

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ESTADO DE SUPERFÍCIE SOBRE A RESISTÊNCIA À FADIGA DE AÇOS CARBONO

Armando Ítalo Sette Antonialli, antonialli@ufscar.br¹

Daniel Garcia Ribeiro, daniel.gribeiro@hotmail.com¹

Carlos Eiji Hirata Ventura, ventura@ufscar.br¹

Vitor Sordi, sordi@ufscar.br²

Rogério Spatti, rogerio.spatti@sp.senai.br³

¹Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, Rodovia Washington Luís (SP-310), km 235, São Carlos, São Paulo – Brasil. CEP: 13565-905

²Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais, Rodovia Washington Luís (SP-310), km 235, São Carlos, São Paulo – Brasil. CEP: 13565-905

³Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, Rua Cândido Padim, 25, São Carlos, São Paulo – Brasil. CEP: 13574-320

Resumo: O inegável apelo por soluções sustentáveis nas mais diversas atividades econômicas se verifica, também, no setor metalmeccânico, no qual pequenas reduções na massa de componentes produzidos podem significar um notável ganho do ponto de vista da ergonomia, ou mesmo uma considerável diminuição no consumo de combustíveis. Nesse contexto, a garantia de projetos robustos faz-se possível graças aos mecanismos de aumento de resistência aplicáveis em materiais metálicos, a saber: redução do tamanho de grão, solução sólida, encruamento, segundas fases ou tratamentos de superfície. Neste trabalho foi estudada a influência do estado de superfície de corpos de prova de aços ABNT 1020 encruado e ABNT 1045 recozido sobre o limite de resistência à fadiga em três condições distintas, a saber: 1 – como usinado (por torneamento) e após acabamento por 2 – lixamento e 3 – jateamento. Esta influência foi analisada por meio de ensaios de fadiga de flexão rotativa com tensão reversa e os resultados analisados por abordagens estatísticas baseadas no “método da escada”. Os resultados mostraram um aumento maior na resistência à fadiga para os corpos de prova jateados em razão das tensões residuais compressivas que este processo impõe. O efeito foi mais marcante nos corpos de prova de aço ABNT 1045 em razão de seu estado recozido.

Palavras-chave: fadiga, jateamento, lixamento, método da escada.

1. INTRODUÇÃO

O papel de um engenheiro é de projetar elementos de máquinas que vão possuir uma função específica em uma determinada máquina e, para tanto, é necessário realizar diversos tipos de escolha durante seu projeto para que este elemento cumpra sua função de maneira adequada. Pode-se citar como exemplo a escolha do material, esta escolha irá influenciar nas dimensões finais do elemento e em seu peso. Outro exemplo seria em relação ao funcional do elemento, pois, dependendo de sua aplicação, este deve possuir características necessárias como um acabamento superficial específico. Assim, diante desta gama de possibilidades, o engenheiro deve estar apto a reconhecer a influência de cada uma para que o projeto seja satisfatório.

De modo geral, a maior parte das peças de uma máquina estará sujeita a cargas que variam com o tempo. Portanto, é necessário conhecer o comportamento dos materiais nestas condições, ou seja, é necessário saber a resistência à fadiga dos materiais. As falhas por fadiga causam fraturas repentinas e podem causar danos catastróficos, incluindo perda de vidas humanas. Assim, um bom projeto deve contemplar, além da falha estática, uma análise criteriosa da falha por fadiga. Esse tipo de falha ocorre, geralmente, em níveis de tensões bem abaixo dos valores da resistência ao escoamento, o que torna o projeto quanto à fadiga mais crítico. Consequentemente, o impacto econômico do projeto é decidido, quanto ao quesito dimensionamento, pela resistência à fadiga do material. Logo, mecanismos que aumentem esta resistência são, muitas vezes, essenciais para a viabilidade de um projeto. (NORTON, 2004).

Neste contexto, já que a propagação das trincas na falha por fadiga ocorre em razão de tensões trativas, tensões residuais compressivas contribuem no aumento de resistência à fadiga (NORTON, 2004). Dentre os diversos tipos de tratamentos capazes de introduzir tensões residuais compressivas na superfície, um dos métodos mais comuns é o de jateamento em razão da sua flexibilidade, seu relativo baixo custo e seu baixo impacto ambiental perante os outros processos. Ele consiste, basicamente, em impactar a superfície da peça com um fluxo de esferas de aço ou de outro material. Os impactos entre a peça e as esferas causam escoamentos localizados, aumentando, assim, a área superficial e fazendo com que a camada logo abaixo force a superfície de volta, criando um estado de tensão residual compressiva (TRSKO et al, 2014).

Contrário ao jateamento, o lixamento é um processo de acabamento de usinagem por abrasão executado por lixas que possui o objetivo de reduzir a classe de rugosidade da superfície da peça. A rugosidade final do material depende da

pressão da lixa sobre a peça, da velocidade de trabalho, do tipo de grão abrasivo, tipo de material da amostra e desenho da lixa (SIQUEIRA, MARCHESI, 2012).

2. OBJETIVOS

Neste trabalho, objetivou-se estudar, de maneira geral, a influência do estado de superfície de corpos de prova de aços ABNT 1020 encruado e ABNT 1045 recozido sobre o limite de resistência à fadiga obtido por meio de ensaios de fadiga de flexão rotativa com tensão alternada, ou seja, com tensão mínima e máxima iguais em módulo. Além disso, buscou-se caracterizar os corpos de provas estudados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Assim como abordado anteriormente, a causa da propagação de trincas é o ciclo de tensões trativas no material, logo, é de se prever que tensões residuais compressivas podem ser benéficas à resistência à fadiga do material e, de fato, o são (NORTON, 2004).

Os efeitos das tensões residuais de compressão são mais efetivos nos materiais com uma elevada tensão de escoamento, pois eles são mais sensíveis à propagação de trinca e porque as tensões residuais podem não permanecer em materiais com baixas tensões de escoamento por muito tempo, já que pode ocorrer um posterior escoamento em razão do carregamento de serviço, o que aliviaria as tensões residuais. Faires (1965) mostra que aços com limite de escoamento S_y menor que 550 MPa apresentam uma melhoria inicial, mas pouca melhoria duradoura. Por outro lado, Heywood (1962) apresentou resultados de uma melhoria de 50% na resistência à fadiga em roscas laminadas em aço de alta resistência.

