

INFLUÊNCIA DO ROLETEAMENTO NA INTEGRIDADE SUPERFICIAL DO AÇO SAE 1020: DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM DISPOSITIVO EXPERIMENTALMateus A. M. Bueno¹ (IC), Jean C. C. Pereira (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI – Campus Itajubá.**Palavras-chave:** Acabamento Superficial. Encruamento. Rugosidade. Tensões Residuais.**Introdução**

A busca por componentes mecânicos com maior desempenho e vida útil é um ponto central em indústrias críticas como a automotiva e a aeronáutica. A integridade superficial corresponde a um conjunto de características da superfície e da camada subsuperficial que tem grande influência sobre o desempenho funcional de componentes mecânicos em condições de desgaste, corrosão e fadiga, e é determinada pelos processos de fabricação empregados (SANTOS, 2019; SANTOS et al., 2020). Processos de conformação mecânica, como os tratamentos de superfície, são essenciais para obtenção de propriedades mecânicas aprimoradas (CANAL; ROCHA, 2024). Tratamentos como o jateamento por granalha são tradicionalmente utilizados para induzir encruamento e tensões compressivas, melhorando as propriedades do material. No entanto, este processo apresenta desvantagens, como o aumento da rugosidade superficial e a dificuldade no controle dos parâmetros, limitando sua repetibilidade.

Nesse contexto, entre os métodos de aprimoramento superficial por conformação mecânica, o denominado roleteamento profundo (*Deep-Rolling*), surge como uma alternativa de baixo custo e alta eficiência. Este processo é caracterizado por passes de um elemento rolante (rolete ou esfera) sobre uma superfície metálica com força suficiente para deformar plasticamente a frio a camada subsuperficial do componente. Com isso tem-se a elevação da dureza e resistência mecânica da região conformada devido aos efeitos do encruamento na microestrutura do material (MARTINS, 2023; CASARIN, 2007).

O objetivo deste trabalho é desenvolver e validar um dispositivo de roleteamento externo, projetado para ser utilizado como uma ferramenta em um torno mecânico convencional. A necessidade deste estudo justifica-se pela crescente demanda industrial por componentes com maior vida útil e pela carência de dados sistemáticos que correlacionem os parâmetros de processo com os ganhos de desempenho. A metodologia abrange o

dimensionamento do projeto em *software* 3D, a seleção de materiais, a fabricação e a montagem de um protótipo. Com o dispositivo validado, serão realizados ensaios controlados em corpos de prova de aço SAE 1020, com o propósito final de investigar e correlacionar a influência das principais variáveis do roleteamento sobre a integridade superficial e as propriedades mecânicas resultantes no material.

Metodologia

O projeto partiu da necessidade de desenvolver um dispositivo de roleteamento acessível e de fácil manuseio. A concepção inicial foi baseada em uma ferramenta de recartilhar, que também opera por deformação plástica a partir de roletes. Um desenho esquemático inicial foi elaborado pelo orientador da pesquisa para explorar configurações possíveis, antecipar interferências geométricas e planejar as etapas subsequentes, onde esse esquema serviu como linguagem visual preliminar de engenharia antes da geração de desenhos técnicos detalhados.

Para delimitar os requisitos de materiais e durezas dos componentes do dispositivo, a ferramenta de recartilhar de múltiplos roletes foi desmontada e submetida a ensaios de dureza *Rockell* em laboratório. Em cada componente, foram realizadas três leituras para cálculo do valor médio:

- Rolete: Dureza média de 57 HRC
- Eixo: Dureza média de 56,7 HRC

Baseando-se nos resultados obtidos, na função de cada componente do conjunto mecânico a ser projetado e na manufatura do processo, definiu-se a utilização de um aço SAE 1020 para bases e eixos, pois este apresenta boa usinabilidade e rigidez suficiente. Para fabricação dos roletes, definiu-se a utilização de um aço ABNT 52100, pois esta é uma liga com alto teor de C e Cr, capaz de atingir elevadas durezas e resistência ao desgaste após tratamento térmico de têmpera.

Os componentes foram modelados no *software Solidworks*. A modelagem permitiu validar a montagem, orientar geometrias para o processo de manufatura e

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

preparar os desenhos técnicos.

