

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

MÁRIO VICTOR DOS REIS

TROCA DE MATERIAL E REDUÇÃO DA ESPESSURA DO DEFLETOR DE CALOR DE AÇO NORMALIZADO LNE 380 PARA AÇO QUIET STEEL®.

**VOLTA REDONDA
2016**

MÁRIO VÍCTOR DOS REIS

TROCA DE MATERIAL E REDUÇÃO DA ESPESSURA DO DEFLETOR DE CALOR DE AÇO NORMALIZADO LNE 380 PARA AÇO QUIET STEEL®.

Dissertação apresentada à Fundação Oswaldo Aranha do Campus Três Poços, Centro Universitário de Volta Redonda, para a obtenção do título de Mestre em Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Carvalho Coelho.

Co-orientador: Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe.

**VOLTA REDONDA
2016**

FICHA CATALOGRÁFICA
Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

R375t Reis, Mário Victor dos.
Troca de material e redução da espessura do defletor de ca-lor de aço normalizado LNE 380 para aço quiet steel® / Mário Victor dos Reis - Volta Redonda: UniFOA, 2016.

66 p. : II

Orientador(a): Profº Dr. Gilberto Carvalho Coelho

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2016

1. Materiais - dissertação. 2. Defletores de calor. 3. Aço LNE 380. 4. Aço quiet steel®. I. Coelho, Gilberto Carvalho. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 620.1

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: Mário Victor dos Reis

**TROCA DE MATERIAL E REDUÇÃO DA ESPESSURA DO DEFLETOR DE
CALOR DE AÇO NORMALIZADO LNE 380 PARA AÇO QUIET STEEL®**

Orientador:

Prof. Dr. Gilberto Carvalho Coelho

Co-orientador

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

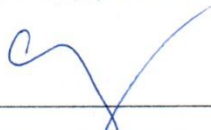
Banca Examinadora



Prof. Dr. Gilberto Carvalho Coelho



Prof. Dr. Luiz de Araújo Bicalho



Prof. Dr. Carlos Angelo Nunes

“Cada escolha, uma renúncia, isto é a vida”.

“O melhor presente Deus me deu, a vida me ensinou a lutar pelo que é meu”.

(Trecho da música “Lutar pelo que é meu”. Autor: Chorão *in memoriam* – Banda Charlie Brown Jr)

A Deus; Senhor, obrigado por tudo que me ofereceu.

Aos meus pais, Antônio Carlos dos Reis e Pedrina Maria de Almeida dos Reis, e ao meu irmão Vinícius Rangel dos Reis pela educação, respeito com o próximo e os ensinamentos dos devidos caminhos da vida.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de registrar o meu agradecimento a todas as pessoas que contribuíram para que este projeto fosse realizado da forma mais adequada, em especial aos meus orientadores Prof. Dr. Gilberto Carvalho Coelho e Prof. Dr Alexandre Fernandes Habibe que me acompanharam em todos os momentos.

Professores, mestres, coordenadores e funcionários do Centro Universitário de Volta Redonda - UniFOA, que transmitiram seus conhecimentos e experiências a fim de nos ajudar no desenvolvimento deste projeto e na conclusão do curso.

Aos amigos e engenheiros Albino Franzoni Júnior, Elisabete Oliveira, Sérgio Amaral, Francisco Monticeli e Edson Yokoyama pelos seus conhecimentos e experiências no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Atualmente, os defletores de calor disponíveis para o mercado automotivo são produzidos com aços normalizados de grau LNE 380. Entretanto, sua vida útil em veículos pesados tem se apresentado reduzida em relação à esperada em função de falhas nas regiões de sua fixação na estrutura da caixa de transmissão. Estas falhas são mais frequentes quando estes componentes são submetidos a aplicações severas de rodagem ao calor transmitido pelo sistema de exaustão dos gases de combustão. A falha do defletor leva ao aumento da temperatura do óleo da caixa de transmissão em virtude da exposição desta ao sistema de exaustão, acarretando na redução de vida útil dos componentes internos da mesma, tais como, engrenagens, sincronizadores e rolamentos. Este trabalho consiste na implementação e validação do conceito de defletores de calor em aço Quiet Steel®, através da substituição do material de aço LNE 380 para aço Quiet Steel® simulando as condições de uso dos defletores pelo método de elementos finitos, testes experimentais, instrumentação veicular, testes de bancada e laboratoriais. A substituição levou ao aumento da vida útil do produto, à redução de ruído e vibração além de reduzir sua espessura em 50%.

Palavras-chave: Defletores de calor; aço LNE 380; Aço Quiet Steel®; Elementos finitos.

ABSTRACT

Nowadays, the heat shields available at the automotive market are produced with standard steels grade LNE 380. However, their life cycles on heavy duties are reduced compared to the expected due to failure at the fixation region on the transmission housing. These failures are most frequent when those components are submitted to severe road applications and to the heat transmitted by the exhaust system of combustion gases. Heat shield failure leads to increased gear box oil temperature due to the exhaust system proximity, leading to the life cycle reduction of the internal components, for example, gears, synchronizer, and bearing. This work consists on the implementation and validation of a new heat shield concept using Quiet Steel®, simulating its usage conditions by applying the finite elements method, experimental tests, vehicle instrumentation, bench tests and laboratorial tests. This replacement led to an increase of the product life cycle and to a reduction of noise and vibration as well as to a decrease in its thickness of about 50%.

Keywords: Heat shield; Steel grade LNE 380; Steel Quiet®; Finite Elements.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise de sensibilidade de frequência natural	Pág.57
Tabela 2 – Análise de espectrometria de emissão óptica	Pág.58
Tabela 3 – Detalhamento das dimensões de um corpo de prova de tração	Pág.59
Tabela 4 – Detalhamento do teste de corrosão	Pág.60
Tabela 5 – Resultados do teste de estabilidade térmica	Pág.62
Tabela 6 – Detalhamento da peça após teste de <i>salt spray</i>	Pág.64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Detalhe da fixação do defletor.....	Pág.15
Figura 2 – Detalhamento do Aço Quiet Steel®	Pág.18
Figura 3 – Comparativo do fator de perda entre os aços	Pág.19
Figura 4 – Propriedades físicas do Quiet Steel®	Pág.19
Figura 5 – Graus de sofisticação em ensaios de fadiga	Pág.20
Figura 6 – Padrões de tensão x tempo	Pág.22
Figura 7 – Tipos de corpos de prova para ensaios de fadiga.....	Pág.23
Figura 8 – Placa excitada por força variável	Pág.27
Figura 9 – Resposta da placa	Pág.27
Figura 10 – Malha deformada	Pág.30
Figura 11 – Tensões principais e direções.....	Pág.31
Figura 12 – Campo de deslocamentos verticais	Pág.32
Figura 13 – Campo de tensões normais	Pág.33
Figura 14 – Comparativo de espessura e massa.....	Pág.34
Figura 15 – Ensaio de líquido penetrante.....	Pág.37
Figura 16 – Ensaio de espectrometria de emissão óptica.....	Pág.39
Figura 17 – Panorama de tensão de Von Mises para 4.0mm	Pág.47
Figura 18 – Panorama de tensão de Von Mises para 3.0mm	Pág.48
Figura 19 – Panorama de tensão de Von Mises para 2.0mm	Pág.49
Figura 20 – Ponto de fixação S1 para instrumentação veicular	Pág.51
Figura 21 – Ponto de fixação S2 para instrumentação veicular	Pág.51
Figura 22 – Ponto de fixação S3 para instrumentação veicular	Pág.52
Figura 23 – Detalhamento da existência de trincas no defletor.....	Pág.54
Figura 24 – Defletor fabricado em aço Quiet Steel® sem falhas.....	Pág.55
Figura 25 – Resultados dos ensaios de frequência natural.....	Pág.57
Figura 26 – Descrição da amostra de cisalhamento	Pág.61
Figura 27 – Amostra do teste de estabilidade térmica	Pág.63

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	Pág.15
2. OBJETIVO	Pág.17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	Pág.18
3.1 Material do defletor	Pág.18
3.2 Projeto de um novo modelo.....	Pág.20
3.3 Exigências de uma análise de fadiga	Pág.21
3.4 Cargas e tensões variáveis	Pág.21
3.5 Ensaio de fadiga.....	Pág.23
3.6 Critérios de projeto para fadiga	Pág.24
3.7 Sensores para medições de vibrações mecânicas	Pág.25
3.8 Medição de frequência natural	Pág.27
3.9 Métodos de elementos finitos (MEF)	Pág.28
4. MATERIAIS E MÉTODOS	Pág.34
4.1 Materiais dos defletores	Pág.34
4.2 Simulação numérica.....	Pág.35
4.3 Testes de campo.....	Pág.35
4.4 Testes de bancada.....	Pág.36
4.5 Validação do produto	Pág.37
4.5.1 Análise de frequência natural	Pág.37
4.5.2 Análise química.....	Pág.38
4.5.3 Ensaio mecânico de tração.....	Pág.40
4.5.4 Teste de proteção superficial	Pág.40
4.5.5 Teste de cisalhamento.....	Pág.41
4.5.6 Teste de estabilidade térmica	Pág.43
4.5.7 Teste de névoa salina.....	Pág.43
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	Pág.45
5.1 Simulação numérica.....	Pág.46

5.2 Testes de campo.....	Pág.50
5.3 Teste de bancada.....	Pág.53
5.4 Teste de validação do produto	Pág.56
5.4.1 Medição de frequência natural.....	Pág.56
5.4.2 Análise química.....	Pág.58
5.4.3 Ensaio mecânico de tração.....	Pág.59
5.4.4 Teste de proteção superficial	Pág.60
5.4.5 Teste de cisalhamento.....	Pág.61
5.4.6 Teste de estabilidade térmica	Pág.62
5.4.7 Teste de névoa salina	Pág.64
6. CONCLUSÕES	Pág.65
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	Pág.66

1. INTRODUÇÃO

Assim como as demais tecnologias já utilizadas nos modernos caminhões que trafegam em países da Europa e nos Estados Unidos, a transmissão automatizada começa a ganhar espaço no trem de força dos caminhões pesados e extrapeados brasileiros. O sistema monitora de forma eletrônica as mudanças de marcha de acordo com a condição de peso do veículo, inclinação do piso, posição do pedal do acelerador e acionamento da embreagem. A tendência do mercado de caminhões é que este volume estimado chegue, nos próximos 10-15 anos, a 85% dos veículos equipados com este conceito de transmissão *V-Tronic* de 16 velocidades, combinando o baixo custo de manutenção de uma caixa de câmbio manual com a facilidade da mudança automática de marchas, proporcionando conforto, segurança, maior produtividade ao motorista/empresa e economia na operação. Devido à elevada temperatura do óleo da caixa de transmissão em virtude da proximidade desta com o sistema de exaustão, ocorre redução de vida útil dos componentes internos da mesma, tais como, engrenagens, sincronizadores e rolamentos. Desta forma, tornou-se necessário a adição de um defletor de calor, conforme ilustrado na Figura 1, a fim de reduzir a troca térmica entre o tubo de exaustão e o trocador de calor da caixa de transmissão.

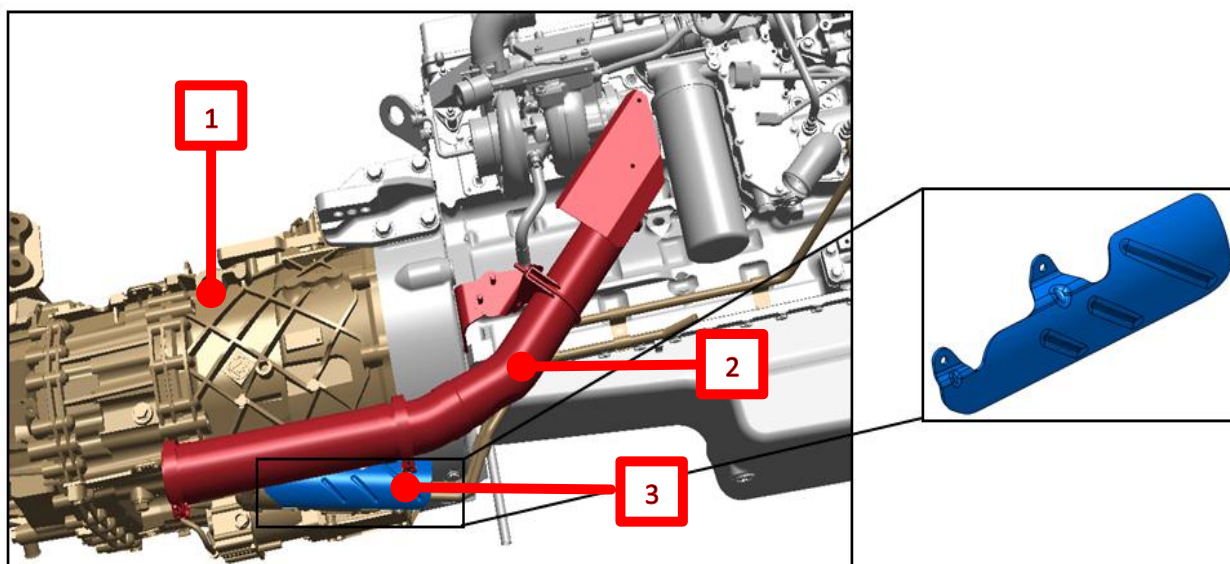


Figura 1 – Detalhamento da fixação do defletor de calor na caixa automatizada.
[Projeto interno - Cathia V5]

1– Caixa de transmissão automatizada; 2– Tubo de exaustão dos gases de combustão; 3– Defletor de calor.

Os defletores atualmente em uso são produzidos com aços normalizados LNE 380. Entretanto, sua vida útil tem se apresentado reduzida em relação à esperada em função de falhas nas regiões de sua fixação na estrutura da caixa de transmissão. O fornecedor da peça apresentou a sugestão de substituição do aço de grau LNE 380 pelo Quiet Steel® por este material já ser usado em outras aplicações na indústria automobilística fazendo parte de seu *know-how* de fabricação.

Neste estudo pretende-se verificar a viabilidade de substituição do LNE 380 pelo Quiet Steel® visando garantir a vida útil do equipamento de forma a beneficiar o cliente final com um veículo de alta qualidade.

2. OBJETIVO

Este trabalho consiste na implementação e validação da substituição do material de defletores de calor produzidos em aço LNE 380 por aqueles produzidos em aço Quiet Steel®. Esta substituição foi implementada com o auxílio de resultados de simulação das condições de uso dos defletores pelo método de elementos finitos assim como de resultados de testes de campo usando veículos instrumentados, testes de bancada e laboratoriais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Material do defletor

Por se tratar de um componente automotivo e para esta aplicação em específico, o aço LNE 380 foi selecionado para defletores de calor por apresentar uma boa combinação de propriedades mecânicas. Este material apresenta tensão de escoamento entre 380 e 540 MPa e 20% de alongamento mínimo, valores bastante adequados para peças que irão sofrer conformação e dobramentos.

O Quiet Steel® é uma linha de produtos metálicos de multicamadas especialmente desenvolvidos para controle de vibração e ruído. É composto por duas lâminas externas de aço LNE 380 com uma camada central de um polímero visco-elástico de 0,025mm (0,001”) de espessura, como ilustrado esquematicamente na Figura 2. A atenuação de vibração e ruídos ocorre com maior eficácia numa faixa de temperatura entre 10°C a 60°C (50°F a 140°F), com redução máxima a 27°C (80°F). É indicado para aplicações em componentes de carrocerias e chassis de veículos automotores, peças de pequenos motores, computadores/eletrônicos e sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado. Este tipo de material compósito pode ser fabricado utilizando-se aço laminado a frio, zincado, eletro-zincado, inox, alumínio, etc., sendo fornecido em bobinas, tiras, chapas ou *blanks*.

