

AVALIAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS NA RETIFICAÇÃO PLANA DO AÇO MARAGING 350 COM REBOLO CONVENCIONAL SOL-GEL

Lucas Benini

Maria Cindra Fonseca

Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Passos da Pátria 156, Bloco D, Sala 219, CEP 24210-240, São Domingos Niterói-RJ
lucasbenini@id.uff.br, mariacindra@id.uff.br

Resumo: Os aços maraging são uma classe especial de aço que apresentam alto teor de Ni sendo compostos por ligas quaternárias de Fe-Ni-Co-Mo. Possuem alta resistência mecânica e tenacidade a fratura e são, por este motivo, utilizados na fabricação de componentes e peças que devem resistir a grandes carregamentos. Embora os aços maraging possuam boa usinabilidade quando solubilizados, a literatura é escassa em estudos sobre os processos de usinagem por retificação desse tipo de aço com rebolos convencionais. Esse trabalho tem como objetivo analisar os resultados preliminares das tensões residuais e do acabamento superficial do aço maraging 350 usinado pelo processo de retificação plana utilizando um reboło convencional sol-gel. Foram preparadas amostras de aço maraging 350 e retificadas com um reboło convencional sol-gel, variando-se a velocidade de avanço durante os ensaios de retificação. Posteriormente foram mensurados os resultados de rugosidade das superfícies usinadas e de tensões residuais pelas técnicas de difração de raio X e pela técnica do ruído magnético Barkhausen. As velocidades de avanço não exerceram influência significativa nos resultados de rugosidade. Em contrapartida, o aumento da velocidade de avanço contribuiu para o aumento das tensões residuais, que se apresentaram majoritariamente como tensões residuais compressivas.

Palavras-chave: Retificação plana; Aço maraging 350; Tensões residuais, Rugosidade superficial.

1. INTRODUÇÃO

A retificação é um processo de remoção de material por abrasão que possibilita atingir um excelente acabamento superficial, sendo um dos últimos processos de fabricação aplicado em componentes mecânicos. A versatilidade e abrangência dos diversos tipos de retificação fazem com que este processo se torne atrativo para diversas indústrias na fabricação de precisão (Gupta *et al.*, 2021). Neste processo, a peça é colocada em contato com a ferramenta (denominada reboło) em rotação. Entre a peça e o reboło é executado um movimento relativo, podendo este ser efetuado pela peça, pelo reboło ou por ambos simultaneamente. Dentre as variações do processo de retificação, está a retificação plana que é utilizada para o acabamento de superfícies planas lisas (Groover, 2017).

O resultado de trabalho de retificação depende primariamente das condições de corte do processo. Se mal dimensionados, estas condições podem causar defeitos geométricos e, ainda, provocar o aumento das tensões residuais que inviabilizem o uso do componente usinado. Juntamente com as condições de corte, é necessária a escolha adequada do reboło. Os materiais empregados normalmente empregados em rebolos convencionais são o óxido de alumínio (Al_2O_3) eletro-fundido e o carboneto de silício (SiC) e em ferramentas superabrasivas são o nitreto de boro cúbico (CBN) e o diamante. A pesquisa em materiais utilizados em ferramentas abrasivas possibilitou o desenvolvimento de rebolos de alumina tipo sol-gel. Por meio da sinterização da alumina, o reboło sol-gel possui uma microestrutura de grãos menores, densos e homogêneos que permite que o reboło mantenha uma melhor capacidade de corte do que o reboło tradicional eletro-fundido, o que garante um melhor acabamento superficial (Benini, 2017).

Além disto, os processos de retificação podem ser empregados para a usinagem de diversos tipos de materiais, desde matérias ferrosos e não ferrosos, aços e ferros fundidos, etc. No contexto dos aços, os aços *maraging* são uma classe especial de aço que apresentam alto teor de Ni. O nome *maraging* vem de “mar” devido a transformação martensítica que o aço sofre e “aging” do tratamento térmico de envelhecimento que por fim concede a dureza ao material. Eles também possuem alta resistência mecânica e tenacidade a fratura, e são por isso utilizados para peças que precisam resistir a grandes carregamentos. Os aços do tipo *maraging* são atrativos principalmente para a indústria aeronáutica, mas também são bastante utilizados nas indústrias militar e nuclear; apresentam boa conformabilidade e usinabilidade quando solubilizados. Isto ocorre devido ao seu baixo teor de carbono, que faz com que a fase martensítica desses aços seja macia e fácil de ser trabalhada. Uma vez que a peça é usinada, ela passa pelo tratamento de envelhecimento que endurece o material por precipitação de compostos intermetálicos o que concede um pico de dureza e dificulta sua usinabilidade posterior (Mouritz, 2012; Carvalho, 2019).

Durante a retificação, tensões residuais são induzidas na camada limite abaixo da superfície dos componentes, afetando seu tempo de vida e sua confiabilidade. A magnitude das tensões residuais originadas do processo de retificação é determinada pelas propriedades mecânicas e físicas do material da peça, e também pelos parâmetros do processo (Balart,

2004). As tensões residuais são tensões internas em equilíbrio, em condições uniformes de temperatura e em repouso, na ausência de qualquer carregamento externo. Elas surgem em virtude de processos de fabricação e de tratamentos e sempre que o componente sofre deformação plástica localizada ou deformação elástica não homogênea. Dependendo da distribuição e da magnitude, os efeitos das tensões residuais podem ser benéficos ou prejudiciais ao componente (Martins, 2004). Caso sejam tensões trativas, podem ocasionar a nucleação e propagação de trincas, levando a ruptura do componente. Caso sejam tensões residuais compressivas, elas dificultam a propagação de trincas (Scholtes, 2007). Os métodos para determinação das tensões residuais são classificados como destrutivos e não destrutivos. Dentre as técnicas não destrutivas, onde não ocorre a remoção de material do componente avaliado, preservando-se este para uso posterior, destacam-se as técnicas de difração de raios-X e o método magnético de Barkhausen (Yelbay *et al.*, 2010).

