

AVALIAÇÃO DE VIDA RESIDUAL DE FADIGA DO GARFO DE ENGATE AUTOMÁTICO

Anderson Pontalti^{*}, Walter J. Paucar Casas[†]

^{*} Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica
Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
Rua Sarmiento Leite, 425 – sala 314, Porto Alegre – RS, CEP 90050-170, Brasil
e-mail: anderson.pontalti@terra.com.br, web page: <http://www.mecanica.ufrgs.br/promec>

[†] Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
Sarmiento Leite 425, CEP 90050-170, Porto Alegre - RS, Brasil
e-mail: walter.paucar.casas@ufrgs.br, <http://www.mecanica.ufrgs.br>

Palavras-chave: Garfo do Engate Automático, Fadiga, Elementos Finitos, Vida Residual.

Resumo. *A necessidade de desenvolver um produto capaz de atingir as exigências impostas pela referência normativa AS-2213 para o componente denominado Garfo do Engate Automático motivam este trabalho. Logo, esta pesquisa apresenta como objetivo principal o estudo de vida residual de fadiga de um garfo forjado pertencente a um dispositivo de acoplamento automático entre veículo trator e reboque. Para realização das análises estáticas através de elementos finitos, foi necessária a determinação de todas as condições de contorno que refletissem as características do teste experimental para homologação do produto. De posse destes resultados, realizou-se a análise pelo método S-N, tendo como resultado a determinação da vida em fadiga das regiões críticas do componente, onde são propostas algumas alternativas que visam aumentar a vida do produto. Dentre as inúmeras alternativas possíveis, destacam-se a alteração de material ou utilização de tratamento térmico no garfo com a finalidade de melhorar as propriedades mecânicas do material sem alterar a geometria do projeto.*

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho é parte do desenvolvimento de novos projetos de engates automáticos aplicados no acoplamento do veículo trator e reboque. Visando a aprovação do produto através de referência normativa australiana, dada a experiência daquele país nesses equipamentos, o presente desenvolvimento deve ser suportado pela norma AS-2213¹.

O engate automático tem como um de seus principais componentes o garfo forjado, tema deste trabalho, pois o mesmo atua sob as mais intensas solicitações cíclicas provenientes de acelerações e desacelerações durante a marcha do veículo e do reboque quando acoplados.

Mecanismos de acoplamento utilizados no transporte rodoviário são classificados através de um índice chamado de “Valor D”, que é função do Peso Bruto Total Combinado (PBTC). Para comercializar este produto no mercado internacional, se faz necessário obter a aprovação do produto, por exemplo, segundo testes especificados na norma AS-2213². As condições de carregamento utilizados nestes testes dependem diretamente do “Valor D”.

Para a aprovação, o componente necessita resistir a uma solicitação alternada totalmente reversível durante 2×10^6 ciclos sem que o produto perca sua função primária. Entretanto, sob condições de teste do engate para $D=220$ kN, o engate automático catalogado para $D=120$ kN apresentou ruptura total na perna superior do garfo forjado com aproximadamente $1,2 \times 10^6$ ciclos. A Figura 1 mostra o componente com indicação da seção danificada.

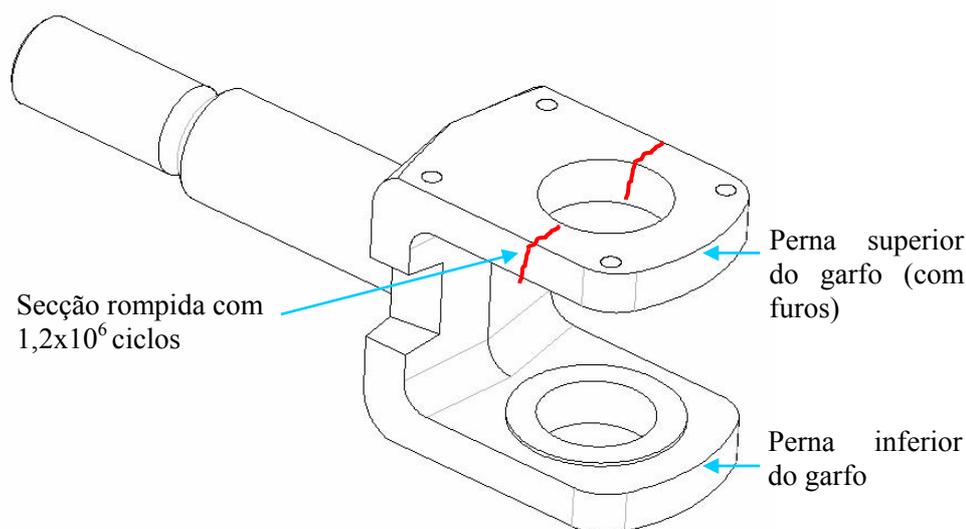


Figura 1: Região de falha do garfo forjado

A seção fraturada do garfo forjado em aço SAE 1045 apresentou sinais claros de falha por fadiga, logo através do uso de ferramentas computacionais como Pro/Engineer[®], MSC.Patran[®], MSC.Nastran[®] e especificamente através do MSC.Fatigue[®], busca-se identificar a possibilidade de aumentar a vida em fadiga do componente sem modificar a sua geometria.

Também se procura obter relações entre a falha ocorrida no teste experimental e os

resultados obtidos através das simulações computacionais, mesmo que apenas localmente na região da falha, visto que não existem informações concisas que comprovem que a peça, sobre as condições de teste especificadas, falhe sempre na mesma região e com o mesmo número de ciclos. Lembra-se que a análise é para o produto sob cargas relativas a um Valor D de 220 kN.

2 ENGATE AUTOMÁTICO

O engate automático usado em veículos comerciais é um dispositivo de acoplamento aplicado entre um veículo trator e um ou mais reboques através de um pino vertical e um olhal., o mesmo que trabalha sem a intervenção de uma pessoa para seu fechamento e travamento. O modelo de engate automático analisado é mostrado na Figura 2, classificado pela sua capacidade de carga dinâmica horizontal, $D=120\text{kN}$.

