

ANÁLISE DAS TENSÕES EM FEIXE DE MOLAS SEMI-ELÍPTICAS E COMPARAÇÃO COM A NORMA ABNT NBR 8567 (1984)

Luiz Daré Neto

Eduardo Carlos Bianchi

Odilson Coimbra Fernandes

Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica, 17033-360, Bauru, SP, Brasil. E-mail: ldaren @bauru.unesp.br.

Resumo

Existe farta literatura para a determinação das tensões em feixes de molas semi-elípticas, utilizando equações elementares de resistência dos materiais, mas não foi encontrada, na literatura formal, trabalho que quantificasse, experimentalmente, as tensões nas lâminas internas de um feixe de molas, dificuldade esta encontrada, devido ao contato entre as lâminas, impossibilitando a introdução de instrumento de medição. Este trabalho tem o objetivo de apresentar o desenvolvimento do processo utilizado para a medição das tensões atuantes nas lâminas internas de um feixe de molas semi-elípticas, e apresentar os valores encontrados com o ensaio experimental, no feixe de molas semi-elípticas, utilizando 24 extensômetros de resistência elétrica, distribuídos nas cinco lâminas de molas; estes valores foram comparados com valores calculados, encontrados através da aplicação da Norma ABNT NBR8567 (1984). Os resultados mostraram discrepância entre os valores medidos e calculados, e que a Norma Brasileira não é indicada para determinar a tensão atuante em qualquer ponto de qualquer lâmina do feixe de molas, mas devido a sua simplicidade e rapidez do processo apresenta boa precisão para o pré-desenvolvimento do produto.

Palavras-chaves: molas semi-elípticas; molas planas; análise de tensões.

1. INTRODUÇÃO

A denominação de mola semi-elíptica surgiu devido ao uso, nas carruagens, de um par de feixes de molas, um feixe sobre o outro, unidos pelas extremidades, sendo, o feixe inferior, a imagem do superior; devido à curvatura das lâminas, necessária para proporcionar o vão livre para o deslocamento ou movimentação, a forma resultante é muito parecida com uma elipse, originando este nome (BASTOW; 1990).

Vários trabalhos, na indústria, já foram feitos medindo-se a tensão atuante na primeira lâmina do feixe de molas, mas, não foi encontrado nenhum trabalho que determinou as tensões nas lâminas internas do mesmo.

O fato de que as últimas lâminas de um feixe são as primeiras a apresentar falas (quebras) é conhecido, tanto pelos fabricantes de veículos pesados como pelos fabricantes de molas, fato também mencionado por WACHTEL et al. (1987).

O objetivo deste trabalho tecnológico é criar um método eficiente para medir a real tensão atuante em todas as lâminas de um feixe de molas semi-elípticas, e realizar comparações entre os resultados teóricos obtidos através da aplicação da Norma ABNT NBR 8567 (1984) e resultados de ensaios

obtidos através de extensômetros de resistência elétrica; para tanto, foi escolhido um feixe de molas existente no mercado, composto por cinco lâminas, as quais receberam 24 extensômetros de resistência elétrica.

2. MATERIAIS

2.1. Feixe de Molas

O elemento em estudo é o feixe de molas semi-elípticas, também chamado feixe de molas planas.

Visando uma aplicação direta da pesquisa, escolheu-se trabalhar com o feixe de molas da suspensão dianteira dos caminhões da marca Mercedes Benz, utilizado em vários modelos. As lâminas foram numeradas de 1 a 5, de acordo com as Normas ABNT -NBR 8567 (1984).

Como um dos pontos menos conhecidos em feixes de molas é o efeito da variação da tensão, devido ao escalonamento das lâminas no feixe, decidiu-se escalonar a segunda lâmina, isto é, cortar uma parte de cada extremidade, tirando o efeito da segurança do veículo, mas, aumentando o número de escalonamentos, de três para quatro lâminas.

O feixe em estudo é um feixe simétrico, sendo que os meios comprimentos das lâminas dos feixe são: lâmina número 1 - 859,0 mm; lâmina número 2 - 734,5 mm; lâmina número 3 - 615,0 mm; lâmina número 4 - 419,0 mm; lâmina número 5 - 226,0 mm.

