

O USO DO *SHOT PEENING* PARA A MELHORIA DA VIDA EM FADIGA EM AÇO ABNT1060 ¹

Cláudia Lisiane Fanezi da Rocha ²

André Massato Takimi ²

Telmo Roberto Strohaecker ³

Resumo

O trabalho foi estruturado visando demonstrar os benefícios que são obtidos com a utilização da técnica *shot peening* em componentes mecânicos no que diz respeito à vida em fadiga. O material estudado foi um aço ABNT 1060 (similar ao SAE J403 1060), na condição de trefilado e posteriormente laminado. O *shot peening* gera tensões residuais compressivas na superfície do material, melhorando o desempenho em fadiga do componente inclusive em ambientes agressivos, onde o material está sujeito a corrosão-sob-tensão e corrosão-fadiga. Foram feitas análises de tensões residuais, levantadas curvas de fadiga e efetuadas análises da fratura em duas condições: antes e depois do *shot peening*. Os resultados apontaram uma melhoria significativa no desempenho em fadiga associado às tensões residuais compressivas decorrentes do processo de *shot peening*.

Palavra-chave: Tensão residual; Fadiga; *Shot peening*

THE USE OF SHOT PEENING TO IMPROVING LIFE IN FATIGUE IN STEEL ABNT 1060

Abstract

The work was structured aiming at demonstrating the benefits that are obtained with the use of the *shot peening* technique in mechanical components regarding fatigue life. The studied material was ABNT 1060 steel (similar SAE J403 1060 steel), on cold worked condition (draw and rolling). The *shot peening* generates compressive residual stresses on the surface of the material, which improves the fatigue performance of the component, and also in aggressive environments, where the material is subject to corrosion-under-stress-corrosion and corrosion-fatigue. Analysis of residual stresses were conducted as well as fatigue curves and fracture analysis of two conditions: before and after the *shot peening*. The results indicated a significant improvement in performance in fatigue associated with compressives residual stresses associated with the process of *shot peening*.

Key words: Residual stresses; Fatigue; *Shot peening*

¹ Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

² Engenheiro Metalúrgico – UFRGS

³ Prof. Dr.- Departamento de Metalurgia - UFRGS

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que desde os primórdios os tratamentos mecânicos são aplicados nos processos de manufatura de componentes metálicos. O martelamento foi o primeiro método mecânico a trazer benefícios para a forma final e resistência mecânica. Na formação da tecnologia moderna, foi observado que as falhas em componentes e estruturas ocorriam mais freqüentemente em carregamentos dinâmicos do que estáticos. Desde o trabalho pioneiro de Wöhler, no século XIX, muitos estudos foram feitos para a determinação da resistência dos materiais à fadiga sob condições controladas e para desvendar os mecanismos pelos quais a falha ocorria.

Uma vez sendo a fadiga um processo que depende tanto de superfície quanto da tensão aplicada, a grande maioria das técnicas empregadas para aumentar a vida em fadiga, almejam produzir uma camada de material comprimido na superfície do componente.

O *shot peening* é um processo no qual se aplica tensão de compressão na superfície metálica, expondo-a ao jato de granalha esférica em alta velocidade, aumentando a resistência, a vida em fadiga e, diminuindo a corrosão em molas helicoidais e planas, barras estabilizadoras de automóveis, engrenagens de caixa de câmbio, coroas e pinhões de transmissão, partes e peças de aviões, brocas de perfuração de petróleo e mineradoras.

Cada vez mais tem-se estudado os efeitos benéficos deste processo. A medição de tensões residuais impostas pelo processo é uma maneira de se saber os efeitos causados pelo processo. Para a vida em fadiga, o fato de existir tensões residuais compressivas traz um ganho bastante significativo, de forma que este trabalho está motivado justamente em estudar os reais efeitos do *shot peening* no aço SAE J403 1060, já que quanto maior a resistência mecânica do aço, mais tensão residual compressiva consegue-se impor, claro que dentro de certos limites. Para isso, foi levantada a curva de fadiga do material com e sem a aplicação de *shot peening*, efetuadas medições de rugosidade (R_a , R_t e R_z), bem como tensões residuais pelo método do furo cego, perfis de microdureza e metalografia.

1.1 Fadiga

Define-se fadiga como o fenômeno de ruptura progressiva de materiais sujeitos a ciclos repetidos de tensão ou deformação. O estudo do fenômeno é de importância para o projeto de máquinas e estruturas, uma vez que a grande maioria das falhas em serviço são causadas pelo processo de fadiga.

