

EFEITO DE TORÇÃO NA METODOLOGIA PARA ENSAIO DE FLEXÃO VERTICAL DE EIXO VEICULAR UTILIZADO EM SUSPENSÃO PNEUMÁTICA DE IMPLEMENTOS RODOVIÁRIOS

Sergio Francisco Dela Antônio¹ e Luiz Eduardo Lopes¹

¹Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A- IPT

E-mails: sfda@ipt.br e luizel@ipt.br

RESUMO

Os eixos utilizados em implementos rodoviários, reboques e semi reboques, a partir de julho/2015, são objetos de certificação no Brasil. O IPT possui laboratório acreditado para realização dos ensaios dos eixos conforme a Norma “ABNT 10961:2009 – Implementos Rodoviários – Caminhão, caminhão trator, ônibus, reboque e semi-reboque – Eixo veicular – Requisitos e métodos de ensaios”. Em trabalho anterior o IPT apresentou uma comparação de métodos do ensaio de flexão vertical, para eixos utilizados em suspensões pneumáticas, sendo um dos métodos conforme a norma NBR 10961 e outro desenvolvido pelo IPT baseado na condição real de utilização. Os ensaios de confirmação da metodologia proposta pelo IPT mostraram que os esforços de flexão eram superiores aqueles obtidos conforme a Norma ABNT 10961:2009, mas também indicaram que esforços de torção estavam presentes. Para quantificar estes esforços foram feitos ensaios experimentais de torção, em um mesmo modelo de eixo, o qual foi instrumentado com extensômetros elétricos. Os níveis de tensões de torção são mostrados neste trabalho e comparados com aqueles encontrados nos ensaios de confirmação da metodologia proposta pelo IPT.

1. INTRODUÇÃO

Os eixos veiculares traseiros utilizados em caminhões e implementos rodoviários como reboques e semirreboques, a partir de julho/2015 são objetos de certificação compulsória no Brasil. Cada modelo de eixo deve ter todo o processo de fabricação auditado e avaliado periodicamente. Esta avaliação da auditoria é baseada em um Regulamento Técnico da Qualidade aprovado e publicado pelos órgãos gestores deste tipo de certificação no Brasil.

Parte importante deste regulamento técnico são os ensaios aos quais o produto deve atender. As metodologias de ensaios adotadas no regulamento atual foram baseadas na Norma “ABNT 10961:2009 – Implementos Rodoviários – Caminhão, caminhão trator, ônibus, reboque e semirreboque – Eixo veicular – Requisitos e métodos de ensaios” [1]. Por sua vez, as metodologias de ensaios da Norma mencionada foram baseadas em normas antigas que em nada se alteraram tecnicamente nas ultimas revisões. Essas metodologias foram criadas quando os caminhões e implementos rodoviários tinham capacidade de carga menor e possuíam somente suspensões com feixes de molas.

Atualmente muitos veículos possuem eixos com suspensão pneumática que é considerada uma evolução tecnológica com relação aos sistemas de suspensão com feixes de molas. As

montagens dos eixos nestes dois tipos de suspensão são diferentes. Na suspensão com feixes de molas as longarinas do veículo são apoiadas nas extremidades dos feixes que por sua vez são fixados sobre os apoios soldados diretamente sobre o eixo, conforme Figura 5. Na suspensão pneumática as longarinas são apoiadas sobre os braços da suspensão que por sua vez são soldados no eixo; um lado dos braços é um ponto fixo em relação à longarina e no outro lado é colocada uma bolsa de ar que funciona como o elemento mola, conforme Figura 3.

Na certificação do eixo os ensaios devem ser realizados conforme o regulamento atual. Para o ensaio de flexão vertical que simula a carga dinâmica do veículo sobre o eixo, os eixos utilizados em suspensões pneumáticas devem ser modificados e ensaiados como se fossem utilizados em suspensões com feixes de molas. Para isso o eixo da suspensão pneumática deve ser alterado para ficar parecido com um eixo de suspensão com feixes de molas. No lugar dos braços da suspensão soldados no eixo para a reação das cargas devem ser soldados os suportes utilizados para fixação dos feixes de molas, onde serão aplicadas as forças no ensaio.

Ensaar um eixo utilizado em suspensão pneumática como se fosse um eixo utilizado em suspensão com feixes de molas não representa as condições reais de uso do eixo e tampouco as condições impostas pelo processo de fabricação. Estas alterações nos eixos podem gerar esforços diferentes dos que acontecem na aplicação real e comprometer a análise da vida em fadiga. Firat [2] propõe a simulação numérica de teste de fadiga por flexão de 4 pontos de um eixo para feixes de molas utilizando a metodologia de análise integrada de fadiga e elementos finitos. No trabalho fica evidente a importância na vida em fadiga dos concentradores de tensão introduzidos pelo processo de fabricação. Wang, X. et al. [3] propõem a simulação numérica do ensaio de fadiga de flexão vertical da estrutura de um eixo automotivo traseiro para estimar, na fase de projeto, se o eixo passaria os testes e quais alterações seriam necessárias para atingir tal objetivo. Além disso, estudam as relações entre os resultados dos testes e aqueles colhidos no campo de provas, onde os projetos são finalmente validados. Lee, Yuejun E. [4] analisa a correlação entre o projeto e os resultados dos testes de flexão vertical de eixos automotivos. A adaptação de deslocamento e deformação para metas de correlação mostra resultados que podem ser altamente não lineares devido aos erros experimentais e ruído. A confiança em se achar uma solução global ótima é altamente limitada sem uma ferramenta de busca que considere o espaço completo de projeto. Propõe um novo algoritmo de otimização, baseado na técnica de exploração de projeto, para a busca da solução ótima. Dela Antonio et al. [5] avaliam a relação entre os esforços ocorridos no eixo veicular utilizado em suspensão pneumática quando o mesmo é submetido à duas metodologias de ensaio de flexão vertical diferentes, porém com o mesmo carregamento. Uma das metodologias foi baseada na norma NBR 10961 e outra foi desenvolvida pelo IPT onde foi definida uma montagem que simulou a aplicação real no veículo. Atualmente o IPT possui uma bancada para o ensaio conforme a norma NBR 10961.