No feixe em estudo, as espessuras das lâminas são diferentes, tendo a primeira e a segunda lâminas espessura de 17 mm, e da terceira à quinta lâminas, espessura de 18 mm. Todas as lâminas do feixe possuem largura de 70 mm com raio de arredondamento lateral.

O módulo de resistência à flexão, calculado, para as lâminas números 1 e 2 foi de 3.050mm^3 , e 3.400mm^3 para as lâminas números 3, 4 e 5; desta forma os valores dos momento de inércia da seção foi de 25.925mm^4 para as lâminas números 1 e 2, e 30.600mm^4 para as lâminas números 3, 4 e 5.

Deve ser ressaltado que estes valores não são válidos para as extremidades das lâminas números 3, 4 e 5.

A boa concordância entre o raio das laterais e as superfícies planas da lâmina de mola, melhora a eficiência, nessa região, do tratamento da superfície pelo processo “*shot peening*”, já que as trincas, por fadiga do material, geralmente, têm início na linha de encontro de superfícies (bordas), conforme PASTOUKHOV & VOORWALD (1995) e PETERSON (1974).

Embora a Norma ABNT NBR 5678 (1984) indique o valor do módulo de elasticidade (E), 196.000 MPa e VLACK (1984) o valor médio de 205.000 MPa, neste trabalho foi utilizado o valor de $E = 204.048\text{MPa}$, valor este, usualmente utilizado pelas Industrias do ramo.

2.2. Elementos para a Medição das Tensões

Neste trabalho, para a medição da tensão em pontos pré estabelecidos da superfície das lâminas do feixe, foram utilizados extensômetros elétricos de resistência para medição da deformação em uma direção; estes extensômetros apresentavam resistência de $119,8 \pm 0,2\Omega$ (a 24°C , 50% RH), os quais foram ligados a uma caixa comutadora, com capacidade para 24 canais, e a um medidor de micro-deformação. Os extensômetros foram ligados em meia ponte de Wheatstone, com compensador de temperatura.

A aplicação da força foi feita por uma prensa hidráulica e o valor da carga aplicada foi lido em um anel dinamométrico, com capacidade de 98.100 N (10.000 kgf).

3. MÉTODO

O procedimento para aplicação das cargas e determinação do deslocamento do feixe foi baseado nas mesas de ensaio, encontradas nas indústrias especializadas, isto é, prensa hidráulica e carrinhos para deslocamento das extremidades; conforme ilustrado pela figura 1.



Figura 1. Banco de ensaios destinados à medição das deformações nos pontos pré-estabelecidos dos feixe de molas (as extremidades da Segunda lâmina não correspondem às condições ensaiadas)

3.1. Método para a Medição da Tensão-Deformação

Considerando o objetivo final do trabalho, que é estudar o comportamento da tensão no feixe de molas semi-elípticas, foi necessário colar extensômetros em determinados pontos de todas as lâminas do feixe.

No feixe de molas semi-elípticas existe a inconveniência de que as lâminas trabalham encostadas uma à outra, impossibilitando a colagem dos extensômetros nas superfícies internas das lâminas do feixe, sem danificá-los.

O procedimento desenvolvido para a medição da deformação-tensão em pontos das lâminas internas do feixe, consiste na utilização de uma lâmina espaçadora entre as lâminas de molas.

Estes elementos espaçadores são de alumínio, material escolhido devido a sua elevada resistência à deformação por compressão e baixa resistência à flexão, influndo o mínimo possível nos resultados. A figura 2 ilustra uma parte de uma lâmina espaçadora.

A deflexão (deslocamento) do ensaio foi 110 mm, valor obtido da condição de trabalho do feixe de molas no veículo.

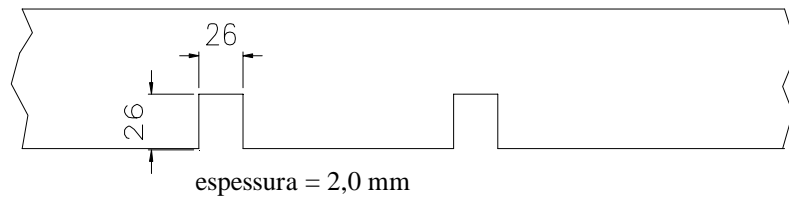


Figura 2. Croqui de uma lâmina espaçadora de alumínio, onde é mostrado o recorte para posicionamento dos extensômetros elétricos.

