

OTIMIZAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL E DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO AÇO AISI 52100 SUBMETIDO AO PROCESSO DE ROLETEAMENTO POR ESFERAS

Fernando Júnio Duarte

Frederico de Castro Magalhães

Alexandre Mendes Abrão

Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte MG, 30270-901, Brasil.
fernandojunioduarte@ufmg.br; fredmag@demec.ufmg.br; abrao@demec.ufmg.br

Berend Denkena

Bernd Breidenstein

Kolja Meyer

Institute of Production Engineering and Machine Tools, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823, Garbsen, Germany.

denkena@ifw.uni-hannover.de; breidenstein@ifw.uni-hannover.de; kolja.meyer@tu-braunschweig.de

Oliver Maiß

ECOROLL AG Werkzeugtechnik, Germany
oliver.maiss@ecoroll.de

Resumo. No presente estudo, uma metodologia de otimização baseada em regressão múltipla visa minimizar tanto a tensão residual quanto a rugosidade induzida no aço rolamento AISI 52100 temperado e revenido (62HRC) submetido ao processo de roleteamento por esferas. O método estatístico de regressão múltipla foi empregado para o desenvolvimento de equações capazes de prever a tensão residual e a rugosidade (desvio médio aritmético R_a). Para desenvolvimento dessas equações foram realizados 18 experimentos distintos de roleteamento onde variaram-se os seguintes parâmetros: pressão, avanço, velocidade e diâmetro da esfera. Os resultados preditos por essas equações foram condizentes com os resultados obtidos experimentalmente, permitindo que as mesmas fossem empregadas como função objetivo no processo de otimização. Por meio do processo de otimização dos parâmetros de roleteamento é possível induzir tensões residuais ainda mais compressivas (34%) e valores de rugosidade R_a ainda menores (em aproximadamente 69%). Assim, por meio da seleção apropriada dos parâmetros de roleteamento, os quais são facilmente ajustáveis no equipamento empregado, é possível produzir componentes com superior resistência à fadiga.

Palavras chave: Roleteamento por esfera. Regressão múltipla. Otimização. Tensão residual. Rugosidade superficial.

1. INTRODUÇÃO

A indústria metal-mecânica exige a evolução contínua dos processos de fabricação, principalmente no que diz respeito à modernização dos equipamentos mecânicos. No entanto, tal modernização não depende somente do aspecto metalúrgico, mas também das condições da superfície e da geometria dos componentes empregados. Kukielka (1989) relata que 85% das falhas dos componentes são decorrentes das propriedades mecânicas e dos acabamentos superficiais inadequados. Variações dimensionais, rebaixos e entalhes são regiões susceptíveis à nucleação de trincas por fadiga mecânica e, caso não possam ser evitados no projeto, faz-se necessário introduzir tensões residuais compressivas nas camadas mais superficiais do componente mediante tratamentos térmicos ou mecânicos. Dentre os tratamentos mecânicos capazes de introduzir tensões residuais compressivas e melhorar o acabamento superficial simultaneamente sem a remoção de material destacam-se os processos de jateamento de granalha (*shot peening*), *laser shock peening* e o roleteamento (Nalla, *et al.* 2016).

O processo de roleteamento consiste em um sistema mecânico ou hidráulico que aplica uma pressão previamente determinada sobre a superfície de um componente por meio de esfera(s) ou rolo cilíndrico, causando deformação plástica superficial e subsuperficial e introduzindo tensões residuais compressivas em uma camada de 1-2 mm abaixo da superfície (Totten, *et al.* 2002). Mediante a deformação plástica a frio da superfície tem-se, concomitantemente, o aumento da dureza nessa região e a melhora do acabamento superficial, isto é, uma diminuição da rugosidade inicial entre 40 e 90% (Revankar, *et al.* 2014). Chien, *et al.* (2005), relatam que é possível aumentar o limite de resistência à fadiga mecânica do componente trabalhado em uma faixa que pode variar de 100% a 200% e a resistência ao desgaste por abrasão em até 98% quando comparado ao torneamento (Neema e Pandey, 1980).

Diferentes estudos (Bouzzid, *et al.* 2004; El-Khabeery, *et al.* 2001; Hassan e Al-Bsharat, 1996) demonstraram que a pressão da(s) esfera(s) ou do rolo cilíndrico, a velocidade de rotação do material, o avanço da(s) esfera(s) ou do rolo cilíndrico e o número de passes são os principais parâmetros que influenciam diretamente no estado de tensões residuais, no encruamento e na rugosidade final do material processado. No entanto, Schijve (2009) relatou que tanto as tensões residuais quanto o encruamento superficial podem diminuir a vida em serviço do componente, quer sob o efeito da temperatura ou de esforços cíclicos mecânicos, ou até mesmo uma combinação de ambos. De acordo com Kloss e Macherauch (1987), a melhora na resistência à fadiga mecânica é proveniente da tensão residual compressiva e não do encruamento do material.

