

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE CIÊNCIAS APLICADAS



CAROLINE ALMEIDA PEGORARO ISABELLA VINHA ALVES LAYCE MICHAELA ANDREUCCI CASTILHO

UM ESTUDO SOBRE O PROCESSO DE BRUNIMENTO POR ROLOS A PARTIR DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE CIÊNCIAS APLICADAS

CAROLINE ALMEIDA PEGORARO ISABELLA VINHA ALVES LAYCE MICHAELA ANDREUCCI CASTILHO

UM ESTUDO SOBRE O PROCESSO DE BRUNIMENTO POR ROLOS A PARTIR DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção dos títulos de Bacharel em Engenharia de Manufatura e Engenharia de Produção, à Faculdade de Ciências Aplicadas da Universidade Estadual de Campinas.

Orientadores: Dra. Alessandra Cremasco;

Dr. Daniel Iwao Suyama; Dr. Jaime Hideo Izuka.

LIMEIRA - SP DEZEMBRO, 2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaríamos de agradecer a **Deus**, por nos ter dado saúde e força para superar as dificuldades.

À nossa família e amigos pelo apoio e incentivo em todos os momentos.

Aos nossos orientadores, Dra. **Alessandra Cremasco**, Dr. **Daniel Iwao Suyama**, Dr. **Jaime Hideo Izuka** pelo suporte no desenvolvimento do presente trabalho.

À empresa **Hanna Tools** pela colaboração e assistência durante a evolução do estudo.

Enfim, agradecemos a todas as pessoas que fizeram parte dessa etapa importante em nossas vidas.

RESUMO

O presente projeto teve como objetivo realizar a análise de um processo de brunimento interno por rolos a partir de simulações computacionais no software Ansys. As simulações se basearam em um ensaio experimental realizado para a empresa Hanna em Limeira-SP e ainda, foram divididas em quatro entregas: Acoplamento; Furo-Eixo; Furo-Rolete; e por fim, Rugosidade. O material utilizado para as amostras a serem brunidas era de Aço 4140, enquanto o brunidor possuía um material de Aço Rápido Temperado e Revenido. Os valores de interferência do brunidor variaram entre 0,01 e 0,13 mm. A simulação de Acoplamento teve como objetivo servir como parâmetro para outras simulações, uma vez que para ocorrer a conformação plástica da amostra e o deslocamento do brunidor, a tensão desse deveria ser maior que a de fixação por acoplamento do brunidor-amostra. A simulação de Interferência Furo-Eixo foi realizada por LoadSteps e representou a simplificação do brunidor-amostra: a utilização de 52 steps aproximou a simulação com o deslocamento real da peça dado o avanço de 0,5 mm/rev. Em relação ao Furo-Rolete, pode-se ter uma melhor visualização das tensões geradas pelo rolete dos brunidores para cada interferência. Para estas simulações, verificou-se que, assim como esperado, conforme houve o aumento da interferência pelo brunidor na amostra, maior foi a tensão máxima equivalente de Von-Mises. Por fim, a simulação de Rugosidade foi realizada para encontrar a magnitude do intervalo de forças que aproximava a deformação computacional com a deformação pelo ensaio experimental. Para este, foi encontrado uma faixa de valores de força entre 4 e 4,5 kN.

Palavras-Chave: brunimento por rolos; simulação; acabamento superficial.

ABSTRACT

The present project aimed to perform the analysis of an internal roller-burnishing process using computer simulations in the Ansys software. The simulations were based on an experimental test carried out for the *Hanna* company in Limeira-SP and were further divided into four sprints: Coupling; Hole-Axis; Hole-Roller; and finally, Roughness. The material used for the samples to be burnished was 4140 Steel, while the burnisher had a Tempered and Quenching Rapid Steel material. The brunishing interference values varied between 0.01 and 0.13 mm. The Coupling simulation aimed to serve as a parameter for other simulations, since in order for the plastic conformation of the sample and the displacement of the burnishing machine to occur, the tension of this should be greater than that of fixation by coupling the burnisher-sample. The Hole-Axis Interference simulation was performed by LoadSteps and represented the simplification of the burnisher-sample machine: the use of 52 steps brought the simulation closer to the real displacement of the burnisher given the 0.5 mm / rev feed. Regarding the Hole-Roller, it is possible to have a better view of the tensions generated by the burnishing roller for each interference. For these simulations, it was found that, as expected, an increase in the burnisher's interference in the sample implied higher maximum equivalent Von-Mises tensions.. Finally, the roughness simulation was performed to find the magnitude of the force range that approximated the computational strain with the strain by the experimental test. For this, a range of force values between 4 and 4.5 kN was found.

Keywords: roller-burnishing; simulation; surface finishing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Diagrama de Peixe do Processo de Brunimento
Figura 2	Brunidor de Rolo Hanna Tools
Figura 3	Representação da Distribuição da Tensão Residual no Processo de Brunimento
por Rolos	15
Figura 4	Geometria da Amostra 1 utilizada para a Simulação de Acoplamento
Furo-Éixo	19
Figura 5	Geometria e Malha da Amostra 1 - comprimento 13 mm - para a Simulação
Furo-Eixo	
Figura 6	Geometria Base Furo-Rolete
Figura 7	Geometria e Malha da Simulação da Rugosidade22
Figura 8	Gráfico de Tensão pela Interferência para a Simulação de Acoplamento23
Figura 9	Gráfico de Deslocamento pela Interferência para a Simulação de
Acoplamento.	
Figura 10	Gráfico de Interferência por Tensão para a Simulação Interferência
Furo-Eixo	
Figura 11	Gráfico de Tensão e Força por Interferência para a Simulação Interferência
Furo-Rolete	
Figura 12	Gráfico de Deformação por Interferência para o Ensaio de Rugosidade28
Figura 13	Gráfico de Deformação por Força resultante da Simulação de Rugosidade29
Figura 14	Gráfico da Força e Deformação pela Interferência para a Simulação de
Rugosidade	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Comparação valores teóricos e simulados para o acoplamento	24
Tabela 2	Valores Sumarizados de Rugosidade e Deformação	27
Tabela 3	Compilação dos Resultados da Simulação da Rugosidade	28
Tabela 4	Compilação dos Valores de Força pela Interpolação	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MEV Microscópio Eletrônico de Varredura