2. A NOVA METODOLOGIA PARA ENSAIO DE FLEXÃO VERTICAL DE EIXO VEICULAR

Para desenvolvimento da nova metodologia para ensaio de flexão vertical o IPT realizou as seguintes ações:

- a) Desenvolvimento de uma nova bancada de ensaio para simulação da montagem real do eixo, com suspensão pneumática.

- b) Modelagem e simulação por elementos finitos dos dois eixos para os carregamentos nos ensaios conforme a metodologia normalizada e a metodologia em desenvolvimento, com o levantamento dos pontos críticos de esforços nos eixos.
- c) Instrumentação de dois eixos, um com a fabricação original dos componentes para instalação em suspensão pneumática e outro de mesma origem, porém modificado para suspensão com feixes de molas.
- d) Realização de ensaios estáticos com sistema de aquisição de dados para leitura dos esforços nos eixos para as duas metodologias;
- e) Análise dos resultados obtidos dos esforços nos eixos para ambas as metodologias.

2.1. Eixo para Suspensão Pneumática

O eixo objeto deste trabalho é apresentado nas Figuras 1 e 2. O eixo possui as seguintes especificações técnicas:

- Tipo: Usinado, tubular com 146 mm de diâmetro externo, 12 mm de parede e 2.218 mm de comprimento total. O lado fixo do braço da suspensão é montado com uma bucha polimérica que permite um pequeno movimento em todas as direções.
- Carga nominal: 11 ton (107,9 kN)
- Utilização: eixo traseiro de caminhões com suspensão pneumática;
- Distância entre braços da suspensão: 931 mm;
- Bitola: 1860 mm;
- Material: FB-70

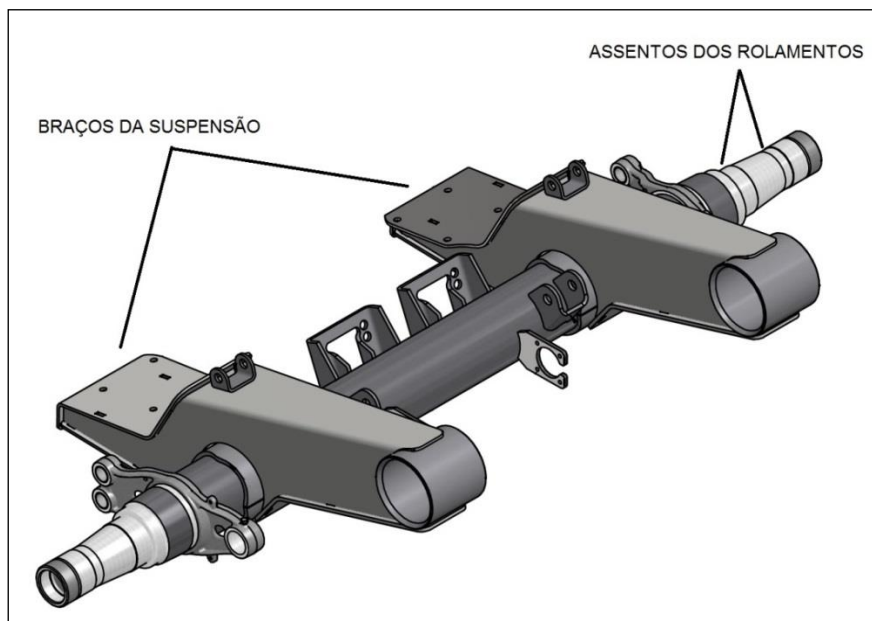


Figura 1 – Eixo para Suspensão Pneumática (perspectiva)

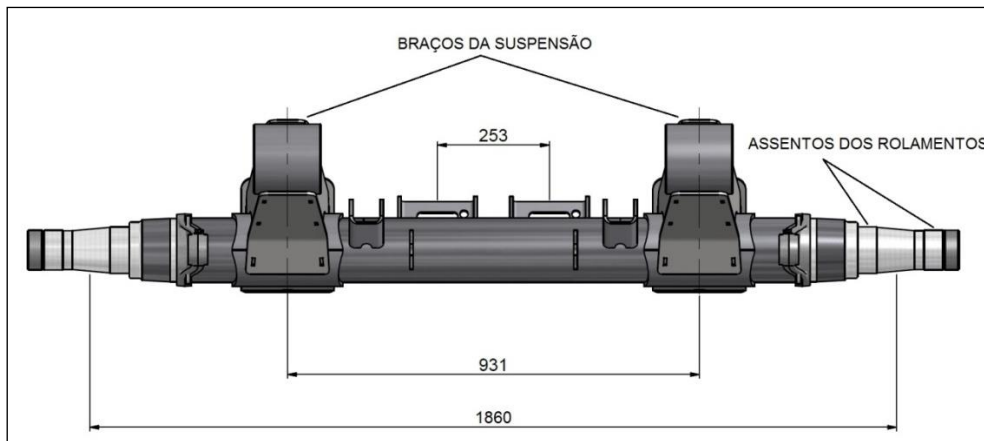


Figura 2 – Eixo para Suspensão Pneumática (vista de frente)

O esquema de montagem do eixo na suspensão pneumática é apresentado na Figura 3. As cotas correspondem ao veículo carregado.

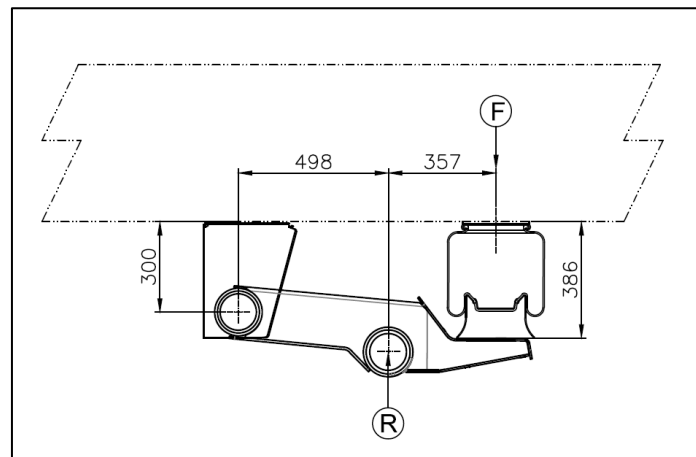


Figura 3 – Esquema de montagem da suspensão pneumática

2.2. Bancada de ensaio conforme a norma NBR 10961.

A bancada de ensaio de flexão vertical conforme a norma NBR 10961 é apresentada na Figura 4. Basicamente a bancada é constituída de um quadro de reação autoportante, com 2 atuadores servo controlados, para aplicação da força sobre os assentos dos feixes de molas. Em cada ponta do eixo é montada uma bucha de aço sobre as sedes dos rolamentos onde se dará a reação das forças. As buchas são apoiadas sobre roletes com 100 mm de diâmetro que são apoiados sobre uma base rígida.

