

ANÁLISE NUMÉRICA-ESTRUTURAL EM UM VEÍCULO DE TRANSPORTE DE PESSOAS

Numerical-structural analysis in a vehicle for transporting people

Pricila Vanuska Nierotka Miliari¹; Gilson Francisco Paz Soares²; Vagner Abramchuk³

¹ Graduada em Engenharia Mecânica pela Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões – URI Erechim. E-mail: pricila.miliari@gmail.com

² Doutor em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Professor e coordenador do curso de Engenharia Civil da Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões – URI Erechim. E-mail: gilsonfps@uricer.edu.br

³ Mestre em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Professor de Fenômenos de Transporte do curso de Engenharias Civil da Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões - URI Erechim. E-mail: vagnerabram@gmail.com

Data do recebimento: 08/04/2014 - Data do aceite: 29/05/2014

RESUMO: O presente trabalho analisa a estrutura de um modelo simplificado de parte da região do rodado traseiro de um ônibus urbano, onde após certo tempo de uso surgem defeitos na sua viga de sustentação. O estudo tem sua fundamentação teórica na área de Mecânica dos Sólidos, envolvendo análise numérica através do método dos elementos finitos e com o auxílio do software UGS NX 8.0. Primeiramente, foi construído um modelo simplificado da geometria em questão, com o intuito de obter informações sobre o comportamento da carroceria sob determinados carregamentos, enfocando a região onde há uma maior concentração de tensões. A investigação contempla as análises da deformação e da tensão máxima na estrutura quando aplicadas duas condições de contorno que visam simular movimentos reais, embora em uma análise estática. Os primeiros resultados obtidos alcançaram o esperado, pois as maiores concentrações de tensão foram encontradas na região que apresentou defeito. Após, foi analisada uma estrutura identificada como “alterada”, onde as maiores concentrações de tensão se deslocaram, acarretando um ponto crítico deslocado. A partir disso, foi desenvolvida uma proposta de melhoria, que apontou uma significativa redução de tensão nos locais críticos, mas sem o deslocamento desta tensão, se mostrando uma boa alternativa de melhoria estrutural.

Palavras-chave: Ônibus urbano. Mecânica dos Sólidos. Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT: This paper analyses the structure of a simplified model of the rear wheels of a city bus, where after some time of use some defects on its supporting beam appear. The theoretical background is based on the area of Solid Mechanics, involving numerical analysis using the Finite Element Method and with the support of the UGS NX 8.0 software. Firstly, a simplified model of the geometry in question was built, in order to obtain information about the behavior of the bus body under certain loads, focusing on the region where there is greater concentration of tensions. The investigation focuses on the analysis of the deformation and the maximum stress in the structure when applied two boundary conditions to simulate real movements, although in a static analysis. The first results reached the expected, because the higher stress concentrations were found in the defected areas. After that, an analysis of another structure named “changed” was performed, where the biggest concentrations of tensions have moved, resulting in a critical dislocated point. From this, a proposal of improvement was developed, which showed a significant reduction of tension in critical places, but without the displacement of this tension, being a good alternative of structural improvement.

Keywords: City bus. Solid Mechanics. Finite Element Method.

Introdução

Com o passar dos anos, surgem inovações tecnológicas em todos os ramos da área de tecnologia, sendo que um dos que mais se destaca é o de transporte veicular. A engenharia tem um papel fundamental nessas inovações, principalmente quando o foco de estudo é algum problema complexo em que se faz necessário, além de um profundo embasamento teórico, a utilização de ferramentas de engenharia para conseguir verificar como o objeto em estudo se comporta em face da ação de diferentes agentes externos, possibilitando prever falhas e/ou fazer melhorias nas estruturas.

Dentro do ramo automobilístico, encontra-se a linha de veículos pesados de transporte de passageiros, os ônibus. Quando uma estrutura de ônibus é fabricada, a mesma é submetida a vários testes, pois existem normas de homologação que devem ser atendidas antes da sua liberação para o mercado.

Neste âmbito, destaca-se a simulação numérica como uma importante ferramenta de auxílio para o desenvolvimento de projetos e também na competitividade industrial. Vários trabalhos têm sido desenvolvidos, mostrando a eficácia desta ferramenta na elaboração de projetos estruturais.

