

USINAGEM CRIOGÊNICA NOS PROCESSOS DE TORNEAMENTO E FRESAMENTO E SUAS CARACTERÍSTICAS DE INTEGRIDADE SUPERFICIAL

Kaciê Karoline de Araújo Trindade, kacietrindade@gmail.com¹

Matheus Emmanuel Pereira Fernandes, matheus_pereir@hotmail.com¹

Welber Vasconcelos Leadebal Júnior, welber.vasconcelos@gmail.com¹

Anderson Clayton Alves de Melo, anderson@ufrnet.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Campus Universitário, CEP:59078-970, Natal/RN, Brasil,

Resumo: O interesse por processos de usinagem criogênica, principalmente assistidos por nitrogênio líquido (LN₂), vem crescendo a cada dia, não somente devido aos seus benefícios técnicos, mas também a questões relacionadas à sustentabilidade. Os componentes obtidos por usinagem criogênica são funcionalmente superiores no que diz respeito às características de integridade superficial, quando comparado a outros métodos convencionais de usinagem, como por exemplo a usinagem a seco. Este artigo apresenta uma revisão sobre a usinagem criogênica, expondo uma visão geral da influência da aplicação da técnica na integridade superficial (rugosidade superficial, microdureza e tensão residual) de peças torneadas e fresadas.

Palavras-chave: Usinagem criogênica, Torneamento, Fresamento, Integridade superficial.

1. INTRODUÇÃO

A criogenia pode ser definida como a ciência e a tecnologia voltada para a produção de ambientes com temperaturas extremamente baixas [1]. Existe ainda uma inconsistência entre as instituições de pesquisa e padronização referente ao ponto a partir do qual se considera temperatura criogênica, com este valor normalmente variando entre -150 e -180 °C. Assim, quaisquer temperaturas abaixo desses valores, seriam consideradas temperaturas criogênicas. Diante do crescente interesse pela usinagem criogênica, não somente devido a fatores técnicos, mas também a questões relativas à sustentabilidade, este artigo apresenta uma revisão sobre esta técnica, expondo resultados de pesquisas sobre como a usinagem criogênica pode influenciar na integridade de superfícies fresadas e torneadas. Neste caso, as variáveis analisadas foram: rugosidade superficial, microdureza e tensão residual.

O resfriamento desempenha um papel significativo no processo de usinagem de metal devido proporcionar uma melhor transferência de calor no processo e, conseqüentemente, reduzir o desgaste da ferramenta. A usinagem a seco de materiais endurecidos na engenharia está geralmente associada a altos custos de usinagem e baixa produtividade. Isto é devido à geração excessiva de calor na zona de corte e dificuldades na dissipação de calor devido a uma condutividade térmica relativamente baixa destes materiais [1-3]. Alta dureza e resistência do material juntamente com altas temperaturas na zona de corte podem resultar em desgaste excessivo da ferramenta e, portanto, vida útil da ferramenta e má qualidade da superfície.

Para solucionar esse problema, geralmente utiliza-se a técnica de adição de fluidos de corte, reconhecida desde o início do século XX, para melhorar a usinabilidade. No entanto, os riscos para o meio-ambiente e para a saúde do operador associados ao uso de fluidos de corte convencionais, juntamente com o desenvolvimento de regulamentações governamentais resultaram em custos de usinagem crescentes. Pesquisas anteriores mostraram que os custos relacionados aos fluidos de corte variaram de 7 a 17% dos custos totais de usinagem para as empresas [4].

Pensando no processo de fabricação sustentável, o nitrogênio líquido (LN₂) passou a ser comumente usado em criogenia. O primeiro uso de gases liquefeitos como refrigerante em operações de usinagem é relatado por Reitz [5] em 1919, onde o dióxido de carbono (CO₂) foi usado como refrigerante na usinagem. Durante a Segunda Guerra Mundial, cientistas descobriram que os metais congelados a baixas temperaturas apresentaram maior resistência ao desgaste. Isso levou ao desenvolvimento de endurecimento criogênico. Em 1966, o termo processamento criogênico foi introduzido pela primeira vez pela CryoTech Company (Detroit, MI, EUA), quando mostraram uma vida aumentada de 200-400%

em ferramentas de metal por criogenia. As diretrizes de aplicação de engenharia criogênica foram estabelecidas no início de 1976 [6], e mais recentemente pela ASHRAE [7].

2. METODOLOGIA

Esse trabalho foi elaborado a partir de uma revisão da literatura nas bases de dados Science Direct, Web of Science e na busca avançada disponível no Portal de Periódicos CAPES no período entre 2002 e 2017. As palavras-chave utilizadas foram “cryogenic”, “cryogenic machining”, “cryogenic milling” e “cryogenic turning”. Inicialmente, realizou-se uma leitura dos títulos dos artigos encontrados e uma breve leitura dos respectivos resumos. Foram critérios de exclusão: artigos que não apresentavam ensaios envolvendo torneamento, fresamento e/ou avaliavam a integridade superficial do material usinado. Diante disso, selecionou-se 40 artigos que atendessem tais critérios.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O objetivo deste estudo foi apresentar uma revisão, expondo resultados de pesquisas sobre como a usinagem criogênica pode influenciar na integridade de superfícies fresadas e torneadas. Nesse caso, as variáveis analisadas foram: rugosidade superficial, microdureza e tensão residual. Os artigos foram lidos e selecionados em cinco categorias: técnicas sustentáveis, usinagem criogênica, torneamento criogênico, fresamento criogênico e efeitos da refrigeração criogênica na integridade superficial

3.1. TÉCNICAS SUSTENTÁVEIS

Nos últimos anos, a utilização de princípios sustentáveis no desenvolvimento de produtos se tornou uma das áreas emergentes na manufatura, sendo um grande foco de pesquisa. A produção sustentável pode ser definida como "a criação de produtos que usam processos que minimizam impactos ambientais negativos, conservam energia e recursos naturais, são seguros para funcionários, comunidades e consumidores, sendo viável economicamente" [8].

