos valores. Cada condição de medição foi feita com uma aresta nova da pastilha.

Tabela 2: Matriz de testes de usinagem

Velocidade de corte v_c (m/min)	Avanço f (mm/rot)	Profundidade de usinagem a_p (mm)
70 – 80 – 90	0,06	0,5
80	0,08 – 0,12	0,5

Ainda que as medições de rugosidade superficial (bidimensional) sejam bastante na indústria e proporcionem uma referência importante, esta técnica não acusa totalmente a condição em que se encontra a superfície. A análise topográfica (tridimensional) das superfícies foi realizada com o objetivo de se obter resultados adicionais para a avaliação da influência do tratamento criogênico na usinagem em relação aos parâmetros topográficos (de amplitude e funcionais). Para a análise topográfica das superfícies usinadas foi utilizado o perfilômetro Hommelwerke com apalpador TKU (E) 600 (raio de ponta de $2 \mu\text{m}/90^\circ$) e os *softwares* “Turbo Roughness” e “Hommelmap Expert 3.0”. Anteriormente ao mapeamento topográfico das regiões, a peça foi limpa com acetona (100%) e seca ao ar ambiente.

3 RESULTADOS

Inicialmente serão apresentados os resultados relativos à análise microestrutural e de microdureza, seguidos dos resultados de vida de ferramenta, rugosidade e análise topográfica.

3.1 Análise microestrutural e de microdureza

Os resultados obtidos da análise microestrutural revelaram algumas diferenças quanto à microestrutura obtida após os tratamentos criogênicos com duração de 4 e 24 horas. As Figuras 1 e 2 apresentam as micrografias obtidas para o aço ABNT 52100 tratado por criogenia durante 4 e 24 horas e atacadas com os reagentes Nital e Picral, respectivamente. Na Figura 1 são observados a presença de bainita (áreas pretas), austenita (áreas brancas), martensita revenida (áreas cinzas) e os pontos brancos são partículas de carboneto que não foram dissolvidos durante o processo de austenitização. Na Figura 1(a), obtida após o tratamento criogênico por 4 horas, observa-se uma estrutura martensítica e finas partículas de carboneto não-dissolvido. Entretanto, na Figura 1(b), obtida após o tratamento criogênico por 24 horas, observa-se uma microestrutura mais refinada e a presença de carbonetos distribuídos mais homoganeamente. Além disso, observa-se na Figura 2 uma estrutura martensítica, caracterizada pela dispersão de carboneto esferoidal. Nota-se também uma maior concentração de carbonetos na amostra tratada por criogenia em 24 horas (Figura 2b).

A medição de microdureza detectou diferenças pouco significativas entre as duas amostras tratadas criogenicamente. A amostra tratada durante 4 horas apresentou um valor médio de dureza de $768 \text{HV}_{0,2}$ com desvio padrão de $54,64 \text{HV}_{0,2}$, enquanto a amostra tratada criogenicamente por 24 horas apresentou dureza média de $746 \text{HV}_{0,2}$ e desvio padrão de $66,69 \text{HV}_{0,2}$. Collins [2] relata que quanto mais austenita retida transformada, maior a diferença de dureza provocada pelo tratamento criogênico, e que a formação de finos carbonetos atribuída ao tratamento criogênico tem como resultado o aumento da resistência ao desgaste e da tenacidade do material, mas pouco ou nenhum efeito sobre a dureza. Entretanto, de acordo com [12] o tamanho e o tipo do carboneto formado influencia no volume de austenita retida. Isto sugere que o volume de austenita retida afeta a formação de carbonetos durante o ciclo de tratamento criogênico, podendo afetar a microdureza do material.

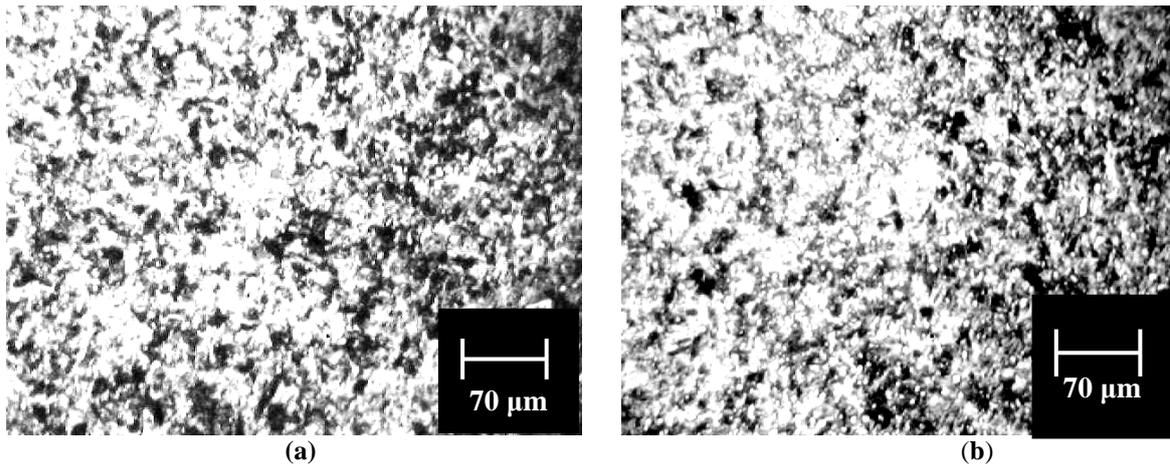


Figura 1: Microestrutura do aço ABNT 52100 tratado criogenicamente: (a) tempo de encharque de 4 horas e (b) tempo de encharque de 24 horas (reagente Nital).