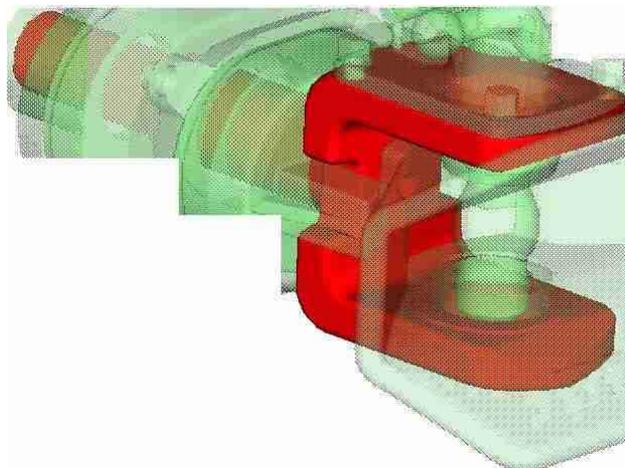


Figura 2: Engate automático

Observa-se em destaque, na Figura 2, o garfo forjado posicionado ao centro do produto, o qual é o principal elemento de ligação entre os demais componentes.

Para entender o “Valor D”, se faz necessário uma demonstração de cálculo para um conjugado qualquer, como por exemplo, o mostrado na Figura 3. O engate automático estudado não atua sobre carregamentos verticais, ou seja, o reboque no qual é acoplado ao produto possui um sistema articulado que evita a transferência de massa deste para o engate.

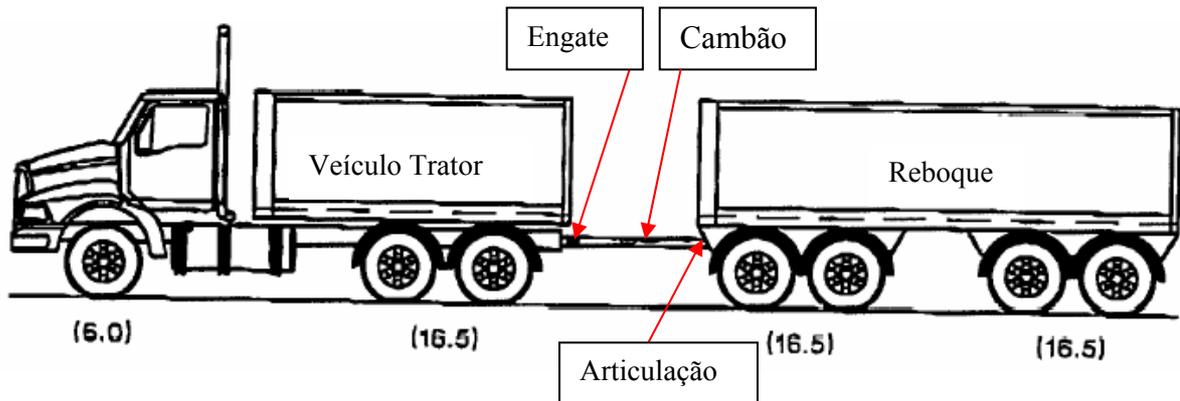


Figura 3: Conjugado entre veículo trator e reboque com cambão articulado¹

A formula para obter o “Valor D”, extraída da norma AS-2213¹, para conjugados conforme mostrado na Figura 3, é:

$$D = g \times \frac{T \times W}{T + W} \quad (1)$$

onde g é a aceleração da gravidade $9,81\text{m/s}^2$, T é a massa total do veículo trator em *ton* e W a massa total do(s) reboque(s) em *ton*. Assim:

$$D = 9,81 \times \frac{22,5 \times 33}{22,5 + 33} \cong 131\text{kN}$$

Subentende-se que o engate a ser especificado para esta aplicação deve possuir um engate com “Valor D” superior ao calculado.

O trabalho se desenvolve através da utilização de elementos finitos sólidos. No MSC.Patran[®] só foi possível utilizar dois tipos de elementos sólidos devido à complexidade geométrica do garfo, elementos sólidos tetraédricos de primeira ordem com quatro nós (TET4), e elementos sólidos tetraédricos de segunda ordem com dez nós (TET10). Entrekin³ comenta que as malhas construídas com elementos tetraédricos são freqüentemente utilizadas pois conseguem modelar quase qualquer sólido, independente da complexidade. Em geral, o tamanho das arestas destes elementos devem ser uma fração da menor característica do sólido para que se consiga uma precisão aceitável.

3 ANÁLISE EXPERIMENTAL DO GARFO E DETALHAMENTO DO ENGATE AUTOMÁTICO

Através do levantamento das propriedades mecânicas do garfo forjado do engate automático, do detalhamento das cargas e reações envolvidas no teste segundo secção 5 da norma AS-2213², esta secção visa subsidiar a análise por elementos finitos.

3.1 Ensaio de tração

Com facilidade encontram-se diferenças significativas nas propriedades mecânicas em componentes forjados. Estas variações podem ser de maior ou menor grau dependendo do grau de transformação da geometria bruta em uma geometria final durante o processo de fabricação. Para o levantamento das propriedades mecânicas se fazem necessárias alguns ensaios experimentais.

Com o objetivo de determinar estas diferenças das propriedades mecânicas que o garfo do engate automático possui, retiraram-se três corpos de prova conforme norma NBR 13284 (1995) de uma mesma amostra, porém em locais distintos da mesma, Figura 4. Os resultados das propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração podem ser vistos na Tabela 1.

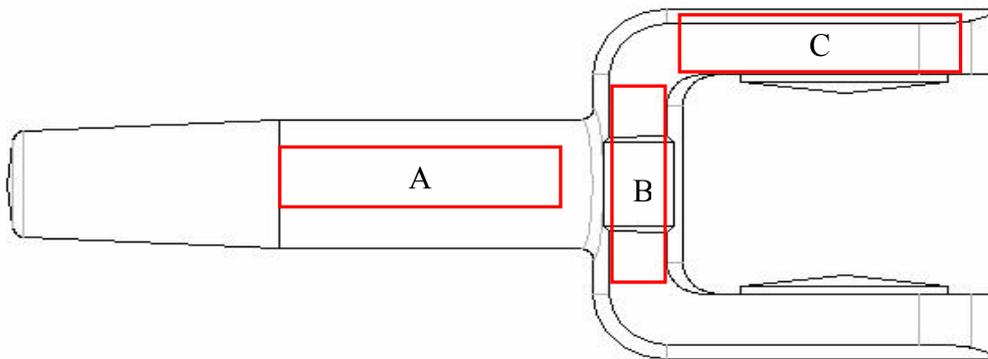


Figura 4: Regiões para extração dos corpos de prova de tração

Tabela 1. Resultados do ensaio de tração, material: aço forjado SAE 1045

Corpo de prova	Área da secção circular (mm ²)	Escoamento (MPa)	Resistência á tração (MPa)	Alongamento até ruptura		Estricção (%)
				%	lo	
A	110	341	660	19	60	31
B	113	352	671	23	60	41
C	50,1	381	694	25	40	47

Um segundo garfo foi submetido a ensaio de tração, com cargas aplicadas simulando a tração no sentido de marcha do veículo, com o objetivo de entender o comportamento do componente, principalmente quanto a sua deformação após escoamento do material. Submeteu-se a amostra a uma carga de 900kN. Observam-se deformações permanentes através da figura 5.