A partir da segunda metade do século XX, diversos estudos experimentais e analíticos buscaram descrever a influência dos principais parâmetros de roleteamento sobre a introdução da tensão residual e a rugosidade após o processamento em superfícies perfeitamente planas, porém não apresentaram grandes progressos e inovações (Schijve, 2009). Conforme afirmam Bougharriou *et al.* (2010), os grandes avanços nos estudos das tensões residuais se deram no campo experimental, empregando-se a técnica não destrutiva da difração de raio-x, e numérico, empregando o método dos elementos finitos (Bouzzid e Saï, 2004) para mapear a profundidade e a intensidade das tensões residuais em diferentes geometrias de peça. Em decorrência de o método numérico exigir mão de obra especializada bem como *softwares* específicos além da realização da parte experimental para a validação do modelo numérico proposto, a técnica numérica é mais dispendiosa, ao contrário dos métodos estatísticos e/ou matemáticos. Na última década, têm-se observado o uso de análises estatísticas (ANOVA), modelos matemáticos e estatísticos (Método de Superfície e Resposta) e modelos computacionais (Redes Neurais) para a interpretação e predição de resultados obtidos experimentalmente, proporcionando uma visão sistêmica do processo de roleteamento de um determinado componente mecânico (Loh, *et al.* 1989). Porém, nenhum desses estudos teve como objetivo a otimização do processo, isto é, aplicar um conjunto de procedimentos matemáticos por meio dos quais se busca minimizar tanto a rugosidade final quanto a tensão residual, permitindo assim a seleção mais adequada dos principais parâmetros de roleteamento.

Tendo em vista os resultados disponíveis na literatura e devido à sua relevância industrial, o processo de roleteamento é merecedor de novos estudos para sua melhor compreensão. Assim, este trabalho tem como meta definir funções objetivo não lineares para tensão residual e rugosidade (desvio médio aritmético R_a), que em seguida serão minimizadas aplicando métodos determinísticos, também conhecidos como métodos clássicos. Para isso, testes de roleteamento por esfera foram realizados em corpos de prova do aço rolamento AISI 52100 (temperado e revenido para uma dureza de 62 HRC) variando os seguintes parâmetros: pressão (p), avanço (f_r), velocidade (v_r) e o diâmetro da esfera ($\emptyset$). Além disso, serão determinados os valores desses parâmetros que permitam a minimização da tensão residual (σ_{res}) e da rugosidade (R_a) da peça após o roleteamento.

2. METODOLOGIA

O material adotado neste trabalho foi o aço rolamento AISI 52100 no estado temperado e revenido (dureza média de 62 HRC). Depois de usar os corpos de prova com insertos de carbeto de tungstênio revestido (classe ISO P15) a uma velocidade de corte de 100 m/min, avanço de 0,05 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,1 mm, foi realizado o processo de roleteamento em um único passe utilizando um dispositivo Ecoroll HG2-HG6, capaz de exercer uma pressão hidráulica máxima de 400 bar. Neste mesmo dispositivo, é alocada uma esfera de carbeto de tungstênio cujo eixo de fixação se posiciona perpendicularmente em relação ao eixo de rotação do material a ser processado. A Figura 1(a) mostra o torneamento de um corpo de prova e a Fig. 1(b), a operação de roleteamento.

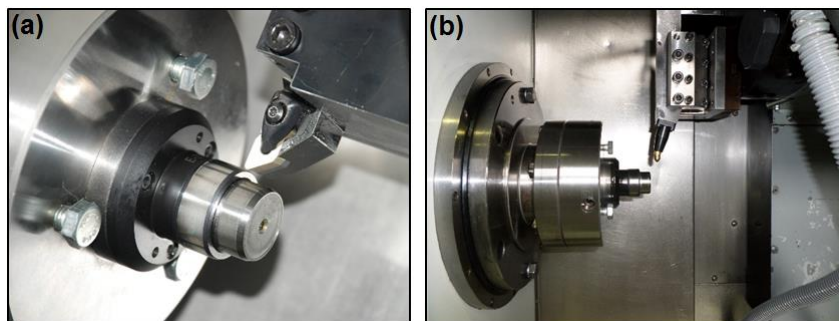


Figura 1. (a) Torneamento e (b) roleteamento do aço rolamento AISI52100.

No processo de roleteamento variaram-se a pressão hidráulica (100 – 400 bar), o avanço (0,05 – 0,2 mm/rev), a velocidade (10 - 200 m/min) e o diâmetro da esfera (2 – 6 mm), resultando em 18 testes. A lubrificação existente entre a esfera e o corpo de prova é proveniente do mesmo fluido hidráulico (viscosidade 46 mm²/s a 40°C) responsável pela pressão exercida sobre a esfera.

Após o roleteamento, a tensão residual próxima a superfície foi registrada com uso de um difratômetro de raio-x GE XRD 3003 TT com um colimador de 2 mm de diâmetro. A rugosidade (R_a) das amostras foi avaliada com um rugosímetro PGR de Mahr ajustado para um comprimento de amostragem de 0,80 mm.

A metodologia para otimização da tensão residual e da rugosidade (R_a) foi desenvolvida em função das diferentes condições de roleteamento e os seus respectivos resultados experimentais. Problemas de otimização lidam com minimização ou maximização de um objetivo geralmente expresso por uma função, conhecida como função objetivo. A função objetivo é uma função de variáveis do processo de roleteamento sobre as quais se tem controle: pressão, avanço, velocidade e diâmetro da esfera. Para a obtenção das funções objetivos da tensão residual e da rugosidade (R_a) foi empregado o método de regressão múltipla.