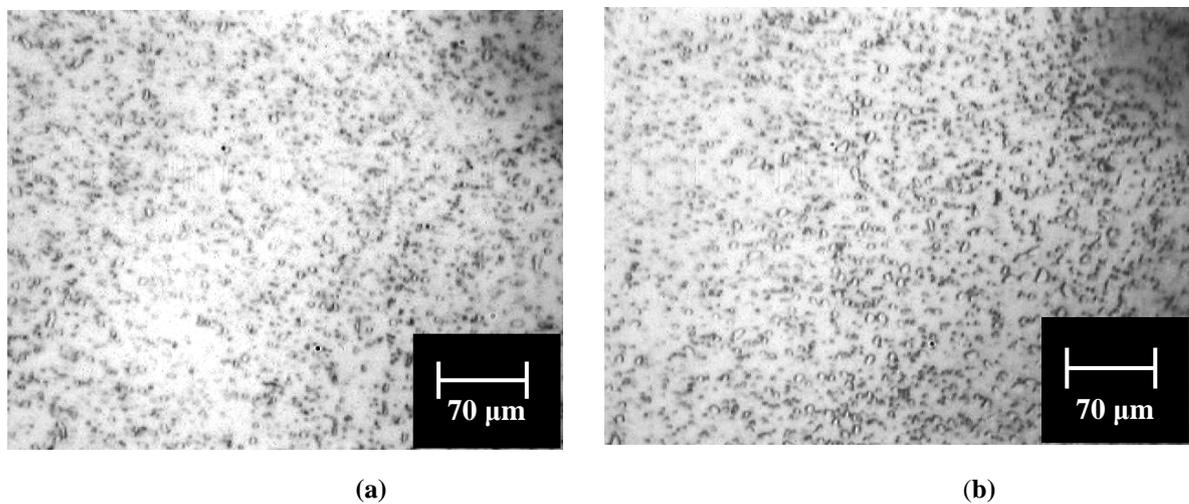


Figura 2: Microestrutura do aço ABNT 52100 tratado criogenicamente: (a) tempo de encharque de 4 horas e (b) tempo de encharque de 24 horas (reagente Picral).

3.2 Vida de ferramenta

A Figura 3 mostra a influência da velocidade de corte sobre o comportamento da vida da ferramenta de corte, medida em termos de volume de material removido para um avanço igual a 0,06 mm/rot e profundidade de corte de 0,5 mm. Observa-se que para as velocidades de corte de 70 m/min e 80 m/min as menores taxas de desgaste foram obtidas usinando o material tratado por criogenia durante 24 horas. Nestas condições, acredita-se que o tempo prolongado de exposição à temperatura criogênica tenha contribuído para a redução da resistência ao cisalhamento do material e das áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, resultando em menor desgaste da ferramenta de corte. Entretanto, foi observado o pior desempenho da ferramenta para a velocidade de corte 90 m/min ao se usinar o aço tratado por criogenia durante 24 horas. Outro fator que influencia o desgaste das ferramentas é a presença de diferentes carbonetos na microestrutura do aço. O tamanho e o tipo de carbonetos formados durante os tratamentos criogênicos realizados a tempo de encharque diferentes provocam o aumento da resistência ao desgaste do material da peça e, conseqüentemente podem afetar a taxa de desgaste na ferramenta de corte.

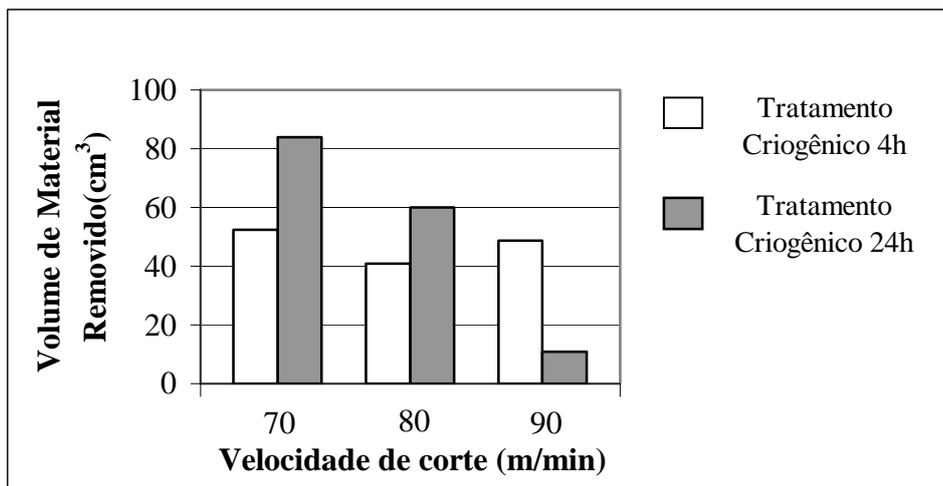


Figura 3: Volume de material removido em função da velocidade de corte para o aço ABNT 52100 tratado por criogenia ($f=0,06$ mm/rot e $a_p=0,5$ mm).

