

USO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NO ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE ENTALHE NA VIDA EM FADIGA DE SPINDLE DE LAMINADOR DE CHAPAS GROSSAS¹

Luiz Otávio Rocha Peres²
Leonardo Barbosa Godefroid³
Leonardo Camilo dos Reis⁴

Resumo

Trata-se do estudo experimental e numérico da influência de entalhe na vida à fadiga de *spindle* de laminador de chapas grossas com a utilização do método dos elementos finitos. Foram utilizados extensômetros para medição dos esforços que o *spindle* experimenta durante o processo de laminação e que serviram como condição de carregamento na análise. Ensaios foram realizados no material para determinação de suas propriedades mecânicas. Simularam-se três geometrias de entalhes e três condições de carregamento e foi determinada então a vida mínima para cada uma. Os resultados mostraram a influência que o entalhe tem sobre o processo de fadiga do *spindle*, identificando pontos de melhoria que possibilitarão um aumento da vida em serviço do mesmo, diminuindo o número de falhas.

Palavras-chave: Fadiga; Método dos elementos finitos; *Spindle*; Extensômetros.

USE OF FINITE ELEMENT METHOD IN THE STUDY OF THE NOTCH EFFECT ON THE FATIGUE LIFE OF PLATE MILL'S SPINDLE

Abstract

In this work experimental and numerical study of notch effect in the fatigue life of plate mill's spindle with the use of finite element method were considered. Strain gages were used to measure the stresses experimented by the spindle during the milling process that were then used as load parameters in the analysis. Mechanical properties of the material were obtained. Three notch geometries in three loading conditions were simulated and it was then determined the minimum fatigue life for each case. The results showed the influence that the notch has on the spindle's fatigue process, identifying improvement areas that will allow an increase in the spindle's life in service, reducing the number of failures.

Key words: Fatigue; Finite element method; Spindle; Strain gages.

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

² Engenheiro Mecânico, MSc., Gerência de Projetos Mecânicos, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil, lperes@usiminas.com.br

³ Professor, DSc., Escola de Minas - REDEMAT/UFOP – Ouro Preto, MG, Brasil, leonardo@demet.em.ufop.br

⁴ Engenheiro Mecânico, MSc., Gerência de Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil, lcreis@usiminas.com.br

1 INTRODUÇÃO

Os *spindles* do laminador de chapas grossas são eixos que transmitem o torque dos motores elétricos (nominal de 110tm) para os cilindros de trabalho que promovem a redução da espessura das placas (entre 200 mm e 250 mm), gerando assim o material denominado chapas grossas (espessuras entre 5 mm e 50 mm). Os *spindles* transmitem o torque nos dois sentidos de rotação, condição que favorece o surgimento do fenômeno de fadiga. A Figura 1 ilustra o laminador de chapas grossas onde se pode observar a montagem dos *spindles*.

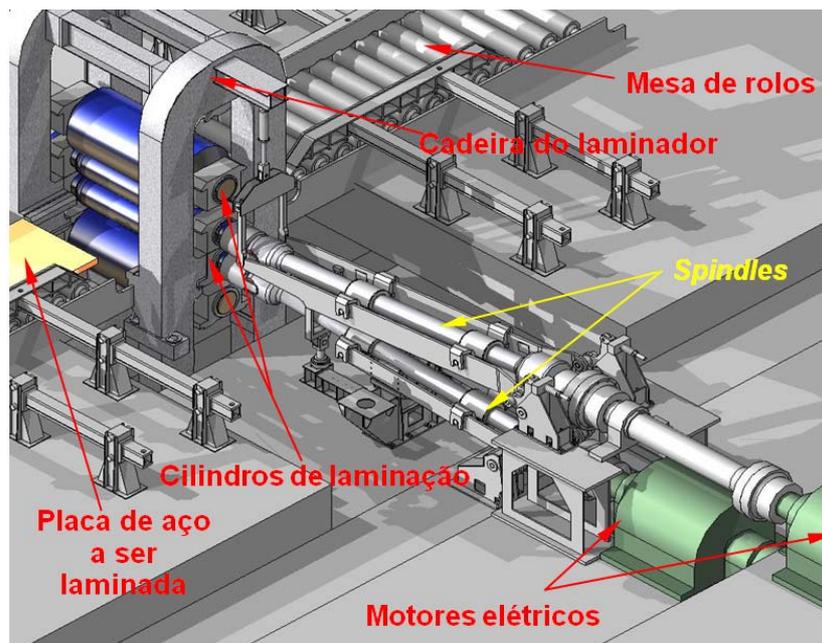


Figura 1 – Desenho esquemático do laminador de chapas grossas da Usiminas.