O uso indiscriminado e abundante de fluidos de corte nos processos de fabricação está na contramão em relação às tendências atuais de sustentabilidade [9]. Sabe-se que estes fluidos lubrificam e melhoram a dissipação de calor durante o processo, reduzindo os mecanismos de desgaste térmicos e químicos, proporcionando uma melhor qualidade aos componentes usinados [10]. Porém, trabalhos recentes mostraram que a exposição aos fluidos de corte pode acarretar no desenvolvimento de doenças de pele e respiratórias [11-13]. Além disso, as rigorosas legislações ambientais estão fazendo com que os custos associados ao descarte dos fluidos de corte se tornem cada vez mais elevados. De acordo com Marksberry [14], o custo de armazenamento e descarte do fluido de corte é 2 vezes maior do que o custo total de usinagem, podendo representar cerca de 17% do custo total de uma peça de automóvel. Portanto, a utilização de técnicas de manufatura sustentável pode erradicar o uso destes fluidos, visando aumentar a eficiência do processo, reduzindo os custos, sem causar danos ao meio ambiente e ao operador.

A usinagem a seco, que é um processo realizado sem a presença de fluido, pode ser considerado um método mais sustentável em relação ao uso de refrigeração convencional, pois não causa poluição do ar ou da água. Além de facilitar a reciclagem dos cavacos [15,16]. Porém, a usinagem a seco apresenta alguns inconvenientes. O aumento da temperatura durante o corte a seco reduz significativamente a vida útil da ferramenta [17]. A adesão, difusão e a deformação plástica são mecanismos de desgaste termicamente ativados. Por outro lado, a abrasão, a fratura e o lascamento são processos de desgaste que também são intensificados com a diminuição da resistência ao desgaste da ferramenta em maiores temperaturas [18]. Uma ferramenta danificada ou desgastada também prejudica a integridade superficial dos componentes finais [19]. Assim, a busca por técnicas alternativas mais sustentáveis é necessária. Nesse sentido, a usinagem criogênica se apresenta com grande potencial de sustentabilidade quando comparada com outras técnicas consideradas convencionais.

3.2. USINAGEM CRIOGÊNICA

De acordo com Jawahir *et al.* [9], a criogenia pode ser definida como a ciência e a tecnologia voltada para a produção de ambientes com temperaturas extremamente baixas. Existe ainda uma inconsistência entre as instituições de pesquisa e padronização em relação ao início da consideração de temperaturas criogênicas, com este valor normalmente variando entre -150 e -180 °C.

Em operações de usinagem, a aplicação de gases liquefeitos como nitrogênio (-196 °C), dióxido de carbono (-78 °C) ou hidrogênio (-250 °C), usados durante o processo como refrigerantes alternativos para os fluidos convencionais, é denominada usinagem criogênica. Apesar das definições mostradas anteriormente, em operações de processamento de materiais, vários pesquisadores utilizam o termo criogenia para se referir a temperaturas abaixo de 0 °C, incluindo o dióxido de carbono líquido [9]. A aplicação do fluido criogênico pode ser feita na superfície de saída e/ou de folga da ferramenta, ou diretamente na peça [20]. A Figura 1 mostra a entrega do fluido criogênico durante o processo nas superfícies de saída/folga.

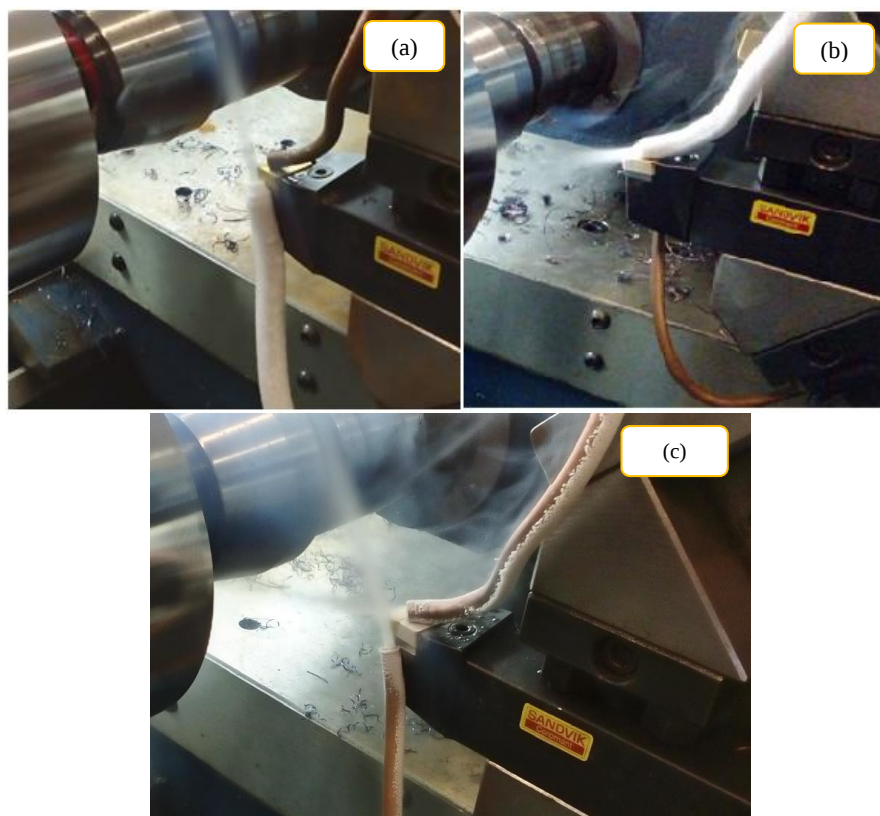


Figura 1: Aplicação de LN₂ na superfície de (a) saída, (b) de folga e (c) saída/folga.