Walber (2010) desenvolveu uma metodologia de análise dinâmica em um modelo numérico de carroceria de ônibus, considerando poltronas e chassi. O modelo numérico foi submetido a medições experimentais, permitindo visualizar os efeitos vibratórios na estrutura da poltrona, propondo uma mudança de projeto a fim de minimizar tais efeitos.

Gauchia (2010) apresentou um novo modelo matemático para avaliação do comportamento de um chassi de ônibus urbano quando submetido a esforços de torção. Os resultados encontrados foram comparados com os obtidos, utilizando o método de elementos finitos, revelando que o modelo proposto é um método alternativo válido para avaliação da torção em um ônibus urbano.

Meira Junior (2010) realizou uma simulação numérica com elementos finitos de casca em uma carroceria de ônibus modelo rodoviário, visando avaliar a segurança da estrutura da mesma sob ação de impacto frontal e prover essa estrutura da capacidade de absorver toda a energia produzida por este impacto.

Machado (2012) realizou uma análise estrutural de um modelo simplificado de parte da estrutura dianteira de uma carroceria de micro-ônibus modelo rodoviário que possuía cantos vivos, visando avaliar o comportamento estrutural da carroceria sob determinados carregamentos, enfocando a região onde a concentração de tensões ocorria, e propondo melhorias para reduzir os valores de tensão nestes locais.

Ciapparini (2012), através de procedimentos experimentais e análises numéricas, analisou o comportamento da estrutura de ônibus para diferentes aplicações, variando o carregamento e os perfis de pista na qual o ônibus trafega. Fornece informações para avaliar a fadiga de estruturas no domínio do tempo.

Métodos analíticos e aproximações grosseiras não são capazes de fornecer soluções que satisfaçam os requisitos de desempenho e de otimização dos materiais empregados. A maioria dos problemas encontrados normalmente não pode ser resolvida de forma analítica. Então, são utilizadas ferramentas que possibilitam a criação de modelos representativos das estruturas reais, onde podem ser inseridas condições do meio, obtendo resultados numéricos com uma maior precisão e rapidez.

Na área de análise estrutural, por exemplo, faz-se uso de métodos numéricos, entre eles, o Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF é um procedimento numérico para a análise de estruturas e meios contínuos, que

pode determinar, entre outros aspectos, o estado de tensão e deformação de diferentes geometrias sujeitas a ações exteriores.

Neste contexto, o problema a ser analisado neste trabalho são as travessas de sustentação na região do rodado traseiro de um ônibus, fabricado em uma determinada empresa da cidade de Erechim - RS que, após certo período, apresentavam defeitos, na forma de trincas, conforme mostra a Fig. 1.

Figura 1 - Detalhe do defeito na travessa de sustentação traseira



Frente ao problema, o objetivo do presente trabalho é analisar numericamente, através do MEF e com auxílio do *software* comercial UGS NX 8.0, a região que apresentou o defeito, no que diz respeito às tensões atuantes. Primeiramente serão aplicadas condições de contorno e comparadas as regiões de maior tensão com a região onde ocorrem os defeitos. Após, serão propostas alterações na geometria original, buscando reduzir as tensões atuantes nesta região crítica.

Metodologia

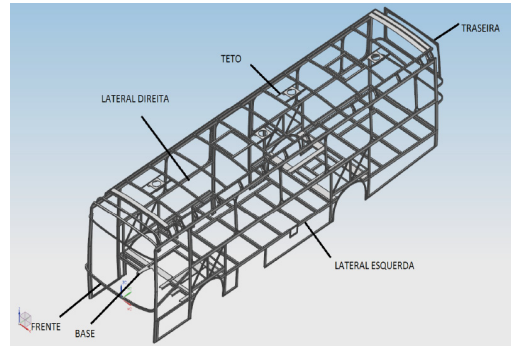
A metodologia utilizada para a investigação do problema proposto foi a análise numérica das tensões através do MEF, que representa um método clássico para análise