3.2. Pontos Analisados

A análise da variação das tensões no feixe de molas foi feita em 24 pontos, sendo distribuídos da seguinte forma: dez pontos na primeira lâmina, cinco pontos na segunda lâmina e na terceira, quarta e quinta lâminas, três pontos em cada uma; a justificativa desta distribuição será detalhada a seguir.

Para a verificação da variação da tensão nas lâminas do feixe em uma mesma seção vertical, procurou-se fazer o alinhamento vertical dos pontos em análise, tomando como referência o centro do feixe.

Para uma visualização mais geral, a figura 3 mostra um esboço dos pontos analisados em cada lâmina.

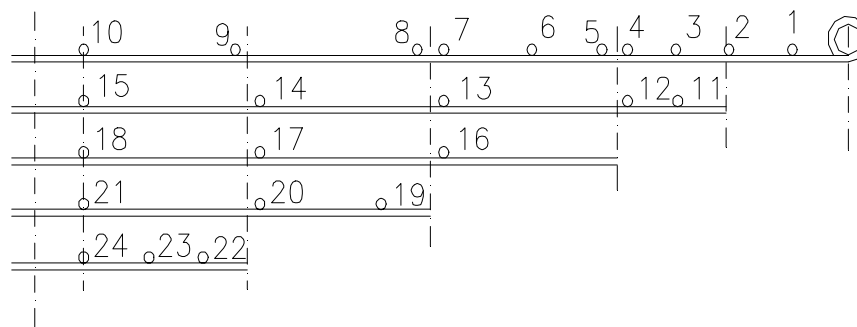


Figura 3. Pontos em estudos do feixe de molas.

A posição de cada ponto em análise foi determinada tendo como base: o efeito da carga externa, o efeito das forças nas extremidades das lâminas em contato e o alinhamento vertical.

Desta forma, o ponto 1 é utilizado para calibrar o banco de ensaios.

Para a análise da variação da tensão nas seções de mesma posição, em relação ao centro do feixe de molas, formaram-se os seguintes alinhamentos verticais: pontos 3 e 11; pontos 4 e 12; pontos 7, 13 e 16; pontos 9, 14, 17 e 20 e os pontos 10, 15, 18, 21, e 24; cada conjunto de pontos alinhados, relaciona diferentes números de lâminas, sendo que o conjunto mais interessante é o que analisa todas as lâminas.

4. RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO

A tensão atuante no material é, geralmente, o elemento mais importante da análise estrutural do projeto, merecendo cuidados especiais para sua determinação. O método de medição da deformação do material é o mais recomendado para estes casos, pois é analisada a própria peça física, dentro do sistema a que pertence e nas condições de trabalho.

4.1. Resultados Experimentais

Os resultados dos ensaios obtidos, através de uma ponte amplificadora, foram em micro deformações, sendo realizados com duas repetições, e as diferenças encontradas mantiveram-se entre zero e 20 μSt (0 a 4 MPa).

Como o usual na engenharia é o tratamento dos resultados utilizando a tensão, os valores mostrados são convertidos em tensão, aplicando a lei de HOOKE (matemático inglês ROBERT HOOKE, 1635-1703), os quais estão mostrados no item seguinte.

4.2. Análise da Distribuição da Tensão no Feixe de Molas Utilizando a Norma ABNT NBR 8567 (1984)

Para análise dos resultados, será assumido que, os valores das tensões medidas pelos extensômetros (σ_{ext}), em cada ponto das lâminas do feixe, serão os valores reais, sendo os mesmos usados para a determinação da diferença ou erro, na comparação com os valores obtidos através dos processos teóricos, indicados pela Norma ABNT NBR - 8567 (1984).

A Norma em tela, traz uma equação específica para o caso de feixe de molas com espessuras de lâminas diferentes, a qual, não pode ser aplicada diretamente, pois as seções das lâminas não são retangulares, sendo formadas por composições de formas. A situação pode ser contornada mantendo-se constante a espessura da lâmina estudada (h_i) e determinando-se a largura média (b_n) suficiente para proporcionar o módulo de resistência à flexão da seção analisada; assim, como resultado obtém-se: b_1^* e $b_2^* = 63,32$ mm e b_3^* , b_4^* e $b_5^* = 62,96$ mm; onde: b_n^* é a largura média da lâmina de mola, necessária para produzir o módulo de resistência à flexão da mesma.

