

ESTUDO DE FALHA DE UM SISTEMA DE ACOPLAMENTO ENTRE VEÍCULO E SEMI-REBOQUE DO TIPO QUINTA-RODA¹

Yonathan Reboh²

Sandro Griza³

Bill Paiva⁴

Telmo Roberto Strohaecker⁵

Resumo

Neste trabalho será apresentado um estudo de falha de um sistema utilizado para fazer o acoplamento entre veículo e semi-reboque. O sistema, do tipo quinta-rodas, apresentou falha em serviço resultando na separação do semi-reboque com relação ao cavalo mecânico. Na primeira parte do trabalho é apresentada a análise de falha realizada para determinação das causas que levaram o sistema a falhar. Foi realizada também uma análise computacional pelo método dos elementos finitos para avaliação do comportamento do sistema em condições de serviço. Com os resultados da análise de falha e da simulação computacional foi feito um estudo do projeto à fadiga. Finalmente são apresentadas medidas a serem tomadas com objetivo de se evitar novas falhas similares. O resultado da investigação mostrou que a falha ocorreu por fadiga iniciada em um cordão de solda. A presença de descontinuidades no cordão de solda que une um componente do sistema ao semi-reboque criou condição suficiente para nucleação de trincas. A adoção de medidas de controle do procedimento de soldagem, automatização do processo ou qualificação do soldador e inspeção cuidadosa mostra-se imprescindível no esforço de se evitar um novo evento similar.

Palavras-chave: Análise de falha; Quinta-rodas; Descontinuidades em soldas

Abstract

This work presents a failure study of a fifth wheel coupling system that had failed in service. The first part of the work presents the failure analysis conducted to determine the reasons for the failure. A numerical analysis by the finite element method was made to simulate the work load in service. With the results of the failure analysis and the numerical analysis a valuation of the fatigue resistance of the coupling was made by the SN method. Finally corrective actions are presented to prevent similar events. The investigation concluded that the failure occurred by fatigue initiated in a welded joint. The presence of defects in the weld toe created the condition for crack initiation. The adoption of better welding procedures and careful inspection are vital to prevent similar failures.

Key words: Failure analysis, Fifth wheel, Weld defects

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Engenheiro Mecânico, mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais. (PPGEM) – UFRGS.

³ Engenheiro Mecânico, doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais. (PPGEM) – UFRGS.

⁴ Graduando em Engenharia Metalúrgica – UFRGS.

⁵ Professor, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM) - UFRGS

INTRODUÇÃO

De acordo com registros oficiais sobre o trânsito no Brasil,⁽¹⁾ ocorrem diariamente cerca de 4.109 acidentes, significando 1.5 milhões de acidentes por ano. Estima-se que anualmente o trânsito seja responsável por 33.000 mortes e 400.000 feridos. Destes, uma parcela não contabilizada porém acredita-se significativa, de inválidos. As estatísticas mostram que cerca de 90% dos acidentes são causados por falhas humanas e que os 10 % restantes podem ser divididos em 6% causados pelas más condições das estradas e 4% causados por falhas mecânicas.

Mesmo parecendo baixa, em primeira impressão, a porcentagem de acidentes causados por falhas mecânicas, 4% dos acidentes significam a morte de cerca de 1.360 pessoas e 16.000 feridos por ano.

É evidente que os grandes avanços para promover uma queda nos índices de acidentes estão na educação da população e na melhoria das condições das estradas nacionais. Uma vez que os estudos científicos das áreas exatas, onde estão compreendidas as ciências de engenharia não são focados para o entendimento da psicologia humana, a atuação dos engenheiros passa a ser efetiva no desenvolvimento de veículos e vias mais seguros. Os conhecimentos técnicos dos engenheiros são as ferramentas capazes de intervir nas causas de 4% dos acidentes e, portanto, de baixar as estatísticas de 1.360 mortes e 16.000 feridos por ano.