As primeiras observações do fenômeno de fadiga datam do ano de 1829, quando Albert^[1] publicou alguns resultados de testes realizados em correntes de ferro submetidas a carregamentos cíclicos. No período de 1852 a 1869, em Berlim, Augusto Wöhler estudou a ruptura de eixos ferroviários. Wöhler projetou aparelhos e desenvolveu métodos para medições das cargas de serviço e introduziu o conceito do limiar de fadiga em metais – tensão abaixo da qual não ocorreriam falhas por fadiga – e definiu o que viriam a ser as curvas S-N (variação de tensão x Número de ciclos) ainda hoje utilizadas no cálculo de vida em fadiga. As principais conclusões foram:

- A falha do material solicitado dinamicamente pode ocorrer bem abaixo da tensão de falha sob carregamento estático;
- A amplitude de tensões é o parâmetro mais importante na vida em fadiga, mas tendo a máxima tensão de tração grande importância.

Falhas por fadiga são causadas por solicitações alternadas.

1.2 Tensões Residuais

Tensões residuais ocorrem em qualquer componente produzido por diferentes processos, que causam uma série de efeitos que poderão ser benéficos ou deletérios, dependendo da aplicação do componente, da intensidade e do sinal da tensão.^[2]

Outro fator importante no efeito das tensões residuais é o projeto adequado do produto, significando o conhecimento do fenômeno pelo projetista e pelo engenheiro. A não observância dos efeitos deste fenômeno causa uma série de problemas durante o processo de fabricação ou até mesmo falhas em operação.

O conhecimento do nível de tensões presentes nas peças de aplicação em engenharia é fator de segurança para evitar até mesmo acidentes. A quantificação do estado das tensões residuais presentes em um componente (sua magnitude, orientação e distribuição) torna possível determinar o comportamento do material sob diferentes condições de carregamento estático ou dinâmico.^[2,3] Este conhecimento é interessante também para a otimização do projeto, redução de peso e de custos.

As tensões residuais são introduzidas em um material no processo de fabricação de um componente. A definição mais simples da tensão residual é que elas são tensões remanescentes em um sólido na ausência de cargas externas e gradientes térmicos.^[3] Estas tensões chegam como uma resposta elástica do material a uma distribuição de deformações não elásticas, tais como deformações plásticas, precipitação, transformações de fase, deformações por expansão térmica, erros de montagem, etc.

Os processos de deformação mecânica que causam deformações plásticas em camadas superficiais do material, são do tipo retificação, usinagem e ainda as deformações de origem térmicas e de transformação de fase diferencial provocadas pelo tratamento térmico, também causam tensões residuais.^[4]

1.3 Método do Furo (Hole Drilling Method)

O Método do Furo data do trabalho de Mathar (1934), que utilizou um extensômetro mecânico para a medida das deformações, decorrentes do alívio de tensões nas vizinhanças de um furo passante, em uma chapa fina de um material contendo tensões residuais.

Soete e Vancrombrugge (1950) obtiveram grande melhoria na precisão do método, através da utilização de extensômetros de resistência elétrica para a medida das deformações ao invés do extensômetro mecânico.

Kelsey publicou a primeira investigação da variação das tensões residuais de grande importância através do Método do Furo em 1956.

As aplicações modernas do Método do Furo datam do trabalho de Rendler e Vigness (1966). Eles desenvolveram o Método do Furo Cego num procedimento sistemático e reprodutível e também definiram a geometria dos extensômetros tipo roseta estabelecida na norma ASTM E 837.

O método de medição das tensões residuais pela técnica do furo para alívio das tensões é uma das técnicas modernas mais utilizadas atualmente. Com a utilização de equipamentos comercialmente disponíveis e das recomendações da norma, o método do furo pôde ser aplicado rotineiramente, podendo ser aplicado em

qualquer laboratório ou no campo sobre corpos de prova, peças ou componentes com grande variedade de tamanho e forma. A técnica é referida como “semidestrutiva” uma vez que o pequeno furo não irá, em muitos casos, provocar danos significativos na integridade estrutural do objeto que está sendo testado. O furo tem, tipicamente, de 0,8 mm a 4,8 mm de diâmetro e profundidade igual a 20% superior para campos de tensão uniformes e 50% superior para campos de tensão não uniformes. Para um grande número de objetos testados pode-se, na maioria das vezes, remover o furo após o teste com uma lixadeira manual.

A introdução de um furo, mesmo de diâmetro pequeno, em um corpo com tensões residuais relaxa a tensão naquela localização. Isto ocorre porque é perpendicular a uma superfície livre, que é um eixo principal no qual as tensões de cisalhamento e normal são zero. Neste caso o eixo está representado pelo furo na superfície. A eliminação destas deformações, na superfície do furo, muda as tensões na região ao redor do furo, causando a correspondente mudança nas deformações locais na superfície do objeto testado.