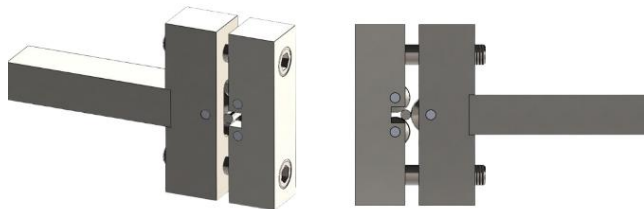


Figura 1 – Modelo tridimensional do dispositivo

A manufatura foi guiada pelos desenhos técnicos e foi realizada por meio de processos de usinagem convencional. No torneamento, utilizou-se um torno mecânico SANCHES BLANES SA T.M.280 (Série 04) com ferramenta HSS de seção quadrada preparada e afiada manualmente. No fresamento, empregou-se a fresadora SANCHES BLANES SA FF 20 mm com fresas OSG de 16 mm para desbaste e 8 mm para acabamento. Após a usinagem, os roletes de aço ABNT 52100, no estado recozido, foram caracterizados quanto a dureza apresentada, tendo como resultado de valor de dureza média de 89 HRB. Em seguida, os roletes foram submetidos a um tratamento térmico de têmpera em óleo, tendo como objetivo elevar sua dureza. Para o tratamento térmico, foi utilizado um forno JUNG LF00212, a qual a temperatura submetida de austenitização das peças foi de 870 ° C por 25 minutos, seguida de resfriamento em óleo e limpeza. O tratamento térmico elevou a dureza dos roletes, tendo como resultado um valor de dureza médio de 63 HRC, um resultado satisfatório e ideal para a aplicação.

A montagem final do dispositivo foi realizada em etapas sequenciais, unindo a base, os suportes e instalando os roletes com seus eixos em seus respectivos alojamentos. A união das duas estruturas principais foi feita com dois parafusos Allen M10x1,5, sendo eles o mecanismo de fixação e de aplicação da força de roleteamento nos corpos de prova.

Para os testes, foram usinados cinco corpos de prova cilíndricos em aço SAE 1020 normalizado. A preparação foi realizada em um torno mecânico, com parâmetros de usinagem controlados para padronização da condição superficial. Utilizou-se ferramenta de metal duro triangular com raio de ponta de 0,8 mm.

Para validação do dispositivo, a ferramenta de roleteamento desenvolvida foi acoplada ao porta-ferramenta do torno Nardini Mascote MS205 e procedeu-se ao alinhamento vertical. Em seguida, uma série programada de oito ensaios de roleteamento foi executada, conforme parâmetros estabelecidos:

CDP	Região Roleteada	Penetração (mm)	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rot)	Passes
1	Reg. 1	indefinida	500	manual	1
	Reg. 2	indefinida	500	0,053	1
2	Reg. 1	indefinida	500	0,053	1
	Reg. 2	0,10	500	0,053	2
3	Reg. 3	0,20	500	0,053	1
	Reg. 4	0,20	500	0,053	2
	Reg. 5	0,40	500	0,053	1
4	Reg. 1	0,10	80	0,053	1
	Reg. 2	0,10	160	0,053	1
	Reg. 3	0,10	400	0,053	1
	Reg. 4	0,10	630	0,053	1
	Reg. 5	0,10	500	0,053	5
	Reg. 6	1,00	500	0,053	1
5	Reg. 1	0,30	630	0,053	1
	Reg. 2	0,50	630	0,053	1
	Reg. 3	1,00	630	0,053	1
	Reg. 4	1,30	630	0,053	1

Figura 2 – Parâmetros utilizado nos ensaios

Resultados e discussão

Os primeiros testes, realizados a partir de três ensaios, tiveram como objetivo avaliar o comportamento mecânico da ferramenta. Primeiramente, a velocidade de rotação foi ajustada em 500 rpm e o avanço feito manualmente. Como resultado do primeiro teste, houve uma deformação plástica excessiva e heterogênea na superfície do corpo de prova.

O resultado do ensaio preliminar, realizado com avanço manual, demonstrou que este método de aplicação e controle era inadequado para o processo de roleteamento. Diante disso, um segundo ensaio foi conduzido, tendo como objetivo eliminar a instabilidade gerada pelo avanço manual. O avanço automático foi programado para uma taxa de 0,053 mm/rot e então realizado o ensaio. Como resultado, a transição para o avanço automático não solucionou o problema, a deformação excessiva manifestou-se novamente na superfície da peça, levando à conclusão de que a força aplicada pelos roletes era excessiva. Como a aplicação da carga era feita diretamente por meio do toque dos parafusos M10, este mecanismo revelou-se um método de difícil controle, baixa precisão e sem repetibilidade, embora os parafusos tenham sido ajustados cautelosamente, buscando apenas o tangenciamento inicial com a superfície do corpo de prova, o resultado no processo foi uma força excessiva, suficiente para deformar plasticamente. Essa observação foi crucial, pois demonstrou que o sistema apresenta

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

elevada sensibilidade à mínima variação possível. Portanto, pela falta de controle e resultados indesejados, o dispositivo desenvolvido não estava apto a conduzir o processo de roleteamento com sucesso, motivando a uma adaptação no uso do dispositivo para obtenção de resultados satisfatórios.

