

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Francisco José da
Silva Henriques E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 28/07/2011


ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Francisco José da Silva Henriques

**O uso do DOE em conjunto com FTA no
desenvolvimento e melhoria de projetos
inovadores**

Campinas, 2011.

Francisco José da Silva Henriques

O uso do DOE em conjunto com FTA no desenvolvimento e melhoria de projetos inovadores

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projetos Mecânicos

Orientador: Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Junior

Campinas
2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

H395u Henriques, Francisco José da Silva
 O uso do DOE em conjunto com FTA no
 desenvolvimento e melhoria de projetos inovadores /
 Francisco José da Silva Henriques. --Campinas, SP:
 [s.n.], 2011.

 Orientador: Auteliano Antunes dos Santos Junior.
 Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

 1. Planejamento experimental. I. Santos Junior,
 Auteliano Antunes dos. II. Universidade Estadual de
 Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.
 Título.

Título em Inglês: Use of DOE together with FTA in the development and
 improvement of innovative design

Palavras-chave em Inglês: Experimental design

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Olívio Novaski, Anderson Paulo de Paiva

Data da defesa: 28/07/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

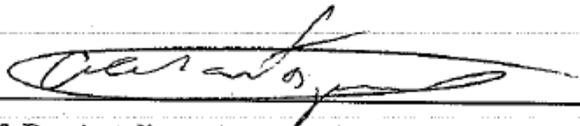
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

**O uso do DOE em conjunto com FTA no
desenvolvimento e melhoria de projetos
inovadores**

Autor: Francisco José da Silva Henriques

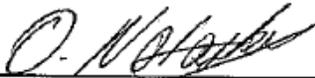
Orientador: Auteliano Antunes dos Santos Junior

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação



Prof. Dr. Auteliano Antunes dos Santos Júnior, Presidente

Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Olívio Novaski

Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva

IEPG– Universidade Federal de Itajubá

Campinas, 28 de Julho de 2011

Agradecimentos

Gostaria de agradecer as pessoas que me apoiaram nestes anos durante os quais desenvolvi este trabalho. Dentro e fora do meio acadêmico que me incentivaram a continuar apesar das mais variadas diversidades. Sem eles este trabalho não teria sido concluído.

Primeiramente gostaria de agradecer ao Prof. Auteliano Antunes do Santos que acreditou no meu trabalho e me apoiou, indicando os caminhos necessários para a boa condução deste trabalho. Sem sua orientação este trabalho não teria chagado a sua forma final.

Aos meus pais Amadeu Henriques Vieira e Maria Alice da Silva que me deram carinho e amor e deste modo e desde pequeno me ensinaram ser a pessoa que sou a valorizar a educação e a buscar meus objetivos na vida.

A minha esposa Maria Silvia e aos meus filhos Mônica e Francisco. Ela que me apoiou durante todo este tempo não só me incentivando nos momentos difíceis quando havia o desanimo, mas também me ajudando diretamente na revisão e sugestões a este trabalho. Sem ela o mesmo não seria possível.

Aos meus amigos, Carlos, Yane, Thatiane, Cristiane, João, Marcelo, Eric, Gabriela e tantos outros que seja na UFRJ, na UNICAMP ou no dia a dia me presentearam com sua inestimável amizade e muitas vezes inspirações.

Resumo

HENRIQUES, Francisco José da Silva, O uso do DOE em conjunto com FTA no desenvolvimento e melhoria de projetos inovadores, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2011. 130 p. Tese (Mestrado).

O presente trabalho tem como objetivo apresentar e aplicar uma metodologia que possa ser utilizada nos diagnósticos de falhas, a priori, com causas desconhecidas ou diferentes das já conhecidas, por equipes de desenvolvimento de novos produtos. Esse tipo de falha acontece principalmente quando trata-se de produtos inovadores e ocorrem durante o processo de validação e mesmo após o início da produção.

A metodologia se baseia na aplicação de Planejamento de Experimentos em conjunto com Árvore de Falhas para a quantificação das importâncias das causas raiz. Como resultado do trabalho é possível identificar quais parâmetros são os principais candidatos a causadores da falha e hierarquizar as causas. É possível ainda verificar as interações entre as causas, se existirem.

A combinação entre métodos proposta pode ser inserida em metodologias de projeto consagradas, como o Projeto para Seis Sigma (DFSS), criando uma nova forma de desenvolver projetos inovadores.

Palavras Chave

Análise de Falhas, Planejamento de Experimentos, DOE, Árvore de Falhas, FTA, Produtos Inovadores.

Abstract

HENRIQUES, Francisco José da Silva, Use of DOE together with FTA to development an improvement of innovative design, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2011. 130 p. Tese (Mestrado).

The present work aims to present and apply a methodology that can be used on failures diagnosis, with unknown or different causes from those already known by the development team. This kind of failure happens mainly along the design of innovative products and occurs during the validation process or in the infant life phase.

The methodology is based on Design of Experiments, which is applied together with Failure Tree Analysis to quantify the importance of each root cause. From the results of this work it is possible to identify what are the main causes related to the fault and rank them. It is also possible to verify whether there are interactions between the causes or not.

The methodology proposed joining both methods can be inserted unusual design methodologies as Design of Six Sigma, creating a new way to develop and improve innovative designs.

Key words

Failure Analysis, Design of Experiments, DOE, Failure Tree Analysis, FTA, Innovative products.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Processo Típico de Desenvolvimento de Produto e aplicação GD3 (adaptado de Yoshimura (2003))	7
Figura 1.2: FTA x FMEA x DOE (adaptado de Nicholson, McDermid, Burns, (1994)).....	9
Figura 1.3: Possível Aplicação da metodologia proposta no Processo de Desenvolvimento de Produto e no GD3 (adaptado de Yoshimura (2003)).....	11
Figura 2.1: Tipos de projetos axiomáticos (retirado de Lobo, 2003)	15
Figura 2.2: Fases do DMAIC	17
Figura 2.3: Demonstração das áreas de atuação das metodologias DFSS e 6 Sigma (Fioravante, 2005).....	20
Figura 2.4: Barreira entre 6 Sigma e DFSS (adaptado de Kiemele, Schimdt, Berdine,1997).....	21
Figura 2.5: Fluxo do DFSS pelo método IDOV (adaptado de Amer et al, 2008)	22
Figura 2.6: Representação geométrica de experimentos fatoriais 2^3	35
Figura 2.7: Projeção das interações dos experimentos X_1X_2 (adaptado de Silveira,2003)	36
Figura 2.8:Projeção das interações dos experimentos X_1X_3 (adaptado de Silveira,2003)	36
Figura 2.9: Sem interação (Silveira,2003).....	37
Figura 2.10: Com interação (Silveira,2003)	37
Figura 2.11: Efeitos principais (Montgomery, 2003).....	38
Figura 2.12: Interações de segunda ordem (Montgomery, 2003)	38
Figura 2.13: Interações de terceira ordem (Montgomery, 2003).....	39
Figura 2.14: Representação geométrica de um experimento fatorial fracionado(Montgomery, 2003).....	40
Figura 2.15: Representação gráfica de uma distribuição de dados ajustado por uma reta.....	44
Figura 2.16: Representação gráfica de Regressão linear (Silveira,2003).....	46
Figura 2.17: Típico Diagrama de Ishikawa (Sakurada, 2001).....	50
Figura 2.18: Diagrama de FTA (NASA, 2002)	51
Figura 2.19: Conceito espaço Falha/Sucesso (adaptado de NASA, 2002).....	53
Figura 2.20: Passos para construção do FTA (adaptado de NASA, 2002)	56
Figura 3.1: Looping proposto para abordagem do problema dada falha.....	62
Figura 3.2: Exemplo de Árvore de Falhas onde há incertezas quanto a sua definição	63

Figura 3.3: Fluxograma da metodologia de trabalho.....	64
Figura 3.4: Desdobramento do FTA baseado na metodologia utilizada	66
Figura 3.5: Dados de entrada do DOE (Planejamento de Experimentos)	67
Figura 3.6: Exemplo de resultados de ANOVA	69
Figura 3.7: FTA inicial para o exemplo (antes do DOE)	69
Figura 3.8: FTA reconfigurado para o exemplo (depois do DOE).....	69
Figura 3.9: Fluxo para determinação do Fator Falha.....	70
Figura 4.1: Carro de Formula SAE(fonte: site fsaeunicamp.com.br).....	73
Figura 4.2: Componente Manga de Eixo quebrado	74
Figura 4.3: Sistema de suspensão dianteiro Formula SAE.....	75
Figura 4.4: Região da falha do componente	75
Figura 4.5: Função Global (Klava,2003).....	76
Figura 4.6: Funções Locais (Klava,2003)	76
Figura 4.7: Sub-funções locais (Klava,2003)	77
Figura 4.8: Regiões funcionais da Manga de Eixo estudada.....	78
Figura 4.9: Árvore de Falha da Manga de Eixo Geral.....	82
Figura 4.10: Planilha usada para cálculo dos esforços na Manga de Eixo	85
Figura 4.11: Esforços sobre a manga de eixo.....	90
Figura 4.12: Gráfico de interações análise DOE-falha-resposta tensão Von Misses	94
Figura 4.13: Gráfico dos efeitos principais na análise DOE-falha-resposta tensão Von Misses ..	95
Figura 4.14: Análise dos resíduos - normalidade DOE	96
Figura 4.15: Gráfico Resíduos x Valores ajustados DOE	96
Figura 4.16: Gráfico de Resíduos x Ordem de coleta DOE	97
Figura 4.17: Representação gráfica das regiões mais solicitadas do componente	98
Figura 4.18: Comparação das Tensões de Von Misses e Tensão de Ruptura e Escoamento para o A356-T6	98
Figura 4.19: Gráfico dos efeitos principais análise DOE - resposta deslocamento.....	101
Figura 4.20: Gráfico de interações análise DOE - resposta deslocamento.....	102
Figura 4.21: Deslocamentos após estudo de DOE	103
Figura 4.22: FTA atualizado após DOE de Tensão e Deslocamento	104
Figura 4.23: Região de maior concentração de tensões.....	106

Figura 4.24: FTA após análise de fadiga.....	107
Figura 4.25: FTA final da análise de falha da quebra da manga de eixo	108
Figura A.1: Tipos de suspensões automotivas (Klava, 2003)	121
Figura A.2: Forças agindo sobre o eixo dianteiro de um veículo devido ao peso próprio (Klava, 2003).....	122
Figura A.3: Forças agindo sobre o eixo dianteiro de um veículo quando este faz curvas (Klava, 2003).....	124
Figura A.4: Forças atuantes em um veículo em movimento (Klava, 2003).....	125
Figura A.5: Ação sobre a manga de eixo durante a frenagem de um veículo (Klava, 2003).....	126
Figura A.6: Cargas de reação dos pivôs da suspensão sobre a manga de eixo (Nicolazzi, Rosa e Leal 2001).....	127

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Classificação de Planejamento de Experimentos (Pizzolato,2002).....	28
Tabela 2.2: Matriz de experimentos 2^3	35
Tabela 2.3: Tabela de análise de variâncias	48
Tabela 2.4: Exemplo da análise de falha de um sistema de combustível (adaptado do handbook NASA, 2002)	59
Tabela 2.5: Simbologia básica do FTA (adaptado de Sakurada (2001)).....	60
Tabela 4.1: Modos de Falha estruturais independentes e dependentes do tempo (adaptado de Klava,2003)	79
Tabela 4.2: Dados de entrada para cálculo dos esforços da Manga de Eixo.....	86
Tabela 4.3: Coeficiente de atrito de adesão e escorregamento pneu solo (Nicolazzi, 2001)	86
Tabela 4.4: Tabela níveis de experimentos x fatores.....	87
Tabela 4.5: Tabela dos esforços para cada tratamento	89
Tabela 4.6: Resultados das simulações (Tensões de Von Misses) e Deslocamentos Máximos....	90
Tabela 4.7: Tabela ANOVA de análise da resposta de Tensão de Von Misses	93
Tabela 4.8: Tabela de propriedades do A356.0-T6 (fonte: www.matweb.com)	99
Tabela 4.9: ANOVA para deslocamento máximo da Manga de eixo	99
Tabela A.1: Propriedades do material da manga de eixo	128

Lista de Siglas

ANOVA – *Analysis of Variance*

APQP – *Advanced Product Quality Planning*

ASQC – *Association for Statistical Quality Control*

CTQ – *Critical to Quality*

DFM – *Design for Manufacturing*

DFSS – *Design for Six Sigma*

DOE – *Design of Experiments*

DRBFM – *Design Review Based on Failure Mode*

DRBTR - *Design Review Based on Test Result*

DRBD&P - *Design Review Based on Design and Process*

FMEA – *Failure Mode and Effect Analysis*

FTA – *FailureTreeAnalysis*

MEF – *Métodos de Elementos Finitos*

MSA – *Measure System Analysis*

PDP – *Programa de Desenvolvimento do Produto*

QFD – *Quality Function Deployment*

SAE – *Society of Automotive Engineers*

FR – *Functional Requirement*

DP – *Design Parameter*

y_{ij} – *Resposta da observação*

μ – *Média Geral*

τ_i – *Efeito do tratamento*

β_i – *Efeito do Bloco*

ϵ_{ij} , - *Erro aleatório*

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABELAS	X
LISTA DE SIGLAS	XI
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	3
1.2 OBJETIVOS.....	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE PRODUTOS.....	13
2.2 FERRAMENTAS DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS - PROJETO AXIOMÁTICO	14
2.3 FERRAMENTAS DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS - DFSS	16
2.4 DESDOBRAMENTO DO DFSS.....	21
2.5 FERRAMENTAS DO DFSS.....	23
2.5.1 Identificar.....	23
2.5.2 Desenvolver	24
2.5.3 Otimizar	25
2.5.4 Verificar	26
2.6 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS	27
2.6.1 Planejamentos Fatoriais Completos.....	34
2.6.2 Planejamentos Fatoriais Fracionados	39
2.6.3 Planejamentos Plackett-Burman (Saturado).....	41
2.6.4 Modelagem e Análise	42
2.6.5 Regressão Linear	45
2.6.6 Análise de Variância (ANOVA).....	47
2.7 MÉTODOS DEDUTIVOS DE ANALISE DE FALHAS	49

2.7.1	Diagrama de Ishikawa	49
2.7.2	Análise da Árvore de Falha	51
2.7.3	Abordagens para a modelagem lógica de um sistema.....	53
2.7.4	Métodos Dedutivos e Indutivos.....	54
2.7.5	Construção de uma Árvore de Análise de Falhas.....	55
2.7.6	Simbologia.....	60
3	METODOLOGIA.....	62
3.1	LEVANTAMENTO DE POSSÍVEIS CAUSAS E FTA.....	64
3.2	VERIFICAÇÃO DAS HIPÓTESES COM O USO DE DOE	66
3.3	ANÁLISE DE RESÍDUOS.....	71
4	ESTUDO DE CASO	73
4.1	CONSTRUÇÃO DA ÁRVORE DE FALHAS.....	80
4.2	ANÁLISE DE FALHAS USANDO DOE E ANOVA.....	82
4.2.1	DOE para Deformação e Ruptura.....	84
4.2.2	DOE Fadiga	105
5	CONCLUSÕES.....	110
	REFERÊNCIAS	113
	REFERÊNCIAS CONSULTADAS	117
	APENDICE A – SUSPENSÕES AUTOMOTIVAS	120

1 INTRODUÇÃO

Aliada a busca por produtos cada vez mais rentáveis desde seu lançamento, a busca por confiabilidade tem sido um foco recente no desenvolvimento de novos produtos. Cada vez mais as empresas buscam usar novas tecnologias para alcançar seus objetivos e entregar produtos mais confiáveis ou melhores. Lidar com produtos inovadores tem-se tornado uma tarefa comum na vida das empresas.

Produtos inovadores não são apenas aqueles que ainda não existem no mercado e que atenderiam ao anseio ainda não existente dos consumidores, como é típico dos produtos Apple, que gera inovações que os consumidores ainda nem sabem que desejam, (SILVA FILHO, 2010). Há ainda outras situações consideradas como geradoras de produtos inovadores como, por exemplo, quando o ambiente no qual o produto está inserido muda e obriga ao fabricante a entrar em novas searas ainda desconhecidas. Este é o caso de mudanças de regulamentação. Hoje, em vários países, as normas ambientais estão se tornando mais rígidas, o que obriga que vários produtos, como os automotivos, tenham menor emissão de poluentes, menores níveis de ruído e utilizem novos materiais não agressivos ao meio ambiente. Como exemplos deste tipo de mudança pode-se citar os sistemas de ar-condicionado automotivo que, por força de regulamentações governamentais e internacionais, tiveram de migrar do uso do gás Freon para o R134, menos agressivo à camada de ozônio, (MOURA,2007). Atualmente a exigência é ainda maior: o R-134 será banido e no lugar deverá entrar outro tipo de gás. Isto obriga que os compressores, até então adaptados ao uso do R-134, trabalhem com gases em pressões mais elevadas e com níveis de vazamento permissíveis mais rígidos. Isso mudará o projeto dos mesmos, lançando os fabricantes em um universo ainda desconhecido, ou seja, terão que desenvolvem novos produtos, (GAZIOLLA E GOMES, 2010).

Outra possibilidade de um produto inovador é a mudança de tecnologia agregada ao mesmo ou a sua funcionabilidade. Um exemplo clássico do setor automotivo foi a mudança dos sistemas de alimentação de ignição por centelha de carburado para injeção eletrônica. Nesse caso, grandes empresas como a Brosol e Weber não souberam, mesmo com todo o seu conhecimento em motores de combustão interna, migrar para a nova tecnologia.

Como inovadores consideram-se também não apenas produtos nunca antes vistos no mercado, criados para determinada finalidade, mas também produtos obtidos quando uma

empresa resolve entrar em um novo nicho de mercado. Como exemplo dessa última classe de produtos, pode-se considerar o fabricante de fogões que começou a produzir também máquinas de lavar roupas. Apesar do grande conhecimento que a engenharia possui sobre o primeiro produto, desconhece a maior parte dos detalhes do projeto e ciclo de vida do segundo. Além disso, as empresas que já atuam com máquinas de lavar roupas não irão transferir informações que agilizem o desenvolvimento por parte da nova concorrente.

Em qualquer empresa, pretende-se que o produto desenvolvido seja confiável desde o seu lançamento, muitas vezes sem a realimentação proporcionada por dados de vida em serviço, ainda não disponíveis. Os testes utilizados para verificar a confiabilidade do produto, também chamados de teste de validação ou verificação, podem ser de dois tipos (COLMENERO, 1999): laboratoriais, que feitos em condições controladas que podem ou não simular a vida em campo, e os testes em campo, que tentam representar as condições às quais serão submetidos ao longo de sua vida. No entanto, nem sempre os testes são bem sucedidos nessa tarefa. Quando um produto chega à sua fase de validação, provavelmente já passou por uma série de testes de verificação de conceito e *design*, ao longo das diversas fases do projeto, que o qualificam para prosseguir para a próxima fase. No entanto, estes testes podem não representar plenamente as condições de solicitações, tanto relacionadas aos esforços submetidos quanto à exposição prolongada às condições ambientais.

Por mais que as empresas se esforcem em projetar os produtos da forma mais confiável possível utilizando técnicas de análise prévia de falhas como o “*Failure Mode and Effect Analysis*” (FMEA) muitas vezes ocorrem falhas cujas causas são desconhecidas pelos projetistas. Seja porque estão em um ritmo tão acelerado de desenvolvimento de projeto que não conseguiram analisar todas as possibilidades ou porque estão desenvolvendo um produto inovador. Como já dito quando definido o produto inovador, isso pode também ocorrer porque a empresa entra em um novo nicho, para o qual não tem base histórica de possíveis problemas que poderiam ocorrer e seus concorrentes, que já passaram por estes problemas, não irão compartilhar o conhecimento necessário.

No final, os engenheiros estarão enfrentando falhas ainda desconhecidas para eles e sobre as quais não possuem nenhum dado histórico ou desconhecem todas as inter-relações dos componentes ou do sistema em questão.

1.1 Motivação

A tendência atual no desenvolvimento de produtos é ir além dos meros resultados do tipo “aprovado” ou “não aprovado” provindos dos testes e análises de validação. Há uma forte inclinação na direção de analisar os resultados e o produto mais profundamente ainda no projeto, de modo a se buscar potenciais futuros problemas. Analisar um produto, mesmo que ele não tenha falhado, em busca de evidências ou sinais significativos que possam gerar uma falha mais adiante na vida do produto, tem se tornado um tema de interesse para prevenir possíveis problemas que não tenham aparecido durante a fase de validação ou para aumentar a vida em serviço do mesmo. Isto se torna mais crítico quando são analisados produtos inovadores ou de tecnologias ainda desconhecidas pelos fabricantes que talvez ainda não as dominem plenamente, para os quais há a necessidade de um conhecimento mais profundo do produto e suas interações com o meio ou outros sistemas.

Quando se trata do desenvolvimento de produtos, o processo não acaba com o lançamento do produto no mercado. Isso é tão verdade que a ferramenta de desenvolvimento de produtos usada na indústria automotiva, chamada “*Advanced Product Quality Planning*” ou Planejamento Avançado da Qualidade do Produto (APQP), segundo o Manual APQP (2008), o lançamento é o momento de avaliar a qualidade do produto e a alimentação do banco de dados de lições aprendidas. Por isso considera-se uma boa prática no meio industrial, principalmente o automotivo, que o fechamento do projeto só estará concluído após um período de exposição do produto ao mercado, de 6 meses a 1 ano, variando entre as empresas. Isto é assim definido porque durante a validação trabalha-se com uma amostra limitada comparada ao universo de produtos que estarão no mercado após o lançamento. Esse prazo permite também a identificação de oportunidades de melhoria do produto, caso ocorram falhas prematuras, ou de confirmação do projeto, caso não haja nenhum problema.

Observou-se na experiência de indústrias que, apesar das diversas metodologias propostas para desenvolvimento do produto que visam um lançamento sem falhas tais como o APQP, DFSS e mesmo projeto axiomáticos, não existe claramente definido um processo que avalie falhas ocorridas nas fases de validação ou prematuras, que ajude a organizá-las de forma hierarquizada e, ainda, que forneça dados quantitativos para retroalimentar o desenvolvimento do produto. Isso se aplica tanto ao produto que ainda está em desenvolvimento como para futuros desenvolvimentos, para os quais tal ferramenta forneceria dados preliminares de análise. O

problema se torna mais crítico quando se trata de produtos ou projetos inovadores uma vez que em geral não existe uma base de dados históricos que possa suportar as análises.

Se, por um lado, pode-se dizer que nenhum produto atualmente nasce do “zero”, ou seja, qualquer produto novo é a evolução de algum já existente ou a união de tecnologias usadas em produtos distintos, por outro isto pode ser um problema, pois as avaliações feitas previamente sobre uma tecnologia para uma determinada condição nem sempre se aplicam integralmente a uma situação diferente. Como já dito, pode se tratar apenas de uma nova regulamentação ou um novo mercado (por exemplo, produtos da Europa usados na América do Sul).

Às vezes, durante as fases de validação, o produto falha em atingir determinados índices, como desempenho, níveis de ruídos, níveis de vazamento, etc., o que define o terceiro caso. Em investigações mais aprofundadas, muitas vezes observa-se que algum novo requisito foi negligenciado ou que a detecção de problemas quanto a este requisito só poderia ser feita em testes muito específicos, em fases avançadas. Isso pode acontecer porque falta experiência adquirida no desenvolvimento de produtos similares. Outra possibilidade é que o produto ou tecnologia que outrora aplicada se demonstrava eficiente em determinados níveis de exigência não o é em níveis mais apurados ou atuais.

Pode acontecer também que o produto tenha passado pelos testes de validação, no entanto, após seu lançamento no mercado, quando exposto ao ambiente de trabalho, as falhas surgem. Deve-se lembrar de que nas fases de validação são feitos testes em uma quantidade reduzida comparada aos volumes de fabricação e são submetidos a ciclos de vida que tentam cobrir, mas não necessariamente cobrem, todos os modos operacionais aos quais o produto será submetido.

Focando nestes dois casos apresentados, pode-se imaginar que uma proposta lógica para a solução destes problemas passa por uma análise de falhas dos produtos durante o projeto para que seja gerada uma proposta de solução duradora e confiável. No entanto, metodologias de projeto como o “*Design for Six Sigma*” (DFSS) têm um foco maior no desenvolvimento do produto, de modo que seja lançado sem falhas. Esta perspectiva não é errada, mas um estudo das falhas ocorridas na fase de validação e mesmo após o lançamento do produto pode trazer contribuições expressivas para a melhoria do mesmo e aumento de seu desempenho. O fluxo do DFSS, que será exposto em maiores detalhes posteriormente, prevê uma retroalimentação de informações para a fase anterior de otimização, mas não necessariamente para as fases de desenvolvimento, já que as considera, a priori, já finalizadas. Também não há uma retroalimentação de possíveis falhas de

produto após o seu lançamento. Acredita-se que uma metodologia que possa retornar informações tanto qualitativas quanto quantitativas sobre a natureza da falha e seu comportamento seria útil no desenvolvimento de produtos, para estes atinjam índices de desempenho aceitáveis pelos padrões do DFSS.

Segundo essa linha de pensamento, uma abordagem interessante que atualmente vem sendo utilizadas em algumas empresas é uma prática da indústria japonesa conhecida como GD3, (YOSHIMURA, 2003), que seria (“*Good Design, Good Discussion, Good Dissection*”). “*Good Design*” significa que o produto deve ser robusto e bem embasado na ferramenta FMEA. “*Good Discussion*” significa que através da ferramenta “*Design Review Based on Failure Mode*” (DRBFM) deve-se focar nos pontos fracos do projeto e que um time multifuncional deve revisar o FMEA original com este foco específico. Após as duas etapas, os testes de avaliação devem ser conduzidos e seus resultados devem ser analisados em busca de diferenças a partir do que é considerado um estado ideal (“*Good Dissection*”).

Esta metodologia, proposta por Yoshimura (2003), é um grande passo na busca de que os problemas sejam resolvidos antes que ocorram, principalmente quando se trata de modificações em produtos já existentes. A ideia nasceu dentro da Toyota com a intenção de observar diferenças físicas em detalhes, na busca de descobrir problemas antes que eles apareçam. Tal conceito está começando a ser aplicado com foco inicial em mudanças de produtos correntes, que por alguma necessidade terão suas características modificadas como mostrado na Figura 1.1. Nela pode-se ver, do lado esquerdo, um típico processo de desenvolvimento de produtos. Já no lado direito, o processo proposto por Yoshimura (2003), onde há intervenções estratégicas entre as fases típicas do desenvolvimento ou mudança do produto. Estas intervenções podem ser pontuais, como aplicação do “*Design Review Based on Failure Mode*” - DRBFM, com o qual se realiza uma revisão do FMEA focado apenas na mudança proposta. Pode também implicar em uma revisão do projeto após os resultados dos testes e validações com o emprego do “*Design Review Based on Test Results*” (DRBTR), com o qual se analisam os resultados dos testes e que efeitos a modificação teve sobre o produto ou sistema. O GD3 também propõe em sua metodologia uma revisão do projeto após a entrada do produto em produção em massa, usando o “*Design Review Based on Design and Process*” (DRBD&P). Isso porque o mesmo estará exposto a uma gama muito maior de eventos e variáveis do que foi exposto durante a fase de validação e poderá mostrar problemas que antes passaram despercebidos. A aplicação desta metodologia é um

grande passo para mudar a mentalidade corriqueira de análise no desenvolvimento do produto. No entanto para as fases DRBTR e DRBD&P não foi achada uma forma metódica específica para análise dos produtos e/ou falhas dos mesmos, acreditando o autor que haja espaço para a utilização dos métodos mais adequados para cada situação.

A vivência do autor, em empresas de grande porte da área automotiva, tem demonstrado que as empresas ainda não têm iniciativas como a do GD3. Um dos motivos é a pouca prática em analisar as falhas de modo sistemático na busca de uma solução definitiva e confiável, quando estas ocorrem. Acima de tudo, que tal análise possa ser usada como subsídio ou retroalimentação nas fases de desenvolvimento do produto e seus testes. O autor acredita que o momento em que a falha é analisada é a melhor hora para se levantar as hipóteses mais próximas da realidade. Também, este é o momento em que está disponível para o engenheiro a maior quantidade de informações sobre o produto, a falha e as condições em que falhou. É o momento de se lançar às análises para não só descobrir a causa raiz, mas também para testar as soluções possíveis com vistas a entender e solucionar o problema de modo a propor uma solução duradoura.

Yoshimura (2003), na sua proposta da metodologia GD3, para a fase “*Design Review Based on Test Results*” (DRBTR) não especifica uma metodologia de análise que possa permitir a obtenção das informações necessárias como, por exemplo, quais as principais causas e quais as interações entre as possíveis causas, se existirem. Isto será discutido neste trabalho.

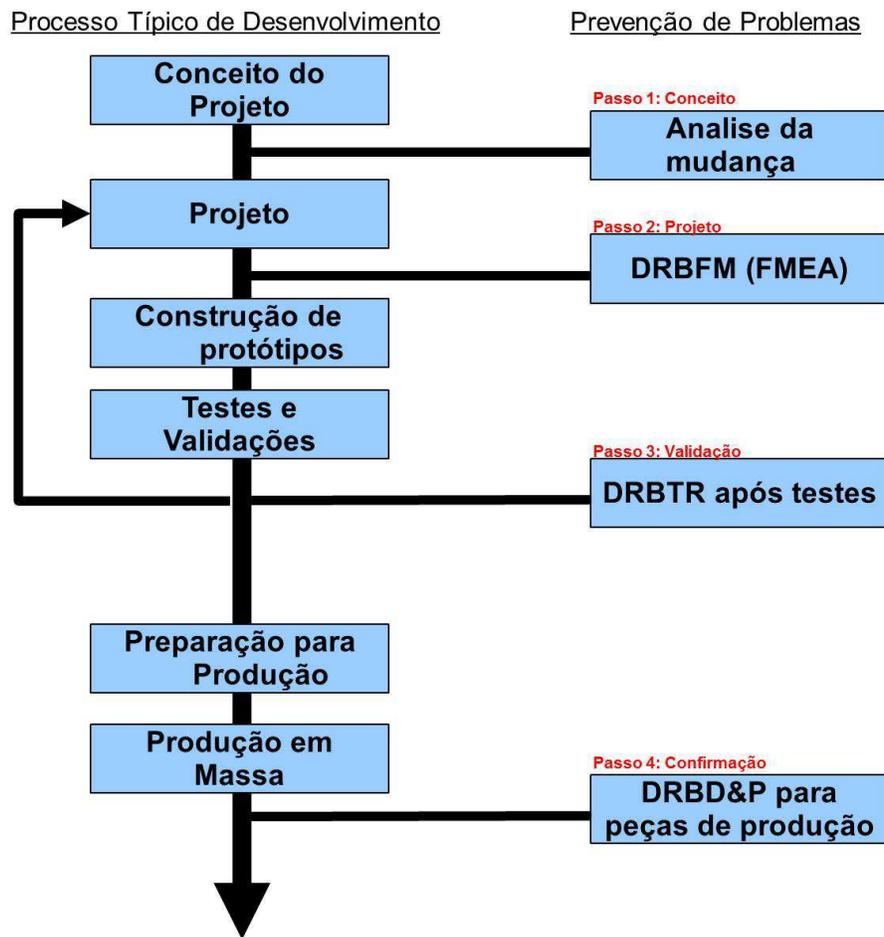


Figura 1.1: Processo Típico de Desenvolvimento de Produto e aplicação GD3 (adaptado de Yoshimura (2003))

Junto com o FMEA, o FTA é uma das ferramentas clássicas de análise de falhas, (NASA HANDBOOK,2002). Enquanto a primeira é definida como uma ferramenta de análise “*Bottom-Up*”, onde se parte de do modo de falha do sistema ou componente e se desdobra nos possíveis efeitos que o modo de falha em questão exerce sobre o sistema/componente, a segunda é definida como “*Top-Down*”, com a qual, a partir do efeito danoso ou falha, se procura deduzir as causas que os originaram. Como a priori se conhecem as consequências da falha, mas não suas causas, o “*Failure Tree Analysis*” (FTA) se aplica mais apropriadamente a esta dissertação.

O FMEA é uma ferramenta indutiva, (NASA HANDBOOK,2002), na qual um time multifuncional define, de modo subjetivo ou baseado em informações anteriores, a hierarquização dos principais modos de falhas, propondo assim quais possíveis modos de falha seriam os

causadores de uma possível falha e, assim, retornando resultados qualitativos. Já o FTA se trata de uma ferramenta dedutiva que divide o sistema em subsistemas e atribui uma possível causa a cada efeito de falha. É uma metodologia gráfica que permite visualização fácil e adequada das inter-relações dos diversos eventos que existem entre a causa raiz e a falha. Assim como o FMEA, é uma ferramenta de análise de falhas que retorna informações qualitativas. Apenas em casos onde já há um histórico de ocorrências do produto ou similares pode-se ter um retorno em termos de probabilidades de falhas. Neste caso, os dados históricos forneceriam subsídios para definir suas inter-relações e hierarquizar o problema.

A questão é: por que utilizar o FTA no lugar de outras ferramentas de análise de falhas como o Diagrama de Ishikawa?

O FTA pela sua apresentação gráfica e encadeada dos eventos que levam a falha principal ou evento de topo, (SAKURADA, 2001), já está predisposto a mostrar de forma lógica as inter-relações e a receber dados numéricos que porventura sejam gerados. Outros métodos tais como o diagrama de Ishikawa, que também se trata de um método de análise dedutiva, não apresentam de forma tão ordenada as informações com as definições de inter-relações através de portas lógicas.

Para a melhoria de um projeto na área de engenharia mecânica são necessários dados quantitativos, como ao se trabalhar em um novo dimensionamento, por exemplo. Além disso, como o foco é em projetos inovadores, muitas vezes não se conhece plenamente todas as interações que poderiam potencialmente levar a uma falha (Ex: entre forças, tensões e ações). Então, o FTA construído inicialmente estaria com várias lacunas ou questões a serem respondidas antes que fosse definida sua forma final.

Por outro lado, o Planejamento Experimental (“*Design of Experiments - DOE*”) é uma técnica de análise exploratória que permite, dentro de uma faixa definida previamente pelo experimentador, conhecer o comportamento de um ou mais fatores de influência quando os mesmos atuam em conjunto. Isto acontece pela análise das respostas dadas pelo sistema, que retorna dados quantitativos, tais como força, deformação, tensão, nível de ruído, etc. No entanto é necessário que haja fatores definidos e respostas definidas, e que ambos venham de um processo dedutivo que possa representar o sistema a ser estudado. Mas como elaborar e definir estes fatores e respostas se a priori não se conhece o sistema, já que ainda está em projeto?

Para este trabalho serão utilizadas técnicas de Planejamento Experimental já empregada na área de engenharia para testar as hipóteses levantadas no FTA. O emprego conjunto de tais

ferramentas deve permitir conhecer as inter-relações dos diversos fatores levantados previamente no FTA e também hierarquizá-los de modo que se possam preencher as lacunas do FTA preliminar. Assim, ter-se-ia a junção de uma ferramenta dedutiva na análise de falhas (FTA) combinada com uma ferramenta para análise exploratória (DOE), conforme a Figura 1.2 no intuito de se analisar falhas de causas desconhecidas e a sequência de eventos que levaram as falhas também desconhecida. Assim a Figura 1.2 define as áreas de atuação de cada uma das ferramentas, onde o FMEA é utilizado quando existe uma causa conhecida e se desconhece o efeito. O FTA fica restrito a quando se conhece o efeito(falha) e se desconhece a causa. E nos casos em que é necessária uma análise mais profunda devido ao desconhecimento das causas e mesmo o efeito é indefinido pode-se usar o DOE.

	Causa Conhecida	Causa desconhecida	
Efeito Conhecido	Descrição do comportamento	Análise Dedutiva	→ FTA
Efeito Desconhecido	Análise Indutiva	Análise Exploratória	→ DOE

FMEA ←

Figura 1.2: FTA x FMEA x DOE (adaptado de Nicholson, McDermid, Burns, (1994))

1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo propor e aplicar uma metodologia que possa ser utilizada nos diagnósticos de falhas, a priori, com causas desconhecidas ou diferentes das já conhecidas pelos times de desenvolvimento do produto, o que é característica de produtos de origem inovadora. Tais falhas podem ter ocorrido durante o processo de validação e mesmo após o mesmo estar em início de produção.

Com a aplicação da metodologia a ser proposta pretende-se que se tenha como resultado uma definição através da árvore de falhas de quais fatores podem gerar a falha que está sendo analisada, suas interações se existirem, mas também espera-se que leve à conclusão de qual é a causa raiz e a quantificação através das respostas escolhidas para o DOE. Por exemplo, em que níveis de tensão, ruído, deslocamento, etc., a falha se manifestaria.

Como metas (objetivos específicos) pretende-se:

1. Hierarquizar, de modo preliminar, os possíveis fatores que levam a falha, utilizando FTA. Dessa forma ter-se-ia um mapeamento, provisório, mas já de maneira estruturada, de como a falha poderia ter ocorrido e suas possíveis causas.

2. Retirar deste FTA preliminar informações que ajudem na montagem do DOE, que é a fase seguinte, tais como que tipo de respostas que serão necessárias (tensão, níveis de ruído, deformação, etc.) e também sobre que parâmetros deverão ser analisados no DOE.
3. Como resultado do DOE, confirmar ou rejeitar os ramos e fatores do FTA preliminar, levando assim a causa ou causas principais.

A partir de tais resultados poder-se-ia retroalimentar as fases de desenvolvimento do produto, seja ele seguindo a metodologia DFSS ou a de desenvolvimento típico, com informações quantitativas; a um melhor entendimento do caminho que leva aquela falha específica e a propostas de novos tipos de testes a serem aplicados no futuro em novos desenvolvimentos (FMEA). Poder-se-ia também aplicar o método como uma ferramenta no auxílio da metodologia GD3, principalmente nas fases DRBTR e DRBD&P, conforme a proposta apresentada na Figura 1.3.

