

Revista Eletrônica



Volume 5 – Número 1 - 2025

Falha por Cisalhamento em Parafusos e Juntas Estruturais Automotivas: Avaliação de Segurança em Fixações Submetidas a Vibrações.

Caique Pimentel da Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
caique.pimentel@aluno.ifsp.edu.br

Kayky Raphael Gigante da Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
kayky.gigante@aluno.ifsp.edu.br

Resumo

As falhas por cisalhamento em juntas estruturais e parafusos na indústria automobilística são fatores de extrema importância ao realizar-se a fabricação de um automóvel, tal que se tornam inerentes a tal processo análises e testes empíricos para a validação dos valores calculados com relação às forças atuantes nessas parte, tal como também auxiliam na comprovação de sua eficácia principalmente ao citar-se as relações com as vibrações e forças atuantes nessas quando o produto final está em estado estático ou em movimento. Assim, tais análises se tornam imprescindíveis a fim de que se tenha garantido que sua utilização não representa nenhum risco monetário e principalmente à saúde de seus usuários.

Palavras-chave

Cisalhamento, falhas mecânicas, vibrações, causa e efeito.

Abstract

Shear failures in structural joints and bolts in the automotive industry are extremely important factors during the manufacturing of a vehicle. As such, empirical analyses and tests become inherent to this process in order to validate the calculated values related to the forces acting on these components. These analyses also help demonstrate their effectiveness, especially when considering the relationship with vibrations and forces acting on them when the final product is either stationary or in motion. Therefore, such evaluations are essential to ensure that their use poses no financial risk and, most importantly, no threat to the health of the users.

Keywords

Shear, mechanical failures, vibrations, cause and effect.

1 – Introdução

Primordialmente, desde sua concepção em 1885, a indústria automobilística tem crescido cada vez mais no mercado industrial. Sua influência não apenas se deu em seu ramo, mas também, influenciou toda a indústria seja com suas tecnologias que revolucionaram o mundo, seus métodos de produção tão conhecidos, como por exemplo o Fordismo e o Toyotismo, contudo, também é de suma importância devido aos testes realizados em seus produtos, que, por seu carácter de serviço, precisa estipular métodos e estudos a fim de garantir o mínimo possível em perdas monetárias e garantir que seus tais produtos estejam em um padrão de qualidade e principalmente, de segurança.

Para tanto, ao longo da história da indústria automobilística, a qualidade de seus produtos foi elevada a medida que suas tecnologias iam melhorando, conseqüentemente, os componentes que acompanham o produto final também tiveram suas melhorias, como por exemplo, as juntas que compõe toda a estrutura veicular, desde a carenagem do automóvel até seu motor e sistemas de amortecimento. O investimento realizado nessas partes citadas anteriormente se deve principalmente ao seu nível de criticidade, uma vez que, caso as juntas e parafusos dessas estruturas falhem as conseqüências ao usuário podem ser catastróficas.



Figura 1 – Exemplo de junta aparafusada aplicada em veículos leves.

Diante de tais fatos, a fim de garantir a qualidade e segurança das juntas e parafusos que compõe todo o sistema a indústria automobilística investe em tecnologias e estudos para análises mecânicas principalmente ao que se refere ao fenômeno de cisalhamento e as vibrações naturais ou não que podem implicar nas falhas dessas juntas mecânicas. Para tanto, este artigo tem por fito destacar e discutir acerca das causas e efeitos das vibrações nos automóveis, os modos de falha em fixações, estudos de cisalhamento e como maximizar ao máximo a segurança do sistema.

Assim, este artigo traz também por objetivo esclarecer ao leitor a importância do tema, tal que este está presente em seu cotidiano, destacando assim, de forma lúdica, como a indústria se molda diante das dificuldades enfrentadas elucidando assim como este setor pode transformar e dar movimento ao mundo à volta do leitor deste artigo.

2 – Fundamentação Teórica

2.1 – Definições Sobre Cisalhamento

Cisalhamento pode ser tido como sendo uma deformação resultante de esforços que tendem a fazer com que as partes contíguas de um corpo deslizem uma em relação à outra, em direção paralela ao plano de contato entre elas. Sendo assim, em projetos estruturais decorrentes de atuação de forças específicas, os processos de cisalhamento são os principais pontos de análise para garantia de resistência do conjunto.