Figura 5: Deformação plástica do garfo após ensaio de tração

3.2 Discretização do produto segundo norma AS-2213-1984

A carga a que o Engate Automático deve ser submetido é descrita na sessão 5 da norma AS-2213-1984². A classificação do produto analisado é de $D=120\text{kN}$ e o objetivo é averiguar a possibilidade de sua utilização para $D=220\text{kN}$. A norma considera sistemas de acoplamento com e sem carga vertical atuando dependendo da aplicação, mas nesta aplicação a carga vertical é desprezada.

A carga horizontal F_h depende do “Valor D”, a qual neste caso é igual à carga de teste F_p .

$$F_h = 1,2 \times D \quad (2)$$

$$F_h = F_p = 1,2 \times 120.000 = 144.000\text{N} = 144\text{kN}$$

Se o interesse é utilizar o garfo para um valor $D=220\text{kN}$, a carga de teste resulta:

$$F_h = F_p = 1,2 \times 220.000 = 264.000\text{N} = 264\text{kN}$$

Conforme a norma, a carga F_p representa a faixa total do carregamento com sinal alternado exigido no teste, ou seja, a metade do valor será utilizado para comprimir o engate automático e a outra para tracionar o mesmo, sendo finalmente a amplitude da carga F para o “Valor D”:

$$F = \pm 0,5 \times F_p \quad (3)$$

$$F_{D220} = \pm 0,5 \times 264.000 = \pm 132.000\text{N} = \pm 132\text{kN}$$

Esta carga é simétrica às duas pernas do garfo forjado, o que implica em uma combinação força-momento em cada uma destas pernas.

Calculada a carga de teste, é preciso reproduzi-las sobre as duas pernas do garfo. Estas cargas são as entradas para a análise por elementos finitos. A primeira consideração é a representação do conjunto pino e buchas como sendo uma viga de maior rigidez apoiada em

cada uma das pernas do garfo do engate automático, como mostra a Figura 6.

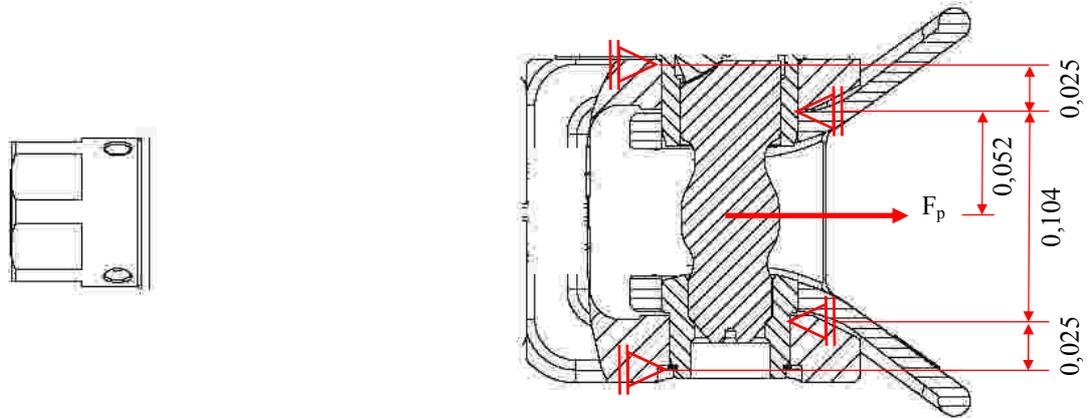


Figura 6: Vista lateral do engate automático, dimensões em m

As quatro reações ocorridas no garfo do engate são a resposta da estrutura do produto à carga simétrica de teste F_p . Estas reações do garfo são as cargas que servem de entrada para o cálculo por elementos finitos nos programas MSC.Patran® e MSC.Nastran®. Estas reações foram calculadas com o auxílio do programa *Ftool*, Figura 7, e os resultados são mostrados na Figura 8 para o “Valor D” igual a 220kN. Observa-se que, embora a aplicação da carga seja simétrica, as reações do lado direito diferem das do lado esquerdo, o qual se deve a diferença de secção da viga, gerada pelo pino e buchas, ao longo de seu comprimento. O diâmetro das secções correspondentes é mostrado na Figura 7.