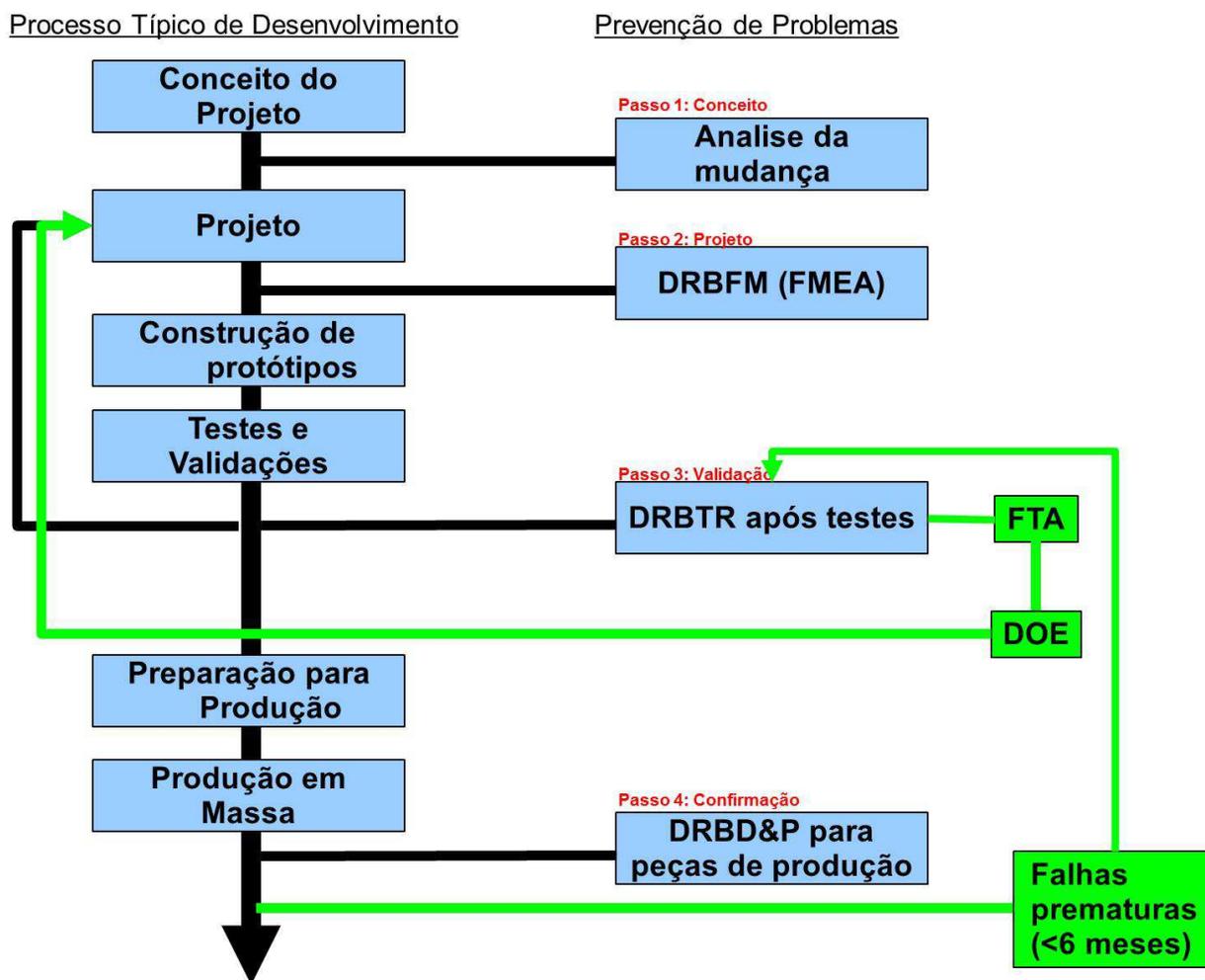


Figura 1.3: Possível Aplicação da metodologia proposta no Processo de Desenvolvimento de Produto e no GD3 (adaptado de Yoshimura (2003))

Para este trabalho investigou-se a existência de referências de trabalhos que combinassem ambas as ferramentas FTA e DOE sendo o problema ainda desconhecido, ou seja, sem dados históricos para a construção de um FTA que realmente descrevesse os eventos que levaram a falha.

Scapin (1999) comenta que o uso do FTA, já definido com suas inter-relações entre os eventos, pode fornecer os parâmetros críticos para um estudo de DOE de modo que o produto se torne mais robusto através de sua otimização. No entanto, parte-se de um FTA já existente.

Morello, (2005), no seu trabalho sobre redução da árvore de falha (FTA) utiliza modelos estatísticos de confiabilidade, baseado em dados já existentes, para a obtenção de uma árvore

mais simples, procurando manter o foco nos componentes mais críticos. No entanto, nestes modelos estatísticos não se utiliza DOE para a redefinição e hierarquização do FTA.

Teixeira e Cavalca (2008) utilizam o modelo de KANO em conjunto com análise de valor e definição de *target cost*, como subsidio para a construção do FTA e através de dados históricos define-se a confiabilidade do sistema. No entanto, ainda se usando dados pré-existentes, o que indica que se trata de um produto já corrente ou produto novo derivado de algum já existente.

Baseado na busca anteriormente citada, não se encontrou literatura que abordasse a utilização de FTA e DOE em conjunto como proposto. Algumas das propostas aqui apresentadas serão fundamentadas nos estudos e práticas efetuadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o desenvolvimento deste trabalho foi necessário o aprofundamento em vários temas, como desenvolvimento de projetos de um modo geral e, particularmente, quanto às ferramentas de análise de falhas, com ênfase em FTA- “*Failure Tree Analysis*”(Análise da Árvore de Falhas), e DOE – “*Design of Experiments*” (Planejamento de Experimentos). Este capítulo se destina a apresentar e a discutir os principais conceitos ligados a estes temas e que são importantes para esta dissertação.

Ele será delineado apresentando algumas das ferramentas de desenvolvimento de produtos tais como o Projeto Axiomático e, principalmente, o DFSS, em sua abrangência e sua conexão com as outras ferramentas FTA e DOE.

2.1 Desenvolvimento de Projetos de Produtos

Existem muitas ferramentas e metodologias de desenvolvimento de produtos. Uma das mais conhecidas no meio automotivo é o APQP (“*Advanced Product and Quality Planning*”), ou Planejamento Avançado do Produto e da Qualidade. Outra muito usada é o DFSS, que pode ser aplicado não só na indústria automotiva, mas em outras áreas também. Detalhes dessa ferramenta serão apresentados mais adiante.

Inicialmente, será apresentada a classificação para os principais tipos de projeto. Segundo Ulrich (2008) os projetos podem ser classificados em quatro tipos: Plataformas de novos produtos, Derivações de plataformas de produtos existentes, Melhorias incrementais de produtos existentes e Produtos fundamentalmente novos.

- Plataformas de novos produtos: estes projetos envolvem um grande esforço para o desenvolvimento de uma família de produtos nova. Este desenvolvimento pode ser baseado em uma plataforma já existente ou requerer a criação de uma nova família. Em última análise, se trata de uma evolução de produtos já existentes ou sobre os quais a empresa possui conhecimento prévio.
- Derivações de plataformas de produto existente: este tipo de projeto é uma ampliação da gama de produtos já existentes como, por exemplo, a criação de uma nova copiadora digital baseada em outra já existente, mas não digital.

- Melhorias incrementais de produtos existentes: este tipo de projetos se concentra em implementar melhorias em características de produtos já existentes. É usado principalmente para atualizá-lo junto ao mercado com o intuito de mantê-lo competitivo ou eliminar pequenas falhas existentes na vida corrente do produto. Neste tipo de projeto não existe nenhum tipo de inovação propriamente dita, apenas melhorias. Muitas vezes, não há a necessidade de testes inteiros de validação do conceito, pois este já está aprovado. Os testes são apenas de confirmação dos resultados de melhoria ou se as modificações não afetaram negativamente outras características do produto.
- Produtos fundamentalmente novos: este tipo de projetos envolve mudanças radicais ou a introdução de tecnologias novas. Isto pode ser aplicado também quando uma empresa se lança a um novo nicho de mercado. Com certeza este tipo de projeto envolve maiores risco e possibilidade de falhas, tanto na fase de validação como no início de vida do produto. Dependendo de como a empresa lida com este tipo de situação o retorno em matéria de sucesso e conhecimento para futuros desenvolvimentos é imensurável.

Um projeto inovador, segundo Pahl et al, (2005), envolve novas tarefas ou problemas não atendidos por novos princípios de solução ou uma nova combinação de princípios de soluções familiares. Segundo ele, podem se distinguir dois casos: o primeiro é a invenção, que trata-se verdadeiramente de descobertas, muitas vezes baseados na aplicação de novos conhecimentos. O segundo é a inovação, no qual são concretizadas novas funções e características de um produto. Isto pode ocorrer também pela recombinação de soluções familiares.

2.2 Ferramentas de Desenvolvimento de Produtos - Projeto Axiomático

A teoria do Projeto Axiomático foi proposta por Suh (1990). Após a análise de diversos projetos, Suh definiu dois axiomas (1-Axioma da Independência e 2-Axioma da Informação), que posteriormente geraram diversos teoremas que hoje guiam o desenvolvimento de um projeto para que ele alcance o sucesso.

Segundo Lobo, (2003), o projeto axiomático pode ser definido como um meio de criar soluções sintetizadas para moldar produtos que atendam as necessidades percebidas, necessidades estas oriundas dos desejos dos clientes mapeados e convertidos em Requisitos Funcionais (“*Functional Requirements*” - FR) e depois transformados em Parâmetros de Projeto (“*Design*

Parameters” - DP). Os FR são o que se deseja atender, os desejos do cliente traduzido em uma função entendível. Uma vez entendido o que o cliente deseja deve-se expressar como, tecnicamente, estes desejos podem ser alcançados.

A relação entre FR e DP são o centro do Axioma 1 de Suh. Por definição em um projeto entre os FR's não existe dependência. No entanto, dependendo da solução adotada para os DPs, os FRs poderão ser acoplados. Este caso gera um sistema caótico, difícil de ser ajustado e controlado. Por isso, projetos devem ter requisitos funcionais independentes.

Além disso, caso as soluções adotadas em DP atendam um e apenas um FR de modo que outros FR não sejam afetados ter-se-à, pela definição de Suh, (1990), um sistema desacoplado. Deste modo o sistema se torna muito mais simples de controlar, pois a variação de um único DP afetará o apenas um FR. “Este axioma é aplicado analisando-se a matriz de projeto, FRs x DPs. Assim, pode-se distinguir 3 diferentes tipos de projeto: o projeto desacoplado (matriz diagonal), o projeto semi-acoplado (matriz triangular) e o projeto acoplado (nenhum dos dois casos)” (Lobo,2003). A representação gráfica desses tipos de projeto é mostrada na Figura 2.1.

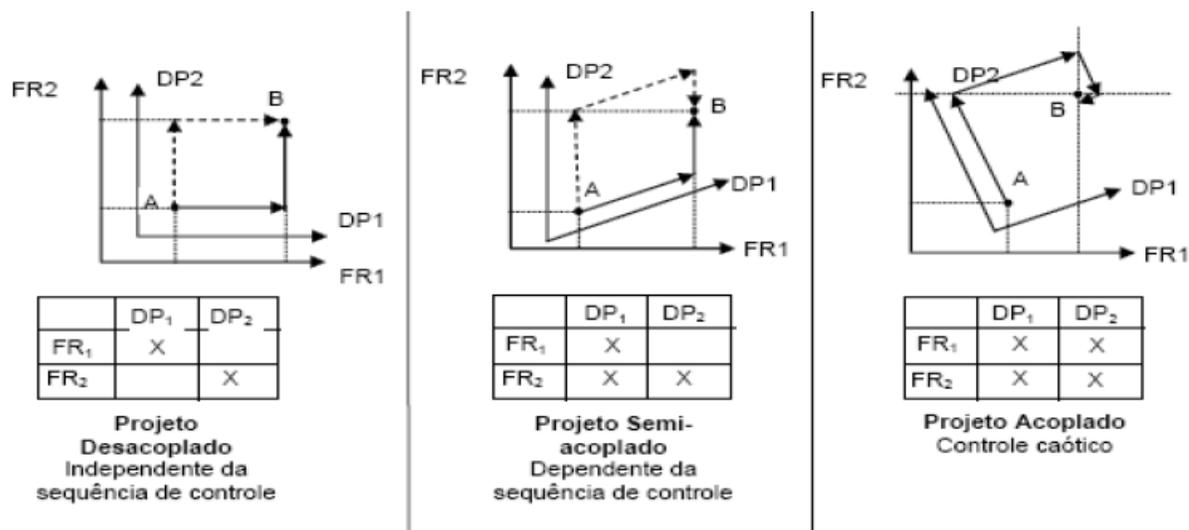


Figura 2.1: Tipos de projetos axiomáticos (retirado de Lobo, 2003)

O Axioma 2 está ligado à complexidade de um projeto. Suh (1990), estabelece que os melhores projetos são os mais simples e, por isso, deve-se procurar ao máximo manter a simplicidade deste. A complexidade de um projeto está diretamente ligada a quantidade de informações que o mesmo possui. Ou seja, quanto mais informações, desnecessárias há no projeto maior a possibilidade deste excesso de informações gerar confusão, perda de foco e desperdício de tempo em questões desnecessárias.

2.3 Ferramentas de Desenvolvimento de Produtos - DFSS

Como o DFSS surgiu a partir de uma evolução da metodologia 6Sigma é necessário iniciar com uma pequena revisão da mesma. O 6 Sigma foi criado, e pela primeira vez utilizado, na Motorola, no final dos anos 70, para integrar ferramentas já existentes como “*Design for Manufacturing*” (DFM) e “*Lean Manufacturing*”. Sua popularização se deu com seu uso pela General Eletric. Com ele a empresa obteve uma economia na ordem de 1,5 bilhão de dólares em 1999, (WERKEMA, 2002).

Esta metodologia foi usada na análise de problemas já existentes na GE, de modo a solucioná-los, deixando os produtos e processos mais confiáveis e robustos. A filosofia do programa Seis Sigma enfatiza a redução da variabilidade do processo usando ferramentas e técnicas estatísticas, (BAÑUELAS & ANTONY, 2004).

Essa filosofia segundo Fioravante, (2005), esforça-se para alcançar operações que gerem não mais de 1,2 defeitos por um bilhão. Em estatística isto significa que, em um processo controlado com distribuição normal, deve-se obter 99,9999998% de peças dentro do especificado, ou seja, 6 desvios padrão (simbolizados pela letra grega σ -Sigma).

Segundo Rotondaro et al, (2002) considera-sena prática adequado o índice de 3,4 defeitos por milhão, o que daria 4,5 σ . A razão é que é muito difícil manter um processo centralizado por um período prolongado, pois diversas influências incontrolláveis acabam deslocando a média nominal, de acordo com estudos, em torno de 1,5 σ . Por consequência, um processo que inicialmente tem um desempenho de 6 σ , devido a estas variações incontrolláveis ao longo do tempo, acaba apresentando um desempenho de 3,4 defeitos por milhão.

O Seis Sigma é orientado para correção, tendo se tornado um dos principais impulsos para a medição da melhoria contínua e para a fixação de níveis de referenciais competitivos. Existem algumas estratégias para atingir uma produção com “zero erro”. Segundo Santos e Martins, (2003) há três estratégias na filosofia Seis Sigma:

- a) estratégia de melhoria de processo;
- b) estratégia de projeto/reprojeto de processo;
- c) estratégia de gerenciamento de processo.

A melhoria de processo refere-se à estratégia de desenvolver soluções com a finalidade de eliminar as causas-raiz dos problemas de desempenho de uma empresa, sem, no entanto, interferir na estrutura básica do processo. Na estratégia projeto/reprojeto de processo, o objetivo é

substituir uma parte ou todo o processo por um novo. Já na estratégia de gerenciamento de processo, as exigências do cliente são claras e regularmente atualizadas, os processos são documentados e gerenciados com medições em todas as suas etapas. Nesta última estratégia, os gerentes e associados também usam as medições e o conhecimento do processo para avaliar os seus desempenhos.

Baseado neste tipo de premissas o 6 Sigma evoluiu para o método de análise hoje chamado de DMAIC, do acrônimo em inglês (“*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*”). Originalmente a Motorola utilizava apenas o MAIC que era uma evolução do ciclo PDCA. Posteriormente a GE acrescentou a fase de definição “D” quando da elaboração do 6 sigma. A Figura 2.2 mostra as etapas do DMAIC, segundo Fioravanti (2005).

Deve-se ressaltar que neste trabalho considera-se *metodologia* a idéia geral que engloba todos os conceitos e ferramentas a serem usados, tal como o Seis Sigma ou DFSS, e considera-se *método* a sistemática ou caminho usado por cada metodologia para solucionar o problema, por exemplo DMAIC, PDCA etc.

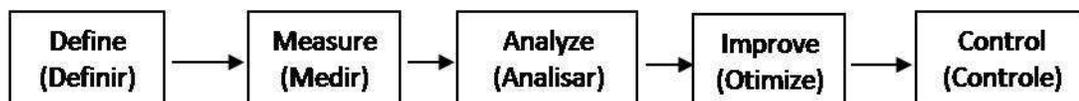


Figura 2.2: Fases do DMAIC

As diversas fases do DMAIC e as atividades concernentes são segundo Fioravanti (2005):

- Definir: nesta fase são identificadas as características que mais afetam o produto quanto à confiabilidade, robustez, lucratividade, etc. Enfim qualquer aspecto que possa afetar o desempenho do produto junto ao cliente (Voz do Cliente). É nesta fase também que se identifica o principal cliente relativo ao aspecto a ser estudado (interno ou externo).
- Medir: nesta segunda fase são medidos os processos que afetam as características que foram definidas na etapa anterior. Por exemplo, para o diâmetro das esferas de um rolamento mede-se a capacidade do processo de gerar peças conforme o especificado e o que poderia influenciar na sua variação. Nesta etapa também são escolhidas as principais variáveis que serão analisadas na fase seguinte.

- Analisar: de posse dos dados da fase anterior, o foco desta terceira etapa é a identificação das causas raízes da variação do processo ou produto que afetam seu desempenho, como definido na primeira etapa.
- Otimização: Nesta penúltima etapa, uma vez identificadas as causas raízes e sua contribuição para a variação do desempenho do produto/processo, buscam-se soluções robustas e confiáveis que reduzam estas variações ou as eliminem.
- Controle: Nesta quinta e última etapa, após a implementação das soluções propostas na fase anterior, monitora-se sua efetividade e para verificar sua eficiência na eliminação da variação e recalcula-se a capacidade do processo. Ou seja, recalcula-se a capacidade do processo se manter estável e fornecer peças dentro do especificado com uma margem de segurança definida estatisticamente.

O DFSS surgiu como uma evolução da metodologia 6 Sigma. No entanto, a grande diferença entre o 6 Sigma tradicional e o “*Design For Six Sigma*” – DFSS é que o primeiro é usado em geral na solução de problemas já existentes e o segundo, por ser uma atividade de projeto, se propõe a prevenir o surgimento de tais problemas. Assim, o DFSS procura maximizar os ganhos de novos projetos através da redução do tempo de lançamento e do índice de falhas. Utiliza uma série de ferramentas para a identificação das necessidades dos clientes e definição de especificações, como o “*Quality Function Deployment*” (QFD), e técnicas estatísticas e de otimização para aquisição e análise de dados e melhorias do produto e processo.

A metodologia DFSS se preocupa com o produto desde o contato com o cliente, passando pelo desenvolvimento do produto e do processo, até a entrada em produção do mesmo. Apesar das diversas variantes utilizadas dentro do DFSS, segundo Kovach et al (2005), os principais focos do DFSS geralmente são:

- Identificar as necessidades do cliente ou Voz do Cliente;
- Analisar as necessidades e priorizá-las;
- Desenvolver um projeto de produto baseado nas necessidades do cliente;
- Desenvolver os vários níveis dos processos de produção baseados nas necessidades do cliente - estabilidade do Processo de Manufatura;
- Modificar o processo produtivo de modo que as variações em relação as necessidades dos cliente sejam minimizadas - projeto robusto;

- Estabelecer um plano de controle da produção - gerenciamento das variações nos produtos;

Em um ambiente de DFSS o grupo de projeto trabalha junto a um time multifuncional composto de membros das áreas de marketing, vendas, qualidade, manufatura, compras e até mesmo do cliente. Com isso, baseado nos focos acima definidos, procura-se criar produtos que reflitam física e funcionalmente os requisitos dos clientes. Assim, busca-se:

- Produtos virtualmente livres de defeitos;
- Manufatura sem desperdícios;
- Peças compradas 100% usáveis;
- Mínima manutenção e/ou assistência técnica.

Um fato importante a destacar é que o DFSS não procura substituir os tradicionais processos de desenvolvimento de produtos, mas busca trazer melhorias ao longo das várias fases dos mesmos.

A idéia principal se baseia no fato de que os custos para a solução de algum problema aumentam em muito conforme o projeto vai transcorrendo até que, no ponto de produção, torna-se caro demais efetuar a sua correção. Por isso os esforços devem ser concentrados no início do projeto quando, apesar de ser mais difícil identificar o problema, é mais barato atuar que nas fases finais do projeto, ver Figura 2.3.

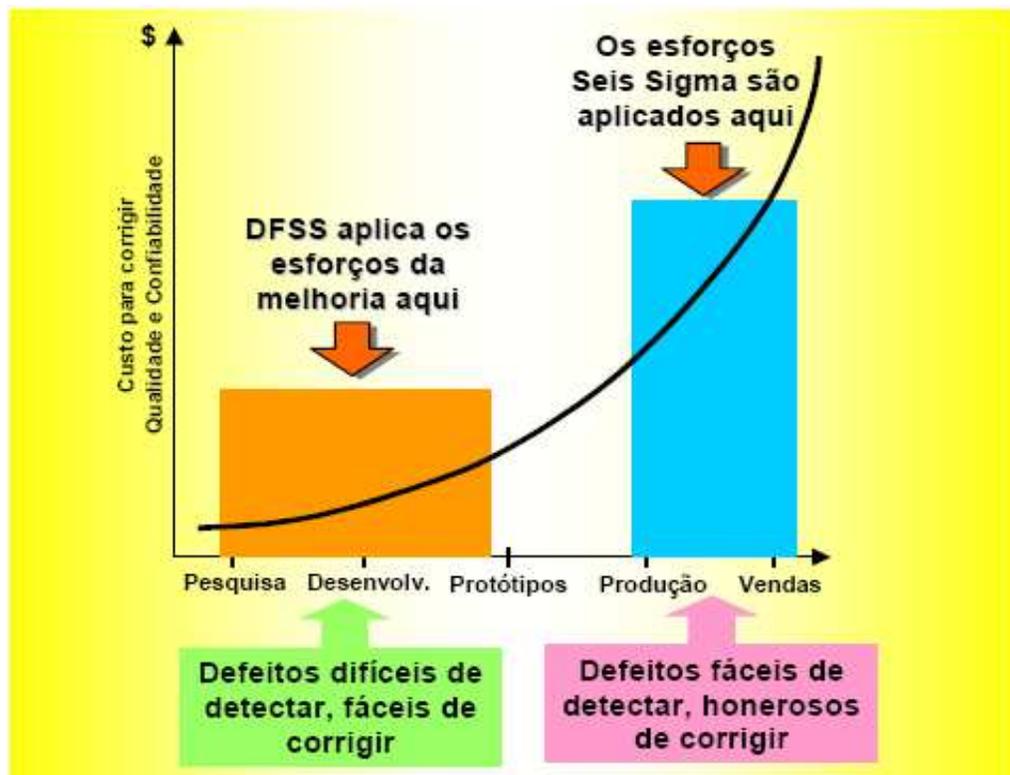


Figura 2.3: Demonstração das áreas de atuação das metodologias DFSS e 6 Sigma(Fioravante, 2005)

Uma questão levantada por diversas fontes, tais como Banuelas e Antony (2004), e Fioravante (2005), é concernente a quando se deve utilizar a metodologia DFSS. Como já mencionado anteriormente, que deve ser usada no desenvolvimento de novos projetos é um consenso entre as fontes mencionadas. No entanto, quando se trata do re-projeto de um produto há uma área nebulosa. Geralmente produtos/processos com problemas são tratados pela metodologia de 6 Sigma, que visa, como já exposto anteriormente, implementar melhorias. Em geral os projetos esbarram em limites físicos e conceituais e apenas melhorias não são suficientes para alcançar a meta dos 6 Sigma. Isto acontece quando se atinge o índice de 4-4,5 Sigma (Figura 2.4), onde uma mudança da ferramenta a ser usada deve ser considerada se o objetivo é atingir o índice 6 Sigma. Uma das opções é considerar uma utilização do DFSS no lugar do 6 Sigma.

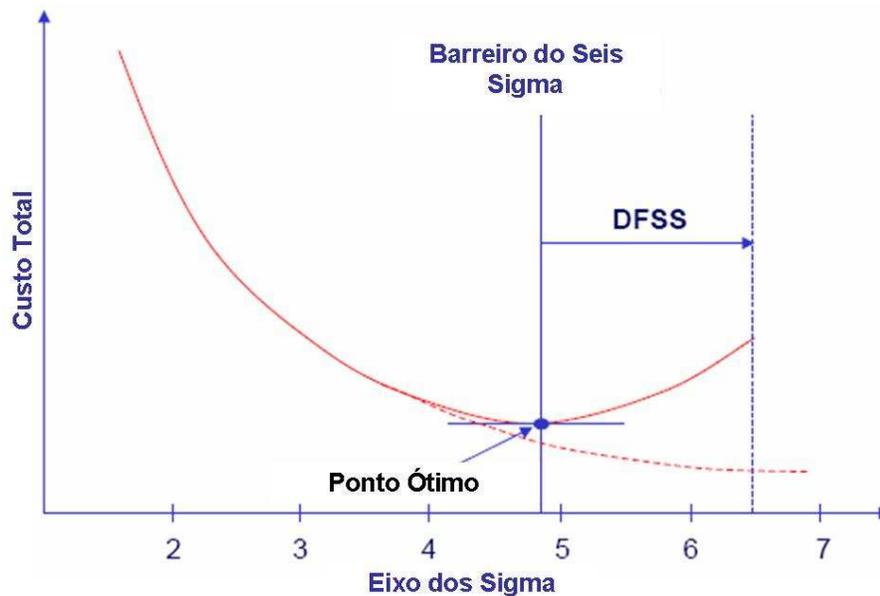


Figura 2.4: Barreira entre 6 Sigma e DFSS (adaptado de Kiemele, Schimdt, Berdine, 1997)

2.4 Desdobramento do DFSS

Pode-se definir o DFSS como sendo uma metodologia que utiliza ferramentas estatísticas, de engenharia e medições, de modo que permita desenvolver produtos e processos que atinjam e excedam as expectativas dos clientes e do próprio negocio e que produzam níveis apropriados de qualidade. Tudo isso seguindo um método definido previamente. No entanto, como no 6 Sigma, não há um método aceito de modo generalizado. Foram desenvolvidos diversos métodos, que dependem da área de atuação, todos baseados no DMAIC original do 6 Sigma, mas adaptados e adequados para a realidade de cada situação. A seguir pode-se ver alguns dos mais utilizados.

O método DMADV, segundo Franza e Chacravorty (2007), é o mais genérico e deriva diretamente do DMAIC do 6 Sigma. É definido como:

- *Define* (Definir) quais as oportunidades ou problemas a serem atacados durante o projeto DFSS. Definem-se também os requisitos do cliente, sejam eles internos ou externos;
- *Measure* (Medir): uma vez definidas as necessidades do cliente é hora de investigar o problema ou oportunidade de modo a conhecer melhor o terreno que será explorado no

projeto. Verificar a dimensão do problema e verificar as informações mais relevantes para uma possível solução;

- *Analyze* (Analisar) as diversas opções de produto ou processo para atender ou solucionar as necessidades dos clientes;
- *Design* (Projetar) o produto e/ou processo para atender aos requisitos do cliente baseado nas opções analisadas na fase anterior. É a fase de construção de protótipos de engenharia;
- *Verify* (Verificar) o desempenho do produto e/ou processo proposto na fase anterior para que atenda as necessidades do cliente e permita a validação dos resultados.

Outro método muito utilizado, principalmente entre indústrias da área automotiva, autopeças e aeroespacial, é o chamado IDOV, (FRANZA E CHACRAVORTY, 2007), cujo fluxograma é apresentado na Figura 2.5. As fases desse método são:

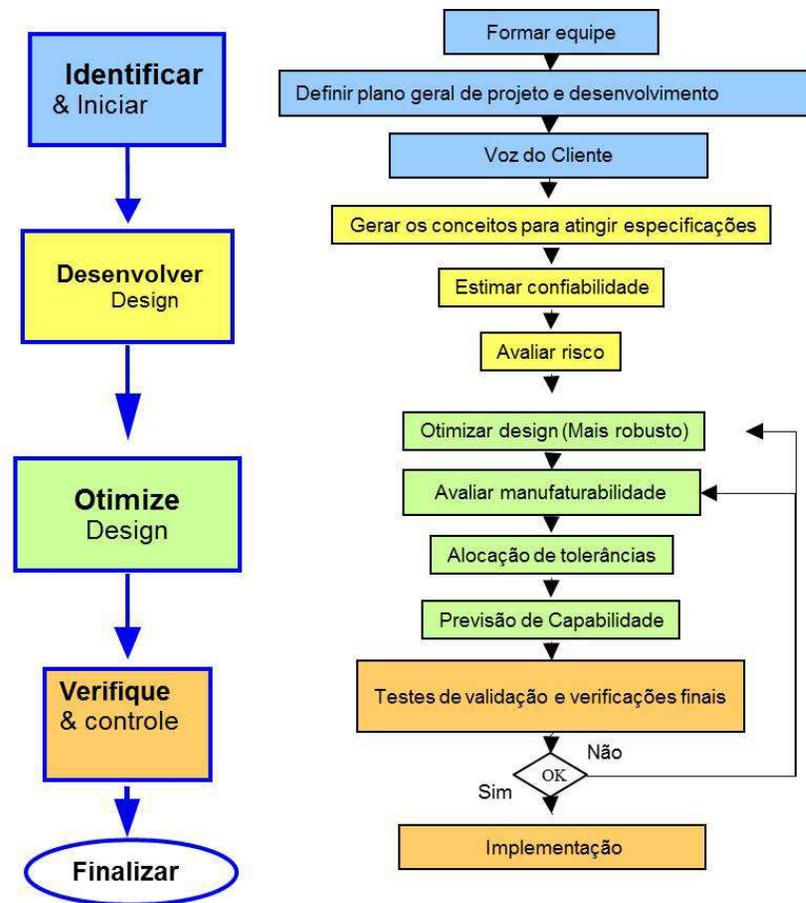


Figura 2.5: Fluxo doDFSS pelo método IDOV (adaptado de Amer et al, 2008)

- *Identify* (Identificar): Significa definir o plano geral do projeto e seu desenvolvimento. Nesta fase também se coletam os dados mais significativos para o projeto, ou seja, os requisitos do cliente, também chamado “Voz do Cliente”.
- *Development* (Desenvolver): Nesta fase, de posse dos requisitos do cliente, é feita uma análise dos mesmos e é feito um escopo do projeto DFSS. É nesta fase também que, após a análise dos requisitos do cliente, estes são comparados com os requisitos da empresa e é verificado se há algum conflito entre os mesmos. Caso haja, estes devem ser comunicados ao cliente para evitar problemas futuros com perda de receita, por exemplo. Caso não haja conflito iniciam-se os trabalhos de engenharia propriamente dita, quando se geram os conceitos para que sejam atendidos os requisitos do cliente. Aqui também se estima a confiabilidade dos conceitos e os riscos de cada conceito.
- *Optimize* (Otimizar): Nesta fase inicia-se a otimização do projeto. Aqui são utilizadas ferramentas como Design Robusto e DOE entre outras, para escolher os melhores parâmetros e tolerâncias para o projeto, priorizando as características críticas. Aqui também é feita a definição do processo de manufatura do produto para que o mesmo atenda as metas do DFSS. São estimadas as estabilidades de produto e processo.
- *Verify* (Verificar): Fase final do DFSS, onde são conduzidos os testes, verificações e validações finais de que o projeto atende aos requisitos originais e como eles são atendidos. Aqui também são estabelecidos quais e que tipos de controles serão necessários para o bom andamento do produto/processo.

2.5 Ferramentas do DFSS

Nesse tópico são apresentadas em detalhes quais ferramentas são utilizadas nas diversas fases do DFSS.

2.5.1 Identificar

Segundo Woodford (2003), para o desenvolvimento da metodologia DFSS o principal fator na fase inicial é conhecer as necessidades do cliente e as restrições (do cliente ou legais) quanto ao produto que se está procurando ofertar. Uma vez identificadas estas necessidades as demais fases seguem de modo menos crítico. No entanto, neste mesmo trabalho é mencionado

que pode haver a necessidade de retorno a fase inicial para um ajuste, ou melhor entendimento de tais necessidades. Para esta fase são utilizadas algumas ferramentas como:

- QFD (1ª Casa da Qualidade);
- FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*);
- Pesquisa de marketing;
- Benchmarking;
- Diagrama de Afinidade;
- Modelo de Kano;

Nesta fase, os participantes devem ter noções de estatística para entender o que são variações e entender também gráficos e histogramas.

Como resultado desta fase é elaborado um planejamento do projeto a ser conduzido e sua agenda, são esclarecidas as necessidades do cliente, é definido o time que irá trabalhar devido a sua afinidade com os temas que serão abordados e, em algumas empresas, o contrato inicial junto ao cliente também é elaborado a partir dos resultados desta fase.

2.5.2 Desenvolver

Neste ponto, também são comparadas as necessidades dos clientes com as da empresa para que não haja conflitos de interesses. Também são transformadas em Funções de Transferência as necessidades dos clientes. Aqui se definem os “*Critical to Quality*” (CTQ's) e as especificações de engenharia que irão nortear os trabalhos do DFSS, como os índices que devem ser atingidos e monitorados. Esta fase também conhecida como Projetar (no inglês *Design*). Compreende o uso das informações recolhidas para criar propostas do produto que atinjam os objetivos definidos nos requisitos de engenharia e CTQ's. Com estas propostas estimam-se a confiabilidade do produto, seus potenciais riscos de desempenho e produção, e faz-se o refinamento dos custos de cada proposta. Com esses resultados, é selecionada a proposta que atenda a todos os requisitos ou que melhor atenda a eles. Se nenhuma proposta atender as necessidades retorna-se aos dois primeiros passos para um melhor entendimento dos requisitos e uma possível revisão dos mesmos. As principais ferramentas usadas nesta fase são.

- TRIZ (técnica de criatividade sistemática);
- Análise de dados de Confiabilidade de Vida;
- FMEA (Análise de Riscos inerentes ao produto);

- Diagrama de Causa e Efeito;
- MSA (Análise dos Sistemas de Medição);
- ANOVA (Análise de Variância);
- Regressão Linear Simples, Polinomial e Múltipla;
- DOE (Projeto de Experimentos);
- Técnicas de Engenharia Robusta.

Como se pode notar pelas ferramentas mencionadas nesta fase, se faz necessário um embasamento mais profundo em técnicas estatísticas para a definição do conceito do produto. Geralmente, a análise é conduzida pelo Engenheiro de Produto ou Projeto definido para o time de DFSS, que pode ser auxiliado por especialista em técnicas estatísticas. Esta é considerada por Franza e Chacravorty(2007) a fase mais difícil, pois envolve a criatividade do Engenheiro(s) na proposição de diversas alternativas para atender as necessidades do projeto e, muitas vezes, pode ser frustrante quando há demora para encontrar uma ou mais soluções.

2.5.3 Otimizar

Uma vez definido o conceito que será desenvolvido e transformado no produto final entra-se na 3ª fase, que é a de otimização. Nela, o conceito é explorado em profundidade pela equipe técnica para buscar uma maior robustez do produto frente às variações de processo e ambiente, além de uma melhor facilidade de manufatura de modo que atenda aos requisitos especificados inicialmente. Também são definidas nesta fase a alocação de tolerâncias, previsão de estabilidade do processo, Análise do Valor Esperado e parâmetros de operação após a otimização do produto. As principais ferramentas segundo Woodford (2003), são:

- Otimização via simulação de Monte Carlo, DOE clássico e Superfície de resposta;
- Ferramentas de Engenharia Robusta (P-Diagrama, Função Perda, etc);
- Alocação de Tolerâncias;
- Projeto para manufaturabilidade (*Design for manufacturing*).

Algumas das técnicas apresentadas já são largamente utilizadas pelas indústrias como as técnicas de DOE clássicas, os métodos de Taguchi e Simulação de Monte Carlo.

Nesta fase também são utilizadas ferramentas computacionais de estatística e de Análise de Elementos Finitos. Elas propiciam o teste de diversos cenários com uma variação grande de parâmetros sem a necessidade de construção de protótipos, que são caros e tomam tempo

demasiado para serem testados. Na maior parte das vezes, com os protótipos não são testadas todas as possíveis variações desejadas devido ao limitante custo/tempo.

No entanto, outras técnicas como modelagem via Superfícies de Resposta ainda são desconhecidas pela maioria dos profissionais e empresas de engenharia que adotam a metodologia DFSS, mesmo estando disponíveis em Softwares comerciais como o Minitab e o Matlab.