Para os ensaios de certificação a força aplicada no ensaio é dinâmica com frequência entre 0,5 e 10Hz, variando de 5kN a duas vezes a carga nominal do eixo. O eixo deve resistir a 300.000 ciclos sem apresentar fratura e ser ensaiado com todos os componentes que gerem calor, soldados ou fixados por outro meio.



Figura 4 – Bancada de ensaio de flexão vertical conforme NBR 10961

Para que o eixo de suspensão pneumática possa ser ensaiado conforme a NBR 10961 deve-se alterar sua configuração, fixando no lugar dos braços da suspensão os apoios dos feixes de molas, conforme Figura 5.

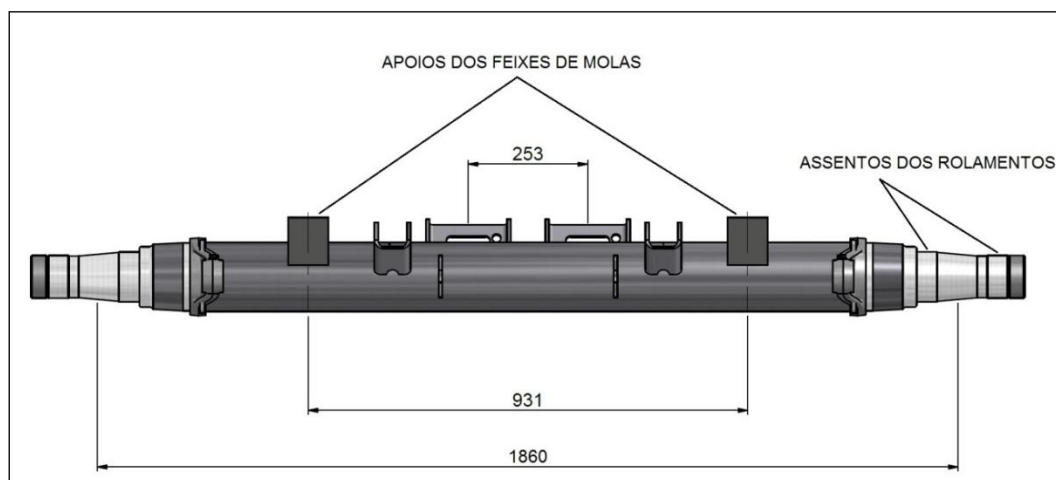


Figura 5 – Eixo de suspensão pneumática modificado para ensaio conforme NBR 10961

2.3. Concepção da nova bancada de ensaio para simulação do eixo no veículo com suspensão pneumática

A nova bancada de ensaio, apresentada na Figura 6, foi concebida e desenvolvida pelo IPT tendo como referência as cotas e desenhos de instalação no caminhão do eixo objeto do trabalho. A bancada é constituída de um quadro de reação, autoportante, dois atuadores servo controlados, para aplicação das forças e o dispositivo de fixação do eixo. As forças são aplicadas no lado do braço da suspensão onde é montada a bolsa de ar. O outro lado do braço é montado em um suporte rígido que permite o pivotamento no sentido longitudinal do veículo.



Figura 6 – Bancada de ensaio de flexão vertical – suspensão pneumática

3. INSTRUMENTAÇÃO DO EIXO DE SUSPENSÃO PNEUMÁTICA

Com base nos esforços encontrados nas simulações, foram definidos 12 pontos de monitoração da deformação. Cada eixo (Figura 1 e Figura 5) foi instrumentado com 12 extensômetros (strain gages), conforme localizações da Figura 13, que mostra o eixo de suspensão pneumática.

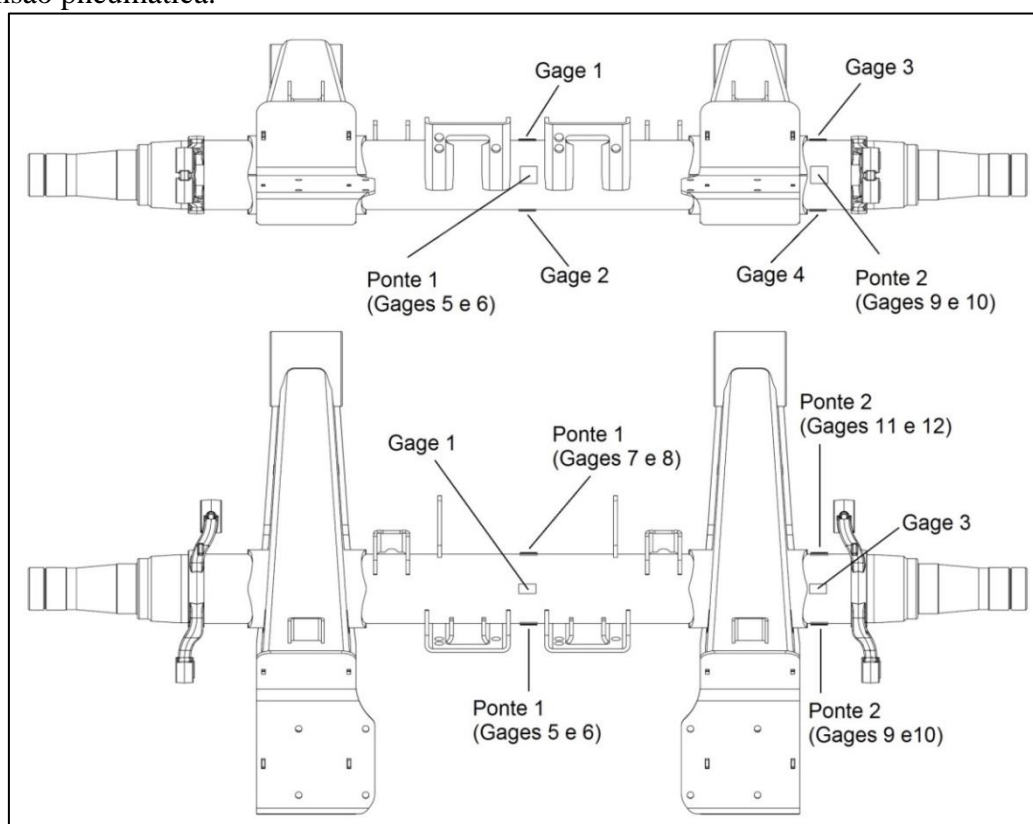


Figura 7 – Localização dos extensômetros (strain gages)

A identificação e os esforços medidos pelos gages são:

Gages 1 e 2: Gages uniaxiais colados no centro do eixo para leitura dos esforços de flexão, gage 1 na parte superior e o gage 2 na inferior. Leituras individuais em $\frac{1}{4}$ de ponte.

