

# O USO DA DIFRAÇÃO DE RAIOS X PARA DETERMINAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL INDUZIDA PELO PROCESSO DE ROLETEAMENTO EM UMA CAMISA DE CILINDRO DE MOTOR DIESEL<sup>1</sup>

Rinaldo Perini<sup>2</sup>  
Nelson Batista de Lima<sup>3</sup>  
Alexandre Schalch Mendes<sup>4</sup>

## Resumo

O Brasil foi o primeiro país a adotar uma legislação específica para reduzir as emissões veiculares na América do Sul e o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve) nos seus 20 anos de existência promoveu a redução de 98% de monóxido de carbono (CO), 95% de hidrocarbonetos (HC), 94% de monóxidos de nitrogênio (NOx) e de 92% de aldeídos. Frequentemente o emprego de novas tecnologias para a redução de poluição em motores Diesel exige um aumento na pressão de injeção de combustível e da pressão de combustão, fazendo com que o motor trabalhe em condições cada vez mais severas. Nesse contexto, a camisa de cilindro é um dos componentes mais solicitados por suportar toda a pressão de combustão e uma das tecnologias empregadas para aumentar a sua resistência à fadiga é o roleteamento do raio de concordância. Esse trabalho tem como objetivo demonstrar que a difração de raios X pode ser empregada com sucesso tanto para a determinação da tensão residual induzida como também para identificar desvios nos parâmetros no processo de roleteamento.

**Palavras-chave:** Roleteamento; Tensão residual; Difração de raios X; Motor diesel.

## THE X RAY DIFFRACTION USED TO DETERMINE THE RESIDUAL STRESS PRODUCED BY THE DEEP ROLLING PROCESS IN DIESEL ENGINE CYLINDER LINERS

### Abstract

Brazil was the first country in the South America to adopt a specific legislation to reduce vehicular emissions and Air Pollution Control by Automotive Vehicles Program (Proconve). In 20 years it promoted a reduction of 98% of Carbon Gas (CO), 95% of Hydrocarbon (HC), 94% Nitrogen Monoxide (NOx) and 92% of Aldehyde. Frequently, the new technology used to reduce Diesel engines pollution, needs an increase in injection and combustion pressure resulting in more severe operational condition for the engines. On this scenario, the cylinder liner is one of the most loaded components, which needs to have sufficient fatigue strength to withstand the combustion peak pressure and the technology used to do it, is rolling the radius between the flange and the body of the liner. By this way, it is possible to increase the fatigue strength up to 10 times of some components. The scope of this paper is to show that the x ray diffraction can be used successfully to determine the residual stress and to identify misalignments of the rolling process.

**Key words:** Deep rolling; Residual stress; X ray diffraction; Diesel engine.

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

<sup>2</sup> *Desenhista Industrial, Pesquisador da MWM International Motores*

<sup>3</sup> *Prof. Dr., Físico, Professor e Pesquisador do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN*

<sup>4</sup> *Engenheiro Mecânico, Pesquisador da MWM International Motores*

## 1 INTRODUÇÃO

As camisas de cilindro dos motores Diesel são fabricadas geralmente em ferro fundido cinzento pelo processo de fundição centrífuga. A escolha desse material está ligada principalmente a sua elevada capacidade de transferência de calor, autolubrificação e atenuação de ruído, essas características do ferro fundido cinzento estão ligadas à presença de veios de grafita contidas na sua matriz. Infelizmente, esses veios de grafita causam uma descontinuidade na matriz que contribui para a fragilização da camisa, desse modo, admite-se que o ferro fundido cinzento é um material que possui trincas preexistentes, fazendo com que seu módulo de elasticidade seja em média de apenas 120.000 MPa, muito inferior aos 210.000 MPa do aço.

O método de roleteamento de raios de concordância é empregado a muitos anos na indústria metalúrgica como meio de indução de tensão residual e assim promover a elevação da resistência à fadiga do metal. A tensão residual é obtida através do emprego de um rolete que aplica uma pressão localizada na superfície do material suficiente para causar uma tensão que vá além do seu limite de elasticidade.<sup>(1)</sup> Quando a pressão é removida a superfície do material tende a reter parte da deformação total. Como as camadas deformadas são suportadas por subcamadas que não sofreram pressão suficiente para exceder o seu limite de elasticidade, a superfície do material fica sobre ação de tensão residual de compressão.