2.5.4 Verificar

Na etapa final do DFSS, também chamada de Validação, após encontrar o projeto ótimo para determinado produto, entra-se na fase de verificação dos resultados ou também chamada de validação do produto. Nela, apesar dos possíveis testes efetuados com a ajuda de sistemas computacionais, é necessário submeter o produto a condições reais para provar os conceitos assumidos. Isto é feito através da realização de testes acelerados para verificação da confiabilidade do produto perante os requisitos dos clientes e legais e quanto às necessidades da empresa. As principais ferramentas são.

- Testes de Vida Acelerada;
- Análise de Confiabilidade;
- Planos de Controle;

Nesta fase também se espera que sejam atualizados com os dados finais os respectivos Planos de Controle, Lista de Materiais, Custos dos Projetos e seja feita um memorial descritivo do projeto para futuras utilizações. É interessante notar que apesar de nesta fase serem desenvolvidos trabalhos práticos, ou seja, construção de protótipos e análise dos resultados, não foi encontrado na literatura consultada nenhuma metodologia que descreva como estes resultados poderiam alimentar as fases anteriores de otimização de design, alocação de tolerâncias etc. Por experiência, estes dados fornecidos em relatórios em geral servem para identificar apenas que ocorreram falhas e que estas falhas estão localizadas em determinados componentes. Um acompanhamento de testes onde estes dados sejam inseridos como dados de entrada em uma modelagem de DOE parece não ser usual, a não ser que já se conheça e esteja sendo avaliado um modo de falha específico.

2.6 Planejamento de Experimentos

O planejamento de experimentos ou DOE (do inglês “*Design of Experiments*”) é um conjunto de técnicas estatísticas aplicadas em diversas áreas da Ciência, como na Engenharia, Biologia, Agricultura, Química, Física etc. Nesse texto, por concisão, o planejamento de experimentos será chamado pela denominação em inglês DOE por ser mais popularmente conhecida nos diversos meios acadêmicos e industriais, Através do DOE, busca-se descobrir as variáveis relevantes que influenciam um determinado processo. Através destas variáveis busca-se a otimização do processo.

Segundo Telford(2007), o DOE foi introduzido na década de 20 do século passado por Ronald Fisher, que era responsável dentro do Ministério da Agricultura da Inglaterra por aumentar a produtividade agrícola após a Primeira Guerra. Fisher, um profundo conhecedor de técnicas estatísticas, aplicou as mesmas analisando experimentos com fatores que mais influenciavam a produtividade dos alimentos. Após este uso inicial o planejamento de experimentos começou a serem usado em outras áreas como indústria Naval, laboratórios químicos e outros, até chegar de modo definitivo a indústria convencional na década de 50 do século passado. É interessante notar que nesta época a indústria que recebeu esta e outras técnicas de melhoria de qualidade não foi a indústria ocidental, que após a Segunda Guerra liderava o desenvolvimento industrial, mas sim a indústria japonesa, que arrasada após o conflito aprendeu tudo o que Edward Deming tinha a ensinar, inclusive técnicas estatísticas. Edward Deming foi um engenheiro americano que se dedicou a melhoria dos processos produtivos principalmente na área de estatística e qualidade. E definiu seus 14 pontos para atingir a qualidade total. Deste período se destaca o nome do engenheiro Genichi Taguchi, que teve um papel de destaque na elaboração de métodos de melhoria da qualidade usando planejamento de experimentos. Taguchi será referenciado outras vezes durante este trabalho.

Segundo Wu e Hamada (2000) apud Barros; Scarmínio; Bruns (2001), o DOE pode ser dividido em três tipos. O primeiro, que diz respeito a entender a influência de fatores que atuam em um processo e nas variações das respostas de saída deste processo, é chamado de “tradicional”. O segundo tipo é referente à Metodologia de Superfície de Resposta (RSM em inglês) que busca não só entender o comportamento do processo sendo analisado, mas também procura seu ponto ótimo de acordo com a variação dos parâmetros de entrada. O terceiro tipo busca encontrar parâmetros do processo robustos que possam reduzir a variabilidade do mesmo,

ainda que sob a influência de fatores de ruídos externos. É definido como Projeto de Parâmetros Robustos (em inglês RPD).

Ilzarbe et al (2008), em sua pesquisa, baseada em publicações científicas publicadas entre 2001 e 2005, mostra que o tipo mais utilizado é o DOE “Tradicional”, que é empregado para saber como as variáveis pré-definidas afetam o processo em estudo. Segundo pesquisa conduzida por Ilzarbe e colaboradores, em média 58% de trabalhos científicos e tecnológicos apresentados usam este método. O segundo mais utilizado, com 33% de uso nos trabalhos publicados, é o que utiliza a metodologia de Superfície de Resposta (RSM). Por último está o uso de metodologia que busca a robustez dos parâmetros do processo/produto ou (RPD).

Pizzolato (2002) classifica os principais tipos de experimentos de DOE de forma bastante didática: quanto tipo de aplicação, estrutura, informações fornecidas pelo experimento e modelo usado pelo experimento. Na Tabela 2.1, pode-se ver esta classificação.

Tabela 2.1: Classificação de Planejamento de Experimentos (Pizzolato,2002)

Completamente aleatório com um único fator	Tipo de Aplicação	Quando somente um fator é usado
	Estrutura	O efeito do fator é estudado por meio da alocação ao acaso das unidades experimentais aos níveis do fator. A ordem dos ensaios é realizada de modo aleatório. Os blocos estão ausentes.
	Informações	* Estimativas e comparações das médias dos tratamentos ou efeito do fator; * estimativa da variância do erro;
	Modelo	$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$, para $i=1,2,\dots,a$ e $j=1,2,\dots,n$, onde y_{ij} é a j-ésima observação, μ é a média geral, τ_i é o efeito do i-ésimo tratamento, e ε_{ij} é o erro aleatório.
Blocos aleatorizados	Tipo de Aplicação	Quando o efeito de um fator está sendo estudado e é necessário controlar a variabilidade provada por fatores perturbadores conhecidos. Estes fatores perturbadores (material experimental, tempo, pessoas, etc.) são divididos em blocos ou grupos homogêneos.
	Estrutura	São tomadas observações correspondentes a todos os tratamentos (níveis do fator) em cada bloco. Usualmente são formados blocos em relação a um único fator perturbador.
	Informações	* estimativas e comparações dos efeitos dos tratamentos livres dos efeitos do bloco; * estimativa dos efeitos do bloco; * estimativa da variância do erro.
	Modelo	$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$, para $i=1,2,\dots,a$ e $j=1,2,\dots,b$, onde y_{ij} é a ij-ésima observação, μ é a média geral, τ_i é o efeito do i-ésimo tratamento, β_j é o efeito do j-ésimo bloco e ε_{ij} é o erro aleatório.
Blocos inco	Tipo de Aplicação	Quando todos os tratamentos não podem ser acomodados em um bloco.

	Estrutura	Os tratamentos testados em cada bloco são selecionados de forma balanceada: dois tratamentos quaisquer aparecem juntos em um mesmo bloco o mesmo número de vezes que qualquer outro par de tratamentos.
	Informações	Idêntico ao projeto em blocos aleatorizados. Os efeitos de todos os tratamentos são estimados com igual precisão.
	Modelo	$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$, onde y_{ij} é a ij -ésima observação do j -ésimo bloco, μ é a média geral, τ_i é o efeito do i -ésimo tratamento, β_j é o efeito do j -ésimo bloco e ε_{ij} é o erro aleatório.
Blocos incompletos parcialmente balanceados	Tipo de Aplicação	Quando um projeto de blocos incompletos balanceados necessita de um número de blocos excessivamente grande.
	Estrutura	Alguns pares de tratamentos aparecem juntos λ_1 vezes, outros pares aparecem juntos λ_2 vezes, ..., e os pares restantes aparecem juntos λ_n vezes.
	Informações	Idêntico ao projeto em blocos aleatorizados. Mas os efeitos de todos os tratamentos são estimados com diferentes precisões.
	Modelo	$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$, onde μ é a média geral, τ_i é o efeito do i -ésimo tratamento, β_j é o efeito do j -ésimo bloco e ε_{ij} é o erro aleatório.
Fatorial	Tipo de Aplicação	Quando vários fatores devem ser estudados em dois ou mais níveis e suas interações podem ser importantes.
	Estrutura	Em cada repetição completa do experimento todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são estudadas. A alocação das unidades experimentais aos tratamentos e a ordem de realização dos ensaios são feitas de modo aleatório. Os blocos estão ausentes.
	Informações	* estimativas e comparações dos efeitos dos fatores principais; * estimativa dos possíveis efeitos; * estimativa da variância do erro.
	Modelo	$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \gamma_k + \beta_j + (\tau\gamma)_{ik} + (\tau\beta)_{ij} + (\gamma\beta)_{jk} + \varepsilon_{ijk}$, para $i=1, 2, \dots, a; j=1, 2, \dots, b; k=1, 2, \dots, n$; onde μ é o efeito da média geral, τ_i é o efeito do i -ésimo nível do fator A, β_j é o efeito do j -ésimo nível do fator B, γ_k é o efeito do k -ésimo nível do fator C, $(\tau\beta)_{ij}$ é o efeito da interação entre os fatores A e B, ..., e ε_{ijk} é o erro aleatório.
Fatorial 2^k em blocos	Tipo de Aplicação	Quando o número de ensaios necessários para o planejamento com k fatores em 2 níveis é muito grande para que sejam realizados sob condições homogêneas (blocos). Neste caso o experimento é dividido em subconjuntos homogêneos. Os blocos surgem geralmente como consequência de restrições de tempo, homogeneidade de materiais, etc.
	Estrutura	O conjunto completo de tratamentos é dividido em subconjuntos de modo que as interações de ordem mais alta são confundidas com os blocos. São tomadas observações em todos os blocos.
	Informações	* fornece as mesmas estimativas do projeto fatorial, exceto algumas interações de ordem mais alta que não podem ser estimadas porque estão confundidas com os blocos.
	Modelo	É o mesmo utilizado no projeto de experimento tipo fatorial.
Fatorial 2^k fracionado	Tipo de Aplicação	Quando existem muitos fatores (k muito grande) e não é possível coletar observações em todos os tratamentos
	Estrutura	Vários fatores em dois níveis, mas somente um subconjunto do fatorial completo é executado. A formação de blocos algumas vezes é possível.

	Informações	* estimativas e comparações dos efeitos de vários fatores; * estimativa de certos efeitos de interação (alguns efeitos podem ser estimáveis); * certos projetos fatoriais fracionados (quando k é pequeno) não fornecem informações suficientes para estimar variância.
	Modelo	É o mesmo utilizado no fatorial
Quadrados de Youden	Tipo de Aplicação	Similares aos quadrados latinos, mas os números de linhas e colunas e tratamentos não precisam ser iguais.
	Estrutura	Cada tratamento ocorre uma vez em cada linha. O número de tratamentos deve ser igual ao número de colunas. Os blocos são formados em relação a duas variáveis perturbadoras.
	Informações	Idêntico ao projeto de quadrados latinos.
	Modelo	$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \tau_j + \beta_{ih} + \varepsilon_{ijh}$, para i, j e $h = 1, 2, \dots, p$; onde μ é a média geral, α_i é o i-ésimo efeito do bloco, τ_j é o j-ésimo efeito do tratamento, β_k é o h-ésimo efeito do j-ésimo bloco e ε_{ij} é o erro aleatório.
Quadrados Latinos	Tipo de Aplicação	Quando um fator de interesse está sendo estudado e os resultados podem ser afetados por duas outras variáveis experimentais ou por duas fontes perturbadoras (variáveis de blocos). É suposta a ausência de interações entre estas variáveis.
	Estrutura	Os tratamentos são distribuídos em correspondência 'as colunas e linhas de um quadrado. Cada tratamento aparece uma vez em cada linha e uma vez em cada coluna. O número de níveis deve ser igual ao número de linhas e colunas do quadrado. Os blocos são formados em relação a duas variáveis perturbadoras, as quais correspondem 'as colunas e linhas do quadrado.
	Informações	* estimativas e comparações dos efeitos dos tratamentos livres dos efeitos das duas variáveis de bloco; * estimativa e comparações dos efeitos das duas variáveis de bloco; * estimativa da variância do erro.
	Modelo	$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \tau_j + \beta_k + \varepsilon_{ij(k)}$, para i, j e $h = 1, 2, \dots, p$; onde y_{ij} é a observação correspondente a i-ésima linha, a j-ésima coluna, do k-ésimo tratamento, μ é a média geral, α_i é o i-ésimo efeito da linha, τ_j é o j-ésimo efeito do tratamento, β_k é o k-ésimo efeito da coluna e ε_{ij} é o erro aleatório.
Hierárquico ou Aninhado	Tipo de Aplicação	Experimentos com vários fatores onde os níveis de um fator (B) são similares, mas não idênticos para diferentes níveis de outro fator (A). Ou seja, o j-ésimo nível de B quando A está no nível é diferente do j-ésimo nível de B quando A está no nível e assim por diante.
	Estrutura	Os níveis do fator B estão "aninhados" sob os níveis do fator A.
	Informações	* estimativas e comparações dos efeitos dos fatores principais e das interações, exceto a interação do fator aninhado; * estimativa da variância do erro.
	Modelo	$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_{j(i)} + \varepsilon_{(ij)k}$, para $i = 1, 2, \dots, a$; $j = 1, 2, \dots, b$; e $k = 1, 2, \dots, n$;
Superfície de Resposta	Tipo de Aplicação	O objetivo consiste em fornecer mapas empíricos ou gráficos de contorno. Estes mapas ilustram a forma pela qual, os fatores, que podem ser controlados pelo pesquisador, influenciam a variável de resposta.
	Estrutura	Os níveis dos fatores são vistos como pontos no espaço de fatores (muitas vezes multidimensional) no qual a resposta será registrada.
	Informações	Mapas que ilustram a natureza e a forma da superfície.
	Modelo	É um polinômio de primeira ou segunda ordem, conforme a relação entre as variáveis em estudo.

Na condução de um estudo de DOE a primeira etapa é a definição do que se deseja estudar e quais resultados se desejam alcançar. Esta parte é definida nas etapas iniciais do projeto com uma metodologia qualquer, como o DFSS. Após isto o próximo passo é a escolher quais e quantos fatores serão analisados. Os fatores são os parâmetros que podem influenciar o produto/processo como, por exemplo, Dureza, Voltagem, Temperatura, etc. Neste momento também são definidos os níveis em que estes fatores serão experimentados. Níveis são os valores nos quais serão experimentados os fatores escolhidos. Por exemplo, para o fator temperatura, que pode variar entre 20°C e 40°C, pode-se definir que o experimento será conduzido em 5 níveis, ou seja, a temperatura será variada de 5 em 5 graus. Ilzarbeet al(2008) ainda em seu estudo indicam que a maior parte dos experimentos tem em média 5 fatores. Ela comenta também que, uma vez que as aplicações de engenharia são geralmente relacionadas a problemas com muitos fatores que influenciam o resultado, é de estranhar que a quantidade seja tão baixa. Ainda segundo este estudo, uma das razões talvez seja que os engenheiros usam seus conhecimentos prévios dos problemas para selecionar os fatores mais relevantes.

Segundo Ilzarbeet al (2008) esta é uma das características marcantes da metodologia que Taguchi desenvolveu e um dos motivos pelos quais ele também é criticado por especialistas da área estatística. Eles criticam que os experimentos de Taguchi não contemplariam todas as possíveis interações. No entanto, na área de engenharia isto é uma grande vantagem, pois economiza tempo e custos, dois recursos muitos escassos nos tempos atuais.

Estes tipos de escolhas refletem-se diretamente na quantidade dos experimentos que serão conduzidos. Com poucos fatores a serem variados e a escolha de planejamentos que privilegiam a otimização das interações, a quantidade de experimentos no final se reduz. Isto reflete a intenção de tentar se obter os melhores resultados com mínimo uso de recursos, uma vez que a maior parte dos experimentos é conduzida em laboratórios ou fábricas, o que pode gerar a necessidade de recursos significativos. No entanto, com o advento do uso cada vez mais generalizado de ferramentas computacionais confiáveis esta tendência pode ser modificada, uma vez que simulações computacionais permitem um grande número de testes com as mais variadas combinações em pouco tempo e com poucos gastos. Inclusive, métodos que fazem uso intensivo de ferramentas computacionais já começam a ser chamados de Virtual DOE, (SOBEK E JAIN,2007), uma vez que os testes e os planejamentos são efetuados em ambientes

computacionais, restando para serem conduzidos no mundo real poucos experimentos apenas para confirmação do que foi visto no computador e para validações finais dos produtos.

Montgomery (1994) comenta que existem cinco princípios fundamentais no planejamento de experimentos, que seriam:

- Randomização (aleatoriedade);
- Replicação;
- Blocagem;
- Ortogonalidade;
- Planejamento Fatorial.

Randomização é o método que protege o experimento de possíveis “vícios” que causariam distorções nos resultados como, por exemplo, a coleta de dados seguindo uma sequência ou ordem que influencie o resultado. Outro exemplo negativo: coletar peças para análise sempre que uma máquina produtiva iniciou seu funcionamento incute na amostra erros de aquecimento da máquina que influenciam o processo. Sem a randomização pode ocorrer que sejam deixados de fora possíveis fatores que teriam importância para a compreensão do comportamento da amostra.

Replicação é uma forma de melhorar a precisão dos experimentos, uma vez que permite a estimativa dos possíveis erros advindos destes, (BARROS, SCARMÍNIO, BRUNS, 2001). Isto é feito através da condução do mesmo experimento duas ou mais vezes considerando a mesma preparação e condições do experimento inicial. Assim, descobre-se a variabilidade do processo experimental e estima-se o erro do experimento mais precisamente, evitando-se conclusões precipitadas.

A blocagem, assim como a randomização, é usada para melhorar a precisão dos resultados dos experimentos. No entanto, enquanto na randomização evita-se pela aleatoriedade efeitos desconhecidos indesejados adicionem alguma tendência ao experimento, na blocagem já se conhece de antemão quais fatores influenciam ou que possam vir a influenciar o experimento de modo indesejado. Se não é de interesse o estudo deste fator, isola-se o mesmo durante o estudo ou “dilui-se” o efeito do mesmo dentro do experimento, de modo que não venha influenciar os resultados.

Em Callioli, (1983), Ortogonalidade é uma propriedade algébrica de dois vetores u e v cujo produto vetorial se anula, isto é $\langle u, v \rangle = 0$ ou

$$\|u+v\|^2 = \|u\|^2 + \|v\|^2 \iff \langle u, v \rangle = 0 \quad (\text{Equação 2.1})$$

Em um experimento ortogonal os fatores analisados variam independentemente, de modo que se torna mais fácil, através de métodos gráficos e computacionais, descobrir o/os coeficiente(s) que regem a função que descreve o fenômeno. Como exemplo, seja a função linear $y=k \cdot x$, onde x é o fator e y a resposta, sendo k o coeficiente desconhecido. Para descobrir o valor de k que permite a representação adequada do fenômeno primeiro tomam-se os resultados de vários experimentos variando-se o fator, então se tem o vetor resposta Y formado por (y_1, \dots, y_n) e X (x_1, \dots, x_n) . Como os fatores são ortogonais tem-se:

$$\langle kX - Y, X \rangle = 0 \quad (\text{Equação 2.2})$$

$$k \langle X, X \rangle - \langle Y, X \rangle = 0 \rightarrow k = \langle Y, X \rangle / \langle X, X \rangle \quad (\text{Equação 2.3})$$

$$\text{isto é, } k = (x_1 \cdot y_1 + \dots + x_n \cdot y_n) / (x_1^2 + \dots + x_n^2)$$

O experimento fatorial é “um meio pelo qual o efeito de cada fator de um experimento ou sua combinação com outros fatores é estimado”(Telford, 2007). Experimentos fatoriais são planejados de modo que variem todos os fatores simultaneamente.

Ainda segundo Telford (2007), “experimentos fatoriais têm uma precisão maior do que outros tipos de experimentos, pois possuem dentro de si mesmos, replicações internas. Essencialmente os efeitos dos fatores são as diferenças entre as médias de todos os testes realizados nos dois níveis (ou mais) para cada fator. Replicações do mesmo ponto não são necessárias nos planejamentos fatoriais. Isto parece ser uma violação dos princípios do emprego da replicação, mas metade dos pontos é dos níveis altos e a outra metade é dos níveis baixos o que gera um grande número de replicações”. Mais adiante no trabalho haverá uma discussão mais detalhada sobre planejamentos fatoriais.

Após realizar os experimentos variando os fatores entre os níveis estabelecidos tem-se um conjunto de respostas. Estas serão a base para montar uma equação polinomial como a mostrada a equação 2.4, que representará o modelo da função do produto ou processo que se estuda, neste caso um fatorial de 2 níveis e 2 fatores.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \varepsilon \quad (\text{Equação 2.4})$$

Nesta equação, y é a resposta da função sendo estudada e x os fatores de entrada e os β 's são as constantes que aproximam a equação do fenômeno real. A seguir serão mostrados os mais importantes tipos de planejamentos de experimentos.

2.6.1 Planejamentos Fatoriais Completos

Segundo Montgomery, (2003), planejamentos fatoriais são usados normalmente para descobrir o efeito dos fatores isoladamente quando se muda de nível e, principalmente, e esta é a grande vantagem do método, a interação entre diversos fatores a serem analisados. Permite ainda descobrir quais fatores mais influenciam as respostas do problema sob análise.

Normalmente são usados apenas dois níveis (alto-baixo/ maior-menor/ 0-1/ + e -) para a condução dos experimentos com o intuito de reduzir a quantidade de testes. Para este tipo de análise tem-se ($n=L^k$) experimentos, onde L é a quantidade de níveis e k a quantidade de fatores. Geralmente são escolhidos níveis que representem a faixa de variação possível. Por exemplo, se deseja-se estudar a influencia da voltagem em um campo magnético deve-se escolher o maior e o menor valor possíveis para a esta, a fim de que toda a faixa seja verificada quanto às possíveis interações.

Pode-se representar graficamente um experimento fatorial como um cubo, onde cada experimento é representado por um vértice do cubo e os fatores são as direções ortogonais. Então, p fatores correspondem a 2^p vértices do cubo. Para dois níveis, tem-se 2^p experimentos necessários a serem conduzidos. Um fatorial 2^2 seria representado apenas por uma face do cubo e seriam conduzidos 4 experimentos (2 níveis e 2 fatores). Já um fatorial 2^3 seria um cubo completo num total de 8 experimentos (2 níveis e 3 fatores). Na Figura 2.6, pode-se ver a representação geométrica.

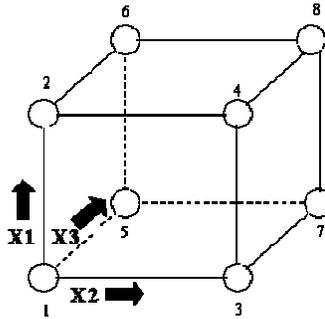


Figura 2.6: Representação geométrica de experimentos fatoriais 2^3 (NIST/SEMATECH,2009)

Assim, um experimento 2^3 teria uma matriz de experimentos como a mostrada a seguir:

Tabela 2.2: Matriz de experimentos 2^3

Experimento #	Fatores			Resposta
	X1	X2	X3	
1	-1	-1	-1	y1
2	1	-1	-1	y2
3	-1	1	-1	y3
4	1	1	-1	y4
5	-1	-1	1	y5
6	1	-1	1	y6
7	-1	1	1	y7
8	1	1	1	y8

Na Tabela 2.2, os números da coluna “Experimento #” representam os vértices do cubo ilustrado pela Figura 2.6. Os valores nas colunas dos fatores “X₁, X₂, X₃” representam os valores máximos (+1) e mínimos (-1) em dois níveis. E y_n são as respostas para cada experimento.

Observando a Figura 2.6, pode-se separar três tipos de interações correspondentes aos eixos coordenados. X₁X₂, X₂X₃ e X₁X₃, que se forem projetados em um plano e ter-se-ia um quadrado equivalente a um fatorial 2^2 , conforme mostrado na Figura 2.7. Neste caso, observa-se a projeção dos vértices 1,2,3,4 sobre os eixos X₁ e X₂. E na Figura 2.8 observa-se o mesmo mas agora para os vértices 1,2,5,6.

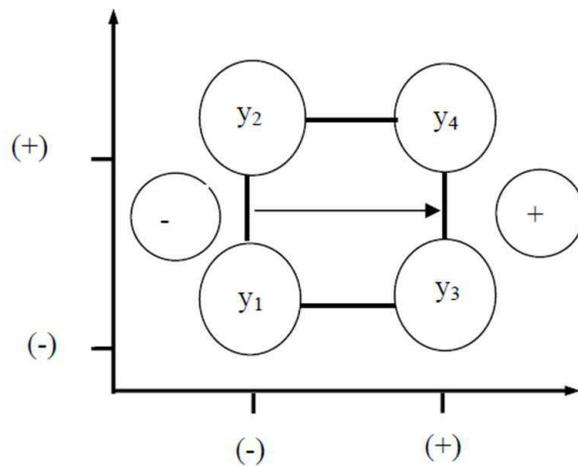


Figura 2.7: Projeção das interações dos experimentos X_1X_2 (adaptado de Silveira,2003)

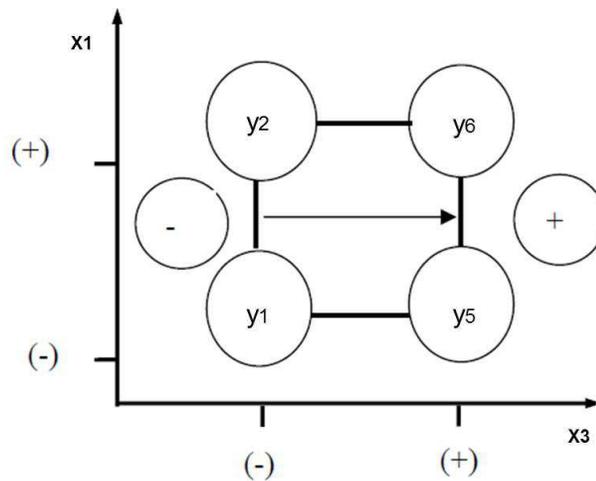


Figura 2.8:Projeção das interações dos experimentos X_1X_3 (adaptado de Silveira,2003)

Os efeitos dos dois níveis em cada um dos fatores da projeção são obtidos através da equação:

$$\mathbf{Efeito} = \frac{(y_{(+)}\text{médio} - y_{(-)}\text{médio})}{2} \quad (\text{Equação 2.5})$$

A partir da obtenção dos efeitos das diversas interações pode-se mostrar graficamente o efeito e verificar qual a combinação que mais afeta a resposta das mesmas. Quando os efeitos são mostrados em curvas (no caso,retas) paralelas,indica que não existe interação entre os dois

fatores, o que é mostrado na Figura 2.9. No caso onde as linhas não são paralelas ou se cruzam há uma interação mais forte entre os fatores quando são variados os níveis, conforme mostrado na Figura 2.10.

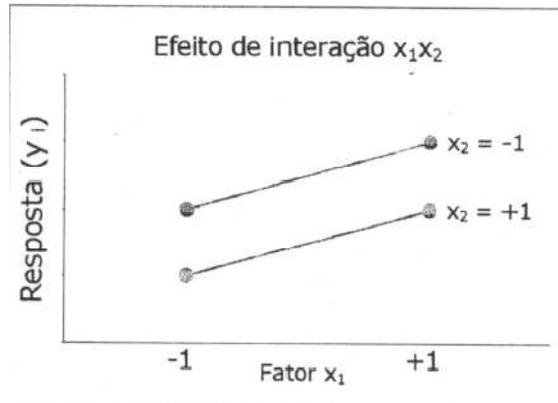


Figura 2.9: Sem interação (Silveira,2003)

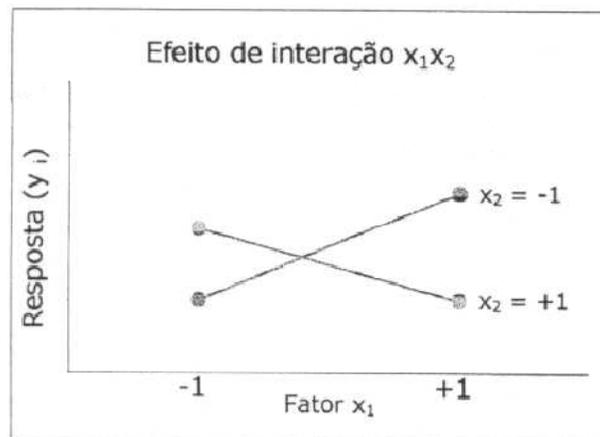


Figura 2.10: Com interação (Silveira,2003)

Os efeitos de um fatorial 2^3 podem ser interpretados graficamente como contrastes, ou seja, faces opostas do cubo representam a variação dos efeitos em relação aos níveis. Tomando a Figura 2.6, com exemplo, o efeito dos pares 1-3 e 2-4 considerando o nível baixo do eixo X_3 nos mostra um contraste, ou seja, os efeitos de quando o fator do eixo X_3 está baixo. Já quando se observa o efeito dos pares 5-7 e 6-8, está-se observando o contraste no mesmo eixo, mas agora quando X_3 está no nível alto.

Entre as faces de um cubo, conforme mostrado na Figura 2.11, cada face oposta representa níveis mínimos (-) e máximos (+). Os 8 ensaios da matriz de experimentos são os vértices do

cubo, já os efeitos principais e as interações entre os fatores são contrastes entre dois planos. Dessa forma, para o fator X_2 os ensaios 1, 2, 5 e 6 adota-se o sinal negativo e o restante como positivos. A face que contém os níveis negativos se encontra perpendicular ao eixo X_2 , no valor mínimo de X_2 , e a que contém os positivos é oposta a esta. O efeito principal é o contraste entre estas duas faces. Analogamente para os demais efeitos principais.

As interações entre dois fatores são representadas por dois planos diagonais, perpendiculares a um terceiro plano definido pelos eixos dos dois fatores envolvidos na interação, a isto se chama de interações de segunda ordem Figura 2.12. A interação de todos os três fatores simultaneamente é chamada de interação de terceira ordem Figura 2.13.

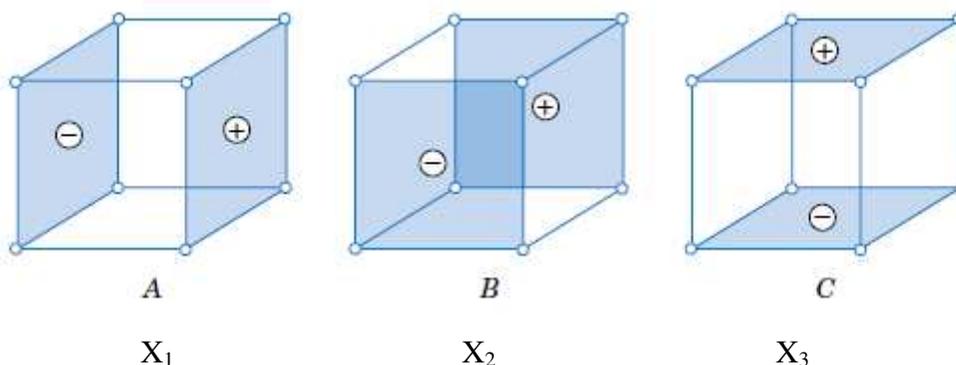


Figura 2.11: Efeitos principais (Montgomery,2003)

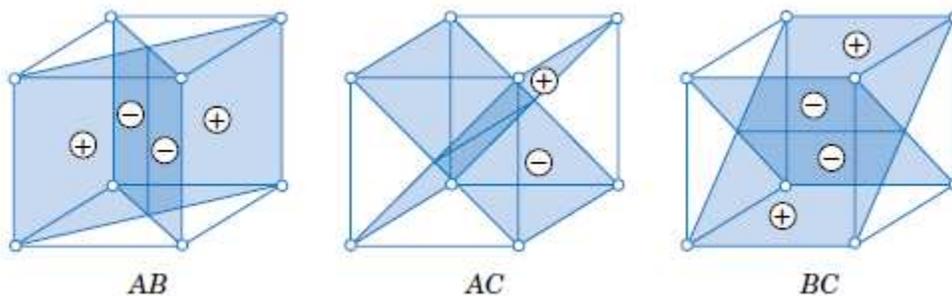


Figura 2.12: Interações de segunda ordem (Montgomery, 2003)

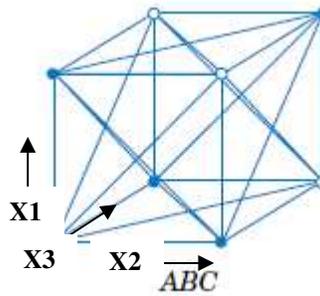


Figura 2.13: Interações de terceira ordem (Montgomery, 2003)

Isto quer dizer que, para o exemplo dado, haverá 3 efeitos principais, 3 interações entre dois fatores e uma interação entre os três fatores. Isto irá gerar uma equação do tipo a seguir, onde β_n é o coeficiente para cada efeito.

$$y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3 + \beta_{123}x_1x_2x_3 + \varepsilon \quad (\text{Equação 2.6})$$

A quantidade de replicações depende da precisão que se deseja obter dos resultados. Quanto maior o número de replicações mais precisa será a estimativa do erro experimental. No entanto, por praticidade e economia de recursos, restringe-se a no máximo duas replicações, com as quais normalmente se obtém uma estimativa de precisão adequada, a não ser que haja dúvidas ou discrepâncias nos resultados.

2.6.2 Planejamentos Fatoriais Fracionados

Quando existe um número muito grande de fatores em um experimento aumenta consideravelmente a quantidade de corridas a serem efetuadas e por consequência o número de interações da ordem alta, (MONTGOMERY, 2003). Se a pessoa que conduz os experimentos considerar que tais interações não são úteis para os mesmos, então, irá focar sua atenção nos efeitos principais e as interações de baixa ordem fazendo assim apenas uma parte do experimento total. A esta variação do experimento fatorial chamado de fatorial fracionado. De acordo com a “*Association for Statistical Quality Control*” - ASQC (1983), um planejamento fatorial fracionado é “aquele onde apenas uma parcela adequadamente escolhida entre todas as combinações de um Fatorial Completo é utilizada no experimento”.

Este planejamento coleta dados de sub-arranjos dos possíveis vértices e requer uma quantidade de experimentos de $2^{(p-q)}$ onde 2^{-q} é a quantidade fracionada. Montgomery (2003) mostra um exemplo onde em um fatorial completo seriam necessários 8 experimentos e um meio fatorial requer 4 experimentos, graficamente um tetraedro inscrito no cubo.

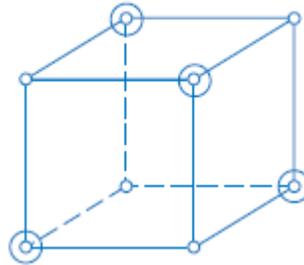


Figura 2.14: Representação geométrica de um experimento fatorial fracionado (Montgomery, 2003)

Como nos planejamentos completos tem-se uma relação exponencial n^k , um aumento do número de fatores (ou mesmo de níveis) faz com que a quantidade de experimentos cresça vertiginosamente, $2^3=8$, $2^4=16$, $2^5=32$...

No entanto, como acontece na expansão em séries de funções, os efeitos principais tendem a ser maiores que as interações de dois fatores, que por sua vez tendem a ser maiores que as interações de três fatores e assim por diante. Quanto mais alta a ordem, ou seja, a quantidade de fatores interagindo, mais esta tendência se acentua, (BARROS, SCARMÍNIO, BRUNS, 2001). Por isso, com efeitos de alta ordem pouco significativos, estes podem ser retirados com pouco prejuízo para a análise dos resultados do experimento.

Neste caso, o Fatorial Fracionado permite avaliar uma quantidade grande de fatores sem a necessidade de variar a quantidade equivalente de experimentos, como no planejamento fatorial completo. Esta técnica consiste em fracionar os experimentos de modo a ensaiar apenas os que mais contribuem para os efeitos principais e também as interações entre os fatores mais importantes. Isto é muito vantajoso, principalmente quando se trata de experimentos de longa duração e com custos muito altos. Em geral, usa-se uma fração da quantidade de ensaios definidos pelo fatorial completo ($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, ...).

Existem três idéias fundamentais que definem os experimentos fatoriais, (MONTGOMERY, 2003):

- Efeitos principais: O sistema é guiado por apenas alguns efeitos principais e interações de baixa ordem quando na presença de muitas variáveis.
- Propriedades projetivas: Planejamentos fatoriais fracionados podem ser projetados de modo que os efeitos maiores sejam justamente dos fatores mais significantes.
- Experimentos sequenciais: Em planejamentos grandes para se estimar os fatores e interações de interesse, pode-se combinar as corridas de dois ou mais fatoriais fracionados para montar uma sequencialidade.

O pesquisador deve valer-se de seu conhecimento para inferir quais fatores e quais interações podem ter maior influência na resposta para que os mesmos sejam escolhidos. É claro que paga-se o preço por usar menos recursos. Sempre haverá alguma diferença em relação a um fatorial completo, por não se estar usando um dos fatores, mesmo sendo o de menor influência. No entanto, como foi usada a mesma quantidade de níveis altos e baixos os efeitos calculados estão bem equilibrados.

Outro cuidado que se deve ter é quando o pesquisador se depara com experimentos sobre os quais pouco ou nenhum conhecimento tem, em especial a respeito do sistema que está estudando. Neste caso, omitir certas interações mesmo de alta ordem pode por em risco o pleno entendimento do sistema se é este o objetivo do experimento. Neste caso talvez seja melhor optar por uma melhor definição dos fatores que se pretendem usar e verificar se realmente são importantes para a compreensão do sistema.

