Análise de falha estrutural em um eixo Virabrequim

Guilherme Mendonça de Faria
gmendonca10@outlook.com

Stephanie Silva
ssilvasteph@outlook.com

William Balbino Fraga
williamfraga2017@gmail.com

Gustavo Henrique Judice
Coordenação de curso Engenharia Mecânica

Resumo
Um componente de grande importância em um motor a combustão interna é o virabrequim. Sem ele e as bielas não haveria o movimento rotativo dos pistões, o que levaria ao não funcionamento do motor. Dessa forma, o presente artigo se justifica pelo estudo de caso dessa peça tão essencial em veículos automotores, em que é avaliada a razão de sua quebra com o propósito de analisar as possíveis causas dessa quebra para que seja possível indicar melhorias, possibilitando cada vez menos a ocorrência de tais fraturas. O objetivo central é uma pesquisa aprofundada dos motivos que levam um virabrequim a falhar ou romper, tendo como principal motivação um caso real reparado na oficina Sul Minas Centro Automotivo, localizada na cidade de Pouso Alegre/MG, em que um virabrequim de um Fiat Fiorino Hard Working 1.4 Evo Flex 2P 2021 Km 43914 motor 4 cilindros partiu-se ao meio, onde por meio de comparações do aspecto superficial da quebra, constatou-se ter ocorrido, muito provavelmente, ruptura frágil súbita.

Palavras-chaves: Análise de Falha; Virabrequim; Deformação.

1. Introdução

Já não é mais novidade a importância que o aço se faz para a população, provando ser cada vez mais vital com o passar dos anos. Para se ter uma ideia dessa valia, em 2019 o Brasil foi responsável por produzir cerca de 31 milhões de toneladas de aço, o que o torna o nono maior produtor deste material no mundo (MATERIAIS JÚNIOR, 2021).

Há inúmeras razões para a popularidade do aço, entre elas estão seu baixo custo de fabricação, de conformação e de processamento em relação a outras ligas; a fartura de matérias-primas (minério de ferro e sucata) e ainda há a viabilidade na obtenção de uma faixa sem paralelo de variabilidade de propriedades mecânicas para aços com diferentes composições químicas ou para um mesmo aço com diversos tratamentos termomecânicos (TSCHIPTSCHIN, 2009).

Os aços possuem incontáveis propriedades conhecidas, mas é de suma importância que ressaltemos suas principais propriedades mecânicas tais como: a resistência a tração, que é a medida de força necessária para tracionar um corpo de prova; elasticidade, onde o material poderá ser deformado ao exercer uma tensão

sobre ele e voltar ao seu estado normal quando essa tensão for retirada; ductilidade, que é a capacidade que o material possui de se alongar até romper; tenacidade, em que é capaz de captar energia e deformar sem fraturar (FERREIRA, et al., 2017).

Ainda que o aço seja um material extremamente resistente e está sempre presente nas indústrias e até em nossas casas, ele também está sujeito a falhas que, dependendo da situação, podem ser catastróficas.

No geral, qualquer tipo de material está sujeito a falhas, por maneiras e razões diferentes, e determinar a causa dessas falhas é de suma importância para evitar quaisquer tipos de reincidência. Uma das técnicas criadas para prevenir este tipo de cenário foi o estudo da falha, que abrange uma análise criteriosa através de métodos de questionamento. No entanto, para que esta metodologia funcione de forma correta, é necessário manter a “mente aberta” enquanto é feita a análise e o exame das evidências para possibilitar um entendimento claro e imparcial da falha (ASM HANDBOOK, 2002).

Um material pode vir a falhar por incontáveis motivos, mas alguns casos relevantes a serem ressaltados são por: ruptura dúctil, decorrente em materiais dúcteis e que possuem alto potencial de se deformar plasticamente quando sujeitados por algum carregamento; ruptura frágil (clivagem), que não sofre deformação plástica e o material se rompe com tensões inferiores ao limite de escoamento com alta velocidade de propagação da trinca; fadiga, decorrente quando o uso de cargas são repetitivas ou cíclicas (AMERICAN SOCIETY, 1990).

Para qualquer tipo de falha apresentada por um material há uma causa, e para entender essas causas são empregados diversos tipos de recursos, como o desenvolvimento do projeto, as propriedades do material aplicado, os esforços a que o material foi submetido, o envolvimento humano, entre muitos outros. Diante tantas informações, uma outra técnica importante é utilizada para a análise de falhas, esta chamada de análise de fratura, também conhecida como “fractografia”, que possibilita a análise da fratura a olho nu ou até mesmo com lupas e lentes (LIMA, 2015).

Como já mencionado, o aço é um material de muita importância, podendo ser encontrado entre os produtos mais comuns aos mais complexos. Dessa forma, o presente artigo se justifica pelo estudo de caso de uma peça bastante conhecida e de máxima relevância, principalmente no ramo automobilístico, chamada virabrequim, em que é avaliada a razão de sua quebra quando utilizada em motores de combustão interna de quatro cilindros de carros de passeio, com o propósito de avaliar as

possíveis causas dessa quebra para que seja possível indicar melhorias e, dessa forma, haver cada vez menos adversidades com essa peça tão essencial em veículos e máquinas.

O objetivo central é realizar uma pesquisa aprofundada dos motivos que levam um virabrequim a falhar ou romper, tendo como principal motivação alguns casos reais, sendo um deles ocorrido na oficina Sul Minas Centro Automotivo, localizada na cidade de Pouso Alegre, MG, onde um virabrequim de um Fiat Fiorino Hard Working 1.4 Evo Flex 2P 2021 Km 43914 motor 4 cilindros partiu-se ao meio.

2. Metodologia

A metodologia utilizada neste artigo foi baseada em revisões bibliográficas, ressaltando características importantes do aço, suas propriedades mecânicas e análises de falhas, frisando as mais comuns em um eixo virabrequim.

Na revisão bibliográfica foram utilizados livros acadêmicos, teses, dissertações, artigos científicos e sites com ênfase em assuntos automobilísticos, visando conteúdos convenientes para a construção deste artigo.

Após adquirir todo conhecimento teórico necessário, foi possível realizar o estudo de caso prático de um eixo virabrequim do automóvel Fiat Fiorino Hard Working 1.4 Evo Flex 2P 2021 motor 4 cilindros com 43.914 quilômetros rodados, fazendo um comparativo baseado em uma problemática semelhante a realizada por Calegaro (2018) de um eixo virabrequim de um motor diesel 12 cilindros em linha aplicado em um caminhão fora de estrada CATERPILLAR, utilizando a análise visual e entendimentos obtidos para avaliar os possíveis tipos de falhas e também pontuando prováveis causas

3. Referencial teórico

As fundamentações teóricas que concede o melhor discernimento para a construção deste artigo são apresentadas neste capítulo.

3.1 Aços

O aço não é uma liga simples e sua definição é mais complicada do que aparenta já que os aços comerciais não são somente ligas binárias, o que pode acarretar a diferentes tipos de mudança devido a adição de elementos de liga aliados

ou o não processamento termomecânico e/ou térmicos apropriados. Tais mudanças a serem observadas são os ARBL (Aços Alta Resistência Baixa Liga) que podem conter baixo ou alto teor de carbono, os multifásicos, e os aços com ultrabaixo teor de carbono com interstícios livres (Interstitial - Free Steels – IF). Embora o ferro e o carbono sejam os elementos de liga centrais em razão dos processos de fabricação, sempre haverá a existência de elementos secundários como o silício, manganês, fósforo e enxofre, que na indústria é conhecido como elementos residuais. Portanto, pode-se dizer que o aço é uma liga de Ferro-Carbono, que contém em torno de 0,008% até por volta de 2,11% de carbono (ELISEI, 2008).

3.1.1 Aços alta resistência e baixa liga (ARBL)

Segundo a dissertação de Ordóñez (2004), os aços intitulados ARBL são aqueles que contém, principalmente, carbono entre 0,05 até 0,25% e manganês até 2,0%. O cromo, níquel, molibdênio, cobre, nitrogênio, vanádio, nióbio, titânio e zircônio são utilizadas em diversas combinações, dificilmente excedendo a porcentagem de 0,1% cada, e sem ultrapassar um total de 8% em peso da composição.

Para Meester (1997), esses aços foram inicialmente desenvolvidos para atender às necessidades da indústria de gás e petróleo, no entanto, seu alto desempenho industrial otimizou o uso em outros tipos de indústria como a automotiva e a de estruturas.

As principais características dos aços ARBL são seu alto limite de resistência e boa tenacidade a baixas temperaturas (RODRIGUES, et al., 2000); boa conformabilidade (SENUMA, 2001) e boa soldabilidade, em função do baixo índice de carbono equivalente, reconhecido por Meester (1997).