Os parâmetros do processo de roleteamento devem ser bem controlados para que não ocorra o aparecimento de trincas subsuperficiais.<sup>(2)</sup> A utilização de eixos com superfícies roleteadas ocorreu pela primeira vez com sucesso em 1880, e em 1929 foi estabelecida a correlação entre superfícies tratadas mecanicamente e a resistência à fadiga, mostrando um aumento significativo na resistência à fadiga em corpos-de-prova tratados mecanicamente pelo processo de roleteamento, quando comparados aos corpos-de-prova que receberam apenas polimento.<sup>(3)</sup>

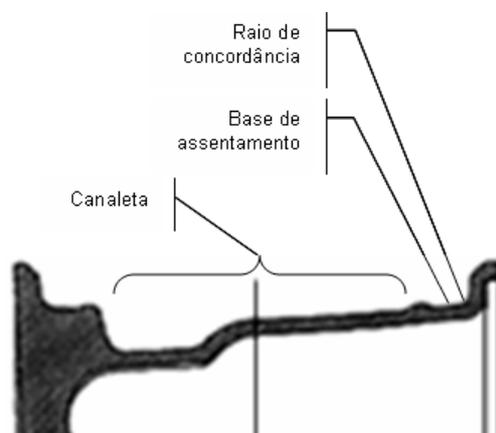
O roleteamento é baseado em uma combinação única e simultânea de três efeitos físicos:

- uma camada profunda de tensão residual compressiva é obtida na superfície da peça tratada;
- aumento da resistência através do trabalho a frio;
- a eliminação de micro fissuras e a melhora do acabamento superficial.

Esse processo é empregado comumente na solução dos seguintes problemas:

- fadiga do material, causada por carregamento cíclicos;
- micro fissuras causadas pela alteração na seção transversal, transições com cantos vivos e marcas de usinagem;
- fadiga causada por tensões residuais advindas dos processos de produção anteriores.
- tensões causadas por carregamentos externos. Por exemplo, montagem de componentes onde uma das peças é aquecida devido à necessidade de um alto grau de interferência do ajuste;
- trincas;
- deformações superficiais causadas por atrito.

Utilizando a técnica de roleteamento Atkin e Mezoff elevaram em mais de dez vezes o limite de fadiga de uma roda de magnésio destinada ao uso militar.<sup>(4)</sup> Na Figura 1, vemos uma roda em corte e sua nomenclatura típica. Foram utilizados nos testes, rodas de magnésio 20X7.50, liga SAE 505-T4 [UNS M11810 (AZ81A)], com pneus inflados com 8000 lb e, os resultados podem ser vistos de forma simplificada na Tabela 1.



**Figura 1** – Detalhe em corte de uma roda.

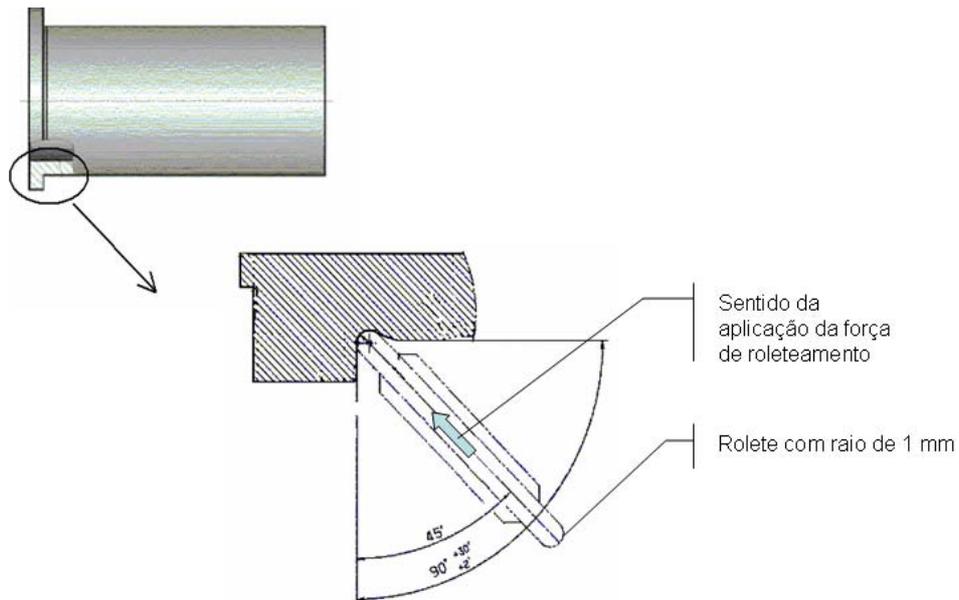
**Tabela 1** – Resultados do teste de fadiga.<sup>(4)</sup>

Descrição da roda testada	Total de ciclos até a falha	Localização da fratura
Não roleteada	$3,26 \cdot 10^5$	Raio de concordância
Base de assentamento e raio de concordância roleteados	$2 \cdot 10^6$	Canaleta fraturada Base de assentamento e raio de concordância sem fraturas.
Base de assentamento, raio de concordância e canaleta roleteados.	$3,9 \cdot 10^6$	Sem fraturas, teste interrompido.