Em seguida foi realizada a otimização das funções objetivas através da função de conveniência, que tem sido amplamente utilizada na indústria por ser de aplicação simples e flexível (Derringer e Suich, 1980). Neste trabalho, o objetivo é encontrar os valores ótimos para cada um dos parâmetros de roleteamento (variáveis dependentes) que minimizem tanto a tensão residual quanto a rugosidade de forma independente. O *software* Minitab v17 foi empregado tanto para a obtenção das funções objetivos quanto para sua otimização.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Inicialmente são apresentados os resultados experimentais relacionados à tensão residual e a rugosidade induzidas no aço AISI 52100 (temperado e revenido para 62 HRC) submetido ao processo de roleteamento por esfera em um único passe, onde variaram-se os parâmetros da pressão, do avanço, da velocidade e do raio da esfera. Baseados nesses resultados são geradas as funções objetivos e os valores ótimos dos parâmetros que permitam a minimização das tensões residuais (σ_{res}) e a rugosidade (R_a).

3.1. Resultados e discussão

Para a realização deste estudo foram realizados 18 testes de roleteamento sob condições distintas, empregando um dispositivo de roleteamento com uma única esfera de carbeto de tungstênio, vide Fig.1(b). Os resultados estão dispostos na Tab. 1. Estes experimentos foram escolhidos de maneira que a tensão residual e a rugosidade pudessem ser avaliadas, possibilitando a análise da influência da pressão (p), avanço (f_r), velocidade (v_r), diâmetro da esfera ($\emptyset$) sobre os resultados.

Tabela 1. Condições de roleteamento empregadas e os seus respectivos resultados experimentais.

Experimento	P (bar)	f_r (mm/rev)	v_r (m/min)	$\emptyset$ (mm)	σ_{res} (bar)	R_a (μ m)
1	400	0,05	10,00	6	-1140	0,068
2	200	0,15	200,00	6	-861	0,123
3	200	0,15	10,00	4	-1000	0,140
4	300	0,10	136,67	6	-1060	0,087
5	350	0,15	136,67	3	-1110	0,139
6	300	0,05	200,00	4	-929	0,104
7	100	0,15	73,33	6	-505	0,174
8	100	0,20	136,67	4	-560	0,143
9	100	0,05	200,00	3	-566	0,188
10	300	0,20	10,00	3	-900	0,282
11	350	0,05	73,33	4	-1000	0,091
12	100	0,10	10,00	2	-577	0,201
13	350	0,20	200,00	2	-666	0,328
14	200	0,20	73,33	6	-839	0,220
15	200	0,05	136,67	2	-788	0,116
16	350	0,10	200,00	4	-1170	0,069
17	300	0,15	73,33	2	-808	0,208
18	200	0,10	136,67	3	-742	0,156

Os gráficos das Figuras 2 e 3 mostram os efeitos dos parâmetros de roleteamento tanto na indução das tensões residuais, quanto na rugosidade.

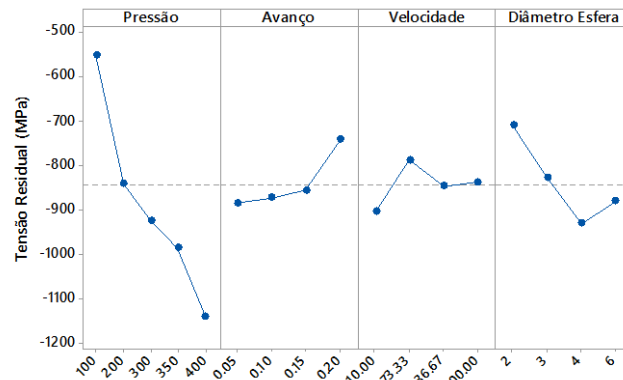


Figura 2. Efeitos principais dos parâmetros na indução das tensões residuais (σ_{res}).

Observa-se na Figura 2 que a pressão é o fator mais relevante na indução de tensão residual, uma vez que sua curva é mais inclinada. Já a velocidade não é tão influente, pois a inclinação da linha é mais horizontal.

Por meio do gráfico da Figura 3 nota-se que o avanço seguido da pressão são os fatores mais influentes sobre a rugosidade das peças roleteadas. Vale ressaltar que os gráficos das Figuras. 2 e 3 não mostram o efeito das interações entre os parâmetros de roleteamento nas gerações das tensões e rugosidades.

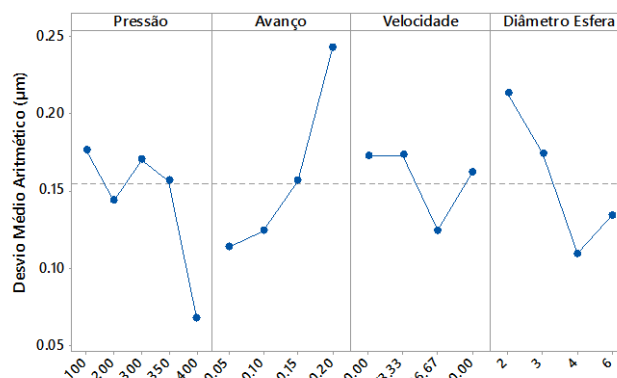


Figura 3: Efeitos principais dos parâmetros na rugosidade (R_a).