Gages 3 e 4: Gages uniaxiais colados em uma das pontas para leitura dos esforços de flexão, gage 3 na parte superior e gage 4 na inferior. Leituras individuais em $\frac{1}{4}$ de ponte.

Gages 5, 6, 7 e 8: Duas rosetas de 90° coladas no meio e na linha de centro a 45° nos dois lados para leitura dos esforços de torção. Leitura em ponte completa, ponte 1.

Gages 9, 10, 11 e 12: Duas rosetas de 90° coladas na ponta e na linha de centro a 45° nos dois lados para leitura dos esforços de torção. Leitura em ponte completa, ponte 2

As Figuras 8 e 9 mostram a instrumentação dos 2 eixos

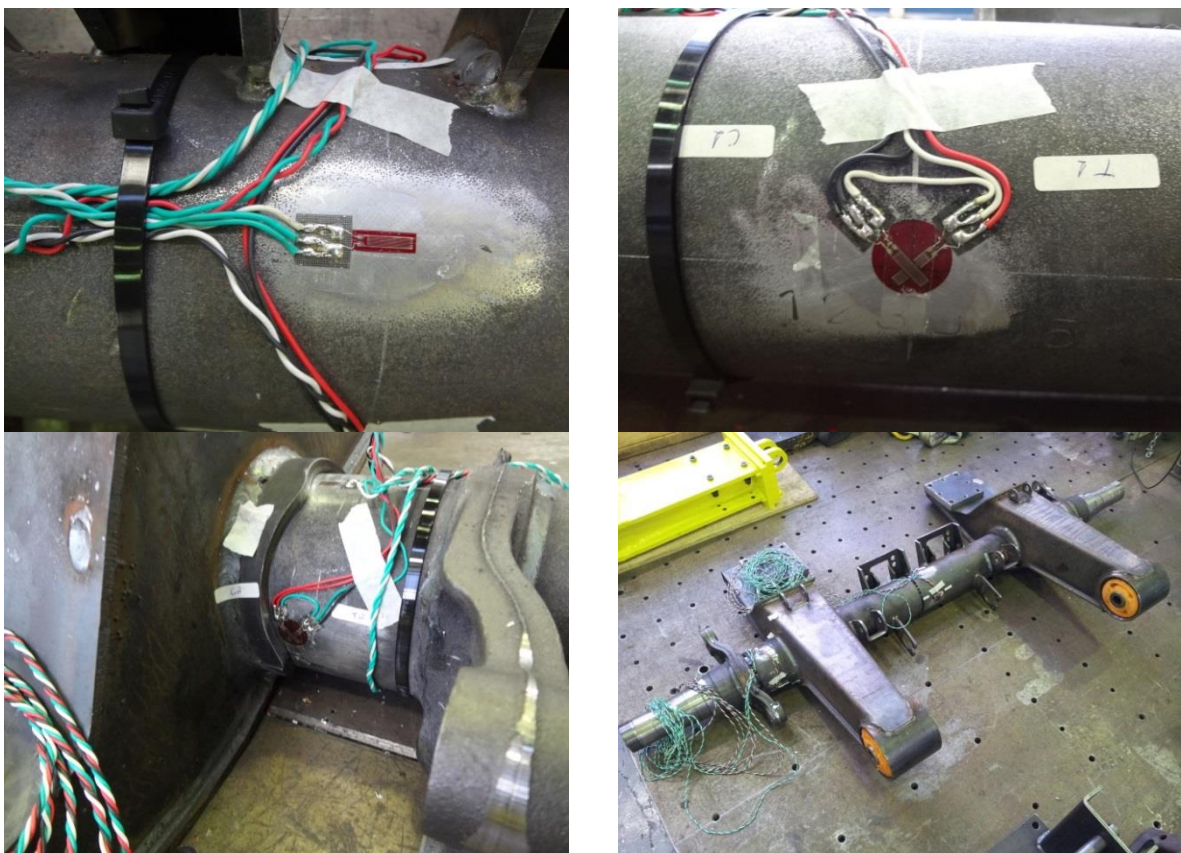


Figura 8- Instrumentação do eixo de suspensão pneumática

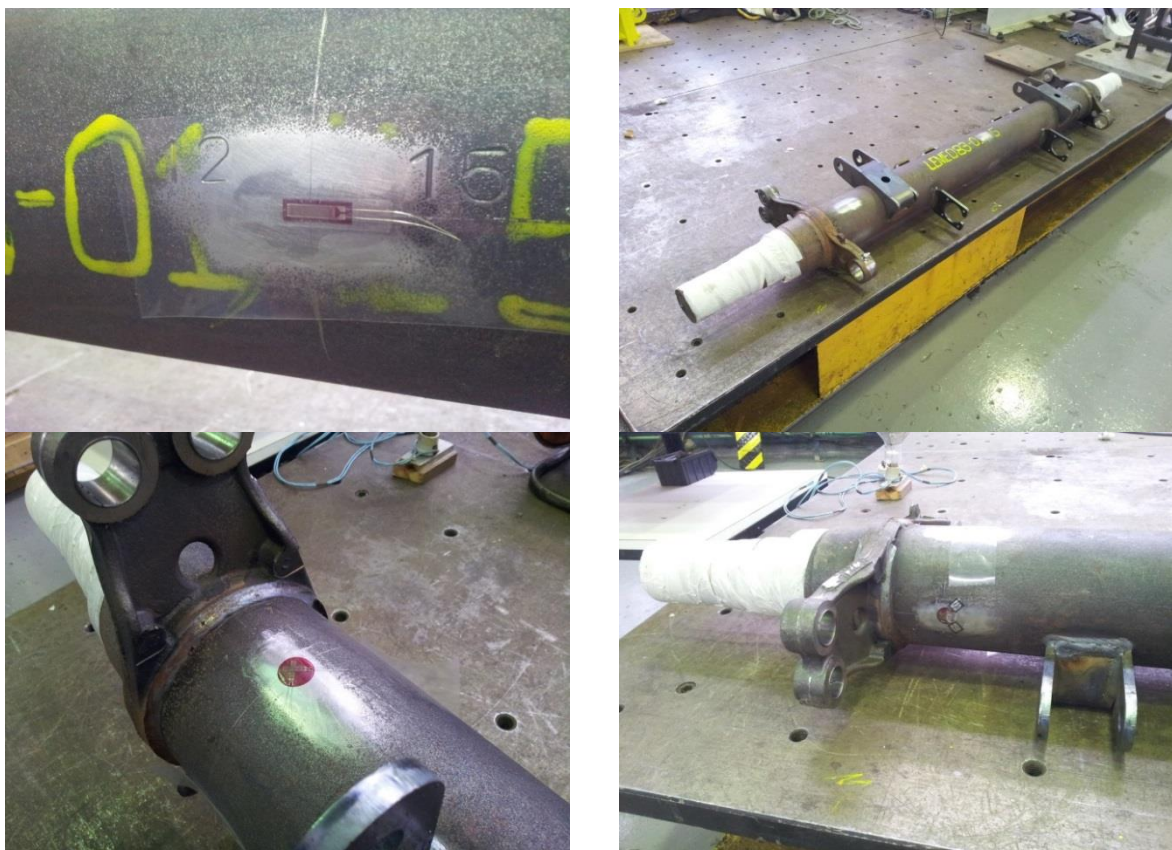


Figura 9 – Instrumentação do eixo de suspensão pneumática modificado

4. ENSAIOS REALIZADOS

Para avaliação dos esforços foram realizados ensaios estáticos nos eixos de suspensão pneumática.

4.1. Sistema de Aquisição de Dados

No ensaio as deformações medidas pelos gages foram monitoradas e registradas por um sistema de aquisição de dados. Posteriormente foram gerados os gráficos das deformações e das forças aplicadas.

4.2. Ensaio conforme montagem do eixo no veículo

Para este ensaio foi seguido o mesmo procedimento especificado pela Norma ABNT 10961:2009. Os valores das forças aplicadas nos braços de suspensão em cada lado foram proporcionais para que a reação nos apoios do eixo também fosse até duas vezes a carga nominal. A Figura 10 mostra a montagem do ensaio conforme montagem no veículo.



Figura 10- Montagem do ensaio do conforme aplicação real no veículo

5. RESULTADOS

5.1 Solicitações Gerais

Os resultados do ensaio conforme a norma NBR 10961 para a montagem real são apresentados nas Tabela 1 e Figura 11. Para o gages os valores negativos de deformação correspondem a esforços de compressão e os positivos à tração.

Tabela 1 - Valores da força aplicada e deformações obtidas – Montagem real

Força em cada atuador (kN)	Força de reação no eixo (% da carga nominal)	Ponte 1 (μΕ)	Ponte 2 (μΕ)	Gage 1 (μΕ)	Gage 2 (μΕ)	Gage 3 (μΕ)	Gage 4 (μΕ)
0	0,0%	5	1	2	6	-2	2
3,0	9,6%	19	-3	-61	71	-41	34
6,0	19,1%	15	-6	-125	139	-86	76
9,0	28,7%	12	-9	-191	208	-132	117
12,0	38,2%	8	-13	-255	275	-177	159
15,0	47,8%	7	-16	-320	344	-223	200
18,0	57,3%	5	-21	-386	413	-268	241
21,0	66,9%	3	-25	-451	481	-314	281
24,0	76,4%	4	-29	-516	549	-359	320
27,0	86,0%	9	-34	-581	617	-403	359
30,0	95,5%	18	-39	-645	686	-447	396
31,4	100,0%	23	-42	-675	717	-467	414
33,0	105,1%	29	-45	-710	754	-490	434
36,0	114,6%	37	-50	-774	821	-534	471
39,0	124,2%	44	-55	-839	890	-578	510
42,0	133,7%	50	-61	-904	957	-622	548
45,0	143,3%	54	-66	-968	1024	-665	586
48,0	152,9%	58	-72	-1033	1092	-709	624
51,0	162,4%	62	-77	-1098	1151	-753	664
54,0	172,0%	64	-81	-1163	1229	-798	703
57,0	181,5%	68	-85	-1229	1298	-843	742
60,0	191,1%	71	-90	-1294	1367	-888	782
62,8	200,0%	73	-93	-1355	1431	-930	818

