

A importância dos testes de pulsação hidráulica de alta pressão para a validação de componentes estruturais mecânicos

“The importance of high-pressure hydraulic pulsation tests for the validation of automotive components and parts”

**Wolff Jairo Muller
Santos Marcio
Batista Ricardo
Seidl Bruno
Velludo Vitor**

A busca por eficiência e melhor qualidade na fabricação de componentes estruturais

ABSTRACT

The search for efficiency and better quality in the manufacture of structural components is a fundamental and essential factor for automotive parts manufacturers and any other industrial component that is subjected to pressure variations. Such components are used in vehicles such as trucks and buses, generators and agricultural and industrial machinery. For example, in the event of any problem in the manufacture of any component / part, it can result in a recall or even an accident putting the life of the vehicle occupants at risk and in the case of industrial machinery components it can also cause an accident or significant losses in productivity. Structural parts subject to vibrations and other cyclical loads, as in the case of components that undergo high pressure variations. To guarantee the reliability of the component, it is very important to evaluate its resistance in relation to the geometry, raw material, machining process and loading within the hydraulic system. In the development and manufacture of automotive components, several validation tests are required, one of which is fatigue. The purpose of this article is to demonstrate the importance of performing fatigue strength tests for any component, in the case of high pressure hydraulic pulsation tests, in order to evaluate its useful life, serving as a diagnostic analysis of possible failures.

RESUMO

A busca por eficiência e melhor qualidade na fabricação de componentes estruturais é um fator fundamental e essencial para os fabricantes de peças automotivas e a qualquer outro componente industrial que esteja submetido a variações de pressão. Tais componentes são utilizados em veículos como caminhões e ônibus, geradores e máquinas agrícolas e industriais. Por exemplo, caso ocorra qualquer problema na

fabricação de qualquer componente/peça, este pode originar um recall ou até mesmo um acidente colocando em risco a vida dos ocupantes do veículo e no caso de componentes de máquinas industriais também pode ocasionar um acidente ou perdas significativas na produtividade. Peças estruturais sujeitas a vibrações e outras cargas cíclicas, como no caso de componentes que sofrem variações de alta pressão. Para a garantia da confiabilidade do componente, é muito importante avaliar sua resistência em relação à geometria, matéria prima, processo de usinagem e carregamento dentro do sistema hidráulico. No desenvolvimento e fabricação de componentes automotivos, demanda-se diversos testes de validação sendo um deles o de fadiga. A proposta deste artigo é demonstrar a importância de se realizar testes de resistência a fadiga para qualquer componente, no caso testes de pulsação hidráulica em alta pressão, para assim avaliar a sua vida útil, servindo como análise de diagnóstico de possíveis falhas.

INTRODUÇÃO

Fadiga mecânica é o fenômeno de ruptura progressiva de materiais sujeitos a ciclos repetidos de tensão ou deformação. O estudo do fenômeno é de importância para o design e processo na fabricação de componentes, projeto de máquinas e estruturas, uma vez que a grande maioria das falhas em serviço é causada pelo processo de fadiga, cerca de 90%.

No caso do sistema de injeção em motor Diesel, quando em operação, os componentes responsáveis pelas interfaces de passagem do combustível sofrem um carregamento em altíssimas pressões. A passagem do combustível em alta pressão nestes componentes ocorre através de furações especificamente desenhadas para isto. Qualquer erro de

design, defeito de usinagem ou falha de material pode levar a fadiga de um componente.

A fadiga de um ou mais componentes que fazem parte deste sistema começa com uma ou várias trincas na furação de alta pressão destes, os quais se propagam no curso da aplicação repetida de forças até que a ruptura completa ocorra repentinamente quando a pequena porção não afetada é muito fraca para sustentar a carga. Tais componentes sujeitos a altas pressões, vibrações e outras cargas cíclicas devem ser projetados para evitar fraturas por fadiga. Por isto, para garantir a confiabilidade do componente, é muito importante avaliar a sua resistência em relação à geometria, matéria prima, processo de usinagem e carregamento dentro do sistema de injeção.

