MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS NO AÇO SAE 4340 ENDURECIDO PELO MÉTODO DO FURO CEGO

Jônatas Juliano Verwiebe [1], jonatas.verwiebe@gmail.com
Clarianne Natali de Campos [1], clarianne.campos@gmail.com
Rodrigo Blödorn [2], rodrigo.blodorn@unifebe.edu.br
Rolf Bertrand Schroeter [1], rolf.schroeter@ufsc.br

1 Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. R. Eng. Agron. Andrei Ferreira, s/n - Trindade, Florianópolis - SC, 88040-900
2 Centro Universitário da Fundação Educacional de Brusque - UNIFEBE. Rua Dorval Luz, 123 - Santa Terezinha, Brusque - SC, 88352-400

Resumo. *Nos últimos anos, o mercado de veículos elétricos tem experimentado um crescimento acelerado. Dentro desse contexto, os sistemas de transmissão de potência enfrentam, em média, um nível de exigência seis vezes maior do que o dos veículos movidos a combustão. Para assegurar a durabilidade desses sistemas, há uma busca constante por materiais com maior resistência à fadiga e melhores condições de usinagem. Além disso, a medição de tensões residuais surge como uma excelente alternativa para investigar a durabilidade de materiais com alta dureza e resistência à fadiga. Para execução das medições de tensões residuais, utilizou-se discos do material SAE 4340 endurecido nas condições mecânicas e térmicas, sendo que o método de usinagem do furo cego utilizado foi o fresamento orbital com os parâmetros de rotação de 8 000 rpm, com velocidade de avanço da mesa em 120 mm/min em um centro de usinagem Romi D600, sendo que para a usinagem utilizou-se fresas de topo reto de 1 mm de diâmetro, fabricadas em metal-duro revestidas com AlTiSiN. Os resultados mostram que os materiais quando sob condições mecânicas, apresentam tensões residuais de compressão com maiores intensidades, fazendo com que sejam preferíveis pelo fato de as tensões de compressão são menos suscetíveis a propagarem trincas e terem melhor performance sob fadiga. Em cenário oposto, as condições térmicas se mostram com maior tendência de trazerem tensões residuais de tração em maior intensidade.*

Palavras chave*: método do furo cego, tensões residuais, aço endurecido.*

1. INTRODUÇÃO

A empregabilidade de aços endurecidos na indústria desponta como uma saída para problemas complexos, podendo oferecer grande resistência a fadiga, que se apresenta como um grande desafio em setores industriais, como é o caso do ramo automotivo, onde os veículos elétricos chegaram com desafios de fabricação que ainda não haviam sido postos à prova.

A crescente necessidade por fabricação de componentes e estruturas mecânicas com menores custos e peso está diretamente ligada às pesquisas de novos métodos e materiais que vêm auxiliando neste processo. Porém, com estruturas cada vez mais leves e ainda sustentando grandes esforços, é de suma importância que se tenha corretas frequências de verificação das tensões residuais, pois por vezes fazem o uso de materiais de baixa resistência mecânica e alívios de massa em sua estrutura.

Os componentes mecânicos, independentemente de tamanho ou forma, estão sujeitos a sofrerem tensões residuais devido a possíveis cargas externas ou em função de descontinuidades da rede cristalina do material, por exemplo. O resultado de um demasiado acúmulo destes carregamentos em metais pode acarretar rupturas e possíveis danos em estruturas metálicas.

Estas tensões podem ter sua origem no processo de fabricação, na montagem ou em outras fontes. Assim, quando surgem as solicitações de trabalho, somam-se as tensões residuais presentes no material. Normalmente, preferem-se tensões compressivas a tensões trativas, visto que as tensões de tração são mais propícias à propagação de trincas, e as compressivas oferecem melhor resistência a fadiga (Schajer e Whitehead, 2018).

Schajer (2013) apresenta em seu trabalho, conforme Fig. (1), os principais exemplos encontrados na área de engenharia referente às formações de tensões residuais de acordo com suas principais aplicações.