Quantitativamente, o método do furo cego apresenta boa representatividade quando comparado com outras técnicas. A incerteza de medição deste método, considerando o uso em campos de tensão uniformes e empregos de técnicas de medição adequadas, está entre 10% e 20% do valor medido ou 10% da tensão de escoamento. Como a formulação clássica considera a existência de campos de tensões residuais uniformes, nos casos em que a tensão varia com a profundidade, a tensão calculada é sempre menor do que a tensão máxima. Para avaliar a uniformidade da tensão ao longo da espessura e garantir o uso correto dos coeficientes de calibração é recomendada a realização da furação de maneira incremental, registrando-se as deformações ou deslocamentos bem como a respectiva profundidade.

Dentre as limitações, os estudos do método do furo mostram que a mudança na deformação, produzida na furação em diferentes incrementos de profundidade após a primeira furação, é causada somente parcialmente pela tensão residual. A deformação incremental restante é gerada pelas tensões residuais nas furações incrementais anteriores devido ao aumento da conformação do material e pela mudança da distribuição das tensões à medida que o furo é aprofundado. Entretanto, a contribuição da tensão, em um incremento em particular, para a mudança incremental correspondente na deformação, decresce rapidamente com o distanciamento da superfície. Como resultado, o total de tensão/deformação na profundidade total do furo é influenciado pela tensão nas camadas mais próximas à superfície. Este comportamento é confirmado para tensões uniformes, pela forma do gráfico normalizado de deformações, onde cerca de 80% da deformação total aliviada ocorre na primeira metade da profundidade do furo.

Em resumo, a aplicação ideal do método do furo é aquela na qual a tensão é essencialmente uniforme com relação a profundidade. Geralmente, este furo é usinado através de pequenos incrementos e a deformação aliviada é medida em três direções por um extensômetro de resistência elétrica especial (ERE). Como as tensões residuais não são completamente aliviadas na região do furo, não é possível calculá-las através da lei de Hooke. Assim o método exige uma etapa de calibração experimental ou computacional.

Um dos modos mais sensíveis para o cálculo das tensões residuais em componentes mecânicos é o Método de Kockelmann,^[5] no qual a calibração é efetuada uma vez através da usinagem de um pequeno furo em um corpo de prova, contendo um estado conhecido de tensões residuais não uniformes, sujeito ao carregamento uniaxial.

1.4 Shot Peening

O *shot peening* é um processo no qual se aplica tensão de compressão na superfície metálica, expondo-a ao jato de granalha esférica em alta velocidade, aumentando: a resistência mecânica, a vida em fadiga e a resistência a corrosão em diversos componentes como molas helicoidais e planas, barras estabilizadoras de automóveis, engrenagens de caixa de câmbio, coroas e pinhões de transmissão, partes e peças de aviões, brocas de perfuração de petróleo e mineradoras, entre outros.

Valorizadas pelo aspecto econômico e pelas garantias quanto à abrasão, contaminação e rigorosa uniformidade, é um processo insubstituível em amplas e importantes aplicações industriais.

Um significativo exemplo é o aumento da vida útil (em %) em ferramentas. Operações como usinagem, repuxo, trefilação, tratamento térmico etc., geram micro-tensões elevadas que alteram as características normais como a resistência à fadiga, ao atrito, à ruptura, ao desgaste, à oxidação e às altas temperaturas, entre as mais importantes. O martelamento dessas superfícies com jato de esferas apresenta resultados surpreendentemente favoráveis às qualidades mecânicas. A intensidade do *peening* varia, principalmente, com a granulometria das esferas, com a pressão de trabalho e com o tempo operacional. A dureza e o acabamento inicial da superfície tratada também influem na rugosidade, na profundidade atingida pela compactação e na quantidade de material removido (abrasão).

De uma forma geral, os efeitos do *peening* são benéficos e se dão pela introdução de um campo de tensões residuais compressivas na superfície do componente em virtude da deformação plástica imposta pelo impacto da granalha.

Principais funções :

- Aumento dos limites de fadiga em peças submetidas a esforços alternados contínuos, como molas e barras de torção;
- Uniformização de tensões em peças de alta responsabilidade, muitas vezes apenas em áreas restritas;
- Compactação da estrutura cristalina superficial para aumentar a resistência mecânica, ao atrito e à corrosão, melhorar a condutibilidade elétrica, eliminar a porosidade e aumentar a resistência às altas temperaturas;
- Obtenção de rugosidades controladas para reter lubrificação, suavizar fricções, uniformizar superfícies, fixar desmoldantes etc.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O material de estudo deste trabalho foi um aço baixa liga com 0,60% de carbono, similar a um SAE J403 1060, cuja composição química é mostrada na tabela abaixo juntamente com a composição padrão do ABNT 1060 segundo o Metal's Handbook.