O resfriamento criogênico está emergindo como uma abordagem promissora para aplicação na indústria e o nitrogênio líquido (LN₂) está sendo o refrigerante criogênico mais utilizado por ser um recurso não tóxico e de fácil obtenção, uma vez que é o gás mais abundante da atmosfera (cerca de 78% em volume) [21]. É mais leve que o ar e evapora após a aplicação, sendo uma tecnologia de usinagem que resulta em produtos secos e limpos, reduzindo os custos de pós-usinagem [20]. Além disso, de acordo com a literatura, a aplicação de LN₂ proporciona menores temperaturas durante a usinagem, mantendo a dureza e resistência ao desgaste da ferramenta em patamares superiores, resultando em maior produtividade e qualidade da superfície usinada [8, 20, 22].

Pusavec *et al.* [23] realizaram um estudo comparativo sobre as características sustentáveis da refrigeração criogênica, da refrigeração convencional a base de óleo mineral e da usinagem assistida por jato de alta pressão. Segundo os autores, a usinagem criogênica se mostrou o método mais limpo, além de possibilitar uma maior produtividade com menores ciclos de produção.

O principal inconveniente da usinagem criogênica (LN₂) está no alto investimento inicial com os equipamentos que compõem o sistema de entrega do fluido. Para garantir a manutenção do nitrogênio no estado líquido, os equipamentos exigem isolamento a vácuo, elevando os custos. Embora alguns fabricantes já estejam desenvolvendo máquinas-ferramentas com o sistema de refrigeração criogênica embutido.

3.3. TORNEAMENTO CRIOGÊNICO

Para verificar o efeito da refrigeração criogênica sobre a usinagem, diversos trabalhos estão sendo conduzidos, para vários processos de usinagem, principalmente no torneamento. Para a maioria, o uso de LN₂ proporcionou melhor desempenho do processo e qualidade superficial usinada superior.

Klocke *et al.* [24] investigaram o desgaste das ferramentas, a força de corte e a rugosidade da peça para o torneamento de alumineto de titânio a seco, criogênico e com MQL. Os resultados mostraram que o resfriamento criogênico possibilitou uma menor taxa de desgaste de flanco das ferramentas, menor rugosidade da superfície usinada, com perfis mais estáveis e sem a presença de fissuras e deterioração da superfície, quando comparado com as outras condições de lubri-refrigeração. Também foi mostrado um aumento da força de corte para a usinagem a seco, justificado pelos autores como sendo resultado do excessivo desgaste das ferramentas.

Ghosh *et al.* [25] investigaram os efeitos do fluido criogênico na usinagem de materiais endurecidos (aço ABNT 52100 e A2), com ferramentas de corte de cerâmica (alumina) e PCBN. A análise dos resultados mostrou que a refrigeração criogênica apresentou melhores resultados em relação à usinagem a seco, tanto em termos de desgaste da ferramenta, quanto na rugosidade da peça. Segundo os autores, este desempenho aprimorado é atribuído devido à remoção de calor mais eficiente para a condição criogênica, com consequente redução do amolecimento térmico das ferramentas.

Rotella *et al.* [26] realizaram experimentos de torneamento da liga *Ti-6Al-4V* a fim de investigar o efeito de diferentes condições de refrigeração (seco, convencional e criogênica) sobre o acabamento superficial. Para diversos parâmetros de corte, o resfriamento criogênico proporcionou os menores valores de R_a em relação às outras condições, como mostrado na Figura 2.

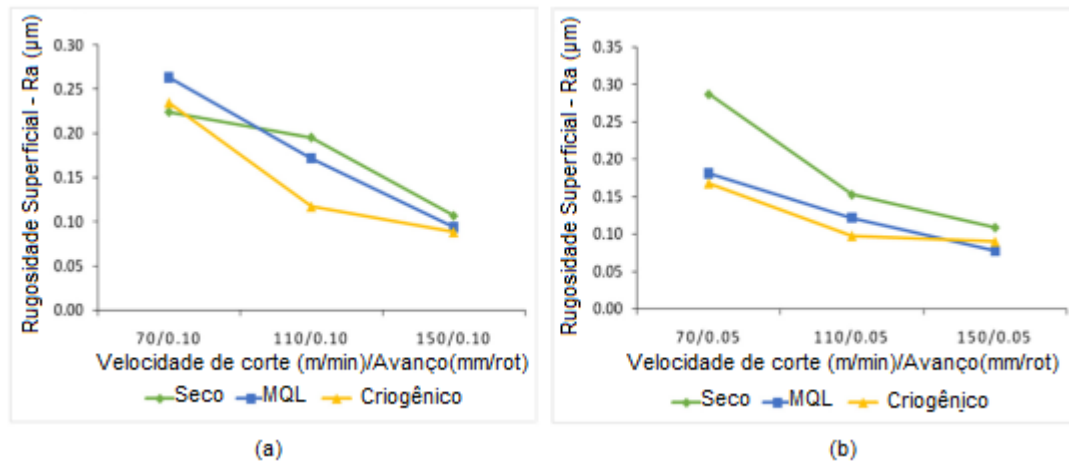


Figura 2: Rugosidade superficial para diferentes condições de refrigeração (seco, convencional e criogênica) para vários parâmetros de corte [26].