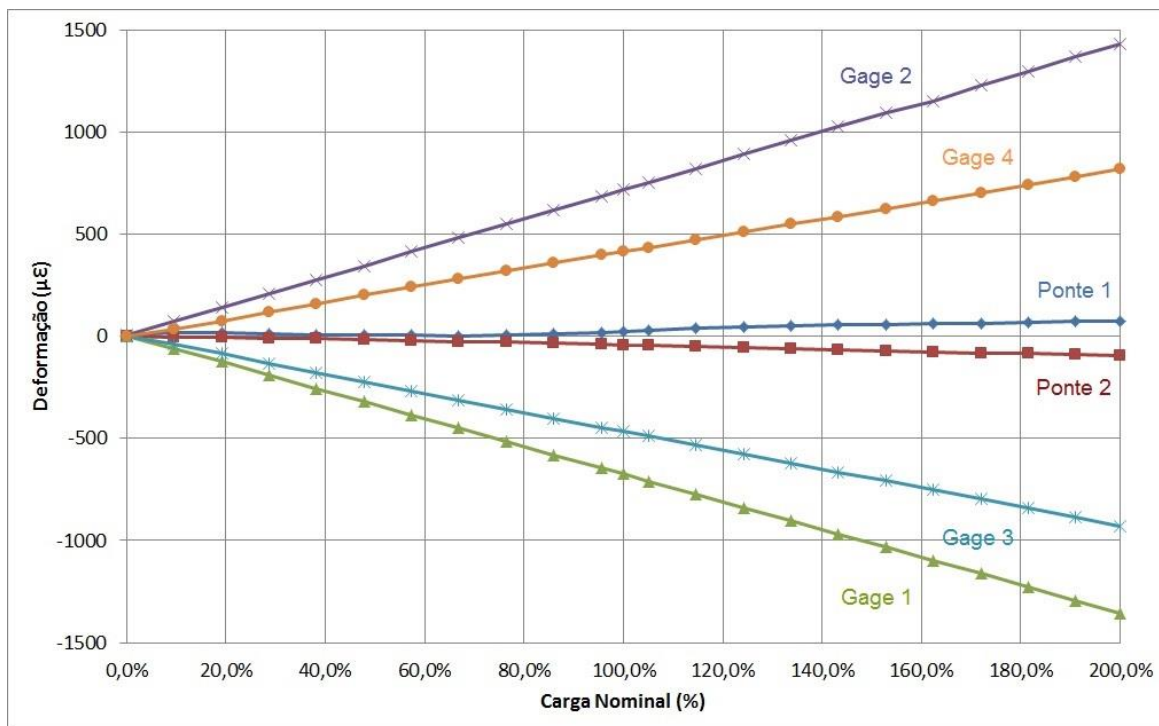


Figura 11 – Deformações obtidas em função da força de reação do eixo – Montagem real

As Figuras 12 e 13 mostram os resultados das medições das Pontes 1 e 2 com escalas mais apropriadas para análise.