O material foi fornecido na forma de arames de secção retangulares de 15x5mm por 800 mm de comprimento.

Tabela 1: Composição química do material estudado

	Composição química dos principais elementos					
	C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(máx%)	S(%max)	Cr(%)
ABNT 1060	0,55-0,60		0,60-0,90	0,04	0,05	0,029
Medido	0,585	0,228	0,845	0,016	0,012	0,029

Ensaio de Tração

Foram realizados três ensaios de tração no material para obtenção das propriedades mecânicas do mesmo. Os testes foram feitos numa máquina de tração modelo servo mecânica INSTRON 5585H com medida de carga e deslocamento. O material possui limite de escoamento 1200MPa e tensão máxima de ruptura em torno de 1400MPa.

3.2 Ensaio de Tensão Residual - Método do Furo Cego

Após a preparação da amostra, que envolve lixamento da superfície com várias granulometrias, limpeza, colagem do strain gage, cabeamento e utilizando os procedimentos adotados pelo Lamef – Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS, inicia-se o posicionamento do tripé do equipamento RS200, da Vishay Micro-Measurements, apresentado na Figura 1.

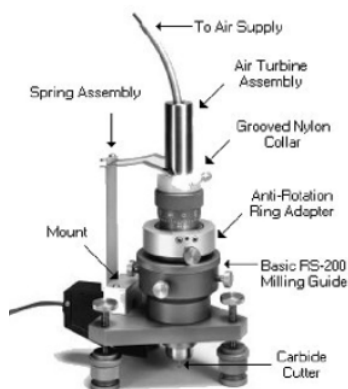


Figura 1 – Tripé - equipamento RS200, da Vishay Micro-Measurements

De posse dos valores medidos, faz-se o tratamento matemático, com base no método de Kockelman, para obter os valores de tensão residual em cada incremento. Gera-se um gráfico, onde temos tensão residual vs profundidade para tensões máxima e mínima principal, tensões tangenciais e longitudinais e, ainda, variação do ângulo da tensão máxima principal com a profundidade.

2.3 Curva de Fadiga

Foram levantadas duas curvas de fadiga ao ar. A primeira com o material como recebido, a segunda, com o material depois de submetido ao *shot peening*. Foram ensaiados oito corpos de prova para a curva do material sem *shot peening* e três corpos de prova para a curva do material com *shot peening*.

O ensaio foi realizado em uma máquina servo hidráulica MTS 810. O sistema de fadiga consiste em um ensaio em flexão a quatro pontos com controle de carga com as seguintes condições de ensaio:

- Freqüência : 5 Hz;
- Razão de carregamento: 0,1.

2.4 Rugosidade

Foram obtidos os parâmetros Ra, Rz e Rt. O equipamento utilizado é do modelo Surfcom 130, da Seimitsu.

2.5 Caracterização Metalográfica

Foram realizadas metalografias do material nas condições sem shot peening e com shot peening, além de análise no MEV (microscópio eletrônico de varredura).

2.6 Perfis de Microdureza

Foram realizados perfis de microdureza no material nas duas condições em estudo.

2.7 Shot Peening

Parâmetros utilizados:

- Máquina de jateamento por ar comprimido;
- Pressão da Linha: 6,0 Bar;
- Pressão do Vaso: 6,0 Bar;
- Shot S110 conforme SAE J444 May93 (57 a 64HRc)
- Intensidade Saturação: 0,0189 A

3 RESULTADOS

3.1 Ensaio de Tensão Residual – Método do Furo Cego

Depois dos dados sofrerem um tratamento matemático, obteve-se os resultados de tensão residual para o material sem *shot peening*, conforme mostrados nas Figuras 2, 3 e 4.

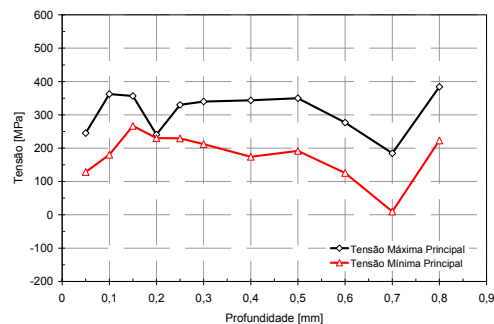


Figura 2: Tensões máxima e mínima principal.

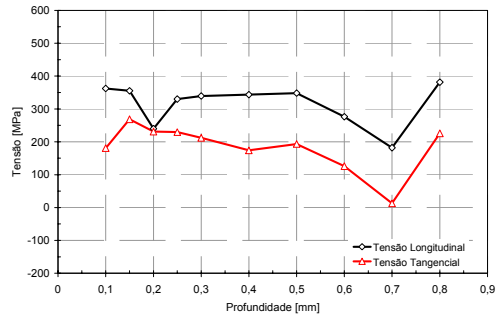


Figura 3: Tensões longitudinal e tangencial.