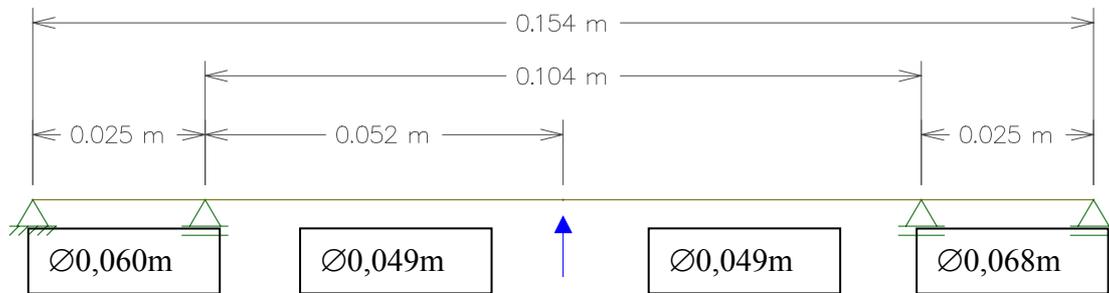


Figura 7: Dimensões gerais da viga

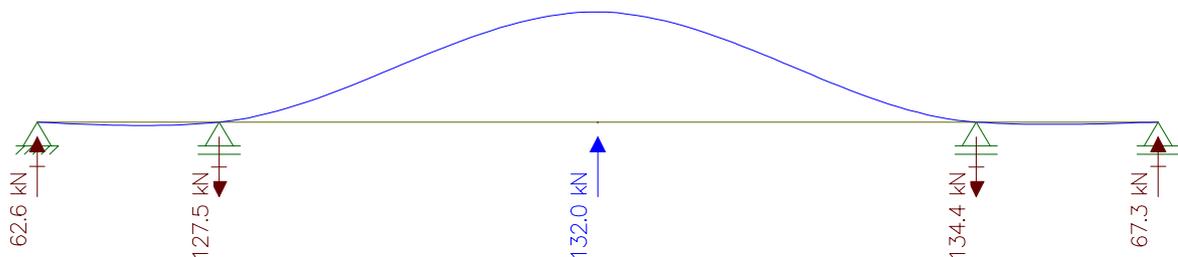


Figura 8: Reações atuantes sobre o garfo com “Valor D” de 220kN

Por convenção denominaram-se estas reações da seguinte forma (ver Figura 9); R_1 , como sendo a reação no lado externo da perna inferior do garfo; R_2 a reação no lado interno da perna inferior do garfo; R_3 é a reação no lado interno da perna superior do garfo e R_4 a reação no lado externo da perna superior do garfo. Os valores calculados das reações foram

$$\begin{aligned} R_1 &= 62600 \text{ N} \\ R_2 &= 127500 \text{ N} \\ R_3 &= 134400 \text{ N} \\ R_4 &= 67300 \text{ N} \end{aligned}$$

Estes valores de reação serão as cargas de teste virtual de fadiga. Como a amplitude da carga de teste F é alternada, têm-se como cargas, durante o ciclo de tração do produto, as ilustradas em cor vermelho na Figura 9. Já as cargas durante o ciclo de compressão do produto são ilustradas em cor azul.

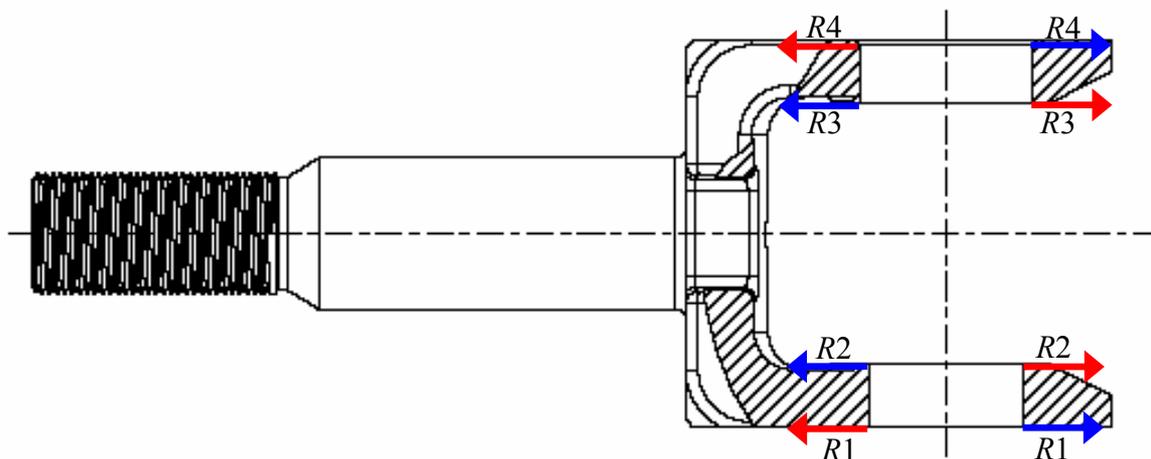


Figura 9: Cargas de compressão e tração do garfo

4 ANÁLISE ESTÁTICA

Para que se possa estimar a vida em fadiga do garfo se fazem necessárias análises estáticas que correspondam aos múltiplos carregamentos que descrevem o ciclo de teste completo. Como descrito anteriormente, o teste segundo AS-2213² possui carregamento alternado totalmente reversível. Para facilitar o entendimento das análises que seguem, convencionou-se que a primeira parte do ciclo é de tração, atuando no sentido de marcha do veículo, e a segunda parte do ciclo é de compressão, atuando no sentido de frenagem do veículo.

Buscou-se uma alternativa que vise simular as cargas calculadas em forma de força distribuída, no caso pressão, diretamente aplicada às superfícies cilíndricas de garfo. Para isto faz-se necessário o mapeamento de todas estas faces, através de ferramentas de construção de malhas presentes no MSC.Patran[®], para que se possa distribuir a pressão nos elementos que

reagem às solicitações provenientes das quatro cargas calculadas previamente.

4.1 Determinação da pressão por face de elemento P_e

Para que seja possível a aplicação das cargas em forma de pressão sobre as faces cilíndricas de contato do garfo, os quais possuem uma espessura h , assume-se a hipótese de que a distribuição das cargas se dê conforme apresentado na Figura 10, que indica metade do ciclo de teste, sendo este no sentido de tração do garfo. Observa-se, também, que apenas metade da espessura h é considerada para distribuir cada uma das quatro reações.

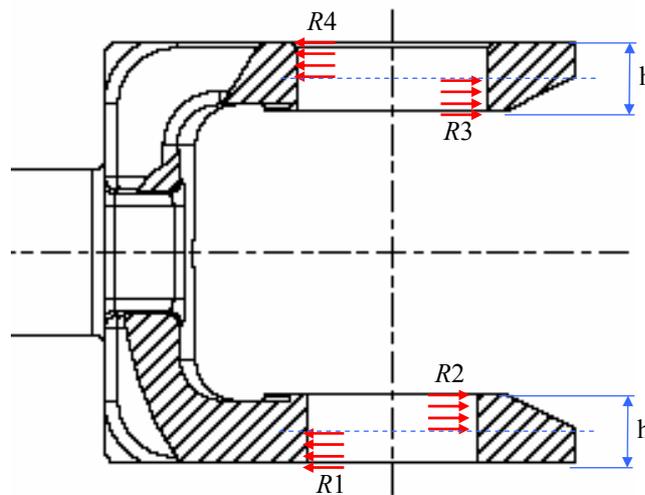


Figura 10: Cargas distribuídas em função de h

A Tabela 1 apresenta o resumo das pressões máximas para cada condição de reação.