No ensaio posterior, aplicado ao CDP - 2, a metodologia de uso do dispositivo foi alterada. Como o conjunto dos roletes secundários apresentava folgas indesejadas, este foi descartado para testes posteriores, utilizando apenas a estrutura com o rolete primário (com geometria de "T"). Como resultado, obteve-se uma superfície homogênea e com bom acabamento superficial. O corpo de prova foi submetido à medição de rugosidade para avaliar o resultado, a qual foi obtido um valor de $R_a = 11,81 \mu\text{m}$ na região usinada (grosseiramente) e $R_a = 1,27 \mu\text{m}$ na região roleteada, evidenciando a eficácia do processo com o rolete primário na rugosidade média do corpo de prova.

Em seguida, os ensaios conduzidos no CDP - 3, conduzido segundo parâmetros da Figura 1, mostraram-se eficaz na redução da rugosidade média, resultando em uma superfície significativamente mais lisa e uniforme em todas as regiões tratada. O processo não apenas reduziu a rugosidade, mas também aumentou consideravelmente a dureza superficial do material nas regiões tratadas. Os parâmetros testados se mostraram eficazes, mantendo valores de rugosidade média e dureza similares, então aumentar esses valores não traz benefícios adicionais significativos para dureza ou acabamento.

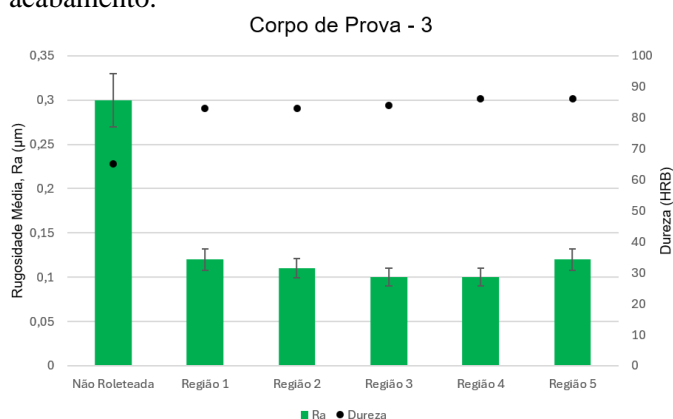


Figura 3 – Rugosidade média e dureza do CDP - 3

O ensaio conduzido no CDP - 4, mostrou-se também bastante eficiente, pois, partindo de uma condição inicial com $R_a = 0,30 \mu\text{m}$ e dureza de 65 HRB, o processo de roleteamento demonstrou uma melhoria notável em ambas as propriedades. A rugosidade superficial foi reduzida em todas as regiões tratadas, alcançando um

valor médio de $R_a = 0,08 \mu\text{m}$. Simultaneamente, a dureza superficial foi elevada de forma consistente, para uma média de 84 HRB. Nestas condições, notou-se que a rotação mais baixa e a mais alta resultaram em uma rugosidade maior, mas que a região 3 apresentou menor rugosidade, indicando a existência de uma faixa de rotação ótima para o processo e dispositivo empregado. No geral, os valores obtidos de dureza não apresentaram desequilíbrio, indicando que valores de rotações aplicados não apresentam grande efeito na dureza final.