3.2. Efeito da Pressão de Roleteamento

De acordo com Altemberger (2011), dentre os parâmetros escolhidos para este trabalho, a pressão (força de roleteamento) é certamente a mais influente na indução da tensão residual. É primordial que seja determinada a pressão normal ótima (força de roleteamento) para cada aplicação do componente. Como esse parâmetro é muito significativo, um valor otimizado de pressão aumenta a resistência à fadiga do material processado. Para pressão minimizada (baixa pressão) o efeito da resistência à fadiga não é pronunciado e para pressão maximizada (alta pressão) podem ocorrer microfissuras na superfície. Assim como a tensão residual, Loh e Tam (1988) relataram que há uma condição ótima da pressão para obtenção da menor rugosidade e que esta depende de cada material a ser processado.

3.3. Efeito do Avanço de Roleteamento

Quase todos os estudos experimentais que investigaram a rugosidade após o roleteamento por esferas verificaram que o aumento do avanço acarreta maior rugosidade, porém diminui o tempo de processamento o material. Desta forma, faz-se necessário encontrar um ponto de equilíbrio entre produtividade e qualidade superficial do produto final. Conforme afirmam Rodriguez *et al.* (2012), a tensão residual próxima à superfície do material não é afetada pelo avanço da esfera para uma pressão (força de roleteamento) constante. Considerando-se apenas a tensão residual, o processo de roleteamento pode ser realizado usando o maior valor do avanço permitido pelo equipamento.

3.4. Efeito da Velocidade de Roleteamento

A influência da velocidade de roleteamento sobre a rugosidade foi estudada por Zhang *et al.* (2014) e Loh e Tam (1988), que relataram que a rugosidade é inversamente proporcional à velocidade de roleteamento, isto é, baixas velocidades de roleteamento promovem o aumento da rugosidade do componente e vice-versa. Assim, do ponto de vista

da rugosidade da superfície, recomenda-se o uso da maior velocidade de roleteamento permitida pelo equipamento. Conforme citam Abrão *et al.* (2014), a velocidade de roleteamento não é capaz de modificar os valores da tensão residual próxima à superfície, portanto, considerando-se a rugosidade e a tensão residual, torna-se exequível roletear a superfície de um determinado componente mecânico usando a velocidade máxima permitida pelo equipamento para aumentar a sua produtividade.

3.5. Efeito do Diâmetro da Esfera

Em decorrência da escassez de estudos experimentais e numéricos sobre a influência do diâmetro da esfera sobre a tensão residual e a rugosidade, fez-se o uso da técnica da regressão múltipla para determinar modelos (função) dessas variáveis em relação aos parâmetros de roleteamento destacados na Fig. 2. Foi possível observar por meio da regressão múltipla que a velocidade não é significativa, sendo por isso desprezada na função apresentada na Eq. (1), a qual apresenta o modelo final obtido pela regressão múltipla para a tensão residual (MPa).

$$\sigma_{res} = -399 - 0,197.p - 1979.fr - 11,9.\emptyset + 22276.fr^2 + 30,18.\emptyset^2 - 0,540.p.\emptyset - 1090.fr.\emptyset \quad (1)$$

Conforme observado por Abrão *et al.* (2014), a velocidade de roleteamento não influencia a tensão residual, indicando a coerência da Eq. (1) (ausência desse parâmetro). A Figura 4 mostra o relatório de regressão múltipla para o modelo da tensão residual obtido.

De posse das informações apresentadas na Fig. 4 constatou-se que a relação existente entre a tensão residual e os parâmetros de roleteamento e suas combinações foram estaticamente significativos, uma vez que, os valores de p do presente modelo foram menores do que 0,10. Outro dado relevante diz respeito à capacidade da Eq. (1) em descrever em 95,04% (coeficiente de correlação R^2) o comportamento da tensão residual (σ_{res}). Dessa forma, a Equação (1) se ajusta bem aos dados obtidos experimentalmente, podendo ser empregada para prever a tensão residual (σ_{res}) para valores específicos dos parâmetros de roleteamento, ou até mesmo para encontrar combinações desses parâmetros que correspondam a um valor desejado ou a uma amplitude de valores para a tensão residual (σ_{res}).

Sumário do Modelo						
S	R ²	R ² (aj)	R ² (pred)			
58,6225	95,04%	91,88%	82,25%			
Coeficientes Codificados						
Termo	Coef	Coef	EP de	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	-997,1	28,3		-35,21	0,000	
Pressão	-353,3	31,1		-11,36	0,000	2,21
Avanço	-57,7	26,9		-2,14	0,055	2,12
Diâmetro Esfera	-83,2	19,0		-4,38	0,001	1,06
Avanço*Avanço	125,3	31,0		4,05	0,002	1,04
Diâmetro *Diâmetro	120,7	31,2		3,87	0,003	1,07
Pressão*Diâmetro	-161,9	38,6		-4,19	0,002	1,92
Avanço*Diâmetro	-163,5	38,2		-4,28	0,001	2,18
Equação de Regressão em Unidades Não codificadas						
Tensão Residual = - 399 - 0,197 Pressão - 1979 Avanço - 11,9 Diâmetro Esfera + 22276 Avanço*Avanço + 30,18 Diâmetro Esfera*Diâmetro Esfera - 0,540 Pressão*Diâmetro Esfera - 1090 Avanço*Diâmetro Esfera						

Figura 4. Relatório da regressão multivariada para tensão residual (σ_{res}).

