

UM ESTUDO DE REDUÇÃO DE TENSÕES EM UMA VIGA AUTOMOTIVA ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A study of reducing tension in an automotive beam through the finite element method

FORMENTON, A. B. K.

SOARES, G. F.P.

Recebimento: 11/05/2012 – Aceite: 24/07/2012

RESUMO: O presente trabalho analisa a integridade estrutural da base de um silo graneleiro de alumínio, utilizado no transporte de ração, onde, após determinado tempo de uso, surgem defeitos caracterizados por trincas na viga base. O estudo é fundamentado na área de Mecânica dos Sólidos, envolvendo análise numérica através do método dos elementos finitos e com auxílio do software ANSYS®. A investigação contempla uma análise na região onde estão concentradas as maiores tensões e apresenta, inicialmente, três propostas de alterações geométricas com o objetivo de reduzir as tensões nesta região: modificação na inclinação da longarina, redução no reforço da calha e extensão do reforço da calha até a dobra da longarina. Para reduzir ainda mais as tensões encontradas, na melhor alternativa proposta, realizou-se a inserção de furos circulares no reforço da calha. Após todas as mudanças realizadas, obteve-se uma redução de aproximadamente 27% nas tensões máximas, em relação à geometria original.

Palavras-chave: Integridade estrutural. Mecânica dos Sólidos. Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT: This paper analyzes the structural integrity of the base of an aluminum grain silo used to transport feed, where, after a certain time of use, defects characterized by cracks in the beam base arise. The study is based on the area of Solid Mechanics, involving numerical analysis through the finite element method and using the software ANSYS®. The investigation includes an analysis in the region where the greatest tensions are concentrated and initially presents three geometric change proposals in order to reduce tensions in the region: changing in the inclination of the stringer, reducing the enhancement of gutter and extending the enhancement of gutter up to the

crease of the stringer. In order to have better reduction in the tensions found, in the best alternative proposed, the inclusion of the insertion of circular holes in the enhancement of gutter was performed. After all the changes made, a reduction of a reduction of approximately 27% in the maximum tensions in relation to the original geometry was achieved.

Keywords: Structural integrity. Solid Mechanics. Finite Element Method.

Introdução

Vários são os trabalhos que usam ferramentas analíticas, experimentais e numéricas para investigação de problemas estruturais na indústria automotiva. Tais análises abrangem o campo linear e não linear, com abordagens estáticas e dinâmicas, que visam desde uma análise estática da distribuição de tensões em resposta a carregamentos externos, como casos mais complexos envolvendo fratura e fadiga.

Conle e Chu (1998) fornecem uma breve história da evolução de softwares de simulação de fadiga na indústria veicular, a partir da observação do comportamento de histerese de tensão-deformação.

Park et al. (2000) propuseram um método analítico baseado em análises modais por elementos finitos para transformação de cargas dinâmicas em conjuntos de carga estática equivalentes. Conjuntos de carga estática equivalentes são calculados para gerar um campo de deslocamento idêntico em uma estrutura, a partir de cargas dinâmicas, em um determinado momento. O processo é derivado matematicamente e avaliado. O método é verificado através de testes numéricos. Concluindo que o processo de otimização desenvolvido tem o mesmo efeito que a otimização dinâmica, a qual usa cargas dinâmicas diretamente.

Haiba et al. (2002) comparam várias abordagens para previsão de vida em fadiga, usando um estudo de caso real na engenharia

automotiva, levando em conta que a otimização baseada na vida em fadiga requer precisão de distribuição relativa ao invés de valores exatos. Concluindo que embora os dois, quase estático e abordagens de domínio de frequência, são potencialmente mais eficientes do que a análise dinâmica transiente, a sensibilidade de parâmetros das abordagens de domínios de frequência podem impedir o seu uso eventual.

Singh e Zheng (2003) realizaram um procedimento para a análise linear de elementos finitos de uma viga prismática tendo as propriedades do material aleatórias. Para analisar essas estruturas, a matriz de rigidez foi dividida em duas partes. A primeira parte foi determinista e a segunda parte contém momentos espectrais da força espectral da função densidade da variável aleatória, além das propriedades geométricas e materiais da viga. A solução foi obtida utilizando expansão por série de Taylor. Um procedimento numérico para incluir a compatibilidade também foi descrito em detalhe. Os resultados numéricos envolvendo a variabilidade da resposta de vigas sob diferentes cargas deterministas e condições de contorno foram obtidos, concordando assim com os dados.