A intervenção do engenheiro em favor da redução da probabilidade de falha de um componente ou sistema ocorre em diferentes etapas da vida do mesmo. Existe a possibilidade de se atuar desde a concepção do projeto, passando pelo controle da qualidade da fabricação, cuidados com armazenamento e transporte até o momento da colocação do sistema em operação. Tendo um evento de falha, ocorrido fora das considerações de vida útil do projeto, é evidente a aceitação da premissa de que algum desvio das condições estipuladas para o correto funcionamento do sistema ocorreu. Com o objetivo de tomar ações corretivas para impedir uma nova falha similar, é necessário o entendimento completo do problema. A maneira mais eficiente de se determinar os motivos de falha do sistema parte de uma investigação sobre o evento. O conhecimento de como ocorreu a falha permite agir de forma eficaz.

Para determinação dos fatores que levam um componente ou sistema a falhar é necessária uma investigação criteriosa. A complexidade de um evento como um acidente rodoviário, ou um exemplo mais clássico, um acidente aéreo, criou a necessidade do desenvolvimento de uma metodologia de investigação capaz de obter respostas confiáveis e úteis aos projetistas.

Neste trabalho será apresentado o estudo do caso de um conjunto pino rei-placa de fixação que apresentou falha em serviço. Este conjunto, juntamente com um componente denominado de quinta-roda, constituem o sistema responsável pelo acoplamento do veículo trator (cavalo-mecânico) ao semi-reboque e semi-reboque a semi-reboque, no caso de bitrens. Atualmente, considera-se este sistema como a opção mais segura para promover o acoplamento do veículo trator com o semi-reboque.

Na Figura 1 observa-se o sistema de acoplamento e a disposição dos seus componentes. A parte fixada ao cavalo-mecânico é denominada quinta-roda, nela estão os mecanismos de trava e amortecimento de carga. A parte fixada ao semi-reboque é denominada pino rei. O pino rei é constituído por dois elementos, o pino propriamente dito e uma placa de fixação. A Figura 2 ilustra a montagem do pino rei. O pino é fixado por uniões parafusadas à placa de fixação sendo esta fixada à mesa do semi-reboque por processo de soldagem.

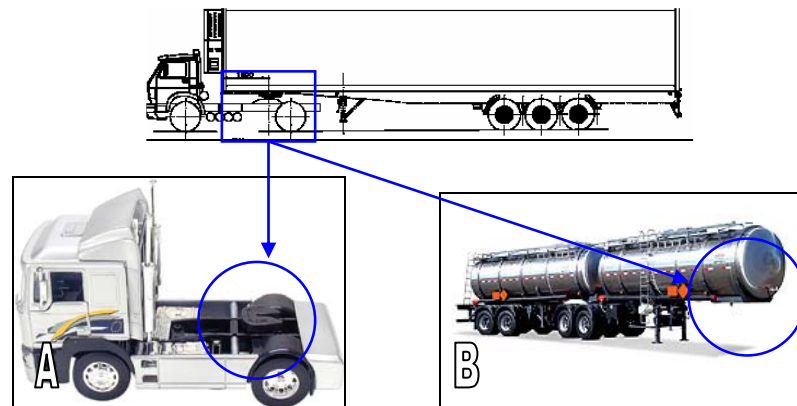


Figura 1. Acoplamento tipo quinta roda-pino rei. Imagem A mostra a localização da quinta roda no veículo trator e imagem B a localização do pino rei no semi-reboque