No caso, o teste de pulsação hidráulica em alta pressão, conhecido pela sigla HPPT (do inglês high pressure pulsation test), é utilizado para a avaliação da resistência a fadiga dos componentes com alta solicitação hidráulica, os quais são fabricados pela Bosch e fazem parte do sistema de injeção de combustível no motor. O sistema de pressão desses componentes é composto de furações (dutos) nos quais os níveis de pressão de operação em veículo são altíssimos.

OBJETIVOS

- Objetivo Geral:

- Baseado nos princípios de Wöhler, demonstrar a importância dos testes de pulsação e análise de fadiga para o desenvolvimento de componentes em geral submetidos a variação de alta pressão e por consequência a fadiga e assim garantir a segurança das pessoas, o cuidado com o meio ambiente, qualidade e durabilidade do produto final.

- Objetivo Específico:

- Demonstrar casos de aplicação hidráulica em sistema sujeitos a variação de alta pressão.

REVISÃO TEÓRICA

Teste de pulsação hidráulica em alta pressão

O teste de pulsação hidráulica em alta pressão, conhecido pela sigla HPPT (do inglês high pressure pulsation test), é utilizado para a avaliação da resistência a fadiga dos componentes altamente solicitados hidraulicamente, e que no caso são aqueles componentes que fazem parte do sistema de injeção de combustível no motor e também de máquinas hidráulicas industriais, por exemplo, tubos de alta pressão e componentes estruturais que estão submetidos a alta pressão. É amplamente utilizado na indústria, em especial na área de sistemas Diesel de injeção, para liberação de amostras, exames de requalificação de qualidade de produtos, validação de alterações em processos de fabricação, mudanças de matéria prima, design, entre outros.

Sua aplicação visa determinar os valores característicos que descrevem o comportamento mecânico de componentes consistindo do mesmo material e com a mesma geometria e condição de superfície (componentes idênticos de um único lote), sujeitos a esse teste sujeitos a uma carga cíclica alternante e por um número de ciclos determinado, que na maioria das vezes corresponde ao fim da vida útil do material. Essa carga (nível de pressão) aplicada ao teste pode variar, por exemplo, de 0 a 6000 bar dependendo do componente a ser testado, possuindo um comportamento de onda Senoidal.

A resistência à fadiga é melhor determinada usando o procedimento desenvolvido por Wöhler, o teste de Wöhler.

O teste consiste em definir a máxima pressão que um componente, em um sistema de injeção, consegue suportar com uma taxa de falha de uma peça por milhão (1 ppm).

Também facilita a análise, quando houver falhas, para identificar quais são as áreas críticas no componente, que posteriormente são investigadas.

Caso se verifique após o teste e análises que o sistema não é robusto suficiente para a pressão desejada, é um sinal de que o processo, o design ou o material atualmente utilizado não é apto para produção de peças com qualidade

Fadiga

A fadiga é conceituada dentro da ciência dos materiais como uma falha estrutural que ocorre quando um material é submetido a carregamentos variáveis. Essa falha é caracterizada pela geração e propagação de uma trinca até a eventual fratura do material (NORTON, 2013). Esse é o tipo de falha mais comum em componentes mecânicos (entre 50 e 90% dos casos). Isso acontece pelo fato de que as tensões repetidas (cíclicas) aplicadas no componente para gerar uma ruptura são muito inferiores às necessárias para causar a fratura devido a uma carga estática (NORTON, 2013). A consequência disso é que a falha ocorre de modo repentino e inesperado, muitas vezes de forma brusca, com características de uma ruptura frágil (NORTON, 2013). A análise do teste de fadiga é importante para ajudar a identificar possíveis falhas de construção de projetos estruturais de componentes que serão submetidos a cargas e variações de pressão.

Teste de fadiga (Curva de Wöhler)

O desempenho de materiais em fadiga normalmente é caracterizado pela "curva S-N", também conhecida como "curva de Wöhler", que é um gráfico de magnitude de tensão (S) por número de ciclos (N) em escala logarítmica. Vide gráfico 01.