Existem três classificações ou famílias de aços ARBL. A primeira e mais conhecida são a dos aços microligados, intitulados dessa maneira por conter os elementos citados acima em quantidades muito pequenas. A segunda são as dos aços ARBL com microestrutura ferrita acircular, dos quais contém menos do que 0,1% de carbono com adições de manganês, molibdênio e boro atuando como elementos de liga principais. E a terceira e última classificação são a dos aços ARBL dupla-fase, onde a microestrutura consiste de pequenas ilhas de martensita com alto conteúdo de carbono e uniformemente distribuídas numa matriz de ferrita. A martensita encontrada

na terceira classificação usualmente encontra-se ocupando quase 20% de volume (CASTI, 2000).

3.1.2 Aços multifásicos

Segundo a tese de Anazawa (2007), no que diz respeito ao aspecto microestrutural, os aços multifásicos consistem em uma matriz ferrítica contínua contendo dispersões de segunda fase, como martensita e bainita. Estes aços também possuem teores de austenita retida, em porções volumétricas superiores a 5%. Também incluem os aços bifásicos (DP), de plasticidade induzida por deformação (TRIP) e de fases complexas (CP). Os aços bainíticos, usados em componentes da suspensão, são uma subsérie dos produtos bifásicos, onde a martensita é substituída pela bainita.

Os aços bifásicos podem ser caracterizados como aços de baixo carbono que, através de um tratamento térmico chamado têmpera intercrítica, possuem microestruturas ferríticas que contêm uma certa porção de martensita (PEREIRA, 1992). A microestrutura dos aços bifásicos é composta por ferrita de baixo carbono e, dependendo da resistência, entre 20 e 70% de fases duras, normalmente martensita (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

Os aços com plasticidade induzida por transformação (TRIP) são os aços com baixos teores de elementos de liga, entre eles silício, alumínio e magnésio. Através de um tratamento térmico apropriado, “ilhas” de austenita (fase estável a altas temperaturas) absorvem carbono em um nível suficiente para não permitir sua transformação no retorno à temperatura ambiente, constituindo a fase chamada austenita retida. Nos aços TRIP, essa fase deve apresentar porções volumétricas superiores a 5% (ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT, 2002).

Por fim, os aços de fase complexas (CP), como o próprio nome já diz, possuem uma microestrutura complexa e extremamente fina composta de ferrita, bainita e martensita distribuídas homogeneamente por precipitações superfinas. Por conta de suas propriedades mecânicas excelentes (resistência ao desgaste, boa conformabilidade a frio e soldabilidade), estes aços são produzidos para a fabricação de componentes automotivos que visam a redução de peso com a manutenção da

segurança, como por exemplo, na fabricação de barras de proteção lateral, reforços estruturais na carroceria, peças de chassis (ANAZAWA, 2007).

3.1.3 Aços IF (Interstitial-Free - Interstícios livres)

São denominados IF alguns aços onde há a inexistência de elementos intersticiais na matriz ferrítica, podendo denomina-los como aços de composição com ultra baixo carbono e nitrogênio, os quais são retirados do estado de solução sólida sendo capaz de formar precipitados pela adição de elementos formadores de carbeto e nitreto, tais como o titânio e o nióbio, deixando, como o próprio nome diz, o aço livre de elementos intersticiais (FIETO,2013).

Não há uma classificação padronizada para os aços IF e, usualmente, eles se diferem pelo elemento que estabiliza os solutos, e como exemplo desses estabilizadores, são citados o titânio, nióbio ou os dois (FIETO, 2013).

3.2 Propriedades mecânicas dos aços

Quando se obtém o conhecimento necessário das propriedades mecânicas dos materiais, é possível realizar uma seleção preliminar destes através de bancos de dados. No entanto, é preciso entender como obter as propriedades nesses bancos, o que elas significam e aprender que foram definidas perante ensaios idealizados (ASKELAND, et al., 2015).

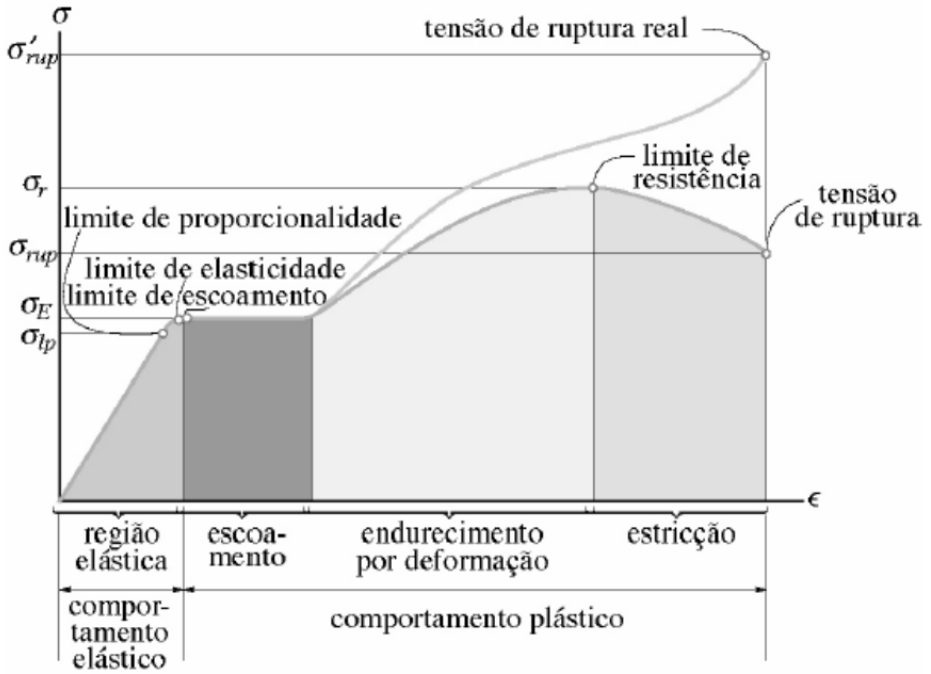
Materiais com a mesma composição química, por exemplo, possuem a chance de ter propriedades mecânicas muito diferentes devido sua microestrutura. Além do mais, mudanças de temperatura, a natureza cíclica de tensões aplicadas, as modificações provenientes da oxidação, corrosão ou erosão, as alterações microestruturais causadas pela temperatura, eventuais defeitos durante a fabricação, como na operação de usinagem, soldagem e corte, entre outros diversos fatores, possibilitam a alteração do comportamento mecânico dos materiais (ASKELAND, et al., 2015).

3.2.1 Resistência a tração

Souza (1982) indica que a aplicação de uma força em um corpo sólido proporciona uma deformação do material na direção do esforço, e o ensaio de tração consiste em submeter um material a um esforço que tende a esticá-lo ou alongá-lo. Usualmente, o ensaio é realizado num corpo de prova de formas e dimensões padronizadas, para que os resultados possam ser comparados ou, se necessário, reproduzidos. Este corpo de prova é fixado em uma máquina de ensaio que aplica esforços crescentes na direção axial, sendo medidas as deformações correspondentes. Os esforços ou cargas são medidos na própria máquina de ensaio e o corpo de prova é levado até a sua ruptura.

O gráfico tensão-deformação, como mostra a Figura 1, é construído baseado em um ensaio de tração em que um corpo de prova metálico é submetido, que utilizam medidas diretas da carga (ou tensão) e da deformação que crescem constantemente até próximo do fim do ensaio (ORDÓÑEZ, 2004).

Figura 1: Diagrama convencional tensão-deformação



Fonte: HIBBELER (2018).

As propriedades mecânicas adquiridas por meio do ensaio de tração são: limite de resistência (LR), que é a tensão máxima suportada pelo metal; limite de escoamento (LE), que é a tensão que marca a transição do metal da zona de

deformação elástica para a zona de deformação plástica; limite de escoamento convencional (Ln), que é calculado seguindo o gráfico tensão-deformação quando não é possível calcular diretamente o limite de escoamento; alongamento total do corpo de prova (ε), que é expresso em % e a estricção (φ), que é expressa em % e calcula a diminuição da seção transversal do corpo de prova (ORDÓÑEZ, 2004).

