

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE REFERÊNCIA EM FORMAÇÃO E EAD/CERFEAD
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM PERÍCIA DE ACIDENTES DE TRÂNSITO

**ANÁLISE DA FADIGA COMO FALHA VEICULAR PREPONDERANTE EM CASOS
DE ACIDENTES DE TRÂNSITO**

Trabalho de Conclusão
NORMANDO DAGOSTIM BEZ

Florianópolis/SC
2017

NORMANDO DAGOSTIM BEZ

**ANÁLISE DA FADIGA COMO FALHA VEICULAR PREPONDERANTE EM CASOS
DE ACIDENTES DE TRÂNSITO**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Centro de Referência em Formação e Ead/CERFEAD do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) como requisito parcial para Certificação do Curso de Pós-Graduação *lato sensu* em Perícia de Acidentes de Trânsito.

Orientador: Fausto Pereira Gomes de Sá, Esp.

Florianópolis/SC

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Bez, Normando Dagostim
ANÁLISE DA FADIGA COMO FALHA VEICULAR PREPONDERANTE
EM CASOS DE ACIDENTES DE TRÂNSITO / Normando Dagostim Bez
; orientação de Fausto Pereira Gomes de Sá. - Florianópolis,
SC, 2017.
36 p.

Monografia (Pós-graduação Lato Sensu - Especialização)
- Instituto Federal de Santa Catarina, Centro
de Referência em Formação e Educação à Distância
- CERFEAD. Especialização em Perícia de Acidentes
de Trânsito. Departamento de Educação à Distância.
Inclui Referências.

1. Acidente de Trânsito. 2. Fadiga. 3. Falha Veicular.
I. Sá, Fausto Pereira Gomes de. II. Instituto Federal
de Santa Catarina. Departamento de Educação à Distância.
III. Título.

NORMANDO DAGOSTIM BEZ

**ANÁLISE DA FADIGA COMO FALHA VEICULAR PREPONDERANTE EM CASOS
DE ACIDENTES DE TRÂNSITO**

Este Trabalho de Conclusão foi julgado e aprovado para a obtenção do título de Especialista em Perícia de Acidentes de Trânsito do Centro de Referência em Formação e Ead do Instituto Federal de Santa Catarina - CERFEAD/IFSC.

Florianópolis, (dia) de (mês) de ano.

.....

Prof. Nilo Otani, Dr.
Coordenador do Programa

BANCA EXAMINADORA

.....

Fausto Pereira Gomes de Sá, Esp. - Orientador

.....

Edison Luis Walter, Esp.

.....

João Henrique Ávila de Barros, MSc.

Dedico este trabalho à minha mãe Mafalda, ao meu pai Valdir, às minhas irmãs
Tatiane e Cristiane, e à minha esposa Marília.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Valdir e Mafalda, pela vida dedicada aos filhos, sempre com muito amor e carinho.

À minha esposa Marília, pelo amor, pela cumplicidade, pela presença em todos os momentos da vida, apoiando as minhas escolhas e participando dos meus sucessos e insucessos; por compreender as ausências, as apreensões, por muitas vezes abrir mão de momentos de lazer e das viagens e, principalmente, por acreditar em mim!

Às minhas irmãs, Tatiane e Cristiane, que sempre estiveram ao meu lado em todas as etapas da vida.

Aos meus queridos sobrinhos, pelo incentivo e pela alegria que me proporcionam sempre que nos encontramos.

E a todos que me incentivaram e apoiaram nessa jornada, obrigado!

A ciência é o grande antídoto do veneno do entusiasmo e da superstição.

(Adam Smith)

RESUMO

BEZ, Normando Dagostim. **Análise da Fadiga como Falha Veicular Preponderante em Casos de Acidente de Trânsito**. Ano 2017. Trabalho de Conclusão (Curso de Pós-Graduação *lato sensu* em Perícia de Acidentes de Trânsito) – Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2017.

Muito embora o fator veicular tenha uma contribuição significativa para a ocorrência dos acidentes de trânsito, principalmente considerando a fadiga como falha veicular principal, esses parâmetros são de difícil reconhecimento e muito pouco divulgados. Os sistemas veiculares são críticos com relação às consequências das suas possíveis falhas. Assim, o objetivo principal deste trabalho é o reconhecimento do fenômeno da fadiga como falha veicular preponderante em acidentes de trânsito. Dentro desse contexto, procurou-se aprofundar os estudos sobre a fadiga, a fim de obter um embasamento teórico sobre as possíveis causas nos sistemas automotivos, principalmente em equipamentos veiculares submetidos a esforços cíclicos. O reconhecimento da fadiga como falha mecânica veicular é possível, principalmente, através de exames laboratoriais que identificam como transcorreu o processo de falha. Essa constatação requer um minucioso exame dos sistemas de segurança veicular. Posteriormente a esse embasamento teórico, realizou-se um estudo de caso de um acidente provocado pela ruptura da coluna de direção por fadiga. O presente trabalho visa otimizar o norteamo das ações com o objetivo de subsidiar os trabalhos periciais com maior embasamento científico em acidentes de trânsito provocados por falha veicular.

Palavras-chave: Acidente de Trânsito. Fadiga. Falha. Exames Laboratoriais. Segurança Veicular.

ABSTRACT

BEZ, Normando Dagostim. **Analysis of Fatigue as Predominant Vehicle Failure in Traffic Accident Cases**. 2017. Conclusion Work (Inspection in Traffic Accident Post Graduation Course) – Federal Institute of Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2017.

Although the vehicular factor has a significant contribution to the occurrence of traffic accidents, especially considering fatigue as the main vehicular fault, these parameters are difficult to recognize and very little publicized. Vehicle systems are critical in relation to the consequences of possible failures. Thus, the main purpose of this work is the recognition of fatigue as the predominant vehicular fault in traffic accidents. In this context, this sought to deepen the studies on fatigue, in order to obtain a theoretical basis on the possible causes in the automotive systems, especially in vehicular equipment subjected to cyclic efforts. The recognition of fatigue as mechanical vehicle failure is possible, mainly, through laboratory tests that identify how the failure process has occurred. This observation requires a thorough examination of vehicle safety systems. Subsequent to this theoretical basis, a case study of an accident caused by fatigue steering column rupture was carried out. The present work aims to optimize the orientation of the actions with the objective of subsidizing the expert work with more scientific basis in traffic accidents caused by vehicle failure.