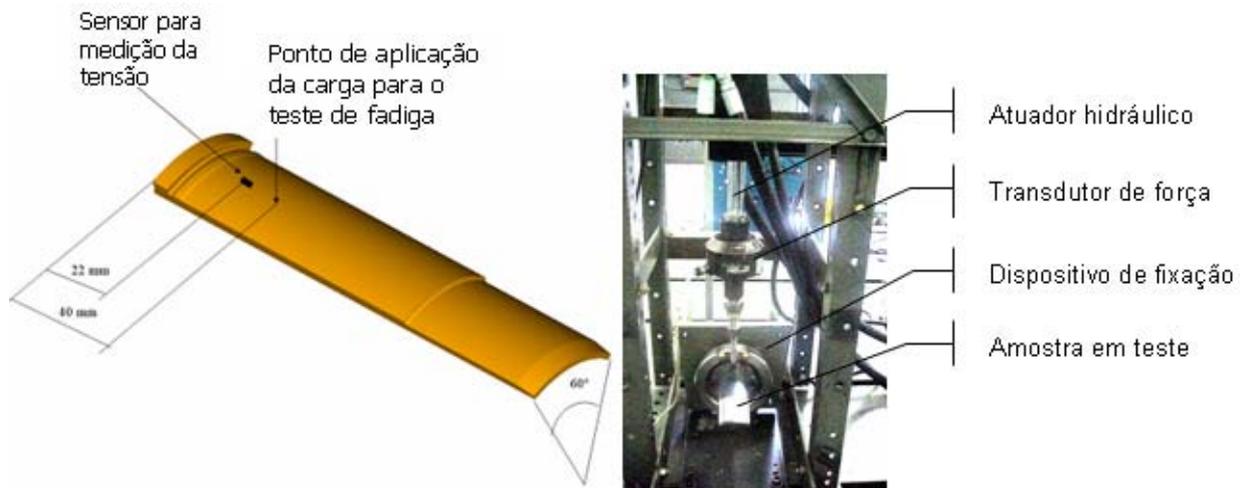
O experimento de Atkin e Mezoff comprovou que o roleteamento contribui definitivamente para a elevação do limite de fadiga em componentes metálicos, pois toda vez que uma nova região da roda era tratada com o roleteamento, o ponto de nucleação da fratura se deslocava para a região imediatamente posterior ao fim da região tratada.

No projeto da camisa é possível notar que na região de transição do corpo para o flange há uma mudança brusca na sua geometria, essa descontinuidade age como um forte concentrador de tensões que são intensificadas ainda mais pelos veios de grafita existentes no material. Sendo assim, a região de transição é mais susceptível a falhas e é nesse ponto em que o processo de roleteamento é utilizado com a finalidade de aumentar sua resistência a fadiga (Figura 2).

A eficácia do roleteamento foi comprovada através da realização de testes de fadiga cujo objetivo foi identificar por comparação qual a carga máxima que poderia ser aplicada aos corpos-de-prova com e sem raio roleteado para que eles resistissem a no mínimo  $2 \cdot 10^6$  ciclos. O detalhe do corpo-de-prova retirado da camisa de cilindro bem como o dispositivo de teste podem ser vistos na Figura 3.



**Figura 2.** Detalhe do raio de concordância e do roleteamento.



**Figura 3.** Corpo-de-prova e dispositivo de teste.

O teste de fadiga foi baseado na norma ISO 12107<sup>(5)</sup> e, com base nos resultados apresentados na Tabela 2, concluiu-se que o corpo-de-prova com raio roleteado suportou o dobro da carga aplicada ao corpo-de-prova sem o raio roleteado.

**Tabela 2.** Resultado comparativo do ensaio de durabilidade entre amostras com raio roleteado e não roleteado.

Amostra		Carga / Freqüência Aplicada (N / Hz)	Total de ciclos até a falha
Sem raio roleteado	P2.1	1300 / 40	$6,9 \cdot 10^5$
	P1.4	1200 / 40	Interrompido em $2 \cdot 10^6$
Com raio roleteado	P5.5	2450 / 40	$5,4 \cdot 10^5$
	P7.2	2400 / 40	Interrompido em $2 \cdot 10^6$

A confiabilidade das peças roleteadas depende da capacidade de se produzir em série, peças tão boas quanto às produzidas durante a fase de desenvolvimento. Como é muito difícil medir a tensão residual, o método mais prático para garantir a confiabilidade das peças produzidas, consiste em manter os parâmetros de processo do roleteamento (força, rotação e tempo) controlados dentro dos valores

estipulados e aprovados durante o desenvolvimento e realizar ensaios freqüentes de fadiga com amostras retiradas da linha de produção.<sup>(1)</sup>

Entretanto, a realização de testes de fadiga periódicos, como meio de controle da qualidade da tensão residual, não se mostra muito prático ou econômico, pois para cada teste de fadiga realizado é preciso que uma camisa de cilindro seja destruída, sendo necessárias ao menos 48 horas para a preparação do corpo-de-prova até a obtenção dos resultados.