3.2.2 Propriedades Elásticas

O módulo de elasticidade, também conhecido como módulo de Young (E), determinado na Eq. 1, é definido pela curva tensão-deformação na região elástica, e essa relação entre tensão e deformação nesta região é vista na lei de Hooke (ASKELAND, et al., 2015):

$$E = \frac{S}{e} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

As constantes (*S*) e (*e*) estão relacionadas, respectivamente, a tensão e deformação de engenharia, na Eq. 2 e Eq. 3 (ASKELAND, et al., 2015):

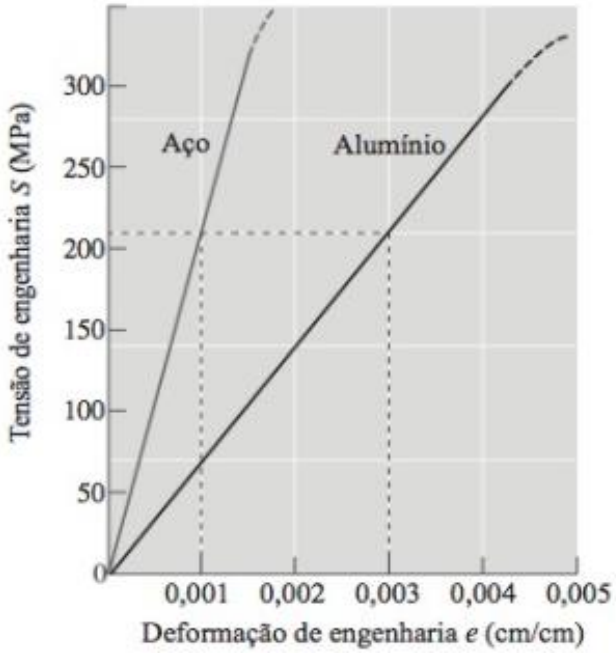
$$Tensão\ de\ engenharia = S = \frac{F}{A_0} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

$$Deformação\ de\ engenharia = e = \frac{\Delta_l}{l_0} \qquad \text{(Eq. 3)}$$

No qual A_0 é a seção transversal inicial do corpo de prova antes do teste, l_0 é a distância inicial entre as marcas de referência e Δl é a variação de comprimento sob a força *F* (ASKELAND, et al., 2015).

Na Figura 2 é feito uma comparação do comportamento elástico do alumínio e do aço. Se for aplicada uma tensão de 207MPa para cada material, o aço irá se deformar elasticamente em 0,001 cm/cm. Já o alumínio irá se deformar em 0,003 cm/cm. Conclui-se que o modulo elástico do aço é cerca de três vezes maior que o do alumínio (ASKELAND, et al., 2015).

Figura 2: Comparação entre o comportamento elástico do aço e do alumínio



Fonte: ASKELAND (2014).

3.2.3 Ductilidade

De acordo Askeland, et al. (2015), a ductilidade é definida pela capacidade que o material possui, após aplicar uma força, de se deformar permanentemente sem romper. As duas medidas comuns expressas para a ductilidade são o alongamento percentual e redução percentual de área. No alongamento percentual é calculado a deformação plástica permanente quando ocorre uma fratura, mensurando as distâncias entre as marcas de sensores do corpo de prova antes e depois do teste. Já na redução percentual de área irá calcular a variação em porcentagem da área da seção transversal na região de fratura, antes e depois do ensaio.

A fórmula para alongamento percentual e redução percentual de área podem ser descritas, respectivamente, conforme Eq. 4 e Eq. 5 (ASKELAND, et al., 2015):

$$\%AL = \frac{l_f - l_0}{l_0} x100 \qquad \text{(Eq. 4)}$$

Onde l_f é o comprimento no momento da fatura e l_0 é o comprimento útil original (CALLISTER, et al., 2020).

$$\%RA = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \qquad \text{(Eq. 5)}$$

Onde A_0 é a área da seção transversal original e A_f é a área da seção transversal no ponto de fratura. Os valores da redução percentual na área são

independentes tanto de l_0 quanto de A_0, e dependendo do material, as magnitudes de %AL e %RA serão, usualmente, distintas (CALLISTER, et al., 2020).

3.2.4 Tenacidade

Em Callister, et al. (2020), a tenacidade indica a resistência de um material a fratura quando uma trinca ou quaisquer outros defeitos prevenientes de tensões se faz presente.

Fabricar materiais sem defeito ou simplesmente prevenir danos durante o serviço é um feito praticamente impossível e por isso, a tenacidade é uma das principais considerações para todos os materiais estruturais. Outra forma de estabelecer a tenacidade é definir a capacidade que o material possui de absorver energia e se deformar plasticamente antes de fraturar. Para uma elevada taxa de deformação ou quando um ponto de concentração de tensões está presente, a tenacidade é obtida mediante um ensaio de impacto. Caso utilize uma pequena taxa de deformação, os resultados são obtidos baseado em ensaios de tensão-deformação em tração (CALLISTER, et al. 2020).

3.3 Falhas

Conforme publicado por Ruchert (2012), a falha é caracterizada por revelar que um componente ou peça em serviço se tornou totalmente inoperacional, ou que continua operando, porém, incapaz de desempenhar com eficácia a sua função, ou está altamente comprometida, prestes até mesmo de se tornar arriscado para uso constante.

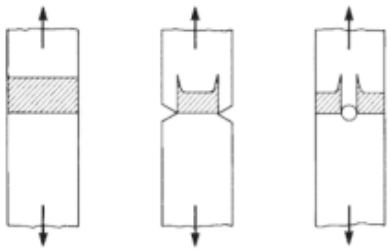
De acordo com Callister (2000), se tratando de uma falha onde ocorre a separação de um corpo de prova em duas partes ou mais, possivelmente houve uma tensão empregue que depende do tipo de esforço que a peça foi submetida, e esses esforços podem ser de tração, compressão, cisalhamento e torção.

A tensão de tração, conforme exemplifica Collins (1993) ocorre constantemente ao longo da seção, em que a ruptura se inicia no centro, se espalha pela superfície e finaliza em linhas de cisalhamento inclinadas a 45°. Quando se fala em materiais dúcteis (aqueles que possuem alta capacidade de deformação), as tensões de cisalhamento são as maiores causadoras das deformações plásticas sobressalentes, que se descrevem por alongamento e estricção. E quando se fala em materiais frágeis,

esses possuem baixa capacidade de deformação e sua ruptura é perpendicular ao eixo de solicitação.

A Figura 3 mostra um exemplo onde, caso haja concentrações de tensões ou locais de descontinuidade, haverá um aumento brusco das tensões no local (CALEGARO, 2018).

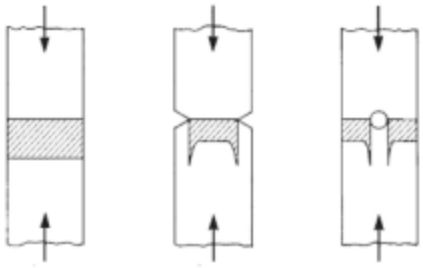
Figura 3: Exemplos de solicitação por tração



Fonte: WULPI (2013).

A tensão proveniente da compressão se porta semelhante a tensão de tração, diferindo apenas o sinal de aplicação da força, conforme Figura 4 (CALEGARO, 2018).

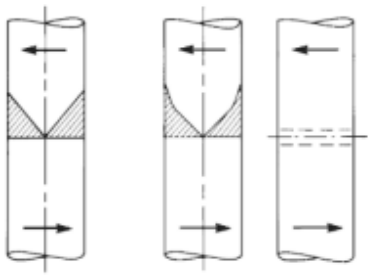
Figura 4: Exemplos de solicitação por compressão



Fonte: WULPI (2013).

Segundo Calegaro (2018), a carga torcional pura (tensão), geralmente vista em eixos cilíndricos, possui tensões que são máximas nas superfícies e zero no eixo central, com dimensões iguais. Porém, como em todo caso, um acumulo de tensão, como um furo transversal ou entalhes, aumenta as dimensões, em especial nos planos de tensão e compressão, conforme demonstra a Figura 5.

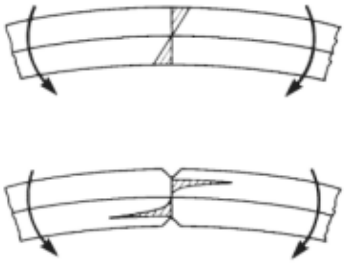
Figura 5: Torção



Fonte: WULPI (2013).

Wulpi (2013) combina tração e compressão em peças que recebem esforço de flexão. A figura 6 evidencia uma flexão de 3 pontos ou trabalho de momento fletor, em que a superfície onde é empregue o esforço sofrerá compressão e a superfície oposta sofrerá a tração. De modo análogo a todos os tipos de esforços, os concentradores de tensão intensificam os efeitos das solicitações na peça.

Figura 6: Flexão



Fonte: WULPI (2013).