Estes valores da largura média, são aplicados na equação indicada pela Norma, que, retrabalhada, é representada pela equação 1.

$$\sigma_t = \frac{6 \cdot P_1 \cdot l_p \cdot h_n}{b_1^* \cdot \sum_{i=1}^2 h_i^3 + b_3^* \cdot \sum_{i=3}^{Ne} h_i^3} \quad (1)$$

Para a determinação da tensão teórica (σ_t), calculada em cada ponto por esta Norma, o comprimento " l_p " é tomado como sendo a distância entre o ponto de aplicação da força até o ponto em análise; o valor da força " P_1 ", que é a carga atuante no olhal da primeira lâmina, é a metade do valor lido no dinamômetro do banco de ensaio, para o deslocamento de 110 mm, a qual apresentou o valor de 11.473,5 N; o número de lâminas na seção transversal do feixe de molas é simbolizado por " Ne ".

Conhecendo-se o valor da tensão real (σ_{ext}), medida no ponto, e a tensão teórica (σ_t), calculada no mesmo ponto, pode-se determinar a diferença entre elas; será chamado de "Erro" esta diferença em porcentagem.

Para o ponto número 1, este "Erro" é:

$$rro_1 = \left(\frac{\sigma_{t1} - \sigma_{\text{ext}1}}{\sigma_{\text{ext}1}} \right) 100 = \left(\frac{222,0 - 220,4}{220,4} \right) 100 = 0,72\% \quad (2)$$

A análise de cada ponto está mostrada na tabela 1.

Tabela 1. Valores das tensões reais (σ_{ext}) e teóricas (σ_t), produzidas pelo deslocamento de 110 mm, utilizadas para determinação do Erro decorrente da aplicação da Norma ABNT - NBR 8567 (1984).

Ponto Número	Distância (l_p) [mm]	Largura da lâmina (b^*) [mm]	Espessura da lâmina (h_n) [mm]	Tensão teórica (σ_t) [MPa]	Tensão real (σ_{ext}) [MPa]	Erro [%]
1	59	63,32	17	222,0	220,4	0,72
2	126	63,32	17	474,0	476,5	-0,51
3	182	63,32	17	342,3	493,8	-30,67
4	233	63,32	17	438,3	497,9	-11,97
5	260	63,32	17	429,7	502,0	-14,39
6	333,5	63,32	17	474,7	516,2	-8,04
7	426,5	63,32	17	504,5	532,6	-5,27
8	455	63,32	17	485,3	540,7	-10,25
9	646,5	63,32	17	516,8	565,2	-8,57
10	807	63,32	17	547,9	581,5	-5,78
11	180	63,32	17	338,6	200,0	69,31
12	232,5	63,32	17	437,3	402,0	8,79
13	427	63,32	17	505,1	493,8	2,29
14	621	63,32	17	535,7	553,0	-3,12
15	806	63,32	17	547,2	589,7	-7,20
16	427	62,96	18	534,8	553,0	-3,29
17	621	62,96	18	567,3	585,6	-3,14
18	806	62,96	18	579,4	597,9	-3,09
19	493	69,33	13,3	357,8	267,3	33,86
20	621	62,96	18	567,3	591,7	-4,14
21	805	62,96	18	578,7	614,2	-5,78
22	682	67,9	13,7	420,1	263,2	59,59
23	738,5	64,93	16,1	503,0	444,8	13,07
24	806	62,96	18	579,4	620,3	-6,59

5. DISCUSSÃO

Analisando os valores dos Erros, nota-se que, nos pontos 1 e 2, devido à simplicidade do sistema, os Erros são os menores; nos pontos mais próximos das alterações de seções, pontos números: 3, 5, 8, 9, 11, 19, 22 e 23, os valores dos Erros são os maiores; deve ser observado que, nos pontos 5, 8 e 9, mesmo não estando próximos da extremidade da primeira lâmina, sofrem influência da entrada de mais uma lâmina, no caso, a terceira a quarta e a quinta lâminas, respectivamente. Os três maiores valores do Erro foram encontrados nos pontos mais próximos das extremidades das lâminas a que pertencem, e são eles, os pontos números: 11, 19 e 22.