Fuchs e Stephens (1980) dizem que o jateamento é muito utilizado em peças como serra de corrente, virabrequins, hastes de conexão, bielas, engrenagens e molas. Inclusive, Shigley et al (2005) dizem que o jateamento de esferas em molas pode aumentar a resistência à fadiga por torção em 20% ou mais.

Bagherifard et al (2014) estudaram a influência do jateamento na microestrutura e no limite de resistência à fadiga do ferro fundido nodular e encontraram um aumento de até 67 % no limite de resistência à fadiga sob determinadas condições de jateamento.

Sakamoto, Lee e Cheong (2015) realizaram ensaios de fadiga por flexão rotativa em um aço médio carbono para estudar suas propriedades após o processo de jateamento e obtiveram resultados com um aumento de 25 % no limite de resistência à fadiga.

Zavodská et al (2016) estudaram a resistência à fadiga de um aço baixa liga (40NiCrMo7) e lograram um aumento de até 19 %. Por outro lado, Trsko et al (2014) estudaram a resistência à fadiga de outro aço baixa liga (50CrMo4) e obtiveram um aumento de até 22 %.

A Figura 1 mostra a distribuição de tensão residual (em psi) resultante do jateamento de esferas em comparação ao polimento e à nitretação sobre dois aços com diferentes limites de escoamento. A Figura 2 ilustra a influência do revestimento de níquel e do jateamento de granalhas na resistência à fadiga do aço (em kpsi), sendo que neste caso o revestimento de níquel é um tratamento superficial que prejudica a resistência à fadiga.

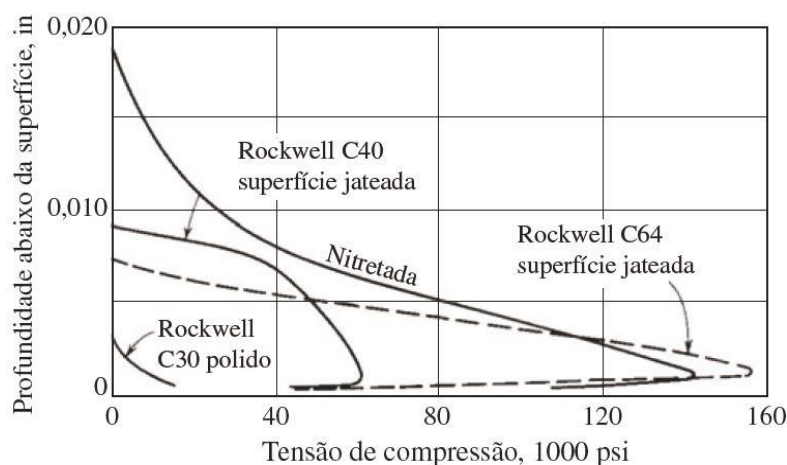


Figura 1. Distribuições de tensões residuais provocadas por jateamento de esferas obtidas por Almen e Black¹ apud Norton (2004).

¹ ALMEN, J. O.; BLACK, P. H.J. Residual Stresses and Fatigue in Metals. New York: McGraw-Hill, 1963. 226 p.

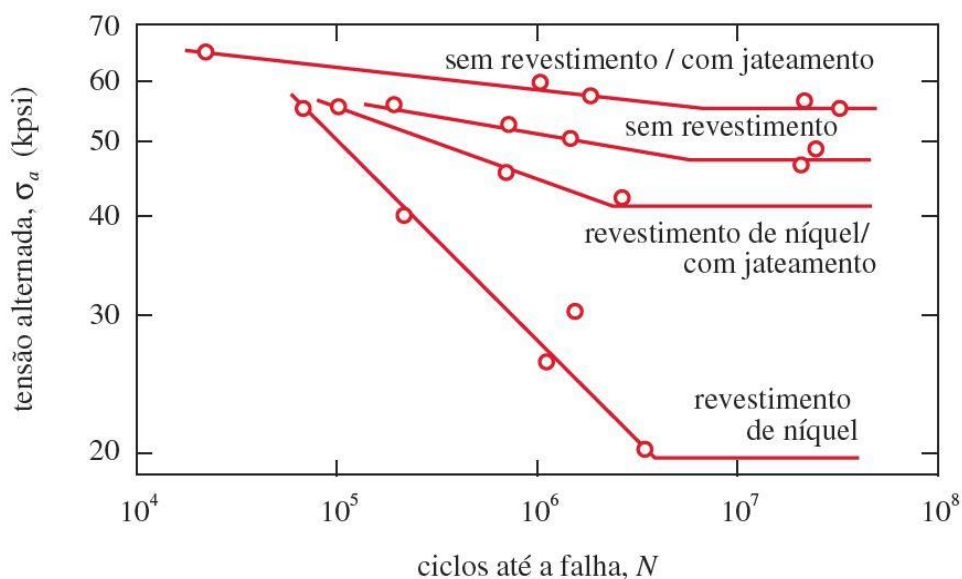


Figura 2. Efeito do revestimento de Níquel e do jateamento de esferas na resistência à fadiga do aço obtido por Almen e Black apud Norton (2004).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos, foram realizados ensaios mecânicos em corpos de prova de aços ABNT (ou AISI) 1020 encruados e ABNT 1045 recozidos em três situações distintas: 1 – como usinado (por torneamento) e após acabamento por 2 – lixamento e 3 – jateamento, onde a sigla ABNT refere-se à Associação Brasileira de Normas Técnicas e AISI à *American Iron Steel Institute*. Assim, eles foram identificados de acordo com seu processo de acabamento e com o material. Os efeitos dos processos foram estudados por meio de um ensaio dinâmico, de fadiga, empregando-se o “método da escada”. Todos os processos de fabricação aqui descritos foram realizados na Escola Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) Antônio Adolpho Lobbe e os ensaios no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos.