3.3.1 Fractografia

Uma das referências mais importantes relacionadas à causa da falha é a própria superfície da fratura, e a fractografia é a responsável por analisar as características da fratura, buscando relacionar a topografia de sua superfície com as causas e modos comuns da fratura (AMERICAN SOCIETY, 1987).

Com a inspeção a olho nu ou com o auxílio de lupas e lentes torna-se possível uma análise fractográfica, mas é importante se atentar aos tópicos gerais da peça, viabilizando delimitar o tipo de fratura, existência ou inexistência de deformação ou estricção, pontos das superfícies de fratura (se é brilhante, fosca, lisa ou granular), definir o modo de solicitação que a peça foi submetida, obter a região do começo da

fratura através de convergência de linhas, presença de defeitos ou oxidação (POKORNY & POKORNY, 2002).

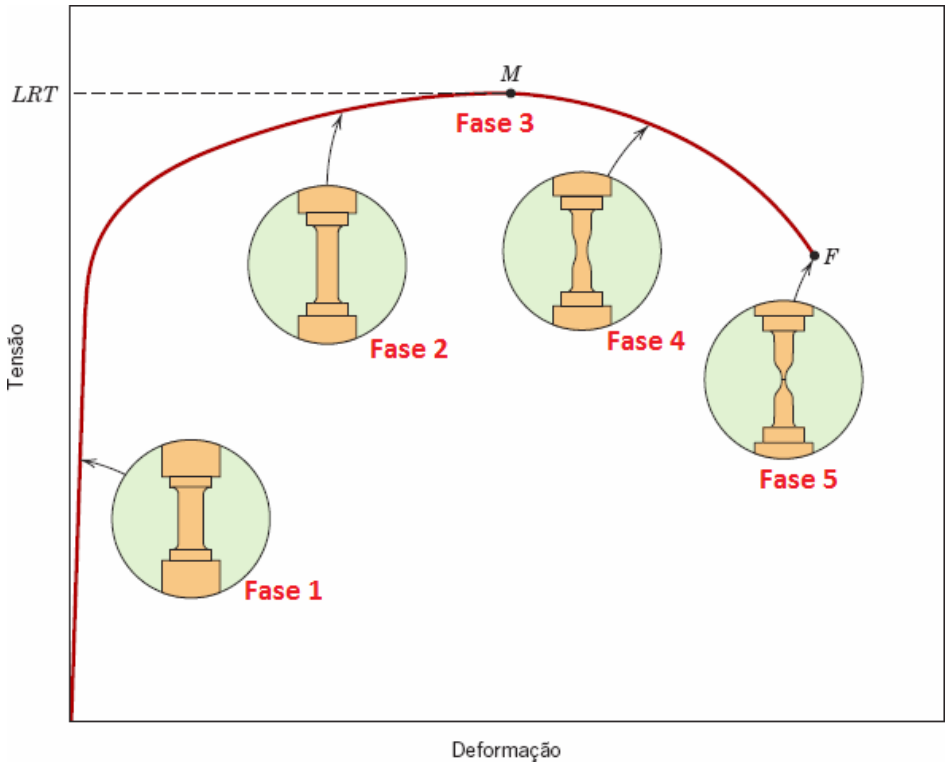
Internamente as estruturas dos materiais utilizados na fabricação é cristalina, o que significa que os átomos são arranjados seguindo uma certa ordem. Na engenharia, a fratura pode acontecer de forma transgranular (por meio dos grãos) ou intergranular (ao longo dos limites dos grãos) conforme a estrutura formada pela ordenação dos átomos. Porém, independente do percurso da fratura, existem três situações fundamentais de fratura conforme sua capacidade de deformação plástica do material, que são as rupturas dúcteis, rupturas frágeis (clivagem), e fadiga (AMERICAN SOCIETY, 1990).

3.3.1.1 Ruptura Dúctil

Para Calegaro (2018), os materiais que sofrem esse gênero de ruptura dúctil suportam grandes esforços, e quando ocorre a fratura é normal associá-la a sobrecargas, especialmente sobrecarga de tração.

Observando o tipo de fratura taça e cone, usual em esforços de tração, é possível analisar as etapas do corpo de prova com o emprego do carregamento, conforme mostra a Figura 7. Na fase 1, o material sofre a deformação elástica, isto é, quando a força é retirada, as dimensões voltam ao seu estágio inicial. A fase 2 o esforço alcança a região plástica o que acarreta em deformações irreversíveis e uniformes ao longo de toda área. A fase 3 demonstra o limite de resistência a tração, que é o ponto máximo na curva tensão x deformação, e se mantida a solicitação neste ponto, a fratura é iminente. A fase 4 demonstra o ponto de criação do chamado estrangulamento (estricção). E por fim, na fase 5 ocorre o limite de resistência a fratura, onde ocorre a propagação de trincas mediante cisalhamento em um ângulo de 45°, aproximadamente, até que o material se desprenda de vez (CALLISTER, 2000).

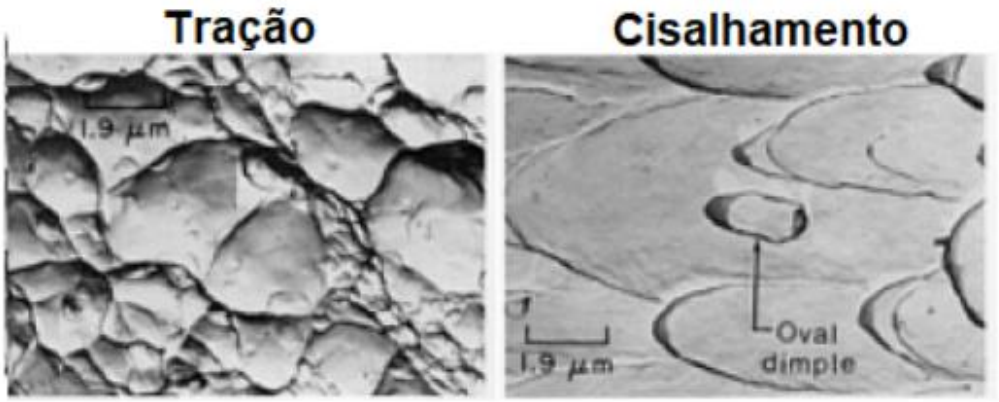
Figura 7: Comportamento de um material dúctil quando submetido a ensaio de tração



Fonte: CALLISTER (2000).

Na Figura 8, Affonso (2002) demonstra com detalhes micro gráficos a formação de micro cavidades onde promove a superfície uma aparência de possuir várias cavidades esféricas ou parabólicas, que são conhecidas como dimples. O formato dos dimples são referentes a maneira de carregamento, sendo os mais arredondados causados por tração e os mais elípticos (ovais) por tensões de cisalhamento.

Figura 8: Influência do carregamento na formação de micro cavidades (dimples)



Fonte: AMERICAN SOCIETY (1987).

3.3.1.2 Ruptura frágil (clivagem)

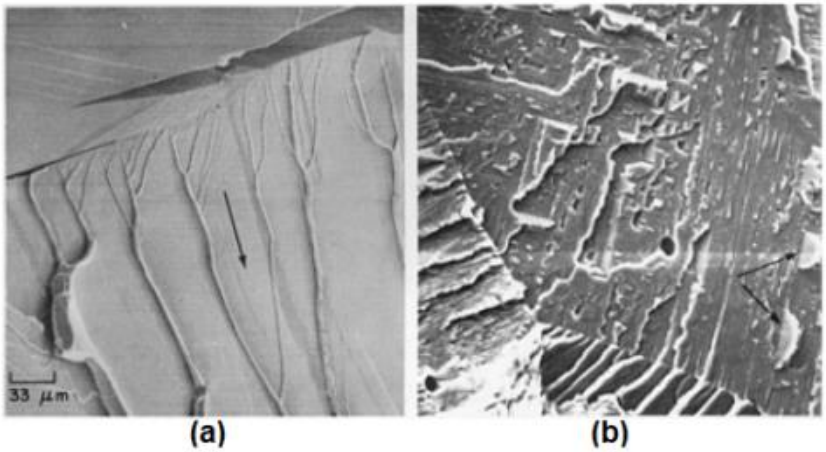
A superfície da fratura frágil exibe separação direta ao longo dos planos cristalinos, também conhecido como planos de clivagem, por uma ruptura de ligações atômicas básicas, como mostra a Figura 9 (CALEGARO, 2018).

Figura 9: Fratura frágil

Fonte: AMERICAN SOCIETY (1987).