Dessa forma, para avaliar a resistência de um material ao cisalhamento, frequentemente são utilizados ensaios mecânicos. Para tal, uma amostra é submetida a uma força de cisalhamento controlada via dispositivos mecânicos, com essa força sendo aplicada de modo a provocar uma deformação por cisalhamento na amostra, gerando um deslocamento relativo entre suas partes.

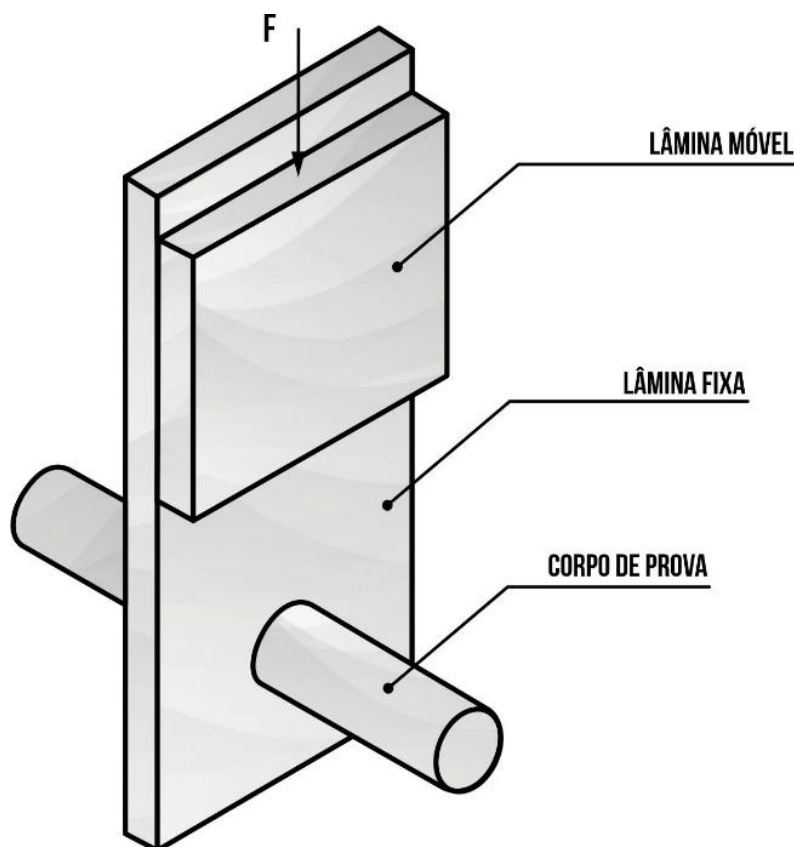


Figura 2 – Dispositivos de cisalhamento usando lâmina móvel.