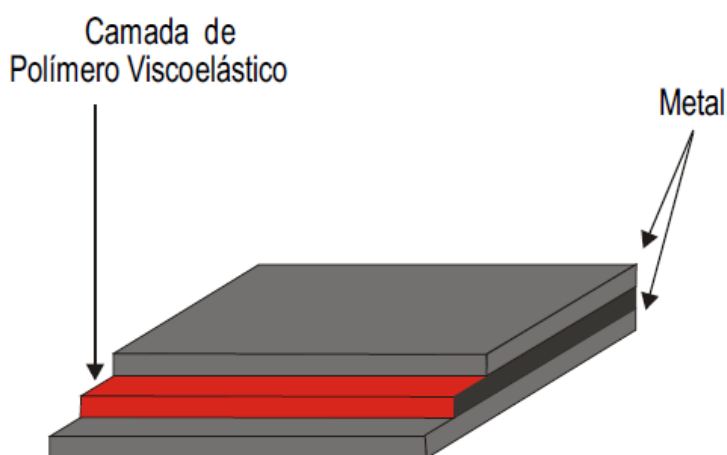


Figura 2 – Detalhamento do aço Quiet Steel®. [1]

A Figura 3 demonstra a características de redução de ruído do PCX-1 (aço Quiet Steel®). Quanto maior o valor do fator de perda, melhor será a capacidade de amortecimento de vibração e, conseqüentemente, redução de ruído do material. A Figura 4 apresenta todos os testes de laboratório que um material deve ser submetido para que seja aplicado como defletor de calor, conforme norma ASTM-D [1].

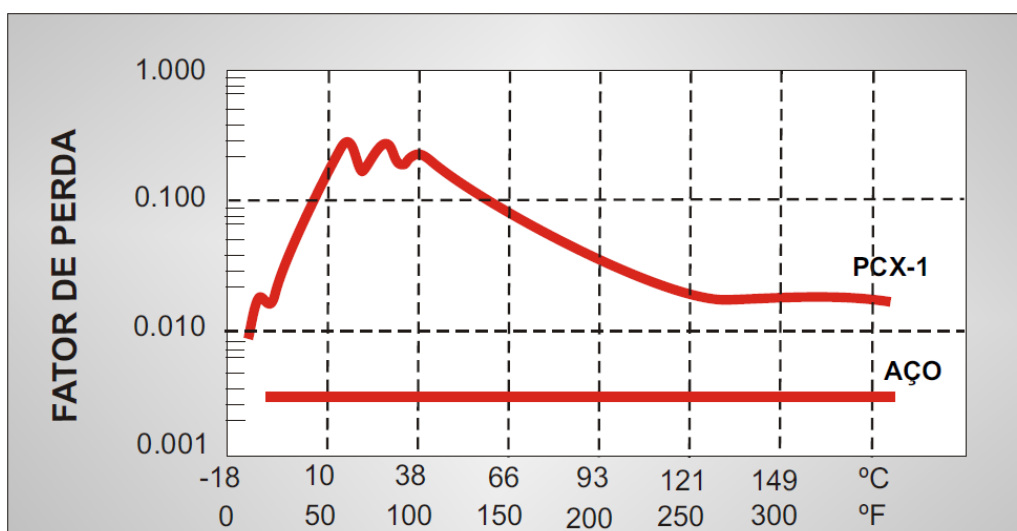


Figura 3 – Comparativo do fator de perda entre os aços LNE 380 x Quiet Steel®. [1]

Propriedades Físicas:

Redução de Ruído.....> 0,1 de 10 °C a 60 °C
 Resistência a descolamento conforme ASTM-D-1876 (por polegada de largura)..... 6lbs min
 Tensão de cisalhamento conforme ASTM-D-1002-72 (teste com aba de 10")..... 250psi min

Os seguintes ensaios não têm efeito sobre as propriedades físicas do PCX-1:

- Tratamento térmico a 232 °C (450 °F) durante 40 min.
- Imersão em óleo a 149 °C (300 °F) durante uma hora.
- Weather-o-meter de -32 °C a 107 °C (5 ciclos).
- Salt Spray (ASTM - D-117-64) por 250 horas.
- Câmara de umidade (ASTM-D-2247-68) por 250 horas.
- Exposição a processos químicos padrões, por exemplo anodização, metalização e eletrolgalvanização.
- Exposição a óleo de estampagem.
- Teste de estabilidade térmica de 38 °C a 205 °C com incremento de 14 °C.

Figura 4 – Requisitos das propriedades físicas do aço Quiet Steel®. [1]

3.2 Projeto de um novo modelo

Quando se propõe a alteração de um componente, dados adicionais àqueles de projeto precisam ser conhecidos, a partir de históricos de teste de fábrica assim como de clientes. São necessários testes de campo e de laboratório para confirmar as hipóteses assumidas no cálculo. Peças falhadas de modelos anteriores nos fornecem dados importantes. Servem para ajustar o procedimento de testes para produzir falhas que sejam semelhantes às falhas ocorridas em campo. Antes de fazer uma análise completa de tensões é possível determinar a relação entre as tensões nos pontos mais significativos e a carga, a partir de medidas em protótipos e assim reproduzir as mesmas condições para o novo projeto, conforme mostrado na Figura 5.

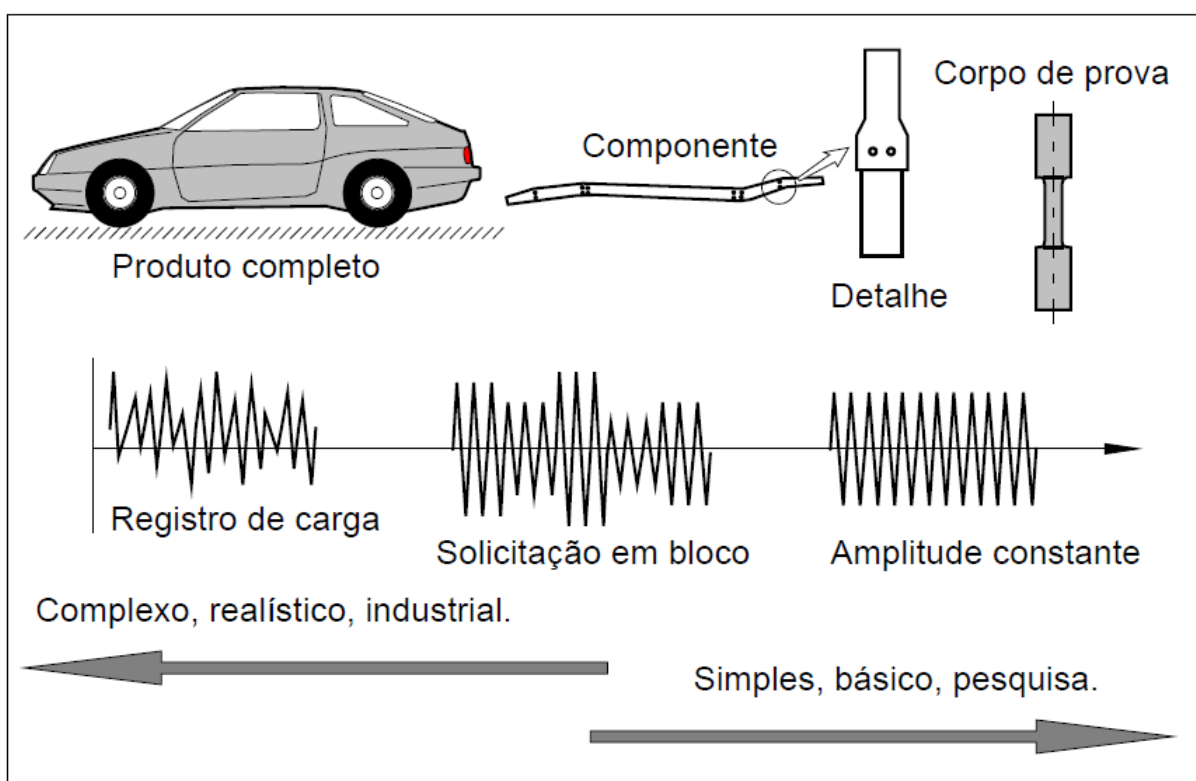


Figura 5 - Graus de sofisticação que podem ser adotados em ensaios de fadiga. [2].

Na etapa de transição do modelo para o produto, devemos ter um cuidado especial no projeto com relação a falhas por fadiga, estimando seu comportamento em uso por meio de testes de protótipos dos componentes em laboratório, cujos resultados podem levar a modificações do projeto.

3.3 Exigências de uma análise de fadiga

A resistência à falha por fadiga durante a sua vida útil é uma consideração importante, pois muitas estruturas estão sujeitas a cargas cíclicas. O engenheiro de testes deve realizar os ensaios de forma que eles reflitam com exatidão a capacidade da estrutura quanto à resistência à fadiga. Ao mesmo tempo os ensaios não devem ser excessivamente longos ou onerosos

No âmbito da engenharia moderna, cargas repetitivas, cargas variáveis e cargas rapidamente aplicadas são de longe mais comuns do que as cargas estáticas ou quase estáticas. Além disso, a maior parte das condições de projeto em engenharia envolve peças de máquinas sujeitas a cargas variáveis ou cíclicas. Tais cargas induzem tensões cíclicas ou variáveis que, frequentemente, resultam em falha por fadiga. A fadiga é um processo de falha progressiva que envolve a iniciação e a propagação de uma trinca até esta atingir um tamanho instável, causando uma separação repentina catastrófica em duas ou mais partes de uma peça. É difícil detectar as mudanças progressivas que ocorrem nas propriedades do material durante a solicitação em fadiga, e a falha por fadiga pode ocorrer, portanto, com pouco ou nenhum aviso. Períodos de repouso, com a tensão de fadiga removida, não levam a melhora ou recuperação significativa dos efeitos da solicitação cíclica anterior. Portanto, o dano produzido durante o processo de fadiga é acumulativo. As falhas por fadiga já têm sido reconhecidas há cerca de 150 anos, mas somente com o advento dos maquinários de alta velocidade e de alto desempenho assim como o desenvolvimento da indústria aeroespacial, a atenção foi direcionada ao tema para se tentar compreender melhor o processo de fadiga. [3]

3.4 Cargas e tensões variáveis

Cargas variáveis e espectros de carregamento produzindo espectro de tensões associados em uma peça de máquina refletem a configuração de projeto e o uso operacional da máquina. Talvez, o espectro de solicitação de fadiga mais simples ao qual um elemento de máquina possa ser submetido seja o padrão senoidal tensão-tempo com média nula, de amplitude e frequência constantes, aplicado por um número de ciclos especificado. Tal padrão tensão-tempo, muitas vezes referido como tensão cíclica completamente alternada ou com média nula é ilustrado na Figura 6(a). [4]. Na Figura 6 estão também indicados alguns dos parâmetros mais comumente usados para caracterizar o processo de fadiga (em laboratório ou em campo):

$\sigma_{\text{máx}}$ e $\sigma_{\text{mín}}$ correspondem aos valores máximos e mínimos das tensões atuantes; σ_a é a amplitude de tensão, calculada como $\sigma_a = (\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}})/2$; sendo positivos os valores de tensões trativas e negativos os valores de tensões compressivas; σ_m é a tensão média, calculada por $\sigma_m = (\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}})/2$; e a razão de tensão $R = \sigma_{\text{mín}}/\sigma_{\text{máx}}$. Na maior parte das vezes, entretanto, os parâmetros para análise de um componente em serviço não são facilmente determinados por causa da natureza aleatória ou semi-aleatória dos carregamentos. Nestes casos, as tensões e frequências registradas no componente em serviço (ver Figura 5) podem ser tratadas de forma a simplificar a análise do problema, por exemplo, descrevendo-as em blocos de carregamentos com diferentes amplitudes (σ_1, σ_2 , etc.), e acumulando-se os danos causados em cada bloco. O carregamento pode ainda ser simplificado pela aproximação do ciclo aleatório a um ciclo periódico senoidal, adotando-se um ciclo crítico representativo para cada condição de uso do componente.

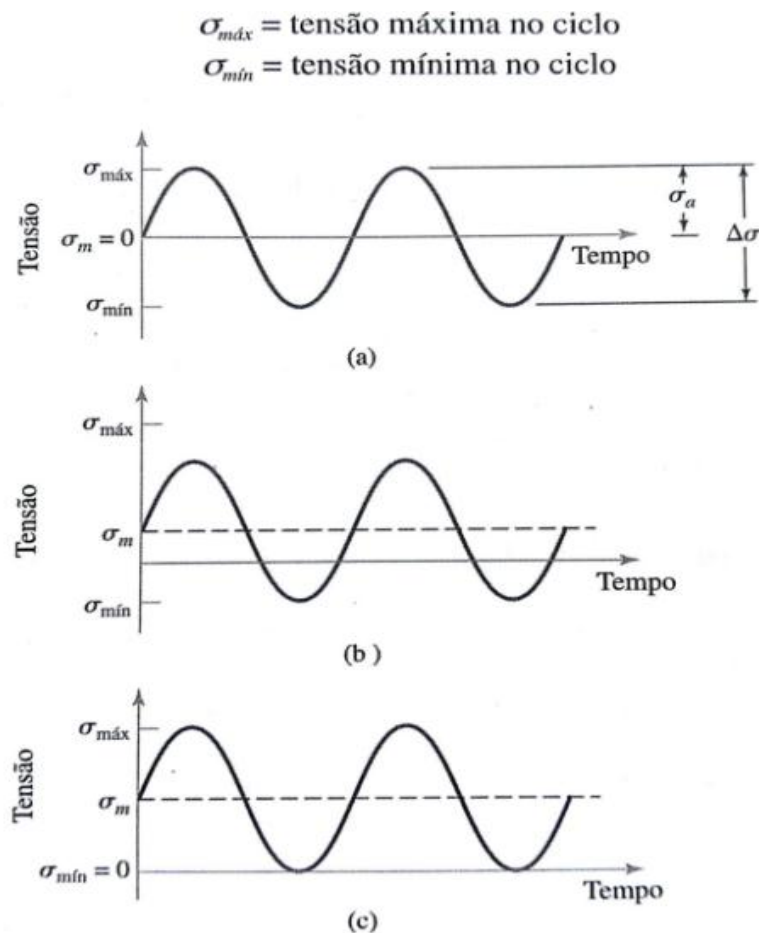


Figura 6 – Padrões de tensão-tempo com amplitude constante. (a) Completamente alternado; $R=-1$. (b) Tensão média não-nula. (c) Tração pulsativa; $R=0$. [4]

3.5 Ensaio de fadiga

Os principais tipos de ensaios de fadiga realizados são os de tração-compressão, torção cíclica ou de flexão plana, sendo que atualmente a tendência é de usar predominantemente testes axiais, de tração-compressão. A Figura 7 mostra os corpos de prova comumente usados nos ensaios de fadiga. Alguns ensaios são realizados com o uso de carregamentos combinados, ou seja, tração-flexão, tração-torção, flexão-torção, entre outras combinações. Atualmente, o estudo da fadiga é feito tomando por base os dados obtidos com ensaios de tração-compressão, com controle de carga no regime de altos ciclos e com controle de deformação no regime de baixos ciclos. Os equipamentos de ensaio são, na sua grande maioria, máquinas eletro-hidráulicas servo controladas, com realimentação do sinal de controle e possibilidade de medida de várias grandezas simultaneamente. Nos ensaios com controle de deformação, as curvas são de ϵ_a (componente dinâmica da deformação) contra o número de ciclos, N , ou de $\Delta\epsilon$, faixa de variação da deformação, contra N .

Muitas vezes o interesse é de obtermos o comportamento do material quando há propagação de trincas de fadiga. Neste caso, o corpo de prova é pré-fissurado e a velocidade com que a trinca cresce e as intensidades dos carregamentos cíclicos são monitoradas.