MEF Metodologia de Elementos Finitos

MSR Metodologia de Superfície de Resposta

LISTA DE SÍMBOLOS

Ki Coeficiente Elástico Interno

Ke Coeficiente Elástico Externo

vi Coeficiente de Poisson do Eixo

ve Coeficiente de Poisson do Furo

deixo Diâmetro do Eixo

di Diâmetros Internos do Eixo

de Diâmetros Externos do Eixo

Di Diâmetros Internos do Cubo

De Diâmetros Externos do Cubo

Qi Fator Geométrico Interno

Qe Fator Geométrico Externo

δ Interferência Diametral Total

Zmín Interferência Mínima

Zmáx Interferência Máxima

E Módulo de Young

p Pressão

pmin Pressão Mínima

pmáx Pressão Máxima

Ra Rugosidade Média do Perfil

r Raio Nominal da Interface entre as Peças

ri Raio Interno do Eixo Vazado

r0 Raio Externo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1. Brunimento por Roletes	14
3.2. Integridade Superficial	14
3.3 Rugosidade	16
3.4. Interferência Furo-Eixo.	16
4. METODOLOGIA	18
4.1. Simulação Acoplamento Furo-Eixo.	18
4.2. Simulação Interferência Furo-Eixo (LoadSteps)	19
4.3. Simulação Interferência Furo-Rolete (LoadSteps)	20
4.4. Simulação Rugosidade	21
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
5.1. Simulações Computacionais.	23
5.1.1. Acoplamento Furo-Eixo.	23
5.1.2. Interferência Furo-Eixo (LoadSteps)	24
5.1.3. Interferência Furo-Rolete (LoadSteps)	26
5.1.4. Rugosidade	27
6. CONTINUAÇÃO DA PESQUISA	30
6.1. Simulações Computacionais.	30
6.2. Metodologia de Superfície de Resposta.	31
6.3. Ensaios Experimentais.	31
7. CONCLUSÕES FINAIS	
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
ANEXO 1: RESULTADOS COMPILADOS DAS SIMULAÇÕES DE ACOPLAME	NTO
FURO-EIXO.	37
ANEXO 2: RESULTADOS COMPILADOS DAS SIMULAÇÕES DE INTERFERÊN	NCIA
FURO-EIXO	37
ANEXO 3: RESULTADOS COMPILADOS DAS SIMULAÇÕES DE INTERFERÊN	NCIA
FURO-ROLETE	37

1. INTRODUÇÃO

O processo de brunimento por rolos consiste em uma técnica de acabamento de superfícies a frio, sem remoção plástica de material (GUERREIRO, 2015; HANNA TOOLS, s.d.). De forma sucinta, os rolos polidos do brunidor, feitos de qualquer material acima de 40 Rockwell "C", desde que mais duro que a peça brunida (GERREIRO, 2015), entram em contato, por interferência, com a superfície irregular do componente, gerando uma alta pressão que leva o material a exceder seu ponto de escoamento, conformando-o plasticamente. O processo de deformação plástica faz com que o metal da superfície usinada seja deslocado das saliências preenchendo as depressões, conduzindo a melhora do acabamento superfícial da peça (EL-AXIR, 2000). Além disso, o brunimento por rolos também proporciona favoráveis tensões residuais compressivas e aumento da dureza, promovendo maior vida útil à fadiga para o componente (YEN et. al, 2005). Diversos são os parâmetros envolvidos no processo de brunimento por rolos (Figura 1), o que torna mais difícil sua otimização, justificando, assim, a quantidade de estudos presentes na literatura neste âmbito (MAHESHWARI et. al, 2017).

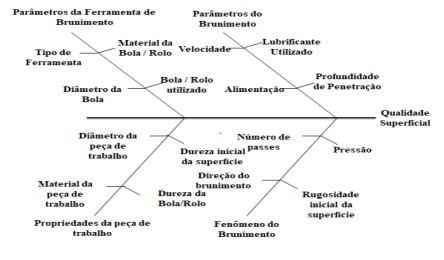


Figura 1: Diagrama de Peixe do Processo de Brunimento.

Fonte: MAHESHWARI et. al, 2017 - Adaptado.

Por meio da simulação pode-se realizar análises estruturais, proporcionando otimização e melhora do controle de qualidade de projetos de engenharia (ESSS, 2020). Um dos métodos utilizados em *softwares* para simulação é a Metodologia de Elementos Finitos (MEF), que consiste na discretização de pequenas partes interligadas de uma região permitindo a aplicação de condições de contorno e cargas para análises complexas de estruturas (SANCHEZ, 2001). As conexões entre os elementos são denominadas nós, cujos

graus de liberdade viabilizam deslocamentos e rotações (AZEVEDO, 2003). O MEF é utilizado para resolver problemas de engenharia por meio de análises computacionais que criam funções de interpolação para simplificar o comportamento de uma região infinita de pontos para um número finito de elementos.

Desta forma, a simulação permite que se observe diversos resultados como: de tensão equivalente de Von-Mises, deformação total, tensões principais e coeficiente de segurança, propiciando uma visão sistêmica dos pontos mais críticos e solicitados de uma peça.

2. OBJETIVOS

O objetivo do seguinte trabalho é realizar uma sucinta revisão bibliográfica sobre: a técnica de brunimento interno por rolos, seus efeitos na integridade superficial da peça e simulações de esforços gerados pelo brunidor. Assim como, realizar simulações simplificadas do processo, com o intuito de se obter análises computacionais iniciais dos esforços gerados, posto que, se observa escassez de análises na literatura para esse tipo de brunidor. Promovendo continuidade ao trabalho, "Estudo Sobre a Integridade Superficial em Diferentes Configurações do Brunimento por Rolos", de (PEREIRA, FONTANA e SOARES, 2020).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Brunimento por Roletes

O brunimento é um processo de trabalho a frio que tem como objetivo realizar o acabamento de superfícies de revolução ou superfícies planas sob condições de aplicação de pressão através de um disco rígido de rolo ou bola, respectivamente (MURTHY; KOTIVEERACHARI, 1981). Esse processo pode ser tanto externo, também conhecido como livre, utilizando como parâmetro a força, quanto interno, utilizando a interferência.

O brunimento por roletes é o processo interno por conformação, no qual utiliza a interferência para melhorar o acabamento de diversas peças, ganhando qualidade dimensional, textura e dureza superficial e resistência à fadiga (HANNA TOOLS, s.d.).



Figura 2: Brunidor de Rolo Hanna Tools.

Fonte: Hanna Tools.

3.2. Integridade Superficial

Integridade Superficial, segundo Griffiths (2001), pode ser definida como "as características topográficas, químicas, mecânicas e metalúrgicas de uma superfície e a sua relação com o desempenho funcional". Para o objetivo do processo de brunimento por rolos, Groover (2010) propõe quatro principais análises: o exame visual da superfície, o exame microestrutural, o perfil de microdureza e o perfil de tensão residual.