4.1. Caracterização dos materiais

Com o intuito de verificar se os materiais estudados eram os materiais propostos, foram realizados alguns procedimentos. Primeiramente, foi realizada uma metalografia, com Nital 2 %, o qual é uma solução de ácido nítrico em álcool etílico a uma concentração de 2 %, nas seções transversais e longitudinais em uma amostra de cada material, assim como ilustram as Figs. 3 e 4. É possível observar, na Fig. 3b, que os grãos estão orientados no sentido do seu processo de fabricação de trefilação a frio, enquanto que isto não é possível ser observado na Fig. 4, onde os grãos estão bem distribuídos em razão do seu processo de fabricação de laminação a quente.

Utilizando o software livre ImageJ®, calculou-se a quantidade de carbono para cada material. Para tanto, utilizou-se da contagem da fase minoritária no material, sendo a perlita $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ para o aço ABNT 1020 e a ferrita α para o aço ABNT 1045, e a relacionou com a porcentagem de carbono por meio da regra da alavanca, conforme utilizado por Callister (2008).

Para as amostras do aço ABNT 1020, o valor médio de perlita encontrado foi de 21,33 %, o que corresponde a 0,18 % de carbono e, para as amostras do aço ABNT 1045, o valor médio de ferrita encontrado foi de 38,67 %, o que corresponde a 0,48 % de carbono, sendo que ambos os valores atendem aos requisitos da ASTM A29/A29M (2015) e são comparados com eles na Tab. 1.

A Figura 5 apresenta as curvas obtidas no ensaio de tração de seis corpos de prova, sendo três para cada material e em cada condição. As propriedades mecânicas obtidas no ensaio foram similares, o que evidencia o fato de que os processos de acabamento aqui utilizados não influenciam nas propriedades avaliadas neste tipo de ensaio. A tensão de escoamento média $\bar{S}_y$ obtida, para o aço ABNT 1020, foi 546 MPa, a tensão de tração máxima média $\bar{S}_{ut}$ foi 620 MPa. Para o aço ABNT 1045, a tensão de escoamento média foi 375 MPa, a tensão de tração máxima média foi 720 MPa.

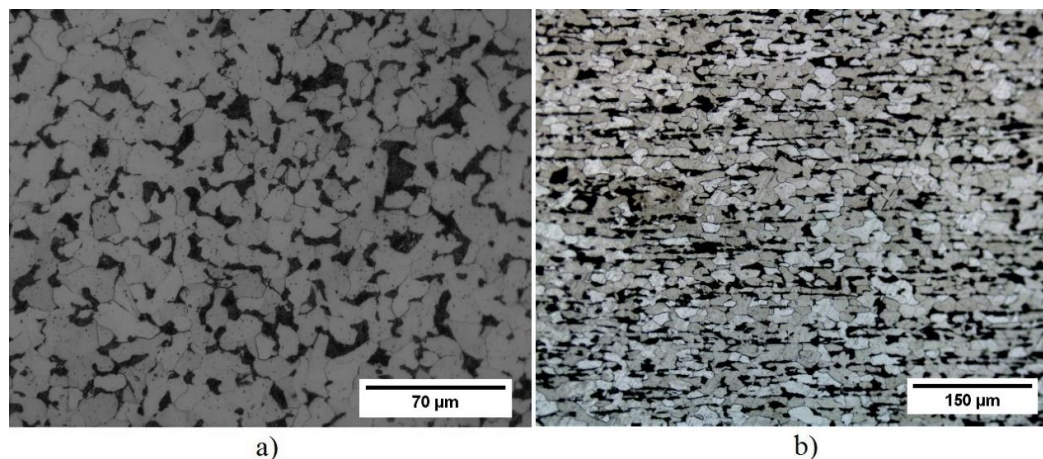


Figura 3. Metalografia do aço ABNT 1020 das seções a) transversal e b) longitudinal à orientação de fabricação.

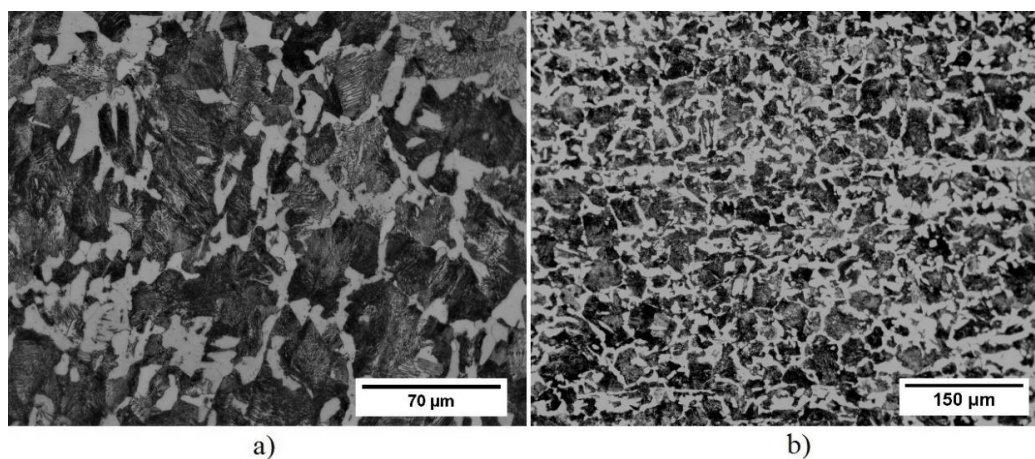


Figura 4. Metalografia do aço ABNT 1045 das seções a) transversal e b) longitudinal à orientação de fabricação.

Tabela 1. Comparação da porcentagem de carbono do material em estudo com a da norma ASTM A29/A29M (2015).

	% C		% C
Aço 1020	0,18	Aço 1045	0,48
1020*	0,18 – 0,23	1045*	0,43 – 0,50

*Valores retirados da norma ASTM A29/A29M (2015)

Segunda a norma ASTM A400 (2012), os materiais em estudo, aço ABNT 1020 e ABNT 1045, se enquadram nas classes R-1 e R-2 respectivamente, devido aos seus processos de fabricação e dimensões, e que as tensões de escoamento mínimas devem estar entre [379 - 414] MPa e [310 – 345] MPa respectivamente em razão do seu processo de fabricação. Assim, os dados obtidos nos ensaios de tração atendem à essa norma. Os resultados obtidos no ensaio são comparados com os da norma na Tab. 2. Além disso, pode ser verificado, nesta mesma Tab. 2, que o limite de escoamento obtido no ensaio de tração do ABNT 1020 é sensivelmente superior àquele mínimo especificado em norma. No entanto, isso não afeta o planejamento dos ensaios de fadiga já que a definição do nível inicial de tensão de flexão é pautada no limite de resistência à tração.