Fadiga é descrita por Chiaverini⁽¹⁾ como “um fenômeno que ocorre quando um componente começa a falhar sob a ação de uma tensão menor do que a sua resistência estática, se a tensão é de natureza cíclica ou alternada”.

No caso dos *spindle* do laminador de chapas grossas da Usiminas, várias falhas precoces têm ocorrido em função do fenômeno de fadiga, sendo que a maioria delas tem se iniciado nos entalhes existentes na “boca-de-lobo” do *spindle*, como mostra a Figura 2.

A presença deste entalhe gera o efeito de concentração de tensões, que, entre outros fatores, eleva o valor das tensões atuantes neste local, favorecendo o surgimento e propagação de trincas de fadiga que levam à ruptura final da peça. Esta ruptura provoca a interrupção do processo produtivo, com grande prejuízo financeiro, agravado pela necessidade de reposição do *spindle*, um componente de difícil manuseio em função do seu tamanho e peso (aproximadamente 11 m de comprimento e pesando em torno de 17 t) além é claro de seu elevado custo de reposição.

Torna-se então necessária uma criteriosa avaliação da influência do entalhe no processo de fadiga do *spindle*, no sentido de buscarem-se alternativas para minimizar seu efeito, aumentando a resistência do componente à falha por fadiga, diminuindo assim o número de falhas.

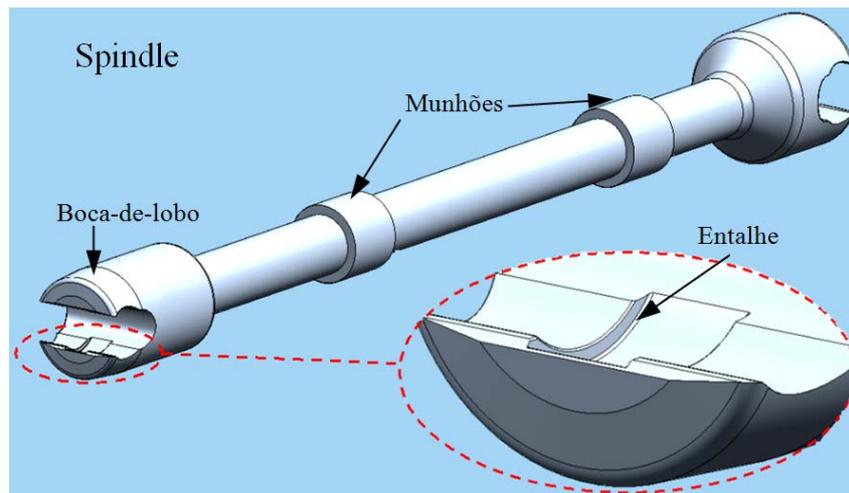


Figura 2 – Desenho esquemático do *spindle* com destaque para o entalhe (ampliação).

Para avaliar um elemento complexo como o *spindle* foi utilizado o método dos elementos finitos, MEF, através do *software* Ansys® Workbench V.11. Várias são as vantagens e benefícios de se utilizar o MEF para análises de fadiga, podendo ser citado como principais:⁽²⁾

- Aplicação conveniente de complexas condições reais de carregamento;
- Fácil e rápida identificação de regiões críticas;
- Avaliação gráfica de fácil compreensão das tensões locais;
- Precisa avaliação da vida em fadiga de modelos complexos.

São muitos os fatores que influenciam o processo de fadiga, sendo determinados como os mais importantes para o estudo o carregamento e a geometria.

Para realizar a análise, o *software* necessitou, como dados de entrada, das propriedades mecânicas do material (limites de resistência e escoamento e curva S-N de fadiga), do carregamento nominal do *spindle*, da geometria do *spindle* e da curva de carregamento ao qual o *spindle* está sujeito.