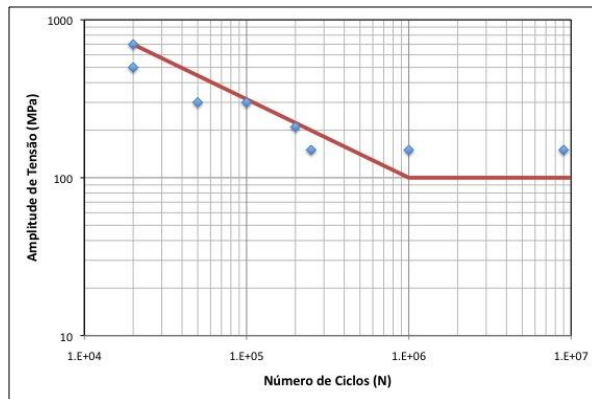


Gráfico 01 – Exemplo de caracterização de curva S-N.

A resistência à fadiga é determinada de forma mais eficiente através deste procedimento desenvolvido por August Wöhler, no qual consiste na aplicação de tensões pulsantes em diversos componentes de mesmo material, processo de fabricação e geometria (PS Testing Handbook, Conduction and evaluation of Wöhler test at internal pressure loaded Common Rail components, 2019).

A oscilação das tensões empregadas no teste de pulsação tem um formato senoidal. Para caracterizar essa curva são utilizados como parâmetros, demonstrados no gráfico 02, a amplitude de pressão [pa], a pressão média [pm], a amplitude de pressão do ciclo [Δp], a pressão mínima [pmin] ou a pressão máxima [pmax]. Porém somente duas destas variáveis são linearmente independentes, a amplitude de pressão do ciclo [Δp] e a pressão máxima [pmax] (PS Testing Handbook, Conduction and evaluation of Wöhler test at internal pressure loaded Common Rail components, 2019).

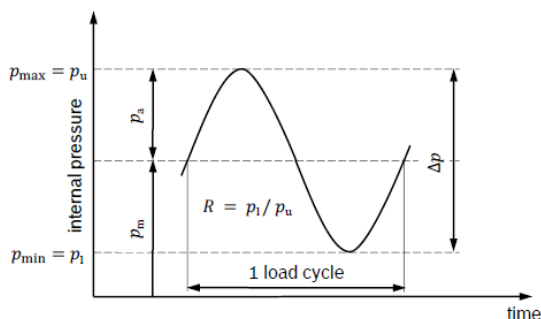


Gráfico 02 - Parâmetros de caracterização do carregamento cíclico.

A variação do carregamento no teste de Wöhler é preferencialmente progressivo, afim de determinar o número de ciclos necessários para romper o componente. A função que relaciona a amplitude de carga aplicada e o número de ciclos para falhar é chamada de curva de Wöhler.

A pressão de fadiga é dividida em três regiões: fadiga de ciclo baixo, fadiga de ciclo alto e vida infinita, como pode ser verificado no gráfico 03 (PS Testing Handbook, Conduction and evaluation of Wöhler test at internal pressure loaded Common Rail components, 2019).

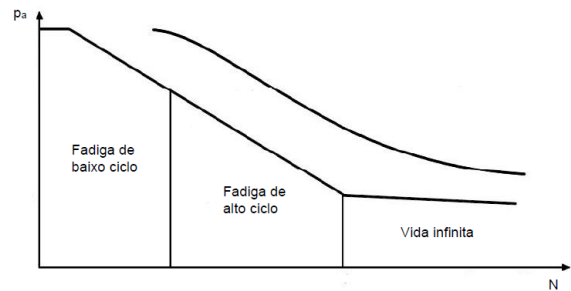


Gráfico 03 - Curva de Wöhler delimitada pelas regiões de fadiga de ciclo baixo, de ciclo alto e de vida infinita.

Os carregamentos aplicados na região de fadiga de baixo ciclo podem ser muito altos, causando deformações plásticas significantes. Já na região de fadiga de alto ciclo, o valor máximo do carregamento é consideravelmente maior que o limite de fadiga. Com isso, o componente precisa ser dimensionado para um número finito de ciclos de carregamento.