Lirio (2004) propõe uma metodologia híbrida experimental-numérica para a análise estrutural de chassis de veículos comerciais. A característica híbrida do método proposto se dá pela utilização de ensaios experimentais para calibrar e validar modelos numéricos. O diferencial em relação a outros trabalhos está na realização dos ensaios experimentais apenas nos pontos de maior incerteza do chassis.

A metodologia foi aplicada a um veículo comercial, que possui 8500 kg de massa bruta total. O método dos elementos finitos (MEF) foi utilizado para resolver o modelo numérico do veículo, o qual foi construído em elementos de viga. Foram utilizados elementos de viga com sete graus de liberdade; três deslocamentos, três rotações e o empenamento (*warping*). Os resultados numéricos foram comparados com medições experimentais das deformações no chassi com o veículo em condições críticas de uso. A comparação foi feita a partir de espectros de densidade de potência das deformações experimentais e das calculadas numericamente. Concluindo que os espectros experimentais e numéricos obtidos foram semelhantes em amplitude, porém diferentes na forma.

Wang et. al (2006) realizaram estudos experimentais e numéricos para investigar o comportamento de carregamento quase estático em conexões de solda em uma liga de alumínio. Os componentes foram projetados de modo que a fratura deva ocorrer na zona afetada pelo calor, que foi também o caso dos experimentos. No estudo numérico, os componentes foram modelados em LS-DYNA utilizando elementos de casca. Os dados de força e endurecimento para a zona afetada pelo calor, material de solda e de base foram obtidos a partir de dados experimentais existentes na literatura. As constantes para o critério de escoamento plástico foram identificadas a partir de ensaios uniaxiais de tração por vários métodos, e o conjunto de constantes que melhor representa as medidas foi adotado na análise numérica. Estimativas razoáveis sobre a ductilidade foram obtidas pelas simulações quando uma malha refinada foi usada.

Wannenburg et al. (2009) apresentam uma metodologia de carga estática equivalente para fadiga, para a avaliação numérica da durabilidade de estruturas de veículos pesados. A aplicação do método é demonstrada

através de dois estudos de caso, um caminhão tanque e um dumper transportador de carga. Os dois obtiveram resultados bons para previsão da fadiga.

Um dos recursos que pode ser utilizado para auxiliar na resolução de problemas de forma aproximada é o software comercial ANSYS®. O mesmo pode ser destinado à solução de problemas mecânicos, como análise de estruturas dinâmicas e estáticas, análise de transferência de calor e fluidodinâmica, análise de problemas acústicos e também de eletromagnetismo.

Análises estruturais podem ser realizadas no ANSYS Mechanical, o qual possui capacidade de análise por elementos finitos, abrangendo desde uma simples análise estática linear até uma análise não linear dinâmica complexa. O processo para uma típica análise no ANSYS® envolve a construção do modelo, a aplicação de forças e condições de contorno, a definição da malha e das propriedades mecânicas do material, a obtenção das respostas e a análise dos resultados obtidos.

Um problema típico de análise de tensões e falha estrutural em veículos automotivos, como o caso objeto desse trabalho, encontra na solução numérica uma forma eficaz de investigação. Por outro lado, pode ser também eficiente na prevenção de futuros problemas, visto que é uma ferramenta que serve de suporte ao projeto, fornecendo informações cruciais a respeito do comportamento de determinada peça ou estrutura frente às solicitações a que estas serão submetidas.

Neste contexto, o problema a ser analisado neste trabalho diz respeito aos silos graneleiros de alumínio, utilizados no transporte de ração que, após determinado período de utilização, começam a apresentar defeitos em sua base. Tais defeitos ocorrem na viga base, na junção do reforço da calha com a longarina, região que será detalhada mais adiante.

Assim, o objetivo geral do presente trabalho é analisar numericamente, através do

MEF e com auxílio do software comercial ANSYS®, a distribuição e os valores de tensões atuantes na região crítica da viga base, onde estão ocorrendo os defeitos. Após, serão propostas modificações na geometria de alguns componentes que interferem diretamente nas tensões desta região. Para tanto, os seguintes objetivos específicos deverão ser atingidos:

a) Confeccionar um modelo em elementos finitos, por meio do software comercial ANSYS®, com as simplificações necessárias, a fim de que se possa simular o estado de tensões a que a estrutura está sujeita, em virtude dos esforços solicitantes;

b) Propor alterações na geometria dos componentes envolvidos, buscando reduzir as tensões atuantes na região crítica.