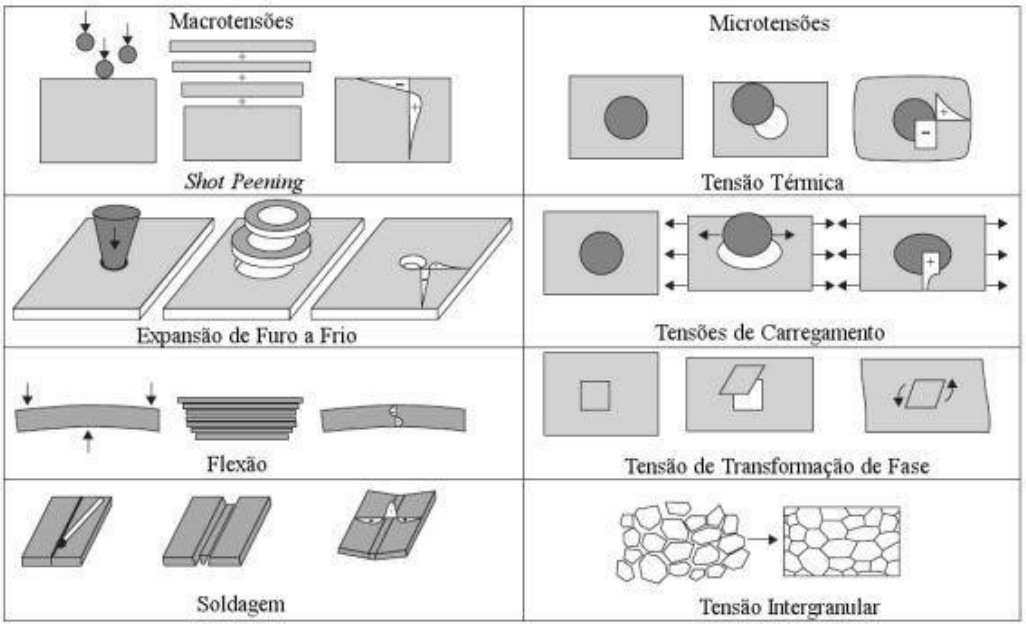


Figura 1. Origem das tensões residuais (Schajer, 2013).

Dentre as variações das tensões residuais existentes, destacam-se as condições mecânicas e térmicas. Para Verwiebe 2024), as tensões mecânicas estão relacionadas às forças aplicadas durante o processo de corte, especialmente quando se busca maior produtividade por meio do aumento da taxa de avanço e da redução da velocidade de corte. Nesse cenário, os grãos do material sofrem deformações plásticas devido ao deslizamento dentro dos cristais, o que pode endurecer a superfície e gerar novas microestruturas após intensa deformação. Esse processo pode resultar na recristalização, formando grãos equiaxiais e alterando significativamente a resistência e a integridade do material.

Já as tensões térmicas estão ligadas ao aumento da velocidade de corte, que gera altas temperaturas na região de usinagem. Quando a temperatura atinge níveis elevados, ocorrem transformações de fase, como a formação da chamada camada branca, que altera as propriedades do material. Essas tensões térmicas podem comprometer a qualidade superficial e a vida da ferramenta, ao mesmo tempo em que afetam a microestrutura do material trabalhado.

Neste contexto, um método de medição de tensões residuais confiável, de fácil operação e execução, bem como de baixo custo torna-se indispensável para aplicação industrial como, por exemplo, no setor de transporte de petróleo, gás e derivados (Blödorn, 2018).

Ainda segundo Blödorn (2018), um método capaz de mensurar esse estado de tensões, empregado em larga escala mundialmente e que possui alta confiabilidade é o Método do Furo Cego (MFC). Este método consiste em usinar um furo passante, ou não, na superfície do material em que se busca conhecer o estado de tensões. Após isso, deve-se medir a deformação na superfície adjacente ao furo usinado, fazendo o uso de extensômetros (*strain gauges*), buscando-se obter o resultado das tensões perpendiculares à nova camada de material criada com a usinagem do furo.