No projeto de componentes, em que se deseja uma durabilidade a fadiga máxima, é assumido que a carga máxima aplicada seja abaixo ou igual ao limite de fadiga permissível do componente em uma probabilidade de falha definida. Na prática, é utilizado como referência uma peça por milhão com confiabilidade de 90% para componentes relevantes à segurança.

Durante os testes de fadiga para determinar a curva de Wöhler, o carregamento é constante em função do tempo, ao contrário da situação real em que o carregamento no componente varia em relação ao tempo. Levando em conta um carregamento dependente do tempo, o limite de fadiga possibilita um projeto de componente econômico que atende à sua função e ao seu tempo de vida especificado (PS Testing Handbook, Conduction and evaluation of Wöhler test at internal pressure loaded Common Rail components, 2019).

Para conseguir desenvolver projetos de componentes duráveis é necessário que a proporção de carregamentos que ultrapassa o limite de fadiga seja restringida. Por esse motivo, as variações de carga precisam ser determinadas para que o projeto atinja o objetivo de obter um componente durável. O conceito de vida útil finita é baseado, via de regra, no dimensionamento de uma aplicação limitada entre 10^4 e 10^9 ciclos de carregamento especificado (PS Testing Handbook, Conduction and evaluation of Wöhler test at internal pressure loaded Common Rail components, 2019). Materiais não homogêneos ou desvios na fabricação dos componentes podem gerar variações entre si do limite de fadiga. Como consequência, a curva de Wöhler pode ser fornecida somente como referência para uma probabilidade específica de falha. Com a ajuda de métodos estatísticos, a curva de Wöhler é calculada considerando probabilidade de falha (P_f): 10%, 50% e 90%. A variação na amplitude de pressão que pode ser tolerada é caracterizada pela faixa de

dispersão TS. Similarmente, a variação na região de fadiga de alto ciclo é descrita por TN.

Assim, a curva de Wöhler pode ser aproximada para duas linhas retas em um gráfico de escala duplo logarítmica. A interseção das duas linhas retas evidencia o número de ciclos NE, que é o número de ciclos da transição da região de fadiga de alto ciclo para a região de vida infinita.

Crítérios de avaliação

Como o número de fatores que afetam a resistência à fadiga é muito grande, sendo a maior parte deles indetectáveis, os resultados dos testes de fadiga podem variar mesmo que o teste seja realizado sob as mesmas condições e no mesmo componente.

Para isso, é necessária uma avaliação estatística do teste de Wöhler para obter os parâmetros característicos (PS Testing Handbook, Conduction and evaluation of Wöhler test at internal pressure loaded Common Rail componentes, 2019).

Por isso, os testes de pulsação hidráulica devem ser realizados em pelo menos três níveis de pressão, os quais são: o “nível de pressão de “fratura”, “nível misto de pressão” e o “nível de pressão que leve a resistência do componente” (mais baixo que o de fratura, porém maior que o de operação do componente no sistema de injeção).

O “nível misto de pressão” é faixa de transição entre o nível de pressão de fratura” e o nível de pressão que leva a resistência do componente”.

Dependendo do tipo e tamanho da câmara de alta pressão da bancada, é possível testar ao mesmo tempo uma determinada quantidade de amostras (componentes) para cada nível de pressão. Para as bancadas utilizadas em nosso departamento de testes é recomendado no máximo 8 amostras para cada nível de pressão à ser aplicado no teste. Isto para evitar que o volume morto do componente à ser testado possa influenciar no aumento da vibração do sistema a bancada.



Fig 01 – Bancada de pulsação Maximator.