A Figura 4 apresenta a influência do avanço sobre a vida da ferramenta (em volume de material removido) empregando-se uma velocidade de corte de 80 m/min. Observa-se que para avanços de 0,06 e ,12 mm/rot a vida das ferramentas utilizadas no torneamento do corpo de prova submetido a um tempo de encharque de 24 horas foi superior, ao passo que para $f=0,08$ mm/rot vida mais longa foi obtida para a ferramenta que torneou o corpo de prova tratado por 4 horas. De acordo com a teoria, o aumento do avanço causa um aumento do volume de material removido por unidade de tempo e, com isso, um aumento do calor gerado e da temperatura da ferramenta, reduzindo a sua dureza e resistência ao desgaste. Por outro lado, a diminuição do avanço faz com que muitas vezes uma mesma porção da peça entre em atrito com a ponta da ferramenta, o que tende a aumentar a temperatura. Em outras palavras, um avanço pequeno gera menos calor na unidade de tempo, mas, como o tempo para cortar um determinado volume de material aumenta com um menor avanço, o calor gerado no final do corte pode ser igual ou até maior àquele gerado com um avanço maior. Devido à limitação de material para a realização dos testes de vida, estes foram executados uma única vez. A realização de réplicas poderia esclarecer de maneira definitiva os resultados apresentados nas Figuras 3 e 4.

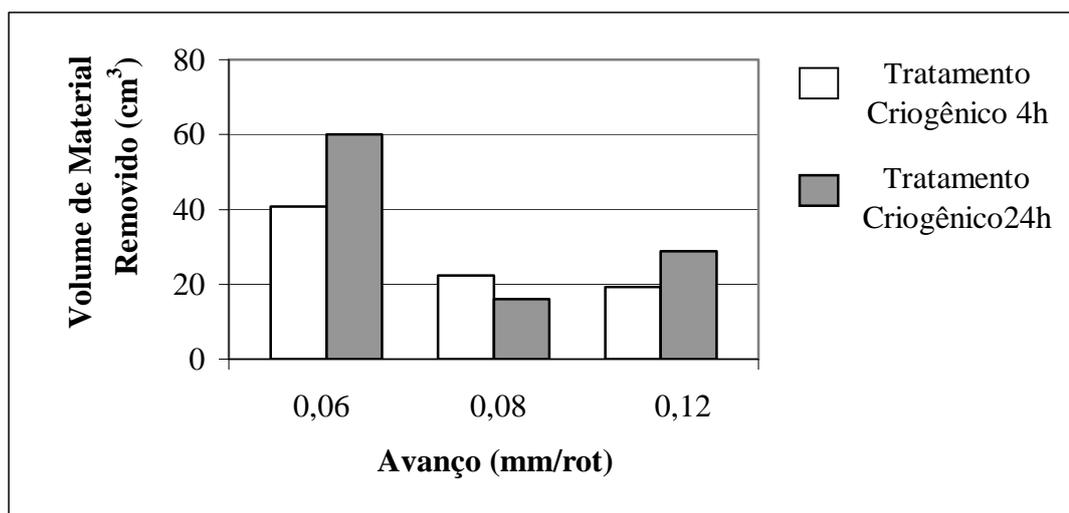


Figura 4: Volume de material removido em função do avanço para o aço ABNT 52100 tratado por criogenia ($v_c=80$ m/min e $a_p=0,5$ mm).

3.3 Rugosidade da superfície usinada

Os resultados de rugosidade bidimensional são apresentados na Figuras 5. Embora tenham sido coletados os valores dos parâmetros R_a e R_t , apenas estes serão apresentados visto que a mesma tendência de comportamento foi observada em ambos os casos. Além disso, o parâmetro R_t pode ser mais útil na avaliação do comportamento do material quando submetido à fadiga, o que, sem dúvida, deve ser levado em consideração na usinagem de aços para mancais de rolamento. A Figura 5 apresenta a variação média de rugosidade em função da velocidade de corte. Considerando o avanço empregado ($f = 0,06$ mm/rot) e o raio de ponta da ferramenta ($r_c=0,8$ mm), o valor teórico de rugosidade total é $R_t=0,56$ μm , bem inferior aos registrados provavelmente devido às forças elevadas induzidas durante a usinagem do aço no estado temperado, que podem provocar vibrações e comprometer o acabamento da peça.

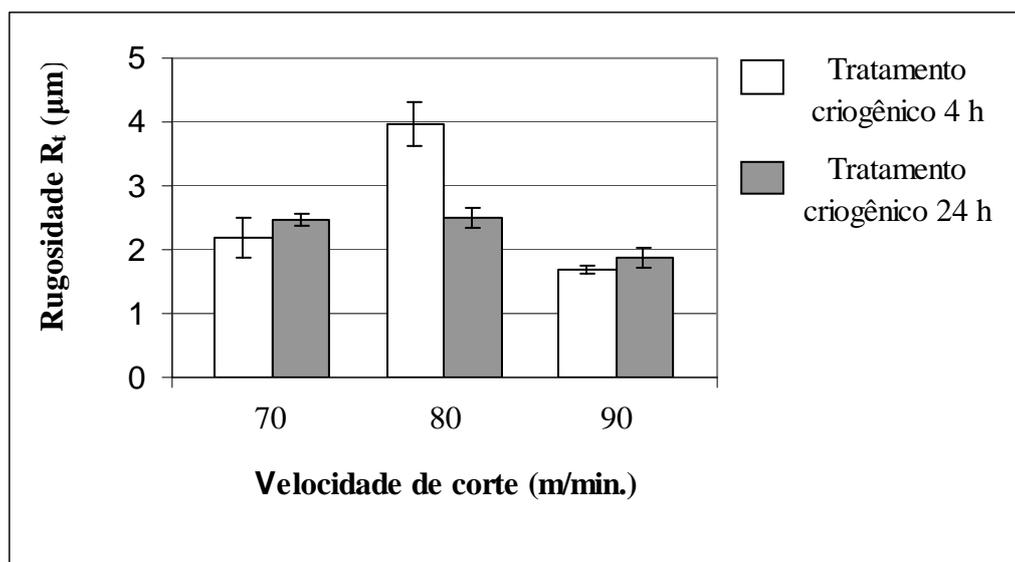


Figura 5: Variação média de R_t em função da velocidade de corte para o aço ABNT 52100 tratado por criogenia ($f = 0,06$ mm/rot e $a_p = 0,5$ mm).