A técnica de medição de tensão residual chamada Fresamento Incremental Orbital (FIO), desenvolvida por Blödorn (2018), é uma abordagem moderna do MFC. Nesse método, um furo cego é usinado em etapas incrementais, aumentando simultaneamente o diâmetro e a profundidade do furo. Essa abordagem oferece diversos benefícios ao processo, incluindo a redução dos danos ao corpo de prova, já que a técnica utiliza menores taxas de temperatura durante a usinagem, facilitando a remoção do cavaco da área usinada.

Para Verwiebe (2024) e Schajer e Whitehead (2018), o processo envolve a criação de um pequeno furo cego na superfície do material. A remoção desse volume provoca uma redistribuição das tensões ao redor do furo, o que resulta em deformações na superfície adjacente. Com essas deformações, é possível medir a tensão residual presente no material utilizando extensômetros ou métodos ópticos.

Dado este contexto, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo de medição de tensões residuais no aço SAE 4340, em condições mecânicas e térmicas, pelo método do furo cego. Para isso, serão usadas fresas de topo reto com 1 mm de diâmetro, em um centro de usinagem Romi D600.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foi estudado o uso do Método do Furo Cego para medição de tensões residuais em materiais endurecidos. Nestes estudos, analisou-se o material SAE 4340, sendo que foram realizados os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento para o material SAE 4340. Sendo assim, os corpos de prova apresentaram-se com dureza próxima de 60 HRC.

Aliado à elevada resistência mecânica e tenacidade, o aço SAE 4340 apresenta também características de elevada temperabilidade e resistência à fadiga. Suas aplicações são amplas nas indústrias automotivas, aeronáuticas e marítima, em severas condições de trabalho.

O material possui formato de disco, com 125 mm de diâmetro externo e furo central com 25 mm de diâmetro. A espessura do disco é de 16 mm. Os pontos de medições são chamados de 1, 2 e 3, sendo que a posição 1 é a mais próxima da borda interna, a posição 2 se apresenta no centro do conjunto e a posição 3 sendo a mais próxima da borda externa. As medições realizadas nos pontos 1 e 3 foram posicionadas a 10 mm de distância das bordas internas e externas, respectivamente, além disto, as medições realizadas na posição 2 possui distância de 15 mm para os demais pontos. As posições destes furos podem ser observadas na Fig. (2).

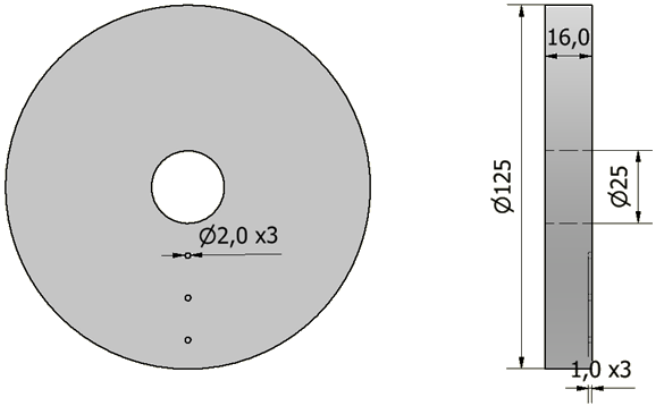


Figura 2. Geometria do corpo de prova e posicionamento dos furos (Os autores).

Anteriormente ao processo de análise de tensões residuais e após o tratamento térmico de têmpera e revenimento, os corpos de prova foram torneados radialmente com ferramenta de cerâmica, com 0,1 mm de desgaste de flanco (VBB). Os parâmetros empregados neste processo de torneamento estão apresentados na Tab. (1). A escolha dos parâmetros apresentados a seguir se deu através de ensaios preliminares, avaliando a integridade das ferramentas em diferentes condições.

Tabela 1. Parâmetros de usinagem do processo de torneamento.

Condições		
Parâmetros	Mecânica	Térmica
Velocidade de corte (V_c)	60 m/min	550 m/min
Avanço (*f*)	0,3 mm/rev	0,08 mm/rev
Profundidade de corte (a_p)	0,5 mm	0,3 mm

Para a execução dos experimentos foram utilizadas fresas de topo reto de metal-duro à base de W-Co revestidas por AlTiSiN, com quatro gumes de corte, diâmetro de 1,00 mm e comprimento de 50 mm. Estas, por sua vez, foram caracterizadas geometricamente, com o intuito de dimensionar suas grandezas como: raio de gume, ângulo de incidência, ângulo de saída e ângulo de cunha. Além disto, ao final dos ensaios, as ferramentas foram novamente analisadas para entender os mecanismos de desgaste presente no processo.