Key words: Traffic Accident. Fatigue. Failure. Laboratory Tests. Vehicle Safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fatores que influenciam no mecanismo de falha.....	19
Figura 2: Aspecto macroscópico de uma ruptura por fadiga.....	22
Figura 3: Secções diferentes submetidas à flexão.....	24
Figura 4: Distribuição de tensões nos pontos concentradores de tensão.....	24
Figura 5: Trinca em ponto concentrador de tensão.....	24
Figura 6: Secção da peça fraturada inicial e final.....	24
Figura 7: Visão geral do eixo fraturado.....	26
Figura 8: Pontos de soldagem.....	26
Figura 9: Secção da fratura mostrando os três estágios de propagação.....	28
Figura 10: Propagação das microtrincas em microscópio ótico.....	29
Figura 11: Resumo do acidente do Ayrton Senna.....	30
Figura 12: Volante com a coluna de direção quebrada.....	32
Figura 13: Fadiga na coluna de direção.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores contribuintes de acidentes.....	14
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Tema e Problema de Pesquisa.....	16
1.2 Objetivos.....	16
1.2.1 Objetivo Geral.....	16
1.2.2 Objetivos Específicos.....	16
1.3 Procedimentos metodológicos.....	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Exame pericial veicular nos acidentes de trânsito.....	18
2.2 Análise de Falha em um Veículo Automotor.....	19
2.3 Mecanismos de falhas automotivas provocados por fadiga.....	21
2.4 Análise metalográfica aplicada a perícia de trânsito.....	26
3 ESTUDO DE CASO ENVOLVENDO ACIDENTE PROVOCADO POR FALHA VEICULAR: FADIGA	30
3.1 Acidente do piloto Ayrton Senna (1º de maio de 1994).....	30
4 CONCLUSÕES	34
REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

A Organização Mundial de Saúde – OMS (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2010, p. 08) define acidente como sendo “um evento independente do desejo do homem, causado por uma força externa, alheia, que atua subitamente e deixa ferimentos no corpo e na mente”. Pode-se considerar um acidente, portanto, um evento não intencional e que causa ferimentos ou danos. O acidente de trânsito também pode ser definido como uma colisão ou incidente entre um ou mais veículos em uma via urbana ou rural. (BURCHARLES, 2014).

A denominação “acidente” relacionado ao trânsito é questionável, por não se tratar de acontecimento casual, inesperado e imprevisível. Os conflitos no trânsito mais se assemelham à prática da “violência”, apesar da ausência de intencionalidade, e na maioria dos casos são previsíveis e preveníveis. (BURCHARLES, 2014).

Os acidentes de trânsito representam altos custos para toda a sociedade. Além da perda de vidas humanas, geram elevados custos materiais. Os custos envolvidos em um acidente de trânsito podem decorrer de: congestionamentos, perdas de produção, danos a veículos, atendimentos pré-hospitalares, hospitalares, pós-hospitalares, prejuízo operacional de elementos do sistema de atendimento, perda de rendimentos futuros, gestão de seguros, danos ao patrimônio público, além dos traumas causados às vítimas e aos familiares não passíveis de mensuração monetária. (FERRAZ, 2012).

Em seu mais recente estudo sobre os impactos sociais e econômicos dos acidentes de trânsito nas rodovias federais brasileiras, de 2015, o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) e a Polícia Rodoviária Federal estimaram que o Brasil gasta, anualmente, cerca de 1,2% do Produto Interno Bruto (PIB) com danos pessoais e materiais advindos de acidentes de trânsito (IPEA, PRF, 2015). No ano de 2014, o custo foi estimado em 50 bilhões de reais, sendo 40 bilhões em acidentes rodoviários e 10 bilhões em acidentes em áreas urbanas. (IPEA; PRF 2015).

Em 2014, o Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN), o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) e a Associação Nacional de

Transportes Públicos (ANTP) realizaram um estudo que estimou que o custo médio de um acidente foi de R\$ 72.705,31. O custo varia conforme a gravidade, sendo que acidentes envolvendo vítima fatal teve um custo médio de R\$ 646.762,94. (BURCHARLES, 2014).

Anualmente, morrem mais de 1,3 milhão de pessoas em decorrência de acidentes de trânsito, sendo o número estimado de 50 milhões de pessoas lesionadas em todo mundo (SANY; NAVIN, 2004). Os seguintes fatores, dentre outros, ocasionaram tais números: falta de cultura de segurança no trânsito, resultando em motoristas imprudentes; vias mal projetadas e com conservação inadequada; frota antiga e sem manutenção; legislação inadequada; ausência de fiscalização eficiente; frota excessiva de motocicletas e assemelhados, uma vez que as motocicletas, em números absolutos, envolvem-se em mais acidentes de trânsito quando comparados a outros tipos de veículos; socorro médico precário, ocasionando uma demora no atendimento das vítimas. (FERRAZ, 2012).

Os acidentes de trânsito podem ocorrer por três fatores, isolados ou combinados: humano, via e veículo. Um estudo realizado por Sany e Navin (2004) indicou valores obtidos em pesquisas realizadas em vários países sobre a incidência de fatores de risco associados aos diversos componentes físicos do sistema de trânsito nos acidentes.

A seguir, vê-se a tabela 1 que apresenta os fatores contribuintes de acidentes de trânsito.

Tabela 1: Fatores contribuintes de acidentes.

Fator	% Individuais	Fator Via %	Fator Humano %	Fator Veículo %
Humano	66,50		66,50	
Via	3,50	3,50		
Veículo	3,50			3,50
Humano + Via	23,50	23,50	23,50	
Humano + Veículo	2,00		2,00	2,00
Via + Veículo	0,25	0,25		0,25
Humano + Via + Veículo	0,75	0,75	0,75	0,75
TOTAL	100,00	28,00	92,75	6,50

Fonte: adaptado pelo autor (Savy; Navin, 2004).

Na tabela 1, tem-se os fatores contribuintes de acidentes de trânsito (via, humano e veículo) e a suas respectivas contribuições, isoladas ou combinadas, para a ocorrência dos acidentes de trânsito. Muito embora os dados apontem uma preponderância do fator humano, observa-se uma contribuição significativa dos veículos para a ocorrência dos acidentes, de ordem de 6,5%, conforme apresentado na tabela 1.

O fator veicular, por vezes, é preterido nos exames periciais e nas estatísticas brasileiras de trânsito. Este fator para ser abordado de forma completa, necessita de profissional Perito, com formação e treinamento técnico diferenciado para esta finalidade.

Segundo Kleinubing e Neto (2012), a grande maioria dos acidentes não conta com a presença do Perito. Normalmente se faz apenas uma perícia paliativa, depois que os veículos foram para o depósito, fato este explicado pelo número insuficiente de profissionais na área pericial e carência de investimentos em tecnologia e laboratórios forenses. O resultado destes fatos são trabalhos periciais e dados estatísticos incompletos e deficientes sobre as causas dos acidentes de trânsito. (KLEINUBING; NETO, 2012).

O fator veicular será considerado como causador do acidente quando ficar evidenciado que o acidente somente ocorreu por falha mecânica no veículo, isto é, por irregularidades no seu pleno funcionamento. Esta constatação requer um minucioso exame dos sistemas de segurança veicular, utilizando-se até mesmo de laboratórios para exames complementares, quando necessário.