A tensometria por difração de raios-X é um método eficaz na determinação das tensões residuais e aplicadas em materiais cristalinos. Ela permite qualificar e quantificar em magnitude e direção as tensões superficiais existentes em dado ponto do material. Os seus princípios básicos são baseados em duas teorias: a teoria da difração de raios-X em materiais cristalinos e a teoria da elasticidade do material sólido, oriunda da mecânica dos sólidos. A teoria da difração de raios-X tem como princípio a medição do espaçamento entre os planos da rede cristalina dos materiais, através do uso de feixes estreitos de raios-X (Spirito, 2018).

Os aços *maraging* possuem uma composição de materiais de sua maioria ferromagnéticos, ricos em Fe, Ni e Co. O que possibilita a realização do ensaio não destrutivo do ruído magnético Barkhausen (RMB). O método magnético do ruído Barkhausen (RMB) é baseado no fenômeno físico que ocorre em materiais ferromagnéticos durante a magnetização (Garstka, 2008). Nestes materiais existem grandes volumes de átomos nos quais os momentos magnéticos estão alinhados segundo uma direção de magnetização espontânea ou de fácil magnetização. Estas regiões são conhecidas como domínios magnéticos. Em dependência das características da estrutura cristalina, a direção preferencial de magnetização é diferente em diversas regiões do material, ou seja, a direção dos momentos magnéticos varia de domínio para domínio (Sernagirald, 2007). Quando materiais ferrosos são submetidos a campos magnéticos variáveis, os momentos magnéticos no interior dos domínios sofrem rotação contínua alinhando-se em uma direção próxima à direção de campo magnético aplicado. Os domínios com orientação na direção do campo tendem a se expandir em todas as suas direções, movendo suas paredes e subjugando os domínios vizinhos (Grijalba, 2010). Em materiais ferromagnéticos os contornos de grãos discordâncias, partículas de segunda fase (fatores estes também conhecidos como “pontos de ancoragem”) podem atuar como uma barreira no movimento das paredes dos domínios. Com a aplicação de altos valores de magnetização, a força necessária para ultrapassar os defeitos cresce até a parede se movimentar e encontrar um novo defeito. Portanto, o processo de magnetização não ocorre de forma contínua em decorrência da movimentação das paredes dos domínios magnéticos. Estes saltos discretos da indução produzem pulsos magnéticos conhecidos como RMB (Wojtas, 2011).

Os danos na superfície da peça usinada podem ser identificados como consequência da realização de processos de usinagem mal executados ou sem controle. No caso do processo de retificação, a escolha inadequada do par fluido-ferramenta, a incorreta afiação da ferramenta e uma lubrificação/refrigeração não eficiente, podem afetar negativamente as propriedades mecânicas do componente usinado, pela diminuição de sua resistência à fadiga e ao desgaste. Isto se deve ao efeito significativo do calor produzido pelo contato entre o rebolo e a peça, podendo resultar em alterações microestruturais, endurecimento da camada subsuperficial e tensões residuais trativas (Kundrák *et al.*, 2017). Neste contexto, é importante ressaltar que há poucos trabalhos que abordam a retificação do *maraging*. Há trabalhos que abordam a retificação do *maraging* 250 com rebolos superabrasivos, entretanto este tipo de material de ferramenta abrasiva possui custos mais elevados e demanda máquinas-ferramentas com maiores velocidades de corte, quando comparada com processos de retificação que utilizam rebolos convencionais, como os de SiC e Al₂O₃. Os trabalhos de Farsky *et al.* (2018; 2019; 2020) merecem destaque por abordarem a retificação do *maraging* 300, empregando rebolos convencionais de SiC. Apesar disto, há a necessidade de conhecer o comportamento de processo e resultado de retificação dos aços *maraging* 350 empregando-se ferramentas convencionais de retificação, sobretudo no âmbito dos rebolos Al₂O₃ sol-gel.

Além disso, os rebolos convencionais de óxido de alumínio são de baixo custo, quando comparado aos rebolos superabrasivos de carboneto de boro cúbico e de diamante, e são largamente empregados na indústria. Mesmo com a popularidade deste tipo de ferramenta abrasiva e de material, ainda há a carência de estudos sobre a integridade superficial, principalmente no âmbito das tensões residuais, resultante do processo de retificação de aços. Por fim, as técnicas empregadas para avaliação das tensões residuais muitas vezes não são facilmente aplicáveis em ambiente industrial, necessitando de infraestrutura de laboratório para sua execução. Além disto, há o alto custo dos equipamentos para avaliação das tensões residuais. Tais fatores não favorecem o estudo de tensões residuais em processos de fabricação, como a retificação, tanto na indústria quanto em meios acadêmicos.

O objetivo principal deste trabalho é analisar a influência da velocidade de avanço nas tensões residuais e o acabamento superficial do aço *maraging* 350 usinado pelo processo de retificação plana empregando um rebolo convencional sol-gel.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de aço *maraging* 350 como recebidas (solubilizadas a 820 °C por 1 h) foram usinadas nas dimensões 25 x 23 x 10 mm (Fig. 1). A Tab. 1 apresenta a composição química do *maraging* 350. Os ensaios de retificação foram efetuados no Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM/UFF).

Tabela 1. Composição química do aço *maraging* 350 (porcentagem %).

Liga	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Fe
350	17,65	11,65	4,69	1,44	0,065	Bal.