de problemas de engenharia. Neste método, as soluções dos problemas podem ser analisadas, subdividindo-se os sistemas em seus componentes individuais, ou em seus elementos, surgindo, assim, a ideia de que a partir do entendimento do comportamento de cada elemento é possível entender o comportamento do conjunto, por mais complexo que possa parecer (ALVES FILHO, 2000). O estudo tem sua fundamentação teórica na área de Mecânica dos Sólidos, envolvendo análise numérica através do método dos elementos finitos e com o auxílio do *software* UGS NX 8.0. Primeiramente, foi construído um modelo simplificado da geometria em questão, com o intuito de obter informações sobre o comportamento da carroceria sob determinados carregamentos, enfocando a região onde há uma maior concentração de tensões. A investigação contempla as análises da deformação e da tensão máxima na estrutura quando aplicadas duas condições de contorno que visam simular movimentos reais, embora em uma análise estática. Após, foi analisada uma estrutura identificada como “alterada”, onde as maiores concentrações de tensão se deslocaram, acarretando um ponto crítico deslocado. A partir disso, foi desenvolvida uma proposta de melhoria, buscando verificar o comportamento da estrutura.

Características físicas e geométricas da estrutura original

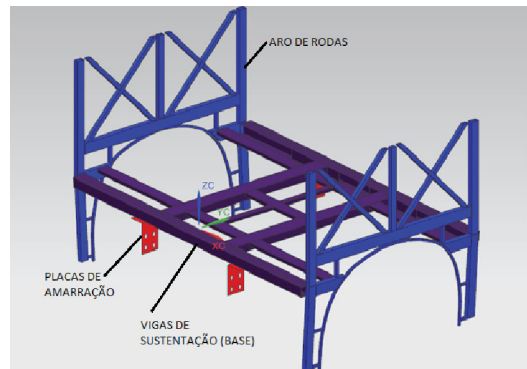
Devido a restrições computacionais, foi confeccionado um modelo simplificado da região da quebra. Entende-se que, se as condições de contorno forem representativas e bem postas, o modelo simplificado é suficiente para satisfazer essa condição. A estrutura com todos os componentes da carroceria modelados no *software* UGS NX 8.0 pode ser visualizada na Fig. 2.

Figura 2 - Estrutura veicular a ser estudada.



O local estudado, fonte do problema, é a traseira do ônibus na região das rodas. A Fig. 3 apresenta o modelo simplificado, contemplando as vigas de sustentação da base, os aros de rodas das laterais e as placas de amarração que fazem a ligação do chassi com o casulo.

Figura 3 - Detalhe da geometria a ser analisada – modelo simplificado.



Os componentes estruturais do modelo simplificado são construídos em aço carbono SAE 1020 e suas dimensões são variáveis. No presente trabalho, as espessuras variam de 1,55 mm a 8,0 mm e, além de tubos, há também vigas, perfis e chapas. As constantes físicas deste material estão apresentadas na Tab. I.

A maioria das ligações entre os elementos da estrutura, perfis, vigas, tubos e chapas é

feita por solda. Foi considerado que a soldagem segue o mesmo padrão para todos os elementos, isto é, o cordão de solda tem a mesma espessura e características em todas as ligações em que for necessário o uso da solda.

Tabela I - Constantes físicas do aço SAE 1020

Densidade	7850 kg/m ³
Módulo de Elasticidade	220 GPa
Módulo de Rigidez	84,6 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3

Modelamento da estrutura original

A discretização da geometria foi realizada através do *software* comercial UGS NX 8.0, com a utilização da interface *Advanced Simulation*. Como o foco foi analisar os pontos de maior concentração de tensão, a simulação consistiu em criar uma superfície média, que corresponde aos “elementos de casca” de todos os componentes da estrutura, ou seja, o *software* criou uma superfície média na metade da espessura de cada elemento, sem que estes perdessem as suas características.