Conforme Figura 10, a presença fractográfica é definida por apresentar facetas de clivagem, que são formados por inúmeros platôs e marcas de rio, do inglês *riverspatterns*, decorrentes do crescimento de trincas sincrônicas em dois ou mais planos cristalográficos paralelos, que se juntam e formam degraus. Vistas por meio de grãos, as facetas de clivagem exibem alta refletividade, o que dá à superfície um aspecto brilhante. Um ponto importante a ser ressaltado na análise de ruptura frágil é definir onde a fratura começou sendo sinalizada pelas marcas radiais, também conhecidas como marcas de sargento (CALEGARO, 2018).

Figura 10: Amostras de fraturas de clivagem



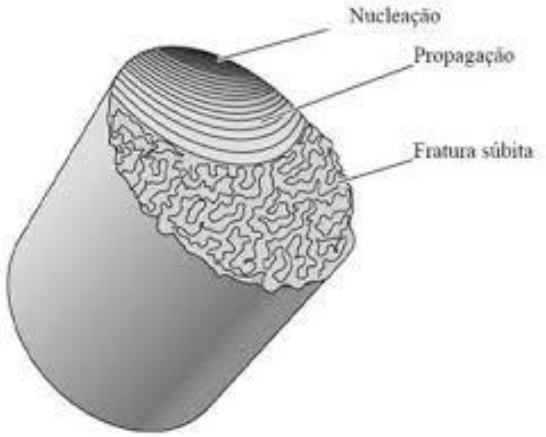
Fonte: AMERICAN SOCIETY (1987).

O lado (a), da Figura 10, demonstra os degraus de clivagem e padrões de rio em uma liga Fe-0,01C-0,24Mn-0,02Si que sofreu impacto. O lado (b) mostra línguas de superfície de um metal de solda de aço 30% de Cr que rompeu por clivagem (AMERICAN SOCIETY, 1997).

3.3.1.3 Ruptura por fadiga

Segundo Callister (2000), usualmente, a ruptura por fadiga ocorre em 3 estágios, conforme Figura 11: no estágio I acontece a nucleação de trincas em descontinuidades existentes no material, parecidos com a clivagem; no estágio II essas trincas se propagam por grande parte de seu comprimento e segue para uma fratura súbita durante estágio III.

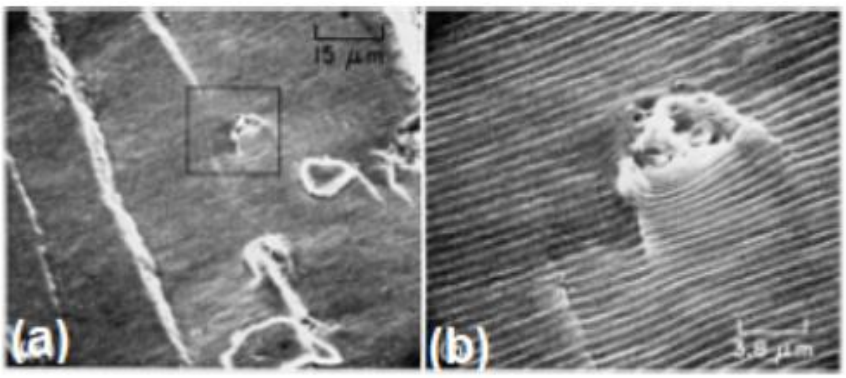
Figura 11: Reprodução de trincas por fadiga



Fonte: CALLISTER (2000).

A superfície de fratura na nucleação não exibe morfologia característica, diferente das fraturas em propagação e fratura súbita, que possui pontos microscópicos as estrias de fadiga, que são marcas paralelas alinhadas com a direção de propagação de trincas, conforme mostra a Figura 12, onde sinaliza a posição de frente de seguimento de cada ciclo de carga. As marcas de praia, do inglês *beachmarks*, quando em análise macro gráfica, são consequências da alteração no ciclo de carga na frequência e na magnitude das tensões (AMERICAN SOCIETY, 1987).

Figura 12: Amostras micro gráficas de estrias de fadiga em uma liga de alumínio



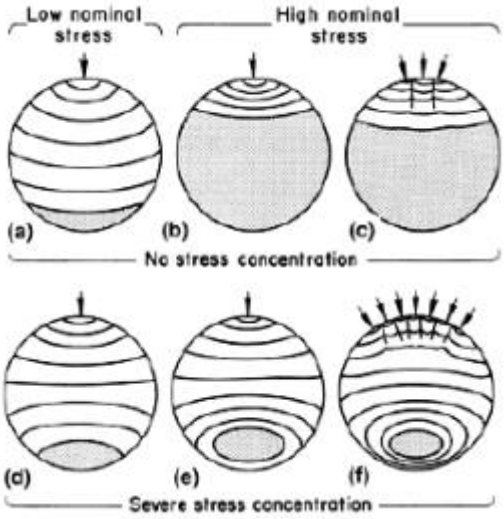
Fonte: AMERICAN SOCIETY (1987).

Na Figura 12 (a) está localizado o rasgo de inclusão, região esboçado por um retângulo e (b) representa a vista com maior ampliação dessa região, exibindo a continuidade do caminho da fratura através e ao redor da inclusão (AMERICAN SOCIETY, 1997).

Para Affonso (2002), outro aspecto que vale a pena ressaltar se tratando de ruptura por fadiga é observar se a ocorrência foi em alto ou baixo ciclo. Na fadiga de alto ciclo provocada por tensões menores que o limite de escoamento, as deformações são dominantemente elásticas, conforme mostra a Figura 13 (a), com marcas de praia em toda superfície e fratura final minúscula. Já na fadiga de baixo ciclo, as tensões de escoamento são acima do limite e apresentam deformações plásticas acentuadas, com marcas de praias espaçadas e fratura final ocupando maior extensão da superfície, conforme mostra Figura 13 (b) e (c). A Figura 13 (d), (e) e (f) exibe uma reação diferente quando a peça apresenta acúmulo de tensões severos, ao ponto que as marcas de praia são de acordo com os ciclos e carregamentos. Nesses casos, a frente da trinca irá se propagar com mais rapidez no perímetro do componente, alterando a curvatura das marcas de praia.

Na Figura 13, as setas indicam o início das trincas e as zonas sombreadas indicam a fratura final (DENNIES, 2005).

Figura 13: Fadigas produzidas através de tensões nominais baixas e altas



Fonte: DENNIES (2005).

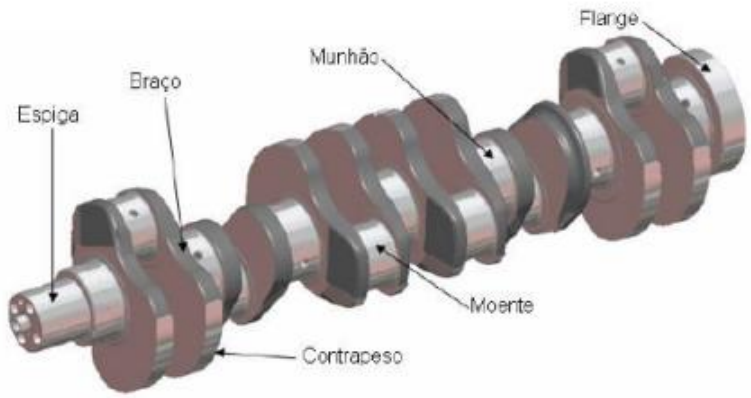
3.4 Virabrequim

O virabrequim é um componente indispensável que compõem diversos tipos de motores. Também conhecido como árvore de manivela ou girabrequim, é uma peça que está sempre em contato com partes extremamente quentes do carro e sofrendo atrito constante. Desse modo, é necessário que ela seja robusta e por isso, na maioria das vezes, é feita de aço. Localizado na parte interna do motor, o componente é responsável por receber as forças geradas pelos movimentos dos pistões durante a queima ar-combustível e transformá-las em torque rotacional. O virabrequim encontra-se entre a parte superior do cárter e a parte inferior do bloco, sendo o motor dividido em três partes que seriam o cabeçote, o bloco e o cárter, respectivamente. Em conjunto com as bielas, o virabrequim é encarregado de transformar a força gerada pelo movimento dos pistões em energia rotativa, que chega até o volante do motor do veículo (NACCARI, 2021).

De acordo com Ferreira (2008), o virabrequim apresenta uma série de elementos, que podem ser observados na Figura 14, e são: a Espiga, região em que o absorvedor de vibrações (também conhecido como polia ou damper) é instalado; o Braço, que é o componente responsável pela fixação do munhão ao moente; as Massas de Contrapeso, que trabalham gerando forças centrípetas contrárias ao movimento do moente para assim contrabalancear a inércia de movimento dos pistões; o Moente que é o componente com a função de proporcionar a montagem da

biela ao virabrequim; o Munhão que tem como função permitir a união do bloco do motor com o virabrequim e a Flange na qual o volante de inércia do motor é fixado, volante este que apresenta um anel dentado para a conexão com o motor de partida e que faz o contato com a embreagem.