Por este motivo, o procedimento pericial de reconstrução profissional de acidentes de trânsito deve passar, frequentemente, por análises metalográficas de peças automotivas, visando determinar de que maneira tais avarias ocorreram e se constituem causa ou consequência do evento.

Desse modo, este trabalho propõe uma análise dos acidentes de trânsito provocados por falha veicular, principalmente por fadiga, e estudo de caso, contribuindo para o estreitamento dos caminhos e direcionando de maneira sistemática o desenrolar das análises.

Assim, será demonstrada a importância da análise de falha em componentes veiculares e que essa investigação vai muito além da análise dos dados de campo e da perícia do automóvel, chegando a análise de dados

laboratoriais através da metalografia.

1.1 Tema e Problema de Pesquisa

Muito embora o fator veicular tenha uma contribuição significativa para a ocorrência dos acidentes de trânsito, principalmente considerando a fadiga como falha veicular principal, esses parâmetros são de difícil reconhecimento e muito pouco divulgados.

O tema foi escolhido tendo em vista a necessidade de informação especializada sobre a fadiga como fator recorrente dentre os causados por falha veicular nos acidentes de trânsito.

O presente tema é de grande relevância para a sociedade, visto que se faz necessário maior divulgação técnico-científica sobre o efeito da fadiga como causa da falha veicular nos acidentes de trânsito.

Diante disso, questiona-se: De que forma o estudo sobre a fadiga pode contribuir para uma redução de ocorrências de acidentes de trânsito causados por falha veicular?

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho estão apresentados a seguir como objetivos geral e específicos.

1.2.1 Objetivo Geral

Estudar o efeito da fadiga como causa de falha veicular preponderante em acidentes de trânsito.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Otimizar o norteamto das ações na confecção do laudo pericial em acidentes de trânsitos provocados por falha veicular;

- b) Investigar características das peças fraturadas com o objetivo de identificar como transcorreu o processo de falha;
- c) Compreender de que maneira o estudo da fadiga pode contribuir para a redução das ocorrências dos acidentes de trânsito provocados por falha veicular.

1.3 Procedimentos metodológicos

A metodologia utilizada neste trabalho é dedutiva, pois utiliza uma cadeia de informações descendentes, da análise geral para a particular, até a conclusão.

A análise é qualitativa, no sentido de utilizar e considerar os dados já existentes, com estudo de caso e análise de índices com apresentação sistematizada, com coleta de dados e estatísticas.

Neste trabalho utilizou-se pesquisa bibliográfica com o exame detalhado de livros técnicos, artigos científicos, sites, referências nacionais e internacionais, os quais trouxeram fundamentos a fim de embasar este trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo visa esclarecer os principais tópicos relacionados ao estudo da fadiga como falha veicular preponderante em acidentes de trânsito. Os principais assuntos abordados são: o exame pericial veicular nos acidentes de trânsito, a análise da falha em um veículo automotor, os mecanismos de falhas automotivas provocados por fadiga e, por fim, a análise metalográfica aplicada a perícia de trânsito.

2.1 Exame pericial veicular nos acidentes de trânsito

O exame pericial de veículos automotores tem o objetivo de verificar e interpretar informações que possam ter relação com os acidentes de trânsito. Esta verificação abrange a identificação, tipificação, localização e orientação de danos e exame das condições operacionais de sua estrutura e agregados, sistemas e componentes mecânicos e elétricos. (KLEINUBING; NETO, 2012).

Este exame no estado dos sistemas veiculares tem o objetivo de definir, com mais rigor, se a causa de um acidente em particular deve-se exclusivamente ao motorista, ou se tem a causa principal de procedência mecânica, alheia ou não ao condutor, ou se algum funcionamento inadequado configura fator contribuinte do acidente. (KLEINUBING; NETO, 2012).

Falhas em componentes de sistemas automotivos são consideradas críticas pelas suas possíveis consequências danosas no veículo e, principalmente, por ser considerado item de segurança, pois afeta a dirigibilidade, podendo causar vítimas.

A perícia em acidentes de trânsito, além de seu papel convencional, de produção de prova material realizada por profissional habilitado essencial à instrução processual criminal e cível, desempenha um importante papel preventivo de avaliação precisa do desempenho dos fatores humanos, viários ambientais e veiculares visando a adoção de medidas preventivas eficazes. (KLEINUBING; NETO, 2012).

2.2 Análise de Falha em um Veículo Automotor

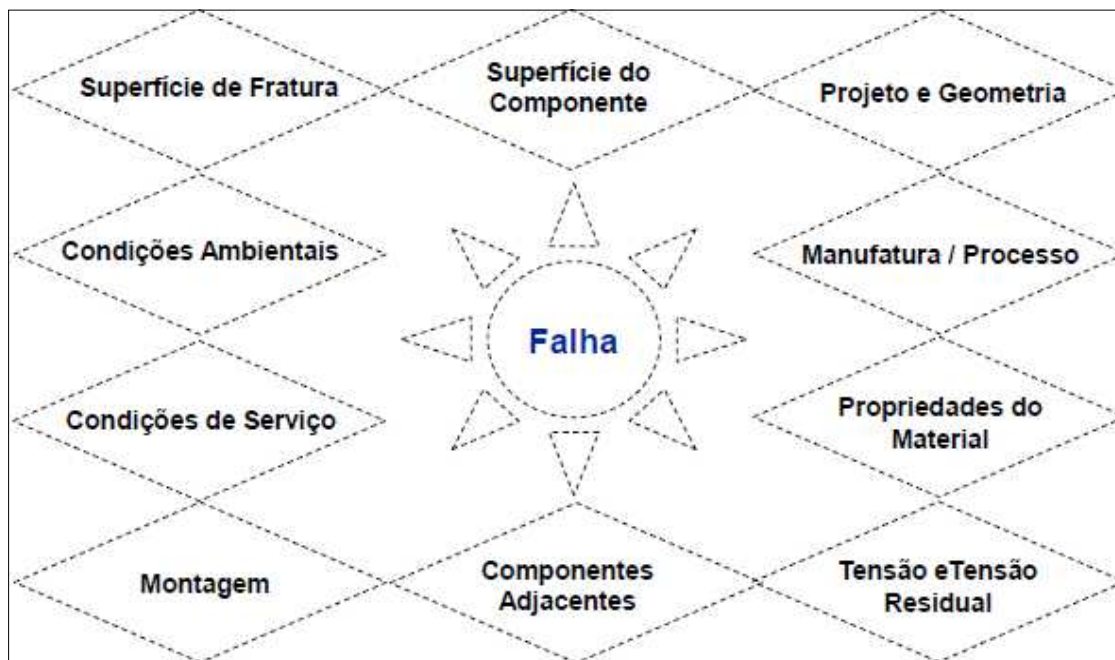
A análise de falhas em componentes mecânicos veiculares é uma ferramenta imprescindível para analisar o comportamento de um processo que pode trazer consequências sérias aos envolvidos.