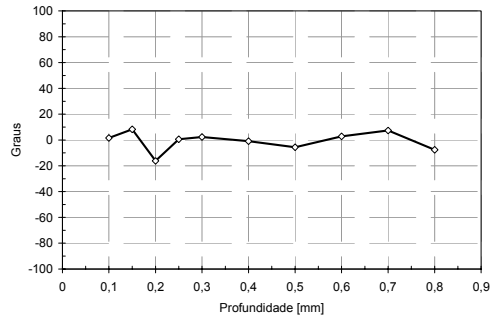


Figura 4: Variação do ângulo da tensão máxima principal com a profundidade.

Para as amostras com shot peening, os resultados de tensão residual foram os seguintes, conforme as Figuras 5, 6 e 7.

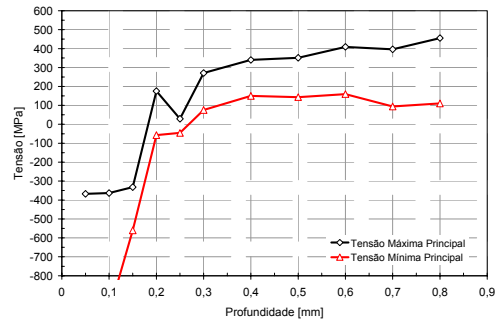


Figura 5: Tensões máxima e mínima principal.

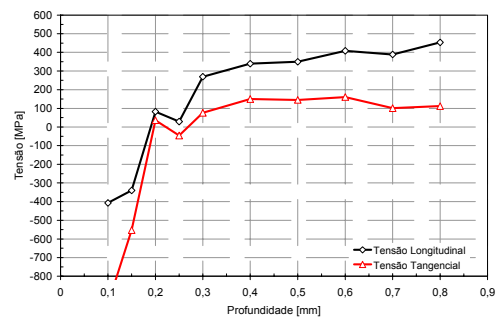


Figura 6: Tensões longitudinal e tangencial.

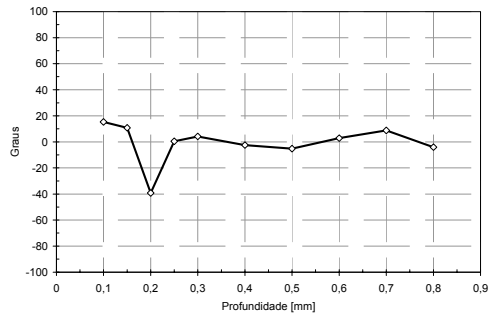


Figura 7: Variação do ângulo da tensão máxima principal com a profundidade.

3.2 Curva de Fadiga

Utilizando dos procedimentos já citados, obteve-se a curva de fadiga ao ar (curva média). A Figura 8 mostra a curva média do material sem o *shot peening*.

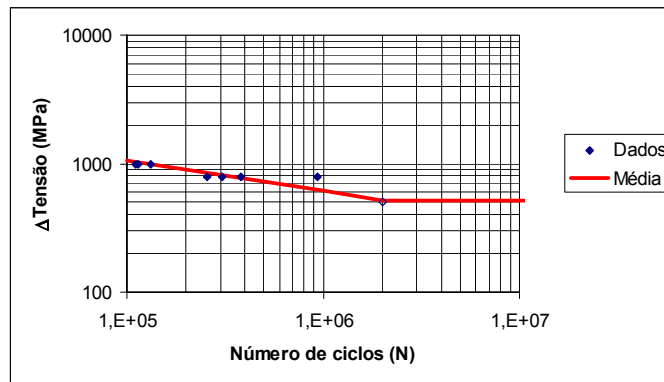


Figura 8: Curvas de fadiga obtida sem shot peening.

Após o *shot peening*, obteve-se a seguinte comparação entre as curvas, conforme a Figura 9.

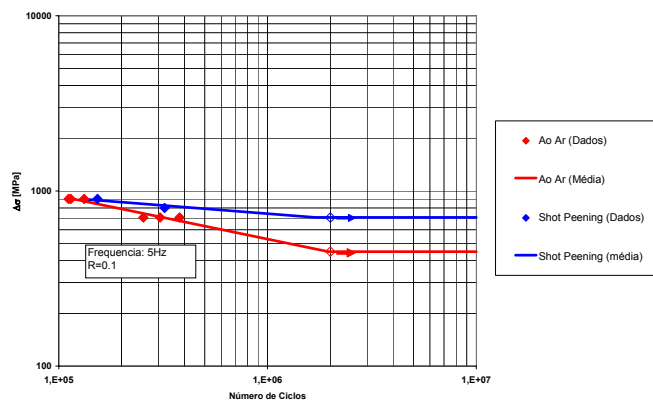


Figura 9: curvas de fadiga obtida sem *shot peening* e com *shot peening*.