As ligações soldadas seguem o mesmo padrão, com uma espessura de 3 mm, sendo a solda formada pelo elemento triangular linear (Fig. 4), constituído por três nós, pois a união entre uma peça e outra é variável, ou seja, este tipo de elemento apresenta a característica de representar contornos irregulares, que é o caso da solda, que deve ser contornada ao redor da ligação de uma peça com outra. Quando esta situação não ocorria, e não havia irregularidades na ligação das peças, assim como para os demais componentes da estrutura, o elemento utilizado foi o retangular linear, constituído por quatro nós (Fig. 5). Foi atribuído a este elemento o tamanho de 5

mm, escolhido através de outras simulações realizadas em carrocerias, que utilizaram este tamanho de elemento.

Figura 4 - Elemento triangular linear. (BELO, 2009).

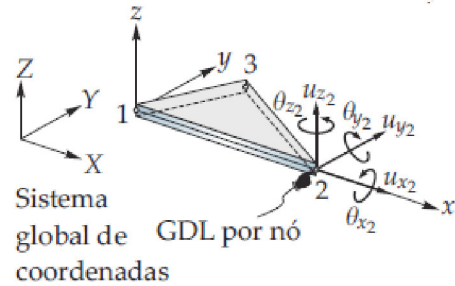
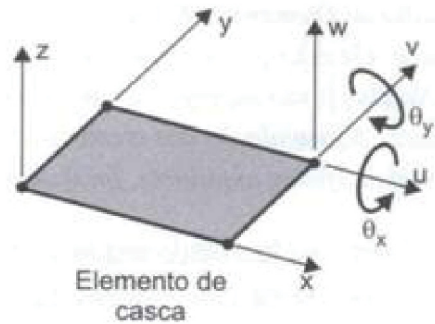


Figura 5 - Elemento retangular linear. (ALVES FILHO, 2000).

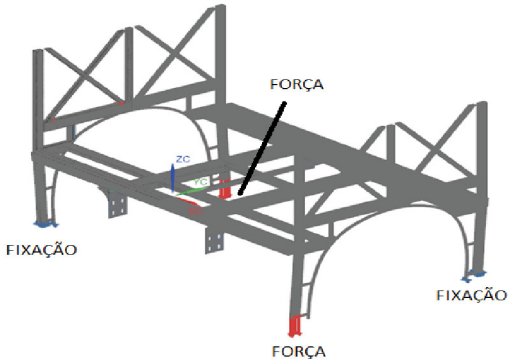


Portanto, para a análise do modelo simplificado, duas condições de contorno foram consideradas. A partir disto, pretendeu-se avaliar os pontos críticos da estrutura, ou seja, os locais onde ocorrem os maiores valores de tensão. A força aplicada foi de 20kN em todos os casos, determinada através de dados obtidos sobre a variação das forças que atuam sobre uma carroceria. Para todas as condições impostas, considerou-se que as placas de amarração permaneceram fixas, restringindo assim o movimento das mesmas. Salienta-se também que, para todas as simulações, foram empregadas análises estáticas.

A primeira condição de contorno aplicada foi de torção. Além das placas, foram fixadas

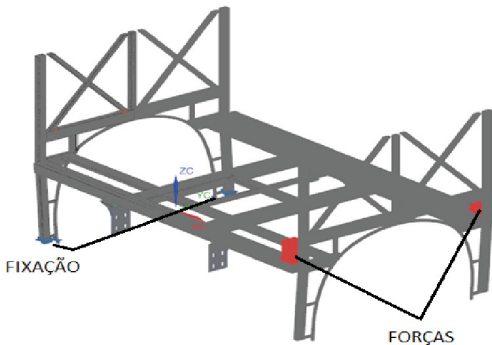
duas extremidades do aro de rodas e nas outras duas extremidades foram aplicadas forças para baixo, conforme a Fig. 6.

Figura 6 - Condição de contorno 1 - torção.



Na segunda condição de contorno (Fig. 7), a estrutura foi carregada para simular uma flexão com carga concentrada na extremidade da viga de sustentação. Esta condição simula curvas muito acentuadas, gerando um excesso de peso em apenas um lado da carroceria. A restrição do movimento se deu nas duas bases do aro de rodas direito e a força foi aplicada ao longo da viga de sustentação.

Figura 7 - Condições de contorno 2 – flexão com carga concentrada.



Simulação numérica da estrutura original

Após a simulação numérica realizada no modelo original, foi possível observar o comportamento deformado da estrutura, devido à aplicação da carga (Fig. 8).