2.6.3 Planejamentos Plackett-Burman (Saturado)

Em 1946, dois pesquisadores, Plackett e Burman, propuseram um novo tipo de planejamento para estimar todos os $k = n - 1$ efeitos principais, onde n é a quantidade de ensaios conduzidos, com uma variância mínima. Assim como outros planejamentos fatoriais a proposta utiliza colunas ortogonais. Ou seja, sendo $n/2$ os sinais positivos de qualquer coluna têm como correspondentes a estes nas outras colunas $n/4$ sinais positivos e $n/4$ sinais negativos. Esta ortogonalidade permite um planejamento econômico, pois detecta os efeitos principais e de cada fator, assumindo que os efeitos de todas as interações são desprezíveis. O planejamento de Plackett-Burman é muito eficiente quando se deseja discernir apenas os efeitos principais.

Este planejamento considera que os efeitos principais são fortemente confundidos com interações de dois fatores. Assim sendo, a quantidade de ensaios são múltiplos de 4. Segundo

Silveira (2003), este planejamento pode estudar até $n-1$ fatores. Também segundo Silveira (2003), a literatura recomenda que o número de fatores estudados seja menor, de modo que as colunas não utilizadas possam ser empregadas na estimativa do erro associado ao contraste.

2.6.4 Modelagem e Análise

Uma vez que planejamento dos experimentos tenha sido desenvolvido é necessário executar os experimentos. Neste momento, se utilizam os modelos traduzidos como expressões matemáticas que irão representar o fenômeno que se deseja estudar ou analisar. É necessário que o pesquisador tenha muito cuidado no momento de conduzir o experimento não apenas fazendo os registros da maneira mais criteriosa possível. Deve anotar os parâmetros e resultados, mas também, se atentando para os possíveis fatores incontroláveis, tais como condições ambientais para que as mesmas não venham a afetar de modo significativo o experimento.

Os modelos podem ter várias finalidades entre elas, segundo NIST/SEMATECH, (2009):

- **Estimação:** Obter um valor médio para uma variável de resposta baseada em uma função de regressão, considerando uma determinada faixa de valores dos fatores de entrada.
- **Predição:** Predizer um valor futuro da variável de resposta. Esta predição pode considerar todas as possíveis combinações dos fatores de entrada até mesmo os que não foram medidos. Quando o objetivo é predizer os valores de uma variável de resposta fora da faixa correspondente aos valores dos fatores usados na construção do modelo está-se fazendo uma extrapolação, o que deve ser feito com muito cuidado, porque fora dessa faixa as conclusões podem não ser válidas.
- **Otimização:** Buscar os melhores parâmetros para que a função de um produto atinja o máximo desempenho possível. Usa-se o modelo na busca das faixas de ótimo desempenho.

Os modelos servem para montar uma representação dos fenômenos observados durante os experimentos, ao que se chama de modelagem. Existem dois tipos de modelos, os mecânicos, que tem sua origem em deduções teóricas dos fenômenos, e os empíricos, baseados nos resultados de experimentos,(MONTGOMERY, 2003). Quando possível, deve-se usar modelos mecânicos, porque seu emprego requer menos recursos que os empíricos. No entanto, quando

os fenômenos são por demais específicos e complexos é muito trabalhoso o estudo teórico dos mesmos, sendo recomendado utilizar modelos baseados nos experimentos.

Obviamente, seria mais fácil se a lei física do fenômeno que se está estudando ou uma função matemática que o representasse fosse conhecida. No entanto, isto não é comum. Mesmo quando se conhece o comportamento de um fenômeno, tal conhecimento pode ser limitado a uma determinada faixa de atuação. Por exemplo, a função da força na mecânica Newtoniana ($F = \text{massa} \times \text{aceleração}$) é conhecida. No entanto, fora dos limites onde a mesma se aplica, como por exemplo, em velocidades próximas as da luz, o modelo perde a validade.

Como outro exemplo, seja um sistema de embreagem eletromagnética. Deseja-se descobrir como a mesma se comporta para que se obtenha a máxima força de acoplamento. Neste processo, estão envolvidas diversas leis de física, como a força da mola da embreagem, a força do campo eletromagnético, o atrito entre as duas superfícies, etc. Uma lei que descrevesse todo este fenômeno demandaria muito tempo e recurso. Isso requer um modelo empírico.

Uma forma de escolher uma função matemática para representar um modelo seria a partir dos dados dos experimentos, (MONTGOMERY, 2003). A partir de um gráfico com os mesmos seria possível analisar a forma com que as respostas se apresentam. É importante que se inicie o processo escolhendo a função mais simples possível, uma função de ordem baixa. Modelos complexos são bons se os dados requerem este aprimoramento. No entanto, o seu uso pode significar que “ruídos” randômicos serão modelados como uma estrutura determinística. Isto poderá gerar incertezas nos resultados obtidos. O ideal para se determinar qual ordem deve ser usada em um modelo é ir aumentando até que o teste t ou F tenha um resultado que valide o modelo.

Na Figura 2.15, como exemplo, observa-se que a distribuição dos pontos sugere um comportamento linear.

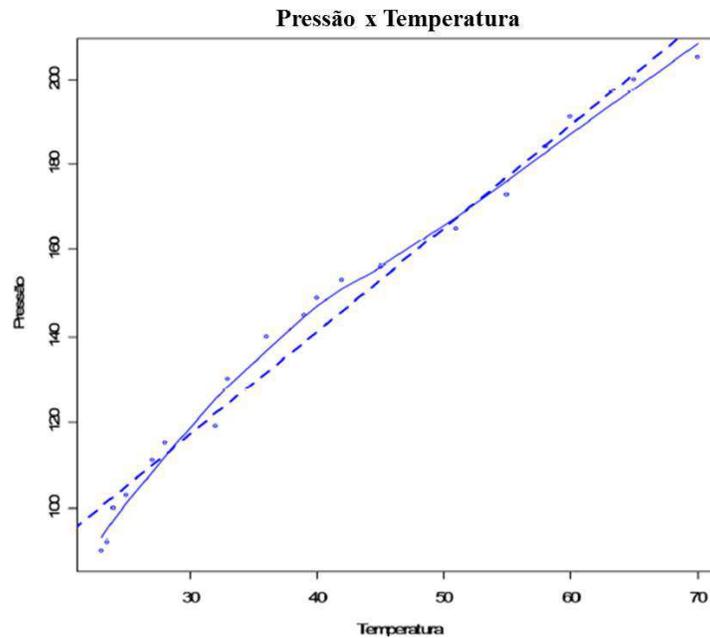


Figura 2.15: Representação gráfica de uma distribuição de dados ajustado por uma reta

Basicamente um modelo é uma descrição básica de uma função resposta qualquer Y que tem como parte de sua estrutura uma ou mais entradas ou fatores (x). Tem-se então, de modo genérico:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (\text{Equação 2.7})$$

Onde, para a função linear $y = f(x) + \beta$, y é a variável de resposta, x é a variável de entrada ou fatores, β os parâmetros estimados durante a modelagem e ε é a estimativa do erro do modelo face às observações experimentais feitas, (MONTGOMERY, 2003). A função do modelo, sendo uma descrição determinística baseada em uma série de experimentos conduzidos previamente, pode assumir diversas formas, dependendo de quantos fatores estão envolvidos e da complexidade ou acuracidade que se deseja do modelo. Assim, para modelos mais simples pode-se ter uma função de primeira ordem, quadrática, polinomial, senoidal etc.

É importante ressaltar, NIST/SEMATECH, (2009), que alguns modelos que do ponto de vista estatístico são lineares, não precisam ser com respeito a variáveis independentes, e modelos não lineares podem ser lineares quando usados em relação a variáveis independentes, mas não com respeito aos parâmetros. Por exemplo,

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (\text{Equação 2.8})$$

é linear em x, mas não pode ser considerado como um modelo linear devido ao produto dos dois parâmetros. Para ser linear uma função deve obedecer 3 princípios:

1. Cada variável (x) da função é multiplicada por um parâmetro desconhecido;
2. Há no máximo, um parâmetro desconhecido não atrelado a uma variável;
3. Todos os termos são somados para produzir o valor final da função.

Assim qualquer função que não atenda a estes critérios não pode ser considerada “linear”.

2.6.5 Regressão Linear

Existem inúmeras técnicas estatísticas que podem ser usadas na criação de um modelo. Lin (1998), em seu artigo sobre DOE sugere, por exemplo, o uso do algoritmo de Yates. No entanto, o mais usado é o ajuste pelos mínimos quadrados ou análise de regressão, (MONTGOMERY, 2003), que serve para ajustar os dados obtidos a uma equação qualquer que reduza a diferença entre os valores reais e os calculados pela equação proposta. Basicamente, uma vez plotados os dados de um experimento procura-se traçar uma curva que passe o mais perto possível de todos os pontos. Isto se obtém matematicamente, buscando coeficientes que tornem a soma dos quadrados dos resíduos mínima.

A análise de regressão normalmente é conhecida pela relação linear. No entanto, para funções onde uma relação linear não se ajusta, utiliza-se um modelo polinomial que é uma expansão da série de Taylor. Segundo Silveira (2003), os modelos polinomiais foram adotados devido à dificuldade de manipulação através de álgebra linear e métodos de otimização. Mesmo com o avanço dos métodos computacionais os modelos polinomiais ainda são muito populares e fornecem resultados muito satisfatórios.

Nos modelos lineares de uma função $f(y, x)$ o modelo da função do experimento pode ser dado genericamente por

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (\text{Equação 2.9})$$

Onde y é a resposta do modelo para o experimento, β 's são os coeficientes que devem ser descobertos e ε é a estimativa do erro do modelo, que é a diferença entre as resposta estimada e

os valores reais observados e também é chamado de resíduo. A demonstração gráfica pode ser vista na Figura 2.16.

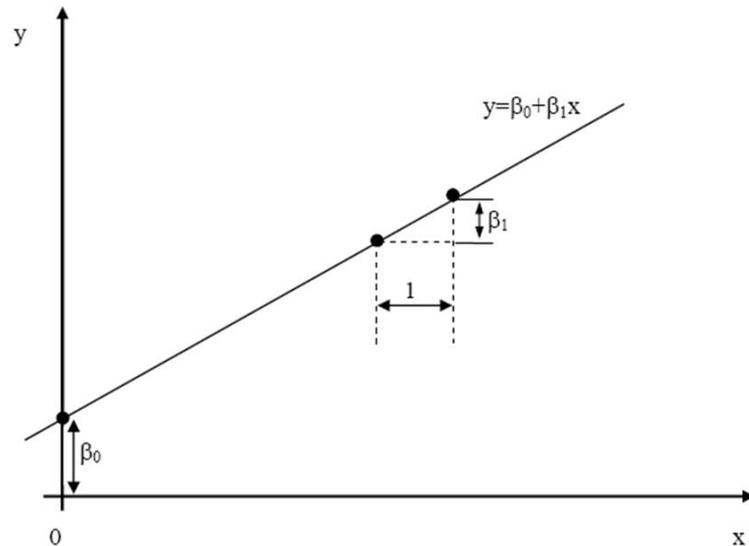


Figura 2.16: Representação gráfica de Regressão linear (Silveira,2003)

Considerando o modelo dado, os parâmetros desconhecidos podem ser calculados através do seguinte procedimento:

1. Calcula-se Q conforme a relação a seguir,

$$Q = \sum_{i=1}^n [y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i)]^2 \quad (\text{Equação 2.10})$$

2. Deriva-se parcialmente Q em relação a $\hat{\beta}_0$ e $\hat{\beta}_1$
3. Ajusta-se cada derivada parcial a zero e;
4. Resolve-se o sistema de duas equações e duas incógnitas. Assim, tem-se:

$$= \sum_{i=1}^n (x_i - x_{med}) / (y_i - y_{med}) / \sum_{i=1}^n (x_i - x_{med})^2 \quad (\text{Equação 2.11})$$

e

$$\hat{\beta}_0 = y_{med} - \hat{\beta}_1 x_{med} \quad (\text{Equação 2.12})$$

Uma vez encontrados os coeficientes, antes de usá-los, é necessário verificar se o modelo se ajusta e se as suposições básicas são satisfeitas. Para se verificar a qualidade do ajuste utiliza-

se o coeficiente de determinação R^2 , que fornece percentualmente o quanto a variável y (resposta), dada pelo modelo, varia em relação à x . Em modelos de regressão linear simples, como o mostrado anteriormente, R^2 pode ser obtido da relação $R^2=r^2$, onde r é o coeficiente de correlação de Pearson. R^2 pode variar entre 0 e 1 (0 a 100%), sendo que quanto mais próximo de 1 (100%) mais bem justado está o modelo.

2.6.6 Análise de Variância (ANOVA)

Quando se procede a uma análise estatística de projetos de experimentos fatoriais, esta análise é feita através da ANOVA. O objetivo da ANOVA é testar o efeito dos diversos fatores uns sobre os outros e também suas interações e se são significativos o suficiente para influenciar a resposta. Ela é a mais importante técnica que envolve a comparação de múltiplas médias, considerando que os resíduos tenham um comportamento de normalidade, isto é, o erro relativo entre a resposta ajustada e a experimental deve ser pequeno e o comportamento deve ser aleatório, sem nenhuma tendência.

Seja um experimento dado pelo modelo, UFPR (2007):

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij} \quad i=1,\dots,I \text{ e } j=1,\dots,J \quad (\text{Equação 2.13})$$

Onde

Y_{ij} é a observação do i -ésimo fator na j -ésima unidade experimental;

μ é o efeito constante (média geral);

τ_i é o efeito do i -ésimo fator;

ϵ_{ij} é o erro aleatório associado ao i -ésimo fator na j -ésima unidade experimental.

Cada observação Y_{ij} pode ser decomposta como mostrado na(Equação 2.13)

A análise de variância, UFPR (2007), baseia-se na decomposição da variação total da variável resposta em partes que são atribuídas aos fatores (variância entre) e ao erro experimental (variância dentro). A variação nos dados pode ser medida pelas seguintes somas quadráticas para cada um de seus componentes:

$$SQ_{\text{total}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (y_{ij} - y_{\text{med}})^2 \quad (\text{Equação 2.14})$$

$$SQ_{\text{fatores}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\hat{y}_{ij} - y_{\text{med}})^2 \quad (\text{também chamada variação Entre}) \quad (\text{Equação 2.15})$$

SQ_{fatores}

(também chamada variação Dentro)

Sendo:

$i = \text{número de parâmetros do modelo} \quad i = 1, 2, \dots, I$

$j = \text{número de replicações do modelo} \quad j = 1, 2, \dots, J$

A relação entre as somas quadráticas (S.Q.) é dada pela expressão a seguir, de onde se calcula a soma quadrática dos resíduos.

$$[SQ_{\text{total}}] = [SQ_{\text{fatores}}] + [SQ_{\text{resíduos}}] \quad \text{ou} \quad SQ_t = SQ_f + SQ_r \Rightarrow SQ_r = SQ_t - SQ_f \quad (\text{Equação 2.16})$$

Estas somas quadráticas podem ser organizadas em uma tabela chamada de tabela de análise de variâncias, como a **Tabela 2.3**:

Tabela 2.3: Tabela de análise de variâncias

Causas de variação	Graus de liberdade	Soma Quadrática	Média Quadrática	Teste F
Fatores	$I-1$	SQ_{fatores}	MQ_{fatores}	$MQ_{\text{fatores}}/MQ_{\text{resíduos}}$
Resíduos	$i(J-1)$	$SQ_{\text{resíduos}}$	$MQ_{\text{resíduos}}$	
Total	$IJ-1$	SQ_{total}		

Onde $MQ_{\text{fatores}} = SQ_{\text{fatores}} / (I-1)$ e $MQ_{\text{resíduos}} = SQ_{\text{resíduos}} / (I(J-1))$ (Equação 2.17)

O teste F é usado para verificar a validade ou não da hipótese nula H_0 . Desde que, os erros do modelo possuam um comportamento normal, UFPR (2007).

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ (as médias entre as populações são iguais – hipótese nula)

$H_1: \mu_1 < \mu_2$ (as médias entre as populações são diferentes – hipótese alternativa)

$\mu_1 > \mu_2$

$\mu_1 \neq \mu_2$

Uma vez que F seja determinado, compara-se o valor de $F_{\text{calculado}}$ conforme a Tabela 2.3 com um valor F_{tabelado} para um nível de significância (α), que pode ser de 90%, 95% ou 99% (os mais usados). O F_{tabelado} depende também dos graus de liberdades dos resíduos e dos fatores. Com estes dados entra-se na tabela com a significância escolhida e encontra-se F_{tabelado} . Se $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ há a rejeição da hipótese nula H_0 , ou seja, existem evidências de que há

diferenças entre as médias dos fatores no nível de significância escolhido. No entanto se $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ as duas populações são diferentes.

Outra maneira de se avaliar a significância da estatística F é utilizando o p-valor, UFPR (2007). Se o $p\text{-valor} < \alpha$, rejeita-se a hipótese nula H_0 , ou seja, há evidências de diferenças significativas entre as médias. Caso contrário, aceita-se a hipótese nula H_0 , dentro do nível de significância α escolhido.

2.7 Métodos dedutivos de análise de falhas

Este tópico tem como objetivo principal, discorrer a respeito do método de Análise da Árvore de Falhas, já que neste trabalho buscou-se uma metodologia que partindo de um efeito conhecido (falha) chegasse às possíveis causas. É de interesse comentar também sobre outro método dedutivo de grande aplicação no meio industrial, o Diagrama de Ishikawa, e justificar porque o mesmo não foi utilizado neste trabalho.

2.7.1 Diagrama de Ishikawa

O diagrama de Ishikawa é também conhecido como “Espinha de Peixe” por sua apresentação gráfica. Mostra de forma simples e de maneira gráfica a relação entre a causa e efeito (falha) de um problema que se está analisando. Normalmente, o diagrama de Ishikawa lança mão do artifício de subdividir as possíveis causas em famílias que quase sempre são máquina, mão-de-obra, meios de medição, meio-ambiente, método e matéria prima, conforme a Figura 2.17. Não é necessariamente restrito a esta estrutura, podendo ser adaptado à necessidade e realidade de cada empresa ou aplicação.

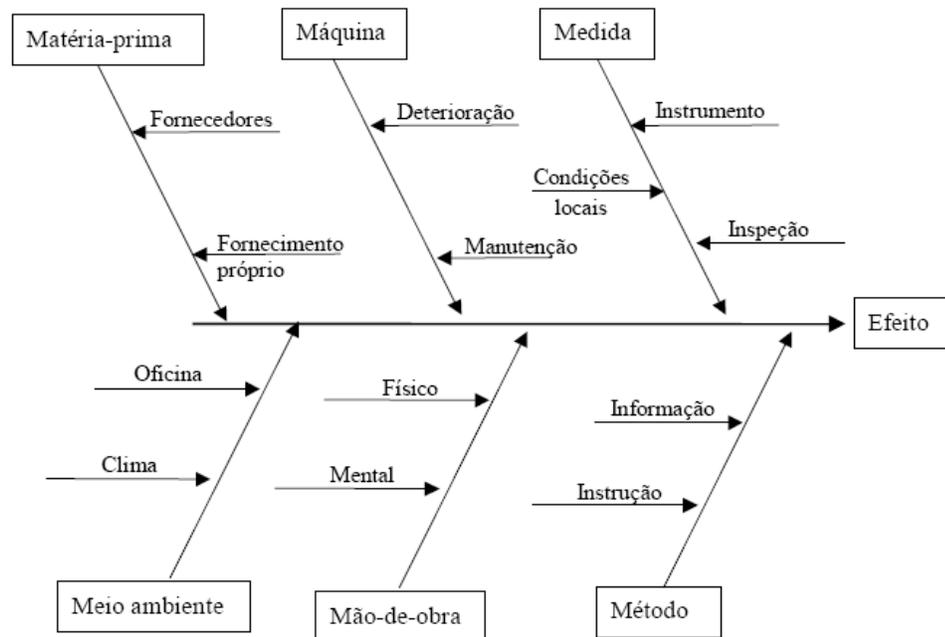


Figura2.17: Típico Diagrama de Ishikawa (Sakurada, 2001)

Segundo (SAKURADA, 2001), para a construção do diagrama de Ishikawa deve-se passar pelos seguintes passos.

1. Definir um efeito (falha);
2. Definir o maior número possível de causas que poderiam gerar o efeito ou falha. Neste ponto se utiliza de técnicas de *Brainstorming* para o levantamento das mesmas;
3. Definir as relações, ou seja, a que família pertence cada causa estipulada, alocando a mesma na posição;
4. Definir a razão para cada causa e assinalar particularmente as mais relevantes que possam afetar o efeito;
5. Registrar quaisquer informações que se julguem necessárias.

No entanto, o diagrama de Ishikawa não define em sua estrutura possíveis inter-relações entre os diversos tipos de falha. Por isso não é necessário que se tenha conhecimento aprofundado do sistema. As informações obtidas com este não auxiliam na organização e hierarquização das possíveis causas que levaram a falha.

“O diagrama de Ishikawa organiza (agrupa) as causas que conduzem a um efeito e o Método da Árvore de Falhas relaciona as causas, através de portas lógicas, que conduzem a um

determinado efeito” (SAKURADA, 2001). Por isso, quando se deseja investigar as causas de um determinado efeito a Análise da Árvore de Falhas se mostra como um método mais adequado na apresentação de informações.

2.7.2 Análise da Árvore de Falha

O FTA é uma ferramenta que trata das causas e efeitos de falhas e que exige um maior conhecimento do sistema que se está analisando. O FTA não é um modelo de todas as possíveis falhas de um sistema ou componente, mas um estudo das principais contribuições que levam a falha que será aqui descrita como evento maior, de um sistema ou componente em particular. Ele apresenta as falhas e os eventos que levaram a mesma, assim como suas inter-relações de forma gráfica, como pode ser visto na Figura 2.18.

Junto com o FMEA, o FTA é uma das ferramentas clássicas de análise de falhas na indústria, principalmente a automobilística e aeroespacial. O FMEA é caracterizado por ser uma ferramenta indutiva, com a qual a partir de possíveis falhas do componente ou sistema se infere as possíveis consequências para o funcionamento do mesmo. É uma análise do tipo Bottom-Up. O FTA é um diagrama da árvore em que se podem colocar os índices de falha, quando conhecidos, para hierarquizar a mesma. Além disso, é uma ferramenta dedutiva, com a qual a partir de uma consequência ou falha se busca a ou as possíveis causas. É uma análise do tipo Top-Down.

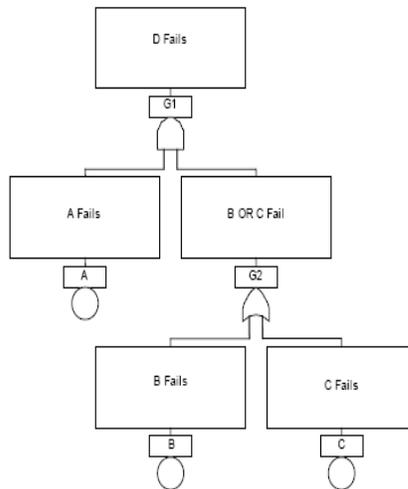


Figura 2.18: Diagrama de FTA (NASA, 2002)

O FTA por sua riqueza de informações e sua forma lógica de decompor problemas, é usado como ferramenta de tomada de decisão das mais diversas formas. A seguir alguns exemplos de como o FTA é usado, segundo o NASA Handbook (2002):

1. Entender a lógica que influencia o evento maior: o FTA dá uma visão lógica das causas básicas e intermediárias que conduzem ao evento maior, que é a falha do sistema ou componente.
2. Priorizar os principais contribuintes que conduzem ao evento maior. Este é um dos principais tipos de informação que o FTA fornece. Se a Árvore de Falhas é quantificada, as falhas e eventos básicos podem ser priorizados de acordo com sua importância. Esta priorização fornece as principais bases para se planejar recursos que serão usados na solução da falha.
3. Ser usada como ferramenta proativa na prevenção de eventos maiores. O FTA pode ser usado para se identificar pontos fracos no sistema ou componente e assim tentar corrigi-los antes que a falha aconteça.
4. Monitorar o desempenho de um sistema: é um uso proativo específico do FTA. Monitorando o desempenho relativo ao evento maior e usando uma sistemática de atualização de dados, a Árvore Falhas pode ser reavaliada e ações podem ser tomadas antes que haja efetivamente risco de falha.
5. Minimizar e aperfeiçoar recursos. Através de várias medidas, o FTA identifica não só o que é importante, mas também o que não é. Para aqueles fatores que não contribuem significativamente para o evento maior (baseado nas probabilidades levantadas quando da existência de dados) os recursos são minimizados e podem ser deslocados para outros mais importantes.
6. Auxiliar o projeto do sistema. Quando se está desenvolvendo um sistema, o FTA pode ser usado para definir os requisitos de projeto baseados no desempenho deste. Assim, o FTA é usado para definir alternativas de projeto que satisfarão os requisitos de desempenho. Mesmo sem dados disponíveis do sistema que se está estudando pode-se usar dados genéricos ou de sistemas similares para se ter uma base adequada na estimativa de desempenho. Este tipo de aplicação é muitas vezes desconsiderado quando da aplicação do FTA.
7. Identificar e corrigir o evento maior. Esta aplicação difere das aplicações quanto ao uso proativo e preventivo descritos anteriormente. O uso como ferramenta de diagnóstico do FTA pode ser feito quando um evento maior ou intermediário já ocorreu e não são claras as causas do mesmo. Assim, pode-se usar de modo eficiente o FTA para priorizar as principais contribuições.

Neste caso, a cadeia de eventos que leva ao evento maior fornece informações valiosas sobre o que falhou e em que áreas atuar para reduzir as possibilidades de falha. Quando medidas corretivas alternativas são identificadas, o FTA pode ser usado para avaliar objetivamente seus impactos na recorrência do evento maior. O FTA também pode ajudar na análise de contingência para identificar as ações mais efetivas a serem tomadas para se reduzir o impacto de uma falha. Os componentes são ajustados na condição de falha na árvore de falhas e ações são identificadas para minimizar os impactos das falhas. Esta aplicação de análise de contingências é normalmente usada para verificar como reconfigurar o sistema para minimizar o impacto dos componentes que falham.

2.7.3 Abordagens para a modelagem lógica de um sistema

A primeira abordagem a ser considerada é a Falha x Sucesso. Durante a operação de um sistema pode haver vários graus de sucesso ou de falha para a mesma aplicação, que podem ir da falha total do sistema, passando por falhas aceitáveis e evoluindo até sucesso mínimo aceitável para o sistema e chegando até ao sucesso completo do sistema. Assim, é definido o conceito de espaço Falha/Sucesso com mostrado na Figura 2.19.



Figura 2.19: Conceito espaço Falha/Sucesso (adaptado de NASA, 2002)

Como pode ser vista na Figura 2.19, várias posições do espaço de sucesso do sistema coincidem com pontos do espaço de falha. Por exemplo, o ponto “máximo sucesso antecipado” pode ser considerado como “mínima falha antecipada”. Apesar da tendência em se optar por

escolher desenvolver uma visão otimista (espaço sucesso) no lugar de uma pessimista (espaço falha), considerando a operação do sistema esta não é uma perspectiva vantajosa.

Segundo NASA Handbook(2002), do ponto de vista analítico é mais fácil chegar a um consenso do que é uma falha do que é efetivamente um sucesso. Por exemplo, tomando o projeto de um avião, na fase de concepção pode-se definir que o mesmo deverá carregar o máximo de carga, voando alto e rápido sem reabastecimento, mas durante o desenvolvimento do projeto se alguma destas características for comprometida o projeto ainda pode ser um sucesso mesmo assim. No entanto, se o avião cair, o projeto terá sido um fracasso.

O sucesso costuma ser associado a quanto um sistema é eficiente e isto, muitas vezes, é difícil de medir, pois a características dos sucessos são definidas como variáveis contínuas e não como eventos discretos. Já um evento de falha, principalmente falha completa, é geralmente fácil de definir. Por isso é mais vantajosa a análise com o uso do espaço falha.

Outros pontos a favor do uso da abordagem do espaço falha é que apesar de haver infinitas maneiras de um sistema falhar ou ter sucesso, na prática há mais maneiras de se ter sucesso em um sistema, uma vez que o desenvolvimento deste é sempre orientado para o sucesso. Finalmente, quantificar as falhas de um sistema é matematicamente mais fácil, pois as probabilidades de falhas são pequenas.

2.7.4 Métodos Dedutivos e Indutivos

Segundo o NASA Handbook (2002), os métodos dedutivos partem de um cenário mais genérico e buscam chegar a um fim específico. Em uma análise dedutiva de um sistema, supõe-se que sistema falhou de uma determinada maneira e procura-se descobrir quais comportamentos do sistema ou componente contribuíram para a falha. Um exemplo no cotidiano é o trabalho investigativo da polícia, onde a falha, crime, ocorreu e se levantam hipóteses e buscam-se evidências que suportem tais hipóteses. O método dedutivo tem um papel importante na investigação de eventos que já ocorreram para se determinar suas causas e buscar a prevenção das mesmas no futuro. É descrito como uma técnica “top-down” de cima para baixo, pois parte de um evento maior (falha) e vai se decompondo de maneira lógica e sistemática. O FTA é um exemplo deste processo, como já dito.

Já no método indutivo ocorre o oposto, parte-se de casos individuais e procura-se a generalização dos mesmos. Na área de análise de falhas parte-se de uma falha, ou estado de falha,

de um componente/sistema e busca-se por indução quais as conseqüências da mesma para o sistema e seus usuários. Análises indutivas são também conhecidas como “botton-up” ou de baixo para cima, pois se inicia nos elementos iniciadores e eventos básicos que levam a falha. O método indutivo desempenha um papel importante na análise de risco e confiabilidade na previsão de eventos em cenários futuros. O FMEA é um exemplo deste uso, como também já foi dito.

Enquanto métodos dedutivos são aplicados para se determinar “como” um componente o sistema veio a falhar, métodos indutivos são usados para se responder “o que acontece” quando determinada falha ocorre. É nessa característica que residem as principais diferenças entre o FTA e os métodos indutivos. O FTA inicia no evento indesejado (falha) e retrocede o necessário até as causas do mesmo. A árvore de falha termina com os eventos básicos e as falhas primárias são identificadas como causas primárias. Já a abordagem indutiva se inicia com as falhas primárias e avança até as conseqüências.

2.7.5 Construção de uma Árvore de Análise de Falhas

A análise de uma falha através do uso da técnica FTA pode ser conduzida seguindo determinados passos. Segundo o NASA Handbook (2002), os seguintes passos devem ser seguidos para construir uma árvore de falhas:

1. Identificar o objetivo do FTA;
2. Definir o evento maior da Árvore de Falhas;
3. Definir o escopo do FTA;
4. Definir a resolução do FTA;
5. Definir as regras gerais do FTA;
6. Construir o FTA;
7. Avaliar o FTA;
8. Interpretar e apresentar os resultados

Segundo a mesma fonte, estes passos são efetuados seqüencialmente, mas os passos 3-5, por serem retro alimentados pelos passos subseqüentes, podem ser efetuados de modo simultâneo entre si, como mostrado na Figura 2.20. As etapas mostradas na figura são:

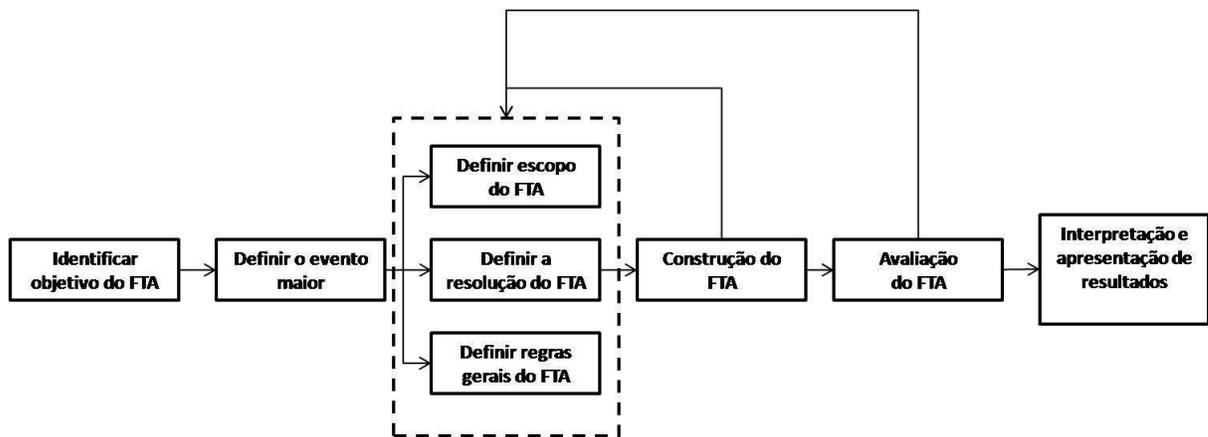


Figura 2.20: Passos para construção do FTA (adaptado de NASA, 2002)

1. Identificação do objetivo do FTA: Apesar de este passo parecer óbvio, não raras vezes o objetivo é definido sem que haja uma conexão com a falha que deve ser analisada.
2. Definição do evento maior da Árvore de Falhas: Uma vez que se definiu o objetivo do FTA, o evento maior que ocasionou a falha é uma decorrência direta dele. O evento maior define o modo de falha do sistema ou componente que será estudado, por exemplo, “quebra da suspensão”. Uma orientação para esta definição seria:
 - Para definir um evento maior, defina um critério de ocorrência do mesmo. Para a falha de um sistema, primeiro defina o critério de sucesso do mesmo.
 - Assegure-se que o evento maior é consistente com o problema sendo analisado e os objetivos definidos previamente.
 - Se não houver segurança quanto ao evento maior, defina alternativas que cubram o evento maior e verifique a aplicabilidade de cada um.
3. Definição do escopo do FTA: Nesta fase, se define quais falhas ou classes de falhas entrarão no estudo. Nesta etapa, também são definidas as condições de contorno para a análise do sistema. Isto significa assumir uma determinada condição do sistema e determinadas entradas no mesmo. Por exemplo, em um sistema pode-se definir se na análise de falha serão incluídas falhas de projeto somente, falhas de manufatura somente ou ambas.

4. Definição da resolução do FTA: Nesta etapa, é definido o nível de detalhamento que será empregado na análise da falha do sistema. Isto é importante definir, pois, dependendo do nível de detalhamento do FTA pode não haver dados disponíveis sobre falhas para que se conduza uma estimativa de probabilidade de falha, embora isso não seja sempre necessário. Ao longo do desenvolvimento do FTA, pode ser revisto o nível de resolução previsto de acordo com a necessidade encontrada.
5. Definição das regras gerais do FTA: Nessa fase, definem-se os procedimentos e nomenclaturas que serão empregados na Árvore de Falhas. Isto é importante para que haja uma uniformidade no desenvolvimento do FTA, principalmente quando diferentes pessoas conduzem Análises de Falha dentro de uma mesma empresa ou sobre um mesmo sistema, mas em componentes distintos.
6. Construção da Árvore de Falhas: Nessa etapa é iniciada a construção da árvore de falhas propriamente dita. As informações são distribuídas de forma lógica, com suas inter-relações sendo explicitadas no modo gráfico.
7. Avaliação da Árvore de Falhas: Esta fase envolve a avaliação tanto qualitativa quanto a quantitativa, quando existente.
8. Interpretação e apresentação dos resultados: Neste item, o mais importante não é apresentar os resultados obtidos nas análises, o que pode ser feito em um relatório gerencial, mas o esforço maior deve ser despendido na interpretação dos resultados encontrados. Assim, pode-se ter uma idéia das possíveis implicações da falha no sistema. Também, se será necessário atuar no sistema como um todo ou em um componente específico.

Na construção do FTA, deve-se evitar cometer o erro de ser conciso, ou seja, deixar o diagrama o mais enxuto possível, pulando etapas. É necessário que todos os possíveis e necessários eventos sejam cobertos pela análise. Não se deve pular eventos, mas também não se deve fazer buscas por demais detalhadas.

Procura-se definir o evento maior antes do início da análise, como visto. Para defini-lo é importante ter claros e definidos os objetivos da análise e o problema que se deseja solucionar. Em alguns casos, é interessante definir outros potenciais eventos maiores e depois decidir o

melhor quando houver maior base para isso. Uma vez definido o evento maior é necessário definir como o mesmo ocorrerá. Isto é feito pelo modo que o sistema atinge o sucesso, que está na especificação de funcionamento. Por exemplo, uma viga deve suportar cargas cíclicas de até 30 vezes seu peso, por até 5 horas. Então a viga falhará se não suportar cargas de 30 vezes seu peso, ou se a falha ocorrer antes de 5 horas. Assim, pode-se resumir a definição do evento maior pelos seguintes passos,(NASA Handbook,2002):

1. Definir o evento maior e seu critério de ocorrência, estabelecendo seu critério de sucesso ou especificação de função.
2. Assegurar-se que o evento maior seja consistente com o problema a ser resolvido.
3. Se não houver certeza de que o evento maior seja realmente o mais adequado, definir alternativas para o mesmo.

Outro ponto importante na construção de Árvores de Falha são os conceitos básicos de efeito, modo e mecanismo de falha. Estes mesmos determinam a inter-relação dos eventos. Basicamente, um mecanismo de falha gera um ou mais modos de falha e cada um gera um ou mais efeitos.

É interessante notar que, dependendo de qual sistema está sendo analisado, o mecanismo, o efeito e o modo de falha podem mudar sua interação. Seja o exemplo de um sistema de alimentação de combustível que não recebe combustível. Considere-se o evento maior como sendo “sem fluxo do subsistema quando necessário”. Para o sistema em si este seria o mecanismo de falha. Quando se desce um nível para o sub-sistema este seria o modo de falha e descendo mais um nível (válvula), este seria o efeito. A Tabela 2.4 mostra o exemplo para este caso específico.