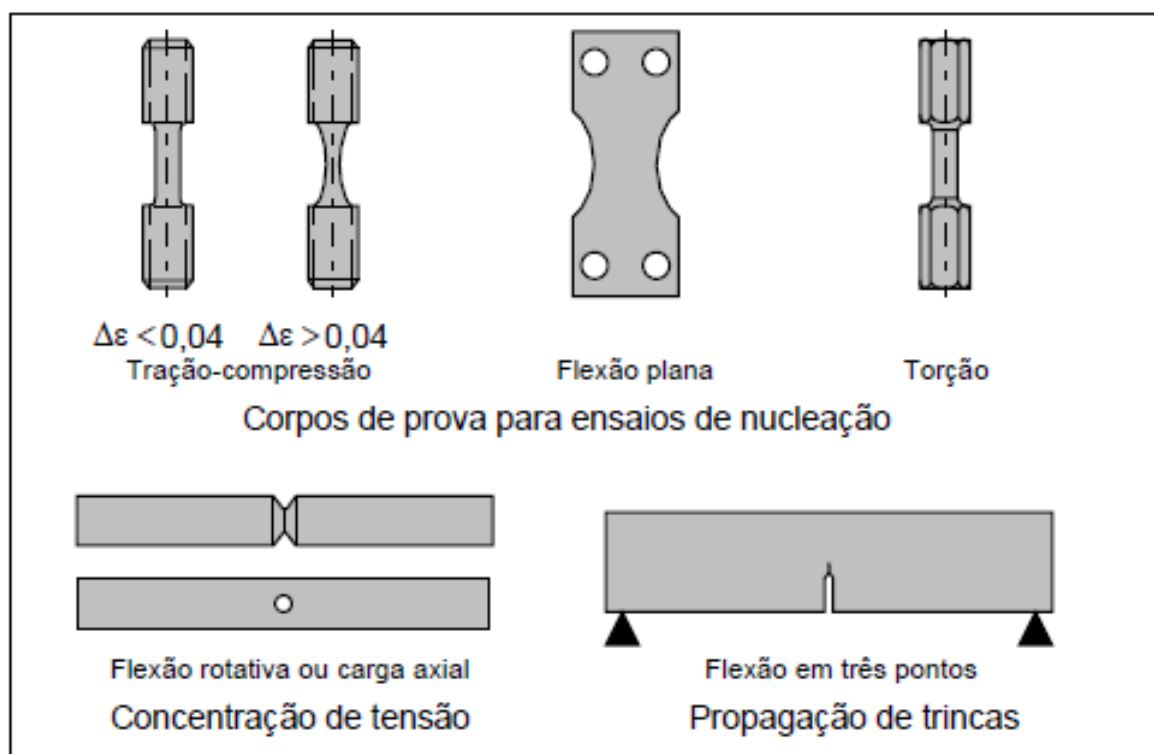


Figura 7 – Tipos de corpos de provas para diferentes ensaios de fadiga. [4].

Peça x Corpos de prova

A essência do presente trabalho é investigar o comportamento mecânico de uma peça utilizada em caminhões em serviço, particularmente em condições de esforços cíclicos. Este estudo pode ser realizado em laboratórios utilizando corpos de prova ou de ensaios utilizando diretamente a peça. Os resultados obtidos em cada modo de estudo não são diretamente comparáveis e as principais diferenças necessitam ser levadas em conta.

Os corpos de prova têm a sua superfície retificada ou muitas vezes polida, enquanto que o componente mecânico é apenas usinado ou mesmo é usado no estado bruto de fabricação, como de laminação, de forjamento, de solda ou de fundição. Estas diferenças são importantes, principalmente para peças projetadas para vidas elevadas. Um acabamento superficial de pior qualidade em geral degrada a resistência à fadiga da peça, diminuindo em muito a sua vida útil. Outras variáveis tais como tensões residuais, tratamentos superficiais, ambiente agressivo, etc., também influenciam na vida do componente mecânico em relação à vida dos corpos de prova. Isto faz com que devemos levar em consideração estes efeitos quando do projeto de produtos que irão trabalhar naquelas condições. [4]

3.6 Critérios de projeto para fadiga

As peças e componentes devem ser projetados e calculados para apresentar resistência à fadiga nas condições de aplicação, o que pode ser obtido através do uso de diferentes materiais, alterações dos coeficientes de segurança, etc. Os critérios para projeto de fadiga foram sendo substancialmente alterados com o desenvolvimento da técnica e do conhecimento do problema de fadiga. Muitos destes critérios são ainda válidos, pois as condições de uso de diferentes componentes mecânicos são as mais diversas possíveis e existem situações onde os critérios, mesmo os mais antigos, são ainda aplicáveis. Os principais critérios de projeto, colocados aproximadamente em uma ordem cronológica de desenvolvimento, são descritos a seguir.

Projeto para vida infinita

Esse critério exige que as tensões atuantes estejam suficientemente abaixo da tensão limite de fadiga pertinente. Muitas peças que operam com um carregamento cí-

clico aproximadamente constante durante vários milhões de ciclos devem ser dimensionadas para vida infinita.

Projeto para vida finita

Se um componente for projetado para a carga máxima esperada, as dimensões, peso, custo, etc., serão excessivos, desnecessários, pois a carga máxima ocorrerá apenas algumas poucas vezes ao longo da vida útil do equipamento; logo o projeto para vida finita sob a ação destas cargas é plenamente justificável. A vida selecionada para o projeto deve incluir uma margem de segurança para levar em consideração a grande dispersão da vida de fadiga (relações de vida máxima, vida mínima da ordem de 10 para 1 podem ser facilmente encontradas nos ensaios de fadiga) bem como outros fatores não conhecidos ou não considerados. O dimensionamento ou análise pode ser tanto feito com base nas relações tensão-vida ($\sigma - N$), deformação-vida ($\epsilon - N$), ou ainda de propagação de trincas pré-existentes ($a - \Delta K$). [2]

3.7 Sensores para medições de vibrações mecânicas

Nos últimos anos, algumas empresas têm surgido visando desenvolver a prestação de serviços na área de medições de vibrações mecânicas, com sistemas disponíveis capazes de efetuar análises de tendência, executar cálculos e reportar a condição dos equipamentos. Para a captação de vibrações, são utilizados sensores aos quais se dá o nome de transdutores de vibração mecânica. Existem vários tipos de sensores, sendo o acelerômetro o mais utilizado devido à sua enorme versatilidade, enquanto outros sensores se resumem a aplicações muito específicas. A análise de vibrações mecânicas é um método indispensável na detecção prematura de avarias, através da observação da evolução do nível global de vibrações e de uma análise das respectivas frequências, na análise espectral. Os transdutores são colocados em diversos pontos da máquina, para coleta de informações nas direções radial e axial. Eles podem ser utilizados de várias formas, através de base ponteira, base magnética, base roscada ou colada para um controle permanente.

O principal objetivo na seleção do sensor é assegurar antecipadamente que o sinal da vibração está dentro de vários limites. Os sensores para altas temperaturas não incorporam o amplificador, este ligado a um cabo especial já fora da zona de elevadas temperaturas. Para a seleção dos transdutores é necessário conhecer sua ga-

ma de utilização, sensibilidade, frequência (ou tempo de resposta), compatibilidade com o meio ambiente, precisão e características elétricas. [5]

Funcionamento dos Acelerômetros

O princípio de funcionamento do transdutor de aceleração baseia-se nos cristais piezoelétricos que, quando sujeitos à compressão, geram um pequeno sinal elétrico proporcional à aceleração. Quando se encontra em funcionamento, o transdutor acompanha a vibração transmitida pelo equipamento em estudo, a massa no interior do transdutor tende a manter-se estacionária no espaço. Um transdutor sensível à aceleração denomina-se por acelerômetro, e este é fixado em uma superfície em movimento, onde haverá um deslocamento da massa em seu interior provocado pela força motriz F que dá origem ao movimento. Esta força é igual ao produto da aceleração com a massa sísmica. O tamanho do acelerômetro (massa sísmica) vai influenciar a gama de frequência utilizável e a sua sensibilidade. Regra geral, quanto maior for o acelerômetro, maior a sua sensibilidade e menor a gama de frequência máxima utilizável. O intervalo de frequência em que os acelerômetros trabalham situa-se abaixo da sua primeira frequência natural. A sua sensibilidade é medida em milivolts por unidade de aceleração "g" e é aproximadamente constante até 1/5 da frequência de ressonância. Por esse motivo, é aconselhável o uso do acelerômetro até este limite superior de frequência.

As principais características dos acelerômetros podem ser resumidas nos seguintes itens:

- Vasta gama de frequências utilizável, de 1 a 10000 Hz. Existem modelos de acelerômetros que podem medir baixas frequências na ordem dos 0,02 Hz;
- Fáceis de instalar e no geral são menores e mais leves do que outros tipos de transdutores;
- São muito robustos e estanques, pelo que se tornam especialmente apropriados para trabalhar em locais fabris;
- Resistem ao choque, quedas, humidade, poeiras, óleo e outras agressividades ambientais e de manuseamento;
- Pouco sensíveis a vibrações laterais, transversais e a campos magnéticos. São, por isso, bons na aplicação em grandes motores elétricos.

3.8 Medição de frequência natural

Em um sentido amplo, poderíamos dizer que a análise modal é um processo por meio do qual descrevemos uma estrutura em termos de suas características naturais, que são as frequências naturais, os fatores de amortecimento e as formas modais, ou seja, suas propriedades dinâmicas. Visando melhor explicar o que estas propriedades dinâmicas significam, usaremos o exemplo da vibração de uma placa simples. Considere uma placa plana, com as bordas livres, sobre a qual foi aplicada, em um de seus cantos, uma força F , conforme ilustrado nas Figuras 8 e 9. Pensamos em uma força estática que causaria alguma deformação estática na placa. Entretanto, o que gostaríamos de fazer é aplicar uma força que varie com o tempo de um modo senoidal. Esta força apresentará um valor de pico constante, mas sua frequência de oscilação pode variar, e a resposta da placa devido a esta força será medida com um acelerômetro fixado em outro canto da placa e registrada em função do tempo como ilustrado na Figura 9. A intensidade das respostas varia com a frequência da força aplicada, apresentando picos denominados modos de ressonância. A análise da resposta gráfica completa é chamada de análise modal. Um componente deve evitar ser usado em uma condição de carga cíclica que o faça operar em qualquer um de seus modos de frequência natural.

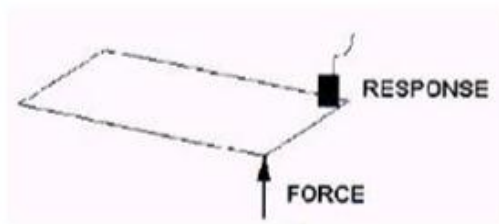


Figura 8 - Placa excitada por força variável. [5]. Figura 9 - Resposta da placa. [5]

3.9 Métodos de elementos finitos (MEF)

Quando surge a necessidade de resolver um problema de análise de uma estrutura, a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto à geometria, modelo do material constituinte e ações aplicadas. O modo como o MEF é formulado e aplicado depende, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema. Referem-se, em seguida, alguns aspectos que é necessário levar em consideração na fase que antecede a análise de uma estrutura. As ações sobre as estruturas são em geral dinâmicas, devendo ser consideradas as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos seus componentes fica sujeito. Por este motivo, seria de esperar que a análise de uma estrutura tivesse obrigatoriamente de levar em consideração os efeitos dinâmicos. Contudo, em muitas situações é razoável considerar que as ações são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezáveis as forças de inércia. Nestes casos a análise designa-se estática. São considerados problemas em que se supõem válidas as simplificações inerentes a uma análise estática. Na análise de uma estrutura sólida, é habitual considerar que os deslocamentos provocados pelas ações exteriores são muito pequenos quando comparados com as dimensões dos componentes da estrutura. Nestas circunstâncias, admite-se que não existe influência da modificação da geometria da estrutura na distribuição dos esforços e das tensões, isto é, todo o estudo é feito com base na geometria inicial indeformada. Se esta hipótese não for considerada, a análise é designada não linear geométrica. É também frequente considerar que, ao nível do material que constitui a estrutura, a relação entre tensões e deformações é linear. Nos casos em que esta simplificação não é considerada, é necessário recorrer a algoritmos específicos de análise não linear. [5]

Exemplo de aplicação do Método de Elementos Finitos

Apresenta-se, em seguida, um exemplo de aplicação do MEF, que consiste na análise de uma estrutura do tipo consola curta de pequena espessura, sujeita às ações indicadas na Figura 10. Nestas condições pode-se admitir que se trata de um meio contínuo, sujeito a um estado plano de tensão. Na Figura 10 está representada a malha utilizada, que é constituída por 92 elementos finitos quadriláteros, sendo cada um destes elementos definido por 4 nós. Encontram-se também assinalados os 5 nós que estão ligados ao meio exterior. Depois de completada a análise da estrutura pelo MEF, fica-se a conhecer os valores aproximados dos deslocamentos e das

tensões instaladas. Na Figura 11 está representada a malha deformada pela ação das forças aplicadas à estrutura. Para permitir uma melhor visualização dos deslocamentos, estes são multiplicados por um fator de ampliação. Como referência, é também representada a malha original indeformada. Com o tipo de visualização utilizado na Figura 11 é possível ter uma percepção imediata dos locais em que as tensões principais apresentam maiores valores, bem como da trajetória das tensões dentro da estrutura. Neste tipo de representação cada segmento de reta está orientado segundo uma direção principal de tensão e a sua grandeza é proporcional ao valor da correspondente tensão normal. A cor verde indica que se trata de uma tração e à cor vermelha está associada uma compressão. Na Figura 12 o valor da componente vertical do vector deslocamento é representado em cada ponto, por intermédio de uma codificação por cores. Consultando a escala lateral, fica-se a conhecer a ordem de grandeza do deslocamento vertical em qualquer ponto da estrutura. Na Figura 12, o tipo de visualização gráfica coincide com o da Figura 13, tratando-se também da representação de um campo escalar por intermédio de uma codificação por cores. O campo representado na Figura 13 é o das tensões normais σ_y , sendo y o eixo vertical. Esta componente do tensor das tensões é sempre perpendicular à facetas horizontais.

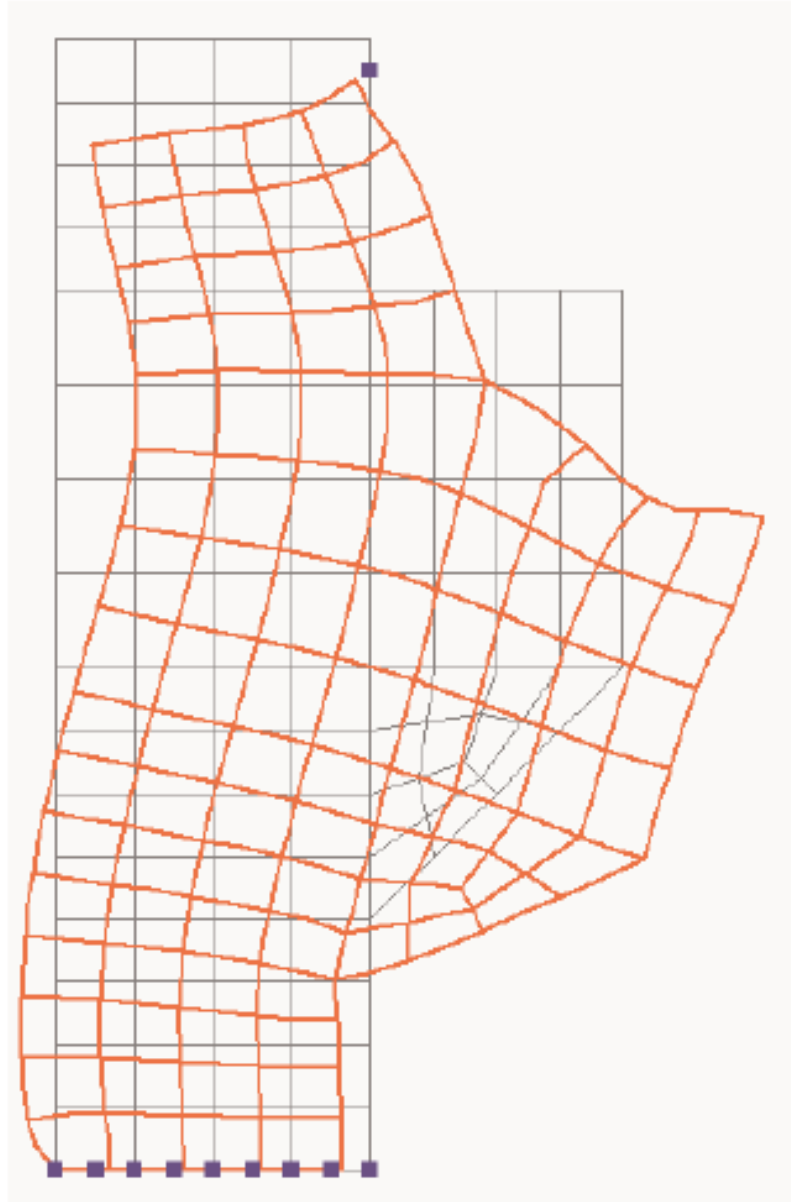


Figura 10 - Malha deformada representada sobre a estrutura indeformada. [5]