Tabela 2. Comparação entre as propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração com os valores mínimos requeridos pela norma ASTM A400 (2012).

	S_y [MPa]		S_y [MPa]
Aço 1020	546	Aço 1045	375
CD 1020*	379 - 414	HR 1045**	310 - 345

*Valores retirados da norma ASTM A400 (2012) para um aço 1020 trefilado a frio.

**Valores retirados da norma ASTM A400 (2012) para um aço 1045 laminado a quente.

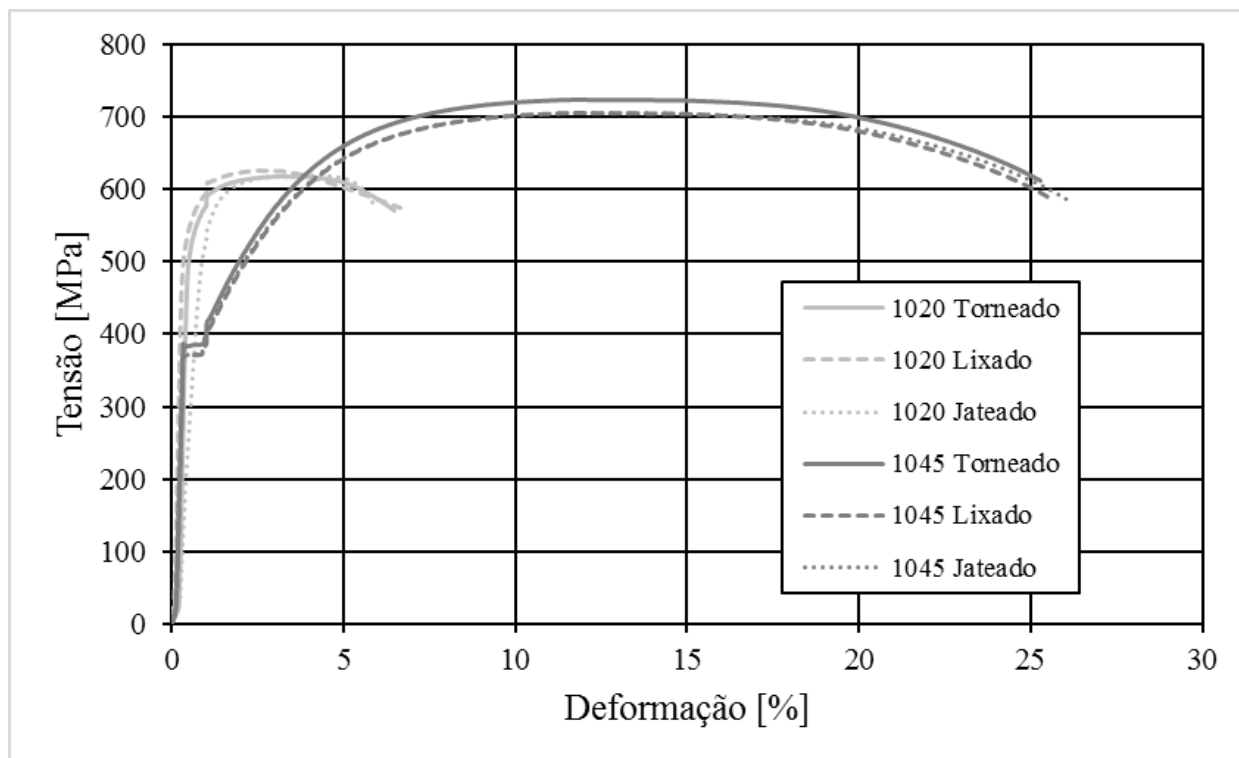


Figura 5. Curvas tensão-deformação para os aços ABNT 1020 e ABNT 1045 utilizados neste trabalho.

4.2. Fabricação dos corpos de prova

As amostras dos materiais foram encaminhadas para a Escola Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) Antônio Adolpho Lobbe para que sua fabricação fosse efetuada segundo o necessário. Para tanto, foi utilizado um torno com controle numérico computadorizado (CNC) industrial Galaxy 10 FANUC 21i-T da ROMI e um gabinete para jateamento GS 9075X da CMV.

Os corpos de provas foram separados em dois grupos, um para os ensaios de tração e outros para o de fadiga e, depois, em lotes conforme seu acabamento superficial. Os lotes referentes aos ensaios de fadiga possuíam seis corpos de prova cada e, os lotes para os ensaios de tração, possuíam um corpo de prova cada.

O torneamento dos corpos de prova para os ensaios de tração foi realizado nas seguintes condições: velocidade de corte $v_c = 200$ m/min; avanço $f = 0,08$ mm; raio de ferramenta $r_e = 0,4$ mm e profundidade de usinagem $a_p = 0,4$ mm. Já o torneamento dos corpos de prova para os ensaios de fadiga foi realizado nas seguintes condições: velocidade de corte $v_c = 200$ m/min; avanço $f = 0,08$ mm; raio de ferramenta $r_e = 0,8$ mm e profundidade de usinagem $a_p = 0,33$ mm. Em ambos os processos, foi empregado fluido sintético abundante como meio de refrigeração dos mesmos. Ademais, a diferença entre o raio de ponta das ferramentas utilizadas para usinagem dos corpos de prova não ocasionou diferença significativa na rugosidade superficial. O lixamento foi realizado com uma lixa com granulação 600 em baixas rotações. O jateamento foi realizado com microesferas de vidro AA (600 – 212 microns) e uma pressão de trabalho de 6 bar em toda a seção de teste.

4.3. Estado de superfície

Para avaliar o estado de superfície dos corpos de prova, a rugosidade média R_a foi medida com o auxílio de um rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-201P. Ela foi calculada para cada corpo de prova por meio de três medições em

posições distintas na região útil dos corpos de prova, ou seja, na região onde o corpo de prova fratura. Os resultados são apresentados na Fig. 6 e as classes de rugosidade são identificadas de acordo com a ISO 1302:2002(E) (2002) (International Organization for Standardization – ISO).