Enquanto o corpo de prova submetido a um tempo de encharque de 4 horas apresenta um aumento de rugosidade quando utilizada a velocidade de corte intermediária ($v_c=80$ m/min), a amostra tratada por 24 horas apresenta valores de R_t próximos para as velocidade de 70 e 80 m/min, seguidos de uma suave queda quando a velocidade de corte é elevada para 90 m/min. Este comportamento pode ser explicado pela elevação da temperatura com o aumento da velocidade de corte, já que mais energia é disponibilizada para o corte do material. Com a elevação da temperatura tem-se a redução da resistência ao cisalhamento do material da peça, o que promove a redução das forças de usinagem e da rugosidade da superfície gerada. O aumento da rugosidade da amostra tratada por 4 horas quando torneada a uma velocidade de corte de 80 m/min pode estar associado ao desgaste da ferramenta sob esta mesma condição, como mostra a Figura 4.

Na Figura 6 é apresentada a influência do avanço sobre a rugosidade do corpo de prova. Para avanços de 0,06 - 0,08 e 0,12 mm/rot os valores teóricos de R_t são 0,56 - 1 e 2,25 μm , respectivamente. De maneira geral, observa-se que a rugosidade aumenta com o avanço, muito embora a tendência teórica de comportamento quadrático não tenha sido observada. Para a amostra tratada por 4 horas foram observados valores de rugosidade superiores à amostra tratada por 24 horas, fato que pode estar relacionado com a menor vida da ferramenta de corte (maior taxa de desgaste), uma vez que com a evolução do desgaste da ferramenta tem-se a deterioração da aresta de corte e a elevação da rugosidade. Finalmente, as Figuras 5 e 6 mostram uma maior dispersão dos resultados de rugosidade para os corpos de prova tratados por 4 horas.

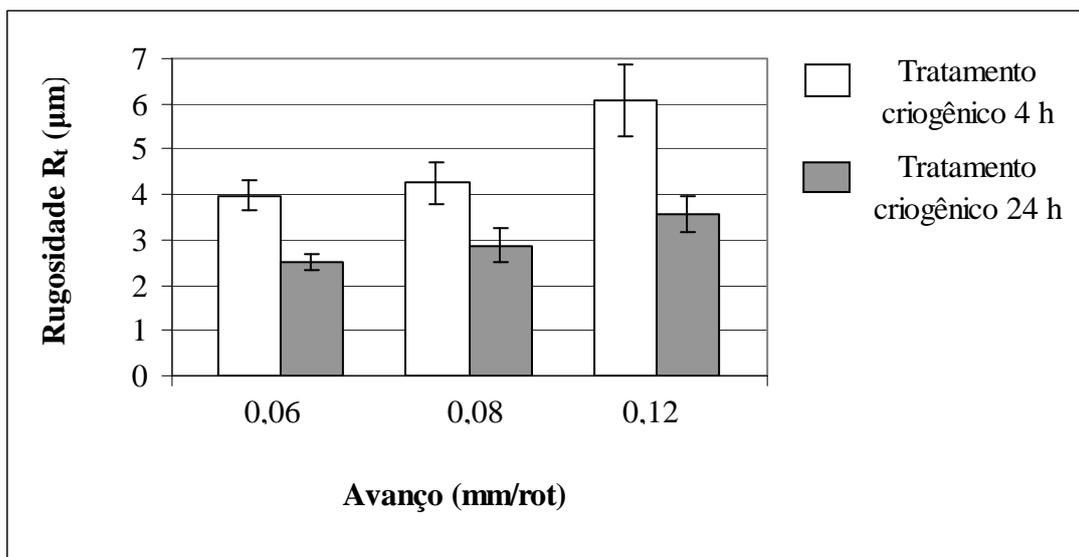


Figura 6: Variação média de R_t em função do avanço para o aço ABNT 52100 tratado por criogenia ($v_c=80$ m/min e $a_p = 0,5$ mm).

3.4 Análise topográfica

A Tabela 3 apresenta os parâmetros topográficos obtidos para as amostras tratadas por criogenia com tempos de encharque de 4 e 24 horas. Foram realizados dois ensaios sob velocidades de corte de 60 m/min e 100 m/min, mantendo-se baixos valores de avanço e de profundidade de corte, visto que a avaliação destes parâmetros topográficos só tem sentido para a operação de torneamento de acabamento. Os parâmetros topográficos usados para descrever a amplitude e as propriedades de distribuição da altura são: S_a (rugosidade média), S_q (desvio médio quadrático), S_{sk} (*skewness*) e S_{ku} (*kurtosis*) da distribuição da altura da superfície. Os parâmetros funcionais S_k , S_{pk} e S_{vk} também foram analisados.