Os componentes aplicados na fabricação dos equipamentos veiculares são projetados levando em consideração aspectos relativos à geometria, aos materiais e ao processo de produção visando atendimento às solicitações a que são submetidos. (ANDRADE, 2010)

Essas solicitações estão intimamente relacionadas com a função a ser desempenhada pelo equipamento ou peça do veículo. Para o adequado atendimento das diversas solicitações, o equipamento deve reunir uma série de atributos técnicos, tais como resistência elétrica, térmica, química, magnética, ótica, mecânica, dentre outras. (ANDRADE, 2010)

A seguir, vê-se a figura 1 demonstrando os fatores que influenciam no mecanismo de falha.

Figura 1: Fatores que influenciam no mecanismo de falha



Fonte: adaptado pelo autor (Callister; Rethwisch, 2014)

Na figura 1, são demonstrados que vários são os fatores que influenciam no mecanismo de falha: superfície, projeto e geometria, manufatura, processo,

propriedades do material, tensão e tensão residual, condições ambientais, condições de serviço, dentre outros. (CALLISTER; RETHWISCH, 2014).

Muitos materiais, quando em serviço, são submetidos a forças ou cargas; como por exemplo o aço do eixo da roda de um automóvel. Em tais situações é necessário conhecer as características do material e projetar o elemento estrutural de tal maneira que qualquer resultante deformação não será excessiva e a fratura não ocorrerá. O comportamento mecânico do material reflete a correlação entre sua resposta ou deformação a uma carga ou força aplicada. (CALLISTER; RETHWISCH, 2014).

As propriedades mecânicas de materiais, tais como resistência mecânica, dureza, ductibilidade, rigidez, dentre outras, são determinadas pela execução de experimentos de laboratório cuidadosamente projetados que replicam tanto quanto possível as condições de trabalho.

Segundo Callister e Rethwisch (2014), dentre os fatores a serem considerados, incluem a natureza da carga aplicada e a sua duração, bem como as condições ambientais. É possível que a carga seja de tração, compressão, ou cisalhamento, e sua magnitude pode ser constante com o tempo, ou ela pode flutuar continuamente. O tempo de aplicação pode ser apenas uma fração de segundo ou ele pode estender-se por um período de muitos anos. A temperatura de serviço também é um importante fator a ser analisado. (CALLISTER; RETHWISCH, 2014).

Por esse motivo, as formas com que os componentes estruturais dos veículos podem falhar dependem do tipo de carregamento, tipo do material, condições ambientais, tempo de vida, cuidados com manutenção, dentre outros.

Um melhor controle sobre componentes se faz necessário para que não ocorram defeitos que podem ser desde problemas provenientes da fabricação até defeitos que surgem a partir de esforços mecânicos.

Quando ocorre uma falha em um componente ou em uma peça automotiva, é necessária a identificação dos motivos que levaram a ocorrência desta falha. Além disso, é importante fazer com que esses dados obtidos na identificação dos motivos retornem ao sistema produtivo de maneira que os problemas possam ser corrigidos e não ocorram em novos projetos. (KLEINUBING; NETO, 2012).

Os componentes veiculares de equipamentos submetidos a solicitações mecânicas devem atender a várias solicitações, e a grande maioria das falhas ocorrem devido a cargas que variam no tempo, e não a esforços estáticos. A principal forma de falha em estruturas que estão sujeitas a tensões dinâmicas é através do fenômeno da fadiga. (CALLISTER; RETHWISCH, 2014).

Dentre as causas geradoras de falhas nos componentes ou equipamentos, trincas geradas pelo mecanismo de fadiga devem ser colocados em um grau de muita importância, pela sua criticidade, pela sua característica de nível de difícil detecção, pelas consequências muitas vezes danosas aos sistemas por sua fratura sem indicações prévias e instantaneidade abrupta de ruptura final causando desastres em certas ocasiões catastróficas, dentre outras situações. (CALLISTER; RETHWISCH, 2014).

Na elaboração do projeto e análise de falhas, o conhecimento em ciência e engenharia de materiais tem papel crucial nos projetos e fabricação dos componentes para a aplicação em diversos segmentos dentre eles os utilizados nas peças automotivas mecânicas. Por este motivo, observar e entender os processos que implicam em falhas é de fundamental importância para o surgimento de equipamentos cada vez mais confiáveis e que geram segurança aos envolvidos.

A análise de falhas consiste em uma disciplina de engenharia que envolve conhecimentos técnicos prévios para permitir uma decisão frente a uma determinada falha. O método consiste em uma investigação criteriosa que tem por objetivo proporcionar auxiliar o Perito a planejar e gerenciar o trabalho, evitando perda de tempo em procedimentos inúteis e, principalmente, a perda de evidências e provas pela eventual destruição de amostras. (KLEINUBING; NETO, 2012).

2.3 Mecanismos de falhas automotivas provocados por fadiga

Conforme Callister e Rethwisch, a fadiga é considerada a maior falha individual em metais, “ela compreende 90% de todas as falhas em metais”. A fadiga é um processo “silencioso”, que está relacionado com as repetições de

solicitações em um determinado componente, portanto tem natureza cíclica. (CALLISTER; RETHWISCH, 2014, p. 78).

Fadiga é um modo de falha gerado por carregamento cíclico atuante por um certo tempo. Esta falha é iniciada por uma trinca que passa a se propagar no material até a ruptura completa do componente. A concentração de tensão propicia a nucleação de trincas. Se nos pontos de concentração de tensões for ultrapassada a tensão de escoamento do material, será iniciada uma trinca. Com a continuidade dos ciclos, nos pontos nos quais a tensão de escoamento é ultrapassada, as trincas formadas crescerão, diminuindo a seção da peça até o ponto que esta rompa repentinamente. (ROSA, 2002).

Uma vez rompida, se a causa for a fadiga, é possível a identificação pela marca que fica no material e que é nítida a olho nu. A seguir, vê-se a figura 2 que demonstra o aspecto macroscópico de uma ruptura provocada por fadiga.



Fonte: Rosa (2002, p. 229)

De acordo com a figura acima, é possível a identificação da causa da falha pela marca que fica no material. Nesse caso, são marcas de praia, e são assim chamadas porque elas se assemelham com a marca que as ondas do mar deixam na areia. (ROSA, 2002).

A estimativa da vida de uma peça quanto à fadiga não é simples, pois variantes não controladas nos sistemas estão envolvidas, como a não homogeneidade dos materiais, além de fatores concentradores de tensão relacionados com a geometria, variações de cargas cíclicas, transferências de cargas dinâmicas, mudanças de ajustes nas fixações ao longo do trabalho da peça, dentre outros (CHIAVERINI, 1977).