Nota-se, na Fig. 6, que a rugosidade superficial em razão do processo de torneamento é praticamente igual para ambos os materiais, assim como a dos corpos de prova lixados. No entanto, enquanto que a rugosidade aumentou para os corpos de prova jateados de aço ABNT 1045, a rugosidade diminuiu para os corpos de prova jateados de aço ABNT 1020. Mesmo a diferença sendo pequena, a qual não foi considerada grande o suficiente para influenciar no resultado do limite de resistência à fadiga, ela pode ser explicada por meio da diferença dos processos de fabricação das matérias primas. Pelo fato do aço ABNT 1020 estar encruado, o aumento da rugosidade superficial, causada pelo jateamento, seria minimizado, já que o impacto, nas condições realizadas, não era intenso o suficiente para isso. Pelo contrário, ele acabou apenas eliminando picos de rugosidade, diminuindo, assim, a rugosidade média. De maneira análoga, estando o aço ABNT 1045 recozido, sua sensibilidade ao processo é maior, logo, o jateamento causou um aumento na rugosidade média.

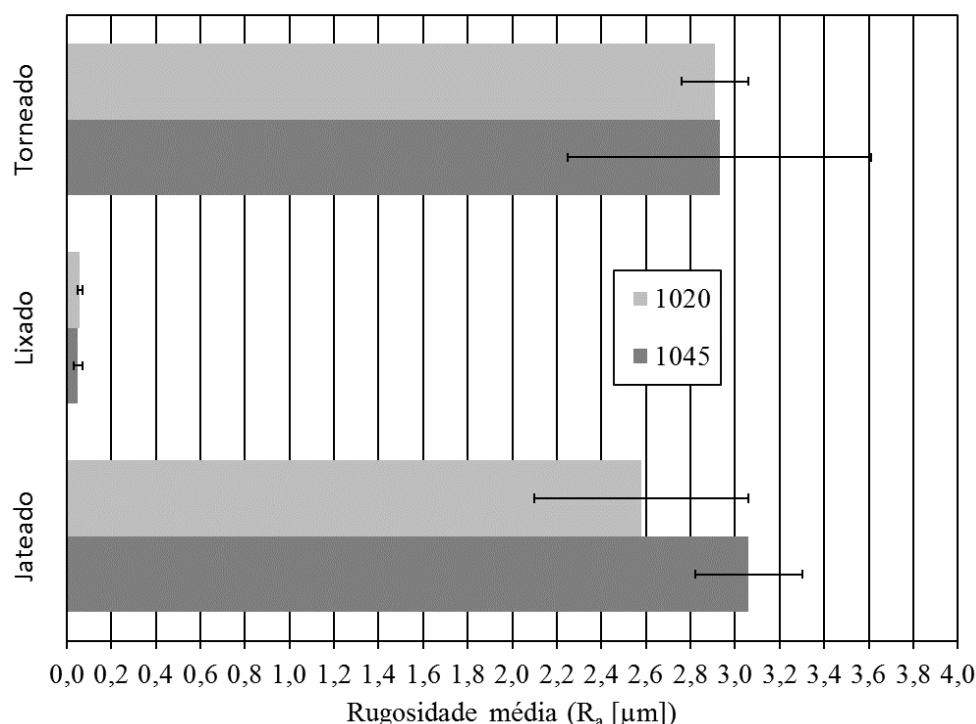


Figura 6. Rugosidade média Ra e seus respectivos desvios padrão para cada condição dos corpos de prova

4.4. Ensaios mecânicos

A norma ASTM E8/E8M-16a (2016) estabelece algumas dimensões possíveis para o corpo de prova em um ensaio de tração, além das condições de ensaio. No presente trabalho, foram utilizados corpos de prova ilustrados pela Fig. 7, com $G = 24,0$ mm, $D = 6,0$ mm, $R = 6,0$ mm e $A_r = 32,0$ mm. Ademais, a deformação utilizada, inicialmente, no ensaio foi de $0,13$ mm/mm/min e, em seguida, foi alterada para 13 mm/mm/min, onde a primeira taxa queria caracterizar a deformação elástica do corpo de prova e a segunda a deformação plástica. A taxa de deformação foi alterada ao atingir 1% de deformação do corpo de prova. Além disso, a taxa foi aumentada porque os ensaios foram realizados em temperatura ambiente, portanto, esta alteração não influencia nos resultados e desejava-se uma maior velocidade nos ensaios. A aquisição dos dados foi realizada a cada incremento de 2 kgf.

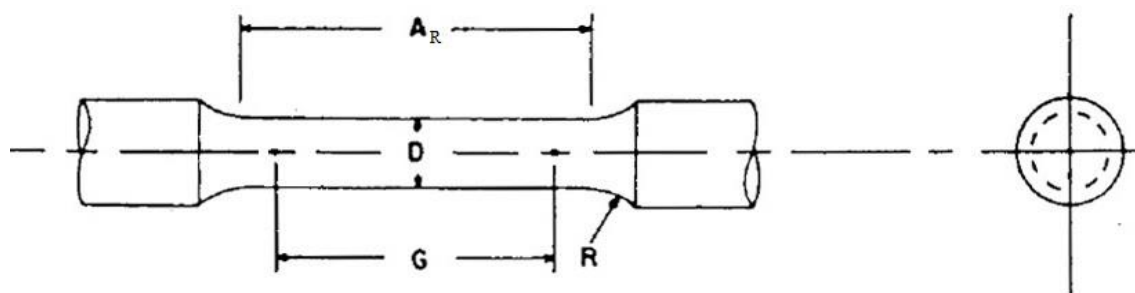


Figura 7. Dimensões de um corpo de prova cilíndrico para o ensaio de tração.

A norma ASTM E466 (2015) refere-se que o tipo de corpo de prova que deve ser utilizado, para ensaios de fadiga, depende do objetivo do ensaio, do tipo do equipamento e de sua capacidade e da forma como o material está disponível. Para as condições disponíveis no Laboratório de Ensaios Mecânicos, sendo que será utilizado o equipamento RBF-200, utilizou-se do corpo de prova com seção circular e raio contínuo, assim como é ilustrado pela Fig. 8, com $d = 6,4$ mm; $R = 55$ mm, $D = 12,5$ mm e comprimento total de 215 mm. Sendo que a norma impõe que $R > 8d$. Além disso, os ensaios de fadiga foram realizados em temperatura ambiente e eles eram por flexão rotativa com tensão alternada, ou seja, com uma razão de tensão $R = -1$.