Os pontos mais distantes das alterações de seção (pontos: 7, 13, 14, 16, 17 e 20), apresentam valores dos Erros que estão dentro da faixa de +2,3 a -5,3%.

No alinhamento de pontos mais próximos ao centro do feixe de molas, são encontrados valores do Erro que estão dentro da faixa de - 3,1% a -7,2%, partindo do valor -5,8% (na primeira lâmina), crescendo até 7,2% (na segunda lâmina), atingindo o mínimo valor da faixa, na terceira lâmina e decrescendo, novamente, até a quinta lâmina.

O método utilizado nesta Norma é simples e rápido; todavia, deve ser observado que apresentou uma tensão teórica pouco menor que a tensão real, nos pontos de maior solicitação, fato este, contra a segurança.

A variação do Erro, em função do comprimento de cada lâmina, é representada pela figura 4.

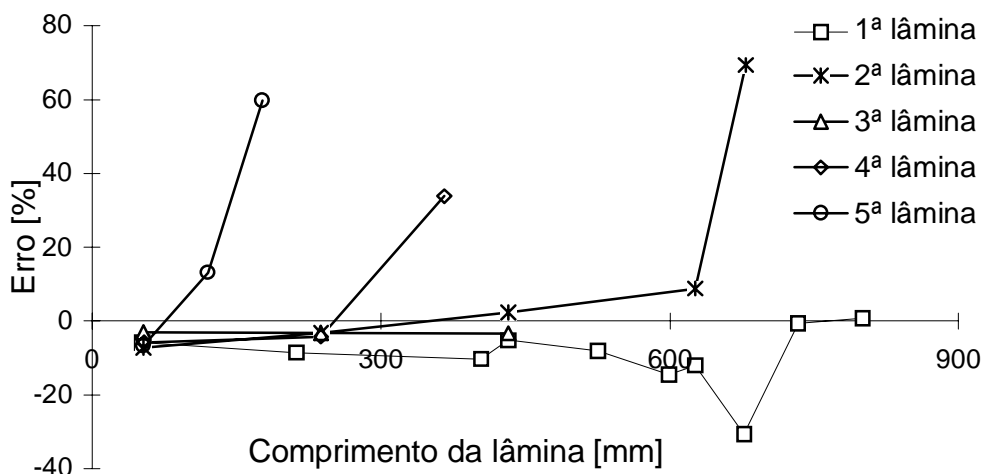


Figura 4. Variação do valor do Erro ao longo do comprimento das cinco lâminas, pela comparação entre os valores obtidos no ensaio e os valores calculados, aplicando a Norma ABNT NBR 8567 (1984).

6. CONCLUSÕES

Do exposto, conclui-se que após aprofundada revisão da literatura, foi constatada a ausência de um processo para a medição das tensões atuantes em todas as lâminas de um feixe de molas semi-elípticas; daí surgiu a necessidade de se criar um método para essa quantificação.

De acordo com os resultados obtidos, após os ensaios, a metodologia desenvolvida mostrou ser inovadora, eficiente e de rápida execução, podendo ser aplicada em condições estáticas, dinâmicas e mesmo com o veículo em reais condições de trabalho.

Outro objetivo, foi a determinação da distribuição da tensão ao longo de cada lâmina do feixe de molas, através da extensometria. Os resultados foram apresentados, representando a condição de trabalho.

Aqueles resultados, denominados de tensões reais (σ_{ext}), foram comparados com os valores das tensões calculadas (σ_t), segundo a recomendação da Norma ABNT NBR 8567 (1984). A conclusão desta comparação foi uma discrepância entre os valores da tensão, em cada ponto, devido, possivelmente, a utilização de uma fórmula simplista para analisar um sistema complexo.