Metodologia

O presente trabalho está fundamentado teoricamente à luz de conceitos de Análise Estrutural. Segundo Popov (1978), o comportamento de um membro, ou elemento, submetido a forças depende das leis fundamentais da mecânica newtoniana, que governa o equilíbrio das forças e, também, das características mecânicas dos materiais de fabricação dos elementos.

Portanto, para se aplicar uma análise numérica, algumas definições da estática e resistência dos materiais são necessárias, como pré-requisito. Entre elas, destacam-se conceitos acerca de: tensão, deformação, Lei de Hooke e concentração de tensão.

A metodologia utilizada para a investigação do problema proposto foi a análise numérica das tensões através do Método dos Elementos Finitos, 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).

Características físicas e geométricas da estrutura

A estrutura completa do silo, modelada no software CAD SolidWorks e fornecida pela empresa que produz o mesmo, está representada na Fig. 1.

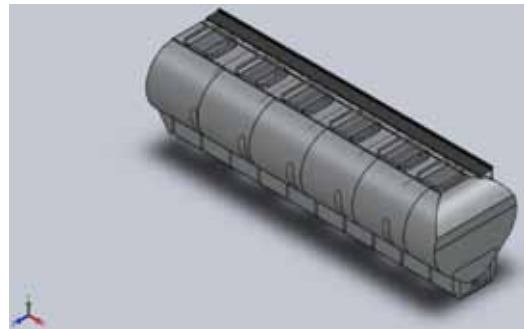


Figura 1 - Estrutura completa do silo graneleiro.

As dimensões totais aproximadas do silo graneleiro são: 2,5 m de altura, 2,4 m de largura e 8,4 m de comprimento. A base do silo, modelada no software CAD SolidWorks, está representada na Fig. 2.

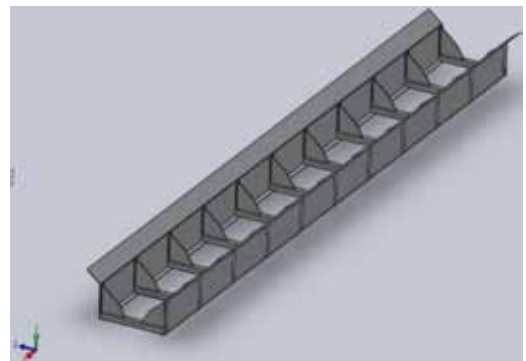


Figura 2 - Estrutura base do silo graneleiro.

A Fig. 3 mostra a vista frontal da seção da base do silo.

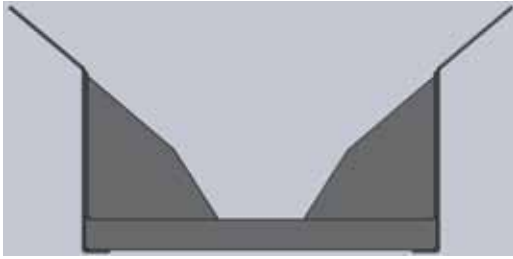


Figura 3 - Vista frontal da seção da base do silo.

A base do silo graneleiro é constituída da longarina, (segmento onde ocorrem os defeitos), os reforços da calha e as travessas da carreta, como pode ser observado na Fig. 4.

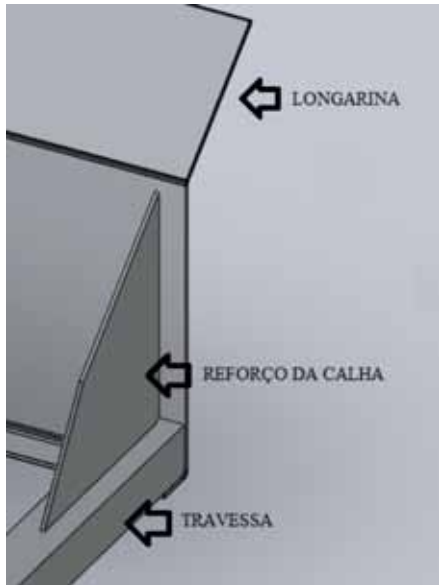


Figura 4 - Partes da base do silo.