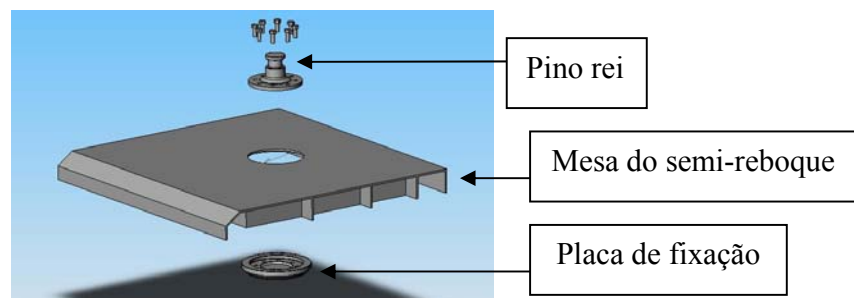


Figura 2. Montagem do pino rei na mesa do semi-reboque

A falha foi caracterizada pela separação do conjunto pino rei-placa junto à mesa do semi-reboque. Para estudo do caso foi feita análise de falha do sistema e uma simulação computacional com objetivo de avaliar o comportamento em condições de trabalho. Os resultados da análise de falha e da simulação computacional serviram de base para avaliação do projeto à fadiga.

METODOLOGIA

Análise de Falha

Para a análise de falha, foi tomada como base a seqüência experimental sugerida pela ASM.⁽²⁾ Os estágios aplicados na investigação de uma falha podem variar dependendo da natureza do caso, para o caso apresentado foi adotada a seguinte seqüência:

- 1) Coleta de dados e seleção de amostras
- 2) Exame preliminar do componente falhado (análise visual e registro de dados).
- 3) Seleção, identificação, preservação e limpeza de fratura e amostras
- 4) Exame macroscópico da fratura.
- 5) Exame microscópico da fratura.
- 6) Seleção e preparação das amostras para análise metalográfica.
- 7) Exames metalográficos.
- 8) Ensaio mecânico – Dureza.
- 9) Determinação dos mecanismos de fratura – Seqüência de falha.
- 10) Testes sob condições simuladas de serviço

Simulação Computacional

Para a etapa de avaliação do sistema sob condição simulada de serviço, foi realizada uma análise computacional pelo método dos elementos finitos. As diretrizes adotadas para determinação das cargas de simulação bem como sua forma de aplicação foram obtidas da norma NBR NM-ISO 8716.⁽³⁾ Na norma estão estipuladas as condições de ensaio dinâmico a que deve ser submetido o sistema para simulação de cargas práticas.

Avaliação do Projeto à Fadiga

Com os resultados obtidos na simulação computacional foi possível realizar uma avaliação do projeto à fadiga do sistema. A estimativa do limite de resistência à fadiga foi adotada para um tempo de vida de 10^6 ciclos. Segundo resultados experimentais obtidos por Mischke,⁽⁴⁾ para materiais como o aço, o limite de resistência à fadiga pode ser relacionado com a resistência à tração do material de acordo com a relação:

$$Se' = 0,5 Su \quad (1)$$

onde: Se' é o limite de resistência à fadiga e Su a resistência à tração do material.

Para cálculos práticos a relação (1) deve ser corrigida por fatores diversos ficando o limite de resistência à fadiga corrigido como:

$$Se = KaKbKcKdKeSe' \quad (2)$$

onde: Se = Limite de resistência à fadiga da peça
 Se' = Limite de resistência à fadiga do corpo de prova
Fatores Kx são obtidos em literatura (4)

Os resultados obtidos da simulação computacional foram comparados com os resultados de cálculo de resistência à fadiga para avaliação do projeto.

RESULTADOS

Análise de Falha

- Exame preliminar do componente falhado
 - Observada presença de trinca percorrendo toda extensão do cordão de solda de união da placa de fixação com a mesa do semi-reboque (Figura 3).
 - Cordão de solda apresentando morfologia bastante irregular.
 - Observada presença de descontinuidades conhecidas por mordeduras, que são classificadas como descontinuidades planares segundo IIW (5) (Figura 4).