3.3 Rugosidade

Foram medidos os perfis de rugosidade em todos os corpos de prova. Os valores oscilaram um pouco de amostra para amostra, de forma que para fins práticos, obtivemos, em média, $R_t=2,148\mu\text{m}$, $R_a=0,266\mu\text{m}$ e $R_z=2,148\mu\text{m}$, mostrado na Figura 10. Mas cabe salientar que este perfil foi medido na superfície reta do

corpo de prova, no sentido transversal, e o material não havia sido submetido ainda ao *shot peening*.

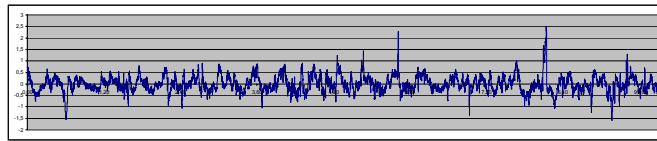


Figura 10 : Perfil de Rugosidade – superfície reta.

Já para a superfície lateral do corpo de prova, o perfil é apresentado pela Figura 11. Os valores obtidos foram bem maiores que os da superfície reta. $R_t=15,925 \mu\text{m}$, $R_a= 1,506 \mu\text{m}$ e $R_z=9,867 \mu\text{m}$.

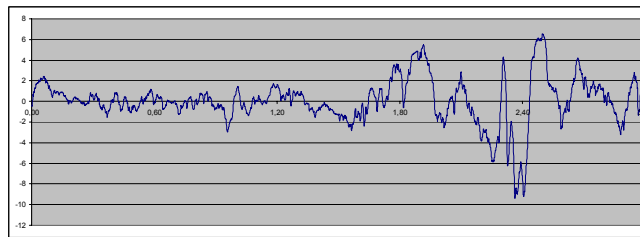


Figura 11 : Perfil de rugosidade – superfície lateral.

Após o *shot peening*, foram feitas as mesmas medições dos perfis de rugosidade e os resultados são apresentados a seguir. Fica evidente que o processo aumenta a rugosidade da superfície e que ao mesmo tempo, uniformiza esta. Em valores, temos $R_a= 4,239 \mu\text{m}$, $R_z=23,557 \mu\text{m}$ $R_t= 30,200 \mu\text{m}$ (Figura 12), considerando a superfície reta do corpo de prova e no sentido transversal.

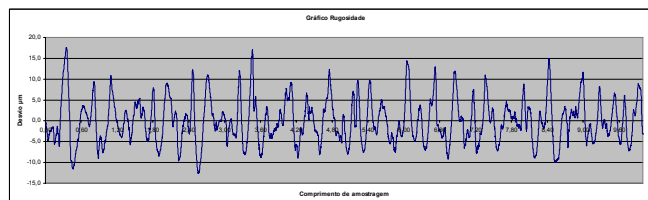


Figura 12 : Perfil de rugosidade – região reta - medida após o *shot peening*.

Na região da superfície lateral do corpo de prova, os valores foram de $R_a= 4,624 \mu\text{m}$, $R_z= 12,842 \mu\text{m}$ e $R_t= 32,563 \mu\text{m}$ como mostrado na Figura 13.

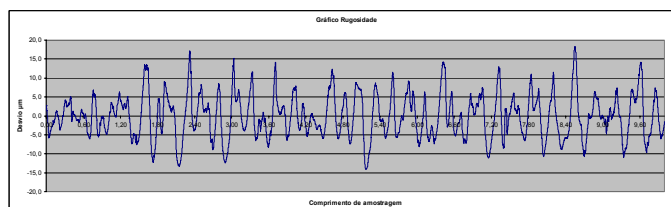


Figura 13 : Perfil de rugosidade – superfície lateral – após *shot peening*.

3.4 Análise da Fratura

Fez-se análise da fratura dos corpos de prova submetidos à curva de fadiga, conforme mostram as Figuras 14 e 15, com auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV). Material sem *shot peening*.

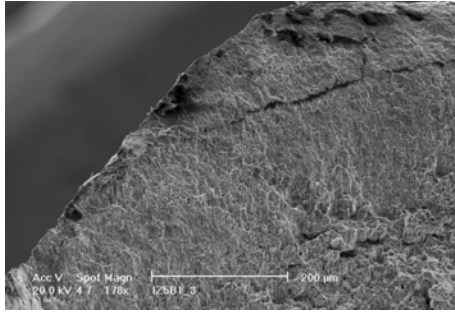


Figura 14 : Fractografia – concordância entre a superfície reta e a superfície lateral. Aumento 178x.