Pereira *et al.* [40] usaram resfriamento criogênico combinado a técnica MQL e compararam com resfriamento à seco no processo de torneamento do aço AISI 304. Os resultados mostram que a combinação de criogenia e MQL melhoraram a vida útil da ferramenta (mais de 50%) e tornando possível o aumento a velocidade de corte (mais de 30%) em comparação com a usinagem a seco. Além disso, a força de usinagem e a integridade da superfície foram mantidas ou melhoradas em comparação com as técnicas convencionais.

3.4. FRESAMENTO CRIOGÊNICO

O fresamento de materiais com baixo índice de usinabilidade gera excessivo calor durante o processo de formação do cavaco, que provoca o aumento da temperatura da ferramenta e acelera a taxa de desgaste dela. Aplicar fluido de corte convencional no processo de fresamento desses materiais pode não controlar efetivamente a geração de calor como também gerar problemas à saúde e ao meio ambiente. Uma alternativa para minimizar os riscos para a saúde e os problemas ambientais causados pelo uso de fluidos de corte convencionais, é utilizar o resfriamento criogênico [38, 39]. A Figura 3 ilustra um modelo de conjunto experimental utilizado para injetar LN_2 sobre o corpo de prova durante o processo de fresamento.

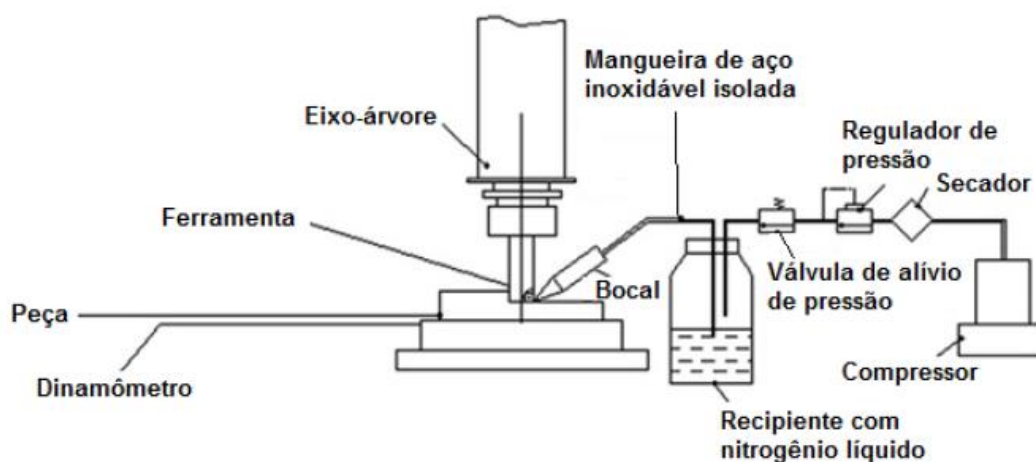


Figura 3. Conjunto experimental para o fresamento criogênico [20].

Para injetar o fluido refrigerante diretamente na zona de corte, fresas com canais de resfriamento internos podem ser utilizadas. A utilização de ferramentas com canais de lubrificação internos é um meio eficaz para promover as funções de resfriamento e lubrificação da peça [17]. Zhang *et al.* (2016) [27] analisou a influência de três tipos de ferramentas com refrigeração interna (com um canal reto, dois canais retos e dois canais helicoidais) utilizando

quantidade mínima de lubrificação criogênica (CMQL) na força de usinagem e no desgaste das ferramentas durante o fresamento lateral do aço H13. A técnica de quantidade mínima de lubrificação criogênica (CMQL) combina as vantagens do ar à baixas temperaturas e da técnica de mínima quantidade de lubrificação (MQL), contribuindo para a melhora dos desempenhos de resfriamento e lubrificação durante a usinagem [28]. Os resultados do trabalho de Zhang *et al.* [27] mostraram que a fresa com canal duplo reto (DSC) obteve o melhor desempenho na extensão da vida útil da ferramenta (a vida foi 1,59 vezes maior do que a da fresa com canal duplo helicoidal DHC) e na redução das componentes da força de usinagem.

Embora se tenha o conhecimento da utilização de variados fluidos na criogenia, o LN₂ é o refrigerante criogênico mais utilizado [21]. Diante disso, Ravi e Kumar [29] objetivaram investigar, de forma experimental, a influência de três condições de usinagem – resfriamento à seco, utilizando fluido de corte e utilizando LN₂ – na temperatura de corte, desgaste da ferramenta, rugosidade e força de usinagem, para fresamento de topo do aço ferramenta AISI H13 endurecido sob diferentes velocidades de corte e avanço constante. Os resultados mostraram que a usinagem com LN₂ reduz a temperatura de usinagem aproximadamente 58% e 40%, diminui o desgaste de flanco da ferramenta em 32% e 11%, reduz a rugosidade em 36% e 27% e a força de usinagem em 20% e 10%, em comparação com a usinagem à seco e utilizando fluido de corte, respectivamente. Além disso, o resfriamento criogênico também pode aumentar os limites de estabilidade na fresamento de topo. Huang *et al.* [30] avaliaram a influência do resfriamento criogênico com LN₂ no limite de estabilidade da operação de fresamento em liga de alumínio 7075-T6, na força de usinagem e nas características dinâmicas do sistema ferramenta-corpo de prova. Os autores observaram que para a maioria dos casos estudados, os limites de estabilidade podem ser melhorados em 50-100% ao aplicar jato LN₂ na zona de corte na direção de retirada do cavaco e as componentes da força de usinagem podem ser significativamente reduzidas, sendo esta a principal razão para o aprimoramento do limite de estabilidade.