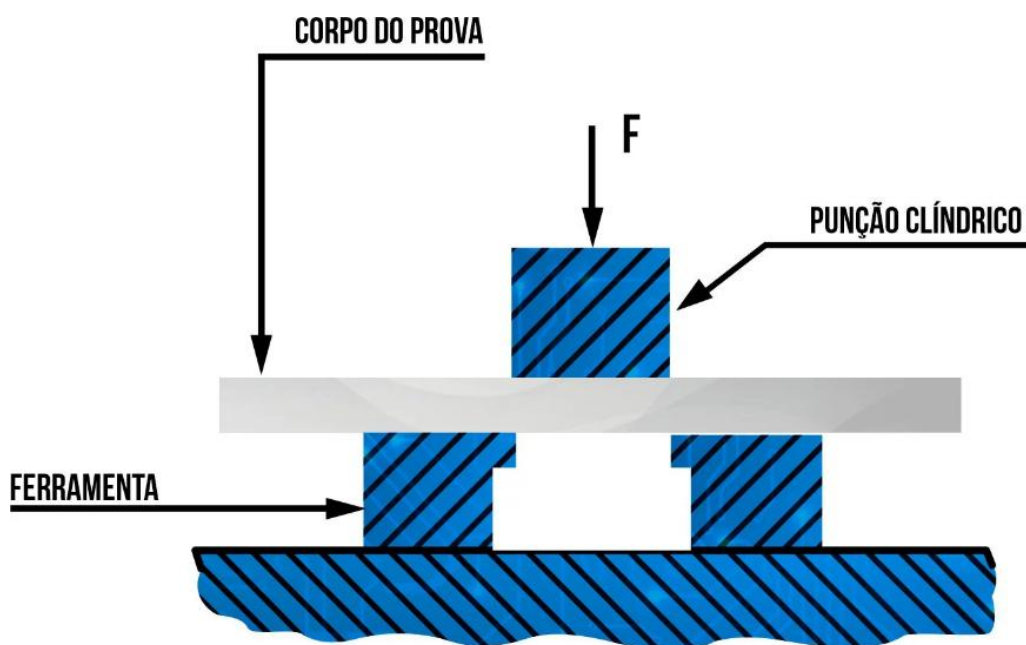


Figura 3 – Dispositivos de cisalhamento e sistema de estampo.

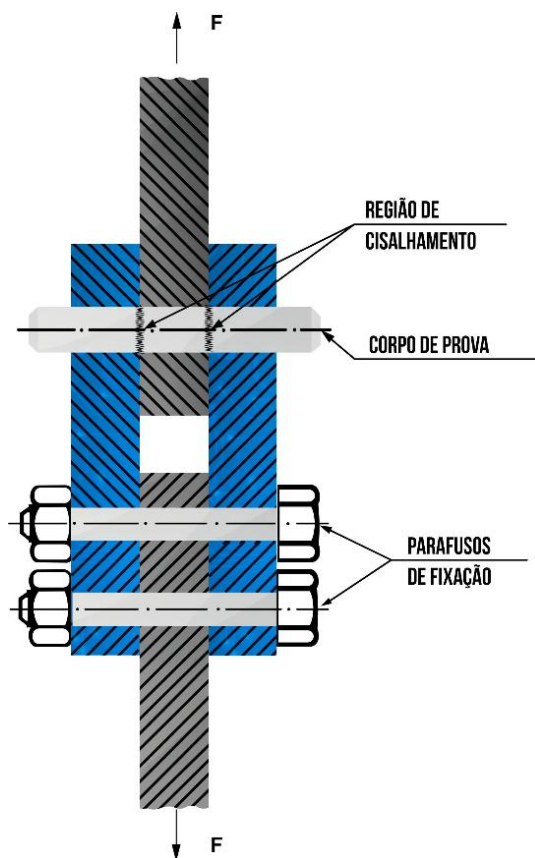


Figura 4 – Dispositivo de ensaio de cisalhamento de um eixo.

Nesse contexto, segundo normas ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), ISO (International Organization for Standardization) e ASTM (American Society for Testing and Materials), são medidos a força aplicada e o deslocamento resultante, permitindo, portanto, calcular a resistência ao cisalhamento do material, que é expressa em pascal (Pa) ou megapascal (MPa), isto é, força sobre unidade de área.

Por sua vez, os dados obtidos passam a ser fundamentais para análise de falhas e desenvolvimento de projetos estruturais. Observe a seguir as principais normas que regulamentam ensaios de cisalhamento: ABNT NBR 9908 (08/2019); ABNT NBR 5916 (03/1990); ABNT NBR 8309 (05/2006); ISO 2039-1; ISO 4587; ASTM D3163; ASTM D5379.

2.2 – Juntas Aparafusadas em Sistemas Automotivos

As juntas aparafusadas são indispensáveis na engenharia automotiva, presentes em praticamente todos os sistemas do veículo, desde a fixação da carroceria até os conjuntos de suspensão, motor e transmissão. Tais elementos são responsáveis por garantir a integridade estrutural e a segurança operacional do automóvel.

Um dos principais desafios associados às fixações automotivas está relacionado à sua exposição contínua a condições dinâmicas severas, como vibrações provenientes do motor, irregularidades da pista e os esforços variados decorrentes de acelerações, frenagens e manobras. Tal ambiente favorece a perda gradual da pré-carga dos parafusos, que compromete a capacidade de transmissão de esforços pela junta e pode culminar em falhas por escorregamento ou cisalhamento.