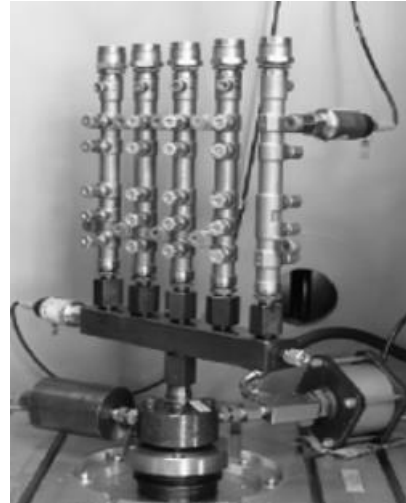


Fig 02 – Teste de pulsação de Rail na Bancada Maximator.

Assim, com o ensaio de pulsação é determinada a curva de Wöhler do elemento construtivo de um componente. Através de avaliação estatística subsequente, é determinada a resistência à fadiga com relação a uma esperada probabilidade de ruptura.

Os valores da pressão de resistência são calculados, com o auxílio de uma ferramenta específica desenvolvida pela engenharia de testes, a qual deriva a curva de Wöhler, a partir dos dados de entrada, que são os níveis de pressão aplicados e do número de falhas nos componentes testados. O valor da pressão de resistência é definido como a pressão com 1 parte por milhão (ppm) de probabilidade de falha. Resumindo, os objetivos importantes deste teste são:

- Análise dos pontos fracos do elemento construtivo, ou seja, as origens da ruptura (trinca) por fadiga
- Comparação relativa entre variantes de materiais ou técnicas construtivas e de fabricação. (PS Testing Handbook, Conduction and evaluation of Wöhler test at internal pressure loaded Common Rail componentes, 2019).

Análise do diagnóstico de falha / Investigação da trinca

Após acabar o teste de pulsação hidráulica de alta pressão, os componentes que tiveram trincas mais expressivas são colocados para uma análise mais profunda de como foram surgidas e se propagaram durante a aplicação da pressão no teste.

As trincas consideradas críticas são aquelas que ocorrem durante o ciclo mais baixo e sob a pressão mais baixa entre os níveis ou quando há falha após 1 milhão de ciclos (PS Testing Handbook, Conduction and evaluation of Wöhler test at internal pressure loaded Common Rail componentes, 2019).

De acordo com o nosso histórico de falhas apresentados nos testes de pulsação hidráulica, a origem mais comum de trincas é a partir de inclusões de Mn-S, Pb e Al-O. No entanto, falhas devido a problemas de processo como falhas

de material, defeitos de usinagem e tratamento térmico também podem ser detectadas conforme exemplo abaixo.

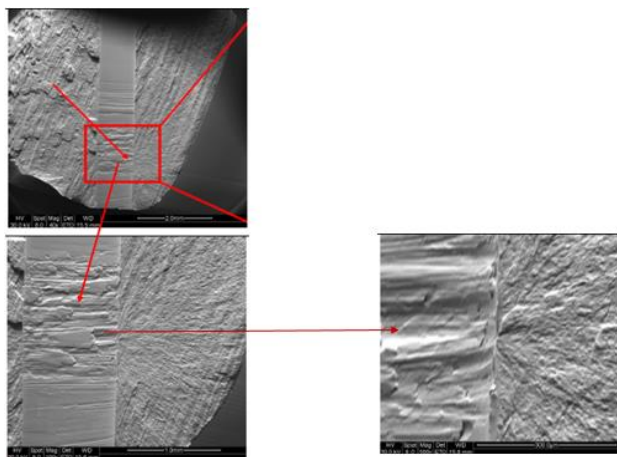


Fig 03 – Exemplo de trinca devido a defeito de usinagem e aspecto de fratura e local do início da trinca.