Segundo Callister e Rethwisch (2014), existe uma dispersão considerável nos dados empíricos de fadiga, relacionada com a sensibilidade da fadiga a uma variedade de parâmetros de ensaio e de material que são impossíveis de serem controladas de maneira precisa. (CALLISTER; RETHWISCH, 2014).

Vários fatores são estudados quando analisou-se a fadiga como: componentes concentradores de tensão, natureza e perfil das cargas cíclicas (amplitude, frequência, local de incidência de aplicação, variação do sinal de tensão), fadiga térmica (flutuação de temperatura) e fadiga por corrosão, dentre outros. (ROSA, 2002).

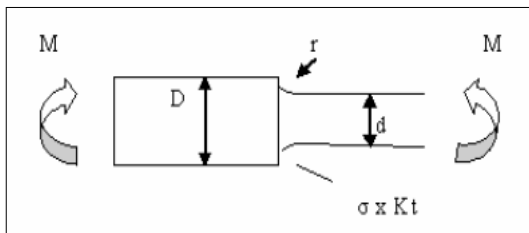
Estudam-se também mecanismos para minimizar os efeitos da fadiga, como: tratamentos superficiais, tensões de compressão residual superficial, melhoria da rugosidade, tratamentos térmicos, dentre outros. (ANDRADE, 2010).

Nos casos envolvendo fraturas por fadiga, são frequentemente analisados: morfologia superficial macrográfica (marcas de praia, catraca, marcas de garra) e micrográfica (intergranular e intragranular); fratura frágil (clivagem); fratura dúctil; evolução e propagação de microtrincas e efeitos da atmosfera de trabalho e ambientais, dentre outros. (CHIAVERINI, 1977).

As regiões de mudança de geometria nos componentes automotivos são fatores concentradores de tensão, pois implicam em fragilização do projeto quanto a resistência à fadiga e, conseqüentemente, aumentam as tensões atuantes nestes pontos. Esse aumento de tensão está associado também ao raio de concordância da região onde acontece a mudança de geometria. (ANDRADE, 2010).

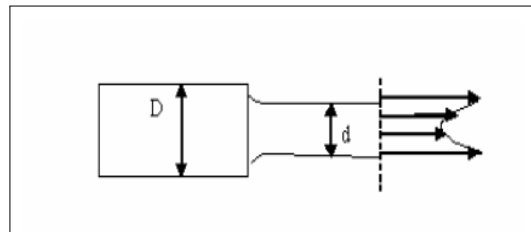
Se for analisado um eixo sob flexão, semelhante ao eixo de direção de um veículo, conforme as figuras 3 e 4, o valor do fator de concentração de tensão é tanto maior quanto menor a relação r/d e maior também quanto maior a relação D/d . A trinca é um inconveniente indesejável podendo ser considerada uma região de mudança de geometria não projetada, uma descontinuidade. A tensão aumenta muito na ponta de uma trinca, diminuindo a quantidade de ciclos ao que o eixo foi submetido. (ANDRADE, 2010).

Figura 3: Secções diferentes submetidas à flexão



Fonte: Andrade (2010, p.16)

Figura 4: Distribuição de tensões nos pontos concentradores de tensão



Fonte: Andrade (2010, p.16)

Onde:

σ = tensão

K_t = fator de concentração de tensão

D = diâmetro maior

d = diâmetro menor

r = raio de concordância

Os raios de concordância ou geometria de entalhes também influenciam no fator de redução de resistência a fadiga. O valor do fator de concentração de tensão está relacionado ao raio de concordância do entalhe. Na figura 5 são mostrados fissuras em local geometricamente suscetível a nucleação de trincas por fadiga, devido as mudanças de geometria. Na figura 6, a secção da fratura, uma região (a) de fratura inicial com marcas de praia e uma região (b) de fratura final (b) com mais de 50% da área, indicando carga alta no momento de quebra bipartindo o componente. (ANDRADE, 2010).

Figura 5: Trinca em ponto concentrador de tensão



Fonte: Andrade (2010, p. 22)

Figura 6: Secção da peça fraturada inicial e final



Fonte: Andrade (2010, p. 22)

A rugosidade superficial das peças também funcionam como múltiplos concentradores de tensão localizados. Quanto maior a rugosidade, para uma mesma tensão, menor a quantidade de ciclos, ou seja, menor a vida do componente. Peças que trabalham sob cargas dinâmicas necessitam de melhor acabamento superficial, pois superfícies com alta rugosidade apresentam maior área efetiva, e geometrias mais propensas a concentração de tensões, oferecendo melhores condições para a nucleação de trincas de fadiga.

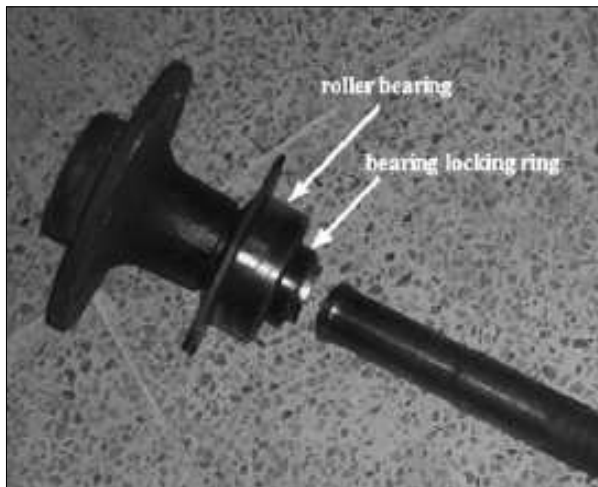
Projetos com pontos de fixação que propiciem a concentração de tensão tendem a gerar possíveis nucleações de microtrincas, alterando a resistência à fadiga esperada. Defeitos de fundição como inclusões, vazios, trincas, segregações concentrando impurezas, falta de uniformidade do material e outros, também são pontos potenciais para inicialização das microtrincas superficiais que na maioria das vezes são a gênese do processo de falha por fadiga. (CHIAVERINI, 1977).

Um dos componentes importantes e indesejáveis em muitas das peças são as microtrincas. Existem condições propícias para a nucleação destas microtrincas iniciais, além dos concentradores de tensão, que são: geometria, rugosidade superficial, defeitos superficiais e ausência de tratamento superficial. (ROSA, 2002).