Assim, milhares de peças terão sido produzidas nesse intervalo de tempo e os custos para o retrabalho dessas peças serão muito elevados, caso o teste aponte um desvio entre o valor de ciclos esperado e o encontrado. Já com o emprego da difração de raios X, o tempo gasto para a obtenção dos resultados é de apenas 2 horas, sendo bem menor a quantidade de peças produzidas nesse intervalo, tendo ainda a vantagem do teste não ser destrutivo.<sup>(6)</sup>

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para que a medição da tensão residual seja realizada corretamente, o feixe de raios X deve ser posicionado exatamente na mesma linha de centro utilizada pelo rolete e deve ser ajustado para abranger uma área de apenas 1 mm<sup>2</sup>. O posicionamento é garantido pelo dispositivo desenvolvido especificamente para a fixação da camisa de cilindro no difratômetro e a dimensão do feixe é conseguida utilizando-se uma fenda com abertura apropriada e do uso do “foco ponto” no difratômetro.

Dessa forma, garante-se que a tensão residual medida será apenas a da região de ação do rolete não havendo influência das regiões não roleteadas, no resultado. Foi criado através do software de CAD IDEAS versão 10, um layout tridimensional do dispositivo e dos principais componentes do difratômetro para que fosse possível dimensionar com a máxima exatidão o ponto de incidência do feixe de raios X. Com base nessas dimensões o dispositivo foi pré-calibrado em uma máquina de medir coordenadas Mitutoyo modelo Strato.

Detalhes do dispositivo de fixação e do ponto de incidência do feixe de raios X podem ser vistos na Figura 4. Na Figura 5, a camisa de cilindro está fixada ao dispositivo, que por sua vez, está montado no goniômetro do difratômetro de raios X Rigaku modelo Dmax 2000.