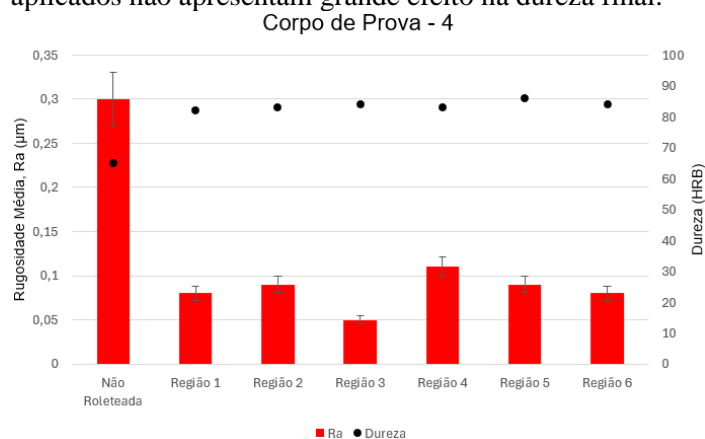


Figura 4 – Rugosidade média e dureza do CDP - 4

Na avaliação do ensaio realizado no CDP - 5, a eficácia do processo de roleteamento é corroborada. Partindo de uma rugosidade inicial $R_a = 0,30 \mu\text{m}$, o tratamento foi capaz de gerar uma superfície com $R_a = 0,06 \mu\text{m}$. Juntamente, a dureza base de 65 HRB foi significativamente elevada em todas as áreas, com destaque para a região 4, que alcançou 96 HRB. Neste teste, o gráfico de rugosidade não apresentou relação linear, inicialmente com a menor penetração obteve-se um bom acabamento, porém seguido do aumento da penetração o acabamento piorou e depois melhorou ligeiramente. Isso pode ocorrer porque uma deformação severa pode deformar o material, criando irregularidades na superfície, assim, a pequena melhora na região 4 pode indicar um novo regime de acomodação dos picos e vales de rugosidade. Por outro lado, o gráfico de dureza mostrou um aumento claro e progressivo da região 1 para a região 4. Isso ocorre porque uma maior penetração impõe uma maior deformação plástica ao material, resultando em um nível mais intenso de encruamento e consequentemente da densidade de discordâncias, aumentando então a dureza do material.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

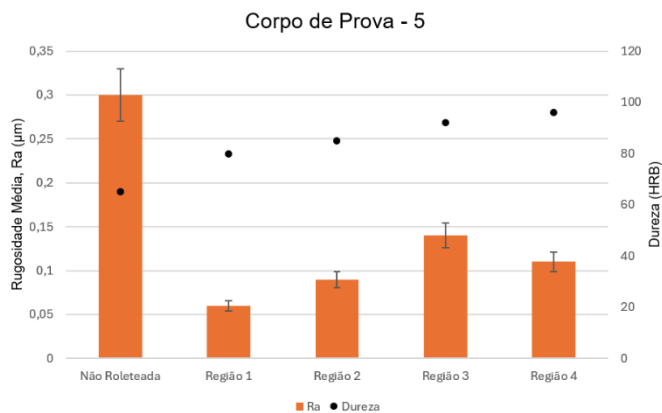


Figura 5 – Rugosidade média e dureza do CDP – 5

Conclusões

A análise comparativa entre as regiões tratadas e as áreas não tratadas permitiu visualizar a eficácia e nuances do roleteamento.

Os resultados demonstraram que o tratamento mecânico superficial de roleteamento externo é um processo eficaz para o aprimoramento da integridade superficial do material. Em todos os ensaios, a rugosidade inicial foi drasticamente reduzida. Simultaneamente, a dureza superficial foi significativamente elevada em todas as regiões roleteadas, o processo induziu um intenso nível de encruamento na camada superficial. Por meio dos resultados e análises de cada ensaio, conclui-se que:

- Utilizando uma rotação de 500 rpm, avanço de 0,053 mm/rot e variando-se a penetração da ferramenta (de 0,10 mm a 0,40 mm) e o número de passes (1 ou 2), o processo reduziu o valor médio de rugosidade em aproximadamente 63% e elevou a dureza superficial em aproximadamente 30%.
- Ao variar a rotação (de 80 a 630 rpm), mantendo o avanço em 0,053 mm/rot, obteve-se uma melhora no acabamento de 73% e um incremento de 29% na dureza superficial.
- Com a rotação fixada em 630 rpm, avanço de 0,053 mm/rot, um único passe e variando-se a penetração de 0,30 mm a 1,30 mm, notou-se uma diminuição na rugosidade média de até 80% e um aumento de 48% na dureza superficial.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo apoio financeiro através do programa PIBIC. Em especial seu corpo docente e aos técnicos dos Laboratórios de

Tecnologia Mecânica (LTM) e de Metalurgia e Materiais (LMM) pelo suporte e incentivo à realização deste trabalho.

À minha família, pela compreensão e apoio constante em minha trajetória acadêmica e profissional.

Referências

SANTOS, Filipe Figueiredo dos et al. Influência da operação de roleteamento sobre a integridade superficial do aço ABNT 1020. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, e-12651, 2020. DOI: 10.1590/S1517-707620200002.1051.

CASARIN, Joviano Janjar. Roleteamento de virabrequins. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MARTINS, Augusto Moura. Estudo experimental e numérico sobre o roleteamento do aço ABNT 4140 endurecido. 2023. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

SANTOS, Filipe Figueiredo dos. Influência do teor de carbono sobre a integridade superficial de aços submetidos à operação de roleteamento. 2019. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

CANAL, Felipe; ROCHA, Alexandre da Silva. Análise dos tratamentos duplex de Deep-rolling e nitretação a plasma em um aço bainítico avançado. Revista de Gestão e Secretariado, São José dos Pinhais, v. 15, n. 6, p. 1-19, 2024. DOI: 10.7769/gesec.v15i6.3819.