Esta caracterização geométrica foi realizada com o auxílio de um microscópio de variação de foco ALICONA® Infinite Focus G5, conforme Fig. (3). Este equipamento está disponível no Centro Universitário de Brusque – UNIFEBE e está localizado no NTIF (Núcleo de Tecnologia e Inovação em Fabricação).



Figura 4. Microscópio de variação de foco ALICONA®, utilizado nas caracterizações geométricas.

Os ensaios de tensão residual pelo Método do Furo Cego foram realizados com o auxílio de um Centro de Usinagem Vertical ROMI D600 para a execução do furo cego por fresamento orbital, disponível no NTIF do Centro Universitário de Brusque – UNIFEBE. O Centro de Usinagem dispõe de uma potência do motor principal de 15 kW, rotação máxima do eixo-árvore de 10 000 rpm, mesa com dimensões de 840 mm x 500 mm, torre porta-ferramenta com 12 posições e comando numérico Siemens. A fixação dos corpos de prova na máquina-ferramenta se deu pelo furo central dos discos, com um parafuso sendo usado para fixar a peça em um gabarito fabricado através de uma base de aço, onde foi usinado um rebaixo com as dimensões externas do corpo de prova, para além do parafuso central, a peça ser fixada pela própria geometria da base.

Os parâmetros de usinagem, que proporcionaram os melhores resultados, foram definidos como: velocidade de rotação da ferramenta de 8.000 rpm, velocidade de avanço da mesa de 120 mm/min e sentido de corte concordante. Esses dados foram desenvolvidos preliminarmente pelos autores deste projeto, como parte da pesquisa.

O fresamento orbital empregado durante os ensaios realizou a usinagem de furos cegos incrementais, onde o diâmetro do furo iniciou com diâmetro de 1,00 mm e profundidade de 0,05 mm. Aumentando orbitalmente, o processo de furação terminou com diâmetro do furo de 2,00 mm e profundidade de 0,1 mm após 2 incrementos.

Após cada incremento de usinagem para medição de tensão residual, o processo foi pausado para análise com equipamento óptico que busca capturar uma imagem da superfície adjacente ao furo cego para posterior cálculo da tensão residual, a partir das deformações geradas nos corpos de prova. A Fig. (4) ilustra o aparato experimental para medição da tensão residual.

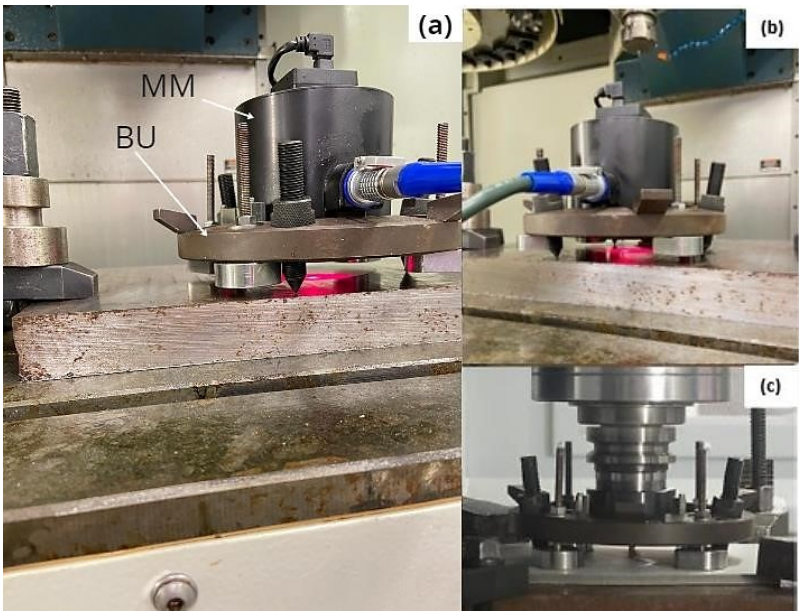


Figura 4. Medição de tensão residual: (a) Montagem no Centro de Usinagem; (b) Interferômetro óptico para medição de deformações mecânicas; (c) Procedimento de usinagem do furo cego no Centro de Usinagem (Os autores).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O aço AISI 4340 é um aço de alta resistência, médio carbono e baixa liga, que combina temperabilidade profunda, alta ductilidade, tenacidade e resistência. Ele possui alta resistência à fadiga e à fluência.