A retificação das amostras utilizou a retificadora tangencial Benner modelo RVK-4515 (Fig. 1). A ferramenta de corte utilizada foi um rebolo de óxido de alumínio (Al_2O_3) do tipo sol-gel de especificação 1SG80-KVH, de grãos microcristalinos de granulometria 80, dureza K, ligante vítreo, com granulometria 46, dureza K, com ligante vitrificado, com 205 mm de diâmetro externo, furo interno de 31,8 mm e largura de 13,5 mm. Além disso, durante a operação, aplicou-se o fluido de corte óleo solúvel biodegradável HYDRIA-EP. A dressagem do rebolo foi efetuada com dressador de ponta única de diamante (Fig. 1), realizada antes da retificação das amostras. Foi empregado um grau de recobrimento de 3,7 μm e profundidade de dressagem de 15 μm . A velocidade de corte v_c foi de 30 m/s e a profundidade de corte a_e foi de 0,05 mm. Os parâmetros de corte são apresentados na Tab. 2.

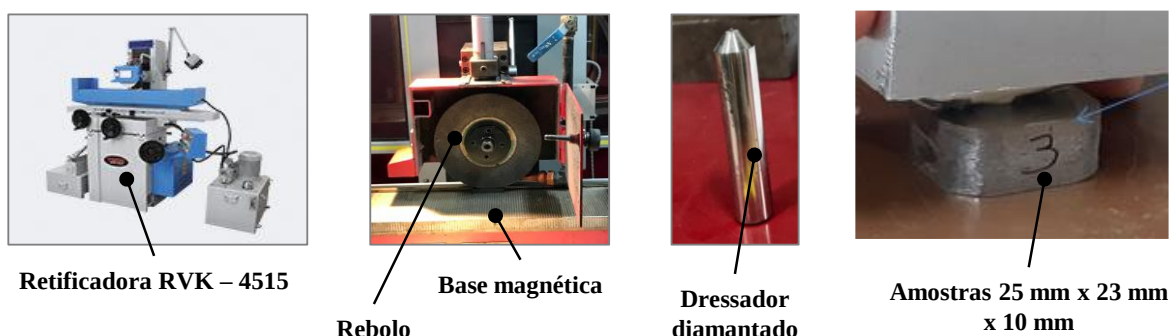


Figura 1. Retificadora Plana RVK, rebolo, dressador e amostras de *maraging* 350.

Tabela 2 - Parâmetros de corte empregados nos ensaios.

Amostra	Velocidade de avanço (V_f) [m/min]
1	11
2	11
3	13,5
4	13,5
5	17
6	17

As análises do RMB foram realizadas no Laboratório de Ensaios Não Destrutivos (LEND/UFF), com um equipamento medidor Barktech, desenvolvido para fins acadêmicos por um grupo de professores da Universidade de São Paulo (USP), conforme mostra a Figura 2(a). O RMB foi avaliado usando uma sonda com área de seção transversal de aproximadamente 15 mm². Os ensaios foram realizados na superfície das amostras após a retificação. Para cada condição foi realizada 21 medições de RMB com 7000 repetições, frequência de amostragem de 350 kHz, amplitude de excitação de 1 V. As tensões residuais foram medidas por difração de raios-X, pelo método de $sen^2\psi$. As medições foram realizadas no Laboratório de Tensões (LAT) da Universidade Federal Fluminense (UFF), utilizando o analisador de tensões XStress3000, do fabricante Stresstecc, Figura 2(b). Os parâmetros de calibração deste equipamento são listados na Tabela 3. As tensões residuais foram mensuradas na direção longitudinal das amostras.

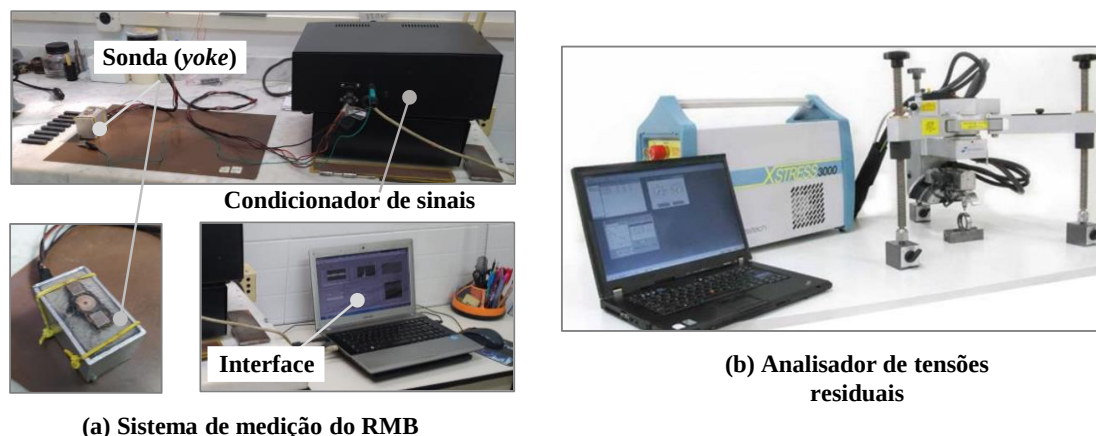


Figura 2. (a) Sistema de medição RMB e (b) analisador de tensões residuais.

Tabela 3. Parâmetros do analisador de tensões residuais por raios-X.

Diâmetro do colimador [mm]	2
Ângulo de incidência 2θ [°]	156,42
Ângulo de inclinação ψ (°)	0;18;27;33;45
Radiação	CrK α
Comprimento de onda λ [Å]	2,29092
Plano de difração [hkl]	[2 1 1]
Corrente [mA]	7
Tensão [kV]	30

Para a medição do perfil de tensões residuais (medição das tensões ao longo da profundidade do material) foi empregada a técnica de remoção de camadas por meio do polimento eletrolítico um relógio comparador digital Mitutoyo Absolute, modelo ID-C112B, foi utilizado para medir as profundidades micrométricas das camadas. Foram mensuradas as tensões residuais em 4 profundidades (20 μm , 40 μm , 60 μm , 80 μm). Para a medição da rugosidade das amostras, utilizou-se o rugosímetro Taylor Hobson Surtronic S25. Foi empregado um comprimento de medição $L = 4,00$ mm e um comprimento de amostragem (*cut-off*) $L_c = 0,80$ mm. O apalpador possui uma ponta com raio de 5 μm , oferecendo uma resolução de 0,01 μm , com precisão de 2% do valor medido. As medições foram realizadas na direção longitudinal (na direção de retificação das amostras).