O material da longarina e dos reforços da calha é alumínio, liga 5083-0, com espessura de 6,35 mm. As travessas da carreta são de alumínio, liga 6351-T6, com espessura de 7 mm. As constantes físicas do alumínio para todas as ligas, segundo Shigley (2005), são apresentadas na Tabela 1 a seguir.

O conjunto, silo graneleiro e caminhão, possui um peso total aproximado de 23 to-

neladas, sendo que o silo pesa cerca de 2,5 toneladas, a carga cerca de 13,5 toneladas e o caminhão cerca de 7 toneladas.

Tabela 1 - Constantes físicas do alumínio.

Módulo de elasticidade	71,7 GPa
Módulo de rigidez	26,9 GPa
Coefficiente de Poisson	0,333

Modelagem da estrutura original

A primeira análise da base do silo, realizada em 3D no software ANSYS, foi confeccionada com um modelo representando um vão da base, contendo cinco travessas, sendo este modelo analisado como um volume único e com geometria real (a não ser pelo comprimento), como mostra a Fig. 5.

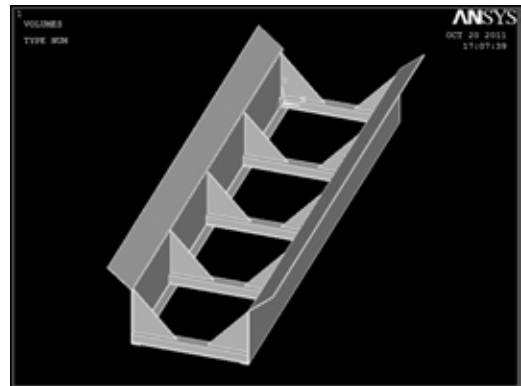


Figura 5 - Geometria de um vão da base contendo cinco travessas.

A simulação realizada no modelo de cinco travessas mostrou que a maior concentração de tensão ocorre na travessa do meio do vão, como mostra a Fig. 6. Com base nestes dados e ainda por motivos de restrições computacionais impostas, a geometria contendo cinco travessas foi reduzida a uma geometria de três travessas. Esta geometria reduzida foi utilizada em todas as simulações, ou seja, em todas as modificações realizadas na tentativa

de reduzir as tensões, já que também nesta, a maior concentração de tensão ocorreu na travessa central.

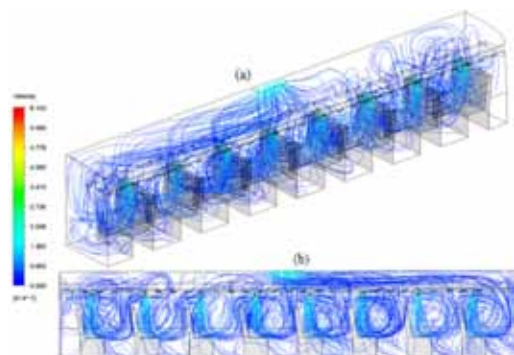


Figura 6 - Geometria de um vão da base contendo cinco travessas.

Para confecção da malha do elemento finito, utilizou-se o elemento SOLID187 para gerar esta e as demais simulações presentes neste trabalho. O SOLID187 é utilizado em modelagens 3D de estruturas sólidas, sendo definido por dez nós com três graus de liberdade em cada nó (x, y e z). O SOLID187 tem um comportamento de deslocamento quadrático e é adequado para modelagem de malhas irregulares (como os produzidos a partir de vários sistemas CAD / CAM). A geometria, a localização dos nós e o sistema de coordenada, para este elemento são mostradas na Fig. 7.

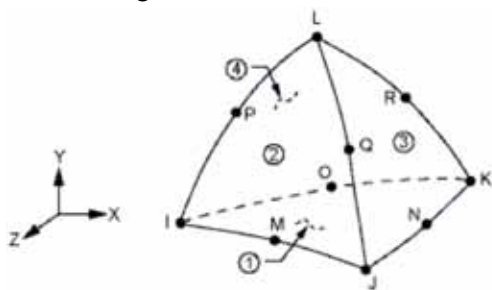


Figura 7 - Geometria, a localização dos nós e o sistema de coordenadas para o elemento SOLID187 (ANSYS, 2010).