Analisando os resultados das medições de tensões residuais do aço SAE 4340 em condições mecânicas, observa-se uma média de -615 MPa para as tensões no furo 1, sendo que no furo 2 a média de tensões foi de -670 MPa e no terceiro furo foi de -795 MPa. Estes resultados estão apresentados na Fig. (5).

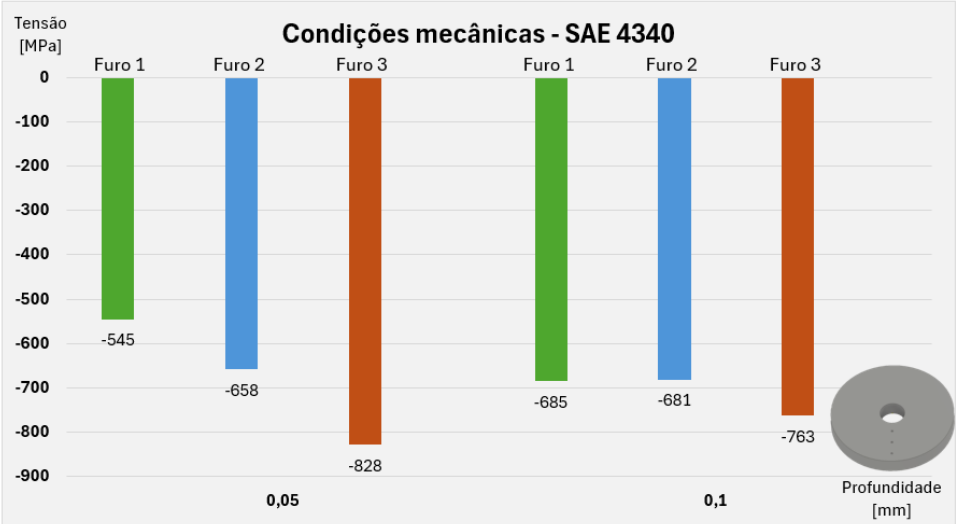


Figura 5. Análise de tensões residuais no aço SAE 4340, em condições mecânicas, em três posições (Os autores).

Os resultados apresentados na Fig. (5) mostram que o furo 3, localizado próximo à borda externa dos materiais, tende a exibir valores de compressão mais elevados. Esse furo está mais próximo do ponto onde o processo de torneamento teve início, o que sugere que ele pode estar menos afetado pelos cavacos gerados ao longo do processo. Por outro lado, nos furos identificados como 1 e 2, situados no diâmetro interno e no centro das amostras, respectivamente, observa-se uma grande similaridade nos valores. Em particular, no segundo incremento (0,1 mm), os valores se mostram muito próximos no gráfico.

Ainda no primeiro incremento (0,05 mm), percebe-se que a posição 1 apresenta tensões residuais compressivas menos intensas do que a posição 3. Isso pode ser atribuído ao fato de que, na posição 1, o processo de torneamento estava próximo do fim do ciclo, e o desgaste da ferramenta de torneamento pode ter tido um impacto significativo nos resultados comparativos.

Júnior (2009) encontrou em seu trabalho, em amostras com condições similares, que o aço SAE 4340 apresentou comportamento com tensões de menos intensidade nas medições. No trabalho referido, as amostras nestas condições apresentaram tensões residuais com médias de -79 MPa nestes ensaios, porém, as medições das tensões residuais para este trabalho foram realizadas por DRX.

Nos estudos de Souza e Câmara (2020), foi medido o comportamento das tensões residuais em amostras de aço SAE 4340 que foram tratadas e normalizadas. Eles observaram que, para profundidades baixas e próximas à superfície, as tensões residuais eram predominantemente compressivas. Para realizar esses testes, os autores usaram diferentes modelos de fresas em processos de fresamento, empregando cabeçotes adaptáveis a esses modelos.