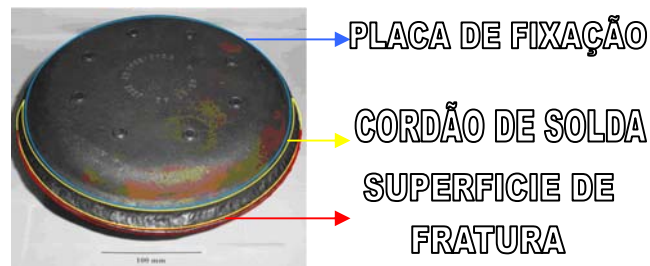


Figura 3. Observa-se a ocorrência da fratura por toda extensão do cordão de solda



Figura 4. Macrografias mostrando presença de mordeduras no cordão de solda que une a placa de fixação à mesa do semi-reboque

- Exames macroscópico e microscópico da fratura

Macroscópico:

- Observada presença de marcas de praia, morfologia característica de matérias que sofrem processo de fadiga, por grande extensão da superfície de fratura (Figura 5-A).

Microscópico:

- Observada presença de estrias de fadiga, micromecanismo associado ao processo de fadiga (Figura 5-B).

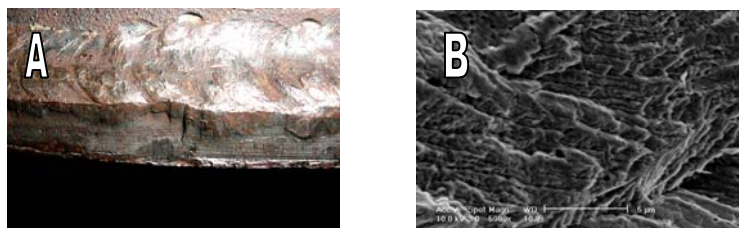


Figura 5. Imagem A mostrando presença de marcas de praia na superfície de fratura. Imagem B, fractografia mostrando presença de estrias de fadiga

- Exame metalográfico e ensaios de dureza

Com base nas análises anteriores foi determinado interesse em avaliar as condições microestruturais na região da solda.

- Observou-se uma microestrutura usual resultante de processo de soldagem, com presença de granulação mais grosseira na zona termicamente afetada (ZTA) (Figura 6-A).
- Foi possível observar falta de penetração do cordão evidenciando problemas no procedimento de soldagem (Figura 6- B e C).
- Os perfis de dureza, realizados na interface de união da solda com a mesa do semi-reboque e com a placa de fixação não revelaram anormalidades com relação aos gradientes de dureza.
- As análises indicam que não ocorreram alterações microestruturais indesejáveis.

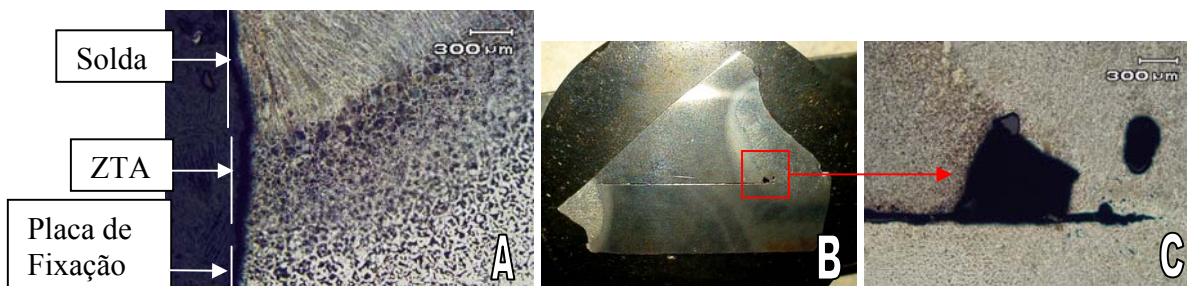


Figura 6. Micrografias mostrando interface da solda e falta de penetração

Simulação Computacional

A simulação computacional foi executada para avaliação do sistema em condições de aceleração e frenagem. Na Figura 7 é possível ver a malha construída para a simulação.