Na maioria dos casos de fadiga, as microtrincas nucleiam-se a partir da superfície em pontos de concentração de tensão. Defeitos superficiais, riscos, rasgos de roscas, pontos de solda também são pontos suscetíveis a concentração de tensão. (ROSA, 2002)

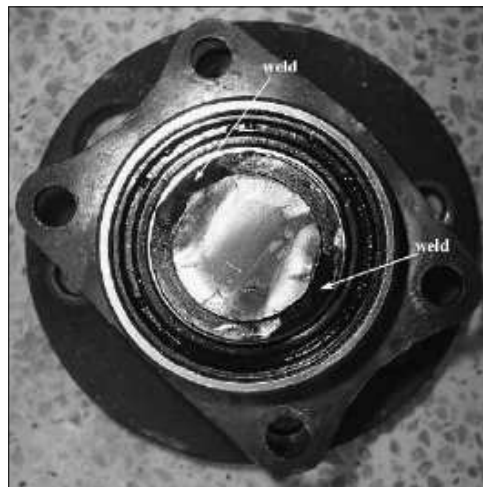
Conforme um estudo realizado por Asi (ASI, 2006), em um eixo de um sistema automotivo, foi identificado como o ponto de nucleação das trincas os pontos de soldagem, como mostrado respectivamente nas figuras 7 e 8.

Figura 7: Visão geral do eixo fraturado



Fonte: Asi (2006, p. 40)

Figura 8: Pontos de soldagem



Fonte: Asi (2006, p. 41)

De acordo com Kleinubing e Neto, “em cada perícia o perito defende uma tese”. Cada falha evolutiva ou abrupta, tem uma característica peculiar, particular, tem uma “assinatura própria”, “uma impressão digital”, estudos de similaridade entre eventos diferentes são catalogados e registrados, gerando banco de dados para posterior associação com possíveis causas comuns. (KLEINUBING; NETO, 2012, p. 36).

Os vestígios deixados nas peças que ocorreram as falhas são muito importantes. As análises investigativas de engenharia se fundamentam nos vestígios que, agregadas a outras informações, se cruzam minimizando possibilidades de diagnósticos errôneos.

2.4 Análise metalográfica aplicada a perícia de trânsito

A análise metalográfica é um processo utilizado na obtenção das características de um material. É por meio dessa análise que se alcança o entendimento da estrutura do material, comportando analisar, explorar, a atuação de um pedaço metálico. (KLEINUBING; NETO, 2012).

O ensaio metalográfico procura relacionar a estrutura íntima do material com suas propriedades físicas, com o processo de fabricação, com o desempenho de suas funções. (KLEINUBING; NETO, 2012).

As respostas às solicitações mecânicas de uma peça são dependentes diretamente de sua micro e macroestrutura e de seus respectivos constituintes químicos, tal como o seu arranjo atômico, o percentual de fases e sua distribuição, a formação, direção e percentual de grãos, e os próprios defeitos nano e micrométricos já presentes. (CHIAVERINI, 1977).

Na fabricação, os métodos, processos, equipamentos e matérias-primas de manuseio envolvidas são itens possíveis geradores de pontos falhos macrometricamente ocultos, que quando submetidos ao trabalho de tração ou torção podem dar início as falhas, comprometendo o número de ciclos resistivos. (CHIAVERINI, 1977).

Segundo Chiaverini (1977, p. 102), “uma forma de estudarmos o macro é estudando o micro”. Muitas características são associadas às propriedades dos materiais, tais como, a energia interna de ligação atômica e a morfologia da rede cristalina. Defeitos cristalográficos são pontos vulneráveis modificando propriedades, e em várias situações concentrando tensão. Estes defeitos são inclusões, vazios, discordâncias, defeitos interfaciais, maclas, dentre outros (CHIAVERINI, 1977).

Além dos defeitos cristalográficos, ocorrem os defeitos inerentes ao processo de fabricação como poros, inclusões e trincas dentre outros que estão presentes em um nível grande de incidência, também geradores de vulnerabilidade mecânica. (CHIAVERINI, 1977).

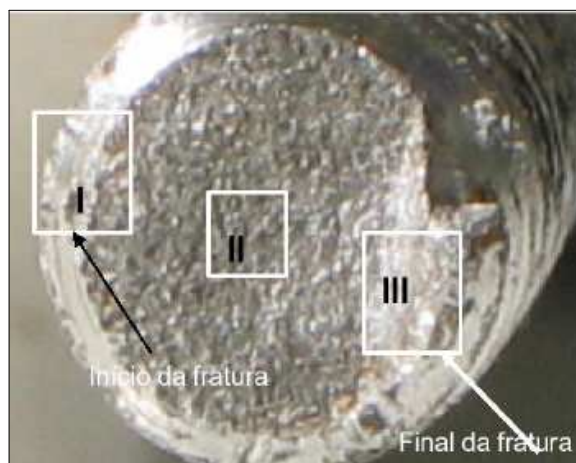
A morfologia da falha pode nos indicar características e propriedades do material e como transcorreu o processo de falha. Nos processos envolvendo tensões cíclicas, existem indicações macrométricas, através de macrografias superficiais das faces da fratura, que indicam que ocorreram esforços repetitivos, como marcas de praia. (ANDRADE, 2010).

Aliada as marcas de praia, ação das tensões cíclicas, a morfologia e a aparência do relevo superficial da região da fratura exposta também podem indicar características do material que falhou. Superfícies com maior aspereza indicam regiões de fratura final, asperezas menores, evolução de microtrincas. (ANDRADE, 2010).

Nos processos de falha envolvendo fadiga, as microtrincas normalmente são iniciadas na superfície da peça, e seguem um direcionamento como mostrado na figura 9, dividindo-se em estágios de propagação: estágio I, 45

graus em relação ao plano de escorregamento, estágio II de estriamento cíclico numa direção perpendicular a direção de tensão, marcas de praia ou marcas de garra, estágio III, região da fratura final com velocidades bem maiores de evolução e superfícies mais ásperas. (CALLISTER; RETHWISCH, 2014).

Figura 9: Secção da fratura mostrando os três estágios de propagação



Fonte: adaptado pelo autor (Callister; Rethwisch, 2014)

A figura 9 demonstra a propagação das microtrincas nos seus três diferentes estágios de propagação, desde o início até a ruptura final. (CALLISTER; RETHWISCH, 2014).

Segundo Colpaert (2009), os objetivos da avaliação metalográfica são: testar hipótese relacionada ao comportamento ou desempenho de um metal, investigar as eventuais causas estruturais de um determinado comportamento ou desempenho de um item de metal. (COLPAERT, 2009).

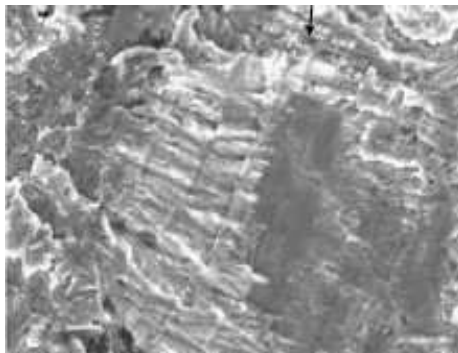
As micrografias através de microscópio ótico e eletrônico de varredura também são recursos importantes para adicionar dados para a investigação e análise de fatos envolvendo desvios, falhas e fraturas de componentes.