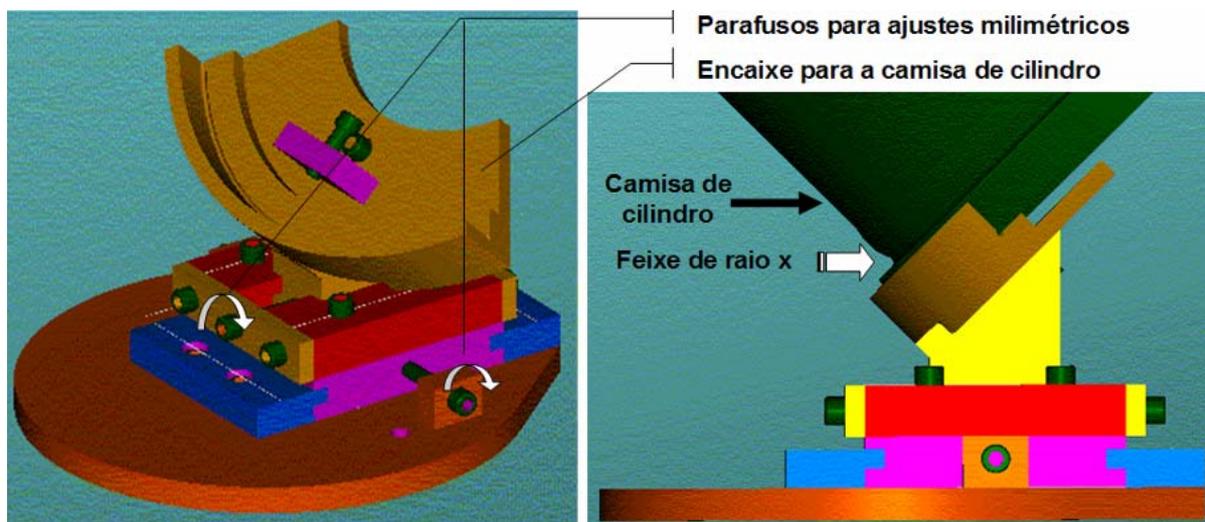
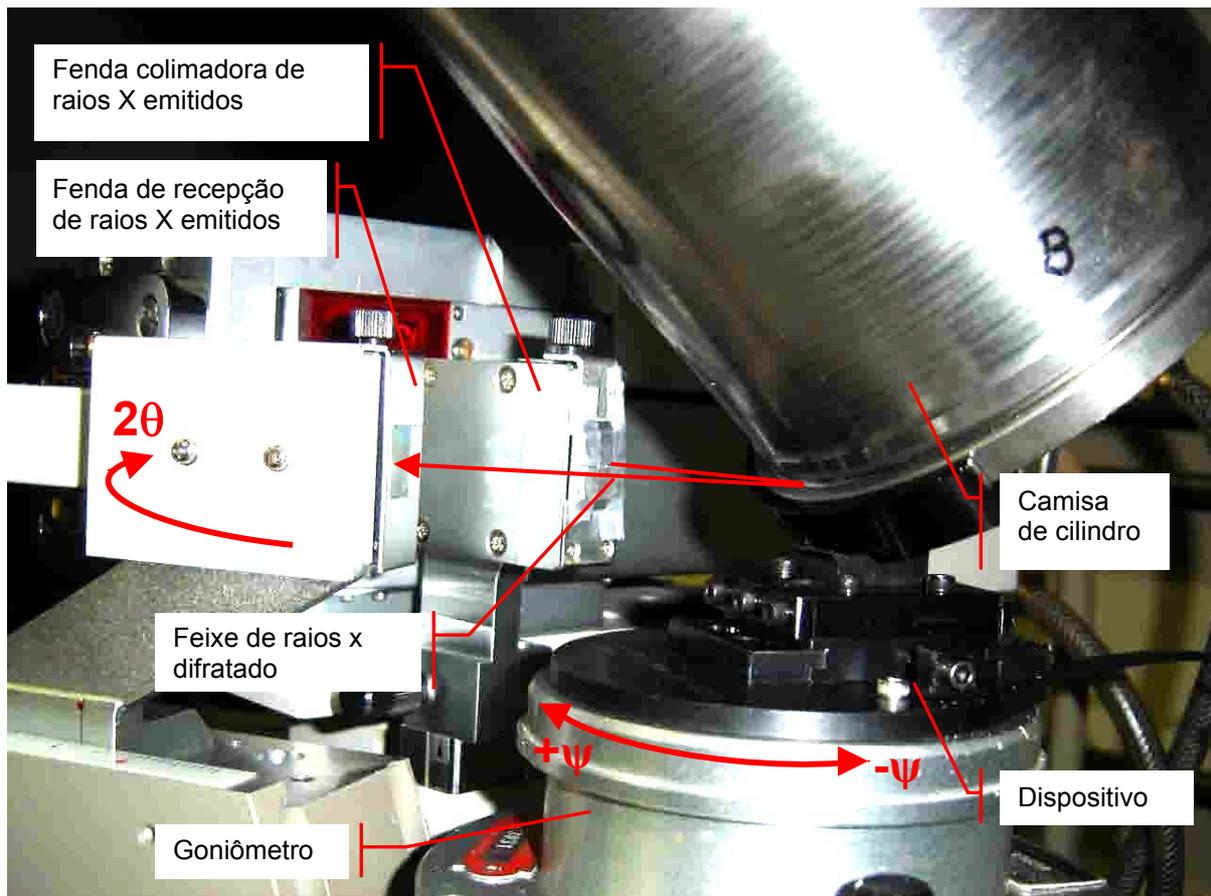
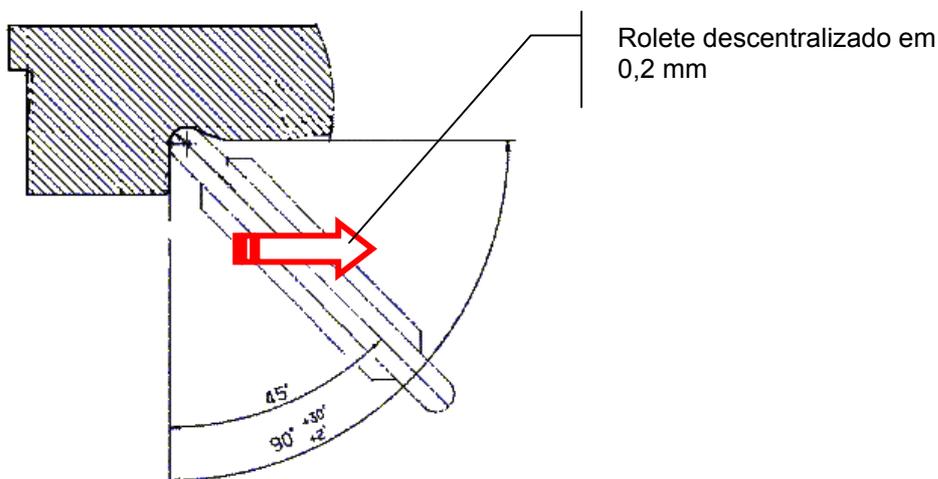


Figura 4. Dispositivo de fixação da camisa ao difratômetro.