Visando a aplicabilidade da Equação (1) na predição das tensões residuais e como função objetivo para a otimização, fez-se uma comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os preditos por essa equação. Essa comparação está representada de forma gráfica na Fig. 5.

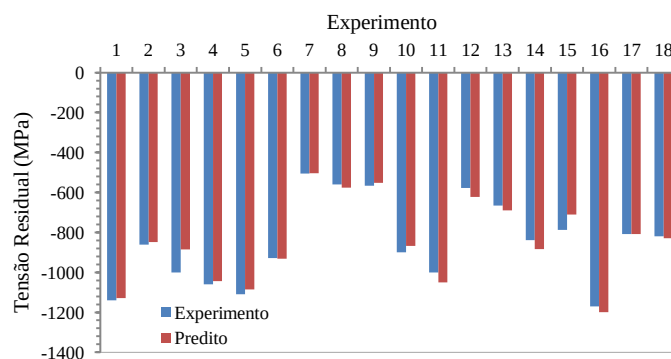


Figura 5. Comparação entre os valores experimentais e preditos para tensão residual (σ_{res}).

Pelo gráfico da Figura 5 nota-se que além de descrever os perfis das tensões residuais para as diferentes condições de roleteamento, a Eq. (1) foi capaz de prever valores próximos aos experimentais. O maior erro relativo foi de 11,52 % para o experimento nº 3, no qual o valor predito pela Eq. (1) foi inferior ao valor experimental. Esta diferença se deve ao coeficiente de correção R^2 da Eq. (1). Para melhorar a exatidão da Equação (1), sugere-se aumentar o número de experimentos.

A Equação (2) mostra o modelo final obtido pela regressão múltipla para o desvio médio aritmético (rugosidade R_a).

$$R_a = 0,4524 - 0,000973.p - 3,543.fr - 0,000219.vr + 9,61.fr^2 + 0,00774.p.fr \quad (2)$$

É possível observar que o diâmetro da esfera não é estatisticamente significativo para rugosidade e por isso foi desprezado. A Figura 6 mostra o relatório de regressão múltipla para o modelo da rugosidade.

Sumário do Modelo					
S	R ²	R ² (aj)	R ² (pred)		
0,0296189	87,10%	82,14%	70,18%		
Coeficientes Codificados					
Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	0,1357	0,0108	12,61	0,000	
Pressão	-0,0007	0,0109	-0,06	0,049	1,06
Avanço	0,05969	0,00951	6,28	0,000	1,04
Velocidade	-0,02079	0,00987	-2,11	0,055	1,11
Avanço*Avanço	0,0541	0,0156	3,48	0,004	1,03
Pressão*Avanço	0,0871	0,0146	5,98	0,000	1,13
Equação de Regressão em Unidades Não codificadas					
Rugosidade Superficial (R _a) = 0,4525 - 0,000973 Pressão - 3,543 Avanço - 0,000219 Velocidade + 9,61 Avanço*Avanço + 0,00774 Pressão*Avanço					

Figura 6. Relatório da regressão multivariada para rugosidade (R_a).

A Equação (2) indica que o parâmetro diâmetro da esfera não influencia estatisticamente a rugosidade (R_a) do material processado, o que é uma novidade, pois não há estudos experimentais e numéricos que comprovem esta afirmativa. O modelo de regressão da Equação (2) é capaz de descrever em 87,10% (coeficiente de correlação R^2) a variação da rugosidade (R_a) e que a relação entre a rugosidade (R_a) com os parâmetros de roleteamento por esfera e as suas interações foi estaticamente significativa (valor- $p < 0,10$). Mediante estas análises, a Eq. (2) pode ser empregada para prever a rugosidade (R_a) para valores específicos dos parâmetros de roleteamento, ou até mesmo para encontrar combinações desses parâmetros que correspondam a um valor desejado ou a uma amplitude de valores para a rugosidade (R_a).

Assim como a Equação (1), a aplicabilidade da Eq. 2 foi verificada na predição da rugosidade (R_a) e o seu uso como função objetivo para a otimização. Para isso, fez-se uma comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os preditos. Essa comparação está retratada de forma gráfica na Fig. 7.

O gráfico da Fig. 7 mostra que além de descrever os perfis das rugosidades (R_a) para as diferentes condições de roleteamento, a Eq. (2) foi capaz de prever valores próximos aos experimentais.

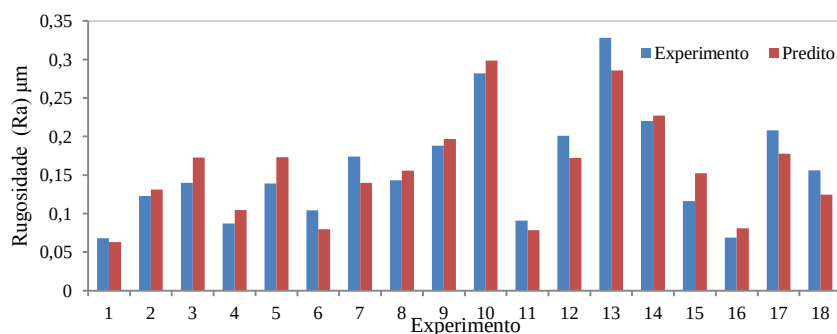


Figura 7. Comparação entre os valores experimentais e preditos para rugosidade (R_a).