A frequência utilizada na maioria dos ensaios era próxima a 7000 rpm em razão do limite de rotação da máquina de ensaio ser de 10000 rpm, logo, para não esforçar a máquina em seu limite, aquela rotação foi adotada. Ademais, foi realizado uma simulação, no Laboratório de Engenharia Computacional do Núcleo de Laboratórios de Ensino à Engenharia – NuLEEn, no software Siemens PLM NX™ 10 utilizando o solver NX NASTRAN com uma análise estrutural e uma solução estática linear SOL 110 Modal Complex Eigenvalues para calcular as frequências naturais de vibração dos corpos de prova de fadiga. O corpo de prova foi discretizado em uma malha com elementos tetraédricos de 5 mm e foram impostas as condições de contorno necessárias para simular o corpo de prova fixado na máquina. A análise mostrou que a primeira frequência natural é 315,44 Hz, ou seja, 18926,40 rpm, assim, a frequência do ensaio adotada está distante desta frequência natural e não sofrerá nenhuma influência desta. Além disso, um controle subjetivo era feito ao observar se a frequência utilizada não causava vibrações perceptíveis ao olho humano e, caso houvessem, rotações em faixas menores eram utilizadas.

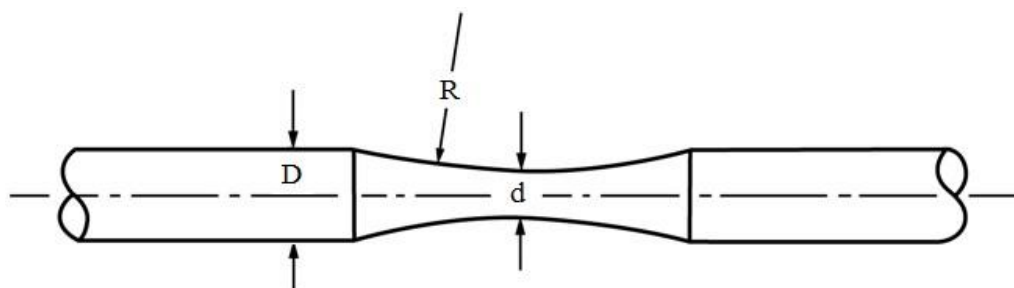


Figura 8. Corpo de prova com seção circular e raio contínuo.

Os materiais aqui utilizados e os dados de rugosidade se assemelham com os dados apresentados por Sakamoto, Lee e Cheong (2015) e por Zavodská et al (2016). Desta maneira, estimou-se que o aumento da resistência à fadiga nos corpos de prova jateados seria na mesma ordem que os dos trabalhos citados, assim um aumento de 20%, em relação aos corpos de prova usinados, foi esperado. Ademais, para os corpos de provas lixados, foi esperada uma influência, em razão da rugosidade superficial média, ser parecida com a de corpos de prova retificados, já que a classe de rugosidade destes é a mesma que a encontrado nos corpos de prova lixados deste trabalho. Além disso, não foi esperada nenhuma influência em razão de possíveis tensões residuais já que o processo de lixamento foi realizado em baixas rotações e com uma pressão exercida pelo operador da máquina, sendo estas condições insuficientes para causarem tensões residuais, pois estas são causadas, nos aços, com altas cargas mecânicas e/ou térmicas.

4.5. Abordagem estatística da fratura por fadiga

Para a análise dos resultados obtidos nos ensaios de fadiga, foram utilizados três métodos de análise estatísticos baseados no método da escada, são eles: método de Dixon e Mood (1948), método de Dixon (1965) e método de Little (1972). Além disso, foi adotado 6 corpos de prova para cada condição para cada material porque Brownlee et al. (1953)

mostra que é possível obter uma estimativa aceitável, para a resistência à fadiga, a partir de 5 a 10 amostras e a Japan Society of Mechanical Engineers² (JSME) apud Pollak (2005) recomenda a utilização de 6 amostras.

De acordo com Pollak (2005), onde ele compara, por meio de vários exemplos, os resultados obtidos dos três métodos com um valor real, o método de Little, quando se possui um lote pequeno e quando há poucas amostras (de 3 a 4) após a primeira troca de eventos, é o que mais se aproxima do valor verdadeiro e, portanto, mais exato que os outros.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 9 e 10 apresentam os resultados obtidos nos ensaios de fadiga por flexão rotativa utilizando os métodos apresentados anteriormente. Elas comparam os resultados tanto para cada método de análise estatística, quanto para cada tipo de acabamento.

Na análise comparativa dos métodos, observa-se que os resultados são coerentes e próximos entre si, assim como esperado. Logo, em razão da maior exatidão do método de Little para a situação deste trabalho, como discutido na seção 4.5, adotaram-se os resultados deste método como valor de comparação entre os limites de resistência à fadiga.

Para os corpos de prova de aço ABNT 1020, os limites de resistência à fadiga para vida infinita encontrados, assim como ilustra a Fig. 9, foram: $S_{f_{usinado}} = 270 \text{ MPa}$, $S_{f_{lixado}} = 262 \text{ MPa}$ e $S_{f_{jateado}} = 298 \text{ MPa}$. Já para os corpos de prova de aço ABNT 1045, apresentados na Fig. 10, os valores foram: $S_{f_{usinado}} = 204 \text{ MPa}$, $S_{f_{lixado}} = 296 \text{ MPa}$ e $S_{f_{jateado}} = 323 \text{ MPa}$.

Não é possível notar uma diferença estatística entre os limites de resistência à fadiga nas três condições dos corpos de prova de aço ABNT 1020 em razão da dispersão calculada pelos métodos. Para os corpos de prova de aço ABNT 1045, houve um acréscimo na resistência nos corpos de prova lixados e jateados, havendo um aumento de 58,20 % para o segundo acabamento. Assim, os processos aqui realizados não estabeleceram diferenças estatisticamente notáveis no limite de resistência à fadiga do aço ABNT 1020 encruado. No entanto, para o aço ABNT 1045 recozido, os resultados foram relevantes.