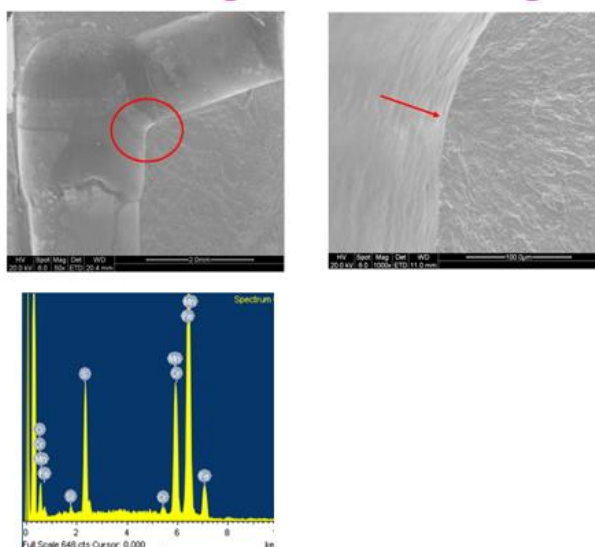


Fig 04 – Exemplo de trinca por fadiga a partir de inclusão não metálica e gráfico de análise química da inclusão não metálica.

Sistema de injeção Diesel

O sistema de injeção Diesel é crucial para um motor com o funcionamento “Ciclo Diesel”. Estes sistemas têm como finalidade a injeção em alta pressão na câmara do combustível do motor e não requerem corrente elétrica ou centelha para a iniciar a combustão, diferentemente do “Ciclo Otto”

Esta injeção à alta pressão garante que haja um preenchimento homogêneo na câmara de combustão, auxiliando assim uma queima homogênea do óleo Diesel durante a combustão.



Fig 05 – Sistema de injeção e ciclo Diesel.

Para este sistema, há a geração de pressão de injeção do combustível em momentos separados. Basicamente, a bomba de alta pressão comprime o combustível, nas quantidades informadas pela unidade de comando eletrônico (ECU), através de compressão mecânica e então o combustível é levado através de condutores de alta pressão até o tubo distribuidor (Common Rail) que funciona como um acumulador de pressão para todos os injetores.

Os injetores que contêm o bico injetor, válvula solenoide e conexões hidráulicas e elétricas para acionar o módulo do bico são então acionados pelo módulo eletrônico para desobstruírem os canais dentro dos bicos de injeção através de um sistema de indução eletromagnética com retorno via mola. Sendo assim, a canaleta do sistema acumulador de pressão sempre possui a pressão necessária para a injeção correta no cilindro, e a central eletrônica controla com grande precisão o momento e a duração de injeção necessária.

Testes finais de Componentes do Sistema de injeção Diesel após o teste de pulsação

Após aprovado no teste de pulsação os componentes do sistema de injeção são liberados para produção em série, no entanto os testes ainda não param por aí, pois além da qualidade do produto a Bosch se preocupa principalmente com a segurança das pessoas que irão utilizar os mesmos e também com o meio ambiente.

Para que um veículo seja homologado vários testes de validação são necessários antes da liberação para a produção em série, entre eles estão os testes de validação do sistema de injeção realizados pela Bosch, onde ela verifica se os componentes foram aplicados de acordo com especificado na documentação técnica do produto.

Cada componente do sistema Common Rail possui uma vida útil com base na sua resistência mecânica verificada durante os testes de pulsação, no caso dos injetores, bombas e Rail, os mesmos foram projetados para suportar variações de pressão e a fadiga e individualmente cada um possui o seu próprio limite de resistência.

Medição coletiva de carga

O objetivo da medição coletiva de carga é determinar a carga nos componentes para o cálculo de fadiga em uma condição realística de campo.

O sistema Common Rail pode ser aplicado em todos os veículos, como carros de passeio, máquinas agrícolas, de construção, geradores, caminhões e ônibus e cada um deles

possuem uma missão/distribuição em percentual de acordo com a utilização, por exemplo, um caminhão pesado pode ter a sua distribuição de utilização final da seguinte forma: 10% Cidade, 30% Rural e 70% auto estrada, já uma aplicação delivery pode ter a distribuição de 80% cidade, 10% Rural e 10% auto estrada e através destes dados é possível definir o plano de teste que será necessário para validar o sistema de injeção.

Durante a preparação e planejamento dos testes são definidos os hardwares, softwares, sensores de pressão, que serão utilizados na instrumentação e medição dos componentes do sistema, juntamente com os sinais importantes para a avaliação coletados da ECU.