Os resultados obtidos indicaram que as tensões variavam entre +100 e -150 MPa, com uma predominância clara das tensões compressivas. É importante destacar que, nesses ensaios, foram utilizadas amostras de perfis retangulares e a medição das tensões residuais foi feita com rosetas extensométricas.

Quando se analisam os resultados obtidos com o aço SAE 4340 nas condições térmicas, encontra-se tensões residuais majoritariamente de tração nas análises das profundidades de 0,05 mm e 0,1 mm abaixo da superfície. Entre todas as análises deste aço na condição térmica, o valor médio de tensões residuais encontrado é de 153,2 MPa, sendo que o maior pico encontrado foi de 317,6 MPa, na profundidade de 0,05 mm de uma análise. Os resultados detalhados desta condição estão apresentados na Fig. (6).

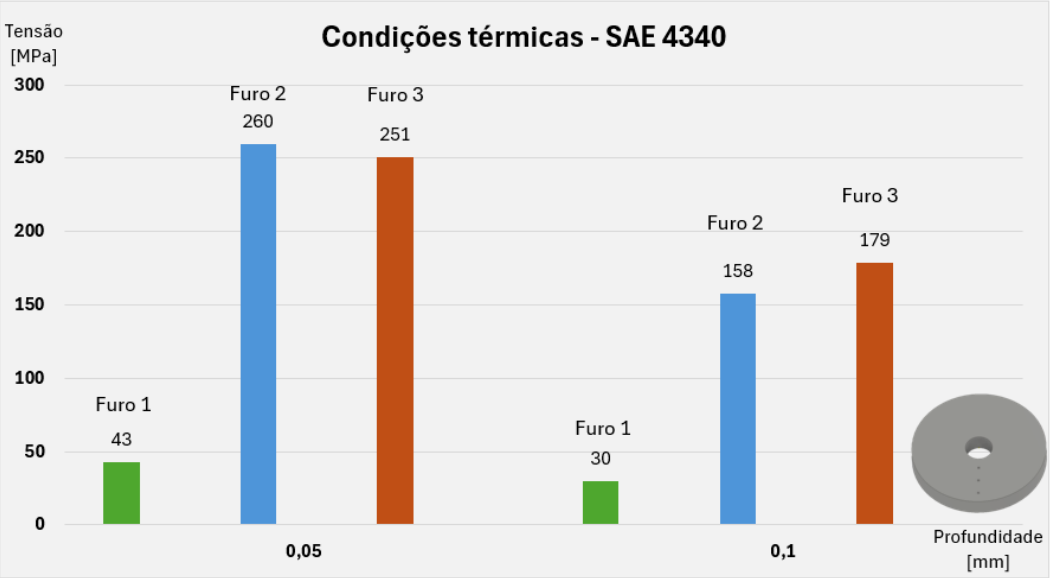


Figura 6. Análise de tensões residuais no aço SAE 4340, em condições térmicas, em três posições (Os autores).

O aço SAE 4340 é amplamente utilizado na indústria, dada a suas ótimas propriedades, tais como: resistência à fadiga e boa combinação de resistência mecânica e tenacidade. É amplamente aplicado na fabricação de peças como virabrequins, bielas, eixos e engrenagens tanto de automóveis quanto de aeronaves.

A condição térmica é conhecida por impor tensões residuais de tração nos componentes por ela trabalhados, o que pode ser um fator comprometedor ao analisar a aplicação que cada material poderá ter em sua jornada na indústria. Sabendo disso, as condições térmicas impostas pelo processo de torneamento não se apresentam como uma estratégia muito viável para o aço SAE 4340, pois as tensões residuais de tração que são obtidas nesse cenário podem fazer com que os processos de propagação de trincas e consequente menor resistência à fadiga seja imposto ao material, e visto sua gama de empregabilidade, estas afirmações não podem ser consideradas nestes processos.