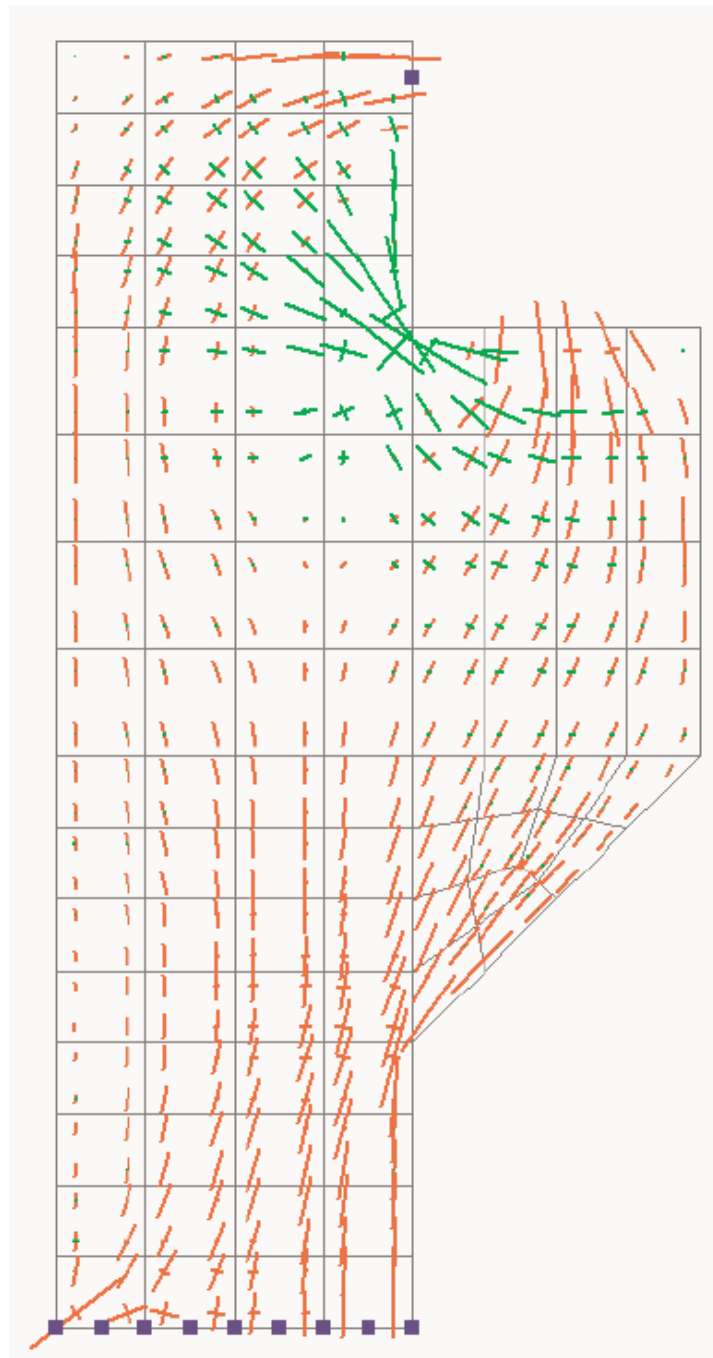


Figura 11 - Tensões principais e respectivas direções. [5]

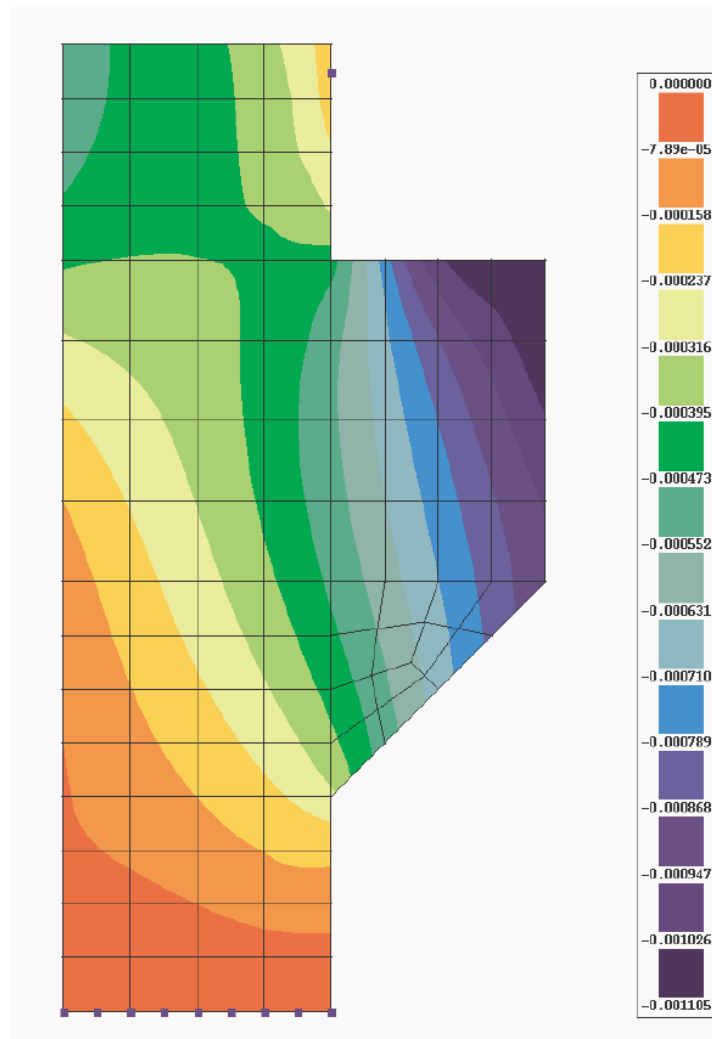


Figura 12 - Campo de deslocamentos verticais. [5]

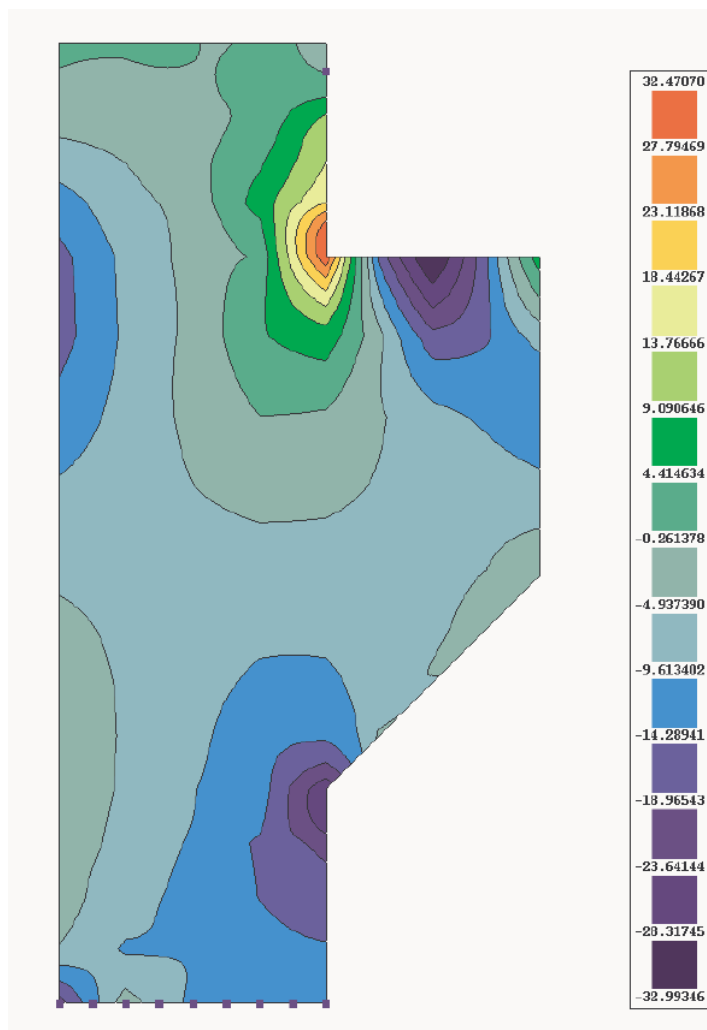


Figura 13 - Campo de tensões normais segundo um eixo vertical. [5]

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais dos defletores

Neste trabalho foram utilizados defletores de calor produzidos em aço LNE 380, a partir de chapas de aço de 4 mm e 3 mm de espessura, assim como em Quiet Steel®.

O Quiet Steel® consiste em um material de multicamada em aço LNE 380 com espessura menor revestida internamente por composto polimérico (viscoelástico), para redução de ruído e atenuação de vibrações. Este material, descrito no item 3.1, é atualmente bastante utilizado na indústria automotiva. [6]



Figura 14 – Comparativo de espessura e massa entre os defletores LNE 380 x Quiet Steel®. [6]

4.2. Simulação numérica

Objetivo:

Esta análise é baseada no cálculo de MEF através de análise de tensão em função da simulação da peça através de seus pontos de fixação e regiões de tensão. Devi-

do à frequência de falhas observadas em componentes fixados ao conjunto motor-caixa de transmissão (*Powertrain*).

Material Utilizado:

Utilizamos o software CATIA V5 versão 2014 (*Computer Aided Three-dimensional Interactive Application*) multi-plataforma CAD / CAM / CAE, atendendo de forma completa os processos de desenvolvimento de produto, desde sua especificação e concepção até a linha de produção, de forma associativa e integrada.

4.3. Testes de campo

Objetivo:

Estes testes são baseados nas condições mecânicas, tais como, amplitude e frequência de vibração.

Material e Equipamentos Utilizados:

Neste caso, os testes foram realizados através de um veículo de capacidade de carga de 26 toneladas com uma potência 280 CV em condições com maior criticidade e aplicações mais severas em terrenos com pisos irregulares e rodagens em rodovias com baixa frequência e alta tensão, onde o veículo foi testado com o seu peso bruto total com 26 toneladas.

Execução e interpretação dos resultados:

Instrumentamos o veículo com *strain gage*, um dispositivo cuja resistência elétrica varia proporcionalmente com a medida da deformação no dispositivo para realização de testes na rodovia presidente Dutra e em estradas de terra, a fim de avaliar a performance do defletor em aço Quiet Steel® nas seguintes condições:

“Rough Road” – Fazenda + Pista de Testes com irregularidades com 35.000 Km;

“Pot Hole Left and Right Wheels” – Somente pista de Testes com irregularidades com 500 ciclos.

Há vários métodos para a medição de deformação, neste trabalho em específico utilizamos o *strain gage* e os acelerômetros, dispositivos cuja resistência elétrica varia proporcionalmente com a medida da deformação no dispositivo. O mais usado é o *strain gage* metálico colado. O *strain gage* metálico é formado por um fio muito fino ou, mais comumente, por folhas metálicas dispostas em um padrão de grade. O padrão de grade maximiza a extensão de fios ou das folhas metálicas sujeitas à deformação na direção paralela. A grade é colada a um suporte fino, denominado base, que é fixada diretamente no corpo de prova. Assim, a deformação sofrida pelo corpo de prova é transferida diretamente ao *strain gage*, que responde com uma variação linear de sua resistência elétrica

4.4 Testes de bancada

Objetivo:

Este teste tem por objetivo realizar ensaio experimental simulando as condições de uso dos componentes controlados em bancada com temperatura de controlada entre 250 à 300°C, simulando as condições reais de trabalho da caixa e do sistema de escapamento. Foi usado um vibróforo de marca Amsler e modelo Wolpert na extremidade do qual foi fixado o defletor a ser ensaiado. Os ensaios foram realizados variando a frequência até que o primeiro modo de frequência natural fosse atingido e deixado nessa condição até a falha da peça ou até atingir o número de ciclos equivalentes a 10^7 de quilômetros rodados com o veículo.

Foi realizado ensaio de líquido penetrante após realização de testes de bancada para verificação de trincas e porosidades na região de fixação nas duas peças em LNE 380 e aço Quiet Steel®.

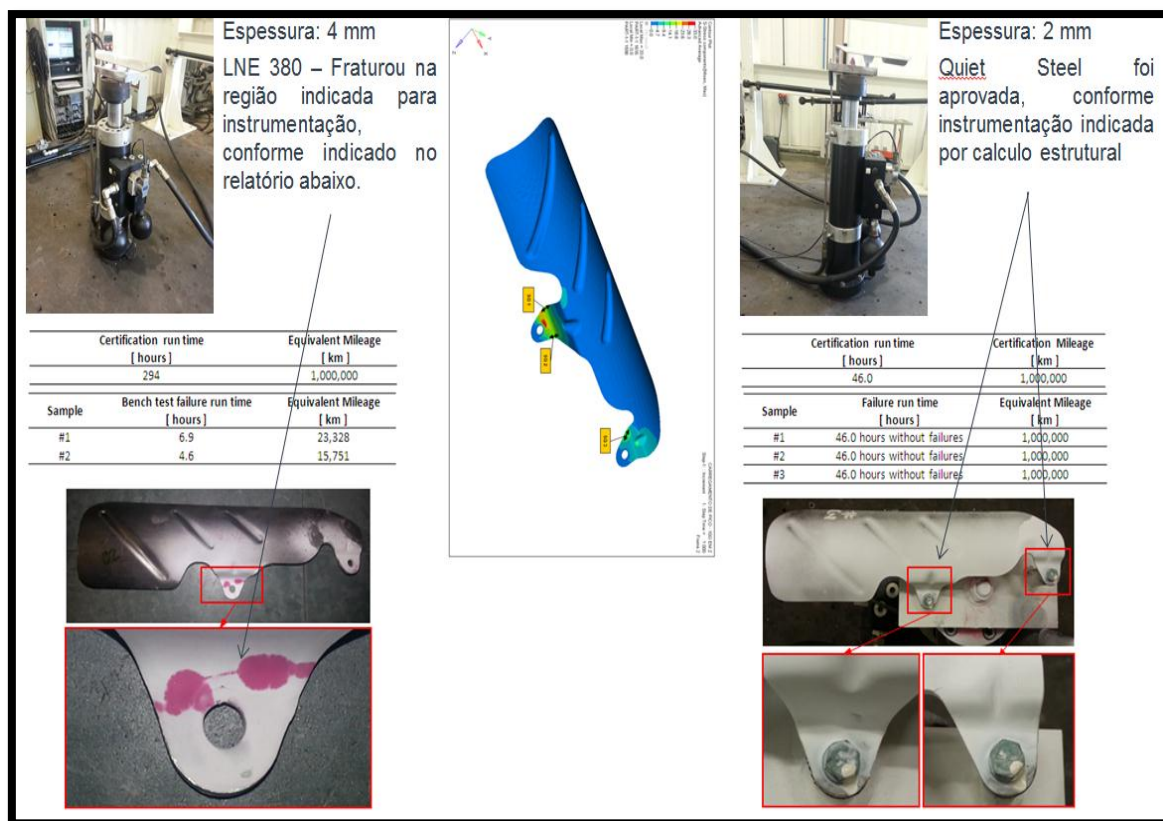


Figura 15– Detalhamento do ensaio de líquido penetrante e teste de bancada.

4.5 Validação do Produto

4.5.1 Medida de frequência natural

Objetivo:

Medimos a resposta da placa utilizando acelerômetros modelo Omega KFH-6-350-C1 nos principais pontos de fixação dos defletores em aço Quiet Steel®.

Para coleta das informações de frequência natural e amplitude para avaliação da ruptura do mesmo, notamos que a amplitude de vibração muda quando modificamos a frequência de oscilação da força F aplicada. Assim, variando a frequência de oscilação da força, haverá aumentos, como também diminuições, na amplitude de

vibração em pontos diferentes da escala de tempo. Apesar de estarmos aplicando o mesmo pico de força a sua frequência de oscilação varia e, assim, a resposta amplia quando aplicamos a força com uma frequência de oscilação o mais próximo da frequência natural da placa (frequência de ressonância) e alcança um máximo quando a frequência de oscilação for igual à frequência natural da placa.

4.5.2 Análise Química

Objetivo:

A composição química de um aço pode ser determinada por diversas técnicas de análise química, respeitando suas particularidades, mas este trabalho abordará apenas a técnica de espectrometria de emissão óptica.

Material e equipamento utilizado:

Para a determinação da composição química encontrada nos corpos de prova foi utilizado espectrômetro de emissão óptica modelo *spectro maxx 118628/05*, onde as amostras foram lixadas em lixadeira de fita de modo a garantir uma superfície isenta de impurezas e suficientemente plana de modo a posicionar corretamente dentro da câmara de queima do aparelho, conforme mostrado na Figura 16.