Tabela 1. Resumo das pressões máximas nas faces do elemento

	Reações	Pressão Máxima P_e (Pa)
Valor D = 220kN	R1	$1,063 \times 10^8$
	R2	$2,165 \times 10^8$
	R3	$2,013 \times 10^8$
	R4	$1,008 \times 10^8$

4.2 Determinação das tensões nos elementos

A Figura 11 apresenta os resultados em condição de carregamento estático através das

pressões previamente calculadas de acordo com o “Valor D” de 220kN, os quais referem-se ao ciclo de tração do garfo. O pico tensão surgiu próximo aos quadrantes 90° e 270° na face inferior da perna superior do garfo conforme ilustrado. O resultado apresentado parece coerente com as condições de contorno empregadas no modelo de elementos finitos. Das quatro cargas calculadas a que está mais próxima desta região é justamente a mais elevada, $R3$. Um fato que justifica a região como sendo a de maior nível de sollicitação, é o momento gerado, primeiramente pela própria geometria do garfo, mas principalmente pela aplicação das reações $R3$ e $R4$ em sentidos opostos e elementos defasados ao longo da espessura h da perna do garfo.

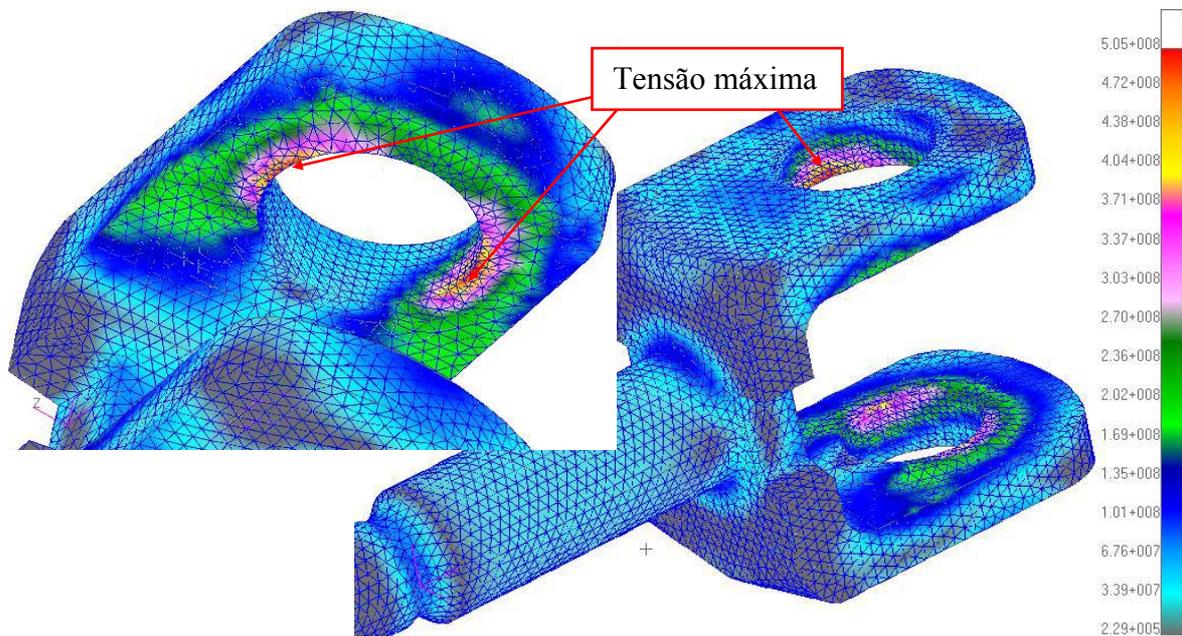


Figura 11: Tensões equivalente de von Mises – Tração / “Valor D” = 220kN

Para o ciclo de compressão do teste a região que apresentou a tensão equivalente maior se localiza próximo ao quadrante 180° na face superior da perna inferior do garfo, como ilustra a Figura 12.

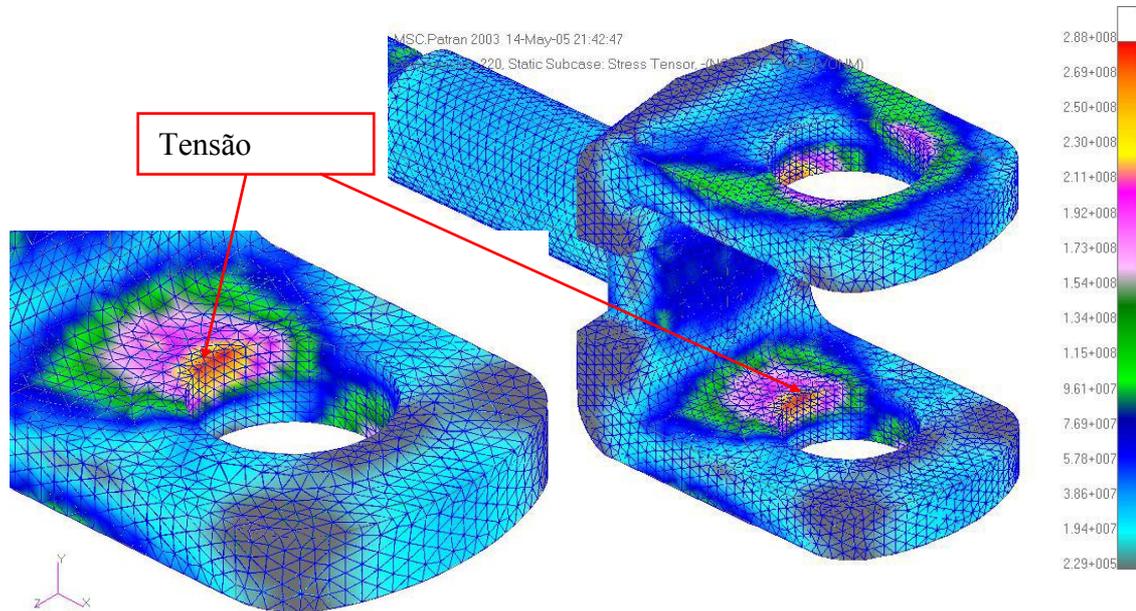


Figura 12: Tensões equivalentes de von Mises – Compressão / “Valor D” = 220kN

Da mesma forma que o ciclo de tração, a região que apresentou o pico de tensão durante o ciclo de compressão parece coerente, porquanto a pressão aplicada se distribui em uma área menor, isto se deve ao raio do furo da perna inferior ser menor que o da perna superior.