O *software*, ao final da simulação, forneceu, como dados de saída, os valores de tensão de von Mises, vida mínima em fadiga, *rainflow counting* (extrai ciclos de tensão média e amplitude constante de um ciclo de carregamento variável) e *damage* (mostra o dano causado pelos ciclos extraídos do *rainflow counting*).

Estes resultados então mostraram a influência do entalhe no processo de fadiga e identificaram-se pontos onde poderão ser feitas alterações que refletirão em uma maior longevidade do *spindle*.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento do estudo foram necessários experimentos com o intuito de se determinar as propriedades necessárias do material do *spindle* e também se medir o carregamento ao qual ele está sujeito.

Com estas propriedades determinadas, foi então realizada a simulação computacional com o Ansys® para se determinar os valores de vida em fadiga do *spindle*.

2.1 Análise do Material

Inicialmente foi feita uma análise do material do *spindle* para se determinar se sua composição química correspondia àquela solicitada em projeto, no caso o material do tipo SAE 4340. Foi extraído um pedaço da cabeça do *spindle* e foram então confeccionados corpos-de-prova para ensaios mecânicos.

Foram realizados ensaios de tração para se determinar os limites de escoamento e resistência do material e ensaios de fadiga, onde foi então levantada a curva S-N, que relaciona o nível de tensão (S) com o número de ciclos (N) que a peça resistirá. Para se certificar que os materiais dos corpos-de-prova não possuísem defeitos que pudessem interferir nos resultados dos ensaios, foram realizadas análises metalográficas nos mesmos para avaliar a sua microestrutura.

Também foram feitas verificações nas fraturas dos corpos-de-prova através da análise com o microscópio eletrônico de varredura, MEV, para verificar se as mesmas correspondiam ao tipo de falha esperado para aquela solicitação.

2.2 Medição do Carregamento

Para uma avaliação mais precisa do problema, foi necessário conhecer o carregamento ao qual o *spindle* é imposto, para então simular estas condições no *software*. Com o uso da técnica de extensometria, foram feitas medições em diversos intervalos e com diferentes materiais laminados, onde foram geradas as curvas de carregamento, divididas em três classes, baseadas no limite de resistência dos materiais. A Tabela 1 mostra as classes definidas, juntamente com a quantidade de materiais em cada classe e a porcentagem que cada uma representa com relação ao mix de produção anual.

Tabela 1 – Classes de materiais definidas para as medições do carregamento por extensometria.

Classe	Quantidade de materiais	Porcentagem do mix total de produção no ano de 2007
40 kgf/mm ²	16	31%
50 kgf/mm ²	49	32%
API*	13	37%

Extensômetros do tipo roseta para medição em peças sujeitas à torção, foram então instalados no eixo intermediário que liga o motor superior ao *spindle* superior como se vê na Figura 3(a). As deformações foram então captadas pelos extensômetros e os dados analógicos transmitidos através de frequência de rádio pelo transmissor de sinal digital, detalhe da Figura 3(a), alimentado por uma bateria presa ao eixo. O sinal é captado pela antena, 3(b), que através de cabo o envia para o receptor, 3(c), que converte o sinal de analógico para digital para então ser tratado no Controlador Lógico Programável, onde então as leituras são registradas e armazenadas no computador pessoal, 3(d), e convertidos os valores de deformação para tensão e em seguida para torque.