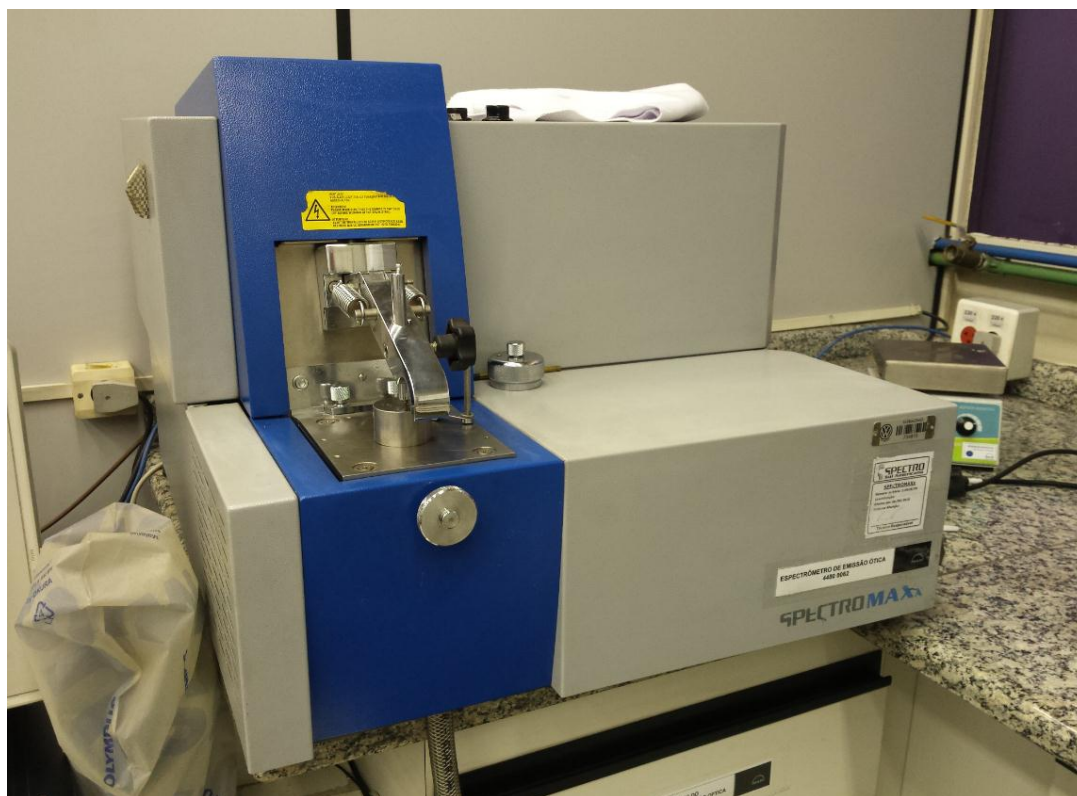


Figura 16 – Espectrômetro de emissão óptica modelo spectro maxx 118628/05 utilizado para realização da análise de composição química. [6]

Execução e interpretação dos resultados:

A mesa do equipamento possui um orifício onde fica posicionado abaixo do eletrodo. O eletrodo foi escovado para limpeza de resíduos que possam interferir nas análises de elementos químicos. Após a limpeza as amostras foram posicionadas de modo a cobrir completamente o orifício da mesa e com a haste do eixo de fixação a amostra foi presa pressionando-a contra a mesa.

A câmara então foi fechada adequadamente de modo a garantir o vácuo em seu interior e a amostra com a superfície a ser analisada foi presa contra a mesa cobrindo completamente o orifício da mesma. [6]

4.5.3 Ensaio mecânico de tração

Objetivo

O ensaio de tração consiste em aplicar uma força uniaxial no material, tendendo-o a alongá-lo até o momento de sua fratura. Os CP's (corpos de prova) na maioria das vezes são circulares podendo também ser retangulares. O corpo de prova (sempre padronizado por normas técnicas) é fixado pelas suas extremidades nas garras de fixação da máquina de tração. O corpo de prova é então submetido a um esforço, aplicando uma carga gradativa e registrando cada valor de força correspondente a um diferente tipo de alongamento do material, alongamento este medido por um extensômetro. O ensaio termina quando o material se rompe.

Material e equipamento utilizado

Para os ensaios de tração foram usinados 5 corpos-de-prova, a fim de garantirmos repetibilidade e precisão do ensaio. Os CP's foram usinados em torno CNC Romi Discovery 1200, utilizando as dimensões recomendadas conforme norma ASTM A 536. Os ensaios de tração foram realizados à temperatura ambiente em Máquina Universal de Ensaio da marca Kratos com capacidade 35T.

4.5.4 Teste de proteção superficial

Objetivo

Este teste possui por objetivo principal submeter o material a ser analisado em atmosferas com alta umidade em atmosfera condensada, a fim de verificar a resistência do mesmo à corrosão no metal base.

Material e equipamento utilizado

Neste ensaio utilizamos uma câmara de alternância climática modelo Thermotron 5M 32 com temperatura controlada durante 264 horas, conforme norma DIN EN ISO 9227 – Testes de Corrosão em atmosferas artificiais através de pulverização.

4.5.5 Teste de cisalhamento:

Objetivo:

O objetivo deste procedimento é definir os requisitos do método de teste de cisalhamento de sobreposição para determinar a resistência de um laminado de metal-metal com o polímero visco elástico intermediário.

Aplicação

Ao Controle da Qualidade de Recebimento/Laboratório de Testes Especiais (CQR/LTE), quando da necessidade de se realizar o teste de cisalhamento e determinar a resistência de um laminado de metal com metal. Aos demais setores, na observância deste método, quando da necessidade de se realizar o teste de cisalhamento e determinar a resistência de um laminado de metal com metal.

Material e Equipamento utilizado

- Equipamento de corte e medição de amostras:
- Equipamento não fixo;
- Régua ou fita métrica (em polegadas).
- Serrote, faca resistente ou outro dispositivo de corte.
- Equipamento de separação de laminados:
- Faca de pouca espessura.
- Ventilador de ar quente (opcional, dependendo da resistência do adesivo).
- Pano ou toalha de papel úmido (opcional, dependendo do uso do ventilador de ar quente).
- Grampo ou sargento (opcional).
- Equipamento de segurança adequado.
- Dispositivo de medição de carga com ajuste de velocidade, como o LLOYD LR 10 K-MK4.

Interpretação dos resultados do teste:

Normalmente, a carga aplicada em um teste de cisalhamento de sobreposição subirá rapidamente, nivelando próximo do pico e, em seguida, cairá muito rapidamente quando ocorrer o rompimento da fita adesiva ou da película de metal. O valor rela-

tado é o valor de pico registrado no teste. Com as duas películas separadas, as cargas desse pico é dividida pela área de teste que representa a resistência de cisalhamento de sobreposição do adesivo. Se o metal quebrar, a amostra deverá ser examinada com maior atenção. Se ocorrer uma falha no metal, bem na extremidade da área de teste, e não houver um estreitamento generalizado aparente na amostra, é provável que a película rompida tenha sido danificada quando a película de cima foi removida. O valor relatado poderá ser bastante inferior à resistência real da fita adesiva. Um corte da amostra de material adjacente deverá ser providenciado e testado outra vez. Se o metal exibir uma área relativamente grande de rebaixamento generalizado ou estreitamento, a ligação adesiva é mais forte do que a resistência de escoamento do metal e não poderá ser medida de maneira confiável por esse método. Existem várias formas de danificar a amostra, causando um valor relatado inferior à resistência real do adesivo. Porém, é improvável haver um aumento acidental da resistência. Portanto, valores muito baixos deverão ser confirmados com um exame da amostra adjacente e todos os valores serão relatados como um mínimo. Quando o teste é muito demorado ou os níveis de carga sobem, descem e depois sobem outra vez, é provável que a amostra não esteja firme nos fixadores. O resultado será inferior ao do valor real relatado. Substitua ou limpe os fixadores, prepare uma nova amostra e realize o teste novamente. Após os 08 minutos, retirar o painel da estufa e comparar com a retenção.

4.5.6 Teste de estabilidade térmica:

Objetivo:

Avaliar a desempenho do material quanto à resistência térmica.

Ensaio:

Teste de estabilidade térmica do laminado usando câmara climática Thermoclimatic modelo CCT GS 0405, conforme NBR 7977 (Determinação da estabilidade térmica por desprendimento) usando 5 corpos de prova de cada com dimensões de 25,4 x 150 mm e espessura de 2 mm.

4.5.7 Teste de névoa salina

Este é um método de "teste acelerado" para avaliar a resistência à Névoa Salina de chapas metálicas pintadas ou não, materiais destinados a fixação e outros.

Materiais e Equipamentos Utilizados:

Câmara Salina modelo 411-1C da Industrial Filter ou similar.

Solução aquosa (5 +/- 1) % em peso de NaCl, livre de níquel e cobre contendo não mais que 0,1 % de Iodeto de Sódio e não mais que 0,3 % de impurezas totais.

Painel de Prova

Os painéis de teste deverão ser amostras cortadas diretamente da produção ou preparados de acordo com a orientação da NCCA - National Coil Coaters Association, para preparação de painéis para teste (Boletim Técnico TB No. III-5).

Os painéis deverão medir preferencialmente 100 x 200 mm, com o lado maior perpendicular à direção de laminação da chapa.

Execução do Ensaio

A operação do equipamento deve ser seguida conforme Instrução de Trabalho IT-KR-01-023 (Câmara Salina 1) ou IT-KR-01-066 (Câmara Salina 2). Colocar os painéis na Câmara com uma inclinação de 15 a 30 ° em relação a vertical e com a face em teste paralela à direção do fluxo da névoa salina. Os painéis não podem se encostar para que se evite a formação de pilha, devendo o espaço entre os mesmos

ser o suficiente para que a solução salina depositada sobre a superfície de um painel não possa gotejar ou escorrer sobre o mais próximo. O ensaio deve ser contínuo durante toda sua duração, a menos das paradas necessárias para inspeção, arranjo ou remoção dos painéis. Estas paradas devem ter a mínima duração possível. A temperatura da Câmara e da torre de saturação, bem como a pressão de ar, devem ser registradas uma vez por dia com intervalo de pelo menos 16 horas.

Para observar qualquer corrosão do metal base, pressionar firmemente um pedaço de fita adesiva transparente ao longo do risco, da superfície dobrada ou da deformação (impacto), retirando-se a fita, em seguida, com um puxão. Repetir este procedimento até que não haja mais nenhum destaque.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O veículo antes de ser colocado em mercado é submetido a uma série de testes de campo que nos permitem obter resultados exigidos por norma, assim como avaliar o desempenho de todos os seus componentes quando são montados em conjunto. Nesta etapa são identificados problemas não previstos em projeto, como o observado nos defletores de calor, objeto deste estudo. Foram observadas falhas nas regiões de fixação do defletor fabricado em aço LNE 380 com 4 mm de espessura. Como esta peça não atua como um componente estrutural do conjunto *powertrain*, a falha foi presumida ter ocorrido por fadiga.

A análise deste problema foi iniciada com a simulação numérica das respostas da peça a esforços mecânicos aplicados nas 3 direções ortogonais entre si. Os resultados e discussão das simulações são apresentados no item 5.1. Como produto desta etapa, foram identificados os pontos críticos que serviram de base para o posicionamento dos transdutores, isto é, os *strain gages* e acelerômetros para os testes de campo e de bancada.

Foram então instrumentados defletores em aço LNE 380 / 4 mm e colocado em campo para avaliação de rodagem com pisos de diferentes características. Nestes testes de rodagem são coletadas informações tais como frequência e amplitude dos esforços aos quais o componente foi submetido. Uma primeira tentativa de solução do problema foi diminuir a espessura do defletor de 4 para 3 mm mantendo o mesmo material, isto é, em aço LNE 380. Não foi obtido êxito, indicando que seria necessário substituir o material. Foi, então, proposta a alteração do material do defletor de LNE 380 / 3 mm para aço Quiet Steel®. Além da substituição do material, foi também reduzida a espessura do defletor, trazendo-a para 2 mm. Os resultados do ensaio de campo com os defletores fabricados em aço Quiet Steel® são apresentados e discutidos no item 5.2.

Outra avaliação de desempenho das 3 soluções propostas foi feita através de ensaios de bancada, que têm como objetivo simular, em condições aceleradas, o comportamento dos defletores quando em uso. Nestes ensaios, as peças são colocadas a vibrar, sendo que o equipamento aplica a vibração variando sua frequência até que atinja o primeiro modo de frequência natural da peça fixada a ele. O conjun-

to permanece nesta situação até que a peça falhe ou atinja um número de ciclos que corresponda à vida infinita (vida útil prevista para o veículo). Os resultados dos ensaios com os defletores fabricados em LNE 380 / 4 mm e em aço Quiet Steel® são apresentados e discutidos no item 5.3.

5.1 Simulação numérica

O critério de falha de Von Mises, utilizado neste trabalho, indica que o escoamento de um material sólido inicia quando o segundo invariante de tensão atinge um valor crítico. O critério é, por esta razão, algumas vezes denominado plasticidade ou teoria do escoamento.

As Figuras 17, 18 e 19 apresentam os resultados de simulação de esforços aplicados sobre os defletores com 4, 3 e 2 mm de espessura, respectivamente. Nestas simulações, as propriedades informadas no software foram aquelas do aço LNE 380 para todos os casos. Em cada uma das figuras, pode ser observada a distribuição de tensões resultante da aplicação dos esforços nas direções Z (a), X (b) e Y (c). Esses esforços são aplicados em magnitude crescente até que a resposta da distribuição de tensões apresente valores superiores ao crítico (von Mises).

Em todos os casos, as simulações mostram que as falhas devem ocorrer próximas aos pontos de fixação como observado nas peças que deram origem a este estudo. Estes pontos serão usados como pontos de fixação de *strain gages* e acelerômetros para acompanhamento dos ensaios de campo e de bancada, respectivamente. Observa-se também que as máximas tensões de Von Mises ocorrem, para cada uma das peças, de forma crescente nas direções X, Y e Z. Os valores de tensão de von Mises são crescentes respectivamente, nas simulações das peças em LNE 380 4 e 3 mm, e em Quiet Steel®. Pode-se observar que o defletor fabricado em Quiet Steel® suporta tensões até duas vezes maiores em relação àquele fabricado em LNE 380 / 4mm, nas 3 direções. Isso sugere que o Quiet Steel® tem um grande potencial de substituição do LNE na aplicação sob condições de fadiga. Este critério é válido sob o ponto de vista de aplicação de cargas estáticas e, portanto, ainda não pode ser afirmado que o Quiet Steel® vá atender as condições de carregamento dinâmico.

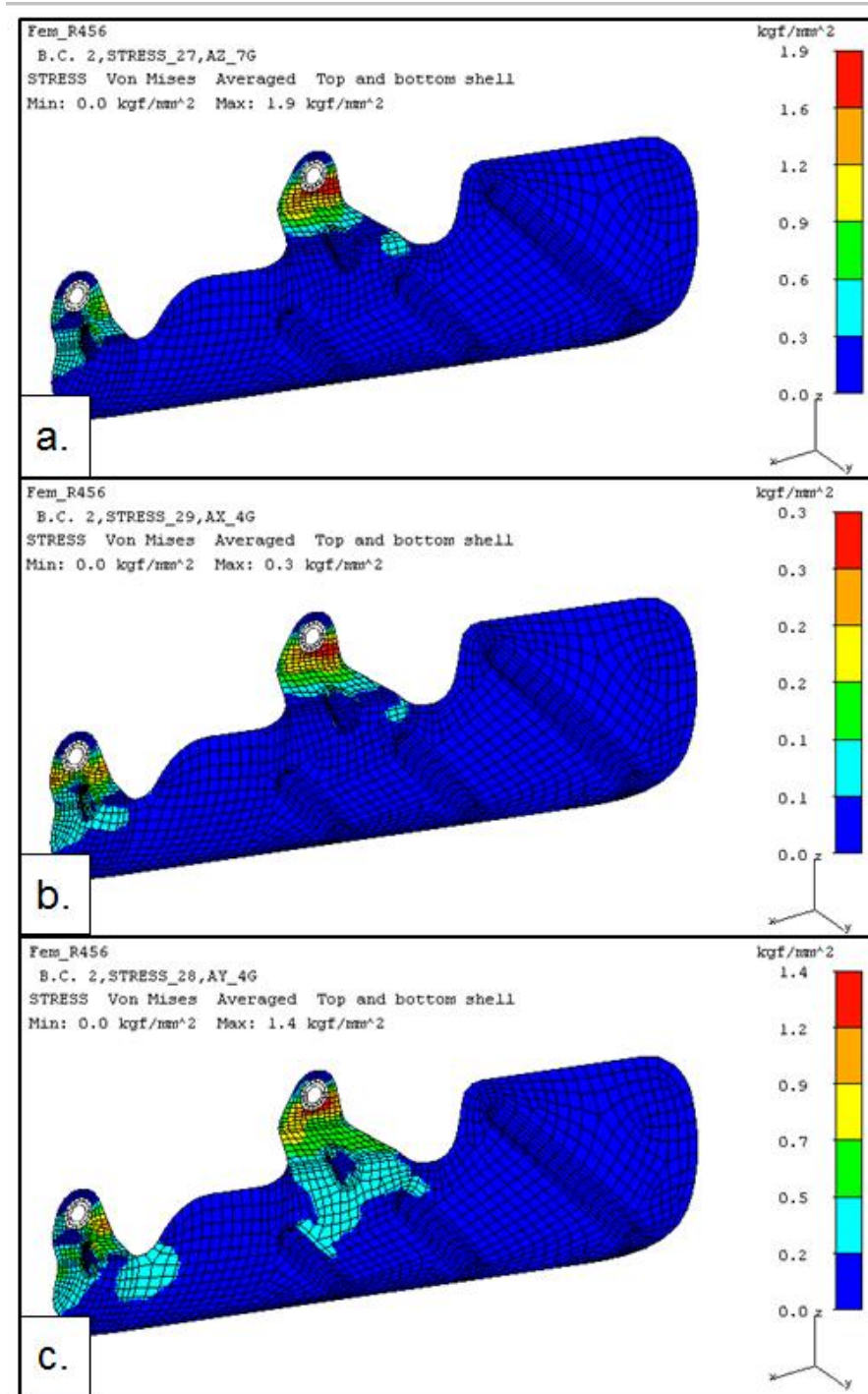


Figura 17 - Panorama de tensão de von Mises para carregamento nas direções Z (a), X (b) e Y (c). LNE 380 / 4 mm.