Analisando isoladamente os valores de tensão obtidos nas simulações de tração e de compressão do garfo, a única situação que não apresenta vida infinita segundo critério de Wöhler é a análise para um “Valor D” de 220kN no sentido de tração. Como estabelecido por Wöhler a tensão máxima encontrada não deve exceder a metade da tensão de ruptura do material para que o mesmo tenha vida infinita, mas essa condição não está sendo respeitada segundo Figura 1, onde a tensão máxima de 505 MPa é superior à metade da tensão de ruptura do material.

5 ANÁLISE S-N

5.1 Informações sobre material

A obtenção dos parâmetros de fadiga dos materiais são geralmente obtidos por meios de testes sob ciclos alternados até quebra total da amostra em vários níveis de tensão. Estes parâmetros diferem conforme o tipo de análise de fadiga envolvida. No MSC.Fatigue[®] o banco de dados dos materiais é gerenciado através do módulo PFMAT, a estrutura deste banco de dados suporta informações úteis aos três métodos de estimativa de vida em fadiga.

O banco de dados do PFMAT, não possui um material com tensões de ruptura σ_r e escoamento σ_e idênticas às encontradas experimentalmente no corpo de prova C extraído da perna superior do garfo forjado. Porém, o material cadastrado neste banco que mais se aproxima do material do garfo é o SAE 1045 HV-HR, que é um aço laminado a quente,

forjado e normalizado, com σ_r igual a 671MPa e σ_e de 327MPa e sua curva S-N é mostrado na figura 13.

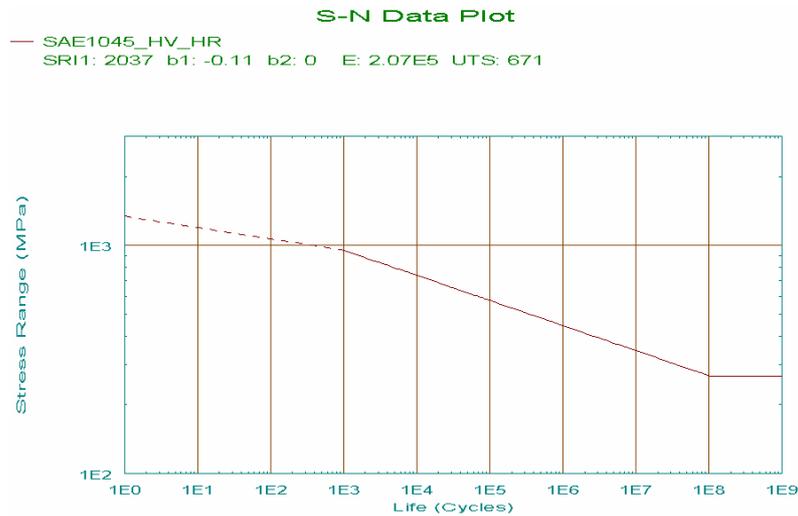


Figura 13: Curva S-N do aço SAE 1045 HV-HR

5.2 Informações sobre carregamento

Uma apropriada especificação da variação de carregamento é extremamente importante para alcançar boa acuracidade na estimativa da vida em fadiga. O carregamento pode ser definido de várias maneiras, tais como funções baseadas no tempo, na frequência ou de forma espectral, conforme o tipo de análise de fadiga utilizado. O gerenciador de carregamentos externos do MSC.Fatigue[®] é PTIME.

No teste conforme AS-2213², sabe-se que o carregamento se dá em duas direções, no sentido de tração e compressão do garfo. Para casos como o do engate automático, em que as solicitações mecânicas se dão através de pinos, a distribuição de carga no sentido positivo geralmente difere do sentido negativo. Por esta razão fazem-se necessárias distintas análises estáticas, já realizadas anteriormente, pois no MSC.Fatigue[®] estas devem ser tratadas individualmente em função de tempo e defasadas entre si.

O gerenciador de carregamentos permite ilustrar graficamente qualquer perfil de carregamento em função do tempo. A figura 14 mostra o sinal gerado internamente através do PTIME, o qual representa o carregamento do teste segundo AS-2213². Nota-se que ambos os sinais possuem valores positivos, neste caso, o que irá definir se o sinal será positivo ou negativo serão as tensões previamente analisadas sobre carregamentos estáticos. A mesma analogia se faz para a amplitude destes sinais, pois para que não haja redução ou amplificação das tensões calculadas, a amplitude deve ser igual a 1.

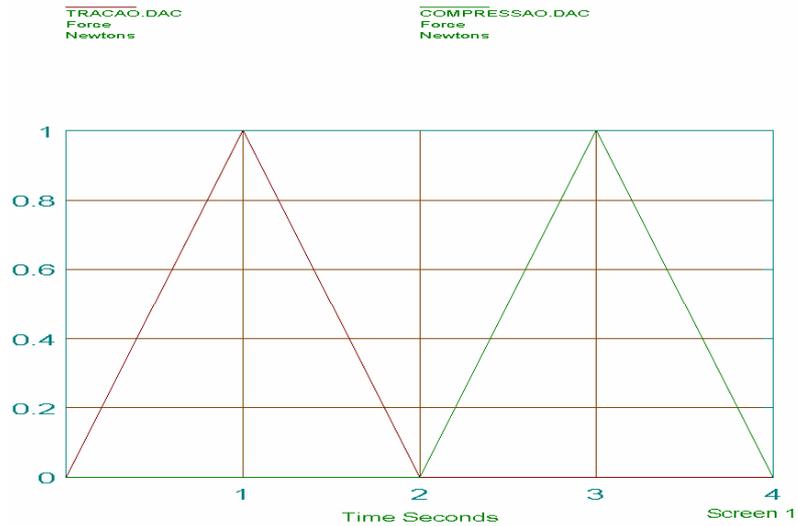


Figura 14: Sinal de teste para um ciclo

5.3 Análise de dano para “Valor D” de 220kN

Sabendo que o produto teve ruptura total no ensaio realizado, busca-se observar o dano obtido, buscando alternativas que visem aumentar a vida do componente até 2×10^6 ciclos sem apresentar falha. Os resultados do dano são apresentados na Figura 15.