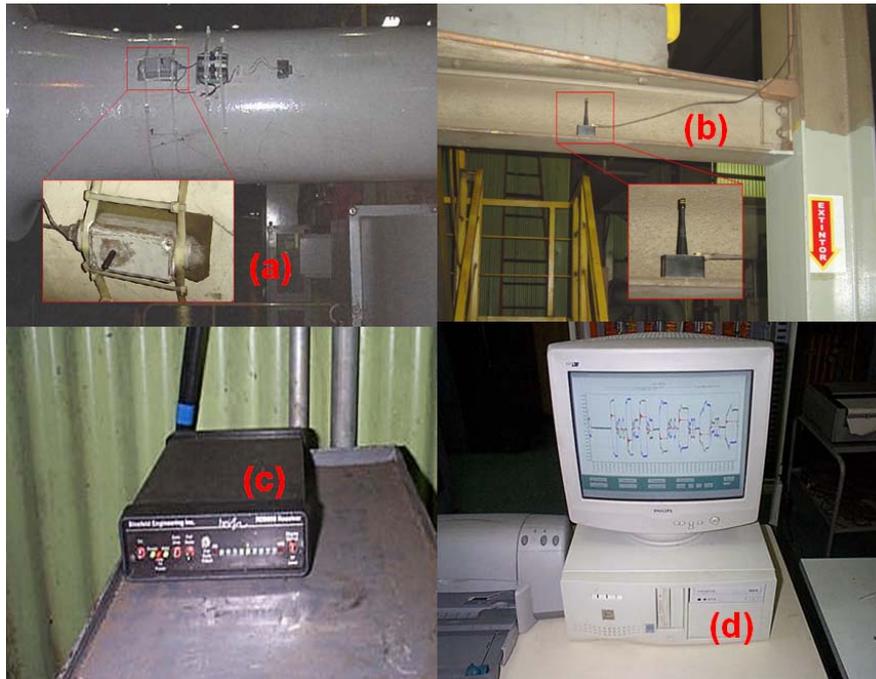


Figura 3 – Estrutura do sistema de medição de tensões com o uso de extensômetro.

2.3 Modelamento Tridimensional

Para se avaliar a influência do entalhe no processo de fadiga do *spindle*, foi necessário estudar diferentes concepções geométricas do mesmo e comparar os resultados obtidos na simulação, onde a partir de então foi possível extrair as conclusões acerca da influência deste parâmetro.

Foram gerados no *software* de modelamento tridimensional Solid Edge® três diferentes geometrias de entalhe, sendo que uma correspondia à condição atual do *spindle*, conforme projeto USIMINAS, e duas propostas de variação do raio do entalhe, inclusive com a geração de uma face plana para aumentar a profundidade do entalhe. A Figura 4 ilustra as três geometrias simuladas.

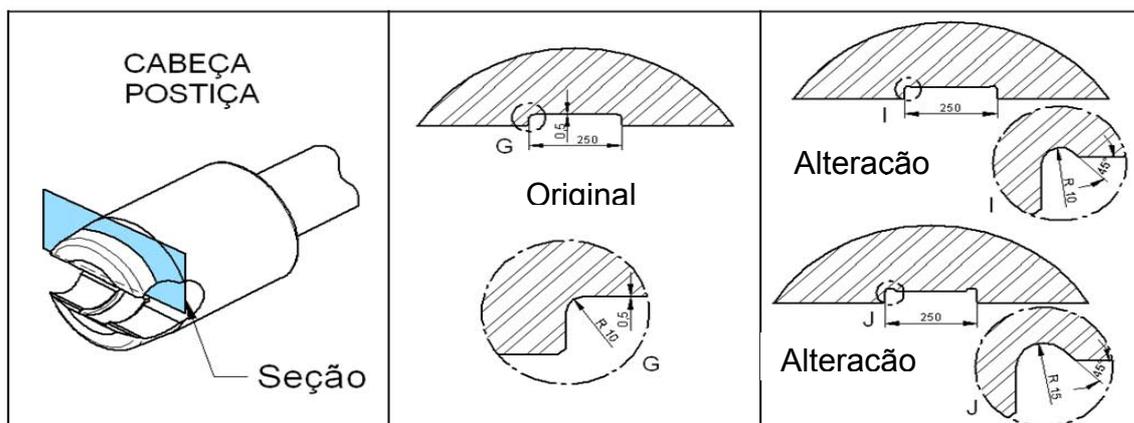


Figura 4 – Esquemático das geometrias modeladas para a análise no Ansys®.

Em seguida os modelos tridimensionais foram exportados para o Ansys® para serem simulados.

2.4 Simulação Computacional

Com as propriedades do material determinadas em ensaio, as medições do carregamento obtidas, e ambas inseridas no *software* Ansys®, o passo seguinte foi simular a operação do *spindle* para se determinar os parâmetros de fadiga que o *spindle* vivencia durante seu trabalho.

Inicialmente foi feita uma análise estática estrutural onde se determinaram as tensões de von Mises para o caso de carregamento em uma condição nominal, utilizando um torque de 110 tm, aplicado através de um conjugado de forças nas faces da “boca-de-lobo” do *spindle*, como mostra a Figura 5.