O carregamento aplicado foi uma carga estática de compressão uniformemente distribuída na parte superior da longarina, simulando

do a carga do grão transportado, mais o peso do próprio silo, e como restrição a longarina foi engastada em suas extremidades. A Fig. 8 mostra o carregamento e as restrições de movimento.

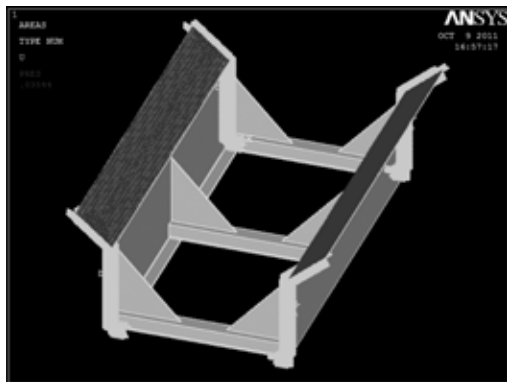


Figura 8 - Aplicação de cargas e restrições no modelo.

A carga estática de compressão simula o peso da ração, distribuído ao longo de toda a longarina, sendo o valor de $0,03544 \text{ N/mm}^2$ ou 35440 Pa (Pascal) em cada longarina. Essa é a pressão do comprimento total da longarina, 8400 mm , sendo a mesma pressão aplicada no vão simulado que possui um comprimento de $1741,744 \text{ mm}$.

O engastamento nas extremidades da longarina simula a continuação da carroceria para ambos os lados.

Simulação numérica da estrutura original

Após a simulação numérica realizada no modelo original, os elementos que apresentaram os maiores valores de tensões estão localizados na região da junção entre o reforço da calha e a longarina, como se pode observar na Fig. 9.

Observa-se que a tensão máxima de Von Mises encontrada foi de $632,157 \text{ MPa}$ e a deformação máxima na aba da longarina, na direção y , foi de $32,0761 \text{ mm}$, como indicam os parâmetros SMX e DMX, respectivamente.

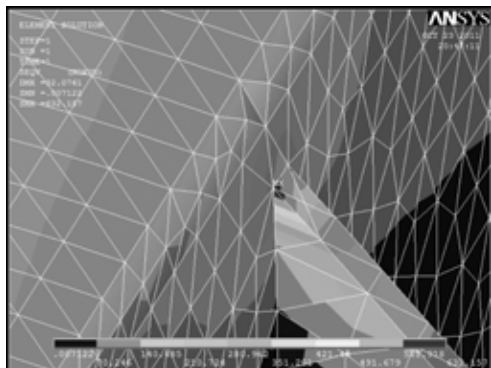


Figura 9 - Elementos com maior concentração de tensões na estrutura original.

Implementação de melhorias na estrutura original

Com o objetivo de reduzir os valores de tensão na região crítica, já localizada, foram propostas algumas modificações geométricas na estrutura, a saber: modificação na inclinação da longarina, redução no reforço da calha, e extensão do reforço da calha até a dobra da longarina. As estruturas modificadas foram simuladas e os resultados são apresentados e discutidos na sequência.

A primeira modificação realizada na geometria da estrutura foi na inclinação da longarina, onde o grau de inclinação passou de 130° para 140°, como pode ser observado na Fig. 10.

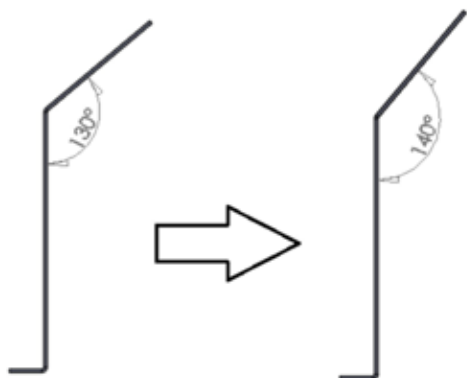


Figura 10 - Alteração na inclinação da longarina, de 130° para 140°.

Após, reduziu-se a área do reforço da calha, como pode ser observado na Fig. 11.

Na terceira modificação realizada, o reforço da calha aumentou, pois um de seus lados foi prolongado até a dobra da longarina, como pode ser observado na Fig. 12.

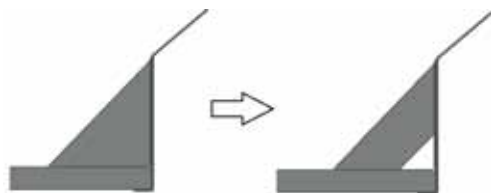


Figura 11 - Alteração da geometria do reforço da calha, com redução de área.