Tomando como referência as tensões reais obtidas no ensaio com o feixe de molas (σ_{ext}) e comparando-as com as tensões calculadas (σ_t), e fazendo um alinhamento das tensões nas seções analisadas mais próximas do centro do feixe de molas (pontos 10, 15, 18, 21 e 24, pertencentes, respectivamente, às lâminas números, 1 a 5), pode-se notar a discrepância dos valores encontrados, que é mostrada pelo gráfico da figura 5.

Com as fórmulas indicadas pela Norma, as tensões calculadas são iguais nas seções alinhadas das lâminas de mesma espessura; isto ocorre devido aos valores numéricos, empregados na equação 1, serem iguais; assim, as tensões nos pontos alinhados: 10 e 15 (lâminas 1 e 2), e 18, 21 e 24 (lâminas 3, 4 e 5), diferem somente pela variação da distância entre o ponto de aplicação da força e o ponto analisado (Tabela 1).

Como na região deste alinhamento das seções ocorre o maior nível de tensão registrada, com base no exposto recomenda-se que, após os cálculos das tensões, estas sejam aumentadas em 6% (seis por cento) para o método de cálculo. Este percentual é baseado no fato de que,

no processo de cálculo das tensões, estas foram menores que as reais, com diferenças da ordem de 5,7%.

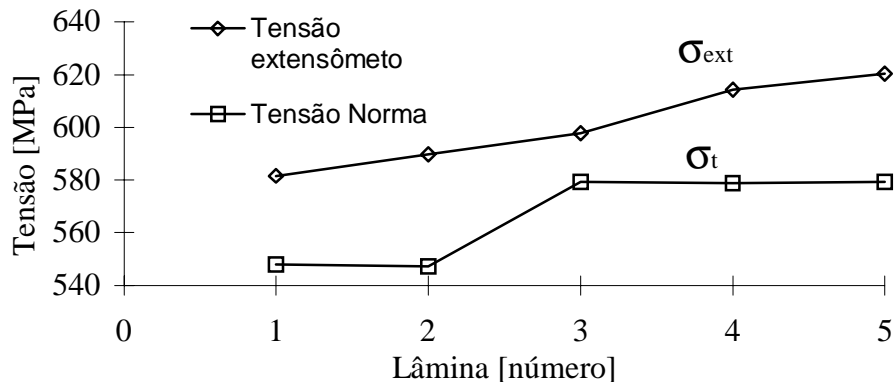


Figura 5. Comparação entre as tensões reais e as tensões calculadas nos pontos números: 10, 15, 18, 21 e 24 (primeira a quinta lâminas), do feixe de molas.

Na determinação da distribuição da tensão do feixe de molas, o “Erro” variou entre 34 e 70% (Tabela 1), nas lâminas inferiores, após aumento do pacote de lâminas (pontos: 11, 19 e 22); nas lâminas superiores, que sofrem aumento da espessura do pacote, o “Erro” também é significativo, 30,7% no ponto número 3; 14,4% no ponto número 5; 10,3% no ponto número 8 e 8,6% no ponto número 9. As vantagens da utilização das Normas citadas, são a simplicidade e a rapidez do processo, apresentando boa precisão a qual, entretanto, é bastante influenciada pela distância do ponto analisado à seção com variação na espessura do pacote do feixe, quanto maior esta distância, melhor a precisão; como desvantagem, não é recomendada a sua utilização na análise da distribuição da tensão ao longo de todo o feixe de molas, recomendando a sua utilização para o pré-desenvolvimento do produto.

7. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984), ABNT - NBR 8567 - Cálculo e Projetos de Feixes de Molas para Veículos Rodoviários.
- BASTOW, D. (1990). Car Suspension and Handling; 2nd ed, 2nd reprinted; Billing & Sons; London; Cap. 7, pp 201-230.
- PASTOUKHOV, V.A.; VOORWALD, H.J.C. (1995). Introdução à Mecânica da Integridade Estrutural, Ed. UNESP, São Paulo, cap. 4, pp 109-145.
- PETERSON, R.E. (1974). Stres Concentration Factor; John Wiley & Sons; New York.
- WACHTEL, D.W.; ADKINS, D.E.; MAY, J.M.; HOHNSTADT, W.E. (1987). Advances in the Design, Analysis, and Manufacturing of Steel Leaf Spring; Truck and Bus Meeting and Exposition; Dearborn - Michigan, November 16 - 19.