O maior erro relativo foi de 24,56 % para o experimento nº 5, sendo que o valor predito pela Eq. (2) foi superior ao valor experimental. Essa diferença pode ser atribuída ao coeficiente de correlação $R^2=0,871$. De forma análoga à tensão residual, a exatidão da Eq. (2) pode ser melhorada com o aumento do número de experimentos.

Em decorrência dos valores preditos pelas Equações (1) e (2) serem próximos aos valores experimentais e acompanharem os perfis experimentais, estas equações foram adotadas como funções objetivos para o processo de otimização.

3.6. Otimização

Apesar do método adotado pelo Minitab v17 não ser de otimização direta (Mukherjee e Ray, 2008), este método foi empregado para se otimizar (minimizar) tanto a tensão residual quanto a rugosidade em função de múltiplos parâmetros de entrada (pressão, avanço, velocidade e diâmetro da esfera) devido à sua simplicidade. As restrições utilizadas durante o processo de otimização da tensão residual e da rugosidade estão resumidas na Tab. 2.

Tabela 2. Restrições para otimização da tensão residual e da rugosidade

	Parâmetro	Limite inferior	Limite superior
Tensão Residual	Pressão (p)	100 bar	400 bar
	Avanço (f_r)	0,05 mm/rev	0,2 mm/rev
	Diâmetro esfera ($\varnothing$)	2 mm	6 mm
Rugosidade	Pressão (p)	100 bar	400 bar
	Avanço (f_r)	0,05 mm/rev	0,2 mm/rev
	Velocidade (v_r)	10 m/min	200 m/min

A Figura 8 mostra o resultado da predição da tensão residual para os valores ótimos dos parâmetros de roleteamento. O menor valor da tensão residual (mais compressiva) predito foi de -1572,42 MPa empregando-se os seguintes parâmetros: pressão de 400 bar, avanço de 0,19 mm/rev e diâmetro de esfera de 6 mm.

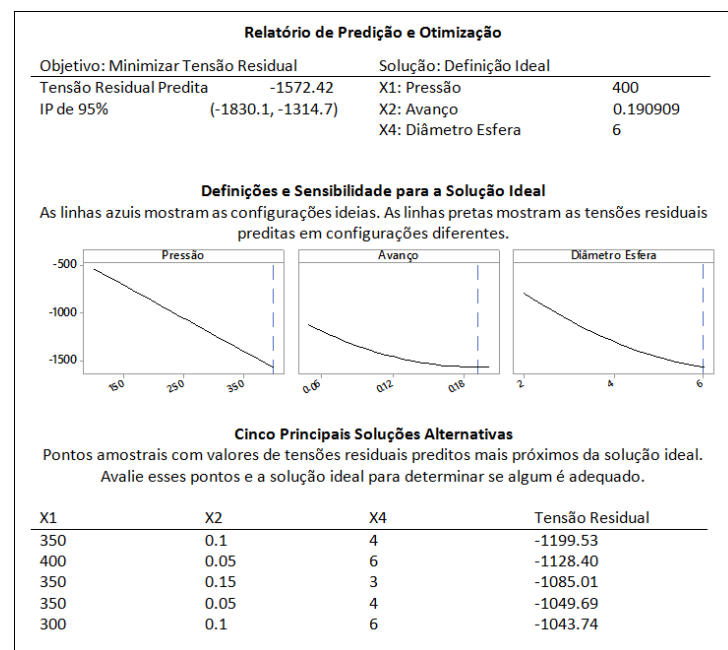


Figura 8. Condições ótimas dos parâmetros para a minimização da tensão residual (σ_{res}).

Comparando o valor minimizado (predito) da tensão residual (-1572,42 MPa) com o menor valor obtido experimentalmente (-1170 MPa, vide Tab. 1) é exequível melhorá-la em 34% (-402,42 MPa), o que é bem significativo em termos de resistência à fadiga mecânica e que demonstra a importância dos estudos de otimização nos processos de fabricação. Ressalta-se que esse valor predito é possível de ser obtido experimentalmente, uma vez que os parâmetros empregados são facilmente ajustáveis no dispositivo de roleteamento utilizado. Além disso, é possível observar outras cinco possíveis soluções para obtenção de distintas tensões superficiais.

A Figura 9 mostra o resultado da predição da rugosidade (R_a) para os valores ótimos dos parâmetros de roleteamento. Um dos objetivos do processo de roleteamento por esfera é a obtenção da rugosidade superficial (R_a) desejada do material empregando valores ótimos dos principais parâmetros. Neste trabalho, a menor rugosidade é a mais adequada.