3. RESULTADOS

A Fig. 3 apresenta os resultados da rugosidade R_a e R_z das amostras do aço *maraging* 350 após os ensaios de retificação plana. Observa-se na nesta figura que o aumento da velocidade de avanço v_f não contribuiu para um aumento significativo dos parâmetros de rugosidade. Nas amostras 1 e 2 (retificadas com $v_f = 11$ m/min) há os menores valores de rugosidade; posteriormente nas amostras 3 e 4 (retificadas com $v_f = 13,5$ m/min) aumentam-se os valores de rugosidade. Este aumento da rugosidade com o aumento da velocidade de avanço v_f é relatado por König (1989), Marinescu *et al.* (2007) e Klocke (2009). De acordo com estes autores, o aumento da velocidade da mesa resulta em maior vibração da máquina-ferramenta e, consequentemente, aumentam os valores de rugosidade.

A diminuição dos valores de rugosidade nas amostras 5 e 6 (com $v_f = 17$ m/min) pode ser explicada pelo mecanismo de desgaste dos grãos abrasivos sol-gel presentes no rebolo. Os grãos abrasivos Al_2O_3 convencionais (alumina eletrofundida) possuem planos preferenciais de fratura, com desprendimento de partículas relativamente grandes. Já a fratura dos grãos de Al_2O_3 sol-gel (também denominados microcristalinos sinterizados), ocorre de forma intergranular e as partículas que se desprendem do grão são relativamente pequenas. Gumes novos se formam sem uma perda significativa do formato do grão. Mesmo que durante o processo de retificação predomina-se um mecanismo de microdesgaste, ocorre uma continuada formação de novos gumes mantendo-se a capacidade de corte uniforme ao longo do processo. Uma melhora da resistência à fratura é alcançada pela redução do tamanho de grão e pela inclusão de partículas que formam uma segunda fase na estrutura do grão (Klocke *et al.*, 2002; Mayer *et al.*, 2006). A diminuição da rugosidade indica uma diminuição das diferenças de protusão dos grãos e uma espessura de cavaco não deformado menor e mais uniforme por gume (Benini, 2017). De acordo com Rowe (2009) o desenvolvimento de grãos abrasivos microcristalinos sinterizados resultou em abrasivos mais resistentes e com a propriedade de auto-afiação mais adequada para a retificação.

De uma forma geral, nota-se que os valores do parâmetro R_a se situaram no intervalo de $0,09 < R_a < 0,46$ μm , independentemente das velocidades de avanço ensaiadas neste trabalho. Nota-se que o limite superior está bem abaixo do

valor de R_a 1,6 μm ; um limite tolerável para acabamento na operação de retificação de semi-acabamento (Marinescu *et al.*, 2007; Malkin e Guo, 2008).

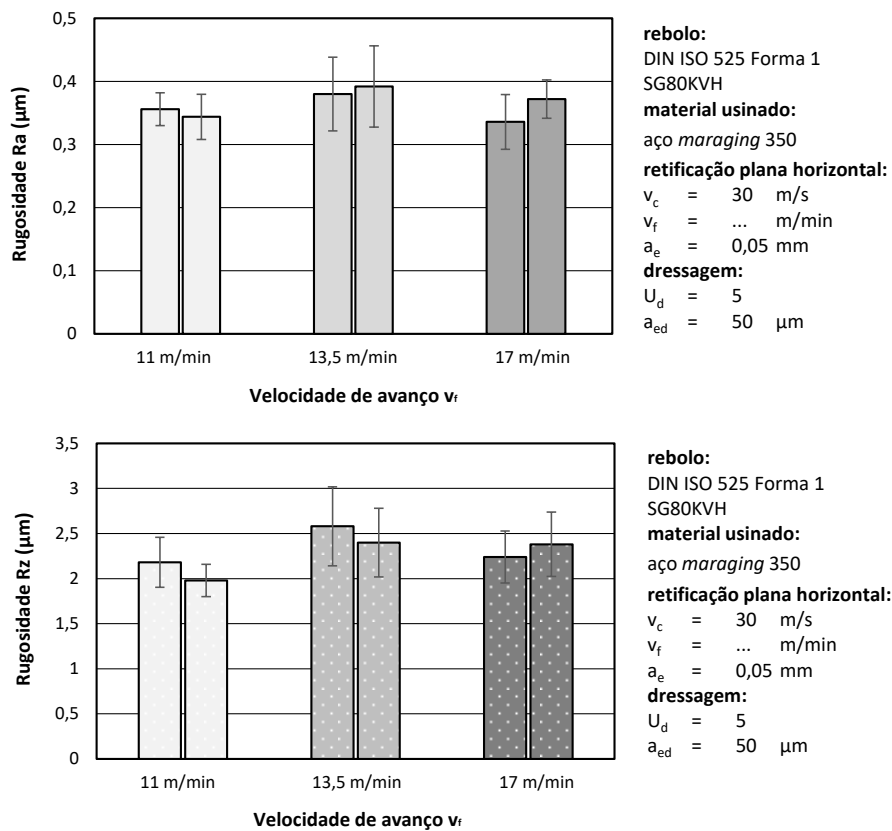


Figura 3. Rugosidade média R_a e R_z como função da velocidade de avanço v_f na retificação plana do aço maraging 350.

A Fig. 4 apresenta os resultados dos valores dos picos RMB (amplitudes médias) mensurados com a $f_{exc} = 10$ Hz nas amostras de aço maraging 350 após o processo de retificação. Como pode ser observado nesta figura, a velocidade de avanço de 17 m/min apresentou os maiores valores de RMB para a frequência de excitação $f_{exc} = 10$ Hz, apesar de que a variação da velocidade de avanço não exerceu influência significativa nos valores do RMB mensurados com esta frequência de excitação magnética.