Stout [13] define os parâmetros de amplitude da seguinte forma: S_a equivale, na análise tridimensional, ao parâmetro R_a , que é o mais utilizado dos parâmetros de perfilometria e corresponde à média aritmética dos valores absolutos dos picos e vales do perfil em relação a seu plano médio, na área de amostragem; S_q corresponde à raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos desvios do perfil em relação ao plano médio; S_{sk} , ou “*skewness*” de uma distribuição de alturas de uma topografia é uma função cúbica das alturas das ordenadas e mede a assimetria dos desvios de uma superfície em relação a um plano médio. É utilizado para descrever a forma da distribuição de alturas da topografia. Finalmente, S_{ku} ou “*kurtosis*” é função da quarta potência do perfil das alturas e caracteriza a dispersão desta distribuição. Se a distribuição das alturas segue uma distribuição gaussiana, então $S_{ku}=3$. $S_{ku}<3$ ou $S_{ku}>3$ indicam, respectivamente, o grau de achatamento ou de protuberância desta distribuição.

Tabela 3: Parâmetros topográficos para análise comparativa.

Parâmetros	$v_c=60$ m/min, $f= 0,06$ mm/rot e $a_p=0,2$ mm		$v_c=100$ m/min, $f= 0,06$ mm/rot e $a_p=0,2$ mm	
	4h	24h	4h	24h
S_a (μm)	0,244	0,29	0,253	0,353
S_q (μm)	0,307	0,353	0,316	0,437
S_{sk}	0,011	0,118	0,032	0,346
S_{ku}	3	2,53	2,84	2,83

Os parâmetros S_a e S_q apresentaram valores ligeiramente inferiores na peça tratada criogenicamente por 4 horas, contradizendo os resultados de R_t apresentados anteriormente. Com relação à simetria da altura

da distribuição topográfica (S_{sk}), foi registrado em ambas condições de tratamento criogênico valores menores que a unidade.

Outros parâmetros que caracterizam a rugosidade da topografia são determinados a partir da curva de material. Esta curva é o resultado de um gráfico que possui, em seu eixo vertical, a altura normalizada em relação a S_q e no eixo horizontal, o percentual da área dos picos interceptados por um plano. Para construção desta curva, desloca-se um plano com uma área igual a área de varredura em uma distância h , a partir do ponto mais alto da superfície, St . Para este ponto determina-se o valor de $M(h)$ igual a “área total interceptada”, expressa em percentual relativo ao plano de varredura. Os pontos extremos equivalem a $h=0$ (crista mais alta) e a $h=St$ (vale mais profundo), onde $M(h=St)$ é igual a 100%.

A curva de razão de área é dividida em 3 zonas. A zona de pico, compreendida entre dois planos horizontais, o plano de topo (0% área de suporte) e $M(h)$ igual a 5% ; a zona de núcleo, contida entre $M(h)$ igual a 5% e 80% e a zona de vale contida entre $M(h)$ igual a 80% a 100%. Da curva obtida define-se: S_{pk} que é uma estimativa dos picos acima de um certo plano situado a $M(h)$ definido por uma secante traçada na curva de modo a possuir inclinação mínima; S_k (rugosidade central) e S_{vk} , que é uma estimativa da profundidade dos vales abaixo de um plano situado na altura onde a secante cruza na parte esquerda da curva de razão de materiais. As Figuras 7 e 8 mostram os estudos gráficos dos parâmetros S_k para a superfície tratada por criogenia por 4 e 24 horas, respectivamente. As análises indicam que os parâmetros funcionais (S_k , S_{pk} e S_{vk}) fornecem diferentes resultados quando usando as mesmas condições de corte, porém diferentes condições de tratamento criogênico.

Comparando as Figuras 7 e 8 pode-se dizer que o tratamento criogênico realizado por 24 horas favorece a obtenção de uma superfície com melhores propriedades de deslizamento e retenção de filme lubrificante, representado por maior S_k . O processo de fabricação que produz pequenos valores de S_{pk} é adequado para a obtenção de boas propriedades de deslizamento. Por outro lado, o processo de fabricação que produz relativamente maiores valores de S_{vk} é adequado para a obtenção de boas propriedades de retenção de filme lubrificante. Esse fato sugere que a seleção dos parâmetros estabelecidos para o tratamento criogênico têm influência sobre o acabamento superficial e para diferentes aplicações estratégicas em engenharia, como por exemplo, o volume de retenção de óleo.

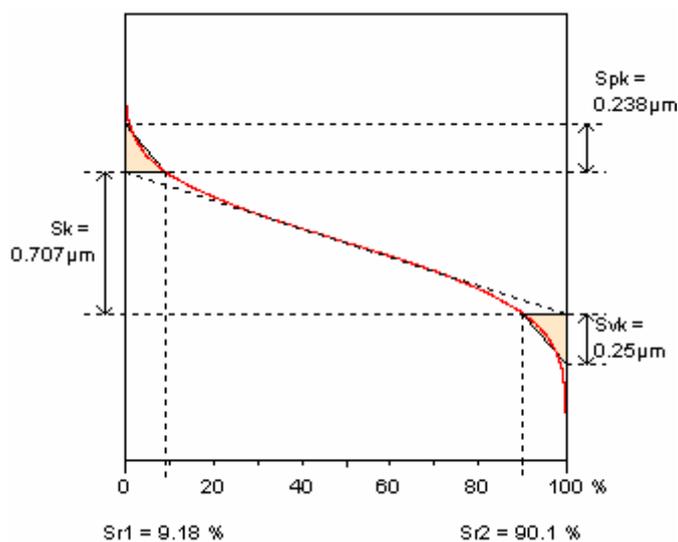


Figura 7: Representação gráfica dos parâmetros S_k para o aço tratado por criogenia por 4 horas ($v_c=100$ m/min, $f=0,06$ mm/rot e $a_p=0,2$ mm).