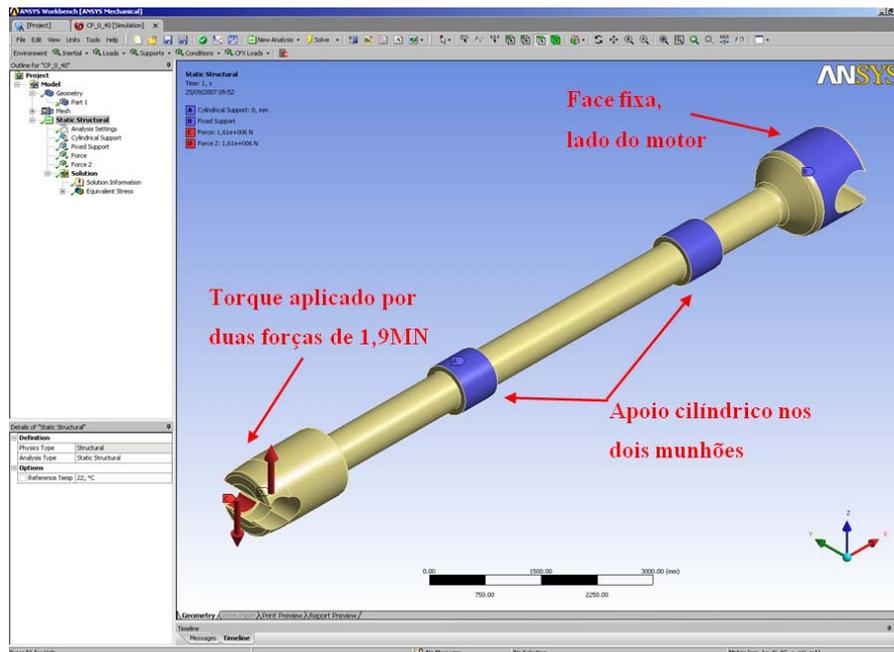


Figura 5 - Condições de contorno aplicadas ao *spindle* para a simulação.

A seguir foram entrados os parâmetros para a análise de fadiga, especialmente as curvas de carregamento para cada classe, convertidos de valores dos extensômetros para o correspondente valor de torque. Foi utilizada a curva de Gerber para a correção da tensão média, sendo que esta teoria mostrou uma razoável aproximação para os dados experimentais em um ensaio com o material SAE 4340, como mostrado em Schijve.⁽³⁾

A análise de fadiga com o Ansys® utiliza a técnica *rainflow counting* para extrair os ciclos de carregamento de mesma tensão média e amplitude de tensão e a partir daí, com a utilização da equação de Miner, calcula os danos causados por estes ciclos, determinando a vida à fadiga do componente. A equação de Miner é o modelo de dano mais simples e mais utilizado, segundo Lee.⁽⁴⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades do Material

A composição química do material ensaiado era correspondente àquela determinada para o material SAE 4340, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Comparativo entre composições químicas: material ensaiado e Norma SAE 4340.

Material	Elementos (% em massa)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Amostra do <i>spindle</i>	0,40	0,25	0,68	0,007	0,0063	1,68	0,78	0,22
Norma SAE 4340	0,38 ~ 0,43	0,20 ~ 0,35	0,60 ~ 0,80	0,040 máx.	0,040 máx.	1,65 ~ 2,00	0,70 ~ 0,90	0,20 ~ 0,30

As propriedades mecânicas encontradas foram:

- Limite de resistência: 973 (+/- 18) MPa;
- Limite de escoamento: 758 (+/- 15) MPa.