**Figura 5.** Camisa fixada ao dispositivo sobre o goniômetro do difratômetro de raios X.

Após a calibração final do dispositivo, foi medida a tensão residual em 10 camisas de cilindros retiradas aleatoriamente da linha de produção para determinar a variação esperada do processo de roleteamento e definir o padrão de medição. Em seguida foram medidas outras 10 camisas de cilindros, porém essas camisas foram roleteadas com o rolete descentralizado em 0,2 mm (Figura 6). Utilizando o software Minitab versão 14.1, aplicamos aos resultados das medições o teste de normalidade “Anderson-Darling” obtendo para os quatro testes P-Value  $> 0,1$  o que comprova que todas as medições estão dentro de uma distribuição normal<sup>(7, 8)</sup> (Figura 7).



**Figura 6.** Descentralização do rolete.

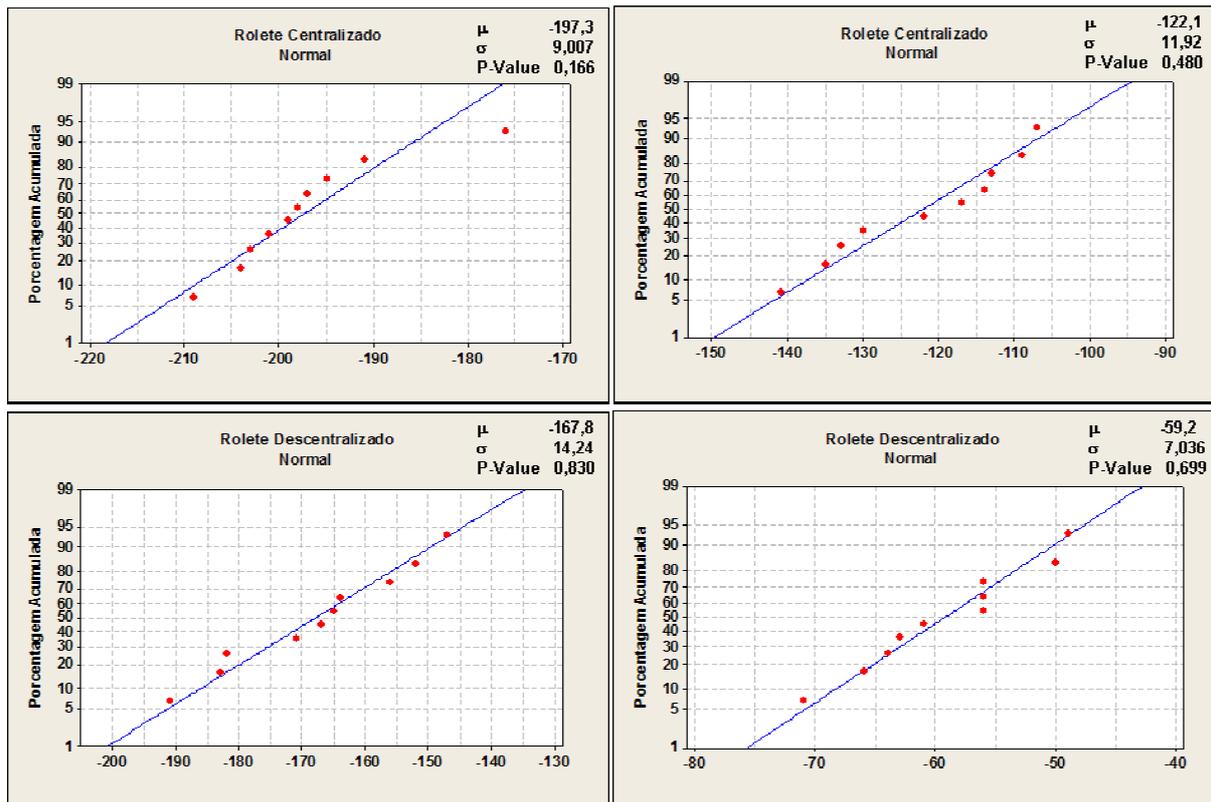


Figura 7. Teste Anderson-Darling de normalidade dos dados.

Os valores de tensão residual encontrados para cada camisa de cilindro, podem ser vistos simultaneamente na Figura 8, onde cada ponto do gráfico corresponde à média de quatro medições realizadas na mesma camisa distantes  $90^\circ$  umas das outras. Os resultados das medições apontam para um processo de roleteamento e de medição estáveis, pois aplicando a cada ponto do gráfico um desvio de  $\pm 15$  a 20 MPa que são consideradas estimativas conservadoras para medição de tensão residual através da difração e raios X.<sup>(9)</sup> Conclui-se então, que todos os resultados estarão dentro da faixa de tolerância prevista.