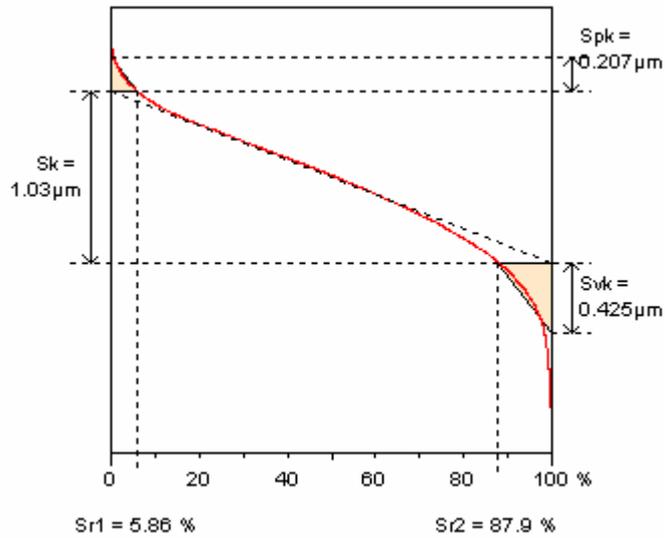


Figura 8: Representação gráfica dos parâmetros S_k para o aço tratado por criogenia por 24 horas ($v_c=100$ m/min, $f=0,06$ mm/rot e $a_p=0,2$ mm).

Superfícies para aplicações em engenharia devem apresentar algumas propriedades funcionais tais como rolamento, selagem e retenção de lubrificantes, sendo necessário a definição de alguns parâmetros funcionais. Dentre os parâmetros, destacam-se: S_{bi} , (*surface bearing index*), que indica a capacidade de escorregamento de uma superfície em relação à outra. Pode ser utilizado como critério e/ou pré-requisito de projeto para fabricação de mancais, engrenagens ou outros componentes de sistemas mecânicos; S_{ci} , (*core fluid retention index*), que define a capacidade de retenção de fluido na superfície. É um critério e/ou pré-requisito de projeto que deve ser considerado onde a retenção de fluido na superfície é desejada. Em mancais, por exemplo, existe a necessidade de uma camada lubrificante entre superfícies em movimento relativo.

As Figuras 9 e 10 mostram, respectivamente, os resultados dos parâmetros funcionais S_{bi} e S_{ci} para a usinagem dos aços tratados com diferentes tempos de encharque. Para o aço tratado por 24 horas se observa maiores índices S_{bi} e S_{ci} na condição $v_c = 60$ m/min, $f = 0,06$ mm/rot e $a_p=0,2$ mm, ou seja, para esta condição a superfície usinada apresenta melhores características de deslizamento e retenção de fluidos. Segundo Stout [13], para uma superfície gaussiana estes índices são $S_{bi} = 0,61$ e $S_{ci} = 1,56$. Um maior índice de rolamento (S_{bi}) indica boa propriedade de rolamento e um maior índice de retenção de filme (S_{ci}) indica uma boa retenção de filme lubrificante na zona central.

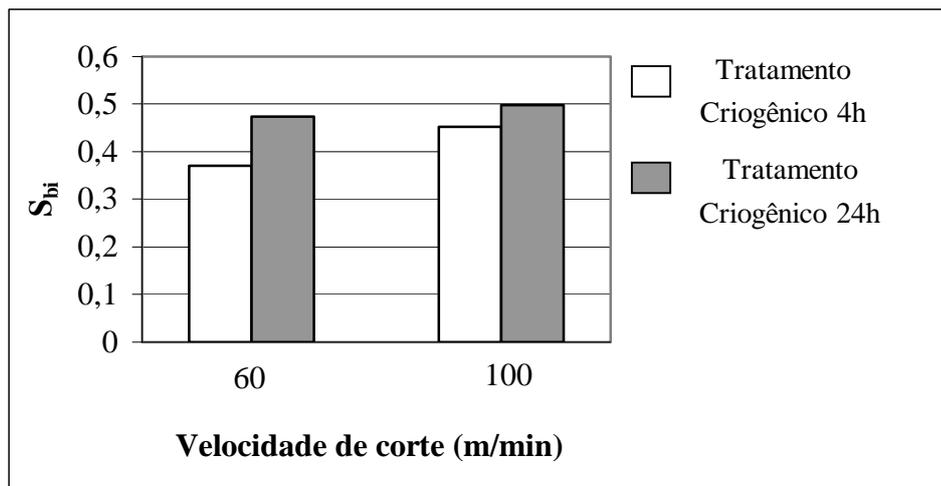


Figura 9: Índice de parâmetro funcional S_{bi} ($f = 0,06$ mm/rot e $a_p=0,2$ mm).