A curva S-N obtida do ensaio de fadiga é ilustrada na Figura 6, onde se observa as regiões de fadiga de baixo ciclo, alto ciclo e o limite de fadiga, tensão abaixo da qual a trinca de fadiga não se propaga, sendo conhecida como região de vida infinita. A curva tem grande aproximação com as curvas experimentais para outro aço SAE 4340 (5) e para um aço similar do tipo SAE 4130.⁽³⁾

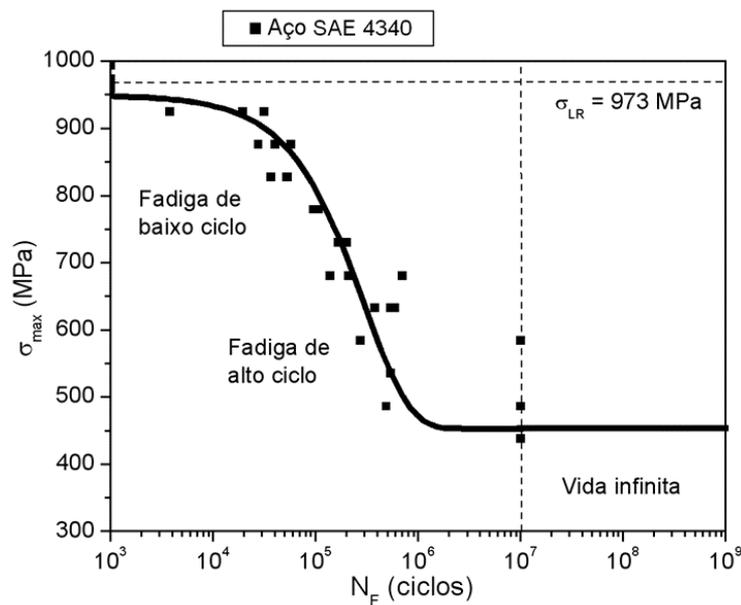


Figura 6 - Curva S-N do aço SAE 4340 obtida do ensaio com corpos-de-prova extraídos do *spindle*.

3.2 Curvas de Carregamento

As curvas de carregamento geradas a partir das medições com extensômetros são mostradas na Figura 7, para as três classes, sendo que foram sobrepostas para demonstrar as diferenças de frequência e magnitude de esforço entre elas. Os valores estão em Fator do Extensômetro (*Strain Gage Factor, SGF*) que posteriormente foram convertidos para torque pela equação do manual do TorqueTrak 9000 da Binsfield,⁽⁶⁾ que foi o instrumento utilizado na medição.

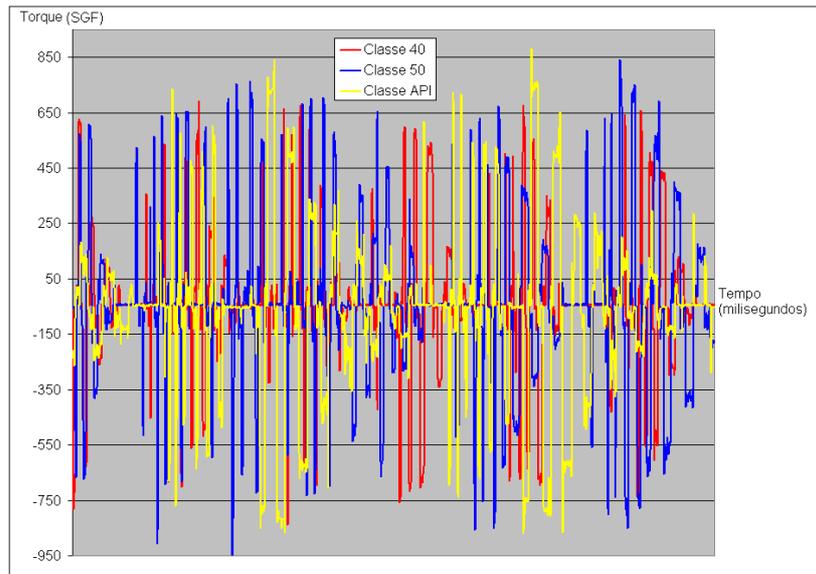


Figura 7 – Curvas de carregamento medidas com extensômetros para as três classes.

3.3 Tensão de von Mises e Vida Mínima em Fadiga

As tensões de von Mises obtidas nos três casos simulados são mostradas por contornos de cor na Figura 8 juntamente com o seu valor máximo, onde se observa que é na região do entalhe, ou seja, no concentrador de tensão, onde se concentra os maiores valores de tensão na peça. Como destacado anteriormente, a tensão de von Mises é calculada baseada no carregamento nominal, enquanto que a vida em fadiga leva em consideração os carregamentos cíclicos das três classes de resistência.