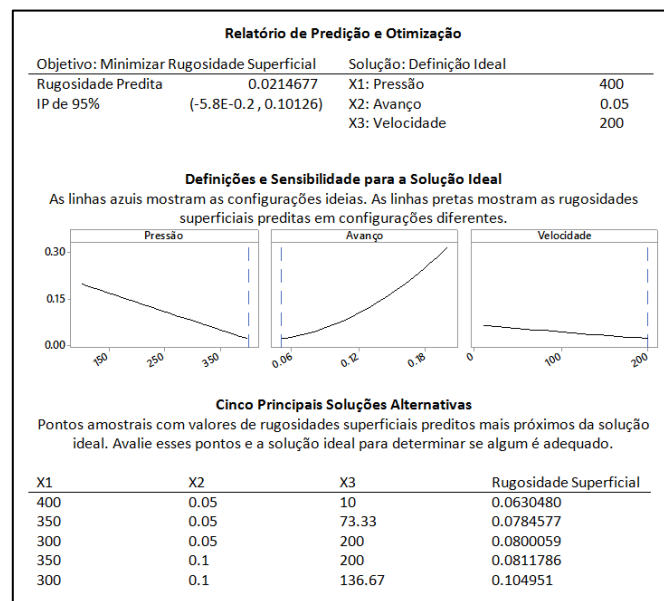


Figura 9. Condições ótimas dos parâmetros de roleteamento para a minimização da rugosidade (R_a).

Com base nas informações apresentadas na Fig. 9 infere-se que é possível obter uma rugosidade (R_a) igual a 0,021 μm empregando os seguintes valores ótimos dos parâmetros: pressão de 400 bar, avanço de 0,05 mm/rev e velocidade de 200 m/min. Comparando o valor minimizado (predito) da rugosidade com o menor valor obtido experimentalmente ($R_a=0,068 \mu\text{m}$, vide tabela 1) é possível melhorá-la em 69%, ou seja, uma diferença de 0,047 μm , o que é bem significativo em termos da qualidade final e da resistência à fadiga mecânica e à corrosão (aspecto polido da superfície), novamente demonstrando a importância de estudos sobre a otimização de processos de fabricação.

De forma análoga à observada no caso da tensão residual, é possível se obter experimentalmente o valor predito de $R_a=0,021 \mu\text{m}$, uma vez que os parâmetros empregados são facilmente ajustáveis no equipamento empregado. Também é possível observar outras cinco possíveis soluções para a rugosidade (R_a).

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo experimental do processo de roleteamento do aço rolamento AISI 52100 temperado e revenido, no qual tensão residual e rugosidade foram avaliadas sob dezoito condições distintas. Para isso, foram alterados os principais parâmetros de roleteamento, a saber: pressão, avanço, velocidade e diâmetro da esfera. Mediante aos resultados experimentais, foram propostas funções que descrevem a tensão residual e a rugosidade por meio de regressão múltipla e em seguida suas otimizações foram realizadas. Por meio da metodologia proposta pode-se concluir:

- Pressão, avanço e diâmetro da esfera são os fatores que estatisticamente afetam tensão residual, ao passo que pressão, avanço e velocidade de roleteamento são os parâmetros significativos para rugosidade.
- As equações da tensão residual e da rugosidade obtidas pelo método estatístico da regressão múltipla foram capazes de descrever o comportamento e de prever valores próximos aos observados experimentalmente para tensão residual e rugosidade. Além disso, a obtenção dessas equações possui duas características importantes para a área de engenharia: baixo custo computacional e uma representação satisfatória do processo.
- Apesar dos erros relativos de 11,52% para a tensão residual e 24,56% para a rugosidade, os valores preditos pelas equações da tensão residual e da rugosidade descreveram satisfatoriamente os experimentos. Por isso, estas equações foram aplicadas como funções objetivos para o processo de otimização.
- Por meio do processo de otimização dos parâmetros de roleteamento torna-se exequível induzir tensões residuais ainda mais compressivas (em 34%) e rugosidade cerca de 69% menor no aço rolamento AISI 52100, alterando os principais parâmetros de roleteamento e proporcionado assim o melhor aproveitamento do processo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa CAPES/DFG BRAGECRIM (Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura) pelo apoio ao projeto nº 029/14 - *Influência do processo de fabricação sobre o subsequente alívio da tensão residual no aço ABNT 4140 durante carregamentos cíclicos* e ao *Deutsche Forschungsgemeinschaft* - DFG pelo apoio ao projeto SPP1551 - *Resource Efficient Machine Elements*.