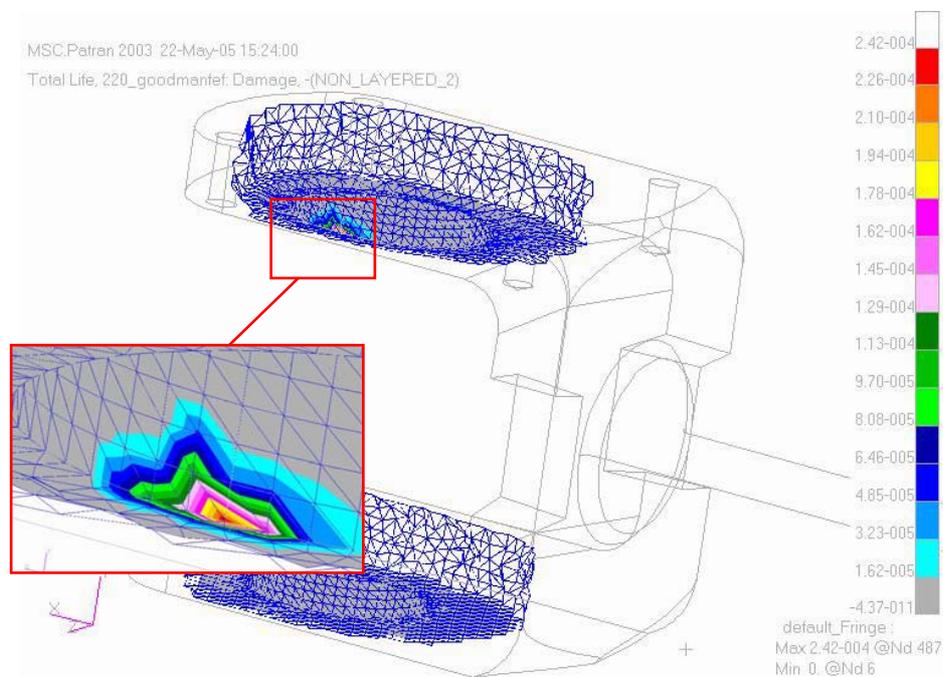


Figura 15: Dano para “Valor D” de 220kN

O nó com maior dano é identificado como o 487, apresentado na Figura 15, com valor de 2.42×10^{-4} , o que corresponde a uma vida de 4130 ciclos como é mostrado na figura 16. Este valor de estimativa de vida para o nó 487 está bastante distante do requerido pelo teste de homologação do produto, o qual exige um número mínimo de 2×10^6 ciclos.

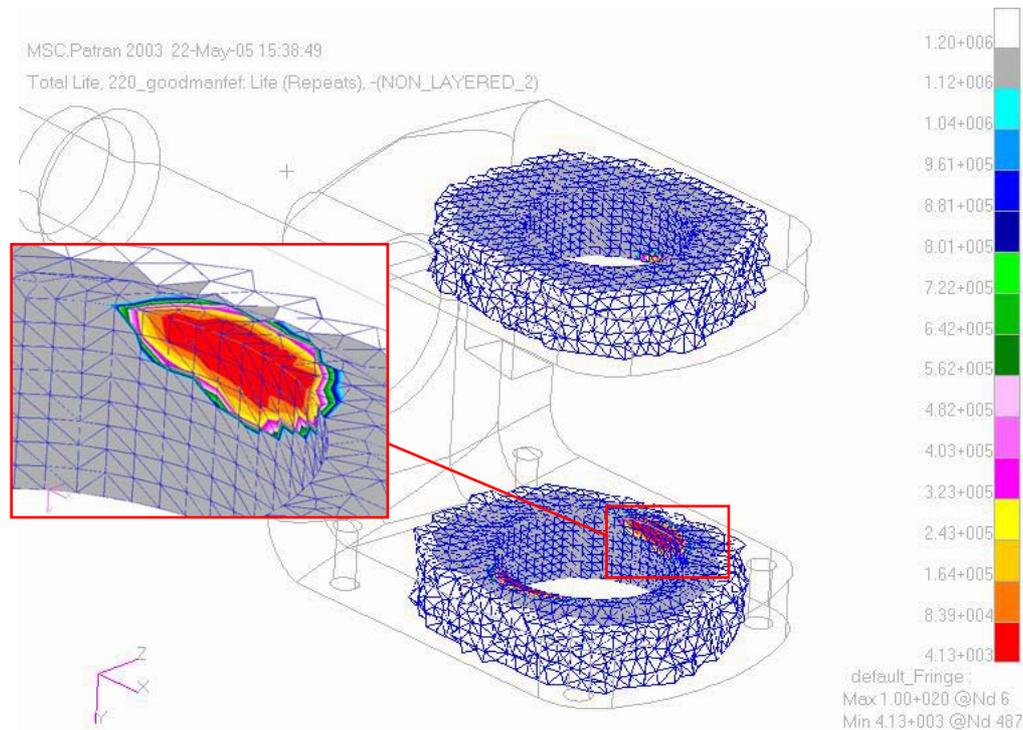


Figura 16: Estimativa de vida para “Valor D” de 220kN

Propositadamente, inseriu-se na legenda da figura 16 um valor máximo para estimativa de vida exatamente igual ao número de ciclos em que ocorreu a falha no teste, $1,2 \times 10^6$ ciclos e como valor mínimo o número de ciclo calculado em que o nó 487 falha, 4125 ciclos. Sabe-se que nas análises de fadiga em componentes, o dano e vida estimados só podem ser comparados com as propriedades de vida em fadiga do material nas regiões de concentração de tensões. Pois para que se possam relacionar os resultados obtidos na análise S-N por elementos finitos com os dados experimentais, seria necessário o levantamento da curva S-N para o componente, porém como descrito anteriormente os custos e tempo envolvidos geralmente tornam este procedimento inviável.