Nas duas condições de contorno aplicadas, os maiores valores de tensão ocorreram na região entre a ligação da placa de amarração com a viga da base, ou seja, no exato local onde estava

ocorrendo a quebra, como se pode observar na Fig. 9.

Figura 8 - Torção da geometria na primeira condição de contorno.

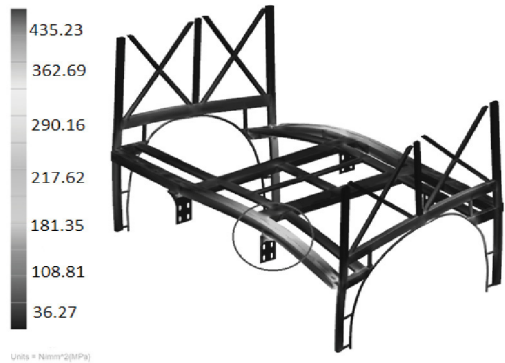
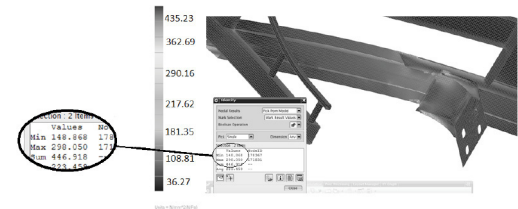


Figura 9 - Detalhe dos máximos e mínimos valores de tensões na região da quebra.



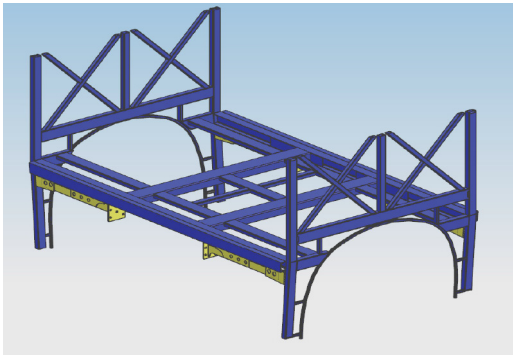
Nota-se que os valores mínimo e máximo encontrados na região que apresentou defeito foram de 148,86 MPa e 298,05 MPa.

Conforme a Fig. 9, o valor máximo é 50% mais elevado, se comparado com o limite de escoamento do aço, que gira em torno de 200 MPa, comprovando, assim, uma concentração maior de tensão nessa região, que poderia ser a causa da trinca do material.

Alteração na estrutura original - Geometria e simulação

Após encontrados os valores de tensão e comprovado o local do ponto crítico da estrutura original, a proposta seguinte foi de realizar uma melhoria nesta estrutura, buscando uma redução deste nível de tensão no local crítico. Realizada a alteração, o modelo praticamente se manteve igual, porém, ao invés de serem utilizadas as placas de amarração, foi utilizado um conjunto ligado na base, chassi e aro de rodas, chamado de “estabilizador”. Esta nova estrutura, que pode ser visualizada na Fig.10, foi denominada “estrutura alterada”.

Figura 10 - Estrutura alterada, com o uso de estabilizadores.



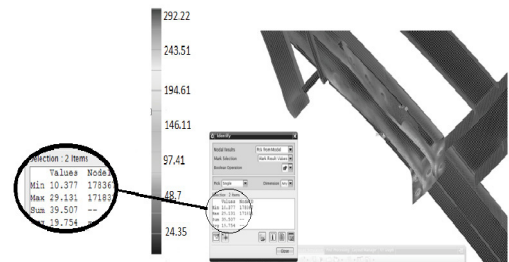
Para a simulação da estrutura alterada foram mantidas as mesmas cargas e condições de contorno da estrutura original, sendo desta forma possível a comparação entre as tensões nos dois casos. A seguir será apresen-

tada a configuração deformada da estrutura, conforme mostra a Fig. 11, e os valores de tensão encontrados, conforme mostra a Fig. 12, com a aplicação da primeira condição de contorno – torção – na estrutura alterada.

Figura 11 - Torção da geometria alterada na primeira condição de contorno - torção.