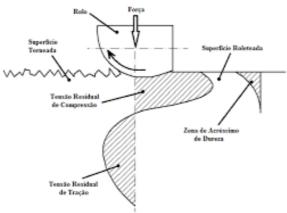
O exame visual da superfície busca analisar qualitativamente a textura superfícial da peça de trabalho, a sua rugosidade, suas ondulações e possíveis falhas superfíciais como rachaduras e descamações. Para a mensuração quantitativa pode-se fazer uso do rugosímetro além de técnicas fotográficas e de fluorescência. A análise da

rugosidade é de extrema importância, pois trata-se de um dos parâmetros fundamentais em um processo de acabamento superficial como o brunimento por rolos. Em suma, quando o rolo é colocado sob alta pressão na superfície da peça de trabalho, o material é progressivamente comprimido, escoando o metal das zonas de alta pressão nos picos para as zonas de baixa pressão nos vales, nivelando as imperfeições e assim diminuindo a rugosidade (HANNA TOOLS, s.d.).

O exame microestrutural visa analisar características do material como, fases intermetálicas, tamanhos e contornos dos grãos, porosidade e possíveis inclusões na microestrutura. Esses parâmetros influenciam na resposta da deformação plástica, manifestando-se nas movimentações de discordância. Esses deslocamentos interagem com os defeitos, contornos de grãos e vazios, levando ao processo de encruamento dos grãos, o que endurece o material, podendo ser mensurado através do seu perfil de microdureza (DEONISIO, 2004).

O perfil de tensão residual, obtido por difração de raio-X ou métodos de simulação, por sua vez, influencia diretamente o desempenho do material, por isso é um dos aspectos principais para a análise da integridade superficial. A tensão superficial presente no processo de roleteamento, suficientemente alta para proporcionar a plasticidade, induz tensões residuais superficiais compressivas, como observado pela *Figura 3*. Essas tensões tendem a ser benéficas, como contrapõem-se as bandas de escorregamento causadas pelas discordâncias, dificultam a movimentação, a nucleação e a formação de trincas (CASTRO, 2007; SUNDER, 2005).

Figura 3: Representação da Distribuição da Tensão Residual no Processo de Brunimento por Rolos.



Fonte: GODOI, 2017.

3.3. Rugosidade

A rugosidade pode ser definida como um conjunto de irregularidades, de saliências e reentrâncias. Em suma, são erros microgeométricos que variam o relevo de uma superfície. Essa condição apresenta um papel essencial no acabamento superfícial de uma peça e consequentemente no desempenho funcional e econômico da mesma. Estudos apontam que mais de 50% da energia de um movimento é perdida por resultados de fricção e que 80% das falhas de máquina acontecem pelo desgaste de superfícies de contato, reafirmando os benefícios da utilização de peças com bom acabamento superficial (BABU et al. (2008) apud HASSAN et al. (1999), BRANDT et.al (1990); DADMAL et al., 2017).

No processo de brunimento por rolos, tanto o interno por interferência como o externo por forças de contato, são geradas altas pressões que resultam no escoamento do material. A deformação plástica causada, achata os picos provocando o deslocamento do material para as depressões, diminuindo a rugosidade e aumentando o acabamento superficial. BABU et al. (2008), examinou o comportamento da rugosidade após o processo de brunimento interno para uma amostra de aço e observou que o aumento da velocidade do brunimento, até certo ponto limite, resultou no aumento do acabamento superficial, com a diminuição da rugosidade (Ra).

A fim de se estudar o comportamento da rugosidade com a aplicação de forças externas pelo processo de brunimento bola, DADMAL et al., (2017) realizou análises por simulação utilizando o método de elementos finitos (MEF), simplificando a amostra de liga de alumínio para uma superfície 2D e variando o carregamento de 20 a 100 N. Esse estudo demonstrou que os resultados da simulação MEF coincidem com os resultados experimentais sendo assim uma boa simplificação, também foi demonstrado a relação da magnitude da força com a dimensão da rugosidade, dado que conforme houve o aumento da força, houve o decréscimo da rugosidade até seu valor mínimo.

3.4. Interferência Furo-Eixo

O ajuste por interferência ou por pressão, também conhecido como acoplamento por interferência, gera deflexão elástica no eixo e no furo, o que resulta em grandes forças normais e de atrito em ambas as partes, a última responsável pela transmissão do torque do eixo ao cubo, criando um mesmo estado de tensão no eixo

do que uma pressão externa faria na superfície (NORTON, 2013). A pressão (p) criada pelo ajuste à pressão pode ser calculada através da (*Equação 1*):

$$p = \frac{0.5 \,\delta}{\frac{r}{E0}(\frac{r0^2 + r^2}{r^2 - r^2} + v0) + \frac{r}{E1}(\frac{r^2 + ri^2}{r^2 - ri^2} - vi)},$$
 (Equação 1).

Sendo $\delta=2\Delta r$ a interferência diametral total entre as duas peças, r é o raio nominal da interface entre as peças, ri é o raio interno de um eixo vazado e r0 é o raio externo do cubo E e v são o Módulo de Young e o coeficiente de Poisson das duas partes, respectivamente.

As *Equações 2 e 3* relacionam as pressões máxima e mínima as interferências máxima e mínima, respectivamente.

$$p_{max} = \frac{Z_{max}}{(K_i + K_e) \cdot d_{eixo}}, \qquad (Equação 2).$$

$$p_{min} = \frac{Z_{min}}{(K_{,} + K_{e}) \cdot d_{eivo}}, \qquad (Equação 3).$$

Onde d_{eixo} refere-se ao diâmetro do eixo, Ki e Ke são os coeficientes elásticos interno e externo, nessa ordem e, que podem ser calculados por meio das (*Equações 4 e 5*) de modo respectivo.

$$K_{i} = \frac{1}{E_{i}} \cdot \left(\frac{1 + -Q_{i}^{2}}{1 - Q_{i}^{2}} - v_{i}\right), \tag{Equação 4}.$$

$$K_e = \frac{1}{E_e} \cdot \left(\frac{1 + -Q_e^2}{1 - Q_e^2} - v_e \right),$$
 (Equação 5).

Sendo $Q_i = \frac{d_i}{d_e}$ e $Q_e = \frac{D_i}{D_e}$ fatores geométricos onde d_i , d_e D_i e D_e são os diâmetros internos e externos do eixo e do cubo, respectivamente.

Enquanto a magnitude da pressão (p) for menor que a pmín ocorre o escorregamento da peça e quando a magnitude da pressão ultrapassa a pmáx resulta no escoamento ou esmagamento da peça, através da deformação plástica, uma vez que sua tensão de escoamento é ultrapassada entrando no regime plástico. Um exemplo real do caso de escoamento/esmagamento da peça é o processo de brunimento interno por rolos, no qual consiste num processo de acabamento superficial por deformação plástica.

4. METODOLOGIA

4.1. Simulação Acoplamento Furo-Eixo

A fim de realizar uma análise inicial das tensões e deformações geradas pela interferência furo-eixo foi simulado o acoplamento furo-eixo das interferências, (0,01 a 0,13 mm), referentes às Amostras de 1 a 7. A simulação do acoplamento furo-eixo foi realizada no *software* de elementos finitos Ansys e a análise foi de "*Static Structural*" (estrutura estática). O Ansys Workbench utiliza 5 etapas principais para a simulação: os Dados de Engenharia, a Geometria, o Modelo, a Configuração e a Solução.