Os resultados de imagens coletadas com o microscópio ótico, por exemplo, podem indicar o mapeamento de fases corroborando com a análise comparativa em relação ao padrão esperado. A presença de inclusões, percentual de cada fase presente, poros, orientação de grãos, presença de tratamentos térmicos, perfis de superfície, microtrincas, dentre outros podem ser constatados através da micrografia (ANDRADE, 2010)

Em imagens de superfície de situações envolvendo falhas de incidências

de tensões cíclicas adquirem, na maioria dos casos, marcas de rio ou de garra. As marcas de rio e a evolução das microtrincas podem ser visualizadas na figura 10.

Figura 10: Propagação das microtrincas em microscópio ótico



Fonte: adaptado pelo autor (Andrade, 2010)

A figura 10 demonstra as marcas de rio e a propagação das microtrincas analisadas a partir de um microscópio ótico. (ANDRADE, 2010).

Nas investigações de falhas em equipamentos, as melhores situações para a tomada de dados e registro de vestígios são o momento imediatamente posterior a ocorrência da situação, pois a ação do tempo, a ação da interferência externa mudando o estado imediatamente após a falha, pode dificultar ou apagar pistas e indícios do início da falha ou consequências desta anormalidade (ANDRADE, 2010).

Toda a sistemática das investigações envolvendo a análise de dados laboratoriais através da metalografia na segurança veicular são muito pouco divulgados, ou quase inexistentes. Diante deste fato, muito pode-se contribuir para a comunidade científica de engenheiros, peritos e aos envolvidos no desenvolvimento de trabalhos de forma metodológica, encurtando caminhos na estratégia de coleta de dados, análises e emissão de laudo pericial, respaldando os trabalhos periciais com maior embasamento científico.

3 ESTUDO DE CASO ENVOLVENDO ACIDENTE PROVOCADO POR FALHA VEICULAR: FADIGA

Este capítulo visa exemplificar, através do estudo de caso de um acidente real de grande repercussão mundial, a importância do estudo da fadiga na prevenção de acidentes.

3.1 Acidente do piloto Ayrton Senna (1º de maio de 1994)

O acidente que vitimou o piloto brasileiro de Fórmula 1, Ayrton Senna, provocou uma grande comoção nacional. Na época, foi instaurada uma comissão de doze peritos para investigação oficial das causas do acidente.

Figura 11: Resumo do acidente do Ayrton Senna



Fonte: Veja (1995, p.33)

A figura 11 resume o acidente que provocou a morte do piloto brasileiro Ayrton Senna. Através da análise da figura 11, pode-se observar a sequência de eventos desde a quebra da coluna de direção até o momento que o braço de suspensão atinge o crânio do piloto.

Foram avaliadas as condições da pista, as medidas de segurança do autódromo e a parte mecânica do veículo. O laudo pericial concluiu que o acidente foi provocado pela ruptura por fadiga de uma emenda aplicada à coluna de direção do carro.

A emenda foi uma resposta dos engenheiros às críticas de Senna a posição de dirigir o veículo. Ao segurar o volante, as mãos de Senna raspavam na parte de fibra de carbono do cockpit. Havia duas alternativas para solucionar o problema. A primeira, mais trabalhosa, era refazer por completo o cockpit. A outra, aumentar o comprimento da coluna de direção, aproximando o volante do piloto em alguns centímetros. A equipe de Senna optou pela segunda alternativa, mais rápida e fácil de executar pois seria impossível redesenhar o carro no meio do campeonato (VEJA, 1997)

Os mecânicos serraram a barra original da coluna de direção em três pedaços, eliminaram o segmento central e, no lugar desse, soldaram um segmento mais fino, feito de uma liga metálica aeronáutica denominada En14. Os peritos apuraram que este fiapo de metal apresentava sinais extensos de fadiga e não era adequado aos esforços a que seria submetido (RIVA, 2004).

A coluna de direção foi feita, em sua maior parte, por um tubo de aço de 22 mm de diâmetro, mas foi modificada para que ficasse mais larga. Um outro tubo de 18 mm de diâmetro (com 5 cm de comprimento) foi soldado em ambos os lados e adicionado à coluna principal. Ficando 30 cm com o diâmetro inicial, 5 cm com a emenda e sua sequência com o diâmetro inicial. Os mecânicos fizeram o que um encanador chama de "luva", soldando-a numa das extremidades da coluna de direção já seccionada. O outro lado dessa luva, de diâmetro ligeiramente inferior ao da coluna de direção, foi encaixado por dentro da coluna e soldado. (RIVA, 2004).

Ocorreu uma maior incidência de forças concentradas pois um ângulo reto surgiu quando foi feita a "luva". As regiões de mudança de geometria são fatores concentradores de tensão, e implicam em fragilização do projeto quanto a resistência à fadiga e, conseqüentemente, aumentam as tensões atuantes

nestes pontos. Esse aumento de tensão está associado, principalmente, ao raio de concordância da região onde aconteceu a mudança de geometria. A barra rompeu exatamente antes da solda, próxima ao ângulo reto da 'luva'. Na figura 12 pode ser visto como ficou uma parte do volante depois da emenda.

Figura 12: Volante com a coluna de direção quebrada



Fonte: Riva (2004, p. 38)