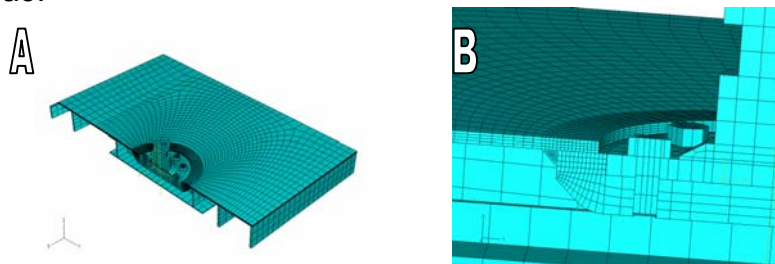


Figura 7. Imagem A mostrando uma vista geral da malha construída. Imagem B mostrando refino de malha no cordão

- Condição de aceleração

- Obtidos valores de tensão máxima principal na ordem de 130 MPa em região do pé do cordão de solda (Figura 8-A).

- Condição de frenagem

- Obtidos valores de tensão máxima principal na ordem de 150 MPa em região do pé do cordão de solda (Figura 8-B).

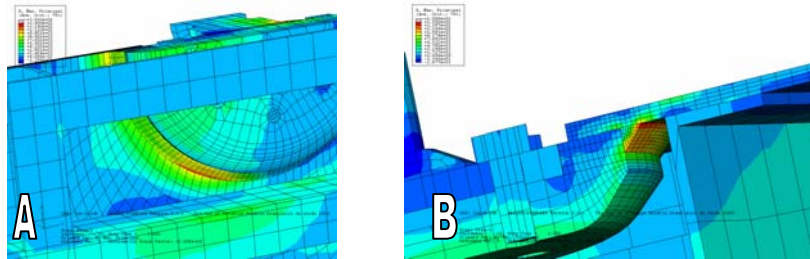


Figura 8. tensões máximas para aceleração, A, e para frenagem, B.

Avaliação do projeto à fadiga

O procedimento de cálculo pode ser dividido em três etapas:

1. Determinação das tensões nominais:
 - σ_{oa} (condição de aceleração)
 - σ_{of} (condição de frenagem)
2. Determinação do limite resistência à fadiga – Se
3. Comparação dos resultados

• Determinação das tensões nominais

A tensão nominal pode ser obtida multiplicando o valor de tensão calculado na simulação, para uma condição livre de defeito, por um fator de concentração de tensão (FCT) devido à geometria do cordão. Em muitos trabalhos como os de J. A. Ferreira e C. M. Branco (6) e W. W. Sanders (7) onde estudaram a vida em fadiga de juntas soldadas foi observada grande dependência com relação à geometria do cordão.

X. Niu e G. Glinka (8) obtiveram, por método de elementos finitos, a seguinte relação empírica para concentração de tensão no pé do cordão:

$$K_t = 1 + 0.512 \times \alpha^{0.572} \times \left[\frac{t}{R} \right]^{0.469} \quad (3)$$

onde: α é o ângulo do cordão, R o raio do pé do cordão e t a espessura da chapa.

A aplicação da relação (3) na geometria da solda resultou em um fator de concentração de tensão $K_t=1.94$.

Utilizando FCT foram obtidos os seguintes valores de tensões nominais:

- $\sigma_{oa} = 252 \text{ MPa}$
- $\sigma_{of} = 291 \text{ MPa}$

• Determinação do limite resistência à fadiga – Se

Utilizando as relações (1) e (2), foi determinado o valor do limite de resistência à fadiga para o conjunto.

As propriedades mecânicas adotadas foram as do material da mesa do semi-reboque. O material é um aço ABNT 1020 laminado a quente. Para este material o limite de resistência à tração é de 465 MPa.⁽⁹⁾

O valor de Se' obtido é:

$$Se' = 232.5 \text{ MPa}$$

Corrigindo o valor do limite de fadiga considerando os fatores, obteve-se o valor para Se :

$$Se = 162,75 \text{ Mpa}$$

- Comparação dos resultados

Através dos cálculos realizados para determinação das tensões nominais e limite de resistência à fadiga foi possível concluir que o sistema estava operando em níveis de tensões superiores ao seu limite de fadiga. A presença das mordeduras criou uma condição de concentração de tensão suficiente para nucleação de trincas de fadiga