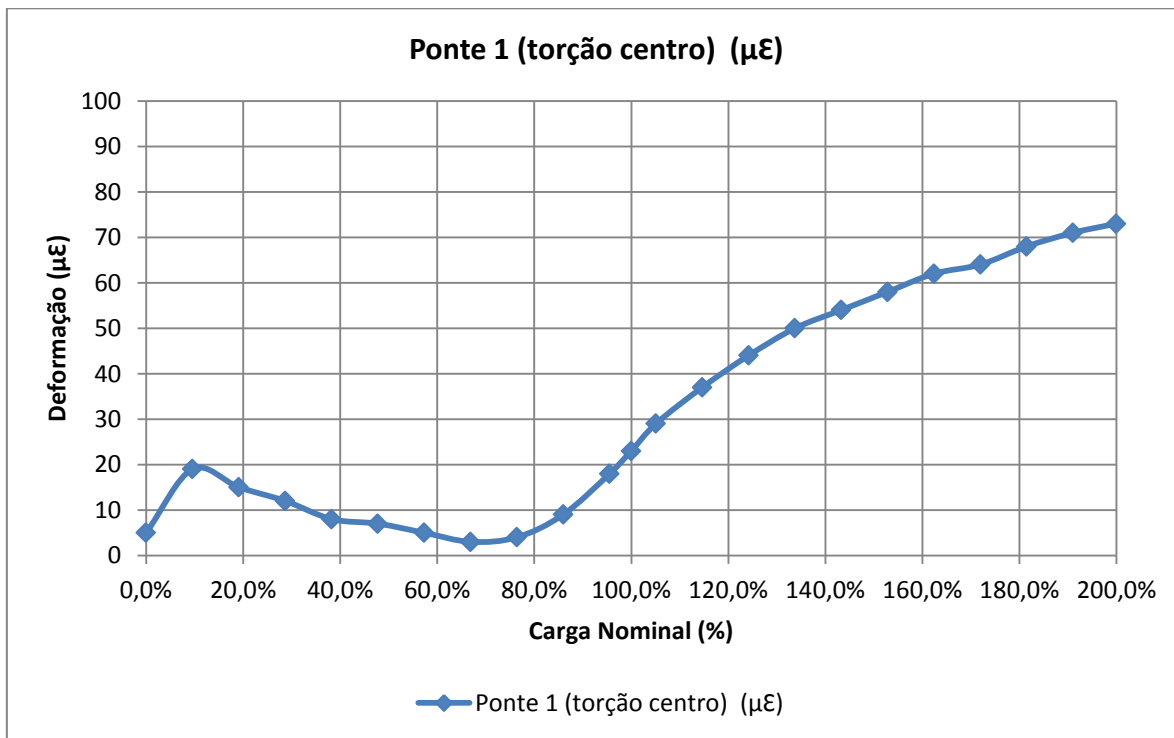


Figura 12- Resultados da Ponte 1

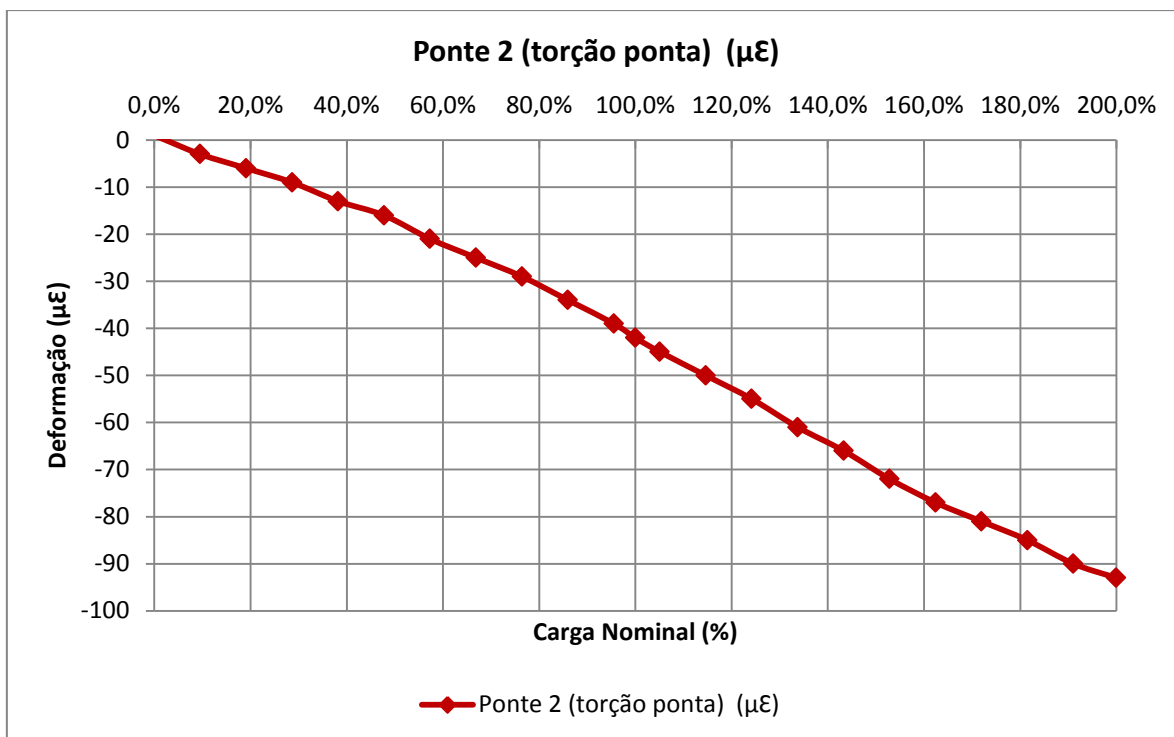


Figura 13- Resultados da Ponte 2

5.2 Solicitações à Torção

As Pontes 1 e 2, conforme Tabela 1 e Figuras 12 e 13, indicam a presença de torção na região instrumentada.

A Tabela 2 mostra os resultados do ensaio de torção no eixo conforme a Norma NBR 10.961. O ensaio consiste na aplicação de torque máximo de 21,58 kN.m, na flange de fixação dos elementos de freio, o que corresponde à uma força de 40% da carga nominal (107,9 kN), aplicada em braço de reação de 500 mm (raio do pneu)

Tabela 2- Valor das deformações e torques calculados na montagem -Norma NBR 10.961

Carga no atuador (kN)	Torque aplicado (N.m)	Ponte 1 (torção centro) (μΕ)	Ponte 2 (torção ponta) (μΕ)	Torque Ponte 1 (N.m)	Torque Ponte 2 (N.m)
0	0	14	17	292	-105
2	1000	23	60	824	-172
4	2000	41	120	672	-223
6	3000	63	181	558	-274
8	4000	81	241	406	-341
10	5000	104	298	368	-392
12	6000	136	357	292	-477
14	7000	216	427	215	-544
16	8000	233	484	254	-612
18	9000	249	542	444	-697