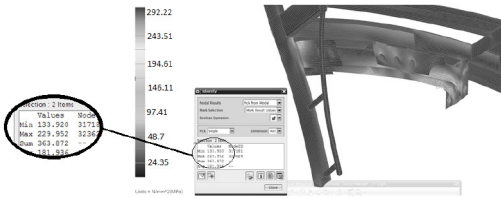
Figura 12 - Detalhe dos valores máximos de tensão na geometria alterada.



Para realizar uma comparação entre os comportamentos das estruturas original e alterada, foi analisado o mesmo local crítico da original. Na estrutura alterada, os valores de tensão reduziram consideravelmente para 10,37 MPa e 29,13 MPa respectivamente.

Porém, observou-se um deslocamento da região crítica, ou seja, outra região com elevado nível de tensão foi encontrada após a simulação da estrutura alterada. Constatou-se então, que o ponto crítico não foi solucionado, e sim deslocado, conforme a Fig. 13.

Figura 13 - Detalhe do valor máximo de tensão deslocado na geometria alterada.



Observa-se na Fig. 13 que os valores de tensão deslocados variam de 133,92 MPa até 229,95 MPa. Vale ressaltar que mesmo ocorrendo este deslocamento, o valor de tensão não ultrapassou o valor obtido na estrutura original, sendo assim, a estrutura alterada seria, em termos de redução de tensão, satisfatória. Contudo, no intuito de promover uma redução ainda maior no nível de tensão da estrutura, foi proposta uma melhoria no modelo alterado.

Implementação de melhorias na estrutura alterada

Visando a redução dos altos valores de tensão na região identificada anteriormente como deslocada, foram propostas algumas modificações geométricas na estrutura. A nova estrutura é composta por um conjunto de tubos, ligados na placa, na base e nas laterais conforme mostra a Fig. 14.

Para validar a comparação entre os valores de tensão entre todas as geometrias, foi também, neste caso, analisada a mesma região crítica dos outros modelos. Na sequência, será apresentada a configuração deformada na estrutura, conforme mostra a Fig. 15 e os valores de tensão encontrados, conforme mostra a Fig. 16, com a aplicação da primeira condição de contorno – torção – na geometria com a melhoria.

Figura 14 - Estrutura da proposta de melhoria, com o conjunto de tubos.

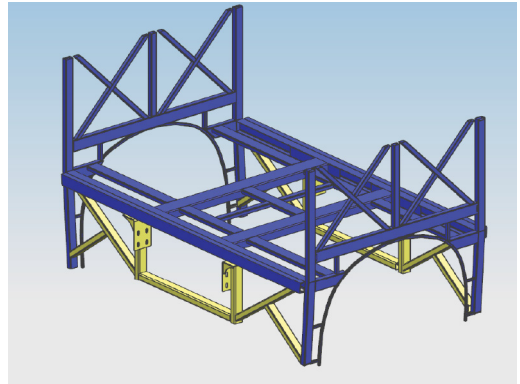
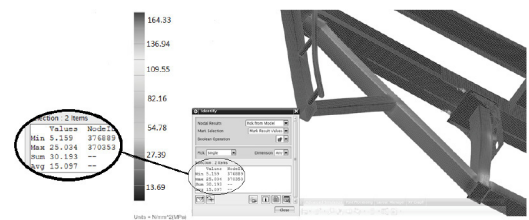


Figura 15 – Torção na melhoria proposta.



Figura 16 - Detalhe dos valores máximos de tensão na melhoria proposta.



Analisando a Fig. 16, para a geometria com a melhoria, os valores mínimo e máximo para a tensão foram, respectivamente, 5,159 MPa e 25,034 MPa. Nota-se que houve um grande decréscimo da tensão na região analisada, ou seja, o objetivo foi alcançado. Além disso, não houve o deslocamento do ponto crítico da estrutura, concluindo-se,

portanto, que a melhoria satisfaz as condições impostas e suporta os carregamentos com distribuição de tensões menores que as estruturas anteriores.