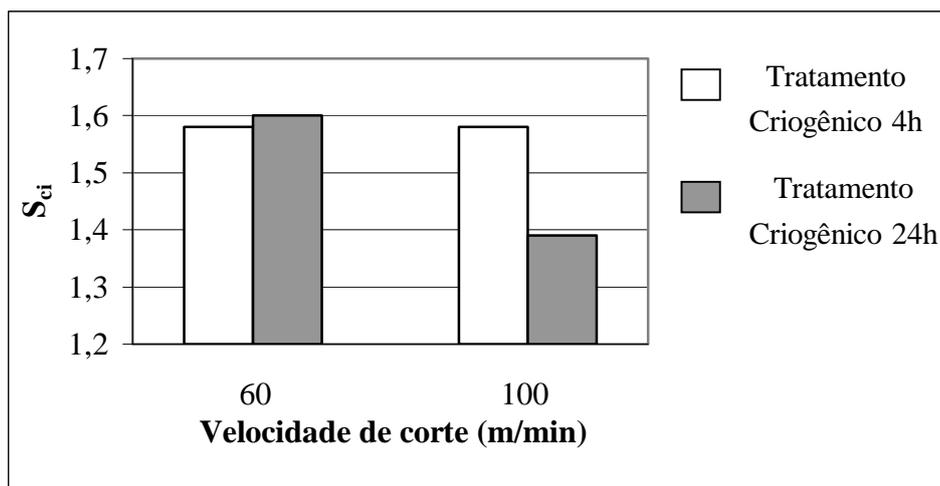


Figura 10: Índice de parâmetro funcional S_{ci} ($f = 0,06$ mm/rot e $a_p=0,2$ mm).

4 DISCUSSÃO

A medição de microdureza das amostras tratadas criogenicamente por 4 e 24 horas não identificou alterações significativas entre os dois tratamentos. Entretanto, não há um consenso entre os autores consultados com relação a este aspecto. Apesar de não sido feita a quantificação da presença dos finos carbonetos, acredita-se que o tratamento criogênico das amostras tenha influenciado a quantidade de precipitação destes carbonetos. Entretanto, o mecanismo ocorrido na condição de tratamento por 4 horas pode estar relacionado somente à transformação da austenita retida, ocasionando um aumento maior na microdureza. É provável que este comportamento ocorra devido a diferentes respostas obtidas quando finos carbonetos são submetidos a diferentes condições de ensaio, envolvendo uma dispersão maior da microdureza na microestrutura. A nucleação e o crescimento do grão são dependentes do tempo de criogenia [7].

Com relação aos resultados dos testes de vida de ferramenta, König et al [14] relatam que a precipitação de carbonetos gerados nos materiais ferrosos endurecidos influencia de maneira negativa quando uma maior temperatura é gerada. A agressividade dos carbonetos é mantida, sendo o mecanismo de desgaste por abrasão bastante significativo. Isto indica que a diminuição do limite da tensão de escoamento da peça causada pelo aumento da temperatura, e que facilitaria a formação do cavaco, não foi predominante em relação ao fenômeno que causava o lascamento e quebra da ferramenta. Este fenômeno pode estar relacionado com o aumento da vibração do sistema causado pelo aumento da velocidade, já que o fim da vida das ferramentas aconteceram por lascamento e/ou quebra das arestas e não por desgaste gradual. Outro aspecto que pode reforçar a tese da influência da velocidade de corte no desgaste está na própria forma acelerada dos mecanismos de desgaste termicamente ativados na região da ferramenta sujeita à maior velocidade de corte.

Outro fator que influencia o desgaste das ferramentas é a presença de diferentes carbonetos na microestrutura do aço. O tamanho e do tipo de carboneto formado durante o tratamento criogênico submetido a tempo de encharque diferentes afetam significativamente a resistência ao desgaste do material da peça e, conseqüentemente pode causar diferentes taxas de desgaste na ferramenta de corte. Além disso, cita que o desgaste não é um fenômeno simples e pode ser influenciado pela combinação dos mecanismos básicos envolvidos em uma situação específica [3].

Os resultados de vida de ferramenta estão de acordo com o que foi postulado por König et al. [14], que também encontraram variações nas taxas de desgaste das ferramentas quando usinando sob as mesmas condições de corte, materiais com microestruturas diferentes e mesma dureza. Isto mostra que a dureza do material não é um parâmetro adequado para avaliar o desgaste da ferramenta. Entretanto, uma modificação do sistema tribológico (ferramenta de corte, peça e meio envolvente) durante o processo de usinagem devido ao tipo de microestrutura da peça pode afetar o desempenho da ferramenta pela combinação de complexos fenômenos químicos, físicos e mecânicos que ocorrem em altas temperaturas e pressões num pequeno volume da zona de cisalhamento primária e secundária.

No que se refere à rugosidade dos corpos de prova notou-se, para o aço submetido ao tratamento criogênico por 4 horas, uma maior influência do avanço no acabamento superficial. Esta ocorrência não foi observada na amostra tratada por 24 horas, no qual foram obtidos menores valores de rugosidade. Isto pode

estar relacionado à granulação mais fina e a alta dureza dos microconstituintes presentes no material e que são influenciados pelo tratamento criogênico. Esta condição está relacionada com o aumento na resistência mecânica, maior estabilidade dimensional e, possivelmente, uma maior tenacidade conforme citado pela literatura [3, 7, 15]. Acredita-se que o mecanismo de precipitação de carbonetos e o tamanho do grão obtido no tratamento criogênico por 24 h proporcione uma melhor combinação das propriedades mecânicas a serem obtidas.

Os resultados da análise topográfica se mostraram, em parte, conflitantes com os resultados de rugosidade bidimensional, já que aquela acusou melhores resultados de S_a e S_q para a amostra tratada por 4 horas. Stout [12] cita que, comparativamente, uma grande simetria negativa ($S_{sk} < -1$) indica que a superfície tem poucos picos pontiagudos sobre a superfície, o que dificulta o desgaste quando em contato com outra superfície e garante boas propriedades de deslizamento. Por outro lado, $S_{sk} > 1$ indica a presença de muitos picos sobre a superfície, que podem se desgastam rapidamente ao entrar em contato com outra superfície. Observa-se ainda que o parâmetro topográfico S_{ku} apresenta valores próximos a 3 para as duas condições de tratamento criogênico. Isto indica que a distribuição das alturas da superfície segue uma distribuição normal, simétrica e normalizada.