DISCUSSÕES

No andamento dos trabalhos de análise da falha ficou evidente a ausência de problemas de origem metalúrgica como alterações microestruturais indesejáveis resultantes do processo de soldagem. As grandes variações de temperatura presentes durante o processo de soldagem muitas vezes geram microestruturas frágeis criando condições propícias para nucleação de trincas. Para reforçar a constatação da existência de uma microestrutura desejável, os ensaios de microdureza mostram um gradiente suave entre o cordão de solda e os componentes. Grandes variações de dureza, muitas vezes presentes em regiões soldadas, não são desejáveis uma vez que criam heterogeneidades internas no material. Tendo em vista que não foram detectados erros grosseiros de montagem dos componentes ou anomalias dimensionais em comparação com as especificações técnicas, a atenção do estudo voltou-se para as descontinuidades observadas no cordão de solda.

As descontinuidades, caracterizadas pela presença de mordeduras e pela falta de penetração indicam falhas no procedimento de soldagem. O entendimento de como a presença destes defeitos poderia afetar o sistema passou a ser necessário.

Exaustivamente tem-se estudado o comportamento da vida em fadiga de juntas soldadas. A complexidade de se obter conclusões efetivas para projeto resulta da própria complexidade associada ao processo, da existência de heterogeneidades microestruturais e geometrias variáveis. Branco, Fernandes e Castro⁽¹⁰⁾ citam como fatores que afetam comportamento a fadiga de juntas soldadas: geometria da junta, distribuição de tensões, estado metalúrgico, espectro de carga, meio ambiente, tensões residuais e defeitos. Shigley⁽⁴⁾ apresenta diversos fatores de redução de resistência à fadiga para variados tipos de juntas e salienta a importância de sua utilização em projeto. Aspectos da geometria do cordão de solda aparecem como principais fatores de influência da vida em fadiga nos trabalhos de Ferreira e Branco⁽⁶⁾ e Sanders.⁽⁷⁾

Uma vez identificados os agentes causadores da falha, o passo seguinte foi quantificar o efeito das descontinuidades na vida em fadiga do sistema. Apoiado pela evidência de que o início e a propagação das trincas ocorreu apenas no pé do cordão de solda, não ocorrendo propagação na raiz, considerou-se a necessidade de maior atenção à presença das mordeduras. Determinou-se que a falta de penetração não foi fator decisivo para falha. Porém é importante citar que normas como ANSI/AWS D8.8,⁽¹¹⁾ ANSI/AWS D1.1⁽¹²⁾ e a recomendação do IIW⁽⁵⁾ não aceitam este tipo de defeito uma vez que é reconhecido o seu efeito drástico na redução de resistência mecânica da junta. Em estudo sobre a influência de defeitos na resistência de juntas soldadas Costa, Scotti e Oliveira⁽⁹⁾ obtiveram resultados que indicam uma redução em torno de 10% na vida em fadiga para juntas contendo mordeduras com profundidade de 1,6mm. Estes resultados foram obtidos em condições controladas de laboratórios e com corpos de prova especialmente preparados para os ensaios, portanto, entende-se que para condições práticas esta redução pode ser considerada ainda maior. Com os

resultados obtidos da análise computacional e da avaliação da vida em fadiga pelo método SN foi possível determinar que o sistema estava operando em condições de carregamento superiores ao limite de fadiga. A presença das mordeduras, funcionando como concentradores de tensão, criaram as condições suficientes para a nucleação de trincas.