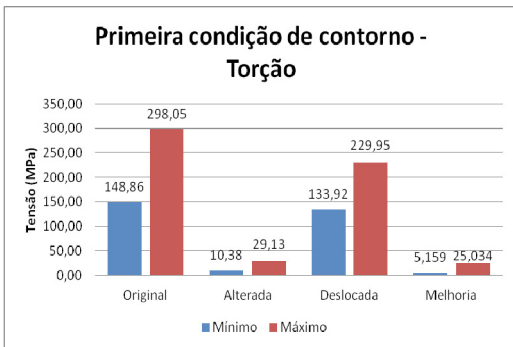
Análise comparativa dos resultados

Realizadas as simulações numéricas nos modelos apresentados, iniciou-se uma análise gráfica dos valores de tensão encontrados. A seguir serão apresentados estes valores correspondentes das regiões mencionadas para as duas condições de contorno. Para melhor entendimento dos gráficos, a legenda referencia as seguintes situações:

- Original: estrutura original.
- Alterada: estrutura alterada.
- Deslocada: estrutura alterada com o ponto crítico deslocado.
- Melhoria: melhoria proposta.

Iniciando-se as análises, é apresentada a Fig. 17, que mostra os valores de tensões para a primeira condição de contorno, torção.

Figura 17 - Comparação dos valores de tensão na primeira condição de contorno - torção.



Observa-se na Fig. 18, a redução relativa dos valores de tensão em relação à geometria original, tomada como referência, com valores unitários. Comparando os valores encontrados, pode-se concluir que na estrutura

alterada, os valores de tensão no local crítico tiveram uma redução de 93% e 90% na tensão mínima e máxima, respectivamente. Porém, o ponto crítico foi deslocado para outra região, apresentando, ainda assim, uma redução nas tensões, na ordem de 10% e 33%. Por fim, na proposta de melhoria, observou-se a eficácia do estudo, uma vez que as reduções de tensões foram de 97% e 92% em relação à estrutura original, sem novo deslocamento da região crítica.

Figura 18 - Evolução percentual dos valores de tensões - torção.

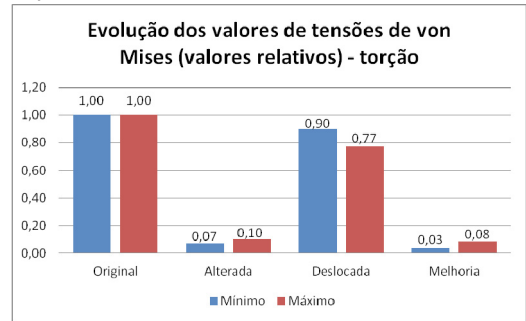
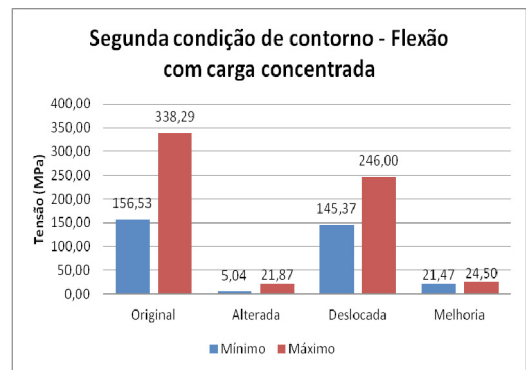


Figura 19 - Comparação dos valores de tensão na segunda condição de contorno - flexão.

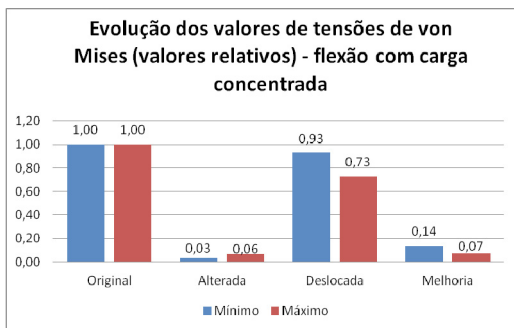


A Fig. 19 apresenta os valores de tensão encontrados para a segunda condição de contorno, flexão, e a Fig. 20, a redução relativa destes valores em relação à geometria original. Observa-se a evolução dos valores nas estruturas estudadas, destacando-se que a proposta de melhoria apresentou uma redu-

ção nos valores de tensão mínima e máxima, da ordem de 86% e 93%, respectivamente.