A falha por cisalhamento em parafusos representa um risco crítico aos sistemas automotivos, pois pode levar à ruptura total da junta estrutural e, conseqüentemente, à perda de funcionalidade de componentes de segurança.

Casos de cisalhamento em fixações no meio automobilístico podem culminar em um elevado custo a partir de um recall, mas também infere em um risco iminente aos usuários do veículo afetado. Nesse sentido, compreender os mecanismos de falha e os fatores que a influenciam é fundamental para o projeto seguro de juntas.

Nesse contexto, métodos de análise teórica, aliados a ensaios de cisalhamento padronizados, constituem ferramentas indispensáveis para a avaliação da confiabilidade de fixações automotivas submetidas a vibrações. Assim, a integração entre modelagem analítica e resultados experimentais fornece uma abordagem abrangente para compreender e mitigar os riscos de falha em juntas estruturais automotivas.

Dessa maneira, segundo todo o desenvolvimento de um projeto estrutural automotivo, pode-se ter a utilização de diversos elementos de fixação, com cada um tendo uma singularidade de utilização específica, unindo praticidade, custo e resistência a determinado esforço.

Sendo assim, seguindo o panorama de estudo de parafusos em geral, em automóveis podemos ter a utilização de parafusos métricos sextavados, allen, torx, flangeados, prisioneiros roscados, dentre outros, todos eles enquadrados em normas bem regulamentadas, apresentando propriedades mecânicas, níveis de torque e resistência bem definidos.

ABNT NBR 6158: características gerais de fixadores metálicos, como tratamento superficial e dimensões;

ABNT NBR ISO 3506: padrões para fixadores feitos de aço inoxidável;

ABNT NBR 9595 e 9971: respectivamente, regulam elementos de fixação autoatarraxantes e a fixação de componentes em estruturas metálicas;

ABNT NBR 11201: utilizada para fixadores roscados.



Figura 5 – Exemplo de junta aparafusada em suspensão de veículos pesados.



Figura 6 – Exemplos de parafusos.

2.3 – Modos de Falha em Fixações

De modo geral, os parafusos costumam falhar principalmente na região de contato entre a cabeça e a região cilíndrica, nos primeiros fios de rosca.

As principais razões para a falha são: a utilização de parafusos com resistência inferior à necessária, pré-carga inadequada e projeto da junta insatisfatório.

Além disso, é válido ressaltar que a qualidade e resistência do parafuso são identificados por marcas impressas na cabeça, seguindo as normas da ASTM e SAE (Society of Automotive Engineers).

Falha por cisalhamento direto:

Segundo o professor *Ivan Zolin* em “Ensaio Mecânicos e Análises de Falhas” (2011), o processo de cisalhamento direto pode ser tido como uma fratura dúctil do material – no estudo desenvolvido, um parafuso – isso significa que a fratura em si é acompanhada de uma deformação plástica significativa e de uma estricção da secção transversal.

Em virtude das tensões de cisalhamento, a redução da secção durante a aplicação de força é causada pelo escorregamento dos planos cristalinos decorrentes de tração. Seguindo o raciocínio, a fratura dúctil, em geral, apresenta três zonas distintas:

- Zona fibrosa: corresponde ao início da fratura;
- Zona radial: corresponde à região de propagação instável da fratura, com aparência rugosa;
- Zona de cisalhamento: inclinada 45° em relação ao eixo de tração.

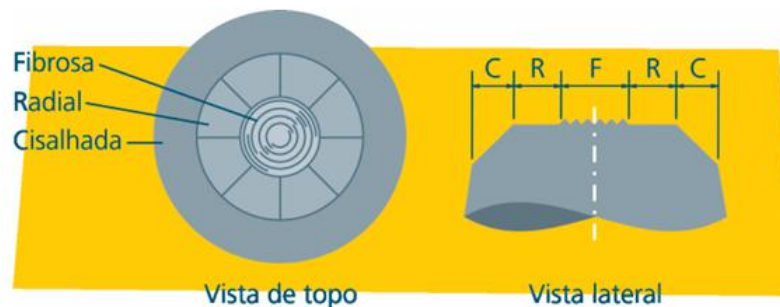


Figura 7 – Representação da zona fibrosa, radial e cisalhada.