20	10000	267	600	786	-781
21,6	10800	283	648	976	-832

Carga no atuador (kN)	Torque aplicado (N.m)	Ponte 1 (torção centro) ($\mu\epsilon$)	Ponte 2 (torção ponta) ($\mu\epsilon$)	Torque Ponte 1 (N.m)	Torque Ponte 2 (N.m)
24	12000	313	719	1204	-883
26	13000	341	778	1508	-967
28	14000	367	835	1774	-1052
30	15000	395	894	2003	-1154
32	16000	417	974	2155	-1238
34	17000	450	1013	2307	-1340
36	18000	472	1065	2459	-1424
38	19000	498	1121	2535	-1492
40	20000	525	1191	2687	-1560
42	21000	539	1242	2801	-1644
43,16	21580	555	1285	2877	-1695

A Figura 14 indica, em gráfico, a deformação em função do torque aplicado conforme os resultados da Tabela 2. As equações de interpolação são indicadas na figura.

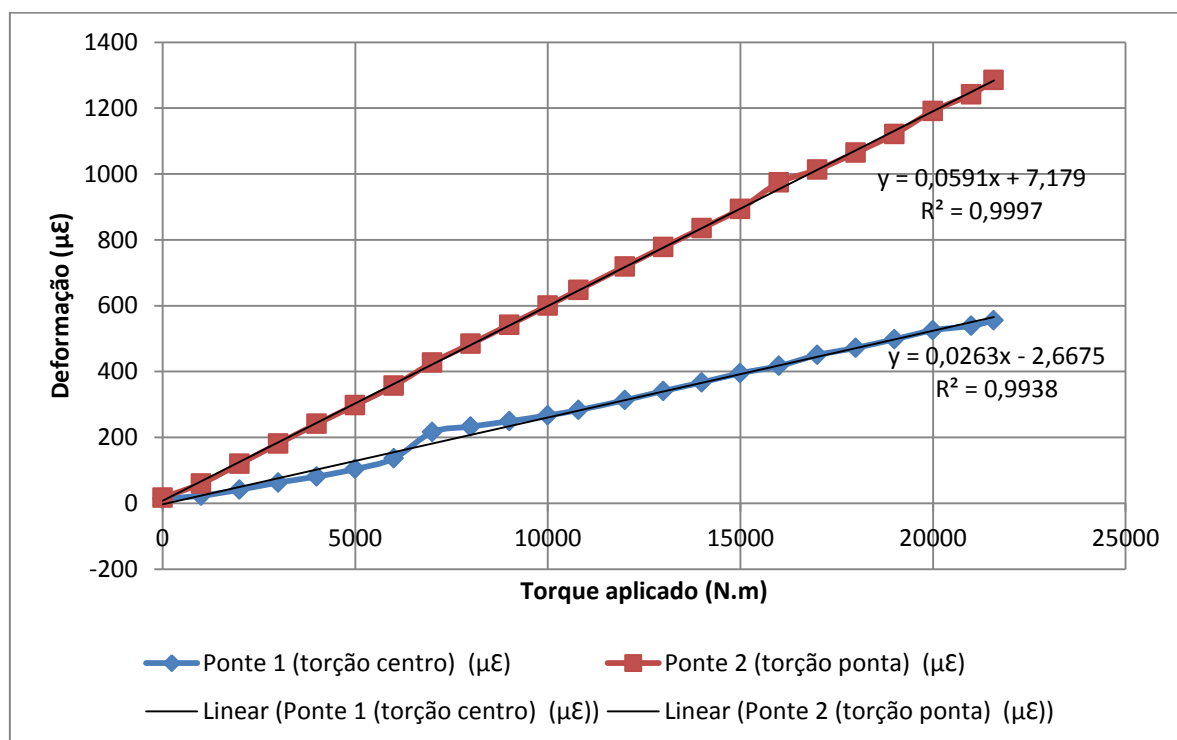


Figura 14- Torque em função das deformações

Utilizando as equações de interpolação da Figura 14, que mostram a variação do torque em função da deformação, foram calculados os valores de torque para as deformações indicadas nas Figuras 12 e 13. Os resultados são indicados na Tabela 2 e os gráficos correspondentes na Figura 15.