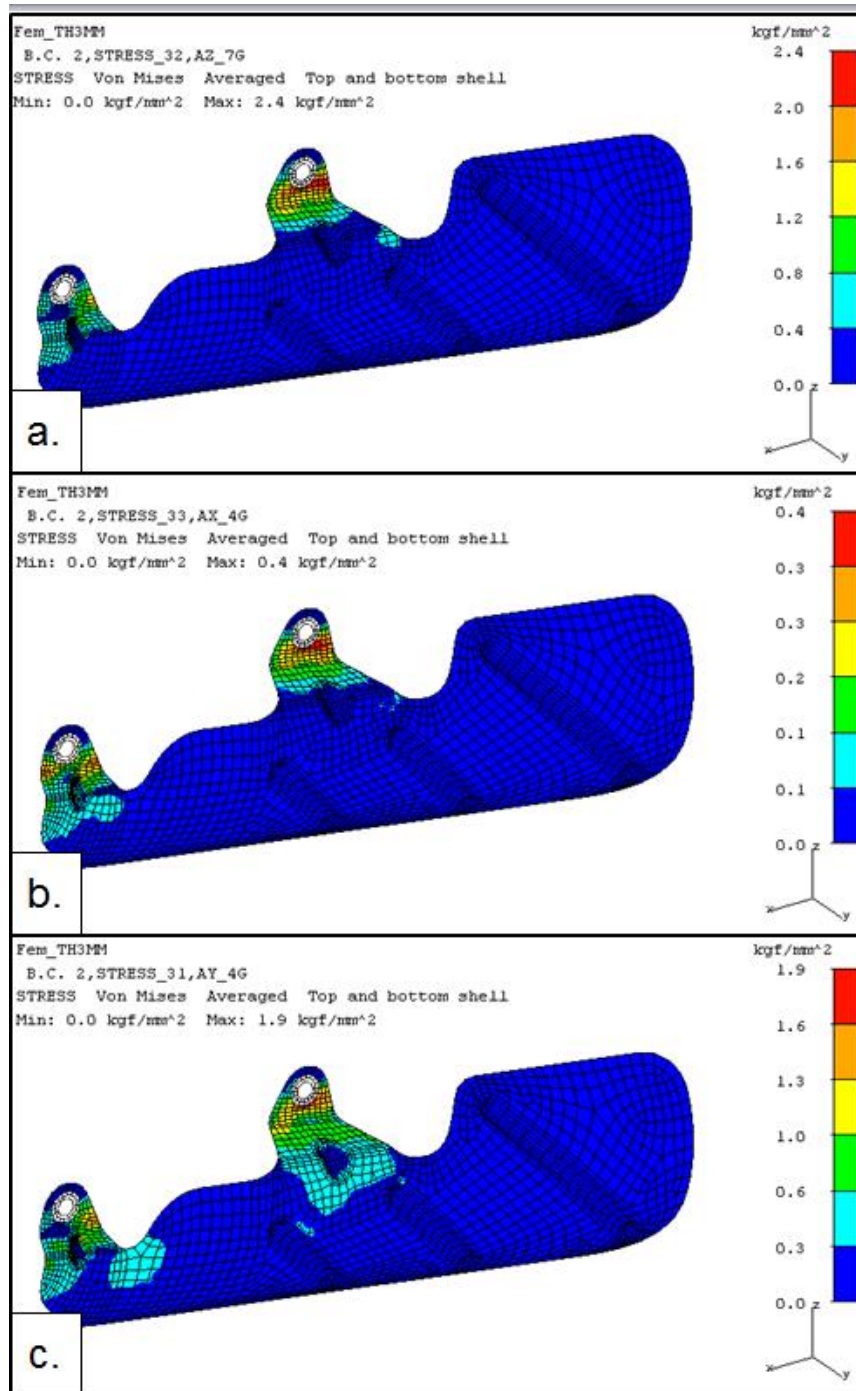


Figura 18 - Panorama de tensão de von Mises para carregamento nas direções Z (a), X (b) e Y (c). LNE 380 / 3 mm

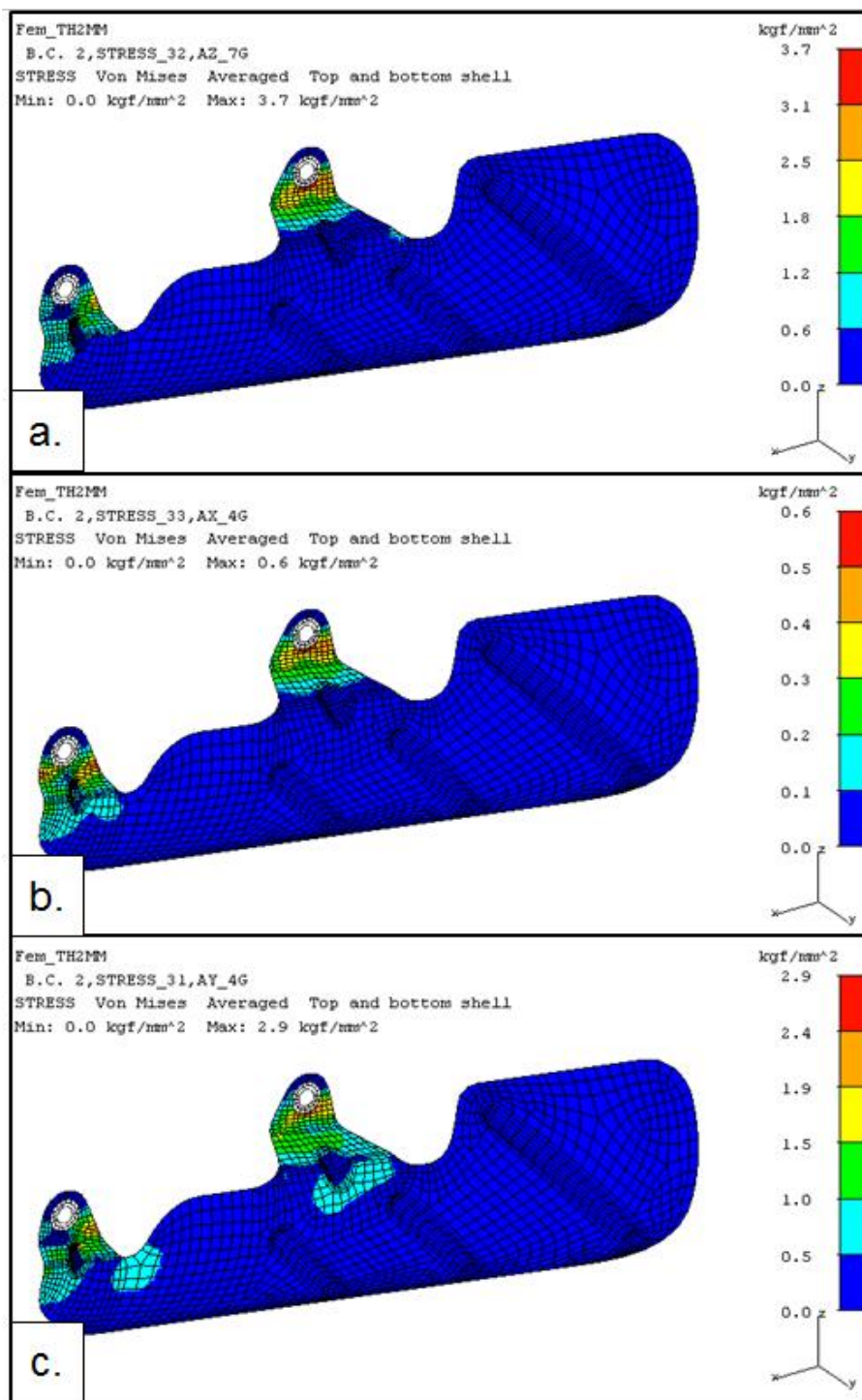


Figura 19 - Panorama de tensão de von Mises para carregamento nas direções Z (a), X (b) e Y (c). LNE 380 / 2 mm (considerando o resultado como representativo para o Quiet Steel®).

5.2 Testes de campo

Com base nos resultados de simulação numérica (item 5.1), foram inseridos *strain gages* nas regiões críticas dos defletores (próximas aos pontos de fixação) para coleta das informações de vibração (frequência e amplitude de tensão). Os valores máximos e mínimos de tensão medidos através de rodagem em diferentes pistas são comparados com requisitos normativos para avaliação de desempenho veicular. As condições de pista de rodagem e suas denominações utilizadas neste trabalho são as seguintes:

- 1- *Rough Road*: estradas de campo (fazenda) e pista de testes com irregularidades equivalentes às observadas nas fazendas;
- 2- *Pot Hole Left Wheel* e *Pot Hole Right Wheel*: pista de teste com irregularidades nas linhas de rodagem sob as rodas esquerda e direita, respectivamente;
- 3- *Dutra Highway*: pista da BR116 (rodovia Presidente Dutra).

As Figuras 20, 21 e 22 apresentam, na forma de barras, os valores máximos e mínimos de tensão medidos nos pontos de fixação dos *strain gages* (S1, S2 e S3) em defletores fabricados em Quiet Steel®. As linhas identificadas por *fatigue limit* representam os valores adotados como limites de fadiga para o LNE 380.

Em quase todas as condições de avaliação, os picos de medição não ultrapassaram o limite de fadiga do material, exceto nos testes realizados em Dutra Highway, onde as condições de tensão máxima de carregamento no ponto S2 ficaram um pouco acima do limite de fadiga. Porém, este valor foi ultrapassado somente 3% de todo o tempo do teste nesta condição de rodagem sugerindo que a substituição do material de LNE 380 para Quiet Steel® concomitantemente com a diminuição da espessura do defletor deverá atender satisfatoriamente as condições de uso desta peça em serviço.

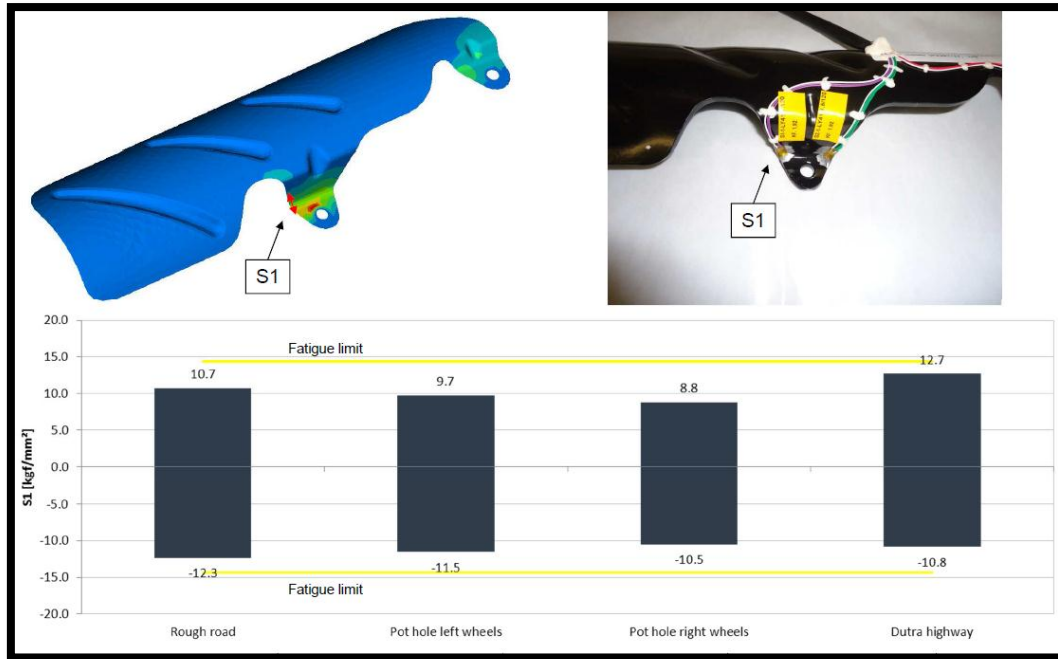


Figura 20 – Ponto de fixação S1 para instrumentação veicular.

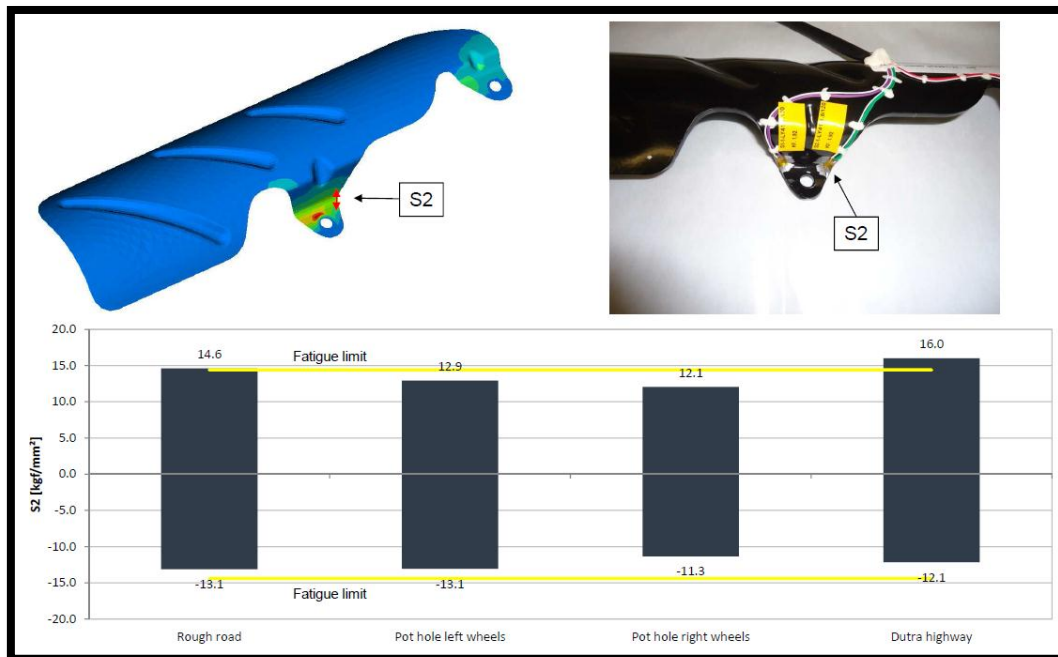


Figura 21 – Ponto de fixação S2 para instrumentação veicular.