3.5. EFEITOS DA REFRIGERAÇÃO CRIOGÊNICA NA INTEGRIDADE SUPERFICIAL

O desempenho funcional de um componente usinado é fortemente influenciado pelas características das superfícies produzidas. Com isso, o desenvolvimento de novos métodos que visem aprimorar, durante o processo, as características da integridade superficial das peças usinadas vem se tornando o foco de vários trabalhos. Inerentemente, um processo de usinagem gera uma elevada temperatura durante o processo e a usinagem criogênica é um método utilizado para controlar esta temperatura. A redução da temperatura de corte pode alterar substancialmente as características da integridade superficial, sendo essencial compreender este efeito.

3.5.1. Rugosidade superficial

Rugosidade e topografia superficial são características de extrema importância para a integridade superficial. Estes parâmetros são importantes para satisfazer a qualidade dimensional de peças usinadas [20]. O efeito do fator refrigeração criogênica na rugosidade e topografia superficial precisa ser melhor compreendido.

Kaynak *et al.* [31] investigaram as consequências na rugosidade para a usinagem de ligas com memória de forma de NiTi com diferentes condições de refrigeração (seco e criogênica). Os autores relataram que o resfriamento criogênico reduziu a rugosidade, prevenindo degradações mecânicas na superfície usinada, em comparação com a outra condição (Figura 4).

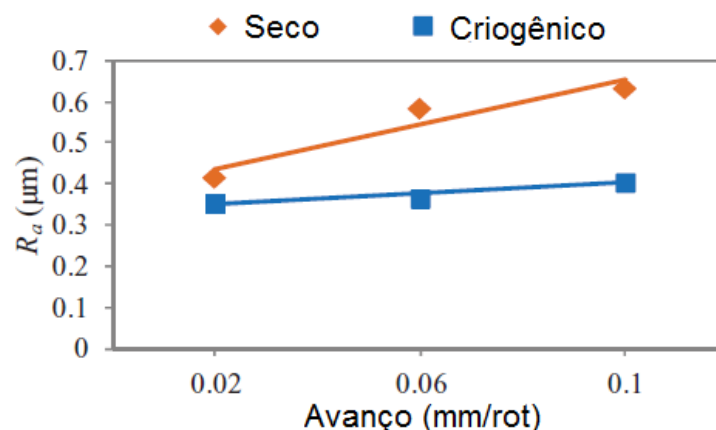


Figura 4: Rugosidade superficial (R_a) com diferentes avanços para a condição a seco e criogênica [31].

Kaynak *et al.* [32] usinaram o aço inoxidável 316L a seco, com refrigeração convencional, criogênica e MQL, e analisaram a rugosidade e topografia superficial de cada condição. Em todos os experimentos foram utilizados insertos de metal duro não revestidos, com raio de ponta de 0,8 mm. A refrigeração criogênica proporcionou a melhor qualidade superficial, reduzindo a rugosidade, propiciando uma topografia superficial mais suave em comparação com as outras condições, como mostrado na Figura 5.

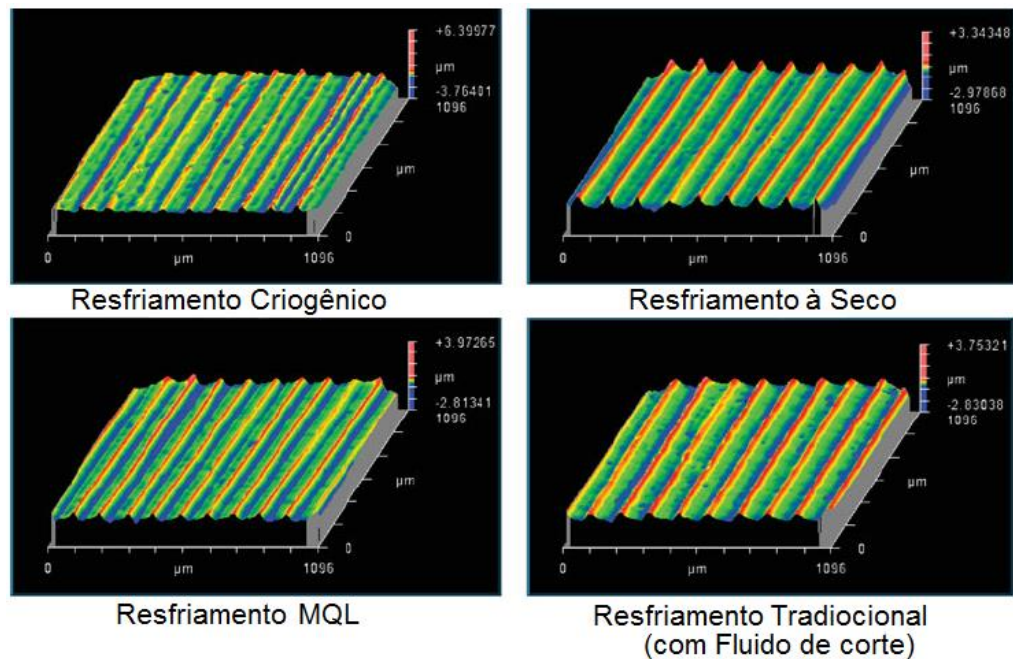


Figura 5: Topografia superficial do aço inoxidável 316L usinado com diferentes condições de refrigeração [32].