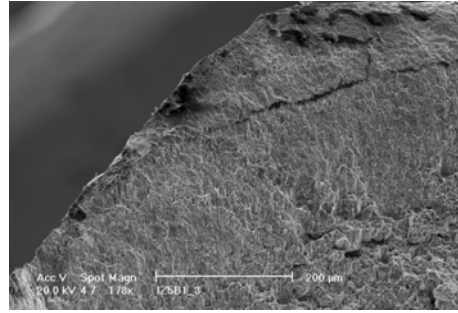


Figura 15 : Fractografia – superfície reta. Aumento 178x.

Após submetidos à curva de fadiga, os corpos de prova com *shot peening* foram analisados em microscópio eletrônico de varredura (MEV), conforme é mostrado nas Figuras 16 e 17.

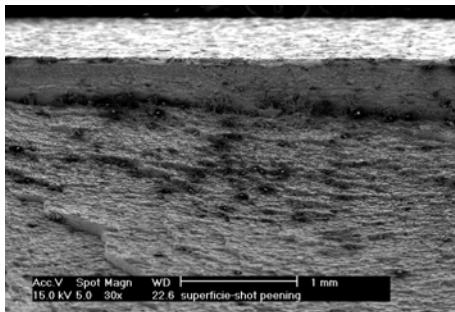


Figura 16 : Fractografia – superfície reta. Aumento 30x.

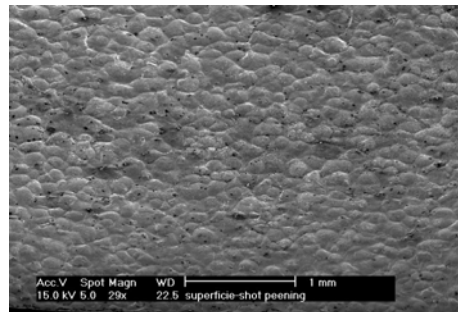


Figura 17 : Superfície com shot peening. Aumento 29x.

3.5 Perfil de Microdureza

A Figura 18 traz o perfil de microdureza do material sem *shot peening* e a Figura 19 mostra o perfil de microdureza depois do *shot peening*.

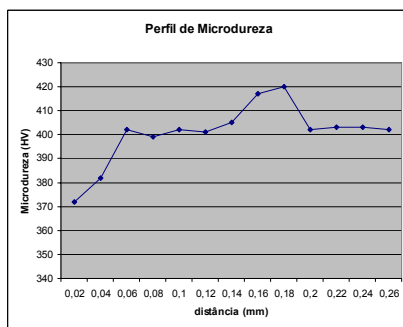


Figura 18 : Perfil de Microdureza – carga 200gf.

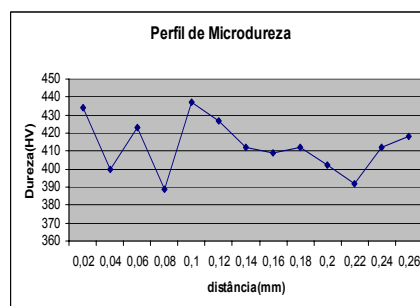


Figura 19 : Perfil de Microdureza – carga 200gf.

3.6 Análise Metalográfica

A metalografia mostra microestrutura composta de perlita e ferrita, típica do aço em questão.

A Figura 20 apresenta a microestrutura do material. Também verificou-se que certas regiões de algumas amostras analisadas estavam decarbonetadas, conforme ilustra a Figura 21.



Figura 20 : Microestrutura – aumento 500x – reagente nital 2%.

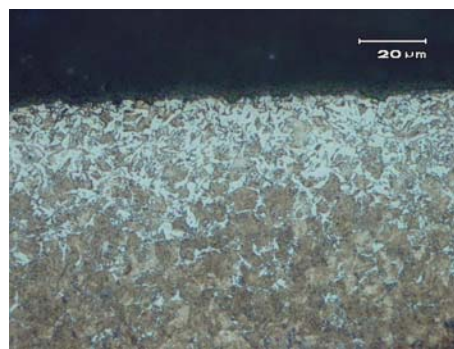


Figura 21 : Microestrutura do material com superfície descarbonetada. Aumento 1.000x.

Após o tratamento de *shot peening*, foi realizada uma análise metalográfica da superfície, a fim de identificar a superfície deformada plasticamente, conforme a Figura 22.