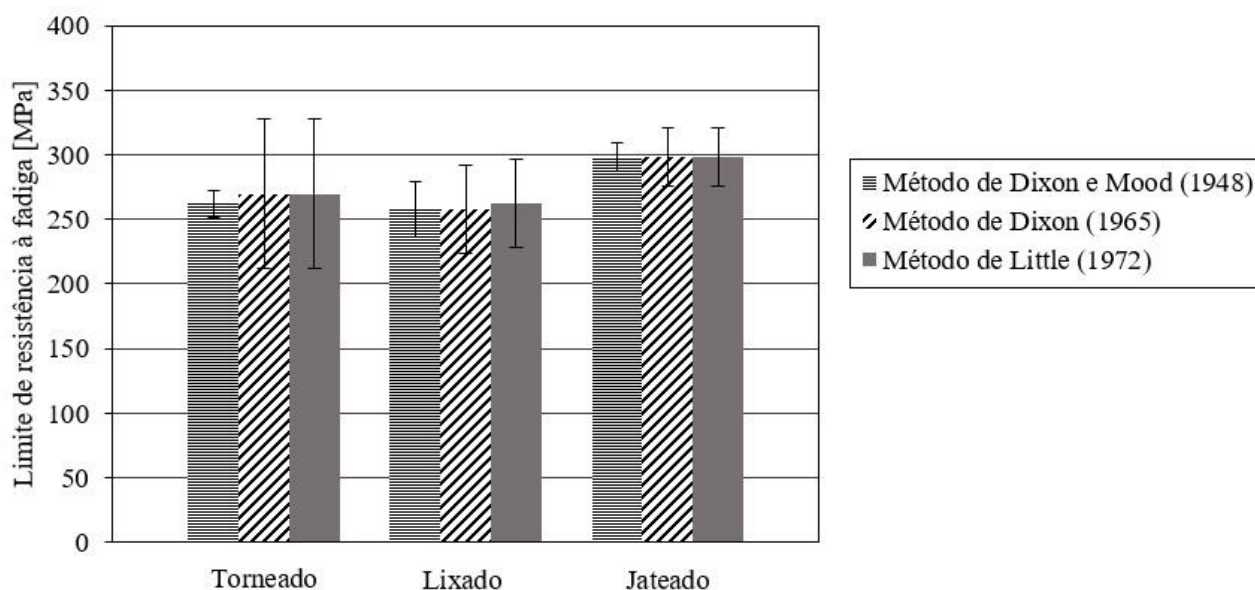


Figura 9. Limite de resistência à fadiga do aço ABNT 1020 para cada tipo de acabamento e cada tipo de método de análise estatística.

² NAKAZAWA, H.; KODAMA, S. Statistical S-N Testing Method with 14 Specimens: JSME Standard Method for Determination of S-N Curves. Statistical Research on Fatigue and Fracture, Japan Society of Materials Science, Elsevier, New York, 1987.

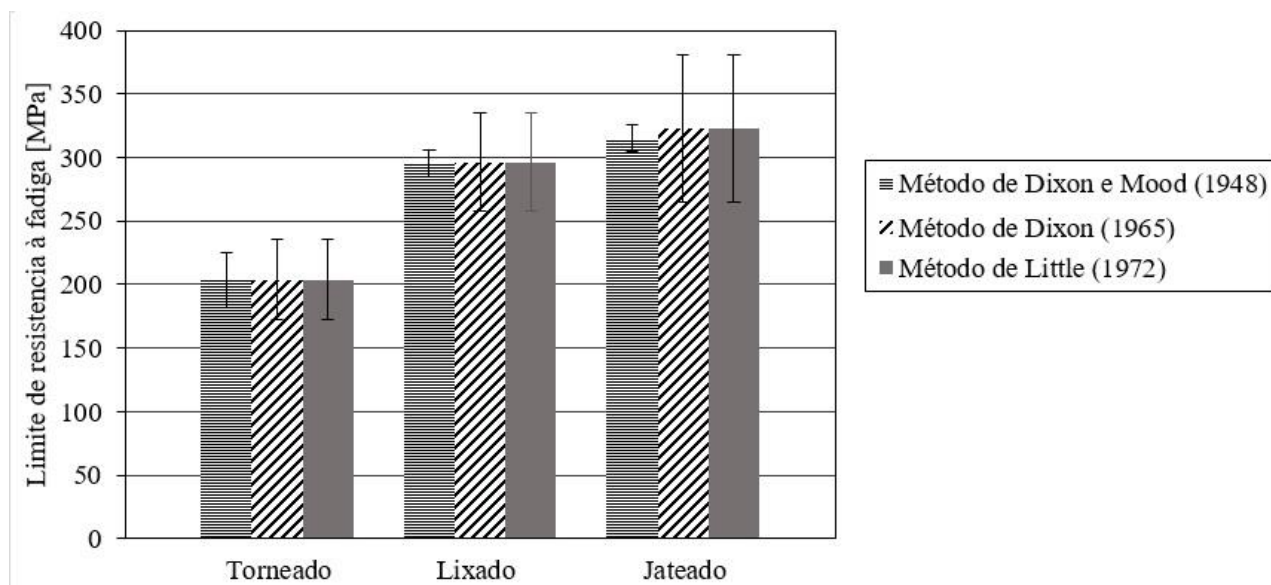


Figura 10. Limite de resistência à fadiga do aço ABNT 1045 para cada tipo de acabamento e cada tipo de método de análise estatística.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, pode-se observar as influências de três tipos de acabamento sobre o limite de resistência à fadiga para vida infinita de corpos de prova de aço ABNT 1020 e 1045, sendo tais acabamentos: 1 – como usinado (por torneamento) e após acabamento por 2 – lixamento e 3 – jateamento. Nele, enfatizou-se a considerável influência que um processo de fabricação/acabamento possui sobre o limite de resistência à fadiga.