Os principais sinais coletados durante a medição são: Pressão de saída da bomba de alta pressão, do Rail, e de entrada no injetor, rotação do motor, corrente do injetor, labels da quantidade injetada e tempo de injeção, torque, temperatura do combustível, óleo, injetor, bomba, Rail e de todos os sensores Bosch.

Para a aquisição dos dados de pressão, temperatura e labels são utilizados softwares, hardwares e sensores com alta tecnologia embarcada e todos são calibrados e controlados por um departamento de qualidade para garantir a confiabilidade dos testes.

Para a medição coletiva de carga é definida uma rota padrão, onde a mesma representa uma condição real de utilização do veículo conforme a figura abaixo. O tempo de rodagem mínima para caminhões, ônibus e carro de passeio em cada rota é de 100 km e para máquinas agrícolas e de construção é de no mínimo 2 horas na principal condição de trabalho.

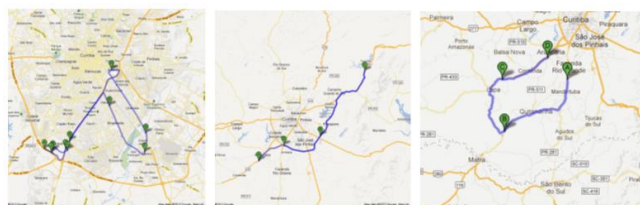


Fig 06 – Rota padrão para teste de carga coletiva.

Resultados obtidos com a medição coletiva de carga do sistema de injeção

Os dados de pressão coletados durante a medição do sistema de injeção conforme a figura 07, são necessários, com base nos testes de pulsação, para o cálculo do tempo de vida de cada componente. Através de algoritmos é possível estimar se os componentes irão suportar as cargas de pressão submetidas durante a vida útil. Se a aplicação atender todos os requisitos de segurança, qualidade e especificação técnica o componente é liberado para a série.

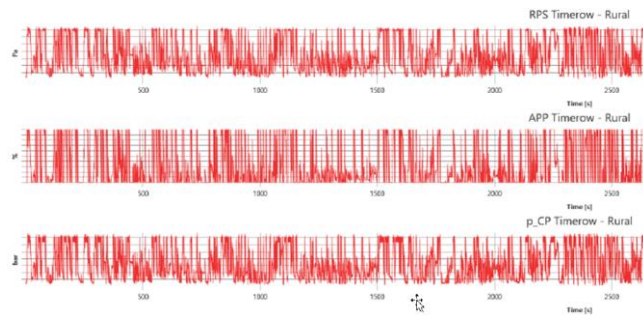


Fig 07 – Perfil de carga dos componentes do sistema de injeção de alta pressão de combustível

Através de algoritmos é possível chegar a um fator estatístico de probabilidade de falha dos componentes submetidos às cargas de pressão durante a sua vida útil. Para quantificar as cargas que um determinado componente sofre durante a sua operação dentro de um sistema, é necessário classificar e contar os ciclos de pressão registrados em uma medição coletiva de carga. Para esse fim, o método “Rainflow Counting” é usado como base para o cálculo do tempo de vida útil, pois representa as cargas reais às quais os componentes são expostos durante a sua operação. O “Rainflow Counting” considera com maior precisão os danos contidos em cada ciclo de um histórico de carga devido ao fato de que apenas loops de histerese fechados são considerados. O resultado do “Rainflow Counting” é uma matriz coletiva de carga contendo todos os ciclos de pressão operacional, chamada de “Rainflow Matrix”. Atualmente, é cientificamente entendido que existe uma correlação direta entre uma determinada histerese e o dano local ao material de acordo com o conceito de tensões locais. A área de um ciclo fechado de histerese é uma medida da energia ou dano contido em um ciclo de carga.