A ruptura de um material metálico por fratura dúctil ocorre segundo o mecanismo mostrado na Figura 6. O esforço de tração produz uma estricção, redução da secção transversal do corpo de prova.

A orientação direcional do esforço principal forma pequenos vazios na estrutura cristalina; a união dessas cavidades por coalescimento origina as trincas ou fissuras que se propagam em ângulos de 45° em relação ao esforço, até a ruptura final. Isso tudo ocorre em uma pequena fração de tempo.

O esforço responsável pela ruptura na estrutura cristalina é o cisalhamento em ângulo de 45° entre os planos dos microconstituintes

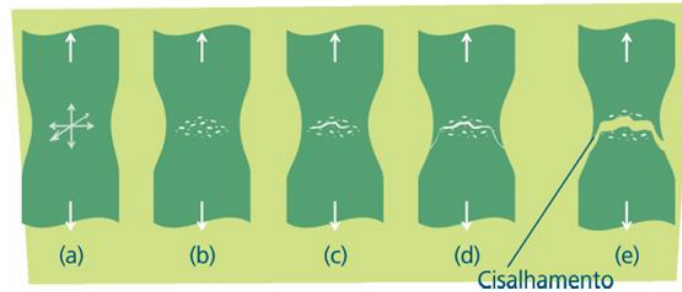


Figura 8 – Mecanismo de formação da fratura através do coalescimento dos grãos.

Ademais, nas palavras de *Affonso Luiz Q. M.* “Equipamentos Mecânicos” (2002), as falhas em componentes não ocorrem de modo isolado, mas por sobrecarga: ‘Falhas de componentes de máquinas em serviço raramente ocorrem por fratura dúctil, sendo ela, em geral consequência de uma falha múltipla onde a sobrecarga que causou a dita fratura dúctil foi originada na falha de outro componente (p. 32).’

Falha por escorregamento da junta de fixação:

De acordo com a empresa especialista em parafusos *SmartBolts* – Certificada em ISO 9001 – diversas juntas aparafusadas incluem uma junta fina e flexível entre a cabeça dos parafusos e a superfície da junta para vedar a junta completamente contra vazamentos de gás ou líquido. A própria junta atua como uma mola, empurrando para trás contra a pressão do parafuso e da face da junta. Com o tempo, e especialmente perto de altas temperaturas ou produtos químicos corrosivos, a junta pode "fluir", o que significa que perde sua elasticidade, levando à perda da força de fixação. Isso também pode acontecer se a área da junta diretamente ao lado dos parafusos for esmagada ou se os parafusos não forem apertados uniformemente em toda a face da junta.

Sendo assim, temos ainda vários outros elementos que podem contribuir para o escorregamento em juntas de fixação:

Aperto insuficiente: a junta não consegue manter as peças unidas, permitindo movimento lateral;

Vibração e forças dinâmicas: a vibração pode levar um movimento relativo nas roscas, levando o parafuso a se soltar e a junção a deslizar;

Cargas de flexão: o movimento relativo entre as superfícies da junta pode submeter o parafuso a cargas de flexão, o que, por sua vez, pode gerar fadiga e falha no parafuso;

Efeitos térmicos: diferenças de temperatura ou a escolha inadequada dos materiais da junta podem causar contração ou expansão térmica, gerando forças que promovem o deslizamento;

Dobramento de peças: o empenamento ou dobramento de uma peça pode induzir forças que levam à superfície de atrito da junta ao deslizamento.

Falha por vibração e afrouxamento por perda de pré-carga (*self-loosening*):

Vibrações em dispositivos mecânicos podem culminar em diversos tipos de falhas. Em um primeiro momento, vibrações em juntas aparafusadas podem vir a representar a aplicação de tensões cíclicas, que, por sua vez, poderão caracterizar fadiga dos componentes, resultando em possível fratura a partir do desenvolvimento de uma trinca. Também segundo *Ivan*, a fratura pode ser dividida em três etapas: Nucleação da trinca, sem nenhum dano visível nessa fase; Crescimento da trinca de fadiga em um plano perpendicular ao da principal tensão de tração; Rompimento brusco e final da peça.