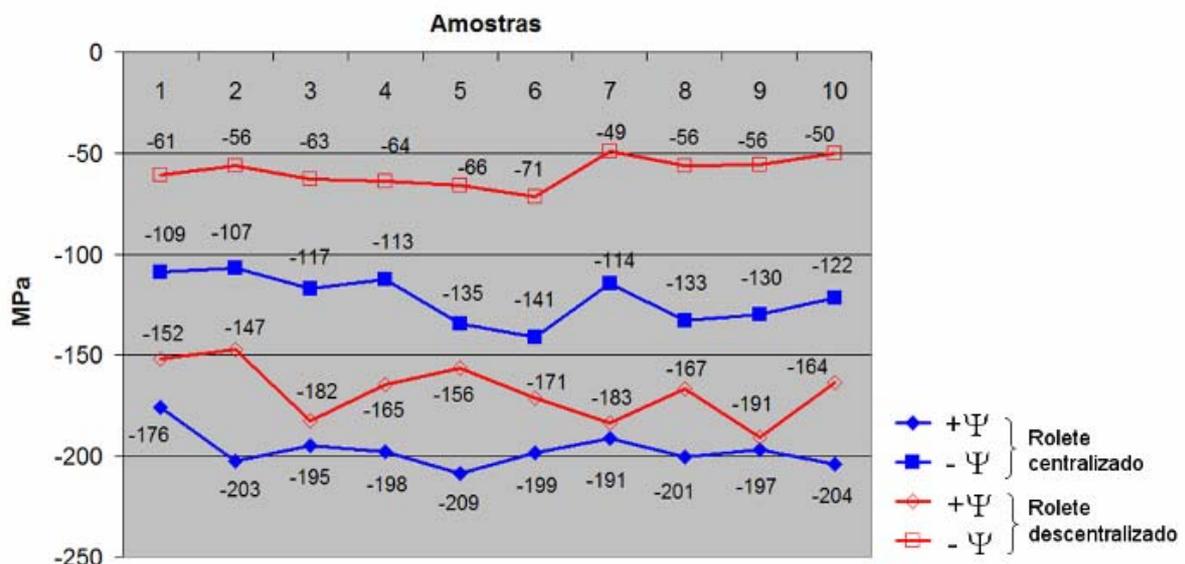
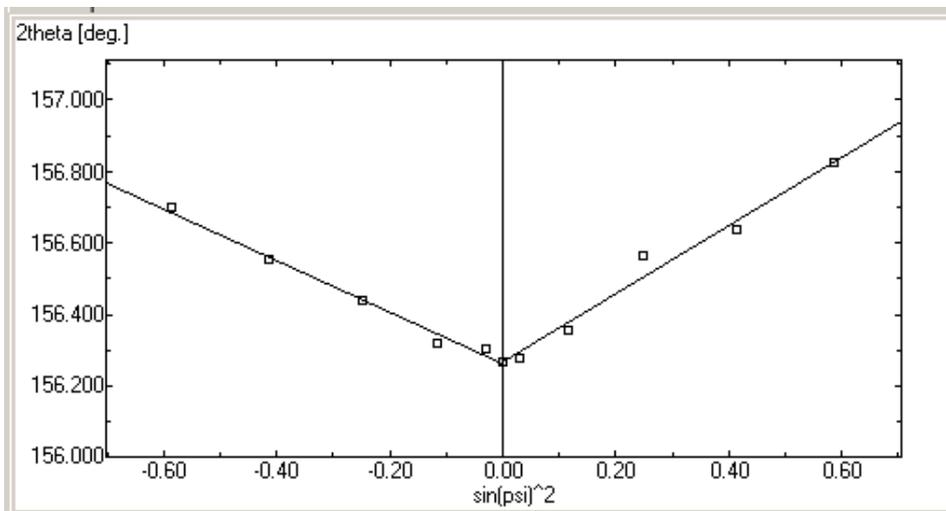