Tabela 2.4: Exemplo da análise de falha de um sistema de combustível (adaptado do handbook NASA, 2002)

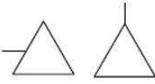
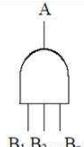
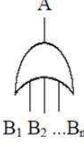
Descrição do evento	Sistema	Sub-sistema	Válvula	Atuador
Sem fluxo quando necessário do sub-sistema	Mecanismo	Modo	Efeito	
Válvula impossibilitada de abrir		Mecanismo	Modo	Efeito
Flexão da haste do atuador			Mecanismo	Modo
Corrosão da haste do atuador				Mecanismo

Diversos são os modos de falha para um sistema. Cada um deles é um evento maior na terminologia de Árvore de Falhas. Na análise, é escolhido um desses eventos e são investigadas as causas imediatas, ou seja, os mecanismos de falhas, para o sistema em particular. Quando este mecanismo de falha é analisado para um subsistema e este é considerado separadamente do restante dos sistemas a ele ligados, o mesmo se torna agora o sistema e o que antes era o mecanismo de falha, agora se torna o modo de falha. Assim, uma nova investigação se inicia até que se chegue ao componente propriamente dito. Quando se chega ao nível do componente, todas as falhas relativas a sistemas hierarquicamente superiores ao componente são consideradas efeitos. Assim, o sistema do componente é o próprio componente. Neste caso, os níveis mais baixos da árvore de falha consistem nas causas primárias de falha do componente em si e não dos sistemas a ele conectados, como nos níveis superiores. Estas causas podem ser: efeitos do controle de qualidade, material escolhido, definições de projeto, dimensionamento, interação com o meio ambiente e demais interações que influenciem o componente. Com isso, chega-se ao limite de resolução da árvore de falhas do sistema como um todo.

2.7.6 Simbologia

O FTA utiliza simbologia gráfica para representação dos diversos eventos, inter-relações entre os mesmos e demais ações que se façam necessárias. Por isso, faz-se necessário a definição desta simbologia. Para isso, adotar-se-á a utilizada em (SAKURADA, 2001), conforme a Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Simbologia básica do FTA (adaptado de Sakurada (2001))

Símbolo	Nome	Relação
	Retângulo	Evento representado por uma porta lógica.
	Circulo	Evento básico com dados suficientes.
	Losango	Evento não desenvolvido.
	Transfer out Transfer in	Símbolo de transferência
	E	O evento de saída "A" só ocorre se todos os eventos de entrada "B1, B2, ..., Bn" ocorrerem ao mesmo tempo.
	OU	O evento de saída "A" ocorre se qualquer um dos eventos de entrada "B1, B2, ..., Bn" ocorrer ou qualquer combinação destes ocorrer.

O evento definido por um retângulo é a representação de um evento de falha resultante de uma combinação de falhas.

O evento definido por um círculo é a representação da falha básica de um componente, ou seja, é o limite máximo da resolução de uma árvore de falhas, (SAKURADA, 2001).

O evento definido por um losango representa eventos não desenvolvidos, ou seja, não foi conduzida uma análise detalhada por falta de informação ou recursos.

O par de triângulos simboliza duas partes idênticas da árvore de falhas. É utilizado no intuito de evitar a repetição de eventos iguais em diferentes partes da árvore de falhas, de modo a simplificar a mesma.

As relações definidas por “E” e “OU” são utilizadas para a definição das inter-relações lógicas entre os eventos conforme definido na Tabela 2.5. A porta “E” soma o efeito de dois ou mais eventos, ou seja, o evento resultante é necessariamente devido à combinação destes eventos predecessores, e a porta “OU” define se o evento subsequente é desencadeado por um ou por outro precedente de modo independente, ou seja, se o evento resultante é desencadeado pela ocorrência de qualquer um dos eventos predecessores.

3 METODOLOGIA

Como já mencionado anteriormente este trabalho propõe o uso de duas ferramentas normalmente empregadas separadamente, o FTA (Análise da árvore de Falhas,) na busca de causas raízes de falhas, e o DOE (Projeto de experimentos), no desenvolvimento de produtos, sejam usadas em conjunto para o desenvolvimento de projetos de inovação. Essa união de ferramentas visa não só encontrar a causa principal da falha de um produto inovador, mas também ajudar a entender melhor o inter-relacionamento de fatores que levaram a falha, hierarquizando os fatores propostos. Ressalta-se que o estudo se restringe a produtos inovadores, para os quais ainda não há dados suficientes sobre falhas.

Por isso, será proposta uma metodologia que integre ambas as ferramentas. O FTA será usado para ordenar, ainda que provisoriamente, as inter-relações dos diversos fatores que levaram à falha. No entanto, com se desconhecem estas inter-relações e seu comportamento, a árvore ficará incompleta, então, ter-se-á um FTA preliminar. Por outro lado, o FTA preliminar servirá como gerador de fatores a serem empregados no planejamento de experimentos, assim como dos tipos de respostas (tensão, voltagem, decibéis, etc.) que são esperadas como saída do DOE.

O FTA estará alimentando o DOE que, por sua vez, será utilizado para mostrar as inter-relações dos fatores e hierarquizá-los. A revisão posterior do FTA irá indicar a causa mais provável da falha, para que o projeto possa ser atualizado e corrigido, e para que a falha não mais ocorra. A Figura 2.20 mostra a relação exposta.

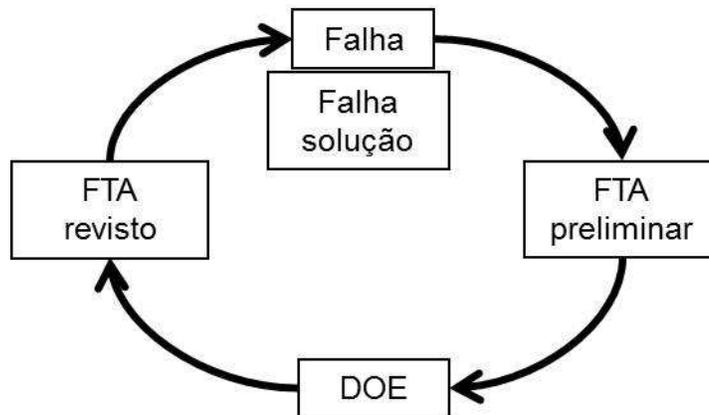


Figura 3.1: Looping proposto para abordagem do problema dada falha

Como exemplo, a Figura 3.2 mostra uma análise de falhas para a qual não há dados históricos de falhas.

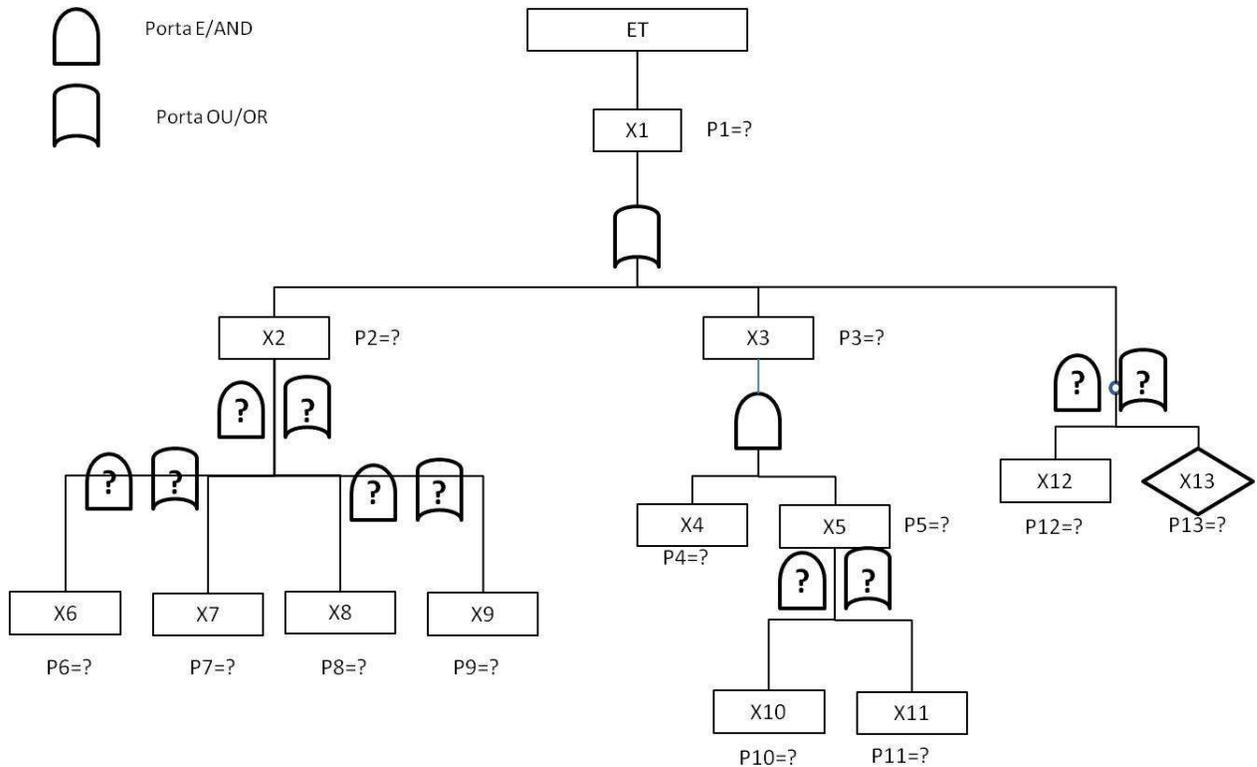


Figura 3.2: Exemplo de Árvore de Falhas onde há incertezas quanto a sua definição

Normalmente, com a existência de dados, cada evento (X_i) teria uma probabilidade (P_i) de ocorrência o que daria uma direção de hierarquização e permitiria avaliar os eventos que mais contribuiriam para a falha. Com base nisso, seriam tomadas ações, levando em conta a priorização encontrada, para que tais eventos não mais pudessem gerar a falha. Além disso, com os dados e experiências da equipe, as relações entre os eventos estariam bem estabelecidas. Ou seja, a falha ou evento predecessor ocorreria da combinação de um ou mais eventos ou poderia ser gerada de modo independente por eventos posteriores. Tudo isto baseado em dados históricos e experiências já adquiridas.

No caso de análise de falhas em projetos inovadores, as probabilidades de ocorrências não existem. As relações entre os eventos são desconhecidas. É neste momento que se aplicaria um estudo do produto com o auxílio do Planejamento de experimentos (DOE). Através do mesmo e dentro de determinados limites estabelecidos para os experimentos, seria possível obter a probabilidade de cada um e qual dos eventos estaria mais contribuindo para a falha. Tais dados

poderiam vir de uma Análise de Variância (ANOVA) sobre os resultados dos experimentos. Além disso, a ANOVA também poderia informar se a combinação de dois ou mais eventos poderia influenciar a falha.

Outro ponto importante é que, ao final desta análise, haveria uma hierarquização de quais eventos contribuiriam para a falha e, por consequência, quais fatores devem ser trabalhados para que as chances da mesma ocorrer sejam reduzidas ou eliminadas. Isto irá economizar tempo e recursos de projeto, e os engenheiros poderão focar suas atenções na melhoria de pontos específicos e não vários ao mesmo tempo.

É importante para a área de engenharia a definição de uma metodologia que possa nortear os trabalhos em campo e laboratório. A *metodologia proposta* é definida pelo fluxograma da Figura 3.3.

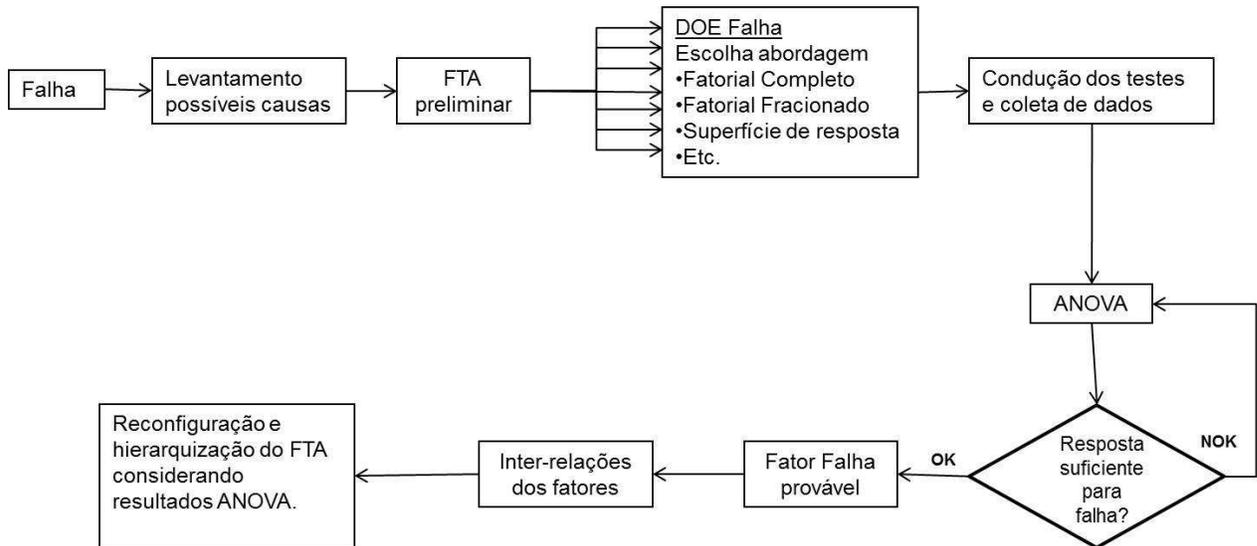


Figura 3.3: Fluxograma da metodologia de trabalho

Nos tópicos a seguir são discutidos os passos da metodologia proposta, detalhando-os, quando necessário.

3.1 Levantamento de possíveis causas e FTA

Nesta primeira etapa, procura-se levantar as possíveis causas que levariam à falha do componente ou sistema. O resultado pode ser usado para verificar qual situação é mais crítica. Como tratam-se de projetos inovadores, o conhecimento prévio como dados de retorno de campo ou histórico de outros projetos será muito reduzido ou inexistente. Apesar de não ser uma regra e

mesmo fora do escopo deste trabalho, é muito importante o uso da boa prática de começar o trabalho de investigação reunindo não só as pessoas que participam diretamente do projeto, mas também especialistas em assuntos específicos (por exemplo, análise de tensões, ou rolamentos, análise vibrações etc.). Não necessariamente serão da equipe, podem ser consultores ou convidados. Quando faltarem pessoas com o conhecimento necessário o mesmo deve ser buscado em pesquisa em fontes bibliográficas. O importante é que a equipe que fará a análise esteja ciente que estará lidando com novos conhecimentos e que estes serão posteriormente incorporados ao banco de conhecimento em desenvolvimento de produtos da empresa.

O primeiro passo é mapear os possíveis eventos que levaram à falha do produto. Para isso, lança-se mão da ferramenta FTA, escolhida por se tratar de uma ferramenta tipo *Bottom-up*, que melhor se adéqua ao tipo de investigação de falhas onde não se tem idéia da causa raiz. Outra vantagem do FTA é que o mesmo fornece um modo gráfico de se entender o mecanismo de falha, da sua causa raiz até que se atinja a falha, e a relação entre os vários eventos. Como não se sabe ainda a inter-relação dos eventos, o FTA irá mostrar os pontos de dúvida que, após a aplicação do DOE, poderão ser mais bem definidos e hierarquizados.

Assim sendo, seguindo a metodologia de FTA descrita na revisão bibliográfica, temos o desdobramento do FTA Figura 3.4 e mais detalhadamente, tem-se:

1. Primeiramente, define-se o evento maior, ou seja, a falha propriamente dita;
2. Segue-se pela definição do escopo da análise que será efetuada, no qual se limitará a linha de análise, para que a Árvore de Falha não seja abrangente demais e se perca o foco. Assim, definem-se as condições de contorno;
3. A próxima etapa é a definição da resolução da Árvore de Falhas, ou seja, quantos níveis a árvore terá;
4. A construção da árvore propriamente dita é feita neste passo, com a disposição das informações de modo ordenado e encadeado;
5. A avaliação da Árvore de Falhas e interpretação dos resultados são os próximos passos. Nesta fase, irá se verificar nos “ramos” inferiores quais as possíveis causas raiz. Algumas talvez sejam descartadas por estarem fora do escopo ou não estarem bem definidas.

Durante a construção da árvore de falhas as inter-relações dos eventos serão definidas por portas lógicas E e OU, caso já se conheça sua inter-relação. Caso esta inter-relação ainda seja

desconhecida deve-se deixar a conexão vazia ou com um ponto de interrogação para que depois se possa retornar e atualizar a informação. Na fase de construção da Árvore de Falhas, também são incluídas, além dos eventos primários, ou seja, ligados diretamente ao produto, os eventos secundários ou fontes externas que podem influenciar o produto na sua falha.

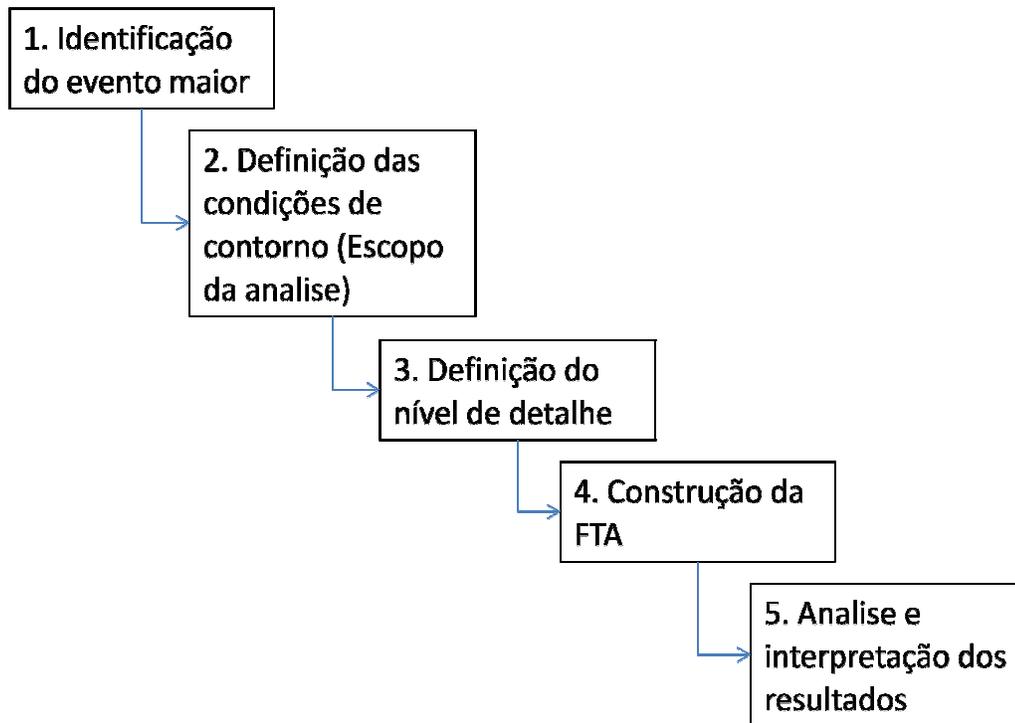


Figura 3.4: Desdobramento do FTA baseado na metodologia utilizada

3.2 Verificação das hipóteses com o uso de DOE

Após o levantamento das hipóteses das causas da falha com o uso das ferramentas FTA e também das condições que as propiciaram, é necessário que se verifique a validade das mesmas aceitando-as ou rejeitando-as. Para isso, lança-se mão da ferramenta de Planejamento de Experimentos. A primeira etapa é a escolha do tipo de experimento que melhor se aplica a situação. Para isto usar-se-á a Tabela 2.1, apresentada no capítulo de revisão bibliográfica na parte de DOE. Nos casos que se busca definir qual hipótese tem maior participação na geração de uma falha (efeito ou resposta) ou quais condições mais propiciam o surgimento da causa, deve-se utilizar um experimento fatorial. No entanto, dependendo da quantidade de experimentos, número de repetições e recursos disponíveis, pode ser necessária a utilização de um experimento fatorial fracionário ou em blocos.

Uma vez definido qual tipo de experimento será utilizado, parte-se para a realização dos testes, tomando-se os cuidados necessários que experimentos deste tipo requerem. Não é o objetivo deste trabalho discutir a questão de como realizar um experimento.

A resposta dos experimentos pode ser a falha propriamente dita, por exemplo, nível de ruído, perda de potência, nível de vazamento, etc. No entanto, pode ser que não seja alguma resposta que possa ser mensurada, por exemplo, quebra da barra, parafuso espanado, etc. Para que na condução de experimentos não seja obrigatório obter respostas que possam ser mensuráveis se faz necessário traduzir respostas não mensuráveis em parâmetros mensuráveis. Na construção do FTA, eventos predecessores muitas vezes definem o tipo de resposta que se deve medir como, por exemplo, quebra de um componente sob tensão máxima de Von Misses, parafuso espanado em tensão de ruptura do parafuso, etc. O experimentador deve estar atento para conseguir interpretar tais informações oriundas do FTA.

Para o experimento, devem-se escolher quais fatores potencialmente mais influenciam e os níveis que se devem aplicar na condução do experimento. Em um experimento que se propõe a estudar as possíveis causas de uma falha para posteriormente atuar na mesma para melhoria de um produto os fatores são definidos na etapa anterior desta metodologia, ou seja, no FTA. Os níveis podem ser definidos pela experiência profissional das pessoas envolvidas no projeto ou mesmo na análise de projetos similares se existirem.

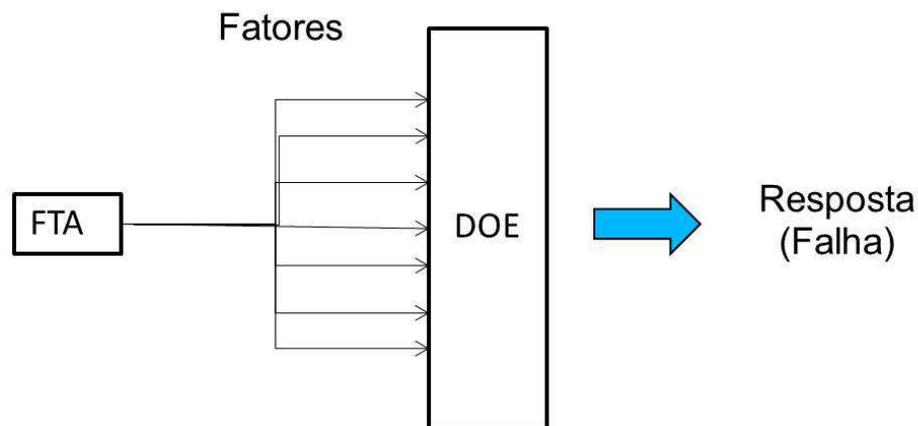


Figura 3.5: Dados de entrada do DOE (Planejamento de Experimentos)

Uma vez que os experimentos tenham sido conduzidos e o resultado coletado, faz-se necessária uma análise dos mesmos para que se verifique qual dos fatores tem maior influência na resposta do sistema sendo analisado. Nesta fase, lança-se mão da Análise de Variância

(ANOVA). Este método, como explicado anteriormente, analisa a variação das médias dos experimentos. A análise de variância pode ser efetuada com os resultados de diversos testes, cada um com uma determinada função.

Para se saber qual fator é o que mais influencia a falha, observa-se o p-valor, que é uma probabilidade de que hipótese nula (H_0) seja verdadeira. Para o caso, H_0 considera que não há variação entre as médias dos fatores, ou seja, não há diferença do comportamento da falha, não importando qual fator está atuando. Em outras palavras, quanto maior o valor de p-valor (entre 0 e 1), maior é a probabilidade de que a hipótese H_0 seja verdadeira e que diferença entre os fatores ou um fator isoladamente não influencie a falha. Já se o valor de p-valor for pequeno, a probabilidade de um fator ou combinação de fatores ser o responsável pela falha é inversamente proporcional à sua magnitude. Assim sendo, quanto menor o p-valor maior a probabilidade de que o fator analisado ou combinação (interação) seja responsável pela falha.

Aqui não se entrará em demonstrações estatísticas do significado do p-valor, pois não é o escopo deste trabalho. Além disso, existem inúmeros softwares estatísticos que fazem os cálculos necessários. Um desses será usado neste trabalho (o Action v. 1.0) como ferramenta para o estudo de caso. Esse programa é gratuito e disponível para download na internet.

Na Figura 3.6, pode-se observar uma ANOVA onde se verificam os efeitos principais A, B, C e suas interações. Pode-se observar que a maior influência é dada pelo efeito B-C, para o qual há uma probabilidade de 0,2% de que ela não influencie a resposta, ou seja, há uma probabilidade de 99,8% de que influencie. Observa-se que o fator A também tem uma grande influência na resposta, mas de modo independente. Estes dados nos dão duas informações importantes. A primeira é que os eventos B e C estariam inter-relacionados, ou seja, no FTA haveria uma porta lógica E. Ainda no FTA o evento A teria uma contribuição significativa, mas sozinho, e sua interação com B e C seria através de uma porta lógica OU. Assim, o FTA para este estudo, que inicialmente ficaria conforme a Figura 3.7, seria na realidade conforme a Figura 3.8, que já inclui as descobertas anteriores.

<i>Tabela da Anova</i>	<i>G.L.</i>	<i>Soma Quad</i>	<i>Quadrado Médio</i>	<i>Estat. F</i>	<i>P-valor</i>
A	1	453,313	453,313	12,191	0,008
B	1	293,811	293,811	7,902	0,023
C	1	153,469	153,469	4,127	0,077
A:B	1	76,740	76,740	2,064	0,189
A:C	1	23,610	23,610	0,635	0,449
B:C	1	705,664	705,664	18,978	0,002
A:B:C	1	9,425	9,425	0,253	0,628
Resíduos	8	297,473	37,184		
Total	15	2013,506			

Figura 3.6: Exemplo de resultados de ANOVA

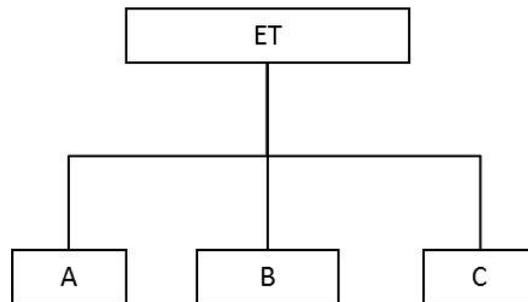


Figura 3.7: FTA inicial para o exemplo (antes do DOE)

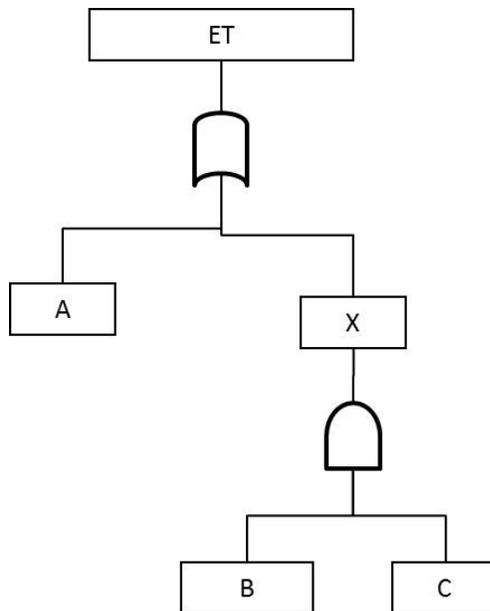


Figura 3.8: FTA reconfigurado para o exemplo (depois do DOE)

Na Figura 3.7 e Figura 3.8, onde ET seria o Evento de Topo ou a falha propriamente dita, A, B e C seriam os eventos menores e X um evento menor que surgiu após a análise com o uso do DOE. Também surgiram as inter-relações “E”, de B e C, e “OU”, de A e X.

Na análise, deve-se considerar sempre o fator ou a combinação de fatores que através do P-valor se mostrem significativos (os mais baixos), pois neles estão as influências mais fortes. Este é o fator, ou combinação de fatores, que se tomará como base para a análise da falha, pois a probabilidade de que o mesmo seja o fator que mais contribuiu para a falha em análise dentro dos parâmetros analisados é grande. Por exemplo, se na análise de variância o p-valor para o fator atrito de um componente tipo freio for pequeno o suficiente conclui-se que este fator tem forte influência para que o freio venha a falhar. Isso fará com que este seja re-projetado, de forma que se torne imune a variação do atrito dentro dos parâmetros de trabalho.

O uso do p-valor é uma etapa fundamental para a análise decisória desta metodologia. Através dele se irá diferenciar em que condições a falha é mais propícia, caso não se saiba em que condições a mesma ocorreu. Depois disso, é ele que irá definir entre quais as possíveis causas a que tem maior peso na falha. O fluxograma da Figura 3.9 mostra em linhas gerais, a sequência de aplicação da ANOVA para a determinação do fator falha.

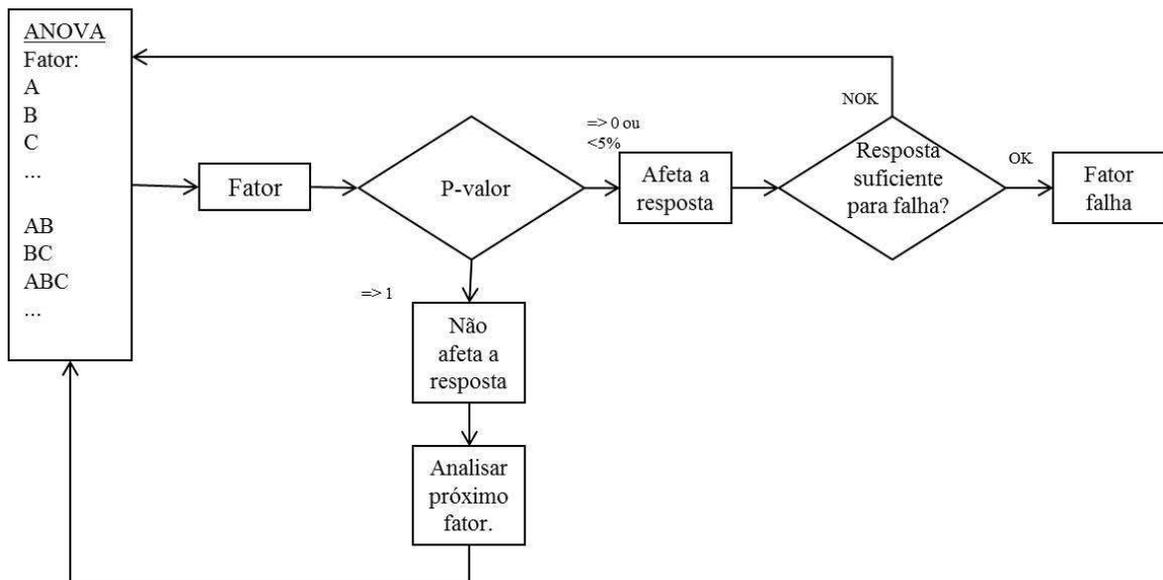


Figura 3.9: Fluxo para determinação do Fator Falha

Esta etapa se inicia com a análise de variância das respostas do DOE feita a partir das hipóteses levantadas pelo estudo do FTA. Cada fator ou sua combinação é analisado

individualmente em relação ao p-valor, se o mesmo está abaixo ou acima da significância definida de 5%. Nesta etapa do trabalho deve-se fazer uma consideração sobre o nível de significância. Neste trabalho, o nível de significância de 5% será o limite para a aceitação ou não de um determinado fator, pois fornece uma margem adequada de confiança para as análises a partir dos resultados.

Se o p-valor estiver acima de 5%, quer dizer que, não há efeito significativo na resposta monitorada quando se varia o nível do fator, e conseqüentemente, não é um contribuinte importante para a falha. A partir dessa constatação, desconsidera-se este fator e analisa-se o fator seguinte da mesma forma. Caso o p-valor seja menor ou igual a 5%, significa que dizer que, há um efeito significativo na resposta monitorada, e conseqüentemente, é um contribuinte de peso para a falha. Então em seguida verifica-se se a magnitude da resposta afetada por este fator é suficiente para gerar a falha. Por exemplo, se ultrapassou a tensão de ruptura. Se não for suficiente então este não é o fator gerador da falha. Caso nenhum dos fatores seja suficiente para gerar a falha, deve-se reavaliar o FTA ou os níveis escolhidos para condução do experimento.

Uma vez que se determinou qual fator ou combinação de fatores mais contribui para a falha, este será o fator principal causador da falha, que neste trabalho será definido como “fator falha”.

3.3 Análise de resíduos

A análise de resíduos é importante para verificar se os resultados se comportam de modo normal, ou seja, se eles seguem uma distribuição normal. Se isto acontecer, então o modelo e os dados são adequados a realidade e podem ser analisados da forma proposta. No entanto, caso não mostrem um comportamento normal, isto pode indicar que um ou mais experimentos foi contaminados durante a sua execução, ou que os dados de entrada não sejam acurados o suficiente, o que gera um comportamento não satisfatório.

A análise de resíduos pode ser feita por meio de ferramentas disponíveis em pacotes estatísticos como o Action e Minitab. Estas ferramentas podem ser:

- Papel de probabilidade, para se verificar a normalidade dos dados.
- Gráficos de resíduos em função da ordem de coleta de dados, para avaliar se o erro tem média zero.

- Gráficos de resíduos em função dos valores ajustados para verificar se a variância é constante.

No caso da análise do gráfico de papel de probabilidade, verifica-se se os resíduos estão próximos da reta de ajuste, o que indica a normalidade dos mesmos. Quanto aos resíduos em função da ordem de coleta e resíduos em função dos valores ajustados, deseja-se que os mesmos sejam os mais aleatórios possíveis. Caso estas três análises conduzam a resultados positivos, poderá se dizer que os resíduos são independentes, com variância constante e não apresentam nenhum tipo de tendência.

Caso um experimento apresente um comportamento não normal ou com algum tipo de tendência, não se poderá ter confiança nos resultados e análises e as conclusões estarão comprometidas. Neste caso, os dados deverão ser revistos para se verificar se houve algum tipo de contaminação ou há alguma causa especial. Deve-se decidir por simplesmente eliminar o dado discrepante ou até mesmo tomar a decisão de refazer todo o experimento. Isto deve ser cuidadosamente estudado uma vez que muitos experimentos são extremamente demorados ou caros. Por outro lado, uma quantidade grande de contaminação dos dados poderá comprometer toda a análise, tornando-a inútil para utilização na detecção da verdadeira causa da falha.

4 ESTUDO DE CASO

Para a implementação da metodologia proposta foi conduzido um estudo de caso baseado em um caso real de falha de componente em serviço. O estudo de caso escolhido foi a falha de um componente de suspensão de um veículo de competição conhecido como Formula SAE.

O Fórmula-SAE é uma competição estudantil na qual alunos de várias universidades competem entre si na construção de um carro de competição dentro das regras estabelecidas pela entidade SAE (Sociedade de Engenheiros Automotivos). Tem como objetivo colocar os estudantes de graduação frente aos desafios da construção de um carro mono-posto de competição. A Figura 4.1 mostra um desses veículos.

Foi escolhido este caso, pois uma equipe de competição deste tipo se assemelha a uma empresa lidando com novas tecnologias e produtos inovadores, apesar da tecnologia automotiva não ser algo novo efetivamente. Para os integrantes definitivamente o é. Outras equipes não vão dividir seu conhecimento obtido em testes e experiência com seus competidores. Cada problema é uma oportunidade de melhor conhecer o produto e seu comportamento, e assim aprimorá-lo para as próximas competições.



Figura 4.1: Carro de Formula SAE(fonte: site fsaeunicamp.com.br)

Durante os testes, antes da competição de 2008, um dos componentes da suspensão, conhecido como Manga de Eixo, sofreu falha quebrando prematuramente sem que houvesse

nenhum acontecimento extraordinário (acidente). Isto obrigou a equipe Formula SAE da Unicamp, a providenciar reparos de emergência e acabou custando pontos preciosos para a mesma. A Figura 4.2 mostra o componente avariado.



Figura 4.2: Componente Manga de Eixo quebrado

Para o desenvolvimento do estudo de caso, foi pesquisado como o componente trabalha e quais esforços atuam sobre o mesmo. Além disso, também foi pesquisado a respeito do material utilizado no componente. O resultado desta pesquisa, como não se trata da matéria principal deste trabalho, pode ser vista no Apêndice A.

A Figura 4.3 mostra a manga de eixo montada em conjunto com o sistema de suspensão do carro e a Figura 4.4 mostra o desenho em CAD do componente, com destaque para a região onde houve a falha. Basicamente, os esforços atuantes no componente são devidos às ações do veículo freando, em curva, ao peso próprio e a combinação de todos. Além disso, sabe-se que a região na qual o componente falhou foi a parte inferior do mesmo. Assim, a pesquisa se concentrou nesta região, considerando as regiões adjacentes apenas quanto à sua influência sobre a região em estudo e não checando algum potencial risco de falha das mesmas. A razão é que não é o foco deste trabalho determinar quais regiões do componente têm risco de falha, mas determinar quais as causas primárias que levaram à falha do componente na região em questão.



Figura 4.3: Sistema de suspensão dianteiro Formula SAE

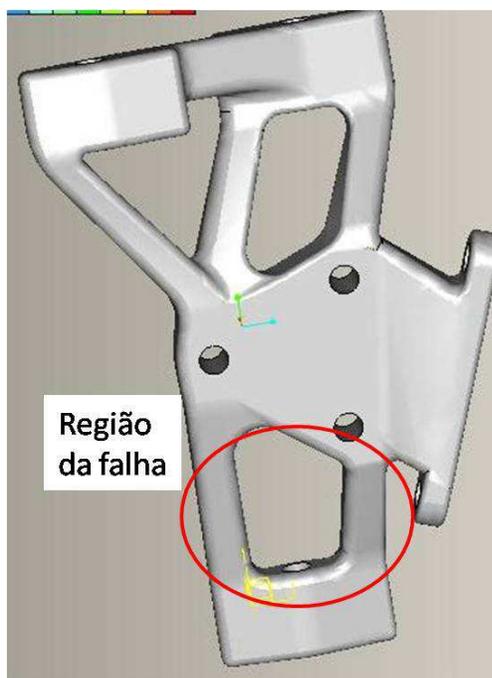


Figura 4.4: Região da falha do componente

Além da pesquisa sobre os materiais e sobre seu trabalho, também foi feita uma pesquisa quanto às funções globais e locais seguindo o trabalho de Klava(2003). Segundo este, a principal

característica ou função global do componente é a de suportar (no sentido de conter) os sistemas de controle dos movimentos do veículo. Esse sistema recebe dois tipos de sinais de entrada, vindo do usuário (motorista) e do meio (interação pneu-solo), e que geram como sinal de saída um Sistema Estável, conforme Figura 4.5.