Figura 9 – Etapas do desenvolvimento de uma trinca até o rompimento.

As três etapas dessa fratura podem ser observadas na Figura 9. A zona delimitada pela linha amarela representa a origem da trinca; a zona delimitada pela linha vermelha o crescimento da trinca; ao ultrapassar a linha vermelha, ocorre o rompimento brusco da peça. Além da ocorrência de fadiga dos componentes, temos o fenômeno do *self-loosening*, que consiste no afrouxamento automático de parafusos e porcas decorrentes de vibrações no sistema. Isso, por conseguinte, pode colocar em risco toda a segurança da estrutura, representando ainda grande risco para o projeto.

Em resumo, pequenos movimentos “transversais” fazem com que as duas seções da junta se movam paralelamente uma com a outra e com a cabeça ou porca do parafuso. Esses movimentos repetidos trabalham contra o atrito entre o parafuso e as roscas da junta. Eventualmente, a vibração fará com que o parafuso se afrouxe e junção perca força de fixação.

De acordo *Sakai*, citado no artigo “*Study on self-loosening mechanism of bolted joint under rotational vibration*”, existem vários fatores que afetam o afrouxamento do parafuso, como pré-carga, amplitude de vibração e frequência de vibração. Nesse contexto, pode-se concluir que sob vibração rotacional, a pré-carga e amplitude de vibração tem grande influência no afrouxamento do parafuso, enquanto a frequência exerce menos propriedade. Ademais, o aumento da pré-carga do parafuso até a vibração reduz a velocidade de afrouxamento da conexão.

2.4 – Causas/Efeitos de Vibrações Automotivas

Generalizadamente, por si só, quando uma máquina está em funcionamento, ela naturalmente terá uma frequência de vibração. Sendo assim, é possível realizar um diagnóstico do problema de um maquinário através da análise do espectro de vibrações.

No caso de um automóvel, é notória a presença de vibrações mecânicas em todo o conjunto, desde geradas funcionamento do próprio motor até consequências do movimento dinâmico nas rodas, freios, suspensão e sistemas de transmissão.

Dessa forma, é fundamental o dimensionamento correto das principais juntas de fixação do sistema, em sua maioria aparafusadas, como coxins, pivôs de suspensão, barras e dentre outros, sempre levando em consideração efeitos adversos, como fadiga dos materiais e afrouxamento decorrentes das tais vibrações.

3 – Teoria do Cisalhamento em Parafusos

Como visto anteriormente, cisalhamento puro ocorre quando forças são aplicadas de forma paralela a uma área, causando um deslizamento ou corte através da seção. Observar Equação (1), onde F é a força de cisalhamento aplicada e A é a área da seção transversal onde a força atua.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Enquanto isso, geralmente para vigas, tem-se o cisalhamento combinado, que acontece devido a cargas que causam força constante na viga, com a tensão de cisalhamento não sendo uniforme em toda a seção transversal, variando com a posição. Ver Equação (2), em que V é a força cortante na seção, Q é o primeiro momento da área da seção acima do ponto onde a tensão é calculada, I é o momento de inércia da seção transversal inteira e t é a largura da seção no ponto onde a tensão é calculada.

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot t} \quad (2)$$

3.1 – Tensões Reais versus Tensões Admissíveis

As tensões reais, também conhecidas como tensões de projeto, é tensão em que a estrutura ou sua fração sofre efetivamente ao ser submetida às cargas de serviço – no caso da automobilística, peso próprio, inércia e arrasto aerodinâmico –, com essa tensão também sendo calculada com base na força

aplicada e na área da seção transversal do material analisado e representando a real tensão existente em condições de utilização.

Em contrapartida, a tensão admissível consiste no limite máximo de tensão que o material ou a estrutura irá suportar com segurança sem sofrer com deformações plásticas permanentes ou de ruptura. Em meio a isso, a tensão admissível não é uma propriedade particular do material, mas sim um valor definido de projeto, calculado a partir de ensaios controlados e estipulando um fator de segurança (FS). Vide Equação (3), onde σ_{adm} é tensão admissível e σ_e é tensão de escoamento.