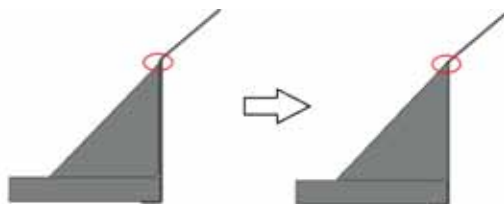


Figura 12 - Alteração da geometria na extensão do reforço da calha até a dobra da longarina.

Analisando e comparando as três alternativas de mudanças na estrutura original propostas anteriormente pode-se observar que aquela que melhor respondeu ao objetivo de redução de tensão na região de alta concentração, até o momento, foi a extensão do reforço da calha até a dobra da longarina, com redução de aproximadamente 10%. Isso pode ser melhor observado na Fig. 13, que apresenta a comparação dos resultados dessas mudanças geométricas, em termos dos valores de tensão máxima.



Figura 13 - Tensões máximas da estrutura original e dos modelos com alterações geométricas.

Implementação de furos na geometria com extensão do reforço da calha até a dobra da longarina

Com o objetivo de reduzir ainda mais as tensões encontradas na melhor alternativa apresentada até o momento, a com extensão do reforço da calha até a dobra da longarina, propôs-se realizar a inserção de furos circulares no reforço da calha, próximo à região crítica. Primeiramente foi introduzido na região um furo de 24 mm de diâmetro. Após foram colocados três furos de diâmetro de 10 mm cada. A Fig. 14 mostra estas disposições.

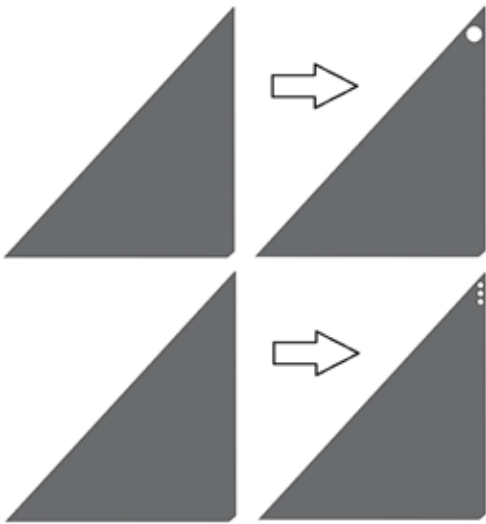


Figura 14 - Inserção de furos circulares na geometria com extensão do reforço da calha até a dobra da longarina.

Com a colocação de um furo na junção do reforço da calha com a dobra da longarina, região onde havia maior concentração de tensões, na geometria sem os furos, as tensões reduziram, ficando em torno de 550 MPa. Comparando este valor com a tensão máxima da geometria sem os furos, que é 571,297 MPa, percebe-se que houve uma pequena redução, em torno de 3,7%.

Já no caso da inserção de três furos, a tensão máxima reduziu para aproximadamente 460 MPa, o que representa uma redução de aproximadamente 19,5%.

Resultados e discussões

Analisando e comparando os dois tipos de inserção de furos, pode-se observar que aquele que melhor respondeu ao objetivo de reduzir ainda mais a tensão na região de alta concentração, foi a inserção de três furos de 10 mm, com redução de aproximadamente 19,5%, se comparando com a extensão do reforço da calha até a longarina, isto é, de 571,297 MPa para aproximadamente 460 MPa. Se a comparação for estabelecida com a geometria original, cuja tensão máxima era de 632,157 MPa, a redução chega ao percentual significativo de aproximadamente 27%. A Fig. 15 apresenta a comparação dos resultados obtidos para a geometria original e para todas as mudanças geométricas implementadas. Pode-se perceber a evolução predominantemente decrescente dos valores de tensão.