Para os Dados de Engenharia foram adicionadas as informações dos materiais utilizados para a análise. Para o estudo em questão, foram adicionados o aço 4140 e o aço rápido temperado e revenido. Os dados utilizados para a análise serão de elasticidade isotrópica, para o aço 4140, o módulo de Young aplicado foi 190 MPa e o coeficiente de Poisson 0,27 e para o aço rápido temperado e revenido o módulo de Young aplicado foi 210 MPa e o coeficiente de Poisson 0,27.

A Geometria foi construída por Assembly no próprio *software* através do "Geometry in SpaceClaim". Foram realizadas 7 simulações, variando apenas a interferência, ou seja, o diâmetro do eixo para o processo de brunimento: de 26,01 a 26,13 mm, com intervalos de 0,02 mm, o comprimento do eixo se manteve em 30 mm. Já as dimensões do furo permaneceram constantes em todas as simulações: diâmetro externo 48 mm e diâmetro interno 26 mm e comprimento 26 mm.

Para o Modelo, foram atribuídos os materiais do furo e do eixo, sendo respectivamente, aço 4140 e aço temperado e revenido. Nas conexões foi adicionado um contato por fricção entre o furo e eixo, com um coeficiente de atrito 0,7. Também foi gerado a malha com 4 mm de tamanho de elemento. Já para a Configuração, foi adicionado um suporte fixo na superfície externa do furo e um suporte sem fricção nas faces frontal e traseira do furo.

Por fim, na etapa final, Solução, foi inserida a análise alvo do estudo, a Tensão de Von-Mises e o deslocamento furo-eixo total ("*Deformation Total*").

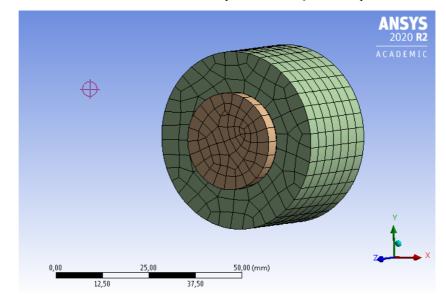


Figura 4: Geometria da Amostra 1 utilizada para a Simulação de Acoplamento Furo-Eixo.

Fonte: Arquivo Pessoal.

4.2. Simulação Interferência Furo-Eixo (LoadSteps)

A fim de calcular as tensões e deformações que ocorrem a partir do processo de brunimento interno por rolos, foram realizadas simulações de estrutura estática ("Static Structural") no software *Ansys*, simplificados pela interferência a partir do deslocamento de um eixo por um furo. Assim, foram realizadas a simulação das interferências, (0,01 a 0,13 mm), referentes às Amostras de 1 a 7, sendo as mesmas geometrias anteriores realizadas no "Geometry in Space Claim", onde manteve-se constante as dimensões do furo. Uma malha foi gerada automaticamente através do "Generate Mesh".

No "Modelo" da simulação, foram definidos os materiais para cada peça. Posteriormente, em conexões, foi adicionado uma conexão do tipo "Frictional" manualmente, sendo os corpos: "Contact" (contato) como o eixo; e "Target" (alvo) como o furo interno. Para este contato, foi utilizado um valor de coeficiente de 0,2. Para as informações iniciais referentes às conexões, obteve-se os valores de contato demonstrando a penetração do sistema. Após essa etapa, foi gerada uma malha de elementos pelo próprio software.

Ainda em "Modelo", foi adicionado um suporte fixo na superfície externa do furo. Além disso, variou-se o número de steps (passos) em: 2, 26 e 52; ajustando conforme a necessidade para ocorrer um razoável andamento das simulações que se

aproxime do real, sem elevar demasiadamente o custo operacional do tempo para a realização total da simulação. Portanto, para as simulações que exigiram um maior número de steps, a espessura do furo e do eixo foram reduzidas para 13 mm (do original 26 mm), visando uma economia no tempo de processamento do software.

Em seguida, inseriu-se uma opção de deslocamento ("Displacement"), para a definição do deslocamento do eixo em relação ao furo a cada segundo dado pelo número de steps anteriormente e, por fim, foi inserida a análise de Tensão de Von-Mises.

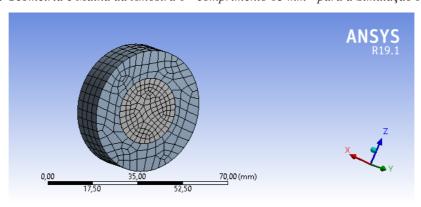


Figura 5: Geometria e Malha da Amostra 1 - comprimento 13 mm - para a Simulação Furo-Eixo.

Fonte: Arquivo Pessoal.

4.3. Simulação Interferência Furo-Rolete (LoadSteps)

Com o propósito de analisar o impacto na tensão, somente com o avanço do rolete no furo, foi realizado no *software* Ansys, a simulação das interferências, (0,01 a 0,13 mm), referentes às Amostras de 1 a 7.

Desenhou-se uma geometria base (*Figura 6*) em "Geometry in Space Claim", correspondendo a dois corpos: 1/4 do Furo, de diâmetro externo 48 mm e interno 26 mm, e um rolete de diâmetro 5,17 mm, montados em contato.

No "Modelo" da simulação, foram definidos os materiais para cada peça, aço 4140 e aço rápido temperado e revenido. Em conexões, foi adicionado uma conexão do tipo "Frictional" manualmente, com um coeficiente de atrito 0,2, sendo os corpos: "Contact" (contato) como o rolete; e "Target" (alvo) como o furo interno.

Gerou-se uma malha automaticamente através do "Generate Mesh" e observou-se a necessidade de refiná-la, portanto, através da ferramenta Sizing, foi aplicada na aresta inferior do Furo um refinamento com tamanho de elemento 0,01 mm.

Já para a Configuração, foi adicionado um suporte fixo na superfície externa do furo e um suporte sem fricção nas faces laterais do pedaço do Furo. Assim como um deslocamento ("Displacement"), na direção X e na direção Y, correspondendo, respectivamente, ao avanço e a interferência.

Por fim, na etapa final, Solução, foi inserida a análise alvo do estudo, a Tensão de Von-Mises e a Força de Reação gerada pelo Suporte Fixo.

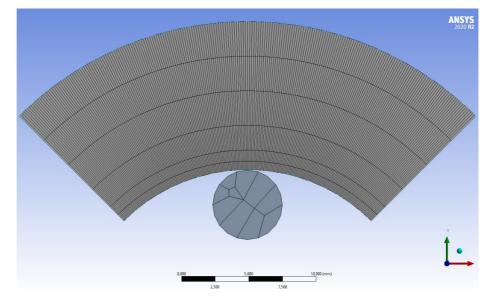


Figura 6: Geometria Base Furo-Rolete.