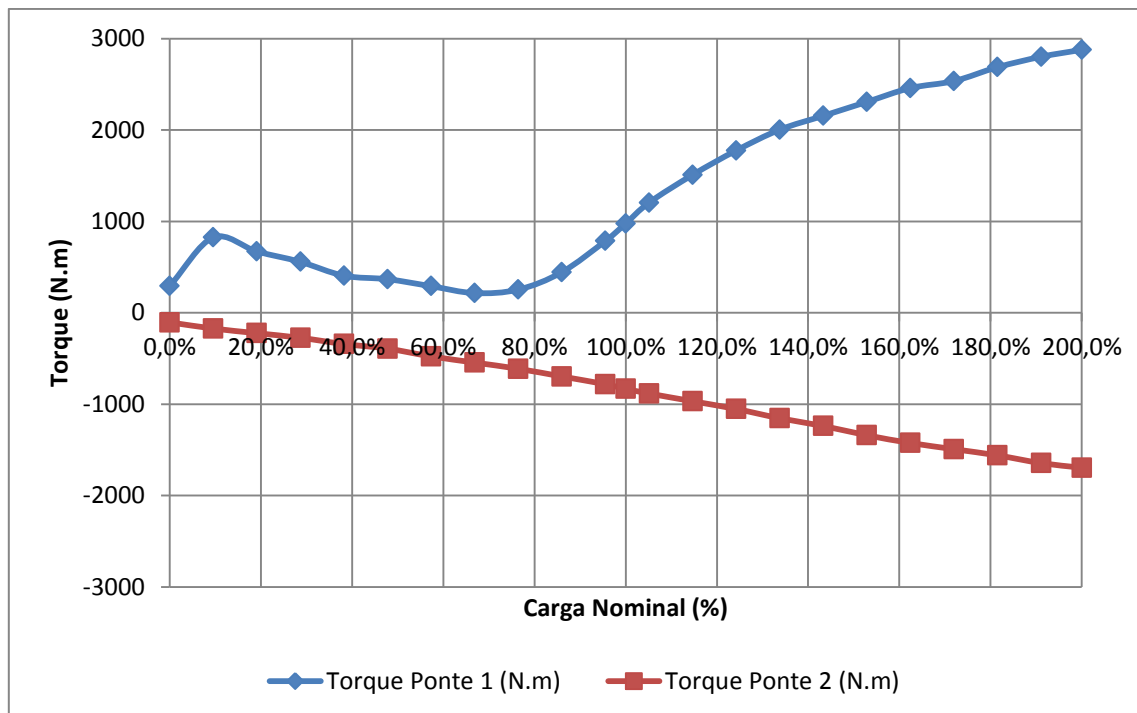


Figura 15- Torque em função da carga nominal para a nova metodologia de ensaio

6. DISCUSSÕES

Como a força máxima para o ensaio dinâmico, conforme a Norma NBR 10961, é duas vezes a carga nominal do eixo, todas as análises dos ensaios estáticos realizados foram feitas para esta condição.

Os gages 5, 6, 7 e 8 que formam a Ponte 1 e os gages 9, 10, 11 e 12 que formam a Ponte 2 foram utilizados para avaliar os esforços de torção, na montagem da nova metodologia.

No ensaio conforme a nova metodologia o eixo apresentou torção tanto no centro (Ponte 1) quanto na ponta (Ponte 2), desde o início da aplicação da força até 200% da força nominal, conforme Tabela 1. As buchas poliméricas montadas no ponto fixo dos braços da suspensão permitem liberdade para pequenos movimentos em todas as direções. No ensaio foi constatado um movimento da bucha de aço montada na ponta do eixo em relação ao rolete de apoio. Considerando a força de reação nesta ponta e o coeficiente de atrito entre os pontos (aço/aço) pode se concluir que o ensaio resultou na aplicação de torque na ponta do eixo. Com 200% da carga nominal foram calculados torques de 2877 N.m para a Ponte 1 (centro do eixo) e -1695 N.m para a Ponte 2 (ponta do eixo).

7. CONCLUSÕES

Conforme já havia sido indicado, a nova metodologia de ensaio proposta pelo IPT, apesar de simular as condições de operação de maneira mais adequada, introduz torque no eixo o que não ocorre na metodologia da Norma NBR 10961.

O torque é introduzido pelo apoio das pontas de eixo nos roletes em função do atrito de deslizamento. Como as cargas são elevadas, o valor da força de atrito não é desprezível.

O torque identificado na nova metodologia é indesejado e deve ser eliminado pelo projeto adequado dos apoios. O apoio deve permitir o giro do eixo em torno do seu centro e também

o giro do centro do eixo em torno do centro das buchas dos braços da suspensão. O IPT irá alterar a bancada de ensaio atual para eliminar o aparecimento do torque discutido neste trabalho.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da equipe técnica do Laboratório de Equipamentos Mecânicos e Estruturas – LEME do IPT, especialmente: Jorge Antonio de Lima, Cleiton Ernandes Alves da Silva, Leandro Duarte da Costa e Carlos Eduardo Lourenço na simulação e realização dos ensaios; Edson Hiroki Amano e José Trevelin na instrumentação dos eixos e aquisição de dados.

9. REFERÊNCIAS

- [1] ABNT NBR 10961, 2009, **Implementos Rodoviários – Caminhão, caminhão-trator, ônibus, reboque e semirreboque – Eixo veicular – Requisitos e métodos de ensaio**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil.
- [2] FIRAT, Mehmet. A computer simulation of four-point bending fatigue of a rear axle assembly. **Engineering Failure Analysis**, University of Sakarya, Dept. of Mech. Engineering, 54187 Adapazari, Turkey, v. 18, p. 2137-2148, 2011.
- [3] WANG, X.; XU, W.; HUANG, Y.; ZHONG, M.; FAN, H. Simulation of the vertical bending fatigue test of a five-link rear axle housing. **International Journal of Automotive Technology**, State Key Laboratory of Automotive Safety And Energy, Dept. of Automotive Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China, v. 13, No. 6, p. 923-932, 2012.
- [4] LEE, Yuejun E. Correlation and Simulation Process Improvement for Automotive Axle. **SAE Technical Paper (2007-01-1205)**, 2007.
- [5] DELA ANTONIO, Sergio F., LOPES, Luiz E. **Metodologia de ensaio de flexão vertical para avaliação de eixo veicular utilizado em suspensão pneumática de implementos rodoviários**, XXIII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva- SIMEA 2105