Nesse cenário analisado, a condição térmica empregou velocidade de corte bastante superior quando comparada à outra condição, 550 m/min, que comparada ao valor de 60 m/min da condição mecânica, tem-se aumento de 916,6%. Porém, apesar do aumento expressivo da velocidade de corte, a condição térmica trouxe valores menores de avanço da ferramenta (0,08 mm/rev) e profundidade de corte (0,3 mm). Assim, com menor atrito e cavacos em menor volume, ocorre menor deformação plástica e variação volumétrica inerentes ao processo, que são aspectos relacionados a origem das tensões residuais induzidas nas superfícies.

Em seus estudos de tensões residuais, Junior (2009) conclui também que quando empregadas maiores velocidades de corte, as tensões residuais logo abaixo da superfície tendem a ser menores, em intensidade. Este fato é semelhante ao encontrado nesta pesquisa, pois, mesmo que em condição de tensões trativas, as intensidades encontradas neste ensaio com maiores velocidades de corte foram bem reduzidas quando comparadas aos demais ensaios.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudado o uso do Método do Furo Cego para medição de tensões residuais em materiais endurecidos. Nestes estudos, analisou-se o material SAE 4340, sendo que foram realizados os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento para o material SAE 4340. Sendo assim, os corpos de prova apresentaram-se com dureza próxima de 60 HRC.

Para medir tensões residuais em materiais nessas condições, é comum encontrar pesquisas ao redor do mundo que utilizam a técnica de Difração de Raios X (DRX). Isso se deve ao domínio consolidado desse método para tais ensaios, à facilidade de acesso a materiais de apoio desenvolvidos por pesquisadores e à confiabilidade dos resultados obtidos. Assim, a aplicação do Método do Furo Cego para medir tensões residuais em materiais endurecidos surge como uma pesquisa relativamente inovadora. Embora o método já tenha sido utilizado por várias décadas, sua aplicação tem sido mais frequente em materiais e ligas com menores resistências mecânicas.

Para materiais com condições mecânicas, os parâmetros de preparação das amostras nos ensaios de torneamento foram definidos com as menores velocidades de corte e o maior avanço da ferramenta. Acredita-se que a diminuição excessiva das velocidades de corte leve a um aumento considerável das temperaturas durante o processo de torneamento, devido ao prolongado tempo de contato entre a peça e a ferramenta. Além disso, essas condições provocam intensas deformações plásticas nos materiais, resultando em um aumento das tensões residuais de compressão.

Observou-se que os pontos de medição 2 e 3, localizados no centro e na borda externa das amostras, respectivamente, apresentaram os maiores valores de tensões residuais sob condições térmicas. Isso leva à conclusão de que a região central

das amostras, ao acumular mais calor e detritos do processo, pode sofrer maiores interferências intrínsecas ao processo de medição óptica das tensões residuais, devido à forma como os valores são calculados.

5. REFERÊNCIAS

Blödorn, R., 2018, “Efeito do fresamento orbital com fresa de topo e furação em cheio com broca helicoidal sobre os valores medidos da tensão residual pelo Método Do Furo Cego”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 242 p.

Júnior, J. R. B., 2009, “Análise de tensões residuais, integridade superficial e forças de usinagem no fresamento de topo de aço SAE 4340 endurecido”, Dissertação (Mestrado), Centro Universitário da Fei, São Bernardo do Campo, 115 p.

Schaejer, G.S., 2013, “Practical Residual Stress Measurement Methods”, 1. ed. Reino Unido: John Wiley & Sons Ltd, 328 p.

Schaejer, G., Whitehead, P.S., 2018, “Hole-Drilling Method for Measuring Residual Stresses”, Synthesis SEM Lectures on Experimental Mechanics, v. 1, n. 1, 186 p.

Souza, A., Camara, M. A., 2020, “Tensões residuais induzidas pela operação de fresamento no aço ABNT 4340 sob variação da velocidade de corte, ângulo de posição e tratamento térmico”, Revista Matéria, Belo Horizonte, 25 p.

Verwiebe, J. J., 2024, “Análise de tensões residuais pelo método do furo cego em materiais endurecidos”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 242 p.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela FAPESC (Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina) e apoiado pelo Centro Universitário de Brusque – UNIFEBE e pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.