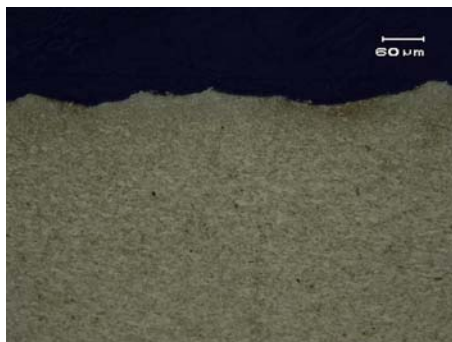


Figura 22 : Superfície após o *shot peening*. Reagente nital 2%. Aumento 200x.

4 DISCUSSÕES

Nas amostras sem *shot peening*, obteve-se tensões residuais trativas bem consideráveis, na ordem de até 33% da tensão de escoamento do material (1.200 MPa). Estes valores são em consequência dos processos de fabricação pelos quais o material é submetido, e podem comprometer o desempenho deste. Para as amostras com *shot peening*, obteve-se tensões residuais compressivas na superfície, na ordem de 400 MPa, numa profundidade em torno de 0,2 mm.

Com relação à curva de fadiga, esperava-se que o material tenha o limite de fadiga equivalente à metade da tensão máxima de ruptura (1.400 MPa), que neste caso é de 700 MPa. Mas os resultados mostraram que o seu limite de fadiga foi inferior a este valor, o que comprova o comprometimento do material frente às tensões residuais trativas e ainda imperfeições em sua superfície, como as marcas dos cassetes de laminação, que podem ser observadas nas amostras, além de descarbonatação.

Para o material com *shot peening*, verificou-se um ganho considerável na vida em fadiga. Isso se deve ao fato das tensões residuais compressivas que foram impostas pelo *shot peening*, que dificultaram a nucleação de trincas de fadiga. Sendo assim, o material encontra-se dentro do esperado, tendo seu limite de fadiga em torno da metade da sua tensão máxima de ruptura.

Na análise da fratura do material sem *shot peening*, pode-se observar um maior número de concentradores de tensão localizados na superfície lateral dos corpos de prova, ou ainda nas marcas dos cassetes de laminação, na superfície reta, provocando o início das fraturas. Para o material com *shot peening*, observou-se menor número de concentradores de tensão na superfície lateral, sendo que o início das fraturas ocorreram com maior frequência nas superfícies retas dos corpos de prova, com algumas nucleações subsuperficiais.

A rugosidade medida na região da superfície reta do material possui um valor menor do que a rugosidade na superfície lateral. Isso provavelmente deve-se ao fato de o material ser trefilado, gerando um produto de perfil redondo e posteriormente laminado, tornando-se um arame de perfil 15x5mm, logo, têm-se uma região abaulada nas laterais, o que torna esta região crítica. Com relação a rugosidade para o material com *shot peening*, os valores obtidos foram maiores. Isto era o esperado, já que o *shot peening* promove deformação na superfície. E ainda, os perfis de rugosidade em ambas as superfícies ficaram com valores próximos.

O perfil de microdureza indicou valores altos, em torno de 430 HV. Pequenas quedas de dureza são observadas nas superfícies. O perfil de microdureza obtido para o material com *shot peening* é praticamente uniforme ao longo da amostra.

A metalografia mostrou uma estrutura predominantemente perlítica. Cabe ainda ressaltar que, em algumas amostras verificou-se descarbonetação na superfície, o que pode diminuir a dureza do material, justificando a queda de dureza observada, bem como da vida em fadiga. Já com *shot peening*, pode-se verificar a deformação plástica imposta na superfície pelas esferas do *shot peening*.

5 CONCLUSÕES

O processo de *shot peening* empregado foi eficiente. As tensões residuais compressivas impostas dificultaram a nucleação da trinca, o que promoveu uma maior vida em fadiga do material.

As imperfeições na superfície, como as marcas dos cassetes de laminação, foram amenizadas também. Sendo assim, obteve-se as superfícies laterais e as superfícies retas com rugosidades praticamente uniformes.

Houve também uniformidade da dureza do material, já que o processo causa deformação plástica na superfície.

Agradecimentos

Ao CNPq e FINEP pelo apoio concedido.

REFERÊNCIAS

- 1 SURESH, S., **Fatigue of Materials**, Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom, 1998
- 2 C, Martins; Rocha, A.S.; Strohaecker, T.R.; Hirsch, T.K. **Análise das tensões residuais em anéis para rolamentos do aço ABNT 52100 através do método do furo cego**, Estudos tecnológicos - Vol. 1, n° 2:39-47 (jul/dez. 2005)
- 3 MEASUREMENTS GROUP. **Measurements of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method** - Hipertext Publication – 1999.
- 4 KOCKELMANN, H. e SCHWARZ, T. 1993. **Die Bohrlochmethode—ein für viele Anwendungsbereiche optimales Verfahren zur experimentellen Ermittlung von Eigenspannungen**. MTB von HBM, 29(2):33–38.