Em geral, o resfriamento criogênico, utilizado em vários processos de usinagem (torneamento, fresamento, furação e retificação), contribui para a melhora da qualidade das superfícies em comparação a outros métodos de lubri-refrigeração [20]. Esta melhoria pode ser atribuída aos seguintes pontos:

- A usinagem criogênica reduz o desgaste da ferramenta em comparação com a usinagem a seco e outros métodos de refrigeração;
- Previne e/ou reduz a ocorrência da formação de aresta postiça de corte na usinagem.

3.5.2. Microdureza

De acordo com Quran e Ye [33], durante o processo de usinagem, o material em torno da aresta de corte é plasticamente deformado. Devido ao encruamento desta camada deformada, a dureza na superfície se torna maior do que na região interna. O efeito deste encruamento só pode ser mantido estável sob uma determinada temperatura. Se durante ou após a deformação plástica a temperatura subir muito, o efeito do encruamento é enfraquecido. Uma deformação plástica mais severa em menores temperaturas resulta no aumento do encruamento.

Pu *et al.* [34] compararam o perfil de dureza de ligas de Mg AZ31 usinadas a seco, com refrigeração criogênica e com o material como recebido. Os autores relataram que os valores de dureza junto à superfície dos três perfis aumentaram em taxas diferentes. A usinagem criogênica proporcionou a maior dureza superficial em relação às outras condições, como mostrado na Figura 6.

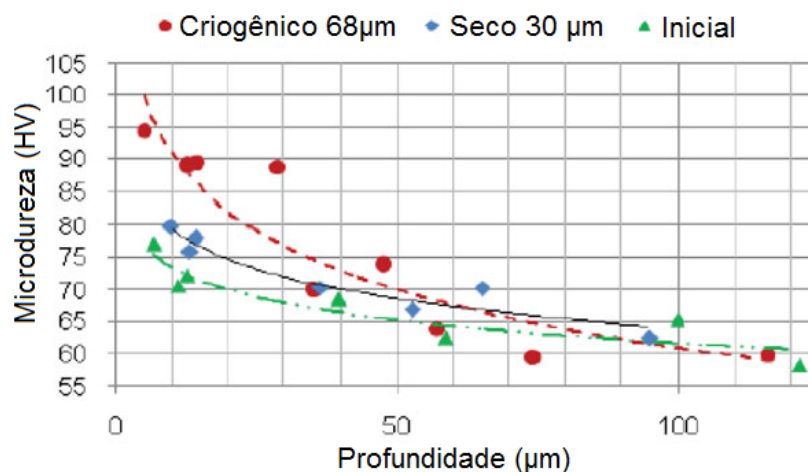


Figura 6: Perfil de microdureza de ligas de Mg usinadas com diferentes condições de refrigeração e como recebida [34].

Kaynak *et al.* [31] também relataram resultados semelhantes em relação a dureza superficial para as mesmas condições de refrigeração, na usinagem de ligas com memória de forma de NiTi.

Em geral, a usinagem criogênica normalmente aumenta a dureza superficial e subsuperficial pelas seguintes razões:

- Devido à baixa temperatura, a usinagem criogênica eleva o efeito do encruamento na superfície e subsuperfície de peças usinadas;
- Caso ocorra recristalização, a refrigeração criogênica propicia um grão menor (maior refinamento de grão), aumentando a dureza da superfície e subsuperfície;
- Em alguns casos, a redução da temperatura resulta em deformação por macla, levando à formação de alta densidade de maclas e aumenta a dureza.

3.5.3. Tensões residuais

Um dos mecanismos de geração de tensão residual é a deformação mecânica. Durante a deformação, quando o efeito térmico é limitado, predominando um domínio do efeito mecânico, resulta-se em tensões residuais de compressão na superfície e subsuperfície dos componentes usinados. Com isso, reduzir a temperatura ajuda a gerar a tensões residuais desejadas [35].

Bicek *et al.* [36] relataram que a usinagem criogênica reduz drasticamente as tensões térmicas induzidas em comparação com a usinagem a seco e, com isso, proporciona tensões de compressão mais elevadas na superfície e subsuperfície, para o aço ABNT 52100, como mostrado na Figura 7.

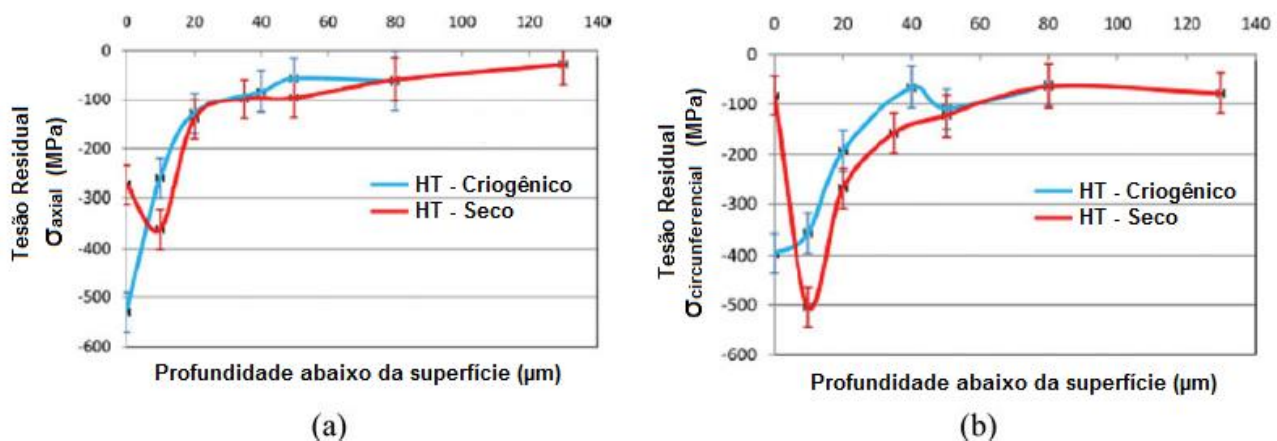


Figura 7: Tensão residual na direção (a) axial e (b) circunferencial de amostras do aço ABNT 52100 [35].