Figura 14: Componentes fundamentais do virabrequim



Fonte: FERREIRA (2008).

Geralmente os eixos virabrequins são fabricados por forjamento ou fundição, que vai depender das circunstâncias de projeto como propriedades mecânicas, geometria da peça, custo benefício (CALEGARO, 2018).

Na Tabela 1 está representado o comparativo de vantagens e desvantagens desses processos e por ela nota-se o motivo dos virabrequins de carros tradicionais serem, na maioria das vezes, de fabricação fundida e os de frota pesada serem forjados (CALEGARO, 2018).

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos métodos de fabricação de um virabrequim.

	FORJAMENTO	FUNDIÇÃO
VANTAGENS	Melhores propriedades mecânicas	Alta taxa de produção
	Confiabilidade	Viabilidade de peças grandes
	Sem necessidade de tratamento do metal líquido	Flexibilidade de projeto
DESVANTAGENS	Defeitos de dobra, falha de enchimento	Trincas, soldas frias
	Forma limitadas quanto a seções ocas	Projeções metálicas
	Custo total geralmente superior	Inclusões

Fonte: FERREIRA (2008).

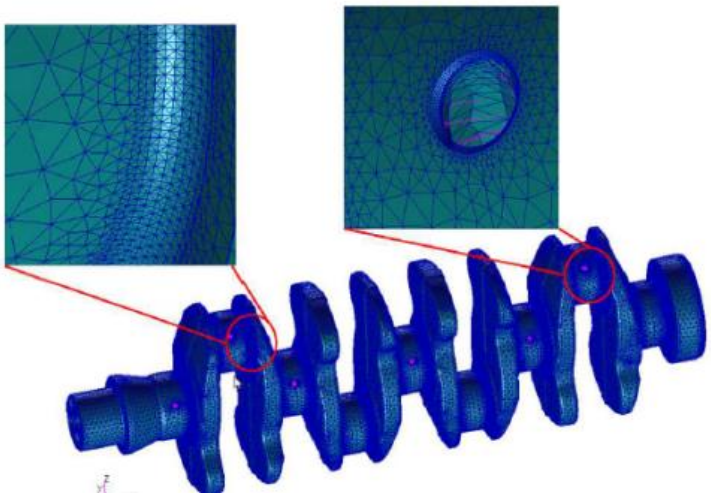
3.4.1 Falhas características de um virabrequim

As razões que levam um eixo virabrequim a falhar são inúmeras. No entanto, as falhas mecânicas por fadiga são, provavelmente, a razão mais usual neste componente. Alguns fatores podem proporcionar essas falhas, como desalinhamento do eixo, demasiadas vibrações ou concentrações de tensão ocasionadas por imperfeições em raios de concordância remanufaturados. É possível que também aconteça as falhas operacionais causadas por erro na lubrificação, temperaturas de operação elevadas e até mesmo contaminação do sistema (CALEGARO, 2018).

Em Rodrigues, et al. (2013), é realizado uma análise de um virabrequim utilizando um modelo em elementos finitos. O intuito dos autores foi analisar o desempenho estrutural da peça durante o funcionamento do motor, avaliar os níveis de tensão e indicar fatores de segurança para o problema em questão. Com este estudo eles reforçaram, com auxílio de recursos computacionais, que os raios de concordância demandam atenção de projeto.

A Figura 15 mostra um virabrequim referência. Rodrigues, et al. (2013) tiveram o cuidado de manter as regiões de tensão com tamanho de elementos parecidos para que o resultado da análise estrutural-dinâmica não fosse afetado. Além de tudo, o modelo foi refinado o suficiente para que apresentasse resultados confiáveis.

Figura 15: Exemplo de elementos finitos empregue na análise dinâmica

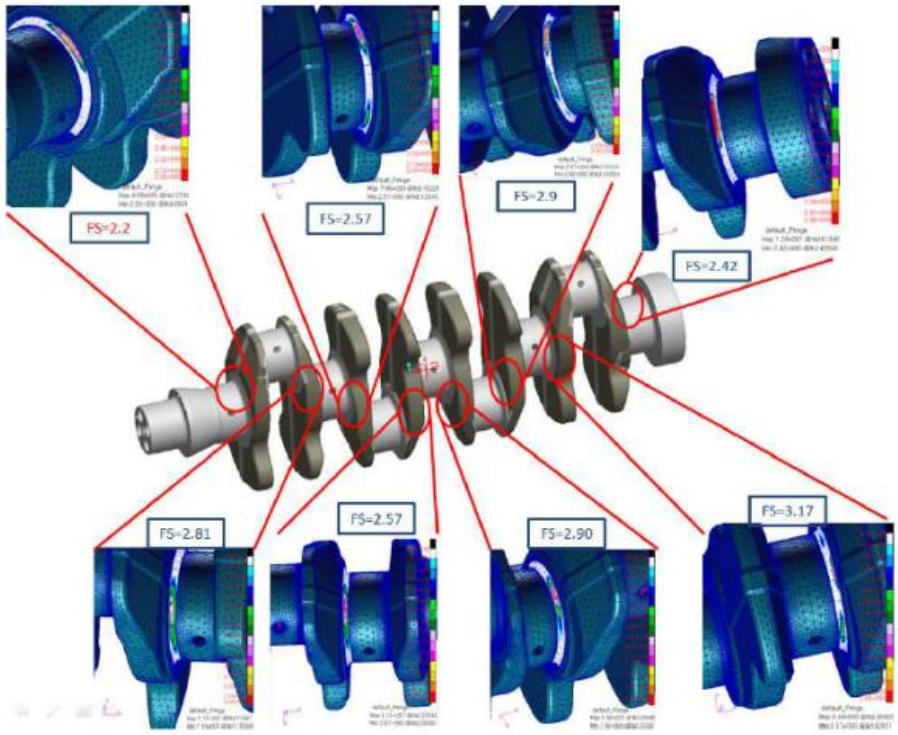


Fonte: RODRIGUES, et al. (2013).

Logo após combinarem os dados de tensão com o critério de fadiga aplicados em seu trabalho, os autores Rodrigues, et al. (2013) exibiram os fatores de segurança nas várias regiões do componente (braços, furos de óleo e raios de mancais) graças aos diferentes limites de fadiga. Nas Figuras 16 e 17 são mostrados os fatores

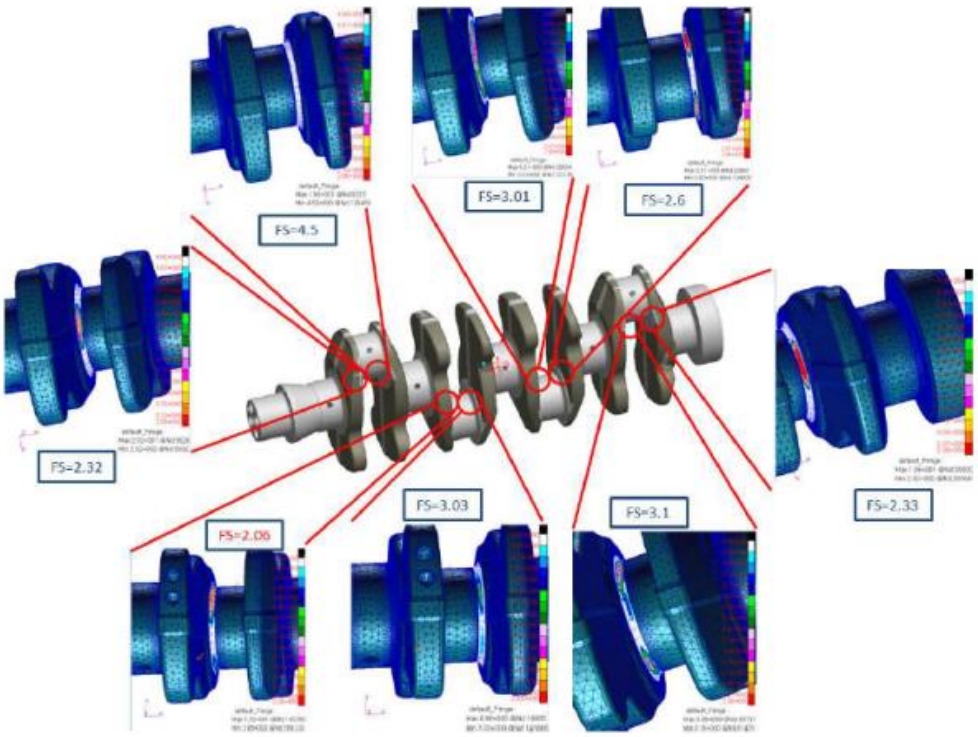
encontrados para os raios de concordância dos munhões e moentes, excepcionalmente nesta ordem.