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_e}{FS} \quad (3)$$

Em detalhe, FS é um número maior que 1 ($FS > 1$) e é aplicado para garantir que a tensão real seja sempre inferior à tensão admissível (tensão real < tensão admissível), garantindo que mesmo sob as cargas máximas previstas a estrutura opere sempre dentro de sua faixa de segurança, nunca atingindo o limite de escoamento do material. Nessa mesma linha, esse fator surge levando em consideração incertezas variáveis, como: Variações nas propriedades do material; Possíveis erros de fabricação ou montagem; Cargas imprevistas ou acima do previsto; A vida útil do conjunto estrutural; Consequências de uma eventual falha.

4 – Cálculo dos Esforços nas Fixações (Considerando Cargas Estáticas)

Para o dimensionamento correto de estruturas, tem-se o cálculo dos esforços nas fixações, com o método de cálculo dependendo do tipo de junta (rígida ou flexível) e das cargas, aplicadas de forma concêntrica ou excêntrica. Sendo assim, a maneira como as fixações são modeladas influencia diretamente a distribuição dos esforços entre os elementos de conexão (parafusos, rebites, soldas, etc.)

Primeiramente, a respeito de junta rígida, assume-se que a fixação se comporta como um único corpo rígido. Dessa forma, sob carga excêntrica – isto é, uma carga aplicada fora do centro de gravidade do elemento e criando tensões variadas no material – os esforços são distribuídos de forma proporcional à distância de cada fixação ao centro de rotação. Em acréscimo, esse tipo de modelo de análise é frequentemente usado para juntas de parafusos com pré-carga.

Seguindo, tratando-se de junta flexível, neste modelo é considerado a deformação da junta, com as fixações mais próximas da carga recebendo uma parcela maior do esforço. Apesar de se mostrar mais realista, de modo geral é um método não muito adotado para dimensionamento.

4.1 – Equilíbrio de Forças em Cisalhamento

Em um grupo de fixações sob carga excêntrica (cisalhamento excêntrico), para calcular os esforços é necessário aplicar os princípios de equilíbrio de forças e momentos. Dessa maneira, a carga aplicada (P) em um ponto distante do centroide de fixação gera dois efeitos principais.

a) Carga de cisalhamento direta (P_{dir}):

A carga de cisalhamento se distribui uniformemente entre todas as fixações, onde N é o número de fixações. Equação (4).

$$P_{dir} = \frac{P}{N} \quad (4)$$

b) Carga de cisalhamento devido ao momento (P_{mom}):

O momento ($M = P \cdot e$), gerado pela excentricidade (e) da carga, causa um cisalhamento rotacional, com o esforço em cada fixação sendo proporcional à sua distância (r_i) do centroide do grupo. Equação (5).

$$P_{mom} = \frac{M \cdot r_i}{\sum (r_i)^2} \quad (5)$$

onde, $\sum (r_i)^2$ corresponde a soma dos quadrados das distâncias de cada fixação ao centroide.

A força resultante em cada fixação (P_{res}) é a soma vetorial da carga direta e da carga de cisalhamento, onde x e y indicam componentes vetoriais das forças. Equação (6).

$$P_{res} = \sqrt{(P_{dir_x} + P_{mom_x})^2 + (P_{dir_y} + P_{mom_y})^2} \quad (6)$$

4.2 – Equações para Dimensionamento

Determinada a força resultante em cada fixação calculada, a fixação mais solicitada, ou seja, aquela com a maior força resultante, deve ser dimensionada para resistir a essa carga. Nesta seção, veja o processo utilizado para dimensionamento de juntas de fixação por meio de parafusos.

A tensão de cisalhamento no corpo de um parafuso (τ) deve ser menor que a tensão de cisalhamento admissível (τ_{adm}). Equação (7).

$$\tau = \frac{P_{res}}{A_s} \leq \tau_{adm} \quad (7)$$

onde, A_s indica área de cisalhamento do parafuso.