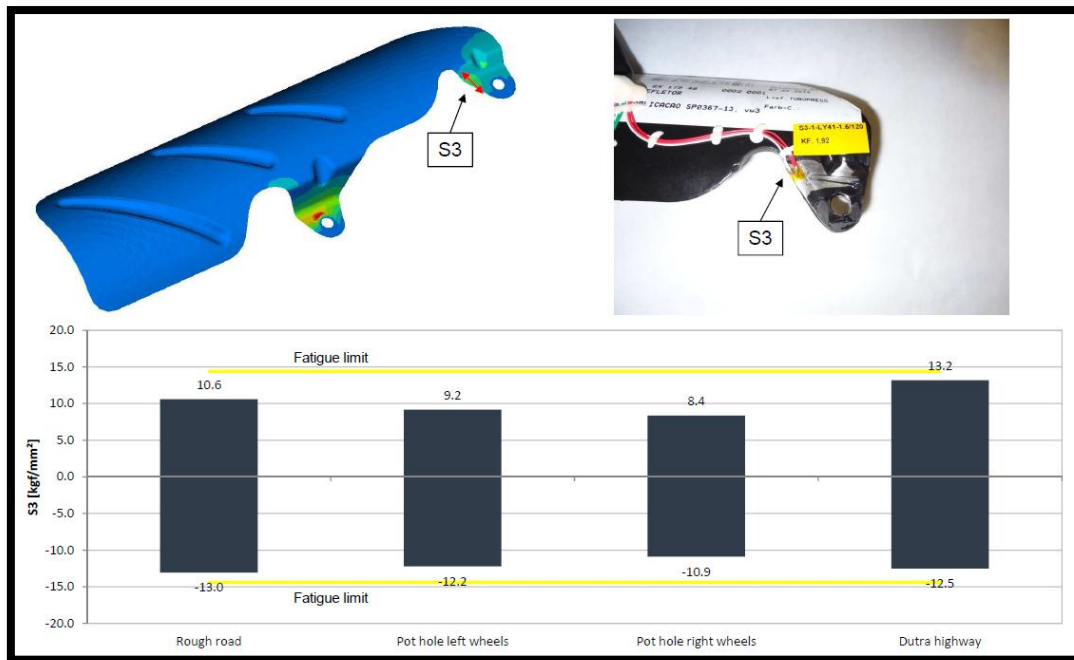


Figura 22 – Ponto de fixação S3 para instrumentação veicular.

5.3. Teste de bancada

As figuras 23 e 24, em suas partes superiores, ilustram o equipamento vibróforo com os defletores produzidos em LNE380 4 mm (figura 23) e em Quiet Steel® durante o ensaio de bancada. Nestes ensaios, as peças foram submetidas à vibração induzida pelo vibróforo, sendo que o equipamento varia a frequência até atingir a frequência natural do defletor em ensaio. O conjunto permanece nesta situação até que defletor falhe ou atinja um número de ciclos que corresponda à vida infinita (vida útil prevista para o veículo). Nestas figuras, em suas partes inferiores, são apresentadas em maior aumento as regiões de fixação dos defletores no conjunto *powertrain*. Através dos resultados de ensaios de líquido penetrante, foi possível identificar as peças em que ocorreram falhas. Na figura 23, pode ser observada, em vermelho, a existência de trincas nas posições S1 e S2 da região de fixação (ver item 5.1 e 5.2) de um dos defletores ensaiados neste trabalho, fabricados em LNE380 4 mm. Na figura 24, pode ser notado que o defletor fabricado em Quiet Steel® não apresenta falhas após ensaio no vibróforo e aplicação do líquido penetrante. Estas figuras também apresentam, de forma consolidada em tabela, os resultados dos ensaios realizados em diferentes amostras do mesmo material. Na parte superior das tabelas são apresentadas as condições de ensaio para cada material que equivalem à rodagem de 1.000.000 km do componente montado no veículo. Esta é, neste trabalho, a condição considerada de vida infinita. Vale ressaltar que as condições de ensaio para vida infinita dos defletores produzidos em diferentes materiais e espessuras variam porque estas peças apresentam rigidezes distintas assim como possuem condições distintas para operação em seus primeiros modos de frequência natural. Para o defletor em LNE380 4 mm, 1.000.000 km rodados em montagem no veículo correspondem a 294 h de ensaio. Para as duas amostras ensaiadas nesta condição, as falhas ocorreram com 6,9 h e 4,6 h de ensaios, equivalentes a 23.328 km e 15.751 km, respectivamente. Para o defletor em Quiet Steel® 2 mm, 1.000.000 km rodados correspondem a 46 h de ensaio. As três amostras ensaiadas nesta condição apresentaram vida infinita, ou seja, não apresentaram falhas durante as 46 h de ensaio.

Os resultados deste ensaio levam a concluir, assim como nos itens anteriores, que a substituição dos defletores de calor produzidos em aço LNE380 / 4 mm por aqueles produzidos em Quiet Steel® / 2 mm pode ser adotada com segurança para essa aplicação veicular.

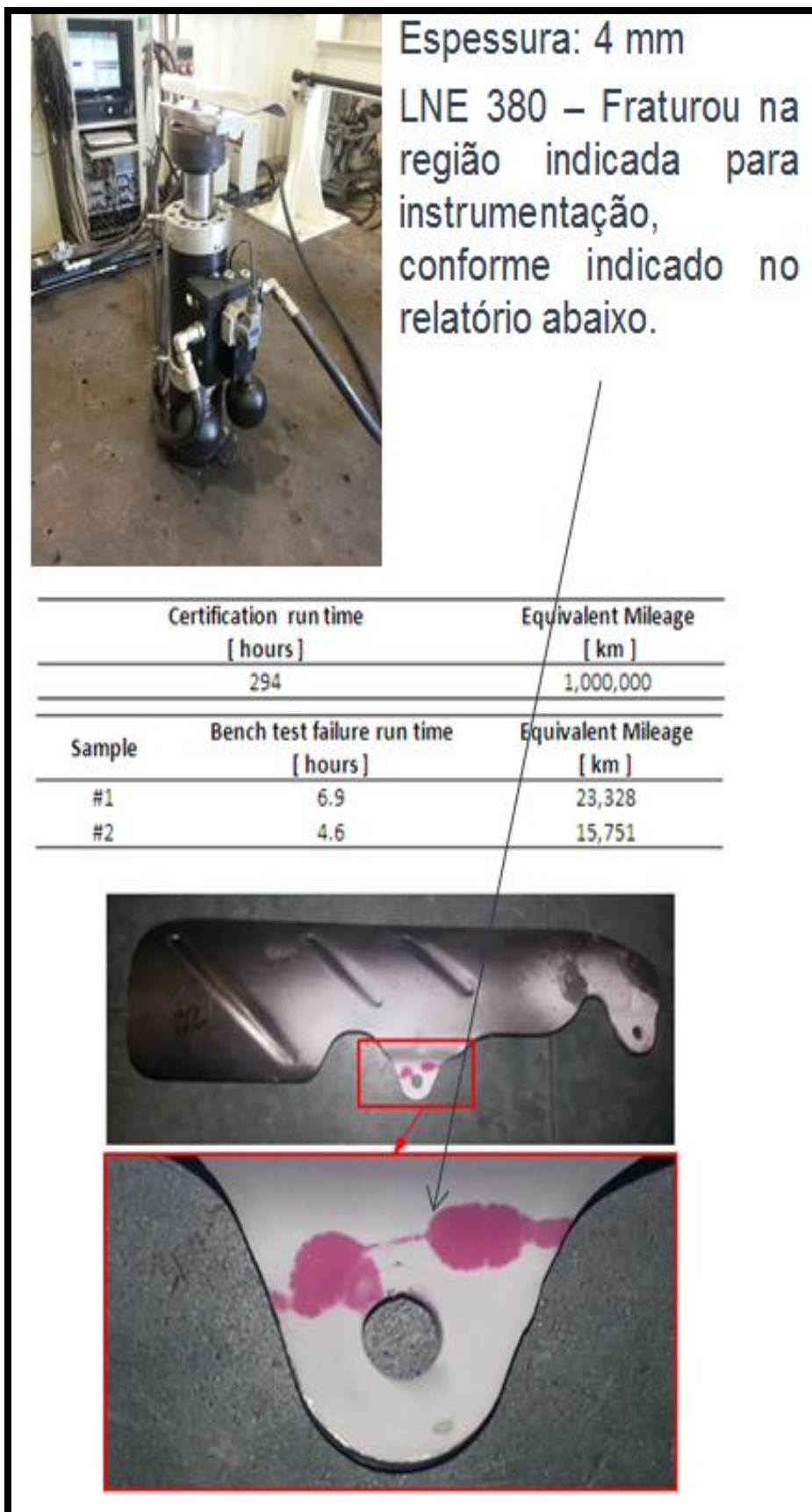


Figura 23 – Detalhamento da existência de trincas nas posições S1 e S2 da região de fixação.

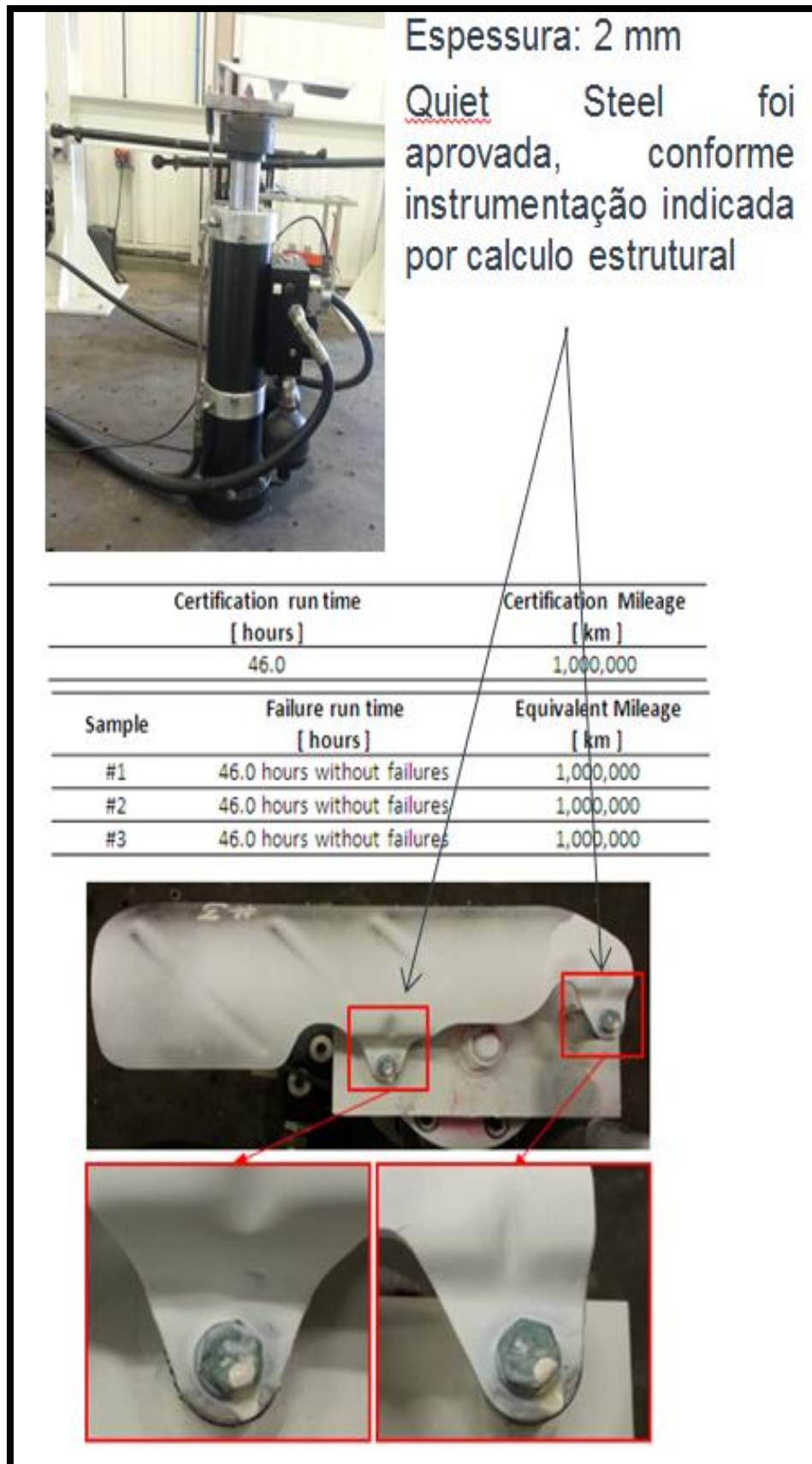


Figura 24 - Defletor fabricado em Quiet Steel® não apresentando falhas após ensaio no vibrômetro e aplicação do líquido penetrante.

5.4 Testes de Validação do Produto:

5.4.1 Medição de frequência natural

No presente trabalho foram realizadas análises modais nos defletores fabricados nos três tipos de material, que consistem no estudo das propriedades dinâmicas dos defletores de calor sob excitação por vibrações.

As vibrações aleatórias geradas, por exemplo, pela rugosidade da pista ao longo da trilha das rodas sobre as quais passa o veículo são, em geral, representadas pela densidade espectral de potência (*Power Spectral Density*, PSD - aceleração ao quadrado em função da frequência).

A Figura 25 apresenta a variação do primeiro modo de frequência natural em função da espessura do defletor de calor (4, 3 e 2 mm). No eixo das ordenadas temos o PSD ($(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$) e no das abcissas a frequência (Hz).

A Tabela 1 apresenta essas mesmas informações, porém com os valores nominais além daqueles de início (mínimo) e fim (máximo) do pico obtido nos ensaios com análise de sensibilidade de frequência natural em função da espessura, nos mostra que a espessura (e portanto também a massa) do defletor influencia diretamente na frequência natural da peça. O pico do primeiro modo obtido no defletor com espessura de 2mm, em aço Quiet Steel®, chega a ser 35% e 60% menor em relação àqueles dos defletores com 3 e 4mm, respectivamente, ambos fabricados em aço LNE 380.

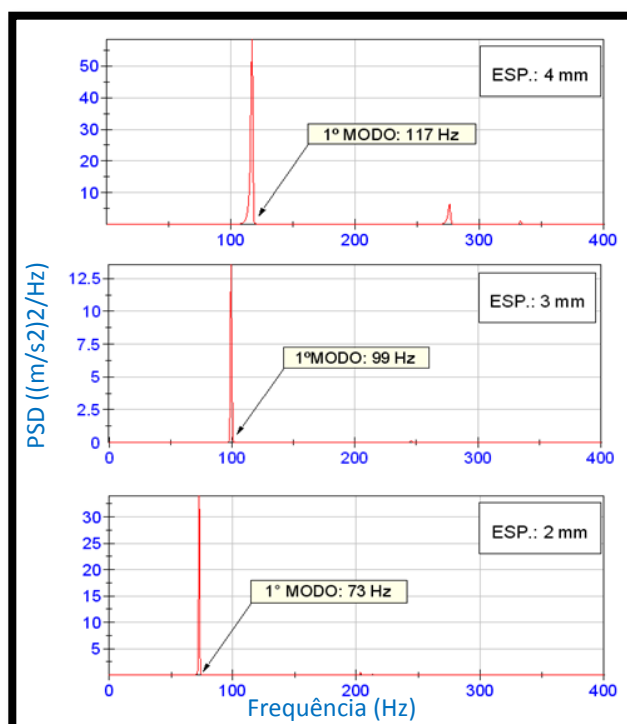


Figura 25 – Resultados dos ensaios de frequência natural.

Componente	Modo	Espessura (mm)	Frequência Natural (Hz)		
			Nominal	Mínimo	Máximo
Defletor	1º	2	73	70,7	80,2
		3	99	97,9	108,1
		4	117	112,4	131,3

Tabela 1 - Análise modal de sensibilidade de frequência natural.