Fazendo uma comparação geral de todos os gráficos, percebe-se a mesma tendência. A estrutura original foi a que apresentou os maiores valores de tensão, enquanto que, na estrutura alterada, os valores diminuíram significativamente. Porém, o ponto crítico foi deslocado, gerando tensões maiores que no modelo alterado, embora não tão elevados quanto no original. Na proposta de melhoria observaram-se os melhores resultados, ou seja, as menores tensões mínimas e máximas da estrutura, sob as mesmas condições de contorno, analisadas na mesma região.

Figura 20 - Evolução percentual dos valores de tensões – flexão.



Um ponto importante a se destacar é a massa das conexões de cada modelo estudado. Na geometria original, a massa das quatro placas é equivalente a 11,68 kg, enquanto que, na geometria alterada, o “estabilizador” possui a massa de 51,84 kg, e na geometria com a melhoria, o valor correspondente aos tubos e as placas é de 51,62 kg. Portanto, além da proposta de melhoria atender ao objetivo de reduzir os esforços atuantes, acaba equivalendo-se em peso com a estrutura alterada, podendo, se confirmado com estudos mais detalhados, acerca de tipo de análise e condições de contorno, tornar-se uma boa alternativa técnica e econômica.

Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo analisar numericamente, através do método dos elementos finitos, parte da estrutura na região do rodado traseiro de uma carroceria de ônibus que apresentava problemas estruturais.

Após realizadas as simulações numéricas iniciais, foi notável que os maiores valores de tensão estavam concentrados justamente na região onde ocorreu a quebra, conforme comparação entre a foto mostrada na Fig. 1 e a simulação apresentada na Fig. 9. Tal observação valida o uso do software, pois se as condições de contorno aplicadas, a malha da estrutura, a ligação dos componentes e as composições dos materiais forem inseridos corretamente, a possibilidade da simulação representar a situação real, ao menos qualitativamente, é grande, mesmo esta sendo analisada estaticamente. Diante disso, foram realizadas as simulações numéricas referentes ao modelo denominado “alterado”, e também foi proposta uma melhoria estrutural. Como se pode observar, através das Figs. 17 a 20, foi perceptível a redução nos valores de tensão quando se compara o modelo original com os demais modelos propostos. Conclui-se que a investigação apresentada foi satisfatória e cumpriu com os objetivos propostos, que eram de estudar diferentes geometrias estruturais do problema, a fim de reduzir os valores de tensão encontrados.

Procedimentos futuros

Este trabalho foi executado de forma a analisar estruturalmente o problema de trincas quando utilizada a estrutura original. Não foram levados em conta fatores econômicos, de processos de produção e de facilidade em

montagem. Como procedimentos futuros, sugerem-se estudos referentes ao que foi citado, e também, de propostas de melhorias que possam ser mais viáveis do que a pro-

posta apresentada. Outro aspecto importante a ser sugerido, se refere à análise dinâmica dos modelos.

REFERÊNCIAS

- ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. São Paulo: Érica, 2000.
- BELO, I. M. **Desenvolvimento da formulação corrotacional em elementos finitos de casca para a análise hiperelástica**. 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Centro Tecnológico, UFSC, Florianópolis, 2009.
- CIAPPARINI, J. **Avaliação de fadiga de uma carroceria de ônibus submetida a diferentes perfis de pista**. 2012. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 2012.
- GAUCHIA, A. *et al.* A Simplified Model for Evaluation of Torsion on an Urban Bus. **Información Tecnológica**, Madri, Espanha, v. 17, n. 6, p. 21-26, 2006.
- MACHADO, V.; SOARES, G. F. P. Análise pelo método dos elementos finitos de um modelo simplificado de parte da estrutura dianteira de uma carroceria de micro-ônibus modelo rodoviário. In: CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA, 18., 2011, Erechim. **Anais...** Rio de Janeiro: ABCM, 2011.
- WALBER, M. Avaliação dos níveis de vibração existentes em passageiros de ônibus rodoviários intermunicipais, análises e modificações projetual. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, RS, v. 11, n. 15, p. 1-88, jan./jun. 2010.