Fonte: Arquivo Pessoal.

4.4. Simulação Rugosidade

Para a metodologia da análise de rugosidade se utilizará DADMAL et al., (2017) como referência. A simulação do efeito do brunimento na rugosidade será realizada no *software* de elementos finitos Ansys e a análise será de estrutura estática.

Seguindo as 5 etapas principais para a simulação no Ansys, primeiro, pelos dados de engenharia serão adicionadas as informações dos materiais utilizados na análise. Para o estudo em questão, será adicionado o aço 4140. Os dados utilizados para a análise serão de elasticidade isotrópica: o módulo de Young aplicado será 190 MPa e o coeficiente de Poisson 0,27.

A próxima etapa é a construção da geometria, para isso se utilizará o próprio software, através do "Design Modeler Geometry". A fim de simplificar a análise, a geometria utilizada será bidimensional. Assumirá a altura da superfície de rugosidade

(Ra), a rugosidade da Amostra 0, $(6,2138 \mu m)$ e um ângulo de 80° para o pico (*Figura* 7).

Em seguida, para o Modelo, será atribuído o aço 4140 para a superfície, assim como uma espessura "infinita", ou seja, suficientemente grande conforme a escala utilizada para a geometria em questão, a fim de se trabalhar com o estado plano de tensão e deformação, utilizou-se 26 mm, a espessura do Furo. Nesta etapa também será gerada a malha para a superfície, através do padrão "Generate Mesh".

Para a configuração, serão fornecidas as condições de contorno para o modelo. Para o estudo em questão, se utilizará 3 suportes fixos, uma na base e dois nas laterais da superfície, além de 9 forças, uma em cada pico. A magnitude dessas forças serão ajustadas a fim de se encontrar os valores de deslocamento obtidos experimentalmente.

Por fim, na etapa final, Solução, será inserida a análise alvo do estudo, o deslocamento total ("*Deformation Total*"), através dela será possível observar quanto a rugosidade foi alterada.

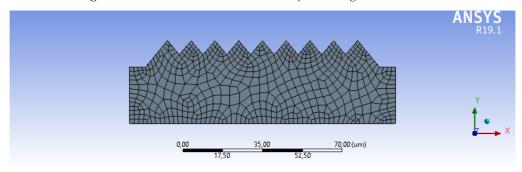


Figura 7: Geometria e Malha da Simulação da Rugosidade.

Fonte: Arquivo Pessoal.

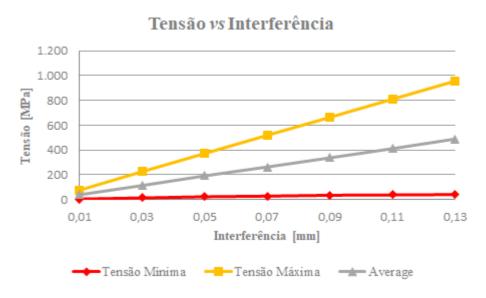
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Simulações Computacionais

5.1.1. Acoplamento Furo-Eixo

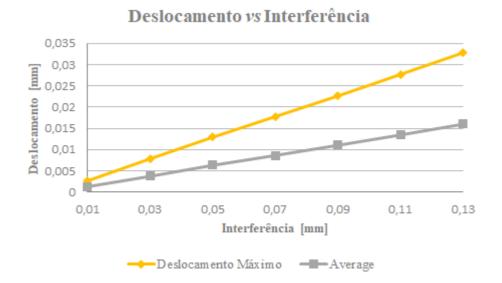
Através das 7 simulações, variando a interferência para cada amostra, obteve-se os valores de Tensão de Von-Mises e de Deslocamento (*Deformation Total*), como pode ser observado no (*ANEXO 1*). Com esses dados, foi possível estudar a relação da interferência furo-eixo, através dos *Figuras 8 e 9*.

Figura 8: Gráfico de Tensão pela Interferência para a Simulação de Acoplamento.



Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 9: Gráfico de Deslocamento pela Interferência para a Simulação de Acoplamento.



Fonte: Arquivo Pessoal.

Analisando os gráficos comprovou-se a relação entre interferência, tensão e deslocamento (EL-AXIR, IBRAHIM, 2005). Conforme a interferência aumenta, as tensões e deslocamentos também aumentam de forma linear.

Ademais, através do cálculo teórico do acoplamento por interferência furo-eixo, (*Equação 2*), realizado para as 7 amostras, foi possível comparar e validar os valores, (*Tabela 1*), obtidos pela simulação de acoplamento, uma vez que o erro relativo mostrou-se pequeno, com valor máximo de 5,17 %.

TABELA 1: COMPARAÇÃO VALORES TEÓRICOS E SIMULADOS PARA O ACOPLAMENTO

	Teórico	Simulado	
Interferência	pmáx	Tensão	Erro
[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]
0.01	39.67	39.292	0.96
0.03	119.02	114.1	4.13
0.05	198.36	192.08	3.17
0.07	277.71	263.87	4.98
0.09	357.06	337.47	5.49
0.11	436.40	411.64	5.67
0.13	515.75	489.16	5.16

Fonte: Arquivo Pessoal.

Os valores apresentados representam o valor mínimo de tensão necessário para escoamento ou esmagamento da peça, através da deformação plástica, ou seja, o valor mínimo que para cada interferência o brunidor necessita atingir para reduzir a rugosidade da peça.

5.1.2. Interferência Furo-Eixo (LoadSteps)

Analogamente, a partir da simulação das diferentes interferências furo-eixo apresentadas na metodologia, pode-se obter os resultados demonstrados no (ANEXO 2) para a simulação. A partir dessa base de dados, foi possível gerar a Figura 10 para análise dos resultados encontrados. Ressalta-se que para as simulações de 26 a 52 steps, foi reduzido a espessura do furo e eixo para 13 mm, devido ao custo operacional da simulação em relação ao tempo.

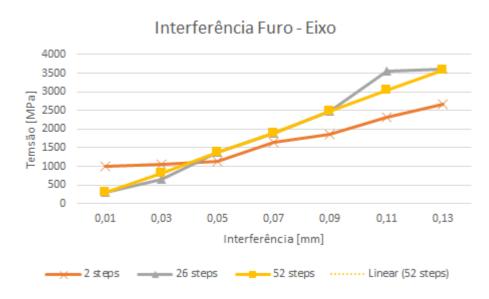


Figura 10: Gráfico de Interferência por Tensão para a Simulação Interferência Furo-Eixo.

Fonte: Arquivo Pessoal.