A Fig. 16 apresenta os valores normalizados em relação à geometria original. Pode-se observar a evolução percentual de redução dos valores de tensão a cada alteração proposta. Percebe-se que a alteração da inclinação da longarina gerou um aumento de 15% na tensão máxima da região crítica em relação à geometria original, ao passo que reduzindo a área do reforço da calha, não houve alteração. Já a implementação da extensão do reforço da calha até a dobra da longarina foi a melhoria que originou resultado mais satisfatório, reduzindo a tensão em 10%. Na sequência, a inserção de um furo nesta geometria proporcionou um ganho de mais 3% de redução. No final, o índice 0,73, obtido com a introdução de três furos na geometria

com extensão do reforço da calha até a dobra da longarina, mostra a já relatada redução de 27% nas tensões em relação à estrutura original, esta identificada com o índice 1,00.



Figura 15 - Tensões máximas das regiões críticas em todos os modelos, mostrando a redução de tensões.



Figura 16 - Evolução dos valores de tensão de Von Mises (S) nos modelos implementados, onde S₀ é a tensão no modelo original e S_i a tensão nos modelos propostos seguintes.

Conclusões

Com o presente trabalho pode-se observar que, com a modificação da geometria da estrutura, através da extensão do reforço da calha até a dobra da longarina, houve uma considerável redução das tensões na região crítica objeto deste estudo. Da mesma forma, a abertura de furos nos reforços da calha

ocasionaram uma melhor distribuições de tensões, auxiliando ainda mais na redução destes valores. Como resultado final, as alterações geométricas da estrutura ocasionaram uma redução de aproximadamente 27% no valor das tensões máximas, em relação à geometria original.

Cabe salientar que, como de propósito, as análises numéricas realizadas neste trabalho não utilizaram algumas variáveis importantes como as tensões residuais das dobras e as tensões residuais da solda. Além do mais, alguns dos elementos utilizados podem não possuir o tamanho adequado, devido a limitações computacionais.

Por fim, conclui-se que o presente trabalho cumpriu com seus objetivos que eram de analisar numericamente, através do método dos elementos finitos e com auxílio do software comercial ANSYS®, a forma de distribuição e os valores de tensões atuantes na região crítica da viga base do silo graneleiro, onde estão ocorrendo os defeitos, e propor modificações geométricas para redução das tensões máximas atuantes.

Procedimentos futuros

Como continuação do presente trabalho, sugere-se uma análise com a utilização de elementos de casca, pois certamente isto tornaria o modelo mais leve, reduzindo o esforço computacional e possibilitando a obtenção de melhores resultados. Outras implementações não realizadas no presente trabalho e necessárias, no caso de uma aplicação prática resultante deste estudo, seriam a análise dinâmica e a aplicação de esforço de torção. Da mesma forma, um processo de otimização topológica para determinar a posição ótima dos furos no reforço da calha poderia ser implementado.

AUTORES

Ana Bárbara Krummenauer Formenton – Engenheira Mecânica pela Universidade Regional do Alto Uruguai e das Missões – URI – Campus de Erechim. Mestranda em Engenharia Mecânica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PROMEC-UFRGS). E-mail: anabkf@hotmail.com

Gilson Francisco Paz Soares – 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 – Campus de Erechim. E-mail: gilsonfpa@uricer.edu.br

REFERÊNCIAS

ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. São Paulo: Érica, 2000.

ANSYS, Inc. **Release 13.0**. 2010.

CONLE, F. A.; CHU C. C. **Fatigue analysis and the local stress-strain approach in complex vehicular structures**. Elsevier, 1998.

HAIBA, M. et al. **Review of life assessment techniques applied to dynamically loaded automotive components**. Elsevier, 2002.

LIRIO, G. R. **Metodologia híbrida experimental-numérica de análise do comportamento estrutural de chassis de veículos comerciais**. Florianópolis: UFSC, 2004.

PARK, G. J.; KANG B. S.; CHOI, W. S. **Structural optimization under equivalent static loads transformed from dynamic loads based on displacement**. Elsevier, 2000.

POPOV, E. P. **Introdução à mecânica dos sólidos**. São Paulo: Blucher, 1978.

SHIGLEY, J. E. **Projeto de Engenharia Mecânica**. Porto Alegre: Bookman, 2005.

SINGH, A. V.; ZHENG, Y. **On finite element analysis of beams with random material properties**. Elsevier, 2003.

WANG, T. et al. **Evaluation of a finite element modeling approach for welded aluminum structures**. Elsevier, 2006.

WANNENBURG, J.; HEYNS, P. S.; RAATH, A. D. **Application of a fatigue equivalent static load methodology for the numerical durability assessment of heavy vehicle structures**. Elsevier, 2009.