Figura 16: Fator de segurança estrutural encontrado no munhão do virabrequim



Fonte: RODRIGUES, et al. (2013).

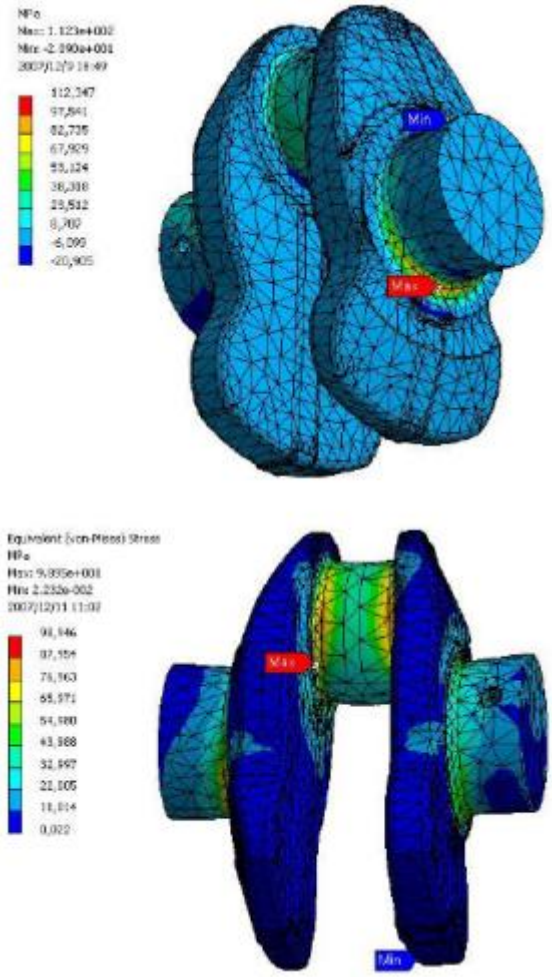
Figura 17: Fator de segurança estrutural encontrado no moente do virabrequim



Fonte: RODRIGUES, et al. (2013).

Em Projetos de Otimização de Árvores de Manivelas, realizado por Ferreira (2008), o autor realizou outra análise que foi possível simular as condições de trabalho mais críticas: onde a força de combustão é máxima e onde a força de inércia é máxima. Foram examinadas as distribuições de tensão nos raios de transição (concordância) entre os munhões e braços e entre moentes e braços. A Figura 18 demonstra os resultados obtidos.

Figura 18: Máximas tensões obtidas nos raios de transição



Fonte: FERREIRA (2008).

4. Resultados e Discussão

Antes de realizar o estudo da causa da falha do eixo virabrequim em si (Figura 19), é importante ressaltar as partes do motor que também foram prejudicadas, tais como: pistão 1 com biela fraturada e pistões 2, 3 e 4 superaquecidos (Figura 20); cárter do motor fragmentado (Figura 21); bloco do motor fraturado (Figura 22) e vela de ignição carbonizada (Figura 23).

Figura 19: Eixo virabrequim fraturado

Fonte: AUTORES (2021).

Figura 20: Pistão 1 com biela fraturada e pistões 2, 3 e 4 superaquecidos

Fonte: AUTORES (2021).

Figura 21: Cárter do motor fragmentado

Fonte: AUTORES (2021).

Figura 22: Detalhe do bloco do motor fraturado

Fonte: AUTORES (2021).

Figura 23: Vela de ignição carbonizada

Fonte: AUTORES (2021).

De acordo com as informações passadas pela empresa Sul Minas Centro Automotivo, o veículo não estava funcionando quando chegou a oficina e precisou ser transportado por guincho.

Para a realização do diagnóstico inicial, os mecânicos da empresa sempre verificam a vela de ignição que, como mostra a Figura 23, se encontra carbonizada. Para justificar a carbonização dessa peça, foi verificado que o veículo, enquanto ainda estava na estrada e em funcionamento, estava com vazamento na mangueira do radiador, onde passou a vazar água sem que fosse notado pelo motorista. Com a falta de água e refrigeração necessários para manter o motor em uma temperatura adequada, houve o superaquecimento do motor, juntamente com o óleo. Com isso, o virabrequim, como mostra Figura 19, veio a fraturar, causando rupturas no cárter e no bloco do motor, conforme Figuras 21 e 22.

De acordo com as pesquisas e estudos realizados, a provável fratura ocasionada no eixo virabrequim do veículo Fiat Fiorino Hard Working 1.4 foi a fratura frágil (tipo de fratura descrita no subtópico 3.3.1.2) que, conforme já mencionado, quando vista através de grãos, apresentam alta reflexibilidade, que dá a superfície onde ocasionou a fratura um aspecto brilhante, conforme mostra a Figura 24.

Figura 24: Detalhe da fratura do eixo virabrequim

Fonte: AUTORES (2021).

Realizando um comparativo mais preciso, a Figura 25 mostra, assim como a Figura 24, o que ocorre em uma fratura frágil. De acordo com Medina (2014), as trincas de uma fratura frágil podem se propagar de maneira súbita e veloz, com pouquíssima deformação plástica. Por gerar pouca deformação plástica macroscópica, a região da fratura é brilhante, como já mencionado, e as facetas e degraus de clivagem ou trincas intergranulares são os geradores de dois tipos de mecanismos predominantes nestes tipos de fraturas: clivagem ou fragilização intergranular.

Figura 25: Fratura Frágil

Fonte: MEDINA (2014).

Na dissertação de Análise de Falhas de um Eixo Virabrequim de Calegaro (2018), a autora verificou que o eixo virabrequim do motor a diesel 12 cilindros havia passado por serviços de retifica, onde o eixo obteve seus mancais principais retificados, admitindo medidas menores que suas dimensões originais (STANDARD), mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Medidas do munhão principal do Virabrequim.

	Tamanho original	Abaixo da medida 0.63 mm
Especificações do manual	120.650 +/- 0.020 mm	120.015 +/- 0.020 mm
Valor medido	-	120.010 mm

Fonte: CALEGARO (2018).

Calegaro (2018) analisou 4 superfícies de fraturas do eixo virabrequim do motor a diesel 12 cilindros em que duas fraturas estavam relacionadas a parte dianteira e duas à traseira, onde a autora identificou um aspecto habitual em falhas típicas de eixo, que é a pôr fadiga. Como visto em ruptura por fadiga no subcapítulo 2.3.1.3, essa falha ocorre quando há a aplicação de cargas repetitivas (usual nos motores) e produz superfície macro-gráfica padrão com marcas de praia (*beachmarks*) e marcas de catraca. A Figura 26 representa o eixo dianteiro, onde nota-se claramente as marcas de praia (*beachmarks*) que indicam a falha por fadiga e as marcas de catraca que indicam exatamente o início da falha.

Figura 26: Detalhe da fratura do eixo virabrequim (eixo dianteiro)

Fonte: CALEGARO (2018).

Na superfície traseira da fratura do virabrequim, conforme mostra Figura 27, Calegaro (2018) verificou que, perante a falta de marcas de praia ou outras evidências que pudessem levar a ruptura por fadiga, conclui-se que houve fratura súbita. Fenômeno parecido pode ser observado no virabrequim analisado do veículo Fiat Fiorino Hard Working 1.4, indicado na Figura 24, em que a falta de marcas distintas uma das outras indica que a fratura ocorreu de forma súbita.

Figura 27: Detalhe da fratura do eixo virabrequim (eixo traseiro)

Fonte: CALEGARO (2018).

Existem alguns processos que podem ser utilizados para melhorar as propriedades tanto físicas quanto mecânicas do material, aumentando sua resistência, melhorando sua usinabilidade, modificando algumas propriedades mecânicas, como a ductilidade. Alguns desses processos são: carbonitretação, utilizado na fabricação de peças com alta dureza superficial e alta resistência a fadiga; têmpera, que aumenta a dureza e a resistência do aço; cementação, utilizada a muitos anos, mas que evoluíram as técnicas de tratamento de calor, aumentando ainda mais a durabilidade e a dureza do material; alívio de tensão, que evita a peça de empenar, torcer ou trincar durante sua utilização; recozimento térmico, que restaura as propriedades do material que foram perdidos em um tratamento anterior; normalização, que propõe melhores propriedades ao material se comparado com o recozimento; solubilização, que aumenta a dureza e a resistência das ligas; endurecimento, que melhora a dureza do material e a resistência ao desgaste; nitretação, que é utilizado para proporcionar mais

dureza na superfície das peças, além de aumentar a resistência a fadiga, desgaste, corrosão e calor (SALES, 2021).