Figura 4.5: Função Global (Klava,2003)

Por sua vez, a função global é suportada por uma série de funções locais que podem atuar em série ou paralelo. Em seu estudo Klava(2003) definiu duas funções locais envolvidas na função global de suportar sistemas, que seriam, conforme a Figura 4.6:

1. Permitir Acoplamento
2. Permitir Acionamento

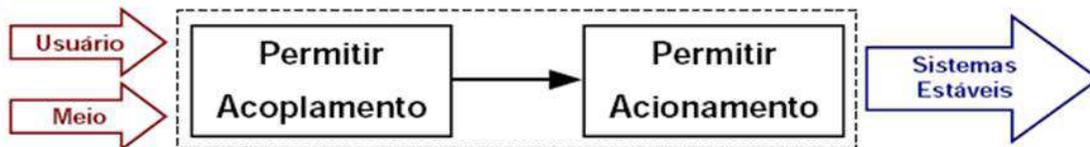


Figura 4.6: Funções Locais (Klava,2003)

A interpretação da função da Figura 4.6 é que para haver o acionamento de qualquer sistema é necessário que este esteja acoplado apropriadamente à manga de eixo, o que justifica sua representação em série. Dentro do sistema descrito, pode-se ainda dividir as funções locais em sub-funções como o mostrado na Figura 4.7.

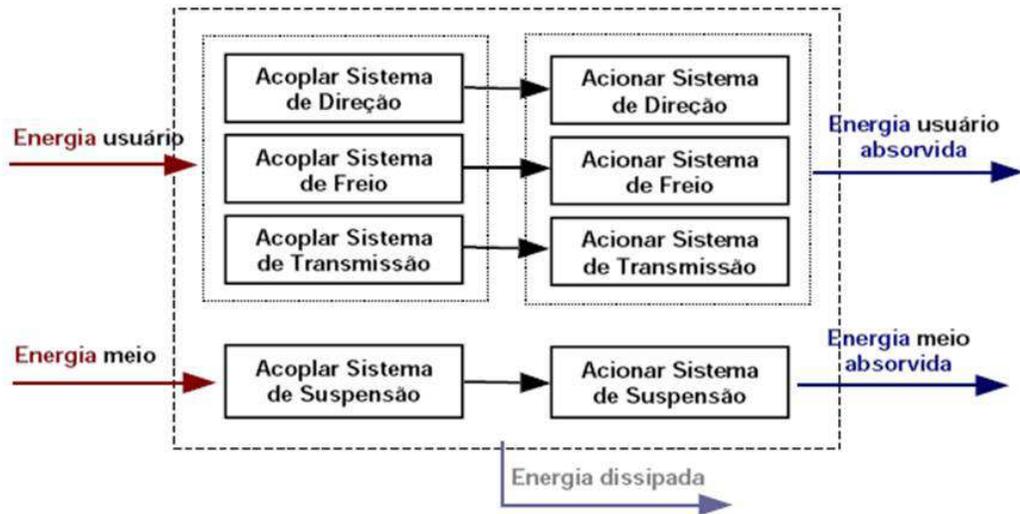


Figura 4.7: Sub-funções locais (Klava,2003)

No entanto, uma vez que o estudo de Klava (2003) se referia a uma suspensão do tipo McPherson característico de veículos de tração dianteira e a suspensão do Fórmula SAE é do tipo braços transversais, característico de veículos de tração traseira, faz-se necessário tecer um paralelo entre as duas. Para se fazer esta análise, na Figura 4.8, destacaram-se 5 regiões e para cada uma definiu-se uma função:

1. Região 1: Referente à função local que suporta o sistema de suspensão.
2. Região 2: Referente à função local que suporta o sistema de direção do veículo (braço de direção).
3. Região 3: Referente à função local que suporta o sistema de suspensão relativo ao acoplamento da manga de eixo ao chassi do veículo.
4. Região 4: Referente à função local que suporta o sistema de frenagem.
5. Região 5: Seria referente a região de transmissão de movimento em uma Manga de Eixo para suspensão McPherson. Neste caso é apenas a região de acoplamento/interface suspensão – roda.

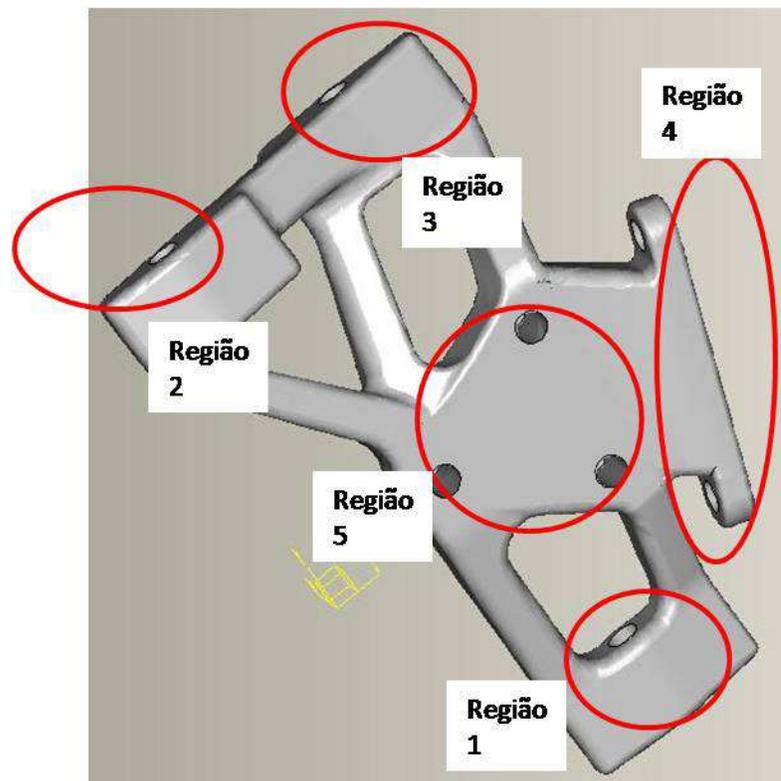


Figura 4.8: Regiões funcionais da Manga de Eixo estudada

Esta definição das regiões funcionais é importante, pois facilita a análise de falhas associadas às mesmas, seja através de FMEA ou de FTA, como no caso estudado. Além disso, também se torna mais fácil a definição dos modos de falhas que posteriormente serão usados na árvore de falhas.

Segundo Klava(2003)os modos de falha associados a um componente estrutural tipo Manga de Eixo podem ser de dois tipos:

1. Independentes do tempo: fratura (dúctil ou frágil); plastificação generalizada; deformação elástica excessiva ou rigidez insuficiente.
2. Dependente do tempo: fratura progressiva ou fadiga.

Analisando os modos de falha, pode-se representá-los resumidamente, como na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Modos de Falha estruturais independentes e dependentes do tempo (adaptado de Klava,2003)

Fratura dúctil	Quando um corpo é submetido a tensões maiores que seu limite de escoamento o mesmo sofre deformação plástica. Se o processo continuar a seção transversal resistente sofrerá redução, o que por sua vez produz um estado tri-axial de tensões. Este estado tri-axial reduz a capacidade de deformação plástica e pode ocorrer ruptura pela nucleação de vazios.
Fratura frágil	A fratura frágil é caracterizada pela separação do material em duas partes segundo um plano perpendicular à tensão de tração. Quando esta tensão ultrapassa um valor crítico se inicia o processo de ruptura.
Plastificação generalizada	Ocorre quando o carregamento atinge o valor do limite de escoamento do material de tal modo que, mesmo após cessar a atuação do carregamento, há uma deformação permanente. Em metais (principalmente aço) isto acarreta um endurecimento do material e por consequência uma fragilização do mesmo.
Deformação elástica excessiva	É quando uma peça ou componente apresenta uma flexibilidade excessiva sob a ação de forças, mesmo que estas não induzam tensões que atinjam o limite estrutural do material. No entanto esta característica poderá levar a deslocamentos de regiões do componente que inviabilizem seu funcionamento.
Fadiga	É um processo progressivo e permanente de dano estrutural localizado em regiões do componente submetidas a tensões e/ou deformações cíclicas. É importante ressaltar que as tensões podem mesmo ser inferiores ao limite de escoamento do material.

Com base nas considerações anteriores, foi construída a Árvore de Falhas para o componente seguindo as bases descritas no Capítulo 2 deste trabalho. Após a construção da Árvore de Falhas utilizou-se a ferramenta DOE (Planejamento de Experimentos), primeiro para se descobrir qual das ações sobre o componente analisado têm maior influência. Em seguida, desceu-se mais um nível na Árvore de Falhas e investigaram-se quais dos possíveis mecanismos estavam mais sujeitos a ação mais severa descoberta na fase anterior.

4.1 Construção da Árvore de Falhas

Na construção da Árvore de Falhas o primeiro passo foi a identificação do objetivo de modo claro. Como se estava buscando determinar as causas que levaram o componente falhar, então o objetivo da Árvore de Falhas é descobrir as causas da quebra da Manga de Eixo.

O segundo passo é justamente a definição do evento maior que deverá estar ligado ao objetivo proposto anteriormente. Além disso, considerando a definição de Espaço Sucesso/Falha, o critério de sucesso seria o componente “suportar as solicitações durante sua operação”. Baseado nestas duas definições, o evento maior foi definido como quebra da Manga de Eixo.

O terceiro passo na construção da Árvore de Falha é a definição de seu escopo. Assim foram assumidas as seguintes condições de contorno:

- Na análise assume-se que não houve falha na manufatura do componente. Isto se embasa no fato de que no componente restante não foi encontrado nenhum indício de que houve algum tipo de falha de fundição, por exemplo. Além disso, o processo de fundição em areia que foi usado na fabricação do mesmo implica em pequenas possibilidades de porosidade, o que seria um fator de enfraquecimento estrutural.
- Também não será analisada a influência do meio ambiente sobre o componente, como o efeito da temperatura e/ou influências químicas ou componentes montados erroneamente que pudessem reduzir a capacidade do mesmo em resistir a esforços. Isto se baseia no fato de que o ambiente em que atua o componente não é considerado agressivo para o mesmo. A checagem mostrou que não havia componentes não previstos na montagem.
- Assume-se que não houve erro de manufatura do componente e também não houve erro de montagem. No primeiro caso, baseia-se no fato de que demais componentes (a segunda manga de eixo) foram feitos utilizando o mesmo processo. No segundo caso, a suposição baseia-se nos fatos de que a equipe técnica tinha conhecimento necessário para efetuar o serviço e também que o componente trabalhou por um tempo considerável (testes preliminares) antes de sofrer a falha.

- Será analisada a atuação dos sistemas conectados ao componente, como tipos de solicitações e suas grandezas.
- Serão analisadas as geometrias e dimensões do componente, se as mesmas contribuiriam para a ocorrência da falha ou não.

O quarto passo na construção da Árvore de Falhas é a determinação da resolução que a mesma terá. No caso em estudo, como se trata de um componente e não de um sistema mais complexo, não se espera que existam muitos níveis na Árvore de Falhas. A resolução da mesma foi definida como até o 5º nível, no máximo.

Na quinta etapa de construção da Árvore de Falhas, são definidas as regras (procedimentos) e nomenclaturas a serem utilizadas no desenvolvimento do trabalho. Como se trata de um trabalho acadêmico, as nomenclaturas que forem sendo adotadas serão explicadas no próprio texto ou no índice de abreviaturas. Quanto às regras a serem seguidas na construção serão as mesmas adotadas na referência,(NASAHANDBOOK 2002).

Na Figura 4.9, observa-se uma Árvore de Falhas preliminar, construída a partir dos passos expostos anteriormente. Para entender o encadeamento dos eventos, pode-se seguir a sequência de eventos composta por ET=>X1=>X4=>X7=>X10=>X15. Segundo esta, a quebra da manga de eixo (evento de topo ET) pode ter sido desencadeada pela ruptura de uma das seções (evento X1), esta ruptura desencadeada por uma tensão acima do valor crítico (evento X4). Esta tensão acima do valor crítico pode ter sido gerada por esforço excessivo no componente (evento X5), este excesso de esforço por sua vez pode ter ocorrido durante uma situação do veículo efetuando uma curva (evento X7), esforço este aumentado devido ao raio da curva pequeno (evento X10). Finalmente, uma possível causa raiz seria que o componente não resistiu a esta solicitação devido ao fato de que área da seção que quebrou não era suficiente (evento X15) para resistir aos esforços. Deste modo tem-se um encadeamento lógico dos possíveis caminhos que levaram a falha.

Além disso, a árvore de falhas apresenta diversas questões por responder tais como:

- Qual a inter-relação efetiva entre os eventos X13 e X14 com relação a X12 assim como entre X7, X8, X11 com relação a X5 e X6 e finalmente a inter-relação de X1, X2, X3 em relação a ET?
- Quais os níveis que apresentam maior influência? Por exemplo, maior ou menor peso, maior ou menor velocidade.

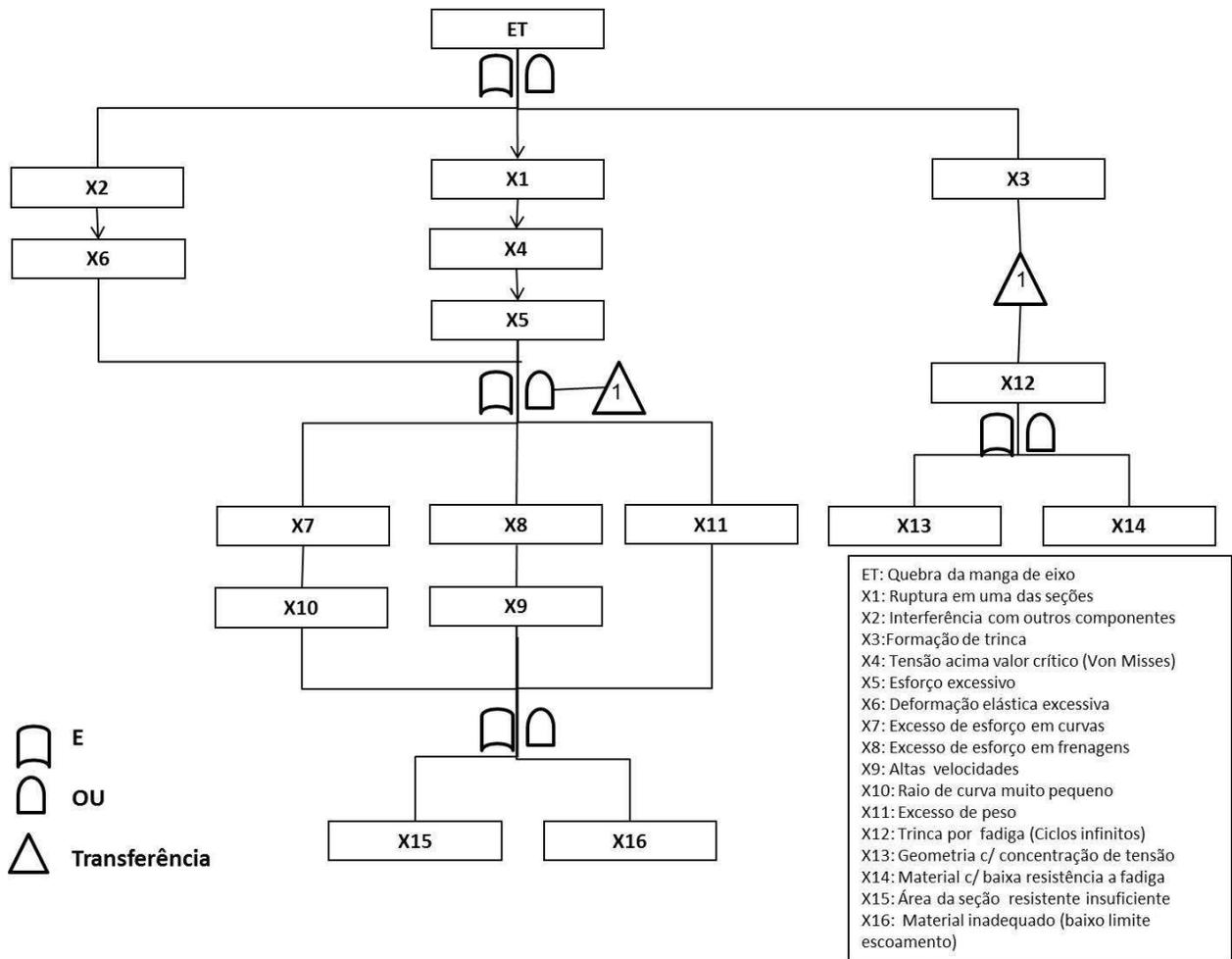


Figura 4.9: Árvore de Falha da Manga de Eixo Geral

4.2 Análise de falhas usando DOE e ANOVA

Na abordagem desta etapa, deve-se fazer uma observação. Deve-se ressaltar que se está analisando um componente novo do qual se desconhece o comportamento. Como um dos intuitos do trabalho, além de descobrir a causa primária da falha, é entender melhor a tecnologia utilizada no componente para desenvolvimentos futuros, o estudo deve levar em conta não somente as falhas primárias, mas os fatores que contribuirão para a falha. Estes entrarão no estudo como parte dos tratamentos, ou seja, da combinação dos fatores.

Com base no FTA construído anteriormente (Figura 4.9) a primeira informação que o FTA nos apresenta é que existem três principais hipóteses de falha ou 3 ramos de falhas.

1. Deformação excessiva devida ao esforço excessivo, que pode levar a interferência com outros componentes;

2. Ruptura da seção devida a esforço excessivo;
3. Ruptura devida à fadiga.

Apesar dos ramos 1 e 2 serem influenciados pelos mesmos fatores (esforço excessivo) são modos de falhas diferentes. Se constatado que um deles é o verdadeiro causador da falha as soluções podem ser diferentes.

A segunda informação obtida do FTA é sobre os potenciais comportamentos ou fatores que influenciam a falha, que seriam:

1. Excesso de esforço na frenagem devido à alta velocidade;
2. Excesso de esforço por peso;
3. Excesso de esforço por curva devido ao raio da curva pequeno;
4. Deformação excessiva devida à alta velocidade;
5. Deformação excessiva devida ao peso;
6. Deformação excessiva devida ao raio da curva pequeno;
7. Formação de trinca por fadiga.

E o terceiro grupo de informações que obtém-se do FTA são as potenciais falhas primárias que ao longo do estudo devem ser comprovadas ou negadas:

1. Pequena área resistente (seção da peça não é capaz de resistir aos esforços/deformações);
2. Material com baixo limite de escoamento/resistência a ruptura (material da peça não é capaz de resistir aos esforços/deformações);
3. Geometria que favorece a concentração de tensões;
4. Material com baixa tenacidade.

Até este momento, estas são as informações que o FTA forneceu. No entanto, existem algumas perguntas a serem respondidas e que este estudo de caso se propõe a responder, que são:

1. Qual das falhas primárias é a causadora ou principal suspeita de causar o evento maior, ou seja, a quebra do componente?
2. Existe uma inter-relação dos fatores que contribuem para a falha?

Para responder a essas perguntas, esse trabalho propõe o uso do DOE. Para isso, tomaram-se como base as informações contidas no FTA. Como mencionado anteriormente, as causas

primárias seriam: área resistente insuficiente para resistir aos esforços, material inadequado para resistir aos esforços, geometria inadequada, material inadequado para resistir à fadiga.

Com base DOE, pode-se verificar que foram levantados três principais ramos de falha (deformação excessiva, ruptura por esforço excessivo e ruptura por trinca de fadiga). Sendo que tanto para deformação excessiva quanto esforço excessivo existem três principais fatores que influenciam, que são: alta velocidade, peso do veículo e raio da curva. Estes ramos de falha definem as respostas que são necessárias para quantificar e analisar o problema. Assim, a resposta a ser analisada para deformação excessiva será o deslocamento das extremidades do componente. Para o ramo ruptura por esforço excessivo a resposta a ser analisada será a tensão de Von Misses. Para terceiro ramo de falha de ruptura por trinca de fadiga será observada a vida do componente em número de ciclos.

Cada um destes ramos de falha, a princípio, necessitaria de um DOE específico. No entanto, analisando-se a Árvore de Falha, pode-se observar que os fatores que influenciam os ramos 1 e 2 são os mesmos. Como os testes serão realizados utilizando modelagem por Método de Elementos Finitos (MEF) e este fornece ambas as respostas simultaneamente, será utilizado um único DOE.

Já para a análise da trinca por fadiga, será usado um DOE-Falha específico, no qual a resposta é a vida em número de ciclos. A realização de dois DOE-Falha facilita a análise.

Para ambos os trabalhos foi utilizado o método dos elementos finitos dentro do pacote do software Pro-E 4.0, módulo Pro-Mechanica. Isso ocorreu porque os custos e o prazo para a realização dos experimentos inviabilizariam o trabalho.

4.2.1 DOE para Deformação e Ruptura

Para esta análise foram utilizados como dados de entrada os fatores encontrados no FTA. Para isso foi necessário definir a relação entre os esforços sobre o componente e os fatores, que são: velocidade do veículo, peso do veículo e raio das curvas efetuadas pelo veículo. Estes fatores foram variados juntamente com a área da seção e material. A frenagem não foi variada, pois o esforço da mesma acaba sendo uma função da velocidade e peso do veículo. Para se entender a atuação dos esforços e definir os mesmos, pesquisou-se sobre o componente e, baseado nos trabalhos de Klava (2003) e Nicolazzi, Rosa e Leal, (2001), construiu-se uma

planilha apresentada na Figura 4.10. Nesta, estão inseridas as principais equações relacionadas aos esforços do veículo sobre o componente. A saída das equações são os esforços que serão usados na simulação de MEF. A base teórica das equações pode ser vista no Apêndice A, uma vez que não é o foco deste trabalho a análise estrutural de componentes de suspensão.

Calculos dos Esforços na Manga de Eixo do Formula-SAE											
Numero das equações em negrito											
Variáveis independentes em vermelho											
eq10	Reação (RIB) peso próprio			eq15	Reação (RIB) curva (N)			eq16	Força Transversal (N)		
G_1	$m(Kg)$	x	R_{IB}	R_{IB}	$h(m)$	μ	$h(m)$	F_{IE}			
1806	300,0	0,386	903	923	1,49	0,75	0,38	695			
eq17	Resit. Rolamento(N)			eq18	Resist. Inercia(N)			eq19	Resist. Active(N)		
Q_R	f			Q_I	$a(m/s^2)^*$			Q_S	$\alpha(^{\circ})^*$		
32,4	0,011			2100	7,00			0	0		
eq20	Resist. Aerodinamica (N)			eq21	Resist Mecânica (Kw)			eq22	Reac (RIB) Frenag (N)		
Q_A	c_x	$A(m^2)$	$q(Pa)$	P_P	η	$PE(Kw)$	R_i	$l(m)$	$a_l(m)$		
0				0			1331	1,75	0,79		
eq23	Força de Frenagem (Active)			eq24	Força Frenagem no plano (Active)			Transfer Peso(Frenagem)			
$F_{F1}(N)$			$F_{F1}(N)$			7,889722824					
1001			1340			1,92					
eq25	Força Frenagem sem Cx			eq26	Força manga na Frenagem			0,8			
$F_{F1}(N)$			$F_M(N)$	$Raio$	d						
1358			967	0,25	0,18						
eq27	Fator corr. Fadiga			eq28	Tensão Limite de Fadiga			eq29	Fator Seg. Fadiga		
K_{SUP}	A	σ_R	b	σ'_f	σ_f		N_f	σ_A	σ_M		
				0			#DIV/0!				
F_{PI}	Força no Pivô Inf. Frenagem			F_{PS}	Força no Pivô Sup. Frenagem						
	2400				1031						
Reação (RIB) curva_frena			Força manga na Frenagem								
$R_{IB_Frena_Curv}$			$F_M_F_C(N)$	$Raio$	d						
1351			967	0,25	0,18						
$F_{PI_F_C}$	Força no Pivô Inf. Fren_CUrv			$F_{PS_F_C}$	Força no Pivô Sup. Fren_CUrv			Força Transv (N) Frena_Curv			
	2401				1032			$F_{IE_Frena_Curv}$			
								1017			

Figura 4.10: Planilha usada para cálculo dos esforços na Manga de Eixo

Na Tabela 4.2 podem ser vistos todos os dados de entrada utilizados para os cálculos dos esforços, sendo que em amarelo estão os dados que foram variados na análise FTA feita: massa do veículo, velocidade e raio de curva. Estes variam de acordo com características do veículo (massa e velocidade máxima) e raio de curvas. Neste último caso, como se trata de um veículo Formula, foram pesquisados raios de curvas de autódromos e optou-se pelo raio da menor curva de Interlagos. Quanto ao peso, definiu-se uma variação máxima de 20kg devido à capacidade do tanque de combustível do veículo (20l). Também foi inserida uma variação do peso do piloto com a introdução de um componente aleatório de até 1kg devido a possíveis variações quanto à ingestão de alimentos ou perda dos mesmos. Além disso, foi introduzido um componente

aleatório no coeficiente de atrito Pneu-Solo, para simular a variação dos tipos de pisos sobre os quais o veículo estaria trafegando. Tomou-se como base Nicolazzi, Rosa e Leal(2001), para definição dos coeficientes para diversos tipos de solo, conforme mostrado na Tabela 4.3. Adotou-se uma variação entre 0,9 e 0,7, o que representaria condições de pista de asfalto seco e molhado.

Tabela 4.2: Dados de entrada para cálculo dos esforços da Manga de Eixo

DADOS ENTRADA	
x	0,38
Ntd(N)	1178,0
m(kg)	320,00
Força peso(N)	3138,1
Ø Pneu - 20" (m)	0,51
Atrito Pneu -Solo	0,80
Entre eixos(m)	1,75
CG-Eixo Frontal(m)	0,96
CG-Eixo Traseiro(m)	0,79
CG-Solo(m)	0,38
R. efet. disco freio(m)	0,09
Veloc. Max.(m/s)	41,70
Aceleração(m/s ²)	7,00
Frenagem(m/s ²)	8,91
Largura(m)	1,49
Coef. Atrito Rolam.	0,011
R. curva(Interlagos)	1000,00
Peso do piloto(Kg)	60,4

Tabela 4.3: Coeficiente de atrito de adesão e escorregamento pneu solo(Nicolazzi, 2001)

Faces de borracha com	μ_o	μ_s
Asfalto ou concreto seco	0,8 a 0,9	0,75
Concreto molhado	0,8	0,7
Asfalto molhado	0,5 a 0,7	0,4 a 0,6
Pedriscos	0,6	0,5
Estrada de terra seca	0,7	0,65
Estrada de terra molhada	0,55	0,4 a 0,5
Neve	0,2	0,15
Gelo	0,1	0,07

Para o DOE foi utilizado o software estatístico livre Action v.1.0, como já apresentado. Através deste foi definido o DOE, quais os tratamentos que seriam usados e que seriam executadas três réplicas. Definiu-se esta quantidade de réplicas, pois como os testes seriam efetuados através de um pacote de simulação não haveria a possibilidade de erros nos experimentos. Devido a este mesmo motivo não foi feita aleatorização, uma vez que a utilização de um software de simulação deixa pouca margem a erros aleatórios. Esta definição também foi a base para a escolha da abordagem do DOE a ser usada. Mais uma vez, como será usado um pacote de simulação, não haveria limitação de recursos o que não justificaria um fatorial fracionado e sim uma abordagem de Fatorial Completo. Além disso, fatoriais completos são adequados “Quando vários fatores devem ser estudados em dois ou mais níveis e suas interações podem ser importantes”(Pizzolato, 2002).

Um resumo para os fatores e níveis em que foram feitos os experimentos é apresentado na Tabela 4.4. Para este estudo adotou-se o nível de significância de 5% (como já descrito na metodologia) para aceitar ou reprovar uma hipótese. Se o fator ou interação de fatores tiverem um $p\text{-valor} > 5\%$ haverá a aceitação da hipótese nula, pois teremos uma certeza de 95% de que as médias relativas às variações são iguais e que não há influência dos fatores em questão. Caso contrário, haverá rejeição da hipótese e aceitação de que aquele fator ou combinação de fatores influencia a resposta. No quesito ordem dos experimentos, como está sendo utilizada uma planilha para gerar os esforços e um software de simulação para o cálculo das tensões, também não há necessidade de aleatorização.

Tabela 4.4: Tabela níveis de experimentos x fatores

Fatores		Níveis		+	-
A	Velocidade(Km/h)	+	-	41,7	20
B	Peso (kg)	+	-	320	300
C	Raio de Curva (m)	+	-	1000	120
D	Área da seção	+	-	Original	5%
Réplicas		3			

As justificativas para os dados da Tabela 4.4 são:

- A+: 75 km/h (20m/s) – Aproximadamente metade da velocidade Máxima
- A-: 150 km/h (41,7m/s) – Velocidade Máxima do veículo (Formula SAE)

- B+: 320 kg– Maior peso possível do carro (Veículo c/ combustível (20 l) e piloto de 60 kg)
- B-: 300 kg- Menor peso possível do carro (Veículo s/ combustível e piloto de 60kg).
- C+: 1000m – Raio de curva comum em estradas
- C-: 120m - Raio de curva em pista de competição (menor raio de curva em Interlagos)
- D+: Área da seção original do projeto. Não foi definido um valor, pois se trata de uma seção variável ao longo do seu comprimento.
- D-: Redução da área em 5% devida à contração do alumínio fundido após solidificação. Valor aceito por literatura de processos de fundição
- E+: Limite de ruptura original definido para o material
- E-: Limite de ruptura original definido para o material considerando uma variação negativa de 5%.

Não se usará a princípio o fator E, pois, por definição, o limite de ruptura do material não pode ser menor ao já considerado em projeto. Caso as simulações mostrem que em todas as situações o limite tenha sido atingido, novas simulações serão feitas considerando um limite de ruptura menor para verificar os resultados.

Após a definição das corridas e tratamentos dos experimentos, utilizou-se a planilha de cálculo para gerar os esforços no componente para cada tratamento, respeitando a ordem dos experimentos como se os testes fossem efetuados com amostras reais. A Tabela 4.5 mostra os valores utilizados.

Tabela 4.5: Tabela dos esforços para cada tratamento

Tratamentos	A	B	C	D	R _{IB_Fren_Curv_}	F _{pl_Fren_Curv_}	F _{ps_Fren_Curv_}	F _{M_Fren_CUrv_}	F _{ib_Fren_Curv_}	Área seção	Limite ruptura
0	-1	-1	-1	-1	1511	2512	1084	1010	1188	-5%	=
a	1	-1	-1	-1	1617	2732	1178	1100	1298	-5%	=
b	-1	1	-1	-1	1999	2322	1026	915	1423	-5%	=
ab	1	1	-1	-1	2127	2444	1080	962	1492	-5%	=
c	-1	-1	1	-1	1350	2383	1025	959	1008	-5%	=
ac	1	-1	1	-1	1458	2760	1183	1116	1187	-5%	=
bc	-1	1	1	-1	1435	2569	1104	1036	1157	-5%	=
abc	1	1	1	-1	1510	2511	1083	1008	1110	-5%	=
d	-1	-1	-1	1	1532	2714	1167	1096	1307	=	=
ad	1	-1	-1	1	2045	2608	1144	1036	1648	=	=
bd	-1	1	-1	1	1603	2596	1122	1042	1219	=	=
abd	1	1	-1	1	1357	2471	1061	997	1053	=	=
cd	-1	-1	1	1	2135	2494	1101	983	1531	=	=
acd	1	-1	1	1	1437	2588	1112	1044	1168	=	=
bcd	-1	1	1	1	1473	2934	1254	1190	1279	=	=
abcd	1	1	1	1	1555	3002	1285	1217	1381	=	=
0	-1	-1	-1	-1	1524	2636	1135	1063	1260	-5%	=
a	1	-1	-1	-1	1629	2848	1225	1149	1366	-5%	=
b	-1	1	-1	-1	2077	2805	1225	1119	1809	-5%	=
ab	1	1	-1	-1	2151	2593	1142	1025	1608	-5%	=
c	-1	-1	1	-1	1386	2810	1200	1141	1231	-5%	=
ac	1	-1	1	-1	1439	2540	1092	1022	1074	-5%	=
bc	-1	1	1	-1	1457	2807	1202	1138	1291	-5%	=
abc	1	1	1	-1	1521	2640	1136	1063	1180	-5%	=
d	-1	-1	-1	1	1537	2759	1185	1115	1333	=	=
ad	1	-1	-1	1	2007	2373	1046	936	1462	=	=
bd	-1	1	-1	1	1592	2487	1077	995	1156	=	=
abd	1	1	-1	1	2145	2559	1128	1010	1581	=	=
cd	-1	-1	1	1	2141	2531	1116	999	1560	=	=
acd	1	-1	1	1	1430	2515	1082	1013	1128	=	=
bcd	-1	1	1	1	1445	2600	1117	1048	1105	=	=
abcd	1	1	1	1	1553	2979	1276	1207	1368	=	=
0	-1	-1	-1	-1	1495	2359	1021	945	1100	-5%	=
a	1	-1	-1	-1	1631	2863	1232	1155	1375	-5%	=
b	-1	1	-1	-1	2050	2640	1157	1049	1675	-5%	=
ab	1	1	-1	-1	2146	2566	1131	1013	1587	-5%	=
c	-1	-1	1	-1	1342	2267	977	910	950	-5%	=
ac	1	-1	1	-1	1437	2487	1071	1000	1048	-5%	=
bc	-1	1	1	-1	1443	2655	1139	1073	1205	-5%	=
abc	1	1	1	-1	1523	2654	1142	1069	1187	-5%	=
d	-1	-1	-1	1	1507	2475	1068	994	1166	=	=
ad	1	-1	-1	1	1598	2542	1099	1019	1188	=	=
bd	-1	1	-1	1	2001	2336	1031	920	1434	=	=
abd	1	1	-1	1	2127	2447	1081	963	1495	=	=
cd	-1	-1	1	1	1376	2664	1140	1079	1155	=	=
acd	1	-1	1	1	1442	2544	1094	1024	1078	=	=
bcd	-1	1	1	1	1415	2353	1015	944	1040	=	=
abcd	1	1	1	1	1523	2656	1143	1070	1189	=	=

Os esforços e as direções de seus vetores são mostrados na Figura 4.11. São baseados nos trabalhos de Klava(2003) e Nicolazzi, Rosa e Leal (2001).