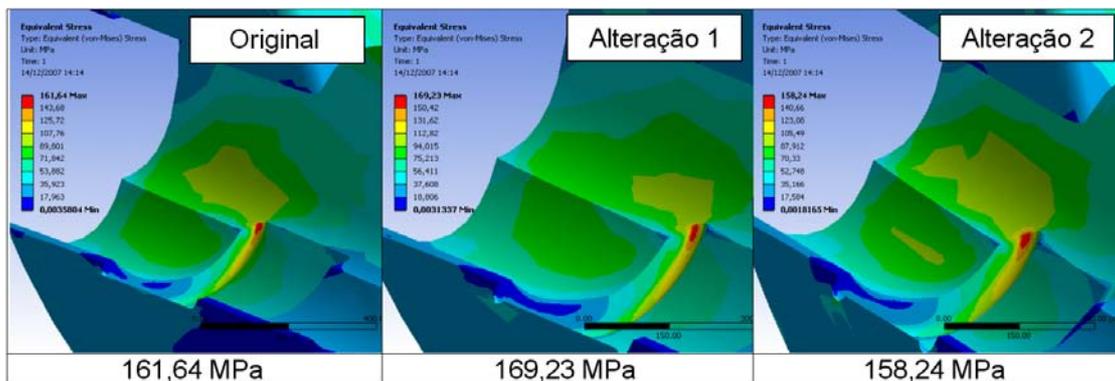


Figura 8 – Resultados de von Mises para as três geometrias simuladas juntamente com os valores máximos para cada caso.

Observa-se uma pequena diferença entre os valores de tensão para cada geometria, sendo que somente na geometria “Alteração 2” houve uma ligeira redução (-2,1%), que apesar de parecer insignificante mostrou-se de grande influência com relação à vida em fadiga. Este fato pode ser observado nos resultados de vida mínima para os três casos de geometria nas três condições de carregamento, cujos valores são mostrados na Tabela 3, em anos de operação. A Figura 9 mostra o comparativo entre as situações simuladas, sendo os valores expressos em blocos de carregamento (cada curva de medição com extensômetros corresponde a um bloco de carregamento).

Tabela 3 – Vida em fadiga mínima para as geometrias e carregamentos simulados.

Classe de carregamento	Duração mínima (anos)				
	Original	Alteração 1	Comparativo com Original	Alteração 2	Comparativo com Original
40 kgf/mm ²	7,5	4,5	60,0%	9,4	125,3%
50 kgf/mm ²	4,5	2,8	62,2%	5,7	126,7%
API	1,8	1,1	61,1%	2,2	122,2%

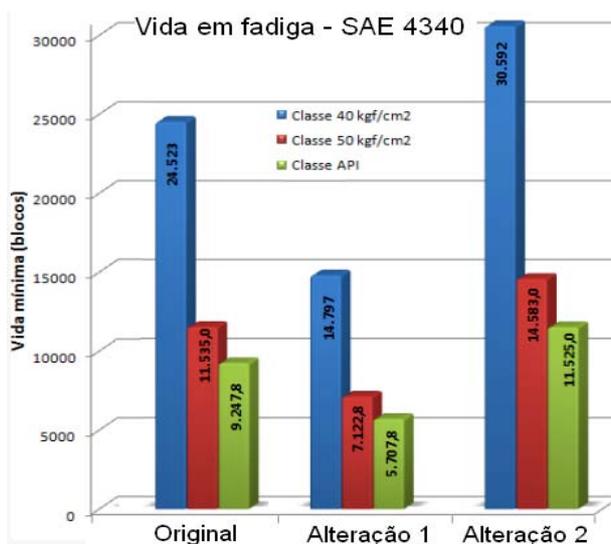


Figura 9 – Gráfico comparativo de vida mínima em fadiga para as três geometrias nos três casos de carregamento (em blocos de carregamento).

3.4 Rainflow Counting e Damage

Os resultados de contagem de ciclos pelo método *rainflow counting* indicaram que a grande maioria de ciclos tinha tensão média próxima de zero e baixa amplitude de tensão, enquanto que alguns poucos ciclos possuíam elevado valor de amplitude. Já os resultados de danos (*damage*) mostraram que a grande maioria dos danos de fadiga na peça foram devidos aos poucos ciclos de baixa tensão média, porém alta amplitude de tensão. Estes resultados concordam com os experimentos realizados com ciclos de carregamento variável pela MSC(7). A Figura 10(a) ilustra o resultado de *rainflow counting* e 10(b) os gráficos de danos provocados pelos ciclos para o carregamento da classe 40 kgf/mm², sendo que para as demais classes os resultados foram semelhantes.