Primeiramente, foi possível identificar que para todos os números de *steps*, houve o crescimento dos valores de tensão máxima a partir do aumento da interferência corroborando a Literatura por Ex-Axir e Ibrahim (2005). Além disso, tendo em vista a necessidade do escoamento do contato entre as peças, nota-se que os valores de tensão de interferência (*ANEXO 2*) são maiores do que as tensões obtidas para o acoplamento (*ANEXO 1*). Assim, confirma-se o deslocamento do eixo pelo furo, como esperado na perspectiva real do processo de brunimento.

Ainda, nota-se pela *Figura 10*, uma configuração aproximada da reta gerada pela relação de tensão e interferência de 26 *steps* e 52 *steps*, com pequenas variações nas interferências de 0,03 e 0,11 mm. Tendo em vista a linearidade dos valores para 52 steps, foi possível encontrar a seguinte equação da reta pelo *Excel*:

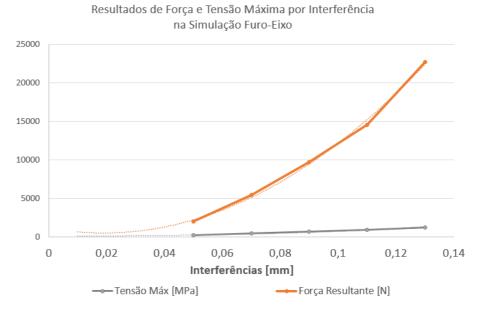
$$y = 548,49x - 260,4$$
. (Equação 6)
 $R^2 = 0,9997$. (Equação 7)

A *Equação* 7, por se aproximar do valor inteiro 1, representa que há uma boa adequação da equação da reta pelo gráfico gerado de 52 *steps*. Essa simulação apresentou uma grande importância uma vez que correlaciona-se o número de *steps* com o avanço do brunidor de estudo, 0,5 mm/rev, obtendo uma análise mais próxima da carga real.

5.1.3. Interferência Furo-Rolete (LoadSteps)

Através das 7 simulações, variando a interferência para cada amostra, obteve-se os valores de Tensão de Von-Mises e de Força Resultante, como pode ser observado no (*ANEXO 3*). As Amostras 1 e 2 não tiveram sua simulações concluídas com êxito pelo *software* Ansys, a primeira apresentou um erro desconhecido pelo sistema e a segunda, tensões somente no rolete, indicando que a interferência não foi captada pelo refinamento da malha utilizada. Com esses dados, foi possível estudar a relação da tensão e força por interferência furo-rolete, através da *Figura 11*. Analisando os gráficos comprovou-se o aumento da tensão e da força em relação a interferência. Portanto, através do comportamento das curvas observadas é possível projetar os valores para as amostras que não puderam ser simuladas, podendo ser visualizadas pela curva pontilhada da *Figura 11*.

Figura 11: Gráfico de Tensão e Força por Interferência para a Simulação Interferência Furo-Rolete.



Fonte: Arquivo Pessoal.

5.1.4. Simulação Rugosidade

Com o objetivo de se observar a grandeza da força, um parâmetro não estudado para esse tipo de brunimento, causada pelo processo de interferência do brunimento interno por rolo e responsável por melhorar o acabamento da peça, se ajustou a magnitude da força, a fim de se encontrar valores próximos ao de deslocamento obtidos experimentalmente.

Os valores de rugosidade, obtidos empiricamente, por (PEREIRA, FONTANA e SOARES, 2020), após o processo de brunimento estão sumarizados na *Tabela 2*, assim como suas respectivas deformações comparando com a Amostra 0, não brunida.

TABELA 2: VALORES SUMARIZADOS DE RUGOSIDADE E DEFORMAÇÃO.

Amostra	Interferência [mm]	Rugosidade [µm]	Deformação [μm]
0	0	6,2138	0
1	0,01	0,9815	5,2323
2	0,03	0,6205	5,5933
3	0,05	0,5846	5,6292
4	0,07	0,5992	5,6146
5	0,09	0,7184	5,4954
6	0,11	1,023	5,1908
7	0,13	1,0585	5,1553

Fonte: Adaptado de (PEREIRA, FONTANA e SOARES, 2020).

A Figura 12 demonstra que a partir de um valor máximo de interferência, a deformação começa a diminuir, ou seja, a rugosidade volta a aumentar, indicando um valor ótimo de rugosidade para o melhor acabamento superficial (PEREIRA, FONTANA e SOARES, 2020).

Deformação vs Interferência 5,7 5,6 Deformação [µm] 5,5 5,4 5,3 5,2 5,1 0,01 0,03 0,05 0.07 0,11 0,13 0,09 Interferência [mm] ─Deformação [μm]

Figura 12: Gráfico de Deformação por Interferência para o Ensaio de Rugosidade.

Fonte: Adaptado de (PEREIRA, FONTANA e SOARES, 2020).

Nota-se que a deformação, das Amostras de 1 a 7, variaram de 5,1553 μm a 5,6292 μm. Para esse intervalo, através do ajuste da magnitude da força, a simulação de Rugosidade apresentou grandeza variando de 4100 N a 4600 N, aproximadamente, conforme pode ser observado pela *Tabela 3*.

TABELA 3: COMPILAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA RUGOSIDADE.

Força [N]	Deformação [μm]
4100	5,1106
4200	5,2353
4300	5,3599
4400	5,4846
4500	5,6090
4600	5,7339

Fonte: Arquivo Pessoal.

Esses valores seguem uma distribuição linear, como observado pela *Figura 14*, indicando que é possível utilizar interpolação linear para encontrar a força exata para as deformações experimentais.

Deformação vs Força 5,8 5,7 Deformação [µm] 5,6 5,5 5,4 5.3 5,2 5,1 5 4000 4100 4200 4300 4400 4500 4600 4700 Força [N] Deformação [μm]

Figura 13: Gráfico de Deformação por Força resultante da Simulação de Rugosidade.

Fonte: Arquivo Pessoal.

O compilado dos valores de Força calculados através de interpolação linear estão apresentados na *Tabela 4*.

TABELA 4: COMPILAÇÃO DOS VALORES DE FORÇA PELA INTERPOLAÇÃO.

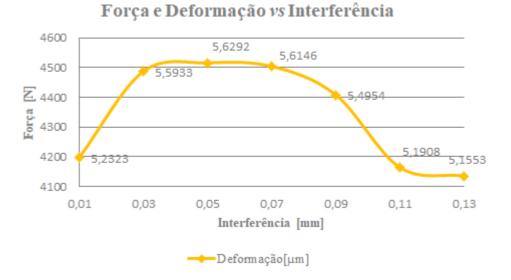
Deformação [µm]	Força [N]
5,2323	4197,6
5,5933	4487,4
5,6292	4516,2
5,6146	4504,5
5,4954	4408,7
5,1908	4164,3
5,1553	4135,8

Fonte: Arquivo Pessoal.