Resultados semelhantes foram relatados por Qin *et al.* [37]. Os autores investigaram o efeito de várias condições de lubri-refrigeração sobre o estado de tensão residual de ligas de aço AISI 1045. A comparação usinagem criogênica propiciou uma tensão residual de compressão mais elevada na superfície e subsuperfície entre todas as condições. Foi demonstrado que a usinagem criogênica minimiza o efeito térmico e maximiza o efeito mecânico.

4. CONCLUSÃO

Uma visão geral das características de integridade da superfície induzida pelo torneamento criogênica e a comparação com o MQL e a seco, foram apresentados neste texto de revisão. De acordo com os trabalhos analisados, a usinagem criogênica, em comparação com os outros meios de refrigeração, contribui significativamente para as características de integridade da superfície dos componentes usinados, melhorando a qualidade superficial da peça, aumentando a dureza na superfície e na subsuperfície, gerando tensão residual compressiva e, portanto, aumentando a vida de fadiga dos componentes.

Quanto ao fresamento criogênico, pode-se concluir que a refrigeração criogênica contribui para a redução da temperatura de usinagem, do desgaste da ferramenta, da rugosidade da peça usinada e da força de usinagem. Além disso, o resfriamento criogênico também pode aumentar os limites de estabilidade no fresamento de topo em virtude da diminuição das componentes da força de usinagem.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica (PPGEM) da UFRN, ao Laboratório de Manufatura (LABMAN) e à Capes pelo suporte financeiro ao projeto.

6. REFERÊNCIAS

- [1] D. Ulutan, T. Ozel, Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: a review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51 (2011) 250–280.
- [2] A. Choragudi, M.A. Kuttolamadom, J.J. Jones, M.L. Mears, T. Kurfess, Investigation of the machining of titanium components in lightweight vehicles, *SAE International Congress* (2010).
- [3] Y. Song, C.-H. Park, T. Moriwaki, Mirror finishing of Co–Cr–Mo alloy using elliptical vibration cutting, *Precision Engineering* 34 (2010) 784–789.
- [4] Weinert K, Inasaki I, Sutherland JW, Wakabayashi T (2004) Dry machining and minimum quantity lubrication. *CIRP Ann* 53(2): 511–537
- [5] Reitz G (1919) Die Gro ße des geistlichen und ritterschaftlichen Grundbesitzes im ehemaligen Kur-Trier, Doc.
- [6] Doody RD (1967) Cold Cylinder Assembly for Cryogenic Refrigerator, US Patent 3,969,907.
- [7] ASHRAE Handbook Fundamentals (2010).
- [8] Jayal, A.D., Badurdeen, F., Dillon Jr., O.W., Jawahir, I.S., 2010. Sustainable manufacturing: modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 2, 144–152.
- [9] Jawahir, I.S., Attia, H., Biermann, D., Duflou, F., Klocke, F., Meyer, D., Newman, S.T., Pusavec, F., Putz, M., Rech, J., Schulze, V., Umbrello, D., 2016. Cryogenic manufacturing processes. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 65, 713–736.
- [10] Chetan, Ghosh, S., Rao, P.V., 2015. Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review. *Journal of Cleaner Production* 100, 17–34.
- [11] Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S.T., 2012. Environmentally Conscious Machining of Difficult-to-machine Materials with Regard to Cutting Fluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 57, 83–101.
- [12] Lawal, S.A., Choudhury, I.A., Nukman, Y., 2012. Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals: A review. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 52, 1–12.
- [13] Hannu, T., Suuronen, K., Aalto-Korte, K., Alanko, K., Luukkonen, R., Järvelä, M., Jolanki, R., Jaakkola, M., 2013. Occupational respiratory and skin diseases among Finnish machinists: findings of a large clinical study. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 86, 189–197.
- [14] Marksberry, P.W., 2007. Micro-flood (MF) technology for sustainable manufacturing operations that are coolant less and occupationally friendly. *J. Clean. Prod.* 15, 958–971.
- [15] Dixit, U.S., Sarma, D.K., Davim, J.P., 2012. *Environmentally Friendly Machining*, First ed. Springer, New York, USA.
- [16] Schultheiss, F., Zhou, J., Grøntoft, E., Ståhl, J.-E., 2013. Sustainable machining through increasing the cutting tool utilization. *J. Clean. Prod.* 59, 298–307.
- [17] Zhao, H., Barber, G.C., Zou, Q., 2002. A study of flank wear in orthogonal cutting with internal cooling. *Wear* 253, 957–962.
- [18] Sharma, V.S., Dogra, M., Suri, N.M., 2009. Cooling techniques for improved productivity in turning. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 49, 435–453.
- [19] Sharma, J., Sidhu, B.S., 2014. Investigation of effects of dry and near dry machining on AISI D2 steel using vegetable oil. *J. Clean. Prod.* 66, 619–623.
- [20] Kaynak Y, Lu T, Jawahir IS, 2014. Cryogenic Machining-Induced Surface Integrity: A Review and Comparison with Dry, MQL, and Flood-Cooled Machining. *Machining Science and Technology* 18(2):149–198.
- [21] Yildiz, Y., Nalbant, M., 2008. A review of cryogenic cooling in machining processes. *Int. J. Mach. Tool Manuf.* 48, 947–964.
- [22] Rotella G, Umbrello D, Dillon Jr OW, Jawahir IS, 2012. Evaluation of Process Performance for Sustainable Hard Machining. *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing* 6(6):989–998.
- [23] Pusavec, F., Kramar, D., Krajnik, P., Kopac, J., 2010. Transitioning to sustainable production e part II: evaluation of sustainable machining technologies. *J. Clean. Prod.* 18, 1211–1221.
- [24] Klocke F, Settineri L, Lung D, Priarone PC, Arft M, 2013. High Performance Cutting of Gamma Titanium Aluminides: Influence of Lubricoolant Strategy on Tool Wear and Surface Integrity. *Wear* 302:1136–1144.
- [25] Ghosh R, Zurecki Z, Frey HJ (2003) Cryogenic Machining with Brittle Tools and Effects on Tool Life. *Proc. of ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Washington, DC* Paper No. IMECE2003-42232.
- [26] Rotella, G., Dillon Jr., O.W., Umbrello, D., Settineri, L., Jawahir, I.S., 2014. The effects of cooling conditions on surface integrity in machining of Ti6Al4V alloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 71, 47–55.
- [27] Zhang C, Zhang S, Yan X, Zhang Q (2016) Effects of internal cooling channel structures on cutting forces and tool life in side milling of H13 steel under cryogenic minimum quantity lubrication condition. *Int J Adv Manuf Technol* 83:975-984
- [28] Zhang S, Li JF, Wang YW (2012) Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions. *J Clean Prod* 32:81-87.
- [29] Ravi S, Kumar MP (2011) Experimental investigations on cryogenic cooling by liquid nitrogen in the end milling of hardened steel. *Cryogenics* 51:509-515.