Contudo, pode-se afirmar que se não houvesse falhas em um único nó antes de se atingir o número de ciclos desejado de 2×10^6 , não haveria falhas no material e conseqüentemente, o componente também estaria livre de danos.

5.4 Material e Método de Correção da Tensão Média

De posse do resultado obtido através do MSC.Fatigue[®] para as cargas cíclicas de testes sob

um “Valor D” de 220kN, busca-se, através da alteração de material, uma nova estimativa de vida para o componente com a simples troca de material ou alteração de propriedades mecânicas do mesmo através de tratamentos térmicos no material atual do garfo. As figuras que seguem mostram algumas alternativas para a otimização da análise, além de buscar alternativas que visam buscar soluções para que possa ser atingida a exigência para o produto segundo norma AS-2213².

A Figura 17 mostra a vida estimada para o nó crítico 487 para as condições da análise já realizada, ou seja, o número de repetições mostrado é de 4125.

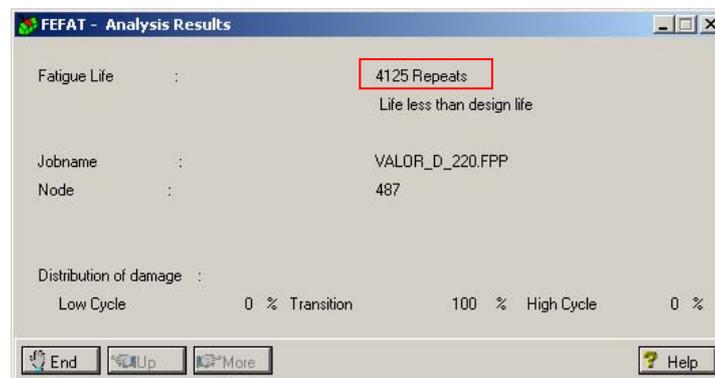


Figura 17: Vida em fadiga do nó 487 - Goodman

Quando alterado apenas o critério de influência da tensão média de Goodman para Gerber, este último o menos conservador, a estimativa de vida do componente aumenta cerca de 19 vezes como mostra a Figura 18.

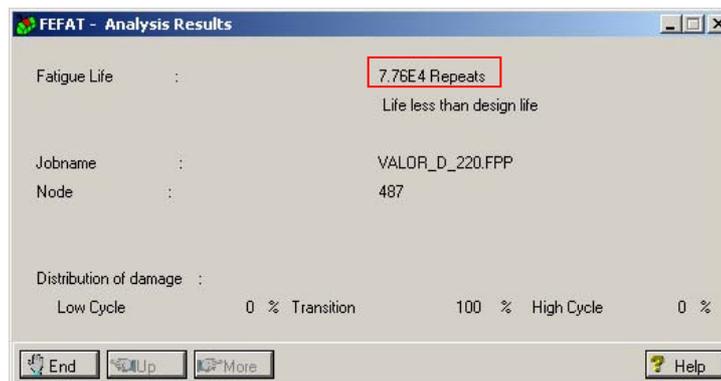


Figura 18: Vida em fadiga do nó 487 – Gerber

Por fim, altera-se apenas a tensão de ruptura σ_r de 694 MPa, valor utilizado na análise anterior, para 1000 MPa. Ao se utilizar este valor, a vida do componente do nó crítico 487, atinge o número mínimo de ciclos desejado, mesmo tendo sido utilizado o método conservador de Goodman. O resultado é observado na Figura 19.

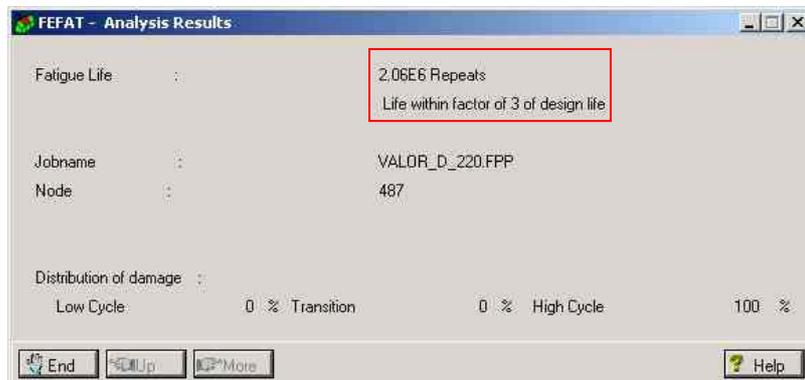


Figura 19: Vida em fadiga do nó 487 – Goodman - $\sigma_r = 1000\text{MPa}$

6 CONCLUSÕES

Mesmo que a análise S-N tenha sido feita sobre o garfo, os resultados mostram que a região com maior possibilidades de falha é a mesma que falhou experimentalmente, o que indica conformidade dos resultados. O fato da análise experimental do garfo sob carregamentos relativos para um “Valor D” de 220kN apresentar falhas para $1,2 \times 10^6$, bem antes dos 2×10^6 de ciclos exigidos, demonstra que os valores obtidos numericamente são conformes. Mas, recomenda-se a comprovação dos resultados computacionais através de ensaios experimentais sob condições de carga de tração para um “Valor D” de 220kN, instrumentando-o nas regiões que apresentaram tensões elevadas.

Com a ferramenta de avaliação de fadiga utilizada, torna-se possível fazer diversas combinações das variáveis que influenciam diretamente a durabilidade em fadiga de qualquer componente; através da escolha distintos materiais, tratamentos superficiais, acabamentos superficiais e correção do efeito da tensão média. A partir dessa possibilidade buscou-se sem qualquer alteração geométrica do garfo, aumentar o “Valor D” de sua especificação.

Como proposta para novos estudos, sugere-se fazer o levantamento da curva S-N do componente, onde os resultados obtidos poderão ser comparados diretamente com os dados experimentais do garfo.

7 REFERENCIAS

- [1] Australian Standard, *AS-2213: 50 mm Pin – Type couplings and drawbar eyes for trailers*, (1984).
- [2] Australian Standard, *AS-2213: Section 5. Method of testing couplings and drawbar eyes*, (1984).
- [3] A. Entrekin, “Accuracy of MSC/Nastran first and second-order tetrahedral elements in solid modeling for stress analysis”, Bell Helicopter Textron, (2002).

Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio da empresa Jost Brasil Sistemas Automotivos Ltda.