Sumarizando, na *Figura 14*, os valores encontrados de força para cada deformação referida, respectivamente a sua interferência, é possível observar que o valor de força segue o mesmo comportamento da deformação representada pela *Figura 12*. Desta forma, em um primeiro momento, conforme a força aumenta e, consequentemente, a tensão aplicada, há, também,

um aumento da deformação, ou seja, uma redução da rugosidade, explicada pelo processo de esmagamento dos picos pela deformação plástica. Entretanto, como é observado pelo gráfico, há uma estagnação da deformação para as interferências de 0,03 a 0,07 mm e após isso, uma redução da mesma, indicando que para o material utilizado, aço 4140, há valores ótimos de força para a redução da textura superficial, assim como observado por (PEREIRA, FONTANA e SOARES, 2020) para a interferência.

Figura 14: Gráfico da Força e Deformação pela Interferência para a Simulação de Rugosidade.



Fonte: Arquivo Pessoal.

6. CONTINUAÇÃO DA PESQUISA

6.1. Simulações Computacionais

O presente projeto teve como proposta fazer as simulações no software *Ansys* dos ensaios experimentais do processo de brunimento interno por rolo realizados por (PEREIRA, FONTANA e SOARES, 2020). Para projetos futuros, sugere-se uma melhoria das análises realizadas.

Primeiramente, em relação a simulação de interferência furo-eixo, sugere-se a utilização do brunidor real da empresa *Hanna* utilizado nos ensaios experimentais, a partir da rotação do mesmo no interior do furo das amostras, buscando alternativas que não exijam muito custo operacional da máquina.

Em segundo lugar, para a simulação furo-rolete, sugere-se o aumento do número de steps utilizados na simulação, aproximando os valores do avanço real do brunidor.

Ainda, sugere-se um aprofundamento no estudo sobre as forças de reação encontradas na simulação do Ansys e a aplicação na simulação de rugosidade apresentada no presente projeto.

6.2. Metodologia de Superfície de Resposta

A Metodologia de Superfície de Resposta (RSM – Response Surface Methodology) é uma coleção de técnicas estatísticas capaz de modelar, analisar e otimizar experimentos nos quais são submetidos a diversas variáveis, a fim de obter um resultado ótimo (MONTGOMERY, 2004). No processo de brunimento, devido ao grande número de parâmetros que afetam as propriedades da superfície da peça como, por exemplo, a velocidade do brunimento, número de passes, material do brunidor, entre outros (LOH et al., 1989); aplica-se a metodologia para assim, haver a redução do número, tempo e custo dos ensaios (DIETER, 2000). Tendo em vista todos os benefícios apresentados anteriormente, recomenda-se o seu estudo e aplicação em projetos futuros.

6.3. Ensaios Experimentais

A fim de dar continuidade às análises propostas por Griffiths (2001), utilizadas no trabalho de (PEREIRA, FONTANA e SOARES, 2020), e que não conseguiram ser realizadas pelo presente trabalho, pelo momento pandêmico atual, recomenda-se realizar os ensaios de microdureza e análise de microestrutura através do uso do microscópio eletrônico de varredura, MEV, dando continuidade às análises propostas.

7. CONCLUSÕES FINAIS

Por meio da apresentação dos resultados apresentados anteriormente é possível corroborar algumas informações:

- Para todas as simulações realizadas no software Ansys, verificou-se que conforme houve o aumento da interferência pelo brunidor na amostra, maior foi a resultante da tensão máxima equivalente (von-Mises);
- Os valores de tensão equivalente (von-Mises) encontrados para o deslocamento pela peça na simulação de Furo-Eixo e Furo-Rolete foram

maiores que as respectivas tensões para cada interferência encontradas na simulação de Acoplamento. Assim, confirmando o deslocamento do brunidor pela amostra e o escoamento do material através da deformação plástica gerada;

- Para a simulação Furo-Eixo, foi possível encontrar uma linearidade dos valores de tensão para o deslocamento da peça em 52 steps. Ressalta-se que esse número de steps aproxima-se com o deslocamento real do brunidor pela amostra dado o avanço do ensaio experimental;
- Através da análise das simulações de geometria simplificada do Furo-Rolete, foi possível notar que os valores de tensão de von-Mises e de força resultante se aproximam de curvas cujas projeções nos trazem a ideia do comportamento esperado para as amostras 1 e 2 cujas simulações apresentaram inconsistências em razão da limitação do software nas máquinas;
- Em relação a simulação de rugosidade, através de um ajuste linear da relação de deformação e força, foi possível identificar que a magnitude das forças para esse processo variaram entre 4 e 4,5 kN.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS: ANÁLISE ESTRUTURAL. ESSS, 2020. Disponível em: https://www.esss.co/ansys/analise-estrutural/. Acesso em: 4 out. 2020.

AZEVEDO, Alvaro. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS. Universidade do Porto, Portugal, ed1, p. 6-8, 2003.

BABU, P. R.; PRASAD, T. S; RAJU, A. V. S; BABU, A. J. P.R Babu, Effect of internal roller burnishing on surface roughness and surface hardness of mild steel, Journal of Scientific and Industrial Research, [s. l.], v. 68, p. 29-31, 2009. Disponível em: http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/2782/1/JSIR%2068%281%29%2029-31.pdf. Acesso em: 10 nov. 2020.

CASTRO, Carlos Alberto Carvalho. Estudo do comportamento à fadiga de metais dentro e fora da água na presença de pressão hidrostática. 2007. 160 f. Trabalho de Doutorado (Doutor em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2007. Disponível em:

https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/MDAD-7DHHLP/1/tese_carlos_vers_o_final.pdf https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/MDAD-7DHHLP/1/tese_carlos_vers_o_final.pdf https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/MDAD-7DHHLP/1/tese_carlos_vers_o_final.pdf https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/MDAD-7DHHLP/1/tese_carlos_vers_o_final.pdf https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/MDAD-7DHHLP/1/tese_carlos_vers_o_final.pdf

DADMAL , Shailesh; KURKUTE, Prof. Vijay. FINITE ELEMENT ANALYSIS OF ROLLER BURNISHING PROCESS. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), [s. l.], v. 4, ed. 6, 2017. Disponível em: https://www.irjet.net/archives/V4/i6/IRJET-V4I6449.pdf. Acesso em: 3 nov. 2020.

DIETER, G., Engineering design: a materials and processing approach. 3ed. New York: McGraw-Hill, 2000. 721p.

DEONISIO, Carlos Cesar de Castro. Estudo do fresamento do aço D2 endurecido em altas velocidades de corte. 2004. 248 f. Trabalho de Doutorado (Doutor em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP, [S. l.], 2004. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264271. Acesso em: 5 out. 2020.

EL-AXIR, M.H. An investigation into roller burnishing. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Elsevier, v. 40, ed. 11, p. 1603-1617, Setembro 2000. DOI https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00019-5. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695500000195. Acesso em: 29 set. 2020.