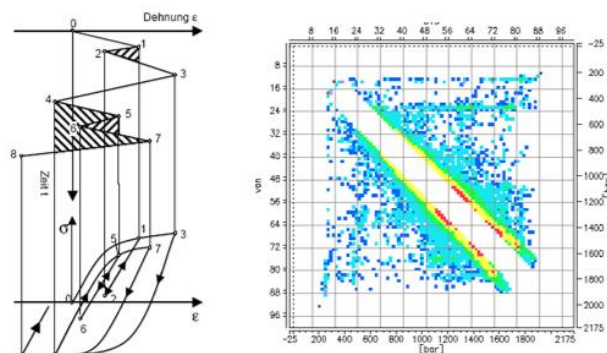


Gráfico 04 – Rainflow Matrix - Matriz coletiva de carga contendo todos os ciclos de pressão operacional.

Para o cálculo da probabilidade de falha (cálculo de vida) de um componente também são considerados, além da “Rainflow Matrix” acima mencionada, os parâmetros específicos alcançados em testes de pulsação em laboratórios.

Os componentes submetidos ao procedimento de cálculo de vida serão assinalados como aptos dentro do sistema da aplicação avaliada quando o resultado do cálculo da probabilidade de falha for menor que 1ppm. O gráfico 05

mostra um exemplo de resultado de um cálculo de probabilidade de falha de componentes submetidos aos procedimentos acima descritos.

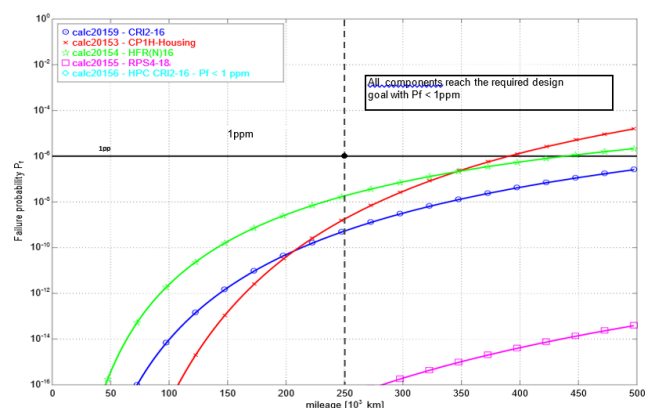


Gráfico 05 – Exemplo de um gráfico resultante do cálculo de vida de componentes.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos dados apresentados neste estudo pode-se observar que:

- O teste de pulsação é muito importante para determinar a confiabilidade, qualidade e durabilidade dos componentes submetidos a variações e cargas de alta pressão durante o desenvolvimento estrutural. Principalmente para garantir a segurança das pessoas que irão utilizar o produto final e prevenir a poluição do meio ambiente.
- Além de melhorar a qualidade do produto pode-se também reduzir o seu custo com matéria-prima e projeto, pois através dos testes é possível apontar a estrutura ideal para suportar as cargas de pressão durante a vida útil com margem de segurança.
- Fazendo um estudo prévio, através de elementos finitos e testes práticos em bancada, torna-se possível entender o comportamento do componente no sistema, e com isto prevenir possíveis falhas decorrentes de design, processo de usinagem e aplicação em campo. Desta maneira prevenir recalls que possam ocorrer na série.
- Além do setor automotivo, esta metodologia pode ser aplicada também em componentes estruturais de máquinas hidráulicas industriais ou de qualquer projeto de componentes que sejam submetidos a variações de cargas de pressão.

REFERÊNCIAS

PS Testing Handbook, Conduction and evaluation of Wöhler test at internal pressure loaded Common Rail components, Feuerbach 2019 (Bosch internal document).

PS Testing Handbook, Limit Cycle Numbers in Pulse Testing, Feuerbach, 2019 (Bosch internal document).

PI23.30.01 Process Instruction - Lifetime calculations of internally pressurized Common-Rail-components, 2019 (Bosch internal document).

NORTON, R. Projeto de Máquinas 4ª ed. São Paulo, Bookman 2013.

Bosch Auto Parts, Common Rail System. Disponível em:

<http://br.boschautomotive.com/en/internet/parts/parts_and_accessories_2/motor_and_sytems/diesel/common_rail_injection/common_rail_diesel_motorsys_parts.html>. Acesso em: 06/2020.

Diesel Fuel-Injection System Common-Rail, Bosch Yellow Jackets Edition 2005.