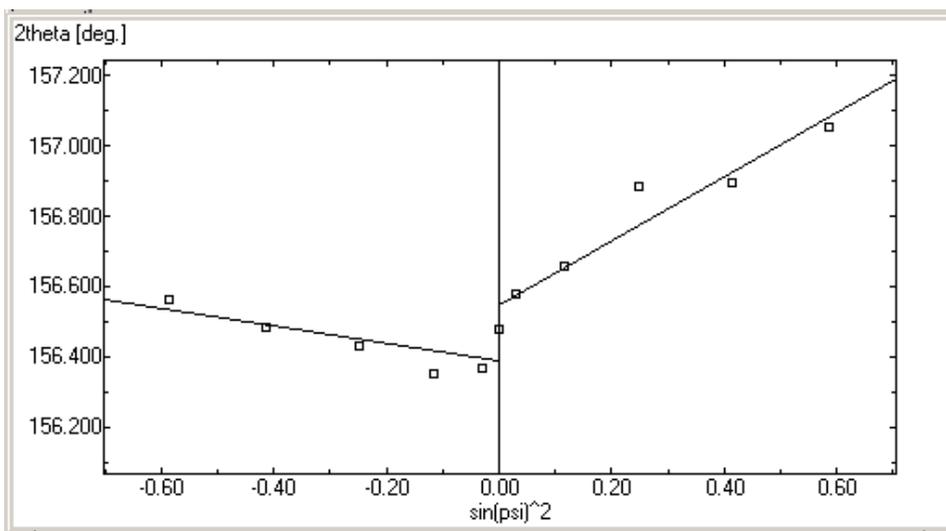
Figura 8. Resultado das medições das camisas de cilindro.

O valor médio da tensão residual obtido com o roleteamento centralizado foi de -197 MPa para (+ $\Psi$ ) e de -122 MPa para (- $\Psi$ ). Já o valor médio da tensão residual obtido com o roleteamento descentralizado foi de -168 MPa para (+ $\Psi$ ) e de -59 MPa para (- $\Psi$ ). Comparando os resultados das médias é possível verificar que a descentralização causou em (- $\Psi$ ) uma redução de 48% nos valores de tensão residual e a diferença entre as médias de (+ $\Psi$ ) e (- $\Psi$ ) aumentaram de 61 % para 185%.

No gráfico (2 theta(deg) x sin  $\Psi^2$ ) gerado pelo difratômetro de raios X para as camisas produzidas com o rolete centralizado (Figura 9), é possível ver as curvas de (+ $\Psi$ ) e (- $\Psi$ ) dispostas simetricamente indicando uma distribuição homogênea da tensão residual para ambos os lados. Contudo, para o gráfico gerado para as camisas produzidas com o roleteamento descentralizado, figura 10, as curvas de (+ $\Psi$ ) e (- $\Psi$ ) estão dispostas assimetricamente indicando uma distribuição heterogênea da tensão residual.



**Figura 9.** Gráfico padrão 2 theta (deg) x sin  $\Psi^2$  - Rolete centralizado.



**Figura 12.** Gráfico padrão 2 theta (deg) x sin  $\Psi^2$  - Rolete descentralizado em 0,2 mm.

### 3 CONCLUSÃO

Com base nos resultados das medições de difração de raios X concluiu-se que:

- a descentralização do rolete causa um desbalanceamento na distribuição da tensão residual juntamente com o rebaixamento dos seus valores absolutos;
- a difração de raios X possui resolução suficiente para identificar alteração no padrão de tensão residual causada por desvios no processo de produção e que, uma vez estabelecida a sua correlação com o teste de fadiga, ela pode substituí-lo com vantagens como método de inspeção.

### REFERÊNCIAS

- 1 Society of Automotive Engineers. Surface Rolling and Other Methods for Mechanical Prestressing of Metals: Surface Vehicle Information Report, SAE, 1981 (SAE J811).
- 2 ALMEN, J. O.; BLACK, P. H. Residual Stresses and Fatigue in Metals: New York: McGraw-Hill, 1963. cap. 6, p. 61-62, apêndice A-12, p. 200-201.
- 3 KLOOS, K. H.; MACHERAUCH, E. Development of Mechanical Surface Strengthening Processes From the Beginning Until Today. (Retroactive Coverage) Shot Peening: Science, Technology; Application, Garmisch-Partenkirchen; FRG; 1987. p. 3-27. 1987.
- 4 ATKIN, R. L.; MEZOFF, J. G. Development and Testing of Magnesium Alloy Wheels: Third Sangamore Ordnance Materials Research Conference, December 1956. Syracuse University Research Institute.
- 5 International Organization for Standardization. Metallic Materials – Fatigue Testing – Statistical Planning and Analysis of Data. ISO, 2003. (ISO 12107).
- 6 Society of Automotive Engineers. Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction: SAE, 2003 (SAE HS-784).
- 7 AGUIAR, S. Integração das Ferramentas da Qualidade ao PDCA e ao Programa Seis Sigma: Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 2002, p.47
- 8 MINITAB. Meet Minitab, Release 14 for Windows September 2003: USA, Minitab Inc., Revised Printing October 2005, cap. 3, p.3-6, cap. 5, p.5-8
- 9 CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. Elements of X-Ray Diffraction. Third edition, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2001. cap. 15, p. 435-469.