Por sua vez, os parâmetros funcionais S_{bi} e S_{ci} apontam, de um modo geral, para um melhor desempenho das amostras submetidas a criogenia por 24 horas, configurando melhores propriedades de rolamento e de retenção de fluido lubrificante.

5 CONCLUSÕES

De acordo com a análise dos resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser destacadas:

- O tratamento criogênico por 24 horas possibilitou uma microestrutura mais refinada e uma distribuição mais homogênea de carbonetos na estrutura martensítica, entretanto, não foram detectadas diferenças significativas entre os valores de microdureza das amostras tratadas criogenicamente por 4 e 24 horas;
- A vida da ferramenta foi afetada negativamente com o aumento da velocidade de corte e do avanço, resultando em uma maior taxa de desgaste da ferramenta. Porém, comparando-se os dois tempos de encharque pode-se, com ressalvas, concluir que o aço ABNT 52100 tratado em criogenia por 24 horas apresenta usinabilidade superior ao tratado por 4 horas em termos de vida da ferramenta;
- Para as ferramentas cerâmicas utilizadas nas condições deste trabalho, a velocidade de corte $v_c = 70$ m/min está mais próxima da indicada, pois nesta velocidade de corte as ferramentas são menos suscetíveis à fratura do que para velocidades maiores e são também mais resistentes ao desgaste. Conseqüentemente, têm vida mais longa;
- De maneira geral, a rugosidade total aumentou linearmente com o avanço e os menores valores de rugosidade foram observados na amostra tratada por 24 horas. Foi possível obter valor de rugosidade total R_t inferiores a $2 \mu\text{m}$ ($v_c = 90$ m/min, $f = 0,06$ mm/rot e $a_p = 0,5$ mm).
- Valores de S_{sk} próximos de zero foram observados para o material tratado por criogenia em 4 horas, em ambas condições. Este fato indica a presença de poucos picos pontiagudos e, conseqüentemente uma superfície mais resistente ao desgaste quando em contato com outras superfícies. Este fato não foi observado para o material tratado por criogenia em 24 horas.
- Os índices S_{bi} e S_{ci} indicam que o aço ABNT 52100 tratado por criogenia em 24h apresenta notáveis resultados para aplicações de deslizamento e retenção de filmes lubrificantes.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas TRATERMINAS Tratamento Térmico Ltda. e VALLOUREC & MANNESMANN TUBES do Brasil e pelo apoio à realização deste projeto.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] HUANG, J.Y., ZHU, Y.T., LIAO, X.Z., BEYERLEIN, I.J., BOURKE, M.A., MITCHELL, T.E., “Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel”, *Materials Science and Engineering*, v. A339, n.1, pp. 241-244, January 2003.
- [2] COLLINS, D.N., “Cryogenic treatment of tool steels”, *Advanced Materials and Processes*, pp. 23-29, December 1998.

- [3] BARRON, R.F., “Cryogenic treatment of metals to improve wear resistance”, *Cryogenics*, pp. 409-414, August 1982.
- [4] YUN, D., XIAOPING, L., HONGSHEN, X., “Deep cryogenic treatment of high-speed steel and its mechanism”, *Heat Treatment of Metals*, v. 2, pp. 55-59, March 1998.
- [5] SILVA, F.J., *Influência do tratamento criogênico no desempenho de ferramentas de aço-rápido*, Dissertação de M.Sc., Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 1999.
- [6] MOLINARI, A., PELLIZZARI, M., GIALANELLA, S., STRAFFELINI, G., STIASNY, K.H., “Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels”, *Journal of Materials Processing Technology*, v.118, n.1, pp. 350-355, December 2001.
- [7] COLLINS, D.N., “Deep cryogenic treatment of tool steels: a review”, *Heat Treatment of Metals*, v. 2, pp. 40-42, 1996.
- [8] JUSTE, P.S., ALMEIDA, J.N., ÂNTONIO DE PAULA, A., “Tratamento Sub-Zero em cilindros para laminação a frio”, In: *Anais do 41º Congresso sobre Laminação*, pp. 115-128, Vitória, ES, 1986.
- [9] MENG, F., AGASHIRA, K., AZUMA, R., SOHMA, H., “Role of eta-carbide precipitations in the wear resistance improvements of Fe-12Cr-Mo-V-1.4C tool steel by cryogenic treatment”, *ISIJ International*, v. 34, n. 2, pp. 205-210, 1994.
- [10] BARRON, R.F., “Cryogenic treatment produces cost savings for slitter knives”, *Tappi Journal*, v. 57, n.5, 2 p., May 1974.
- [11] COHEN, P., KAMODY, D., “Cryogenics goes deeper”, *Cutting tool Engineering*, v. 50, n. 7, pp. 46-50, 1998.
- [12] CHIAVERINI, V., *Aços e Ferros Fundidos*, 7 ed., São Paulo, ABM, 1996.
- [13] STOUT, K.J., *Development of methods for the characterization of roughness in three dimensions*, London, Penton Press, 1993.
- [14] KÖNIG, W., KOMANDURI, R., TÖNSHOFF, H.K., ACKERSHOTT, G., “Machining of hard materials”, *Annals of the CIRP*, v. 33, n. 2, pp. 417-427, 1984.
- [15] KAMODY, J.D., “Using deep cryogenics to advantage”, *Advanced Materials and Processes*, v. 10, pp. 215-218, 1998.