EL-AXIR, M.H.; IBRAHIM, A.A.;, Some surface characteristics due to center rest ball burnishing, Journal of Materials Processing Technology, v. 167, ed. 1, p. 47-53, 2005. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013604011963. Acesso em: 14 nov. 2020.

GODOI, EDUARDO LUIZ DE. INFLUÊNCIA DO ROLETEAMENTO A QUENTE AUXILIADO POR RADIAÇÃO INFRAVERMELHA NA QUALIDADE SUPERFICIAL DE UMA LIGA AERONÁUTICA INCONEL 718. 2017. Dissertação Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, [S. l.], 2017. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/152746/godoi_el_me_bauru.pdf?sequence =3&isAllowed=y. Acesso em: 7 out. 2020.

GRIFFITHS, B. Manufacturing Surface Technology: Surface Integrity & Functional Performance. [S. l.: s. n.], 2001. 256 p. DOI https://doi.org/10.1016/B978-1-85718-029-9.X5000-8. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/book/9781857180299/manufacturing-surface-technology#book-description. Acesso em: 5 out. 2020.

GROOVER, Mikell P. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. 7. ed. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2010. cap. 5, p. 90.

GUERREIRO, Roberto Magalhães. EFEITOS DO PROCESSO DE BRUNIMENTO POR ROLO NO TOOLOX 44. 2015. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Panambi/RS, 2015. Disponível em: https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/bitstream/handle/123456789/3136/TCC%20-%2 0Roberto%20Magalh%c3%a3es%20Guerreiro.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 1 out. 2020.

HANNA TOOLS (Limeira-SP). Complete Tooling Catalog. [s. d.], 180 p. Disponível em: http://hannatools.com/catalogos/. Acesso em: 28 set. 2020.

LOH, N.; TAM, S.; MIYAZAWA, S. A study of the effects of ball-burnishing parameters on surface roughness using factorial design. Journal of Mechanical Working Technology, v. 18, sed. 1989, p. 53-61, 1989.

MAHESHWARI, Anil S; RUPESH, Dr.; GAWANDE, R. The Role of Burnishing Process in Manufacturing Industry-A State-of-the-Art Survey-. International Journal of Engineering Research and Development, [s. l.], v. 13, ed. 6, p. 50-60, Junho 2017. Disponível em: https://www.academia.edu/34604272/The_Role_of_Burnishing_Process_in_Manufacturing_I ndustry A State of the Art Survey. Acesso em: 5 out. 2020.

MONTGOMERY, D.C. Design and analysis of experiments. ed. 6. New York: John Wiley & Sons, 2004. 684p.

MURTHY, R.l.; KOTIVEERACHARI, B. Burnishing of metallic surfaces — a review. Precision Engineering, v. 3, ed. 3, p. 172-179, 1981. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0141635981900106. Acesso em: 07 dez. 2020.

NORTON, Robert L. EIXOS, CHAVETAS E ACOPLAMENTOS: AJUSTES POR INTERFERÊNCIA. *In*: PROJETO de Máquinas: Uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. cap. 10.12, p. 580-585.

PEREIRA, Daniel da Silva; FONTANA, Gabriel de Luccah Bueno Galliani; SOARES, Luis Felipe Santos. ESTUDO SOBRE A INTEGRIDADE SUPERFICIAL EM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DO BRUNIMENTO POR ROLOS. 2020. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Manufatura) - Faculdade de Ciências Aplicadas - UNICAMP, [S. 1.], 2020.

SANCHEZ, Cesar Antonio Aparicio. ESTUDO DE IMPACTO USANDO ELEMENTOS FINITOS E ANÁLISE NÃO LINEAR. Teses (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 6. 2001.

SUNDER , Ramasubbu. Fatigue as a process of cyclic brittle microfracture. Fatigue & Fracture of Engineering Material and Scrutures, [s. l.], v. 28, ed. 3, p. 289-300, Março 2005. DOI https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2005.00857.x. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1460-2695.2005.00857.x. Acesso em: 7 out. 2020.

YEN, Y.C.; SARTKULVANICH, P.; ALTAN, T. Finite Element Modeling of Roller Burnishing Process. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Elsevier, v. 54, ed. 1, p. 237-240, 2005. DOI https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60092-4. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607600924?via%3Dihub. Acesso em: 4 out. 2020.

ANEXOS

ANEXO 1: RESULTADOS COMPILADOS DAS SIMULAÇÕES DE ACOPLAMENTO FURO-EIXO

	Tensão [MPa]			Deslocamento [mm]	
Interferência	Tensão Mínima	Tensão Máxima	Average	Deslocamento Máximo	Average
0.01	4.8353	76.2430	39.2920	2.6676 E-3	1.2803 E-3
0.03	13.4870	225.7700	114.1000	7.8558 E-3	3.7270 E-3
0.05	23.0700	373.1100	192.0800	12.9240 E-3	6.3048 E-3
0.07	28.3250	519.3500	263.8700	17.7960 E-3	8.6338 E-3
0.09	35.1900	664.6600	337.4700	22.6420 E-3	11.0310 E-3
0.11	37.6870	811.2000	411.6400	27.7110 E-3	13.4570 E-3
0.13	40.9060	956.8700	489.1600	32.8080 E-3	15.9880 E-3

ANEXO 2: RESULTADOS COMPILADOS DAS SIMULAÇÕES DE INTERFERÊNCIA FURO-EIXO

	Tensão Máxima [MPa]			
Interferência [mm]	2 steps	26 steps	52 steps	
0.01	1010,10	309,29	309,20	
0.03	1059,80	652,45	826,06	
0.05	1127,70	1385,00	1384,90	
0.07	1653,00	1901,20	1900,30	
0.09	1871,10	2483,10	2484,10	
0.11	2320,60	3568,00	3051,90	
0.13	2647,50	3605,60	3578,10	

ANEXO 3: RESULTADOS COMPILADOS DAS SIMULAÇÕES DE INTERFERÊNCIA FURO-ROLETE

	Interferência [mm]	RESULTADOS (4 STEPS - EDGE MESH)			
Amostra		FORÇA	TENSÃO		
Amostra			Mínima	Máxima	Average
		[N]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Amostra 1	0,01	Não simulado	Não simulado	Não simulado	Não simulado
Amostra 2	0,03	Erro Simulação	Erro Simulação	Erro Simulação	Erro Simulação
Amostra 3	0,05	-2028,2	2,93E-10	220,44	5,6778
Amostra 4	0,07	-5456,2	3,03E-10	447,19	15,017
Amostra 5	0,09	-9730	3,34E-10	670,54	26,462
Amostra 6	0,11	-14585	2,28E-10	890,94	39,338
Amostra 7	0,13	-22701	6,94E-09	1254,5	60,782