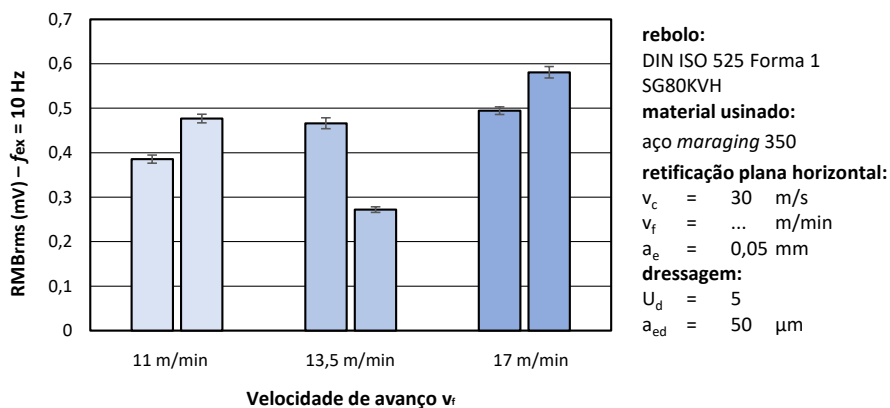


Figura 4. RMB com frequência de excitação magnética $f_{exc} = 10$ Hz como função da velocidade de avanço v_f na retificação plana do aço maraging 350.

A Fig. 5 apresenta os resultados dos valores dos picos RMB mensurados com a $f_{exc} = 50$ Hz. Os resultados dos picos RMB mensurados com $f_{exc} = 50$ Hz e $f_{exc} = 10$ Hz são similares, como os maiores valores observados para a $f_{exc} = 50$ Hz.

Estes resultados podem ser explicados pelo fato de que a frequência de excitação estabelece a profundidade na qual o campo magnético alinha os domínios magnéticos da amostra, e o RMB se refere à esta camada. Com o aumento da frequência de excitação a profundidade de detecção de alterações pela medição do RMB diminui. Com o aumento da frequência de excitação magnética de 10 Hz para 50 Hz diminui-se minimamente a profundidade na qual os domínios magnéticos da amostra são alinhados. Este fato explica a similaridade dos resultados mensurados com ambas as frequências de excitação.

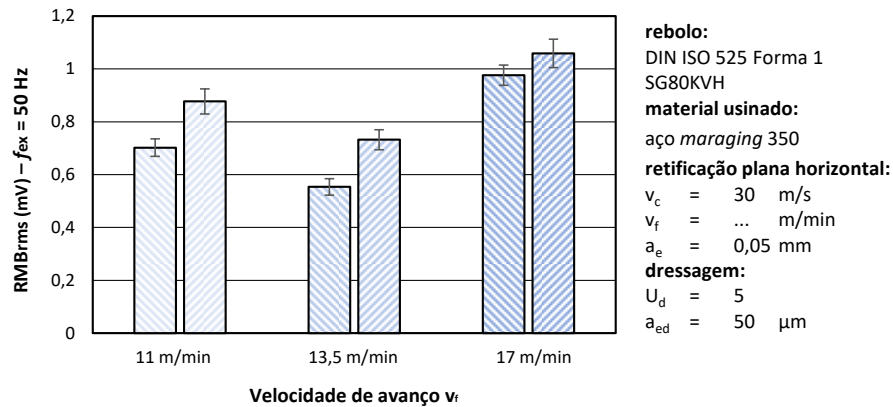


Figura 5. RMB com frequência de excitação magnética $f_{exc} = 50$ Hz como função da velocidade de avanço v_f na retificação plana do aço *maraging* 350.

A Fig. 6 mostra os resultados das tensões residuais mensuradas pelo método de difração de raios-X. Como pode ser verificado nesta figura, a velocidade de avanço exerceu influência significativa nos resultados de tensão residual. Com o aumento da velocidade de avanço as tensões residuais tornaram-se mais compressivas. Efetuando-se uma média dos valores das tensões das réplicas para cada velocidade de avanço, observa-se que o processo de retificação tende a gerar tensões mais compressivas. Estes resultados estão de acordo com a literatura, que estabelece que quanto maior a velocidade de avanço, maior o nível de compressão das tensões residuais (Majerik e Bajcik, 2009; Zoei *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2015).

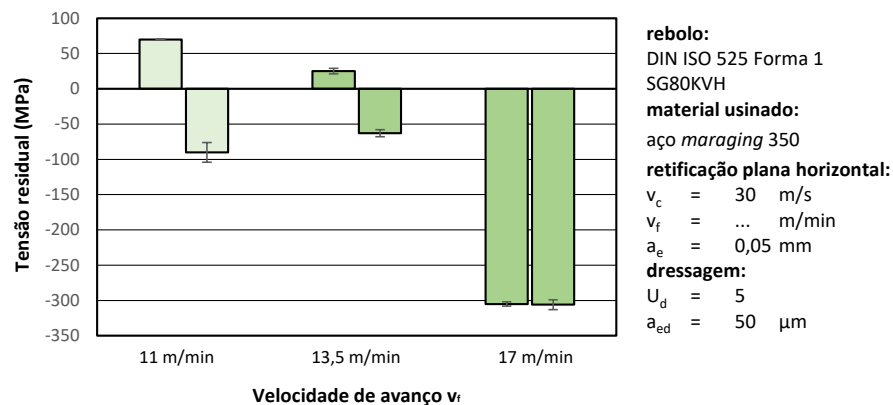


Figura 6. Tensões residuais longitudinais como função da velocidade de avanço v_f na retificação plana do aço *maraging* 350.