5.4.2 Análise Química:

Resultados:

Conforme Tabela 2, os resultados encontrados estão em conformidade de acordo com a norma NBR 6656 (Bobinas de aço laminados à quente). [8]

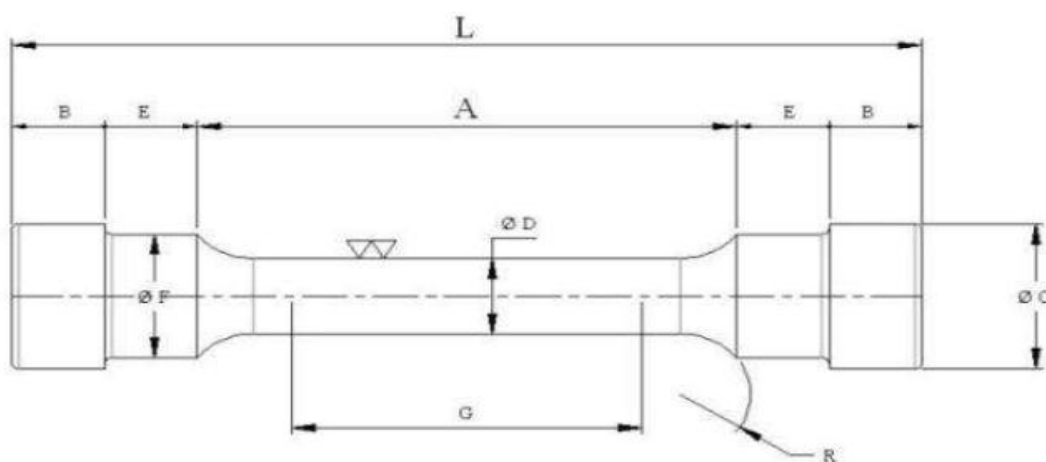
Composição química (%)		
Especificado EDDS	Encontrado	Equipamento utilizado
C 0.02 máx	0.016	Espectrômetro de Emissão óptica 4480 0062
Mn 0.40 máx	0.16	
Cu 0.10 máx	0.002	
P 0.020 máx	0.016	
S 0.020 máx	0.0080	

Tabela 2 – Análise de espectrometria de emissão óptica. [8]

5.4.3 Ensaio mecânico de tração:

Resultado:

Diante do ensaio realizado foi encontrado um valor médio dos 5 corpos-de-prova com tensão de 165 MPa com especificado de 105 à 170 MPa, conforme norma NBR 6656 e Tabela 3.





DIMENSÕES	DESCRIÇÃO	PADRÃO
A	COMPRIMENTO MÍNIMO DA SEÇÃO REDUZIDA	77
B	COMPRIMENTO MÍNIMO DA CABEÇA	13,25
C	DIÂMETRO DA CABEÇA	24±0,6
D	DIÂMETRO	12,5±0,3
E	COMPRIMENTO MÍNIMO DO RESSALTO	13,25
F	DIÂMETRO DO RESSALTO	16,5±0,2
G	MEDIDA DO COMPRIMENTO A SOFRER ALONGAMENTO	50±0,3
L	COMPRIMENTO MÍNIMO TOTAL	130
R	RAIO MÍNIMO	10

Tabela 3 – Detalhamento das dimensões de um corpo-de-prova para ensaio de tração [8].

5.4.4 Teste de proteção superficial:

Resultados:

Através da submissão do material em atmosfera com alta umidade e condensada, a fim de verificar a resistência do mesmo à corrosão, o mesmo resistiu a 264h sem apresentar corrosão no metal base, onde o especificado é de 240h, conforme DIN EN ISO 2808, ilustrado na tabela 4:

Data	Tempo		Corrosão		Temperatura		Solução			Interrupções	
	Hora	Soma	Branca	Vermelha	Cam °C	Sol °C	pH	Conc NaCl g/l	Vol Col ml	Tempo	Causa
12/09/2013	8:30	-	-	-	40°	-	7	-	-		
13/09/2013	8:30	24:00	-	N	40°	-	7	-	-		
14/09/2013	8:30	48:00	-	N	40°	-	7	-	-		
15/09/2013	8:30	72:00	-	N	39,9°	-	7	-	-		
16/09/2013	8:30	96:00	-	N	40°	-	7	-	-		
17/09/2013	8:30	120:00	-	N	40°	-	7	-	-		
18/09/2013	8:30	144:00	-	N	39,9°	-	7	-	-		
19/09/2013	8:30	168:00	-	N	40°	-	7	-	-		
20/09/2013	8:30	192:00	-	N	39,9°	-	7	-	-		
21/09/2013	8:30	216:00	-	N	40,1°	-	7	-	-		
22/09/2013	8:30	240:00	-	N	40°	-	7	-	-		
23/09/2013	8:30	264:00	-	N	40°	-	7	-	-		
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

Resultado do Ensaio	
Especificado:	Encontrado:
Resistir 240hs sem apresentar corrosão no metal base.	Peça resistiu 264hs sem apresentar corrosão no metal base.

Espessura da camada	
Especificado:	Encontrado:
Mínimo 75um – Conf. ISO 2808.	111um à 153um.

Tabela 4 – Detalhamento do teste de corrosão. [9]

5.4.5 Teste de Cisalhamento:

Resultado:

O filme plástico não apresentou mais que uma moderada perda do "Embossado" (Relevo Gravado) e/ou mudança do brilho, conforme mostrado na Figura 26. Considera-se moderada uma alteração facilmente perceptível sem necessidade de um exame profundo, mas insuficiente para alterar de maneira marcante o aspecto original.

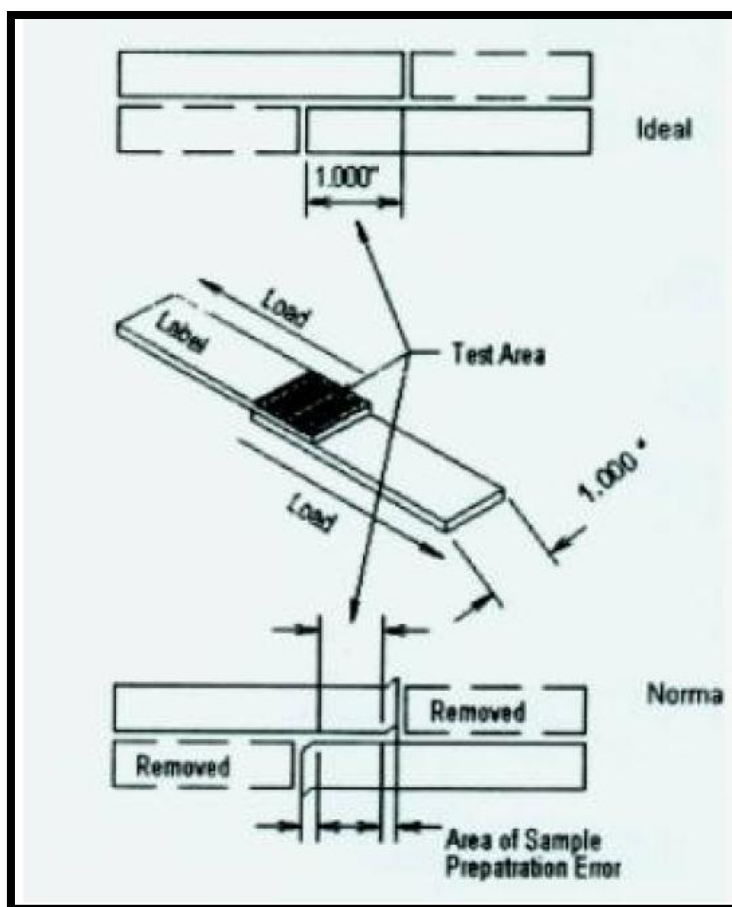


Figura 26 - Descrição da amostra de cisalhamento de sobreposição. [9]

5.4.6 Teste de estabilidade térmica:

Resultados:

Teste de estabilidade térmica do laminado, conforme Tabela 5:

Temperatura / período		T-Peel		Shear Test		Visual
		Inicial	Após teste	Inicial	Após teste	
1	200°C / 40 min.	22 lbf/in	20	470 lbf/in ²	390	Ap.
2	220°C / 10 min.		19		350	Ap.

Tabela 5 – Resultados do teste de estabilidade térmica. [10]

O material quando submetido aos testes de estabilidade térmica, apresentou resultados satisfatórios, com perda leve de aderência em relação aos valores iniciais e na avaliação visual sem evidência de descolamento a partir das bordas, conforme Figura 27:

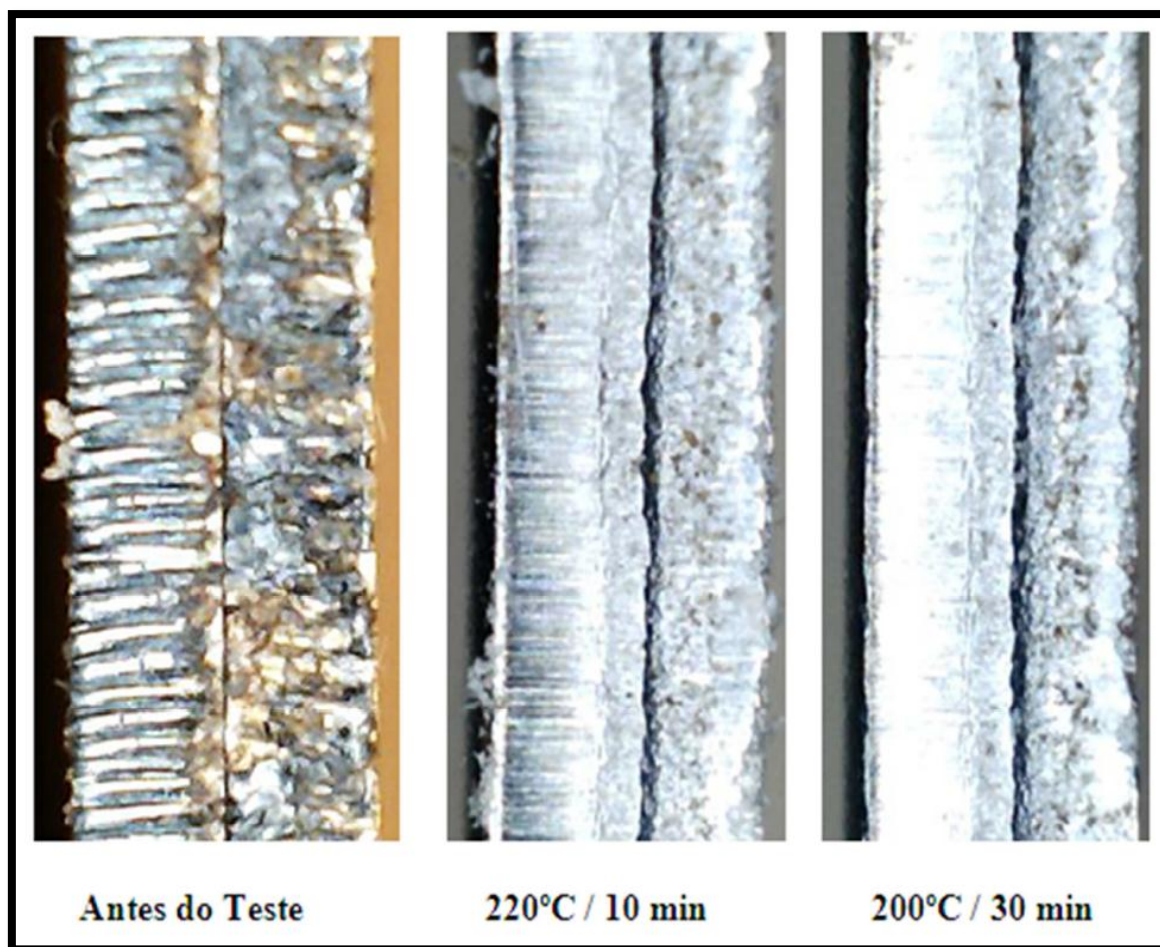


Figura 27 – Amostras do teste de estabilidade térmica - Ampliação do aparelho microscópio (vista perfil da peça) - Zoom de 5X. [10]

Nota:

Na análise visual consideramos resultado aprovado quando não há evidência de descolamento a partir das bordas.

Conclusão:

O material quando submetido ao teste de estabilidade térmica nas condições 1 e 2 apresentou resultado satisfatório, com perda leve de aderência em relação aos valores iniciais. [10]

5.4.7 Teste de névoa salina:

Resultados:

Conforme norma VW13750 o material resistiu a 240h sem apresentar corrosão no metal base, de acordo conforme Tabela 6:


Peça/ Material Nº : X3751				Ordem de Produção: -				Data Receb.: 05/09/13			
Descrição Peça/ Material: Defletor											
Cliente: MAN			Nº Desenho: 2T2301327			Data: 07/03/13			Nº da Peça Cliente: 2T2301327		
Fornecedor (Pintura/Zincagem): Croma											
Especificação/Norma de Referência: VW13750-(x630) conf. TL260 / (x650) conf.TL256											
Descrição do Corpo de Prova: -											
Obs.:											
Data	Tempo		Corrosão		Temperatura		Solução				
	Hora	Soma	Branca	Vermelha	Cam °C	Sol °C	pH	Conc NaCl g/l	Vol Col ml		
10/09/2013	8:30	-	-	-	35°	46°	7	50g/l	1,6ml		
11/09/2013	8:30	24:00	-	N	35,1°	46°	7	50g/l	1,8ml		
12/09/2013	8:30	48:00	-	N	35,2°	46°	7	50g/l	1,8ml		
13/09/2013	8:30	72:00	-	N	35,1°	46°	7	50g/l	1,9ml		
14/09/2013	8:30	96:00	-	N	35,1°	46°	7	50g/l	1,9ml		
15/09/2013	8:30	120:00	-	N	35,1°	46°	7	50g/l	1,9ml		
16/09/2013	8:30	144:00	-	N	35,1°	46°	7	50g/l	1,8ml		
17/09/2013	8:30	168:00	-	N	35,2°	46°	7	50g/l	1,7ml		
18/09/2013	8:30	192:00	-	N	35,1°	46°	7	50g/l	1,7ml		
19/09/2013	8:30	216:00	-	N	34,7°	46°	7	50g/l	1,6ml		
20/09/2013	8:30	240:00	-	N	35°	46°	7	50g/l	1,5ml		
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Resultado do Ensaio											
Especificado:						Encontrado:					
Resistir 240hs sem apresentar corrosão no metal base.						Peça resistiu 240hs sem apresentar corrosão no metal base.					
Espessura da camada											
Especificado:						Encontrado:					
Mínimo 75um.						100um á 127um.					

Tabela 6 – Detalhamento da peça após teste de salt spray. [11]

6. CONCLUSÕES:

Os materiais em estudo foram avaliados com base em propriedades que potencializem sua aplicação em campo, sempre com o foco em aumentar ao máximo a vida útil dos defletores de calor e reduzir o índice de perdas por quebra dos mesmos em operação.

Com base em todos os ensaios realizados entre estes materiais concluímos que, o melhor material para ser aplicado ao uso é a proposta em aço Quiet Steel®, devido as seguintes conclusões:

A proposta em LNE 380 com 4mm foi reprovada no teste de bancada e nas rodagens veiculares. A proposta em Quiet Steel® foi aprovada na bancada com *vida infinita*. O uso do Quiet Steel® propiciou redução de 50% na massa do defletor além de gerar uma economia no custo variável.

Capacidade de aplicação elevada em diversas partes do veículo, uma vez que, esta tecnologia é utilizada basicamente por todos os veículos de passeio.

O material é uma proposta para modificar os defletores atuais visando a redução de massa, ruído, vibração e custo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] MSC/TEKNO. Disponível em: <<http://www.msctekno.com.br/laminatesandcomposites>>, acesso em 23 de Março de 2016 e em Wolverine/Tekno Laminates and Composites Ltda <<http://www.wolverine-tekno.com.br/>>, acesso em 04 de julho de 2016.
- [2] DE OLIVEIRA; F. FERREIRA; J.L. ARAÚJO, J. A. **Identificação das Condições de Falha por Fadiga em Materiais**. São Paulo, ed. Acker, 2002.
- [3] CLOUGH, R. W. **The Finite Element in Plane Stress Analysis**, Ed. Pittsburgh, September 1960.
- [4] BROCH, J. T; GOODIER, J. N. **Mechanical Vibration and Shock Measurements**. Third Edition, Ed. Bruel & Kjaer, 1984.
- [5] ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **The Finite Element Method**. Fourth Edition, Ed. McGraw-Hill, 1986.
- [6] VARIAN, A. **Plasmas Em Química Analítica e Preparo de Amostras, Curso em Análise Química**. Departamento de Química / Ed. UFSCar. São Paulo, 2001.
- [7] CALLISTER JR, W.D. **Materials Science and Engineering**. Ed 1. Ed. Wiley & Sons, 1994.
- [8] JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas**. 4ª Ed. 2003.
- [9] ASHBY, M.; JOHNSON C.. **Materiais e Design - Arte e Ciência da Seleção de Materiais no Design do Produto** - 2ª Ed. 1999.
- [10] NASH, W. A.; POTTER, M. C. **Resistências dos Materiais**. Col. Schaum – Ed. Bookman 5ª Ed. 2014.
- [11] SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. Ed. Edgard Blucher, 2ª Ed. 2001.