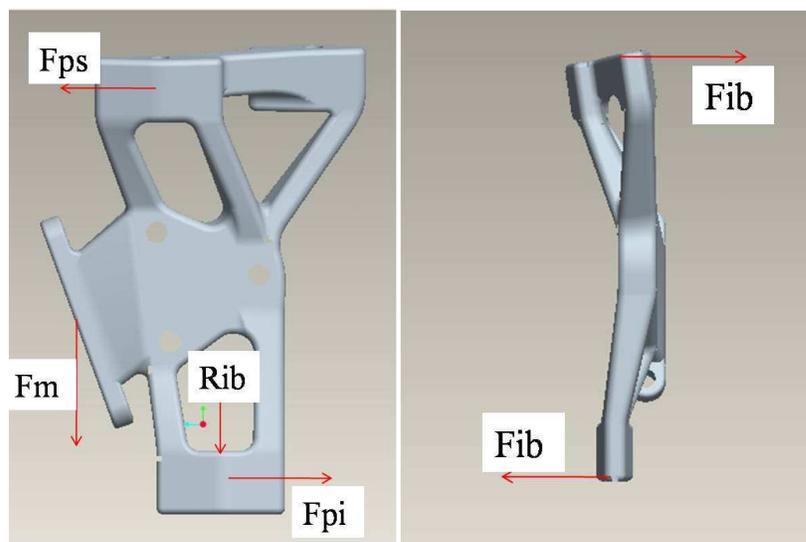


Figura 4.11: Esforços sobre a manga de eixo

Com o modelo já definido, foram efetuadas diversas simulações, cada uma considerando um dos esforços já apresentados na Tabela 4.5. Os resultados das simulações podem ser vistos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Resultados das simulações (Tensões de Von Misses) e Deslocamentos Máximos

Tratamentos	A	B	C	D	Y_Von Misses	Desloc (mm)
0	-1	-1	-1	-1	137,2	0,38
a	1	-1	-1	-1	149,0	0,42
b	-1	1	-1	-1	142,8	0,45
ab	1	1	-1	-1	150,7	0,48
c	-1	-1	1	-1	125,1	0,33
ac	1	-1	1	-1	145,1	0,38
bc	-1	1	1	-1	137,5	0,37
abc	1	1	1	-1	134,7	0,36
d	-1	-1	-1	1	136,9	0,40
ad	1	-1	-1	1	145,1	0,50
bd	-1	1	-1	1	130,9	0,38
abd	1	1	-1	1	119,6	0,33

<i>cd</i>	-1	-1	1	1	142,4	0,47
<i>acd</i>	1	-1	1	1	127,7	0,36
<i>bcd</i>	-1	1	1	1	142,0	0,39
<i>abcd</i>	1	1	1	1	148,0	0,42
<i>0</i>	-1	-1	-1	-1	143,9	0,40
<i>a</i>	1	-1	-1	-1	156,3	0,43
<i>b</i>	-1	1	-1	-1	173,8	0,56
<i>ab</i>	1	1	-1	-1	160,0	0,51
<i>c</i>	-1	-1	1	-1	148,7	0,39
<i>ac</i>	1	-1	1	-1	134,0	0,35
<i>bc</i>	-1	1	1	-1	150,7	0,39
<i>abc</i>	1	1	1	-1	141,7	0,38
<i>d</i>	-1	-1	-1	1	139,0	0,41
<i>ad</i>	1	-1	-1	1	135,5	0,45
<i>bd</i>	-1	1	-1	1	125,4	0,36
<i>abd</i>	1	1	-1	1	146,2	0,49
<i>cd</i>	-1	-1	1	1	144,6	0,48
<i>acd</i>	1	-1	1	1	124,1	0,35
<i>bcd</i>	-1	1	1	1	125,9	0,35
<i>abcd</i>	1	1	1	1	147,0	0,42
<i>0</i>	-1	-1	-1	-1	129,3	0,36
<i>a</i>	1	-1	-1	-1	149,8	0,39
<i>b</i>	-1	1	-1	-1	163,3	0,52
<i>ab</i>	1	1	-1	-1	158,5	0,50
<i>c</i>	-1	-1	1	-1	119,7	0,31
<i>ac</i>	1	-1	1	-1	131,3	0,34
<i>bc</i>	-1	1	1	-1	142,4	0,38
<i>abc</i>	1	1	1	-1	142,4	0,38
<i>d</i>	-1	-1	-1	1	124,7	0,37
<i>ad</i>	1	-1	-1	1	128,2	0,37
<i>bd</i>	-1	1	-1	1	133,4	0,44
<i>abd</i>	1	1	-1	1	139,8	0,46
<i>cd</i>	-1	-1	1	1	129,0	0,36
<i>acd</i>	1	-1	1	1	123,3	0,34
<i>bcd</i>	-1	1	1	1	116,1	0,33
<i>abcd</i>	1	1	1	1	131,0	0,37

Com os resultados em mãos, partiu-se para a o estudo da Análise de Variância (ANOVA), primeiramente para a tensão de Von Mises. Foram introduzidos no programa estatístico os dados de tratamento e respostas e o mesmo retornou os resultados da ANOVA. Na Tabela 4.7, podem-se observar os P-valores para cada fator e suas interações. Baseado nela pode-se concluir que:

- Os fatores B(peso do veículo), C(raio de curva) e D(área da seção) são os que individualmente mais contribuem para a variação da tensão de Von Mises com p-valores respectivamente de 4,5%, 1,5% e 0,03%. Esses valores indicam a probabilidade de que as médias não sejam iguais, ou seja, rejeitando a hipótese H_0 . A influência da variação da área resistente da peça é muito maior que os demais fatores, mas os fatores B e C não podem ser desprezados. O fator A (velocidade do veículo), no entanto, não fornece sozinho uma contribuição significativa para a variação da tensão de Von Mises.
- A avaliação das interações de dois fatores mostra que as variações mais significativas ocorrem quando se está lidando com os fatores CD(raio + área) com P-valor de 2%. Desconsidera-se, apesar do p-valor relativamente pequeno, a interação BD(peso + área), pois o p-valor ficou acima de 5%.
- A avaliação das interações de três fatores mostra que os fatores B, C e D em conjunto não atingem um nível de significância considerável (apenas 27%). O mais interessante é que a interação dos fatores A, B e D tem um P-valor de 1%. Apesar do fator A(velocidade do veículo) individualmente não ter influência, quando combinado com a variação do peso (fator B) e a variação da área resistente (fator D) promove alterações consideráveis na resposta de tensão.

Tabela 4.7: Tabela ANOVA de análise da resposta de Tensão de Von Misses

<i>Tabela da Anova</i>	<i>G.L.</i>	<i>Soma Quad</i>	<i>Quadrado Médio</i>	<i>Estat. F</i>	<i>P-valor</i>
A	1	86,135	86,135	1,001	0,325
B	1	373,525	373,525	4,341	0,045
C	1	566,500	566,500	6,584	0,015
D	1	1431,175	1431,175	16,633	0,000
A:B	1	0,880	0,880	0,010	0,920
A:C	1	56,117	56,117	0,652	0,425
B:C	1	0,542	0,542	0,006	0,937
A:D	1	4,025	4,025	0,047	0,830
B:D	1	321,885	321,885	3,741	0,062
C:D	1	518,110	518,110	6,021	0,020
A:B:C	1	216,325	216,325	2,514	0,123
A:B:D	1	635,835	635,835	7,390	0,011
A:C:D	1	0,725	0,725	0,008	0,927
B:C:D	1	105,317	105,317	1,224	0,277
A:B:C:D	1	49,005	49,005	0,570	0,456
Resíduos	32	2753,447	86,045		
Total	47	7119,550			

Pode-se observar também nos gráficos de interações da Figura 4.12 para as interações dos pares de fatores A, B, C e D que temos dois tipos básicos de comportamento. Se as retas se mantêm quase paralelas significa que a interação entre os fatores é baixa. A inclinação, ou seja, a resposta varia apenas devido ao fator da abscissa, isto acontece para os pares AB, AD e BC. Assim, a partir da observação dos gráficos é possível inferir que a interação entre esses pares é pequena.

Se as retas não são paralelas ou se cruzam entre si significa que existe uma forte interação entre os fatores. É o caso das interações BD e CD. No entanto, deve-se ter cuidado em considerar apenas a avaliação gráfica, pois se houver uma definição de confiabilidade é necessário fazer uma análise conjunta com a tabela da ANOVA. É o caso da interação BD que apesar do gráfico mostrar uma grande interação, a tabela ANOVA mostra que o p-valor está acima do nível de significância definido para este trabalho que é de 5%.

Outras informações retiradas dos gráficos, Figura 4.12, são quais níveis de cada fator mais influenciam a resposta. Por exemplo, do gráfico CD temos que para D(área) - e C (raio da curva) - é quando a resposta tem sua maior magnitude para esta interação em específico. Para a combinação ABD a tensão de Von Misses cresce quando A(velocidade) e B(peso) estão nos níveis maiores (+) e quando D(área) está no nível mais baixo (-).

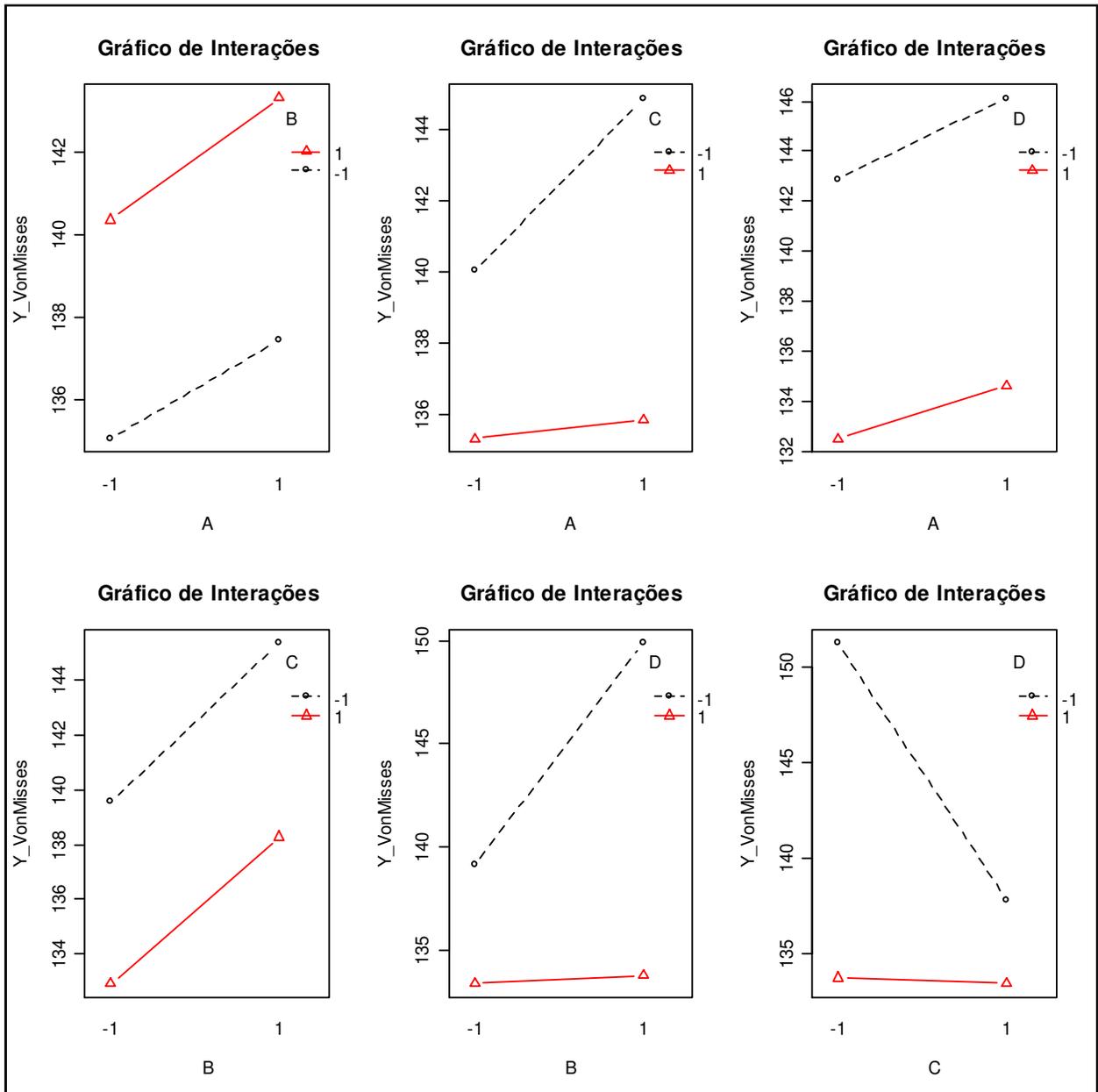


Figura 4.12: Gráfico de interações análise DOE-falha-resposta tensão Von Misses

Isto pode ser confirmado também pela análise dos gráficos dos efeitos principais Figura 4.13, onde se verifica que a velocidade, fator A, no maior nível (+) aumenta a resposta tensão, apesar da inclinação da reta ser pequena. O fator B, peso, também causa o mesmo efeito, aumentando a tensão também quando está no nível maior. Já quando os fatores C, peso, e D, área da seção, estão nos seus níveis mínimos é quando a resposta tensão é a maior.

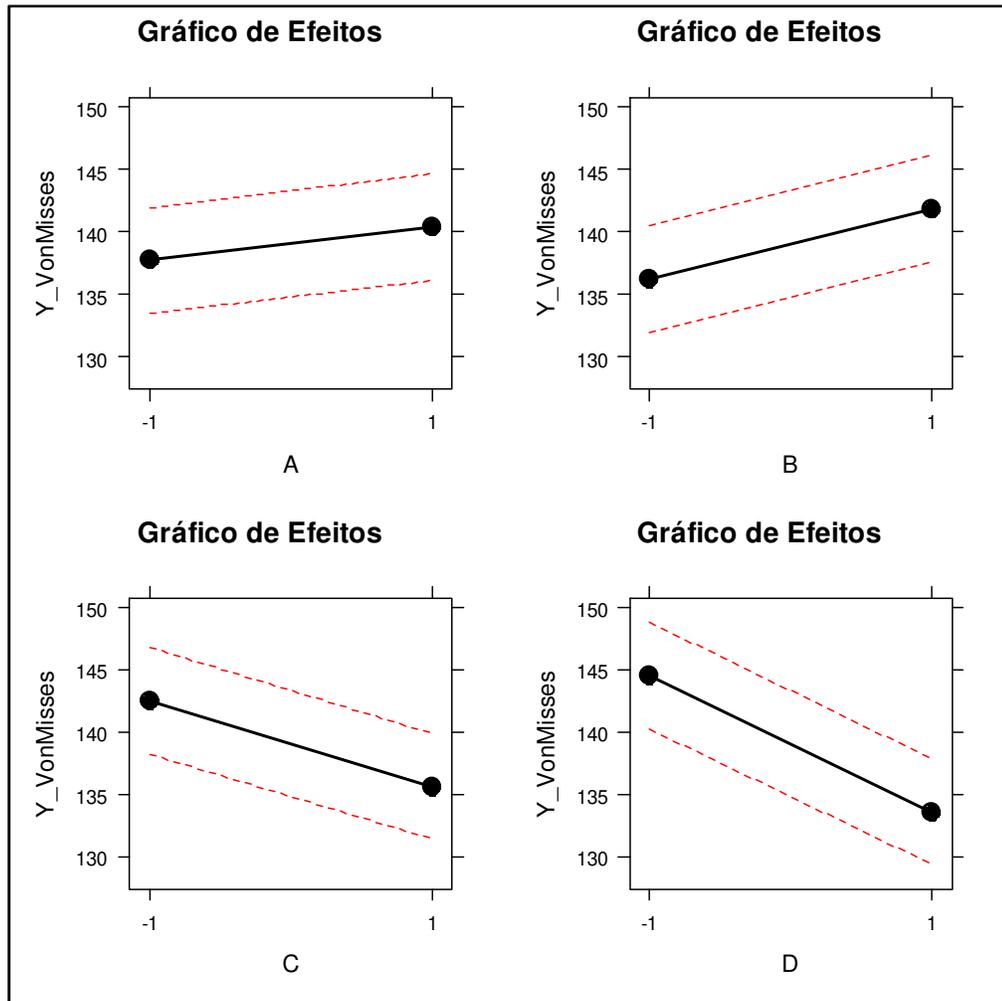


Figura 4.13: Gráfico dos efeitos principais na análise DOE-falha-resposta tensão Von Misses

Outra questão a ser analisada é a normalidade dos dados, apesar dos experimentos terem sido conduzidos em software de simulação e a aleatoriedade introduzida ser uma função da planilha de cálculo utilizada, ou seja, espera-se que os dados sejam sempre normais, analisou-se o gráfico do Papel de Probabilidade para seguir a metodologia proposta.

Analisando-se o gráfico do Papel de Probabilidade, Figura 4.14, pode-se notar graficamente que os pontos não se dispersam muito além da reta de ajuste de normalidade. Além disso, o p-valor apresenta uma probabilidade de 85,4% demonstrando que os dados são normais, o que é bem aceitável. No entanto, por serem oriundos de simulações, esperava-se um p-valor maior, acima de 90%. Isto pode ser explicado pela adoção de uma aleatorização do peso do piloto e do coeficiente de atrito pneu-solo, pois suas variações podem ter afetado o índice de

normalidade e a variação final da interações. Isso, por este se tratar de um exemplo de aplicação da metodologia, introduz maior robustez às conclusões apresentadas.

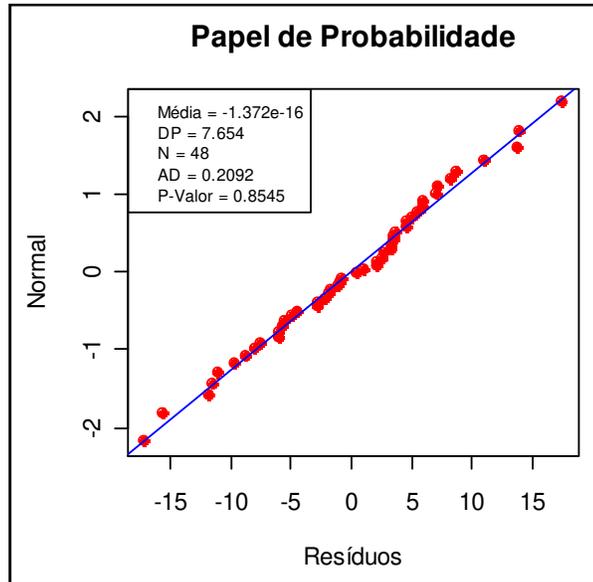


Figura 4.14: Análise dos resíduos - normalidade DOE

Analisando-se a Figura 4.15 e a Figura 4.16, pode-se ver que não há nenhuma tendência dos dados, o que leva a conclusão de que os resíduos são independentes e de que a variância é constante. O que, em conjunto com a Figura 4.14, permite concluir que os resultados seguem uma distribuição normal aleatória.

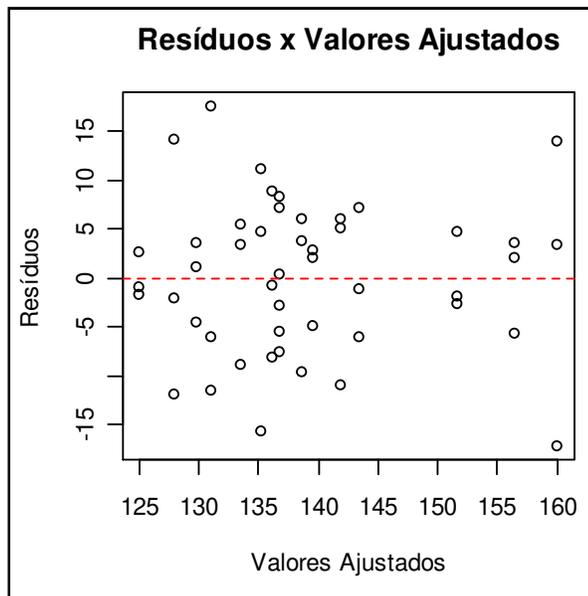


Figura 4.15: Gráfico Resíduos x Valores ajustados DOE

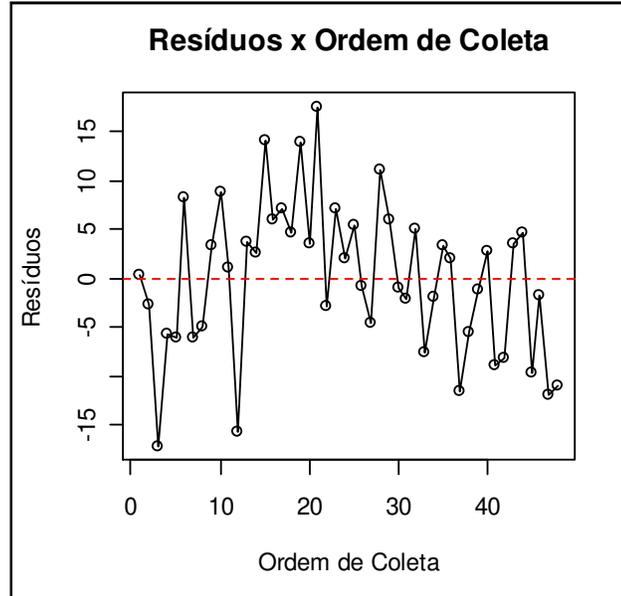


Figura 4.16: Gráfico de Resíduos x Ordem de coleta DOE

A conclusão desta primeira etapa é que o que mais influência na resposta é a interação entre o fator peso do veículo e o raio de curva na qual o veículo transita. Mas será que os níveis de tensão seriam suficientes para gerar a falha? A partir deste ponto, seguindo a metodologia proposta, verifica-se se os níveis atingidos nas simulações seriam suficientes para a falha. Primeiro, foi analisado o modelo para verificar em que região do componente está ocorrendo a maior magnitude dos esforços. Isto pode ser observado analisando a saída gráfica das simulações, Figura 4.17. Nesta pode ser visto que as maiores solicitações encontram-se na região inferior do componente. Este comportamento se repete para todos os experimentos realizados mudando apenas a magnitude das respostas. A representação gráfica é semelhante para todos os tratamentos mudando apenas a magnitude da tensão resultante. Isto comprova que as regiões mais solicitadas coincidem com a região onde ocorreu a falha do componente. Mas será que a magnitude dos esforços foi suficiente para gerar a falha? Para isto construiu-se um gráfico de barras, Figura 4.18, com as tensões encontradas nas simulações para os diversos tratamentos e estas foram comparadas com os limites de ruptura e escoamento do material usado no componente, que foi o Alumínio A356.0 T6 SandCast (fundido em areia). Segundo o site www.matweb.com este material possui as propriedades descritas na

Tabela 4.8. Nesta comparação apesar de a grande maioria dos tratamentos terem ultrapassado o limite de escoamento (linha tracejada), nenhum atingiu o limite de ruptura, o que por si só não caracteriza apenas os esforços como causa da falha de ruptura da Manga de Eixo.

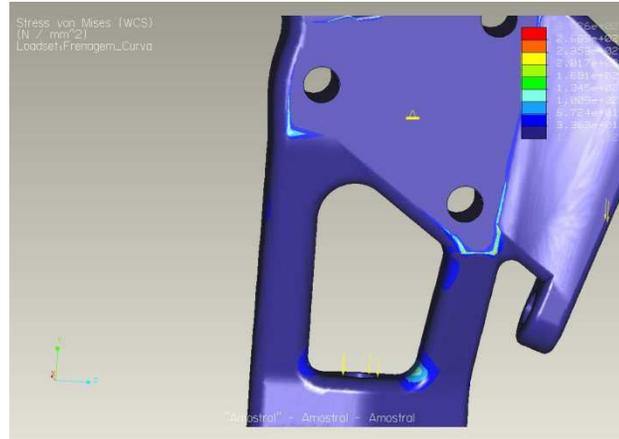


Figura 4.17: Representação gráfica das regiões mais solicitadas do componente

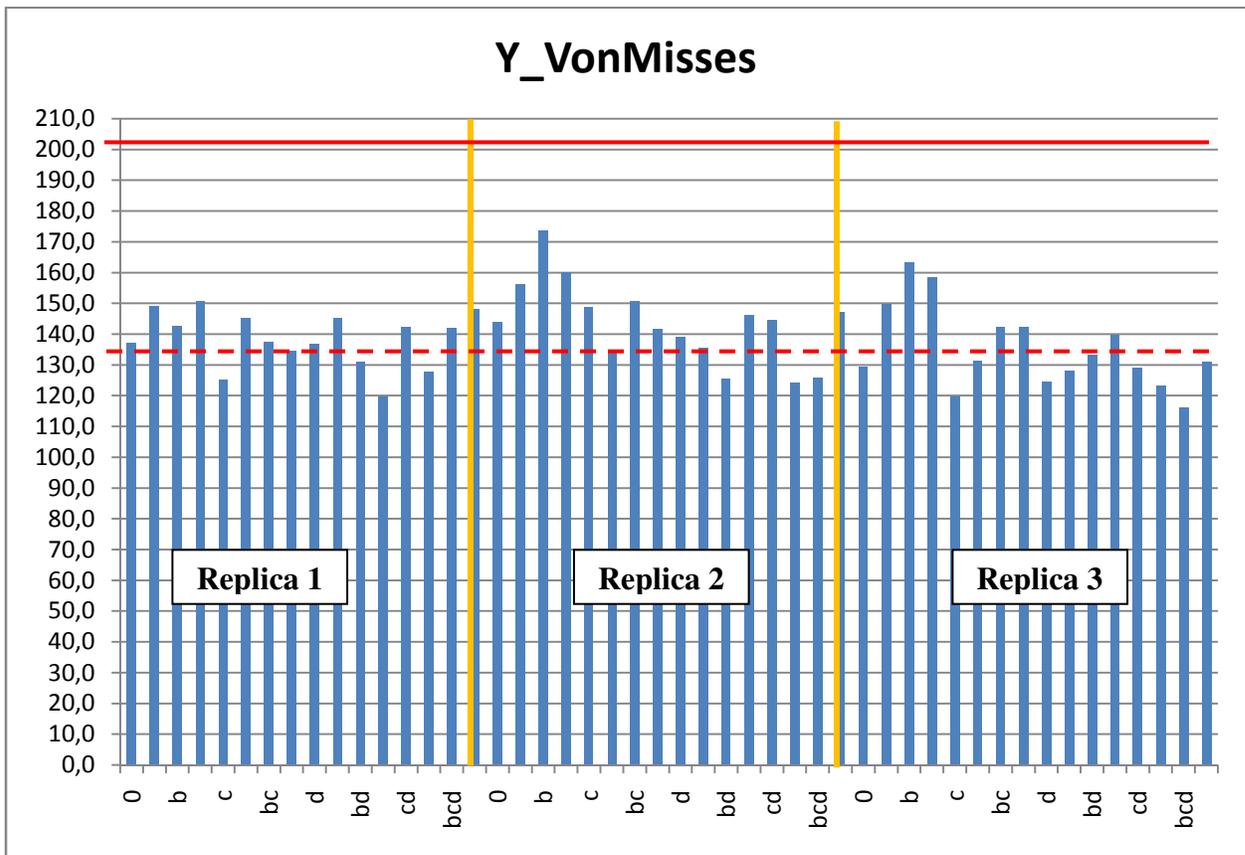


Figura 4.18: Comparação das Tensões de Von Mises e Tensão de Ruptura e Escoamento para o A356-T6

Tabela 4.8: Tabela de propriedades do A356.0-T6 (fonte: www.matweb.com)

Aluminio 356.0-T6, SandCast	
Propriedades Físicas	Sistema Métrico
Densidade	2.68 g/cc
Propriedades Mecânicas	Sistema Métrico
Dureza, Brinell	55.0 - 90.0
Tensão de Ruptura	≥ 207 MPa
Tensão de Escoamento	≥ 138 MPa
Elongação na Ruptura	≥ 3.00 %
Módulo de Elasticidade	72.4 GPa
Coefficiente de Poisson	0.330
Tensão de fadiga	60.0 MPa
	# of Cycles 5.00e+8
Usinabilidade	50%

A mesma análise foi feita para o ramo da FTA (Figura 4.9) relativo ao deslocamento sob ação dos esforços definidos.

Efetuada uma análise ANOVA mostrada na Tabela 4.9 e através dos gráficos de efeitos principais para os fatores individuais, Figura 4.19, pode-se observar também que o efeito A, assim como na resposta Von Misses, pouca influência tem sobre a resposta “deslocamento máximo” com um p-valor de 48% e baixa inclinação da reta. Também como na análise para a tensão de Von Misses, B, com p-valor de 2%, e C, com p-valor de 0%, são os que mais influenciam, principalmente o fator C (raio da curva). Isto também pode ser visto na inclinação das retas destes fatores na Figura 4.19. Pode-se observar na Figura 4.19 que a resposta, deslocamento, aumenta quando o fator B, peso, está no máximo e o fator C, raio, está no mínimo. No entanto, o fator D no caso do deslocamento pouca influência tem sobre a resposta, ao contrário da análise feita na tensão de Von Misses, com pequena inclinação da reta e com um p-valor de 57%.

Tabela 4.9: ANOVA para deslocamento máximo da Manga de eixo

<i>Tabela da Anova</i>	<i>G.L.</i>	<i>Soma Quad</i>	<i>Quadrado Médio</i>	<i>Estat. F</i>	<i>P-valor</i>
A	1	0,001	0,001	0,502	0,484
B	1	0,010	0,010	5,802	0,022
C	1	0,039	0,039	23,207	0,000
D	1	0,001	0,001	0,321	0,575
A:B	1	0,001	0,001	0,321	0,575
A:C	1	0,003	0,003	2,008	0,166
B:C	1	0,006	0,006	3,393	0,075
A:D	1	0,000	0,000	0,020	0,888
B:D	1	0,018	0,018	10,620	0,003
C:D	1	0,011	0,011	6,504	0,016
A:B:C	1	0,006	0,006	3,393	0,075
A:B:D	1	0,007	0,007	3,935	0,056
A:C:D	1	0,002	0,002	1,285	0,265
B:C:D	1	0,004	0,004	2,429	0,129
A:B:C:D	1	0,003	0,003	1,626	0,211
Resíduos	32	0,053	0,002		
Total	47	0,162			

Quando se analisa a interação de dois fatores a interação entre BC se mostra significativa com p-valor de 7%, mas não o suficiente para considerá-la pelos critérios adotados. No entanto, o que mais potencializa o deslocamento quando os fatores B e C são estudados é o fator D (área resistente) principalmente quando o fator D está no nível baixo (menor área). Isto se pode facilmente observado na Figura 4.20 interações BD e CD com p-valores de 0,3% e 1,5%, respectivamente.

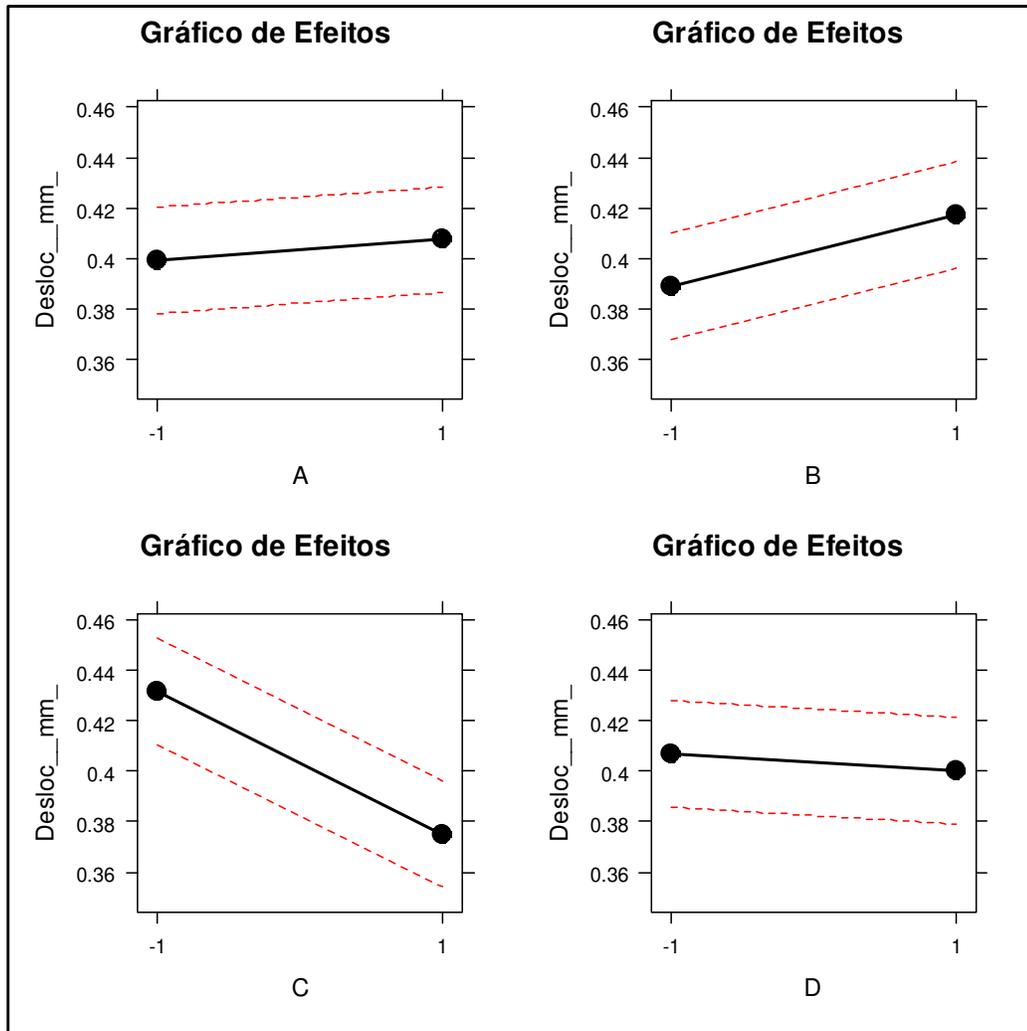


Figura 4.19: Gráfico dos efeitos principais análise DOE - resposta deslocamento

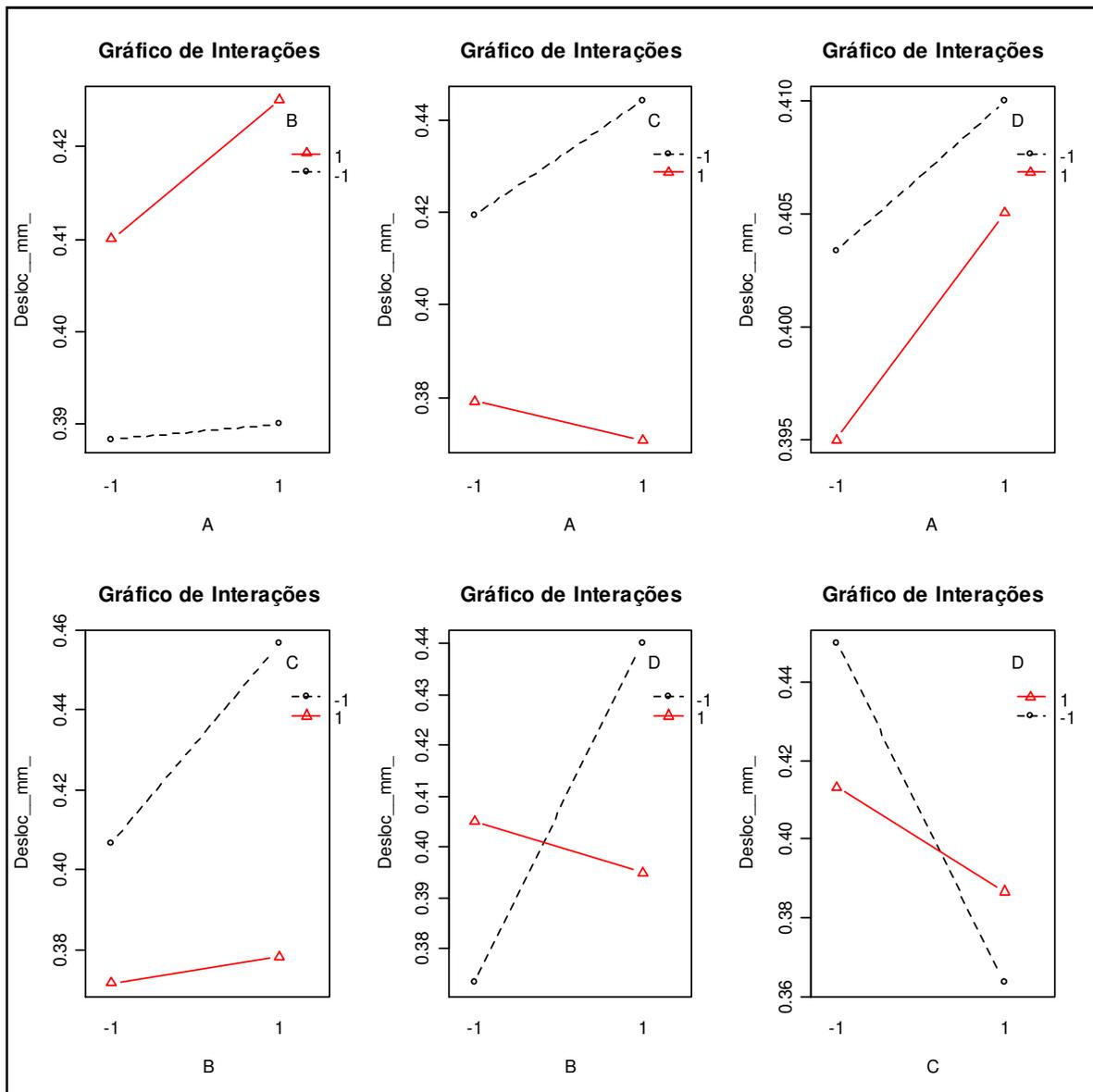


Figura 4.20:Gráfico de interações análise DOE - resposta deslocamento

Quando se analisa a interação entre três fatores, nota-se que as combinações ABC e ABD têm influência importante, com p-valor de 7,5% e 5,6%,respectivamente,mas não tão forte como as interações anteriormente analisadas e não o suficiente para atingir o nível de significância de 5%.

Analisando-se as magnitudes dos deslocamentos (Figura 4.21),verifica-se que os mesmos não ultrapassaram 0,6mm, o que seria muito pouco para interferência em algum componente adjacente. Isto permite descartar este ramo da árvore de falha como candidato a causar a falha.

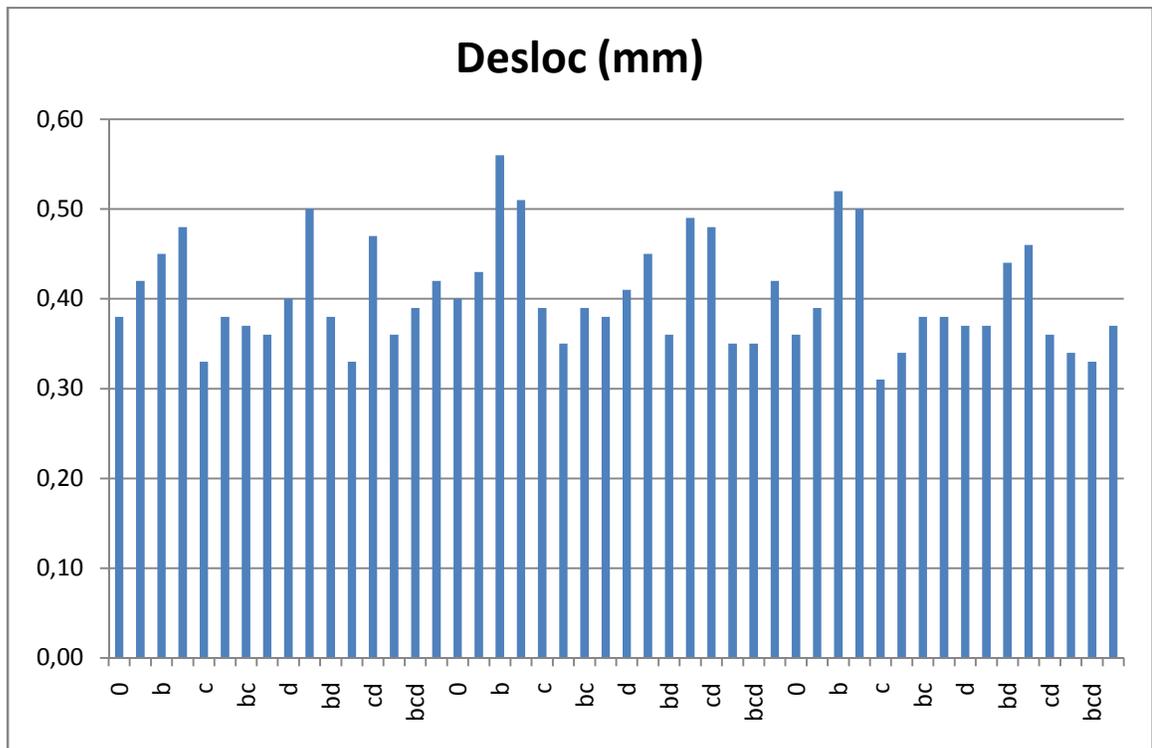


Figura 4.21: Deslocamentos após estudo de DOE

Assim, mesmo ainda não tendo uma conclusão definitiva, os resultados até aqui obtidos já permitem a reformulação do diagrama FTA da Figura 4.9, conforme a Figura 4.22.