De acordo com Kruszynski & Wójcik (2001), o aumento da velocidade de avanço induz a tensões residuais compressivas no componente retificado. Isto decorre do fato de uma maior velocidade da mesa resultar em um menor tempo de contato entre o rebolo e a peça, e deste modo, ocorre um menor aporte térmico. Malkin e Guo (2008) afirmam que as tensões residuais de compressão aumentam a resistência à fadiga.

Comparando-se os resultados do RMB com os resultados de tensão residual, pode-se aferir que o aumento da atividade magnética está relacionado com o aumento das tensões residuais, que nas condições ensaiadas neste trabalho, tornaram-se mais compressivas com o aumento da velocidade de avanço.

A fim de entender melhor o comportamento das tensões residuais nas camadas abaixo das superfícies originadas pelo processo de retificação, foram mensuradas as tensões ao longo da profundidade na amostra 5, uma vez que esta amostra apresentou o maior valor de tensão residual compressiva em comparação com as demais (Fig.7). Observa-se na Fig. 7 que a curva obtida do perfil das tensões residuais é coerente com os perfis de tensão residual apresentados por Grum (2001), Fathallah (2009), Manns e Scholtes (2013) e Ding (2016). Segundo Ding (2016), as tensões residuais em processos

de retificação são primariamente originadas por três causas: expansão ou contração térmica localizada do material retificado, deformação plástica devido a abrasão do rebolo e mudança de volume induzida por transformação de fase localizada. O padrão de tensões residuais compressivo (como o da Fig. 7) geralmente é decorrente da deformação plástica devido a abrasão do rebolo (Ding, 2016). Além disto, se a densidade da fase do material transformado torna-se menor que o original, as tensões superficiais serão compressivas, pois a expansão do volume da nova fase do material é restringida pelo material na zona não afetada.

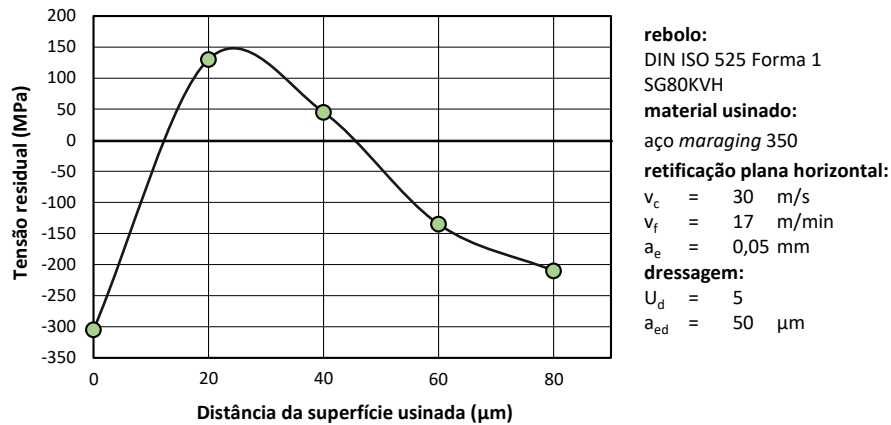


Figura 7. Perfil das tensões residuais longitudinais na amostra 5 de aço *maraging* 350.

Através os sinais obtidos pela medição do RMB, foi realizado um tratamento de sinal, de modo a entender os acontecimentos internos, estudando a envolvente (Fig. 8). A envolvente representa o perfil do sinal de RMB, na qual também são mostrados os parâmetros frequentemente utilizados que podem ser determinados, sendo eles: amplitude pico da envolvente e posição pico da envolvente - estes parâmetros são sensíveis às propriedades microestruturais dos materiais.

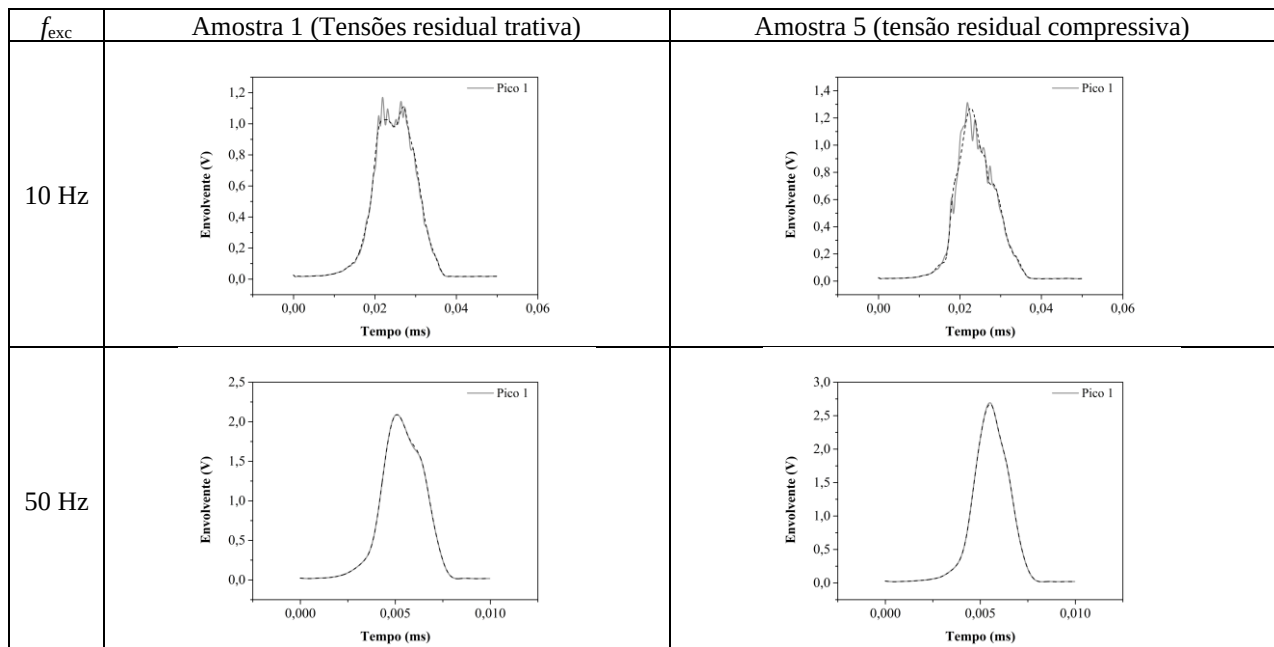


Figura 8. Envolventes dos sinais no domínio do tempo – amostra 1 e amostra 5 de aço *maraging* 350.