Conclusões

O presente artigo resumiu os processos de análises de falhas para o estudo de caso, onde se analisou uma ruptura em um eixo virabrequim de um Fiat Fiorino Hard Working 1.4 Evo Flex 2P, modelo 2021, hodômetro com 43914 km e motor 4 cilindros.

No capítulo 4, foi realizado a análise de falhas visuais, sem muitos detalhes da micrografia devido à falta de equipamentos necessários para a avaliação da microestrutura nessa região, mas a provável causa mediante ao aspecto da fratura e as informações da literatura utilizadas para análises comparativas pelo aspecto visual da falha indicam que, muito provavelmente, ocorreu fratura frágil por conta do superaquecimento do motor que levou a uma sobrecarga no virabrequim.

Com a provável causa da ruptura, é possível mencionar melhorias facilmente praticáveis como: manter o veículo com as manutenções preventivas em ordem (revisão, controle, monitoramento dos equipamentos dos veículos e realizar a troca de óleo periodicamente), sempre verificar o nível de água e o nível de óleo do carro, optar por aditivos do radiador por ser um liquido refrigerante onde irá auxiliar a manter a temperatura do motor estável, se atentar as luzes do painel, principalmente as luzes de temperatura, se atentar a vazamentos de óleo e/ou água, principalmente em rodovias, evitando colocar a própria vida e a de outras pessoas em risco.

Também é importante ressaltar que a revisão bibliográfica detalhada, organizada e estruturada possibilitou o melhor entendimento em torno da análise de falhas da peça, auxiliando na provável causa raiz sem a necessidade de equipamentos mais sofisticados e tornando os problemas para causas futuras mais acessíveis, visto que aborda, mesmo que de forma sucinta, o conceito de análise de falhas.

Para propostas de trabalhos futuros, pode ser realizado uma análise matalografica da região da fratura para obter um melhor indicativo da falha. Uma outra alternativa para monitorar as características operacionais é a termografia, mas que é interessante para motores de alto custo por ser uma análise relativamente cara para ser realizada a todo momento em que o motor está funcionando.

Referências Bibliográficas

AÇO: características e propriedades. **Materiais Júnior,** 2019. Disponível em: <https://materiaisjr.com.br/aco/>. Acesso em: 8 de set. de 2021.

AFFONSO, L. O. A. **Equipamentos mecânicos: Análise de falhas e solução de problemas**. 3° Ed. QualityMark, 2002.

AMERICAN, Society F. M. **Metals Handbook: Failure analyses and prevention**. Vol. 12 Ohio: ASM International, 2002.

AMERICAN, Society F. M. **Metals Handbook: Fractography**. Ohio: ASM International, 1987.

AMERICAN, Society F. M. **Metals Handbook: Fatigue and Fracture**. Vol. 19. Ohio: ASM International, 1990.

ANAZAWA, Roberto Masato. **Caracterização mecânica e microestrutural de um aço 300M com microestrutura multifásica.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

ASKELAND, Donald R.; WRIGHT, Wendelin J. **Ciência e engenharia dos materiais.** 2° ed. brasileira. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

CALEGARO, Ana Beatriz. **Análise de falha de um eixo virabrequim**. 2018. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018.

CALLISTER, JR. W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**. 5° Ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2000.

CALLISTER, JR. W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução.** 10° Ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2020.

COLLINS, J. A. **Failure of materials in mechanical design: analysis, prediction, prevention**. 2° Ed. Canada: John Wiley & Sons, 1993.

DENNIES, D. P. **How to organize and run a failure investigation.** Ohio: ASM International, 2005.

ELISEI, Cristina de Carvalho Ares. **Caracterização mecânica e microestrutural de um aço de baixo carbono.** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

FERREIRA, Pedro Henrique Ribeiro. **Projeto e otimização de árvores de manivelas.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

FERREIRA, Vanessa; ABRANTES, Jedson; NETO, Aarão. **Construções modulares**. Brasília: NT Editora, 2017.

FIETO, Bárbara Matos. **Evolução da microestrutura e das propriedades mecânicas de aços IF tratados termomecanicamente**. Projeto (Graduação em Engenharia de Materiais) – Escola Politécnica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

JÚNIOR, Álvaro Alvarenga. **Avaliação experimental dos efeitos da fadiga térmica nas propriedades mecânicas de um aço inoxidável austenítico.** 2006. Tese (Comportamento dos Materiais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

LIMA, Dirceu Alves. **Análise de falhas de peças rompidas em serviço.** 2015. Relatório (Iniciação científica) – Fatec Sorocaba, Sorocaba, 2015.

MEDINA, Jorge Arturo Hinostroza. **Avaliação de previsões de fratura elastoplástica.** 2014. Tese. (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2014.

METALS BLACK BOOK: **NORTH AMERICAN FERROUS DATA**, Canada: Casti publishing Inc., 2000.

MEESTER, B. **The weldability of modern structural TMCP steels**. Vol.37. Belgium: ISJ International, 1997.

NACCARI, Fernando. O que é o virabrequim e qual sua importância para o motor? **InstaCarro**, 2021. Disponível em: <https://www.instacarro.com/blog/manutencao-automotiva/o-que-e-o-virabrequim-e-qual-sua-importancia-para-o-motor/>. Acesso em: 6 de out. de 2021.

ORDÓÑEZ, Robert Eduardo Cooper. **Soldagem e caracterização das propriedades mecânicas de dutos de aço API 5L-X80 com diferentes arames tubulares.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Engenharia Mecânica – UNICAMP, Campinas, 2004.

PEREIRA, M. S. **O efeito do revenimento da martensita sobre o comportamento em fadiga de um aço bifásico.** 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 1992.

POKORNY, A.; POKORNY, J. **Fractographie. morphologie des cassures: Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques.** 2002.

RODRIGUES, Alex de Souza. **Análise dinâmica e balanceamento de virabrequins leves de motores.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP, Campinas, 2013.

RODRIGUES, P. C. M.; PERELOMA, E. V.; SANTOS, D. B. **Mechanical properties of na HSLA bainitic steel subjected to controlled rolling with accelerated cooling.** Vol. 283. USA: Elsevier, 2000.

RUCHERT, Cassius. **Princípio de análise de falhas em componentes.** 2012. USP. Disponível em:

<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/225646/mod_resource/content/1/Curso%20Analise%20de%20Falhas%20V4.pdf>. Acesso em: 29 de set. de 2021.

SALES, Raquel. Tratamento de metais: entenda como funcionam os processos mecânicos e térmicos. **ACOPLAST Brasil**, 2021. Disponível em: <https://blog.acoplastbrasil.com.br/tratamentos-de-metais/>. Acesso em: 1 de dez. de 2021.

SILVA, Renato Pacheco. **Avaliação do desgaste erosivo água-areia e água-ar-areia em tubulações de 4" através de técnicas de CFD e de experimentos laboratoriais.** 2011. Dissertação (Materiais e Processos de Fabricação) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

SOUZA, S. A. **Ensaios Mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos.** 5° Ed. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda, 1982.

TENUMA, Takehide. **Physical metallurgy of modern high strength steel sheets.** Vol. 41. Japan: ISIJ International, 2001.

TSCHIPTSCHIN, André Paulo. Mundo dos aços especiais: Processos de fabricação. **Gerdau.** 2009. Disponível em: <http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/antschip/Modulo-1.pdf>. Acesso em: 8 de set. de 2021.

ULSAB-AVC OVERVIEW REPORT. 2002. Disponível em: <http://www.ulsab-avc.org/index.html>. Acesso em: 29 de set. de 2021.

WULPI, D. J. **Understanding how components fail.** 3° Ed. Ohio: ASM International, 2013.

ANEXO A – DECLARAÇÃO DA EMPRESA

ANEXO A – DECLARAÇÃO DA EMPRESA

Declaro para os devidos fins que Guilherme Mendonça de Faria, Stephanie Silva e William Balbino Fraga possuem autorização para divulgar o nome da empresa bem como dados não confidenciais na elaboração de seu trabalho de conclusão de curso apresentado a Faculdade Una de Pouso Alegre, como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Pouso Alegre, 03 de Novembro de 2021.

Centro Automotivo Sulminas Pneus Lojas II

Valdirene Bernardo Mendonça

FRANCO & MENDONÇA LTDA.
CNPJ: 11.203.432/0001-16