- [30] Huang X, Zhang X, Mou H, Zhan X, Ding H (2014) The influence of cryogenic cooling on milling. *Journal of materials processing technology* 214:3169-3178.
- [31] Kaynak, Y.; Karaca, H.; Jawahir, I.S., 2011. Cryogenic machining of NiTi shape memory alloy. 6th Int. Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds, 23–26 June, Ankara, Turkey, 123–128.
- [32] Kaynak, Y.; Karaca, H.E.; Noebe, R.D.; Jawahir, I.S., 2013. Analysis of tool-wear and cutting force components in dry, preheated and cryogenic machining of NiTi Shape Memory Alloys. *Procedia CIRP*. 8, 497–502.
- [33] Quan, Y.; Ye, B., 2003. The effect of machining on the surface properties of SiC/Al composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 138, 464–467.
- [34] Pu, Z.; Dillon Jr, O.W.; Puleo, D.A.; Jawahir, I.S., 2010. Microstructural changes of AZ31 magnesium alloys induced by cryogenic machining and its influence on corrosion resistance in simulated body fluid for biomedical applications, *Proceedings of the International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 12–15 October, Pennsylvania, USA, 271–277.
- [35] Shokrani, Alborz; Dhokia, Vimal; Newman, Stephen T., 2016. Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Journal of Manufacturin Processes*. 21, 172-179.
- [36] Bicek, M., Doumont, F., Courbon, C., Pusavec, F., Rech, J., Kopac, J., 2012. Cryogenic machining as an alternative turning process of normalized and hardened AISI 52100 bearing steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 212, 2609–2618.
- [37] Qin, M.Y.; Ye, B.Y.; Wu, B., 2012. Investigation into influence of cutting fluid and liquid nitrogen on machined surface residual stress. *Advanced Materials Research*, 566, 7–10.
- [38] Imran Masood; Mirza Jahanzaib; Ahmad Wasim. 2017. Sustainability Assessment for Dry, Conventional and Cryogenic Machining in Face Milling of Ti-6Al-4V. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*. 36(2), 309-320.
- [39] Sadik, M. Ibrahim; Isakson, Simon. 2017. The role of PVD coating and coolant nature in wear development and tool performance in cryogenic and wet milling of Ti-6Al-4V. *Wear*. 386-387, 204-210.
- [40] Pereira, O.; Rodríguez, A.; Fernández-Abia, A.I.; Barreiro, J.; López de Lacalle, L.N. 2016. Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304. *Journal of Cleaner Production*. 139, 440-449.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

CRYOGENIC MACHINING IN TURNING AND MILLING PROCESSES AND ITS SURFACE INTEGRITY CHARACTERISTICS

Kaciê Karoline de Araújo Trindade, kacietrindade@gmail.com¹
Matheus Emmanuel Pereira Fernandes, matheus_pereir@hotmail.com¹
Welber Vasconcelos Leadebal Júnior, welber.vasconcelos@gmail.com¹
Anderson Clayton Alves de Melo, anderson@ufrnet.br¹

¹Mechanical Engineering Department, Federal University of Rio Grande do Norte, University Campus, Zip code: 59078-970, Natal/RN, Brazil,

Abstract. *The interest in cryogenic machining processes, mainly assisted by liquid nitrogen (LN2), is growing every day, not only due to its technical benefits, but also to issues related to sustainability. The components obtained by cryogenic machining are functionally superior with respect to the surface integrity characteristics when compared to other conventional machining methods, such as dry machining. This article presents a review on cryogenic machining, presenting an overview of the influence of the application of the technique on the surface integrity (surface roughness, microhardness and residual stress) of turned and milled parts.*

Keywords: *Cryogenic machining, Turning, Milling, Surface integrity.*