Analisando a Fig. 8, é possível perceber a relação que ocorre entre as envolventes das amostras e o aumento da frequência de excitação. O pico da amostra 1, que teve a menor velocidade de avanço utilizada, tem sua altura máxima (2,2 V) com a maior frequência de excitação (50 Hz), possibilitando estudar as camadas mais superficiais da amostra, corroborando com resultados de Sorsa *et al.* (2018). Observando no domínio do tempo, a percepção do pico da envolvente ocorreu em maior tempo, utilizando a frequência de excitação de 10 Hz. Já o pico da amostra 5, que teve a maior velocidade de avanço utilizada, tem sua altura máxima, ou seja, amplitude de voltagem (3 V) com a maior frequência de excitação (50 Hz). Observando no domínio do tempo, a percepção do pico da envolvente ocorreu em maior tempo,

utilizando a frequência de excitação de 10 Hz. De modo geral, pode-se observar que as tensões residuais compressivas originaram uma maior atividade magnética, com os maiores picos da envolvente no domínio do tempo.

4. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi analisar a influência da velocidade de avanço na retificação do aço *maraging* 350 com o uso do rebolo convencional Al_2O_3 sol-gel. Foram avaliados a rugosidade, o RMB e as tensões residuais das amostras. Com os resultados alcançados neste trabalho, conclui-se que:

- A velocidade de avanço não influenciou significativamente os resultados de rugosidade da retificação do aço *maraging* 350. Os valores do parâmetro de rugosidade R_a gerados neste trabalho ficaram abaixo do valor de R_a 1,6 μm , normalmente esperados em processos de retificação, demonstrando que rebolos de Al_2O_3 sol-gel são recomendáveis para retificação de aços *maraging* 350;
- A velocidade de avanço de 17 m/min apresentou os maiores valores do RMB para ambas as frequências de excitação magnéticas de 10 e 50 Hz, indicando que o aumento da velocidade de avanço causou maiores alterações microestruturais que estão relacionadas com o aumento da atividade magnética nas amostras retificadas;
- O aumento da velocidade de avanço contribuiu para a geração de tensões residuais compressivas nas amostras do aço *maraging* 350, as quais aumentam a resistência em fadiga do componente retificado. As tensões compressivas geraram os maiores valores do RMB, tanto nos resultados RMS (em mV) quanto nas amplitudes dos picos das envolventes;
- Verifica-se que a técnica do RMB é adequada para o monitoramento do processo de retificação, pois é sensível a variação dos parâmetros de entrada do processo de retificação, bem como a variação das tensões residuais mensuradas pela técnica de difração de raio-X.

4. REFERÊNCIAS

- Balart, M.J., Bouzina, A., Edwards, L., Fitzpatrick, M.E., 2004. The onset of tensile residual stresses in grinding of hardened steels. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 367, p. 132-142.
- Benini, L., 2017. *Influência do teor de grãos microcristalinos de Al_2O_3 em rebolos convencionais na retificação de ADI*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Carvalho, D., 2019. *Avaliação das propriedades mecânicas e magnéticas de aços maraging graus 300 e 350 de ultra-alta resistência: Relação entre propriedades e tamanho de grão da austenita prévia*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil.
- Ding, W., Zhang, L., Li, Z., Zhu Y., Su, H., Xu, J., 2016. Review on grinding-induced residual stresses in metallic materials *Int J Adv Manuf Technol, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 88, p. 2939-2968.
- Farsky, J., Baksa, T., Zetek, M., 2018. Influence of Grinding Parameters on Forces when Grinding Maraging Steel X3Nicom 18 9 5 with SiC Grinding Wheels, DAAAM International, *Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium*. Zadar, Croatia.
- Farsky, J., Baksa, T., Zetek, M., 2020. Grinding of maraging steel 1.2709 with sic grinding wheels and effect of grinding conditions on the surface roughness and wear of the wheels. *Manufacturing Technology*, n. 20, p. 18-22.
- Farsky, J., Baksa, T., Zetek, M., 2019. Grinding of maraging steel VACO 180 with SiC grinding wheels - Grinding force and wheel wear. *DAAAM International, Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium*. Zadar, Croatia.
- Fathallah, B.B., Fredj, N.B., Sdhom, H., Braham, C., Ichida, Y., 2009. Effects of abrasive type cooling mode and peripheral grinding wheel speed on the AISI D2 steel ground surface integrity. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, n. 3-4, p. 261-272.
- Garstka, T. The influence of product thickness on the measurements by Barkhausen noise method. *Journal of Achievements on Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 27, n. 1, p. 47-50.
- Grijalba, F.A.F., 2010. *Desenvolvimento de ensaio não destrutivo baseado no ruído de Barkhausen par caracterização de tensões elásticas e deformações plásticas em aços*. Tese de doutorado. Escola Politécnica de São Paulo, USP. São Paulo, Brasil.
- Groover, M.P., 2017. *Fundamentos da Moderna Manufatura - Vol. 2*. GEN:LTC, 5ª edição.
- Grum, J., 2001. A review of the influence of grinding conditions on resulting residual stresses after induction surface hardening and grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 114, n. 7, p. 212-226.
- Gupta, M., Khan, A., Song, Q., Liu, Z., Khalid, Q., Jamil, M., Kuntoglu, M., Usca, U., Sarikaya, M., Pimenov, D., 2021. A review on conventional and advanced minimum quantity lubrication approaches on performance measures of grinding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 17, p. 729-750.
- Klocke, F., 2009. *Manufacturing Processes 2 Grinding, Honing, Lapping*. Springer - Verlag Berlin Heidelberg.
- Klocke, F., Engelhorn, R., Mayer, J., Weirich, T., 2002. Micro-an-alisis of the contact zone of tribologically loaded second-phase reinforced sol-gel-abrasives. *Annals of the CIRP - Manufacturing Technology*, Vol. 51, n.1, p. 245-250.
- König, W., 1989. *Fertigungsverfahren Band 2: Schleifen, Honen, Läppen*. 2 Aufl. Düsseldorf: VDI Verlag.