Além disso, também deve ser considerada a tensão de esmagamento (*bearing stress*) no material da placa (σ_b). Equação (8).

$$\sigma_b = \frac{P_{res}}{d.t} \leq \sigma_{b,adm} \quad (8)$$

onde, d é o diâmetro do parafuso e t é a espessura da placa.

5 – Discussão e Análise Crítica

Com base na linha de raciocínio e conhecimento desenvolvido ao longo do artigo, é possível notar grande embasamento teórico e de cálculo para projetos mecânicos, representando, por sua vez, cenários estáticos gerais e que permitem boa compreensão e análise para um dimensionamento correto e de componentes e juntas de fixação, inclusive tendo ciência dos riscos e adversidades por possíveis falhas enfrentadas.

Entretanto, quando se trata de questões de aplicabilidade prática, é necessária compreensão profunda de suas limitações. Nesse contexto, temos que os modelos matemáticos e físicos definidos são tidos frequentemente simplificados quanto a geometria do projeto, propriedades do material e condições de carregamento, com muitos cálculos assumindo materiais isotrópicos e homogêneos, algo raro na realidade. Além disso, podemos ter também a existência de variáveis não controladas no sistema, como temperatura, umidade, corrosão ou pequenas imperfeições de fabricação. Ademais, a teoria não é capaz de capturar por completo fenômenos complexos e fora do comportamento linear, para junções aparafusadas, por exemplo, a distribuição real de tensões e a influência da pré-carga são complexas e dependem de muitos fatores que os cálculos simplificados não abrangem.

Sendo assim, a discrepância entre os modelos ideais e o comportamento real é um ponto crítico na engenharia. Em modelos ideais, as condições de contorno são simplificadas, enquanto em campo essas condições são bastante complexas e podem variar com o tempo, afetando a distribuição de tensões e deformações. Em acréscimo, temos que as condições reais enfrentadas pelos componentes envolvem carregamentos dinâmicos, aleatórios e imprevisíveis, diferentes das cargas estáticas ou ciclos de carga simplificados abordados.

Por tanto, nesse contexto, destaca-se a necessidade de uma apuração cautelosa na implementação de margens e fatores de segurança, como citado anteriormente. Para tal, existem diversos ensaios relacionados que fornecem dados empíricos e valiosos a respeito do comportamento de todo o jogo estrutural, como por exemplo ensaios de fadiga e vibração. Ademais, existe também todo um conjunto

de normas (VDI 2230: análise de juntas aparafusadas e ISO 898-1: propriedades mecânicas de parafusos), que procura enquadrar os projetos mecânicos em margens seguras de utilização, com todos esses elementos auxiliando e norteando o desenvolvimento de um projeto seguro e bem-sucedido.

6 – Conclusões

Ao longo deste artigo, pode-se compreender a importância do estudo das vibrações atuantes em um sistema automotivo, tal como entender como tal pode influenciar nos efeitos de cisalhamento nas juntas e parafusos do corpo de prova, evidenciando as suas características e principais métodos de validação teórico-prático utilizado pelas montadoras de veículos automotores e as influências que estas trazem consigo.

Este artigo também evidenciou a funcionalidade das análises, explicitando o viés de segurança que os testes aqui apresentados possuem e destacando sua influência na régua de qualidade e segurança imposta pelas fábricas de automóveis, assim, espera-se que o leitor possa entender o valor que os testes realizados pelos fabricantes possuem a fim de evitar que os efeitos aqui apresentados para juntas mal dimensionadas e parafusos cisalhados impactem diretamente na vida do usuário dos veículos.

7 – Referências

- [1] IVAN ZOLIN, *Ensaio Mecânicos e Análise de Falhas*, Santa Maria – RS 2011.
- [2] ZHIBIN LI, YAN CHEN, WEICHENG SUN, PENG JIANG, JIACHENG PAN, ZHENQUN GUAN, *Study on self-loosening mechanism of bolted joint under rotational vibration*, 2021.
- [3] E. RUSSELL JOHNSTON JR, FERDINAND PIERRE BEER, *mecânica dos Materiais* 8. Ed.
- [4] RICHARD G. BUDYMAS, *Elementos de Máquinas de Shigley*.
- [5] SMARTBOLTS®, [5 Causes of Loose Bolts – and 5 Ways to Prevent Them](#).