6. REFERÊNCIAS

- Abrão, A.M., Denkena, B., Köhler, J., Breidenstein, B., Mörke, T., Rodrigues, P.C.M., 2014. “The influence of heat treatment and deep rolling on the mechanical properties and integrity of AISI 1060 steel”. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 214, 3020-3030.
- Altenberger, I., 2005. “Deep Rolling – The Past, the present and the future” In *9th International Conference on Shot Peening - ICSP9*. Marne la Vallée, France.
- Bougharriou, A., Bouzid, W.S., Saï, K., 2010. “Prediction of surface characteristics obtained by burnishing”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.51(1), p. 205-215.
- Bouzid, W.S., Tsoumarev, O., Saï, K., 2004. “An investigation of surface roughness of burnished AISI 1042 steel”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, p. 120-125.
- Bouzid, W.S., Saï, K., 2005. “Finite element modeling of burnishing of AISI 1042 steel”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.25, p. 460-465.
- Chien, W.Y., Pan J., Close D., Ho S., 2005. “Crankshaft fatigue crack propagation analysis with consideration of residual stresses”. *International Journal of Fatigue*, Vol. 27, p. 1-19.
- Derringer, G.C., Suich, R., 1980. “Simultaneous optimization of several response variables”. *Journal of Quality Technology*, Vol. 12, p. 214-219.
- El-Khabeery, M.M., Al-Axir, M.H., 2001, Experimental techniques for studying the effects of roller-burnishing parameters on surface integrity. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, p. 992-998.
- Hassan, A.M., Al-Bsharat, A.S., 1996, “Influence of burnishing process on surface roughness, hardness and microstructure of some non-ferrous metals”. *Wear*, Vol. 199, p. 1-8.
- Kloos, K.H., Macherauch, E., 1987. “Development of mechanical surface strengthening processes from the beginning until today”. In *3th International Conference on Shot Peening - ICSP3*. Garmisch-Partenkirchen, Germany.
- Kukielka, L., 1989. “Designating the field areas for the contact of a rotary burnishing element with the rough surface of a part, providing a high-quality product”. *Journal of Mechanical Working Technology*, Vol.19, p. 319-356.
- Loh, N.N., Tam, S.C., 1988, “Effects of ball burnishing parameters on surface finish: A literature survey and discussion”. *Precision Engineering*, Vol. 10, n. 4, p. 215-220.
- Loh, N.N., Tam, S.C., Miyazawa, S., 1989. “Statistical analyses of the effects of ball burnishing parameters on surface hardness”. *Wear*, Vol. 129, p. 235.
- Mukherjee, I., Ray, P.K., 2008. “Optimal process design of two-stage multiple responses grinding processes using desirability functions and metaheuristic technique”. *Applied Soft Computing*, Vol. 8, p. 402-421.
- Nalla, R.K., Altenberger, I., Noster, U., Liu, G.Y., Scholtes, B., Ritchie, R. O., 2003, “On the influence of mechanical surface treatments – deep rolling and laser shock peening – on the fatigue behaviour of Ti-6Al-4V at ambient and elevated temperatures”. *Materials Science and Engineering*, Vol. A355, p. 216-230.
- Neema, M.L., Pandey, P.C., 1980. “Investigation of the performance characteristics of cold-worked machined surfaces”. *Wear*, Vol. 60, p. 157-166.
- Revankar, G.D., Shetty, R., Roa, S.R., Gaitonde, V.N., 2014. “Analysis of surface roughness and hardness in ball burnishing of titanium alloy”. *Measurement*, Vol. 58, p. 256-268.
- Rodriguez, A., Lopez de Lacalle, L.N., Celaya, A., Lamikiz, A., Albizuri, J., 2012, “Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique”. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 2016, n.11-12, p. 2817-2824.
- Schijve, J., 2009. *Fatigue of Structures and Materials*. Kluwer Academic Publishers, 3ª edição, p. 71-83.
- Totten, G.E., Howes, M., Inoue, T., 2002, *Handbook of residual stress and deformation steel*, ASM International, The Materials Information Society, Materials Park, Ohio 44073-0002.
- Zhang, T., Bugtai, N., Marinescu, I.O., 2014, “Burnishing of aerospace alloy: A theoretical-experimental approach”. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 37, p. 472-478.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

OPTIMIZATION OF THE RESIDUAL STRESS AND SURFACE ROUGHNESS OF AISI 52100 STEEL SUBJECTED TO DEEP ROLLING

Fernando Júnio Duarte

Frederico de Castro Magalhães

Alexandre Mendes Abrão

Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte MG, 30270-901, Brazil.

fernandojunioduarte@ufmg.br; fredmag@demec.ufmg.br; abrao@demec.ufmg.br

Be rend Denkena

Bernd Breidenstein

Kolja Meyer

Institute of Production Engineering and Machine Tools, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823, Garbsen, Germany.

denkena@ifw.uni-hannover.de; breidenstein@ifw.uni-hannover.de; kolja.meyer@tu-braunschweig.de

Oliver Maiß

ECOROLL AG Werkzeugtechnik, Germany

oliver.maiss@ecoroll.de

Abstract. *In the present study, an optimization methodology based on multiple regression aims to minimize both the residual stress and the surface roughness induced in hardened AISI 52100 bearing steel (62HRC) subjected to deep rolling. In order to develop equations capable of predicting residual stress and surface roughness (arithmetic mean deviation R_a), a statistical method based on multiple regression was employed. For the development of these equations, 18 different deep rolling experiments were carried out in which the following parameters were varied: pressure, feed, speed and ball diameter. The predicted results were consistent with the results obtained experimentally, allowing the former to be used as an objective function in the optimization procedure. Through optimization of the deep rolling parameters, it is possible to induce compressive residual stresses of higher intensity (34%) and lower surface roughness (approximately 69%). Thus, through the appropriate selection of the deep rolling parameters, which are easily adjusted in the equipment used, it is possible to produce components with superior fatigue resistance.*

Keywords: *Deep rolling. Multiple regression. Optimization. Residual stress. Surface roughness.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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