- Kruszynski, B.W., Wójcik, R., 2001. Residual stress in grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 109, p. 254-257.
- Kundrák, J., Mamalis, A.G., Szabó, G., Pálmai, Z., Gyáni, K., 2017. Numerical examination of residual stresses developing during hard turning at different rake angles, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, p.1989-1999.
- Liu, M., Nguyen, T., Zhang, L.C., Wu, Q., Sun, D.L., 2015. Effect of grinding-induced cyclic heating on the hardened layer generation in the plunge grinding of a cylindrical component. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 89, p. 55-63.
- Majerik, J., Bajcik, S., 2009. Residual stresses measurement after high strength steels grinding by high cutting speeds application. *Annals of DAAAM & Proceedings*, v. 20, p. 1811-1812.
- Malkin, S.; Guo, C., 2008. *Grinding technology: theory and application of machining with abrasives*. Industrial Press Inc.
- Manns, T., Scholtes, B., 2013. Diffraction residual stress analysis in technical components-status and prospects. *Thin Solid Films*, Vol. 530, p. 53-61.
- Marinescu, I.D., Hitchiner, M., Uhlmann, E., Rowe, W.B., Inasaki, I., 2007. *Handbook of machining with grinding wheels*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 1ª edição.
- Martins, C.O.D., Strohaecker, T.R., Rocha, A.S., Hirsch, T.K., 2004. Comparação entre Técnicas de Análise de Tensões Residuais em Anéis de Rolamento do Aço ABNT 52100. *Matéria*, Vol. 9, p. 23-31.
- Mayer, J., Engelhorn, R., Bot, R., Weirich, T., Herwartz, C., Klocke, F., 2006. Wear characteristics of second-phase-enforced sol-gel corundum abrasives. *Acta Materialia*, Vol. 54, p. 3605-3615.
- Mouritz, A., 2012. *Introduction to aerospace materials*. Woodhead Publishing.
- Rowe, W.B., 2009. *Principles of Modern Grinding Technology*. William Andrew: Elsevier, 1ª edição.
- Scholtes, B., 2007. *Residual stress analysis of components with real geometries using the incremental hole-drilling technique and a differential evaluation method*. Doctoral thesis, Kassel University, Deutschland.
- Serna-giraldo, C.P., 2007. *Avaliação de juntas soldadas de aços carbon através do Ruído Magnético de Barkhausen*. Tese de doutorado. Escola Politécnica de São Paulo, USP, São Paulo, Brasil.
- Sorsa, A., Santa-aho, S., Warttinen, J., Suominen, L., Vippola, M., Leiviskä, K., 2018. Effect of Shot Peening Parameters to Residual Stress Profiles and Barkhausen Noise. *Journal of Nondestructive Evaluation* Vol. 37, n. 10, p. 1-11.
- Spirito, M.A., 2018. *Comportamento da integridade superficial na retificação plana de aço AISI 4340*. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil.
- Wojtas, A.S., Suominen, L., Shaw, B.A., Evans, J.T., 1998. Detection of Thermal Damage IN Steel Components after Grinding using the magnetic Barkhausen Noise method. *NDT.net* - September 1998, Vol. 3, n. 9, The Open Access NDT Database. 13 Set. 2022 <<http://www.ndt.net/>>.
- Yelbay, H.; Camb, I.; Gur, H., 2010. Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique. *NDT&E International*, Vol. 43, p. 29-33.
- Zoei, S.M., Sadeghi, M.H., Salehi, M., 2016. Effect of grinding parameters on the wear resistance and residual stress of HVOF-deposited WC-10Co-4Cr coating. *Surface & Coatings Technology*, Vol. 307, p. 886-891.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

RESIDUAL STRESSES EVALUATION ON FLAT GRINDING OF MARAGING 350 STEEL WITH CONVENTIONAL SOL-GEL GRINDING WHEEL

Lucas Benini

Maria Cindra Fonseca Segundo Autor

Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Passos da Pátria 156, Bloco D, Sala 219, CEP 24210-240, São Domingos Niterói -RJ
lucasbenini@id.uff.br, mariacindra@id.uff.br

Abstract. *Maraging steels are a special grade of steel that has a high Ni content and is composed of quaternary Fe-Ni-Co-Mo alloys. They have high mechanical strength and fracture toughness and are, for this reason, used in the manufacture of components and parts that must withstand large loads. Although maraging steels have good machinability when solubilized, the literature is scarce in studies on grinding machining processes of this type of steel with conventional grinding wheels. This work aims to analyze the preliminary results of residual stresses and surface finish of maraging 350 steel machined by the flat grinding process using a conventional sol-gel grinding wheel. Maraging 350 steel samples were prepared and ground with a conventional sol-gel grinding wheel, varying the feed speed during the grinding tests. Subsequently, the roughness results of the machined surfaces and residual stresses were measured by the X-ray diffraction technique and the Barkhausen magnetic noise technique. The feed speeds did not exert a significant influence on the roughness results. On the other hand, the increase in feed speed contributed to the increase in residual stresses, which were mostly presented as compressive residual stresses.*

Key words: *Flat grinding; Maraging 350 steel; Residual stresses; Roughness.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.