Ademais, concluiu-se que o jateamento é um processo de acabamento que aumenta a resistência à fadiga consideravelmente, até mais que um acabamento por lixamento, sendo este equivalente, nas condições realizadas, a um acabamento por retífica. Neste estudo, não foi obtido uma diferença estatística do limite de resistência à fadiga para o aço ABNT 1020. Já para o aço ABNT 1045, o aumento na resistência à fadiga foi de 58 % para os corpos de prova jateados quando comparada com o mesmo material usinado. Também se confirmou que o aumento ocorre em razão da introdução de tensões residuais compressivas e não de uma possível melhora na rugosidade superficial, já que esta é semelhante a imposta pela usinagem, assim o efeito acoplado entre acabamento superficial e tensões residuais compressivas foi estudado.

Para trabalhos futuros, observou-se a necessidade de realizar ensaios em materiais com condições similares e não tão diferentes como as estudadas (encruado e recozido) para que se possa correlacionar as condições de jateamento com o aumento da resistência à fadiga. Além disso, enxergou-se a necessidade de separar as influências dos acabamentos superficiais das influências das tensões residuais sobre a resistência à fadiga para uma maior compreensão e caracterização das mesmas.

7. REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E8/E8M – 16a: Standard Test Methods for Tension Test of Metallic Materials. West Conshohocken, 2016. 30 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E29/E29M – 15: Standard Specification for General Requirements for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought. West Conshohocken, 2015. 16 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A400 – 69 (2012): Standard Practice for Steel Bars, Selection Guide, Composition, and Mechanical Properties. West Conshohocken, 2012. 9 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E466 - 15: Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. West Conshohocken, 2015. 6 p.
- BAGHERIFARD, S. et al. Effect of severe shot peening on microstructure and fatigue strength of cast iron. *International Journal of Fatigue*, v. 65, p. 64-70, ago. 2014.
- BROWNEE, K. A. et al. The Up-and-Down Method with Small Samples. *Journal of the American Statistical Association*, v. 48, n. 262, p. 262-277, jun. 1953.
- DIXON, W. J.; MOOD, A. M. A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data. *Journal of the American Statistical Association*, v. 43, n. 241, p. 109-126, mar. 1948.
- DIXON, W. J. The Up-and-Down Method for Small Samples. *Journal of the American Statistical Association*, v. 60, n. 302, p. 967-978, dez. 1965.

- FAIRES, V. M. Design of Machine Elements. 4. ed. London: Macmillan, 1965. 550 p.
- FUCHS, H. O. STEPHENS, R. I. Metal Fatigue in Engineering. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1980. 473 p.
- HEYWOOD, R. B. Designing Against Fatigue of Metals. New York: Reinhold, 1962. 436 p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1302:2002(E): Geometrical Product Specifications (GPS) – Indication of surface texture in technical product documentation. Genebra, 2002. 46 p.
- LITTLE, R. E. Estimating the Median Fatigue Limit for Very Small Up-and-Down Quantal Response Tests and for S-N Data with Runouts. Probabilistic Aspects of Fatigue, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 511. jan. 1972.
- NORTON, R. L. Projeto de máquinas: uma abordagem integrada. Tradução João Batista de Aguiar et al. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004. 1030 p.
- POLLAK, R. D. Analysis of Methods for Determining High Cycle Fatigue Strength of a Material with Investigation of ti-6al-4v Gigacycle Fatigue Behavior. 2005. 255 p. Dissertation (Degree of Doctor of Philosophy) – Air Force Institute of Technology, Air University, Ohio, 2005.
- SAKAMOTO, J.; LEE, Y. S.; CHEONG, S. K. Effect of surface flaw on fatigue strength of shot-peened medium-carbon steel. Engineering Fracture Mechanics, v. 133, p. 99-111, jan. 2015.
- SHIGLEY, J. E. et al. Projeto de Engenharia Mecânica. Tradução João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 960 p.
- SIQUEIRA, N. C. de; MARCHESI, S. S. Determinação por meio de planejamento de experimentos da influência do lixamento nas medidas de dureza com durômetro portátil de método UCI.2012. 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.
- TRSKO, L. et al. Effect of severe shot peening on ultra-high-cycle fatigue of a low-alloy steel. Materials and Design, v. 57, p. 103-113, mai. 2014.
- ZÁVODSKÁ, D. et al. Fatigue resistance of low alloy steel after shot peening. In: DANUBIA ADRIA SYMPOSIUM on Advanced in Experimental Mechanics, 32., 2016, Materials Today Proceedings. p. 1220-1225.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EVALUATION OF THE SURFACE CONDITION INFLUENCE OVER THE FATIGUE LIMIT OF CARBON STEELS

Armando Ítalo Sette Antonialli, antonialli@ufscar.br¹

Daniel Garcia Ribeiro, daniel.gribeiro@hotmail.com¹

Carlos Eiji Hirata Ventura, ventura@ufscar.br¹

Vitor Sordi, sordi@ufscar.br²

Rogério Spatti, rogerio.spatti@sp.senai.br³

¹Federal University of São Carlos, Department of Mechanical Engineering, Rodovia Washington Luís (SP-310), km 235, São Carlos, São Paulo – Brasil. CEP: 13565-905

²Federal University of São Carlos, Department of Materials Engineering, Rodovia Washington Luís (SP-310), km 235, São Carlos, São Paulo – Brasil. CEP: 13565-905

³National Service of Industrial Learning, Rua Cândido Padim, 25, São Carlos, São Paulo – Brasil. CEP: 13574-320

Abstract: *The undeniable appeal for sustainable solutions in the most diverse economic activities is also verified in the metalworking sector, in which small mass reductions of manufactured components can mean a notable gain in an ergonomic view or even a considerable reduction in the fuel consumption. In this context, the guarantee for robust projects is possible due to the strength enhancing mechanisms applicable to metallic materials as: reduction of the grain size, solid solution, hardening, second phases or superficial treatment. In this work, the surface condition influence over the fatigue limit of ABNT 1020 strain hardened and 1045 annealed steel test specimen in three different conditions was studied, to know: 1 – as machined (by turning) and after finishing by 2 – sanding and 3 – shot peening. This influence was analyzed throughout rotating Cantilever bending fully reversed fatigue tests and the results were analyzed by statistical approaches based on the “up-and-down method”. The results showed a higher increase in fatigue limit for the shot peened test specimens due to the residual compressive stresses that this process imposes. The most remarkable effect was observed for ABNT 1045 steel test specimens due to their annealed condition.*

Keywords: *fatigue, shot peening, sanding, up-and-down method.*