4 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram claramente que o entalhe é um grande influenciador do processo de fadiga do *spindle*, sendo um ponto preferencial para o surgimento de uma trinca de fadiga que se propagará até a falha final do componente.

Os fenômenos desencadeados pela presença do entalhe - geração de altas tensões localizadas, de um estado triaxial de tensões, alta deformação localizada e um aumento do gradiente de deformação local - são fatores que contribuem significativamente no processo de iniciação da trinca.

O carregamento, apesar de também ter mostrado uma grande influência na vida em fadiga do *spindle*, não tem influência no entalhe, sendo que as variações de vida mínima entre os diferentes carregamentos foram proporcionais quando da variação da geometria do entalhe.

Alterações na geometria do entalhe ou então uma alteração na concepção do *spindle* com a eliminação do mesmo podem proporcionar um aumento significativo na longevidade do componente, diminuindo conseqüentemente o número de falhas e os prejuízos originados por estas.

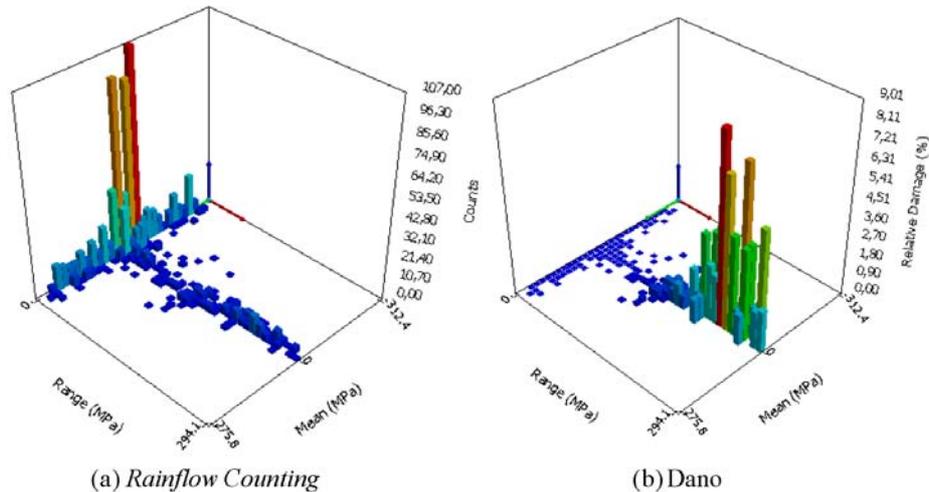


Figura 10 – Gráfico com os resultados de *rainflow counting* e dano (*damage*) para a classe de carregamento 40 kgf/mm².

REFERÊNCIAS

- 1 CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas. 2^a edição, Volume I; Editora McGraw-Hill, São Paulo, 1986.
- 2 MSC Fatigue Application Brief – A multiaxial assessment – McNeal Schwendler Co. Disponível em: http://support.mscsoftware.com/kb/multiaxial_assessment.pdf; Acesso em: 22 out. 2005.
- 3 SCHIJVE, J. Fatigue of Structures and Materials. Kluwer Academic Publishers. Nova Iorque, E.U.A., 2004.
- 4 LEE, Y.; PAN, J.; HATHAWAY, R.; BARKEY, M. Fatigue Testing and Analysis; Elsevier, Oxford, 2005.
- 5 MIL-HDBK-5H, Military Handbook - Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures. Department of Defense, E.U.A., 1998, Capítulo 2, pág. 46-60.
- 6 BINSFELD ENGINEERING INC. TorqueTrak 9000 – Digital Telemetry System - Users Manual. Maple City, MI, E.U.A., 2007.
- 7 MSC Fatigue Application Brief – Verification and Validation – McNeal Schwendler Co. Disponível em: http://support.mscsoftware.com/kb/verification_validation.pdf; Acesso em: 22 out. 2005.