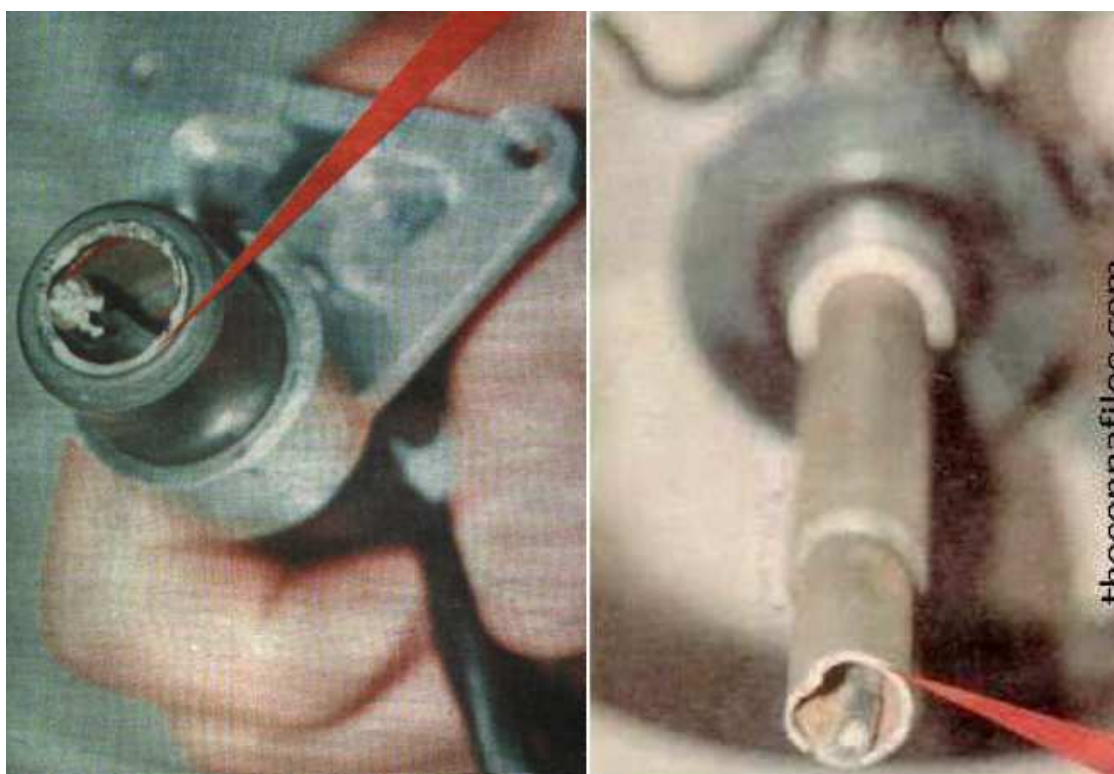
A figura acima mostra a situação do volante com a coluna de direção quebrada após o acidente. A ruptura provocada pelo processo de fadiga do material ocorreu devido a solicitações ou esforços repetidos. A identificação da causa foi possível, principalmente, pelas marcas de praia que surgiram a cada ciclo de solicitação, isto é, a cada vez que a coluna de direção se submetia a um tipo de esforço, como torção ou flexão. No caso da coluna de direção do veículo de Senna, ocorria torção quando ele virava o volante para manobrar o carro e flexão pela trepidação e vibração do veículo. (RIVA, 2004).

A comprovação da suspeita inicial dos peritos foi feita por meio de exame da peça em um microscópio eletrônico, que mostrou sinais de fadiga no metal da coluna da direção. O exame no microscópio eletrônico apontou que 70% do setor ao redor do local de fratura apresentava as famosas marcas de praia de fadiga. Menos de dois meses depois do acidente, já havia testes de

laboratório comprovando que a coluna de direção se quebrou antes da batida do carro contra o muro, e não depois. (VEJA, 1995).

De acordo com a conclusão apresentada pelos peritos, o piloto Ayrton Senna nunca teria terminado aquela corrida com apenas 30% da superfície da coluna de direção não afetada. Na figura 13 pode ser observada a coluna de direção e o local onde ocorreu a ruptura.

Figura 13: Fadiga na coluna de direção



Fonte: Riva (2004, p. 40)

A combinação dos indícios, de acordo com a figura 13, vestígios e os exames laboratoriais apresentando as marcas de praia de fadiga na coluna de direção, permitiram aos peritos concluir que o acidente foi provocado pela ruptura por fadiga da emenda aplicada à coluna de direção do carro.

4 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi apontar que, dentre as causas preponderantes para a ocorrência dos acidentes de trânsito, a fadiga representa a falha mecânica veicular mais recorrente.

É de fundamental importância que se reconheça, de acordo com os dados apresentados neste trabalho, a contribuição significativa do fator veicular para a ocorrência dos acidentes de trânsito (6,5%), e a fadiga como principal falha individual em metais (90%).

O reconhecimento da fadiga como falha mecânica veicular é possível através de exames laboratoriais que identificam as características e as propriedades do material e como transcorreu o processo de falha.

A fadiga está relacionada com as repetições de solicitações em um determinado componente, portanto tem natureza cíclica. E nos processos envolvendo tensões cíclicas, existem indicações macrométricas, através de macrografias superficiais das faces da fratura, que indicam que ocorreram esforços repetitivos, como as marcas de praia.

As micrografias através de microscópio ótico e eletrônico de varredura também são recursos importantes para adicionar dados para a investigação e análise de fatos envolvendo falhas veiculares provocados pelo efeito da fadiga, como no estudo de caso apresentado neste trabalho.

Por fim, a análise de uma hipótese de falha mecânica como causa de um acidente de trânsito, para ter fundamentação técnica e científica, deve ser sempre sistêmica.

E, de acordo com o que foi apresentado neste trabalho, toda a sistemática das investigações envolvendo a análise de dados laboratoriais na segurança veicular são muito pouco divulgados, ou quase inexistentes.

Diante deste fato, muito pode-se contribuir para a comunidade científica de engenheiros, peritos e aos envolvidos no desenvolvimento de trabalhos de forma metodológica, encurtando caminhos na estratégia de coleta de dados, análises e emissão de laudo pericial, respaldando os trabalhos periciais com maior embasamento científico.

REFERÊNCIAS

ASI, O. **Fatigue failure of a rear axle shaft of automobile. Engineering Failure Analysis**, London, England, p. 1293 – 1302, 2006.

ANDRADE, Ismar Paulo Siqueira de. **Metodologia de análise e diagnóstico de fratura em um componente automotivo sujeito a cargas cíclicas alternadas**. 2010. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

BURCHARLES, Luciano Gardano Elias. **Critérios para avaliação pericial da macro e microtextura de pavimento asfáltico em local de acidente de trânsito**. 2014. 01. f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento**. 2 ed. São Paulo: Mcgraw-Hill, 1977.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.

FERRAZ, A. C. P. et al. **Segurança viária**. São Carlos: Suprema, 2012

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA), POLÍCIA RODOVIÁRIA FEDERAL (PRF). **Acidentes de trânsito nas rodovias federais brasileiras: caracterização, tendências e custos para a sociedade**. Brasília, 2015. Disponível em:
<http://www.iciet.fiocruz.br/sites/www.iciet.fiocruz.br/files/IPEA%202015_relatorio_acidentes_transito.pdf>. Acesso em: 15 de janeiro de 2017.

KLEINUBING, R.; NETO, O. N. **Dinâmica dos acidentes de trânsito: análises, reconstruções e prevenção**. 4 ed. Campinas: Millennium, 2012.

RIVA, Ikaro dos Reis. **Análise de fadiga de estruturas metálicas com ênfase em offshore**. 2010. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

ROSA, Edison da. **Análise de resistência mecânica de peças e componentes estruturais**. Florianópolis: Publicação da UFSC, 2002.

VEJA. **O remendo fatal**. São Paulo: Abril, edição 1390, 1995. Disponível em:
<<http://veja.abril.com.br/idade/exclusivo/050203/senna.html>>. Acesso em: 02 de abril de 2017.

SANY, R. Z; NAVIN, F. P. D. Improving traffic safety: a new systems approach. **Transportation research record**: journal of the transportation research board, Washington, p. 1-9, 2004.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **How to conduct a situational assessment**. 2010. Disponível em: <http://whqlibdoc.who.int/publications/2010/9789241598965_eng_Chapter2.pdf>. Acesso em: 13 de maio de 2017.