Entendido que para o sistema analisado não é cabível a presença de descontinuidades como mordeduras é importante a adoção de um melhor controle de qualidade do processo de soldagem. Ações imediatas para se evitar uma ocorrência de falha similar seriam, elaboração do procedimento de soldagem, automatização do processo ou qualificação do soldador e execução de inspeção cuidadosa. Existem diversas técnicas de melhoria de resistência à fadiga, simples de serem executadas e de bons resultados. De acordo com os resultados obtidos no Welding Institute⁽¹³⁾ na comparação das técnicas de melhoria de resistência a fadiga, verificou-se que o martelamento apresentou os melhores efeitos. Por ordem decrescente de aumento de resistência a fadiga a seqüência fica: martelamento, afagamento completo com lima, shoot peening, acabamento com plasma e afagamento com disco.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados das análises foi possível determinar que a falha do componente ocorreu por processo de fadiga. Trincas nucleadas no pé do cordão de solda cresceram até a face oposta da mesa fazendo com que existisse uma pequena região resistente que acabou rompendo por sobrecarga.

Pelo fato de não terem sido observadas anormalidades microestruturais bem como a ausência de erros grosseiros de montagem ou dimensionais dos componentes, a atenção do estudo foi voltada para as descontinuidades encontradas no cordão de solda. A hipótese principal para o evento era de que funcionando como concentradores de tensão, as mordeduras criaram as condições suficientes para a nucleação de trincas. Uma vez existindo a presença de trincas naquela região foi uma questão de tempo para ocorrência da falha catastrófica. Para confirmação desta hipótese foi realizada uma análise computacional do sistema simulando condições práticas de serviço. Os resultados obtidos na simulação confirmam a existência de uma condição de carregamento que supera o limite de fadiga teórico para o material.

A adoção de medidas de controle do procedimento de soldagem, automatização do processo ou qualificação do soldador e inspeção cuidadosa mostra-se imprescindível no intuito de se evitar uma ocorrência de falha similar. Alguns procedimentos conhecidos por melhorarem a resistência de cordões de solda podem ser adotados no esforço de se trabalhar em favor da segurança.

REFERÊNCIAS

- 1 http://www.cidades.gov.br;http://sos.estradas.com.br/estudos/sos_estudos_acidentes.asp
- 2 ASM – Metals Handbook - **Failure Analyses and Prevention**, Vol 11, 9 ed. , 1992
- 3 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR NM-ISO 8716: Veículos rodoviários comerciais – Pino rei para quinta roda – Ensaios de resistência, Rio de Janeiro, 2001.
- 4 Shigley, J. y Mischke, C., Mechanical Engineering Design, 5a. ed., McGraw-Hill Inc. USA, 1989
- 5 Documento IIS IIW-340-69, também publicado em Metals Construction, Vol 2, no.2, p.78, 1970.
- 6 Ferreira, J. A.; Branco, C. M. **Fatigue Analysis and Prediction in Fillet Welded Joints in the Low Thickness Range**, Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 13, no. 3, 1990
- 7 Sanders, W. W. ; McDowell K.A. **Fatigue Behaviour of 5000 Series Aluminum Alloy Weldment in Marine Environment**, report to welding research council and national science fundation, ISU-ERI-Ames 78055, Engineering Research Institute, Iowa State University, 1977.
- 8 Niu, X. ; Glinka G. **The Weld Profile Effects on Stress Intensity Factors in Weldments**, International Journal of Fracture, Vol. 35, 1987.
- 9 Costa, A. V. da. ; Scotti, A. ; Oliveira, S. A. **Influência de Defeitos na Resistência de Juntas Soldadas de Alterações Veiculares**, XXIV Encontro Nacional da Tecnologia da Soldagem, Fortaleza, Brasil, 1998.
- 10 Branco, C. M., ; Fernandes, A. A. ; Castro, P. T. de. **Fadiga de Estruturas Soldadas**, 2a. ed., Lisboa, 1999.
- 11 ANSI/AWS D8.8-89 – **Automotive Frame Weld Quality – Specification for Arc Welding**, USA, 1989.
- 12 ANSI/AWS D1.1-96 – **Structural Welding Code Steel**, USA, 1996
- 13 Welding Institute – **Improving the fatigue Performance of Welded Joints**, Publicação No. 85300164-2, 1983.