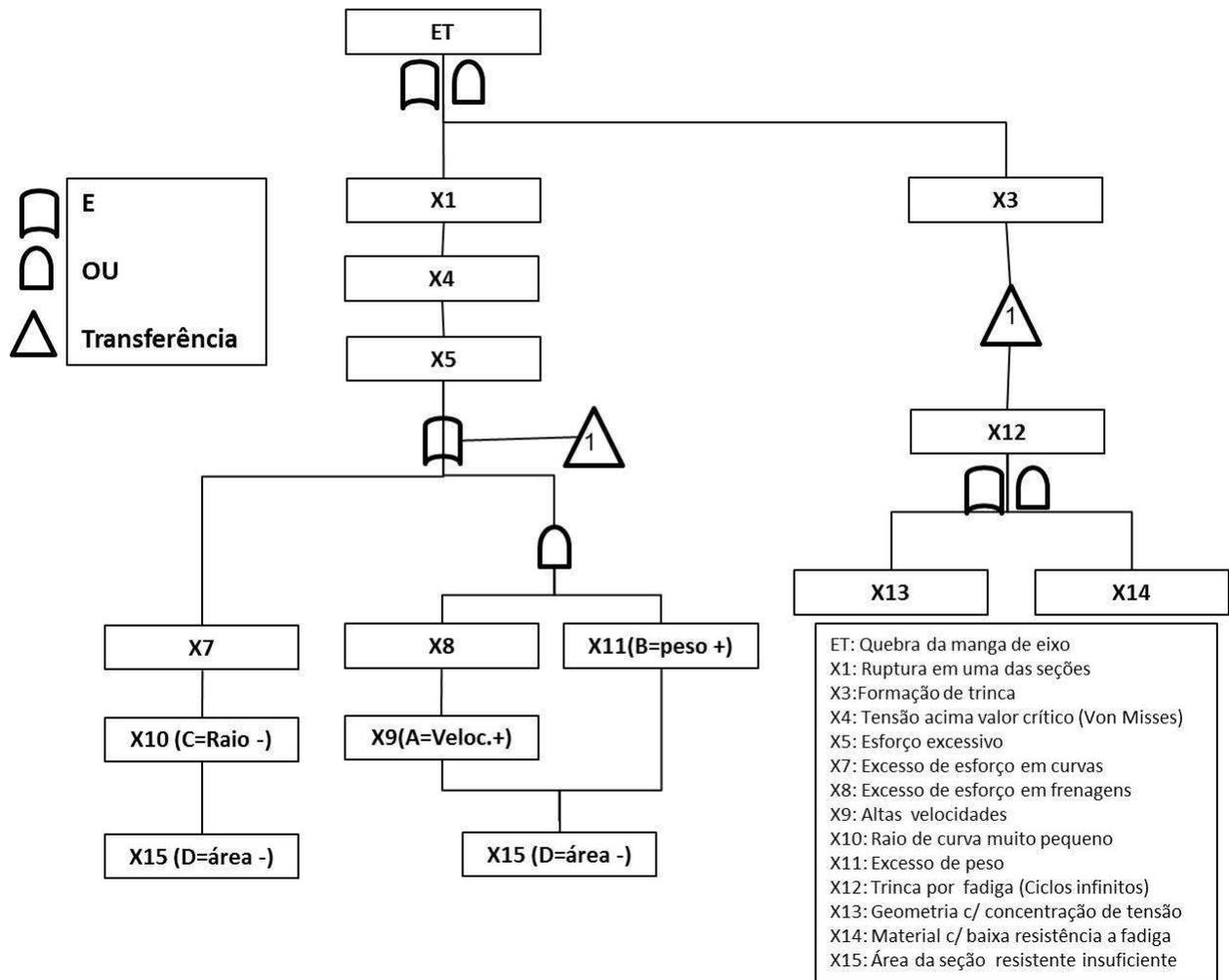


Figura 4.22: FTA atualizado após DOE de Tensão e Deslocamento

Como verificado nos DOE sobre tensão e deslocamento, existe uma interação dos fatores ABD. Isto se deve a situações de frenagem, independente do raio da curva, quando há uma desaceleração elevada em combinação com outros fatores (peso do veículo e área da seção resistente). Para que haja influência na tensão de modo significativo para que a falha ocorra, deve haver a combinação dos 3 fatores. Isto, transportado para a Árvore de Falha, é o ramo que engloba os eventos X8, X9, X11 e X15.

Há ainda a interação CD, também com um nível de significância elevado. Isto se deve a situações com curvas fechadas (raio pequeno) e o componente com baixa área resistente. Assim, a combinação destes dois fatores é outra possível causa de falha e é representada pelo ramo contendo os eventos X7, X10, X15.

Um ponto que se deve destacar é que individualmente o peso, o raio de curva e a área da seção são muito significativos. Principalmente a área da seção. No entanto, como estes aparecem representados em outros ramos não serão gerados ramos específicos para eles. Caso um dos fatores não estivesse presente nas interações o mesmo deveria ser representado separadamente.

Além disso, a partir da conclusão de que o deslocamento não é significativa para promover a interferência com qualquer outro elemento do conjunto, Figura 4.21, não chegando a 0,6mm de deslocamento, elimina-se este ramo do FTA.

Apesar das análises quanto à tensão de Von Misses quanto ao deslocamento não atingirem níveis críticos que levem à ruptura, os resultados mostram que os níveis de tensão são significativamente altos a ponto de poder afetar a resistência a fadiga do componente. Por isso, os ramos da árvore de falhas relativos aos esforços sofridos pelo componente são mantidos. E os mesmos, assim como previsto na árvore de falha preliminar, servirão com dados de entrada para a posterior análise de fadiga.

4.2.2 DOE Fadiga

Seguindo a metodologia proposta foi construído um DOE para a falha por fadiga que foi proposta no FTA. Para montar este DOE tomou-se como base o conjunto de resultados obtidos quanto a análise da resposta da tensão de Von Misses. Neste estudo não foram alteradas as relações de esforços, ou seja, suas direções e magnitudes em relação ao estudo conduzido anteriormente. Também se manteve inalterado o modelo matemático para rodar as simulações.

Para o estudo de fadiga foram adotados os seguintes parâmetros:

Kc: coeficiente de confiabilidade para 99%

Kd: Coeficiente de temperatura = 1 ($T < 350^{\circ}\text{C}$)

Vida infinita: 10^6

O motivo pelo qual foram adotados apenas estes coeficientes foi porque o programa de análise já considera no estudo de fadiga os elementos relativos à geometria. No entanto não é considerada a confiabilidade, nem a relação de temperatura. Além disso, considerou-se um carregamento tipo Pico-Pico, constante.

Foram empregadas as mesmas combinações de esforços já utilizados nos estudos de tensão e deslocamento para reduzir a variabilidade do estudo. A Figura 4.23 mostra o resultado da vida em fadiga em detalhes. A legenda mostra o expoente da base 10 que descreve a vida.

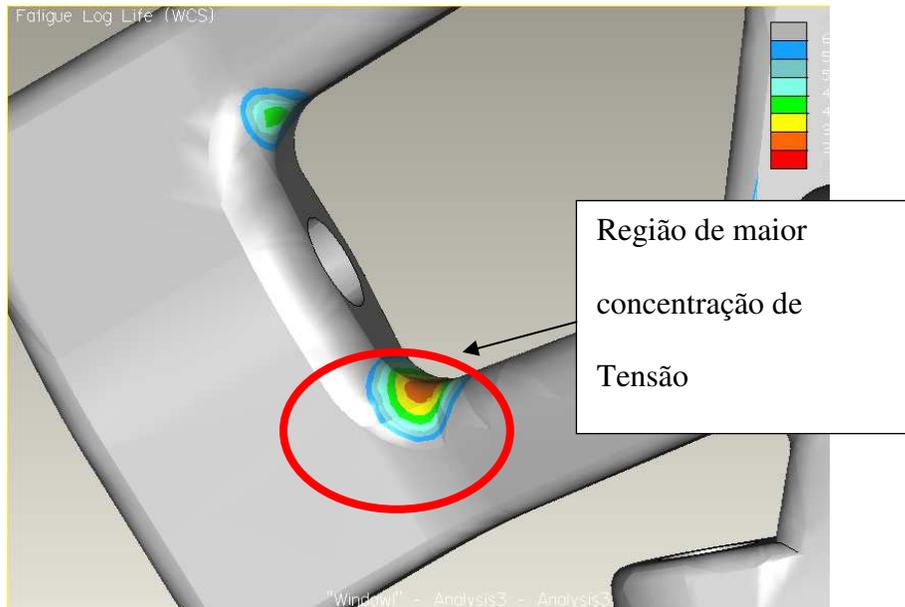


Figura 4.23: Região de maior concentração de tensões

Nas simulações preliminares observou-se um comportamento diferente do esperado inicialmente. Esperava-se que a falha por fadiga pudesse ocorrer em níveis de vida acima de 10^4 ciclos. No entanto, observou-se um comportamento de falha com ciclo na ordem de, no máximo, 10^2 ciclos.

Estudando um pouco mais sobre o fenômeno da fadiga descobriu-se que existem dois tipos de modelos para falha por fadiga. O primeiro, que seria o mais comum e que se esperava no início deste estudo, é a fadiga de alto ciclo. Esta se caracteriza por solicitações cíclicas que produzem níveis de tensão inferiores ao limite de escoamento do material. Para esse modelo, a existência de características geométricas que podem favorecer a concentração de tensões leva consequentemente ao surgimento de trincas. O segundo seria a fadiga de baixo ciclo, que se caracteriza por solicitações cíclicas com níveis elevados de deformação ou acima da tensão de escoamento. Seria próximo ao modo de falha definido por Klava(2003), na Tabela 4.1, como fratura dúctil, embora neste caso só ocorra na presença de tensões variáveis. A fratura dúctil pode ocorrer também, em alguns materiais, sob solicitação constante e suficientemente intensa.

Uma análise mais profunda mostra que esse seria mesmo o tipo de fadiga esperado, já que o número de ciclos sofrido pelo componente analisado foi pequeno, certamente abaixo de 10 mil ciclos e provavelmente abaixo de 100 ciclos.

Isto leva à conclusão de que o comportamento visto durante a realização do DOE Tensão e Deslocamento, com a grande maioria das respostas tensões de Von Misses acima do limite de escoamento do material, pode não ser a causa direta da ruptura conforme imaginado no FTA preliminar. Por outro lado, as simulações feitas indicaram a ocorrência do fenômeno de fadiga de baixo ciclo e, conseqüentemente, à fratura dúctil por fadiga. Devido a esta descoberta o FTA da Figura 4.22, deve ser acrescido do modo evento Trinca por fadiga (Baixos Ciclos) X12B, tomando a forma da Figura 4.24. Dessa forma elimina-se o ramo relativo à Trinca por fadiga (Altos Ciclos) para esse caso específico

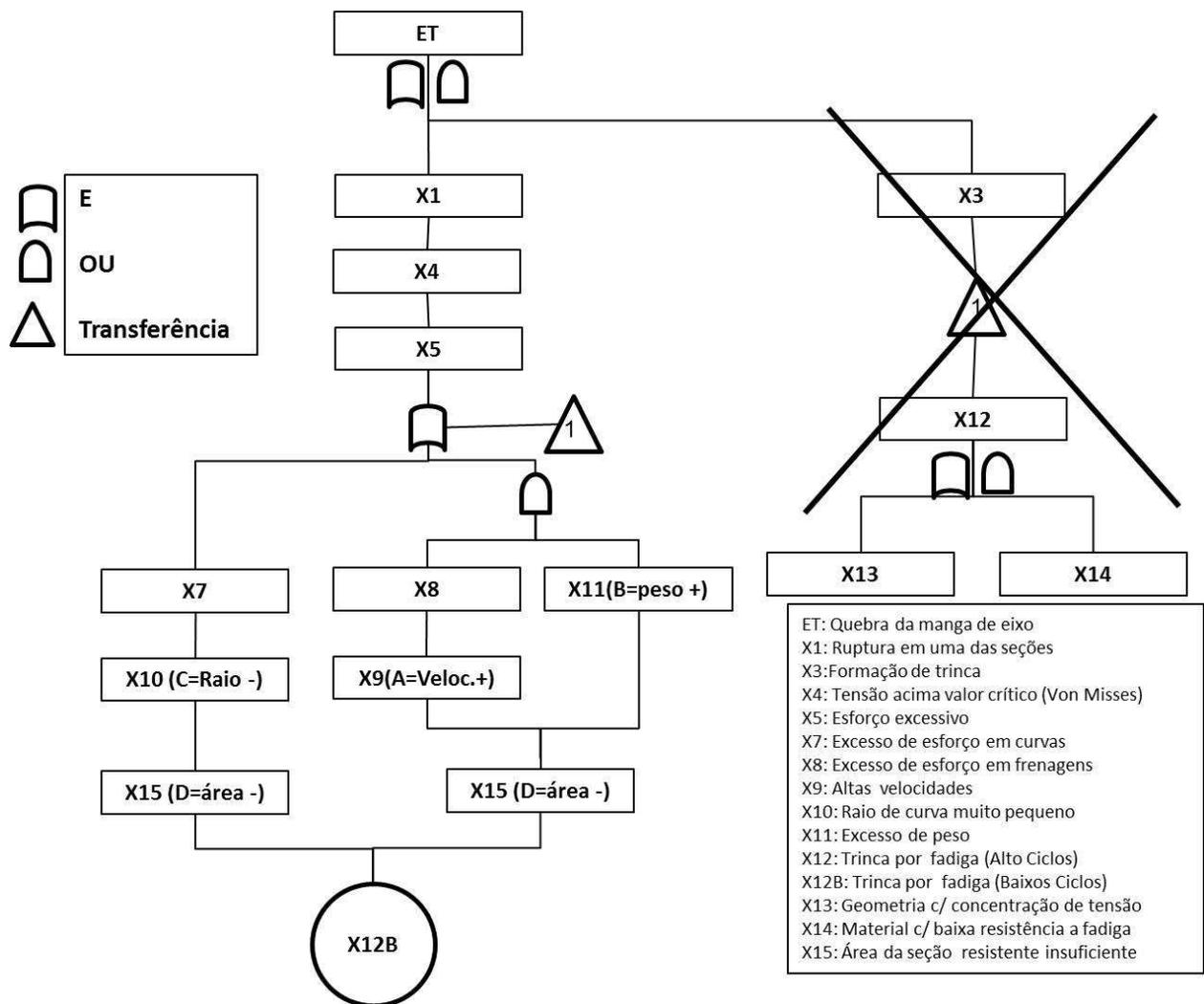


Figura 4.24: FTA após análise de fadiga

Com isto conclui-se que a falha primária mais provável da quebra da Manga de Eixo do Formula SAE foi devido à fadiga de baixo ciclo com fratura dúctil. Fenômeno este ativado pelo

fato de que os esforços ultrapassaram o limite de escoamento pela combinação dos fatores, área resistente pequena + raio de curva pequeno ou pela combinação dos fatores peso elevado + velocidade elevada + área resistente pequena.

Esta conclusão é corroborada pelas análises do componente em questão tais como:

1. Região de quebra na área inferior da Manga, conforme observado nas análises pelo MEF;
2. Componente quebrou com baixa quilometragem e pouco uso.

Com essas considerações, o FTA final deste estudo será conforme a Figura 4.25:

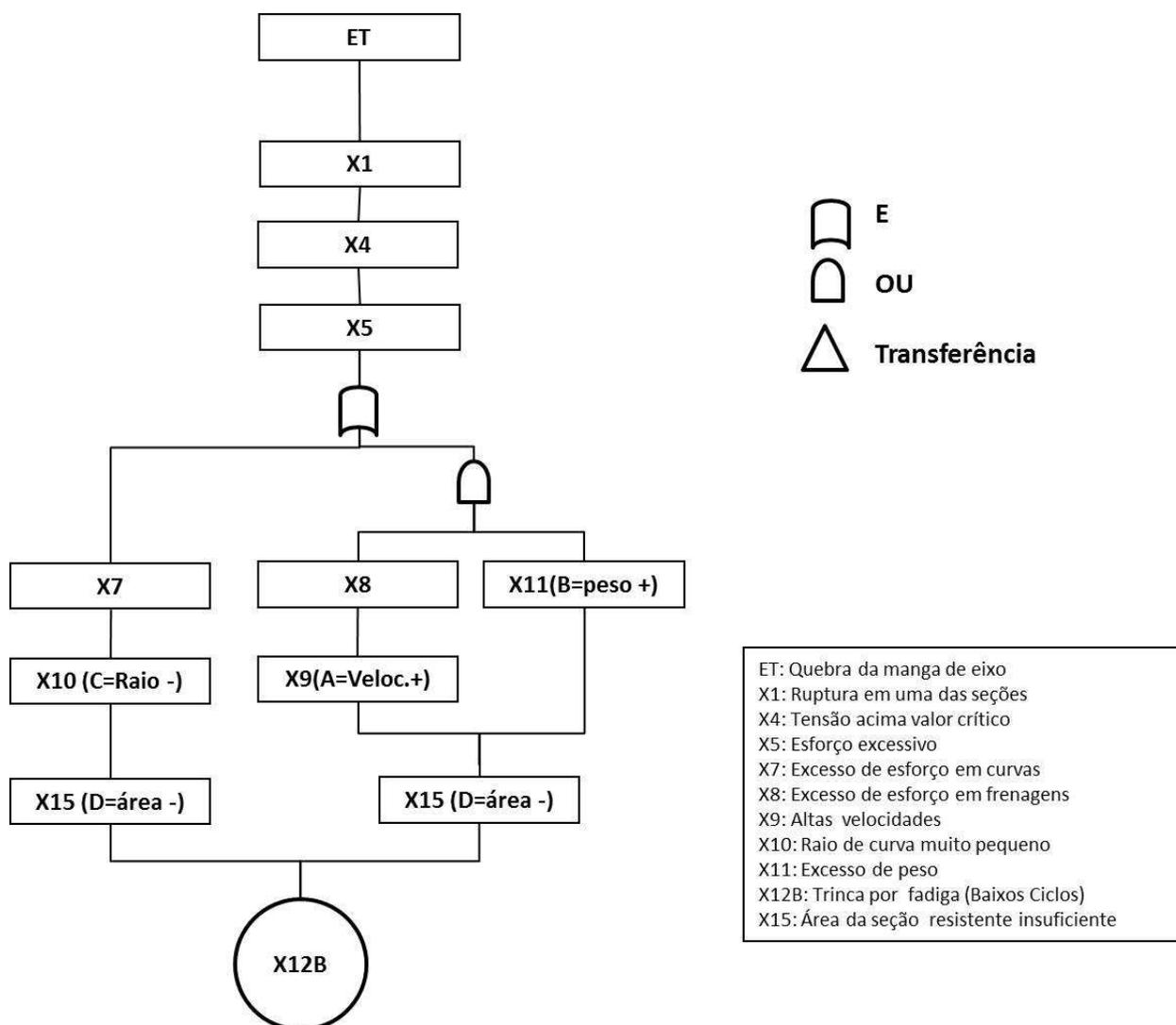


Figura 4.25: FTA final da análise de falha da quebra da manga de eixo

Com isto é possível definir uma Árvore de Falhas que descreve os eventos antes desconhecidos que levam ao evento de topo ou falha principal. Não era possível definir tais eventos devido à inexistência de dados históricos para embasar a construção e hierarquização da mesma. Como resultado agora existe uma Árvore de Falhas embasada em dados experimentais e estatísticos que poderá ser utilizada em futuros projetos similares ou mesmo no atual e ser acrescida de dados probabilísticos de retorno de campo, uma vez disponíveis.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta uma metodologia que permite conhecer mais sobre um novo produto ou uma nova tecnologia e como a mesma interage dentro de um sistema maior. Tomou-se como premissa que os desenvolvedores do componente estudado buscavam um maior conhecimento numa área reservada a grandes empresas e equipes de competição: o projeto de veículos. Esta é justamente a intenção da competição Formula SAE, gerar conhecimento e a vontade da busca do mesmo nas novas gerações de engenheiros.

Através deste trabalho pôde-se observar a capacidade de ferramentas como a Análise da Árvore de Falhas (FTA) e o Planejamento de Experimento (DOE). Pôde-se observar também que a combinação de ambas gera amplia suas capacidades individuais, pois combina de forma harmônica uma técnica que visa conhecer as possíveis causas para uma falha (FTA) com o poder de uma técnica de estatística experimental de grande uso em pesquisas.

No trabalho, foi possível mostrar que o uso da técnica FTA, que normalmente é utilizada para se avaliar a probabilidade de danos em componentes e sistemas tomando como base dados de ocorrências passadas, pode ser também utilizada para o levantamento de hipóteses. Isto é possível mesmo que a estrutura da árvore de falhas montada não esteja ainda totalmente definida ou comprovada.

O DOE foi usado considerando o P-valor como índice de avaliação para discernir quais dos fatores mais contribuem para a falha e como estes interagem entre si. Com base neste, podem-se separar quais dos fatores ou suas combinações, quando variados controladamente, afetam a resposta previamente definida. Isto forneceu subsídios para a confirmação, eliminação ou rearranjo das combinações previamente propostas no FTA original. Logicamente foi necessária a observação da magnitude dos valores das respostas para que se tivesse certeza ou não de que os fatores eram suficientes para causar a falha.

Com os resultados apresentados nesse trabalho atingiu-se ao objetivo de criar uma ferramenta que possa ser aplicada no desenvolvimento de produtos inovadores, isto é, de auxílio a um time de desenvolvimento que não possua um conhecimento prévio sobre o mesmo. Esta metodologia pode ser aplicada não só para identificar uma ou mais causas primárias de falha, mas também mapear os possíveis caminhos que levam as mesmas. Pode também ser usada para

retroalimentar o FMEA de projeto uma vez que agora se conhecem os caminhos que podem levar as situações mais críticas que culminariam com uma falha do componente ou sistema. No caso aqui estudado, o FMEA de projeto retroalimentado com as informações do FTA+DOE poderia solicitar a inclusão de testes em futuros componentes que avaliassem o efeito das variações de esforços em curvas ou sob esforços devidos às variações de peso e frenagem. Poderia também especificar que os testes fossem efetuados considerando variações dimensionais da área resistente.

O DFSS, em sua metodologia demonstrada na Figura 2.3, não prevê uma retroalimentação para a parte de desenvolvimento do produto e conceito caso haja falhas nas fases de validação, muito menos caso se trate do desenvolvimento de um produto com nova tecnologia, ou inovador. Isto deixa uma lacuna em aberto para melhoria não só do produto, mas do conhecimento sobre o mesmo e sobre a tecnologia nele envolvida. Dentro do ambiente DFSS é importante que a tomada de decisões tenha embasamento estatístico que conduza a um produto ou solução robusta como o próprio DFSS se propõe. Com o uso da metodologia aqui proposta, embasada no P-valor, pode-se verificar qual das hipóteses de falha tinha o maior peso probabilístico, o que permite adotar novas soluções para resolução do problema baseadas nessa hipótese.

O autor também acredita que esta metodologia possa ser incorporada a outras metodologias tais como o GD3, também mencionado neste trabalho, na parte de DRBTR. Este pode ser uma ferramenta para melhor analisar os componentes após os testes, quando os mesmos estão envolvidos em algum tipo de falha.

Se considerarmos o ponto de vista de um projeto axiomático. Esta metodologia vai de encontro ao Axioma 2, sobre informação que define que projetos de sucesso são os mais simples com menos informações desnecessárias. Com a metodologia proposta, eliminam-se hipóteses irrelevantes ou com contribuição menor para a falha e foca-se nas mais importantes.

Um ponto adicional a ser destacado é a possibilidade de aplicação da metodologia na análise de falha em produtos já existentes e validados, como forma de se ter uma visão mais confiável de como a falha se desenvolveu. Principalmente em análises de retorno de campo em produtos que não possuem uma árvore de falha construída e os eventos que levam a falha ainda são desconhecidos. Através desta metodologia, pode-se definir e hierarquizar uma árvore de

falhas mesmo sem histórico. Após esta definição e como consequente recebimento de dados históricos pode-se enriquecer a mesma com as probabilidades obtidas.

Como tópicos para estudos futuros propõe-se:

- Gerar estimativas probabilísticas da ocorrência de cada causa através de estudos estatísticos;
- Confirmar a viabilidade de uso da metodologia em casos de componentes já existentes e em uso corrente e analisar o quanto a adoção desta poderia contribuir para a melhoria do processo e dos produtos desenvolvidos.

Referências

AMER, Y., LUONG, L., LEE, S., ASHRAF, M.A., **Optimizing order fulfillment using design for six sigma and fuzzy logic**. International Journal of Management Science and Engineering Management Vol. 3 No. 2, pp. 83-99, 2008.

APQP, **Planejamento avançado da qualidade do produto e plano de controle. Manual de Referência**, Segunda Edição, 2008.

ASQC – **Glossary & Tables** – 1983.

BAÑUELAS, Ricardo; ANTONY, Jiju; **Six Sigma or Design for Six Sigma?** TQM Magazine Volume 16, Number 4, 2004. pp 250-263,

BARROS NETO, Benicio; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. **Como Fazer Experimentos – Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Ed. Unicamp, 2001. P. 401.

CALADO, Robisom Damasceno; CARLAGE, Felipe Araujo. **Conceitos do Projeto Axiomático e Desdobramento de Metas: Aplicação em uma empresa de setor de serviços**. **Anais SIMPOI**, 2009.

CALLIOLI, Carlos A.; DOMINGUES, Hygino H.; COSTA, Roberto C.F. **Álgebra Linear e Aplicações**. Ed. Atual 4ª Ed. 1983.

CANALE, A. C. **Estudo de desempenho de autoveículos rodoviários considerando o passeio do centro de gravidade e restrições impostas pelo binômio pneumático x pavimento**, Tese de Doutorado Escola de Engenharia de São Carlos-USP, 1991.

COLMENERO, Alberto N., **Ensaio acelerados. Coleta e processamento de dados para estudos de confiabilidade em casos de mecanismo de falha simples**. Campinas, Unicamp, 1999. Tese (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, 1999.

FIORAVANTI, Alexandre; **Aplicação da Metodologia “Design for Six Sigma” (DFSS) em Projetos Automotivos**. Dissertação de Mestrado – Programa de Engenharia Automotiva USP – 2005.

FRANZA, Richard M.; CHACRAVORTY, Satya S.; Desing for Six Sigma (DFSS): A case Study. **PICMET Proceedings 2007**, 5-9 August, Portland, Oregon, USA.

GAZIOLLA, H., GOMES, R. D. **Sistema de climatização automotivo**. Trabalho de conclusão de curso. Centro Paula Souza Faculdade de Tecnologia-Santo André S.P. 2010.

HAMADA, M.S., **Using Statistically Designed Experiments to Improve Reliability and Achieve Robust Reliability**. RR-94-06(NT), 1994.

HELMAN, Horácio. **Análise de falhas (Aplicação dos métodos de FMEA e FTA)**. Belo Horizonte, MG: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1995. 156p.

ILZARBE, Laura; ÁLVAREZ, Maria Jesús; VILES, Elisabeth; TANCO, Martín; **Practical Applications of Design Research of Experiments in the Field of Engineering: A Bibliographical Review**. Qual. Reliab. Engng.Int. 2008; 24:417–428.

KIEMELE, M., SCHIMIDT, S., BERDINE, R., **Basic Statistics: Tool for Continuous improvement**, 4 Ed., Air Academy Press, LLC, Colorado Springs, Colorado, 1997.

KLAVA, Behno. **Desenvolvimento das Etapas de Análise e Otimização Estrutural de uma Manga de Eixo**. UFSC, Março de 2003.

KOVACH, Jami; STRINGFELLOW, Paris; TURNER, Jennifer; CHO, B. Rae. The House of Competitiveness: The Marriage of Agile Manufacturing, Design for Six Sigma, and Lean Manufacturing with Quality Considerations. **Journal of Industrial Technology**. Vol. 21 N° 3 – 2005.

LIN, Ho Siong. Understanding Statistical Design and Analiysis of Experiments in the Classroom. **ICOTS 5**, 1998.

LOBO, Carlos Eduardo d’Araujo Vilaça. **Aplicação do Projeto Axiomático para o desenvolvimento de Sistemas de Medição de Desempenho para Manufatura**. Campinas, Unicamp, 2003. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, 2003

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C.; **Applied statistics and probability for engineers**. John Wiley & Sons. 2003. 822p.

MORELLO, Marcelo Guimarães. **Redução da árvore de falhas baseada no grau de criticidade: uma aplicação em transmissão de veículo comercial.** Campinas, Unicamp, 2005. Tese (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, 2005.

MOURA, M. B. B.; **Aprimoramento em Sistemas de Climatização Veicular para Melhoria de Condições Ambientais e Redução no Consumo de Combustível.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; Dissertação de Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva; 2007.

NASA, **Fault Tree Handbook with Aerospace Applications**, Version 1.1, August, 2002.

NICHOLSON, M., MCDERMID, J., BURNS, A. **Analysis and design synthesis for hard real time safety critical systems.** University of York, UK; 1994

NICOLAZZI, Lauro Cesar; da ROSA, Edison; LEAL, Longuinho da Costa Machado. **Uma introdução à modelagem quase estática de veículos automotores de rodas.** Publicação interna do GRANTE – Departamento de Engenharia Mecânica – GRANTE, Florianópolis, agosto de 2001.

NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods,
<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, Fevereiro, 2009.

PAHL, GERHARD; BEITZ, W. FELDHUSEN, J. GROTE, K. **Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produto, métodos e aplicações.** São Paulo, Ed. Blucher, 2005. p943.

PIZZOLATO, Morgana. **Método de otimização experimental da qualidade e durabilidade de produtos: um estudo de caso em produtos fabricados por injeção de plástico.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – UFRGS, 2002.

SAKURADA, Eduardo Y. **As Técnicas de Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no Desenvolvimento e na Avaliação de Produtos.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC. abril de 2001.

SANTOS, Adriana Barbosa; MARTINS, Manoel Fernando. Modelo de referência para estruturar o Seis Sigma nas organizações. **Revista Gestão e Produção**, São Carlos, v. 15, n. 1, p. 43-56, jan.-abr. 2008.

SCAPIN, Carlos Alberto. **Análise sistêmica de falhas**. Belo Horizonte: Ed. De Desenvolvimento Gerencial, 1999. 131p.

SILVA FILHO, A. M. Conectividade e informação – O mundo em suas mãos: Apple é sinônimo de Inovação orientada para “User Experience”. **Revista Espaço Acadêmico** – Número 109 Junho de 2010.

SILVEIRA, Zilda de Castro, **Análise Estatística e Otimização de Parâmetros de Projeto em Componentes de Sistemas Mecânicos**. Campinas, SP, 2003, Tese de Doutorado, UNICAMP.

SOBEK II, Durward K, JAIN, Vikas K. Relating Design Process to Quality: A Virtual Design of Experiments Approach. **Journal of Mechanical Design**. Maio 2007, Vol. 129 pg 483-490.

SUH, N. **The principles of design**. New York: Oxford University Press, 1990.

TAGUCHI, G. **Taguchi Methods - Design of Experiments**. Publisher: American Supplier Inst; Spiral edition, 1993.od.

TEIXEIRA, Carlos A.R., CAVALCA, Kátia L. **Reliability as an Added-value Factor in na Automotive Clutch System**. Qual. Reliab. Engng. Int. 2008; 24:229–248.

TELFORD, Jacqueline K. A Brief Introduction to Design of Experiments. **Johns Hopkins Apl Technical Digest**, Volume 27, number 3 (2007).

UFPR-Departamento de Estatística. **Curso de Estatística 2 (Notas de Aula)**, Curitiba 2 de Agosto de 2007.

ULRICH, Kart T. **Product design and development** – 4 Ed. -2008. 368p.

VLAHINOS, Andreas. **Applying Six Sigma to Drive Down Products Defects**. ANSYS Advantage Magazine. Vol. 2 Issue 2, 2008.

WERKEMA, M. C. C. **Criando a cultura seis sigma**. Qualitymark Ed., Rio de Janeiro, 2002.

WOODFORD, D., **Design for Six Sigma – IDOV Methodology**, www.isixsigma.com, 2003.

YOSHIMURA Tatsuriko. **Introduction to DRBFM/DRBTR**. GM Presentation. 2003.

Referências Consultadas

ABDO, Jamil; Design of Experiments technique for characterization of friction in dry contact. **International Journal of Surface Science and Engineering**, Vol. 2, Nos. 1/2, 2008.

ANTONY, Jiju; **Taguchi or classical design of experiments: a perspective from a practitioner**. Sensor Review 26/3 (2006) 227-230.

BUTTON, Sergio Tonini, **Apostila de Planejamento Experimental e Análise de Resultados**, FEM-UNICAMP, 2005.p.70,

CONDRA Lloyd.LINDSLEY, Michelle. **Using Design of Experiments to improve product and process integrity**. IEEE, 1991.

CUI, Yuling, Khan, A Wahid. A Case Study: Reliability-based Product Development and Improvement Model. **Qual. Reliab. Engng. Int.** 2008; 24:361–373.

DEDINI, Franco G.. **Notas de Aula do Curso – Sistemática e Metodologia de Projetos**, FEN-UNICAMP– 2008.

FERNANDES, Marcelo Rivas. O poder da ANOVA e da igualdade de variância. **Revista Excelência Six Sigma Edição 06** (Jan / Fev 2008).

FERNANDES, Marcelo Rivas. Um Ilustre Desconhecido!. **Revista Excelência Six Sigma Edição 06** (Jan / Fev 2008).

FERRYANTO, Liem. Analytical Design for Six Sigma for multiple response products. **International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage**. Volume 3, Number 1, pg 13-32, 2007.

GIOLO, Suely Ruiz. **Análise de Regressão Linear**. Universidade Federal do Paraná. 2007.

GUO, Huairui; METTAS, Adamantios. Improved Reliability Using Accelerated Degradation and Design of Experiments. **IEEE Transactions**, pg 446-450, 2007.

HUBER, Charles; LAUNSBY, Robert; Stright Talk on DFSS. **Six Sigma Forum Magazine**. Agosto 2002.p21-25.

MATTOS, Viviane Leite Dias de. **Identificação de Efeitos de Dispersão em Experimentos com Poucas Replicações** – Tese de Doutorado. UFSC – 2004.

MONTEVECHI, José A.B; FILHO, Renaldo G. A.; MEDEIROS, Andre Luiz; - Application of factorial designs for reducing factors in optimization via discrete-event simulation. **Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference**.

MONTEVECHI, José A.B; PINHO, Alexandre F.; LEAL, Fabiano; Marins, Fernando A. S.; - Application of design of experiments on the simulation process in the automotive industry. **Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference**.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. John Wiley & Sons. 1994.538p.

MONTGOMERY, D.C.;WOODALL, Willian H.; **An Overview of Six Sigma, International Statistical Review** (2008), 76, 3, 329–346.

NUCCI, Maria di; MANCUSO, Paolo. **Using DOE to Solve a Product Development Problem**. Artigo do site isixsigma.com acessado em 15 de Janeiro 2009.

PARK, Jong In; KIM, Seong Jun; JEONG, Myong K; - A new tolerance design method for a secondary rechargeable battery using design of experiments with mixture. **Qual. Reliab. Engng. Int.** 2008; 24:543-556.

PETENATE, Ademir José, **Utilização do Método Taguchi na redução dos Custos de Projeto**, Campinas, SP, 2005, UNICAMP.

PHADKE, M. S. **Quality engineering using robust design**.AT&T Bell Laboratories Prentice Hall.334p.1989.

RECHULSKI, Denise Kaufman; CARVALHO, Marly Monteiro de; **Programas de qualidade Seis Sigma – Características Distintivas do Modelo DMAIC e DFSS**. PIC-EPUSP 2004 pp 1218-1237.

SCHAFER, Christina; FINKE, Eckhard; **Shape optimization by design of experiments and finite element methods—an application of steel wheels**.Struct Multidisc Optim (2008) 36:477–491.

SIMON, Kerri; **What is DFSS? And how does Design for Six Sigma compared to DMAIC**, Artigo do site www.isixsigma.com.

SMITH, Larry R. Six Sigma and the Evolution of Quality in Product Development. **Six Sigma Forum Magazine**. Novembro 2001.

TOLEDO, José Carlos de; AZEKA, Fábio e Amaral; DANIELCapaldo, Site sobre Projeto Robusto/ método Taguchi, acesso em 03/06/2008,
http://www.numa.org.br/conhecimentos_port/pag_conhec/projeto_robustov5html.

TOLEDO, Maria Luiza. DOE – **Experimentos de Superfície de Resposta (Response Surface Design)**. Minitab Report. www.Minitabbrasil.com.br acessado em 09/01/09.

APENDICE A – Suspensões Automotivas

1. Suspensões e Manga de Eixo

Os sistemas de suspensão são responsáveis pelo controle de direção dianteira e absorção de choques e irregularidades do terreno, bem como têm a função de sustentar o veículo, suportar os sistemas de freio e também de tração do veículo. O componente que agrega todas estas funções é chamado de manga de eixo. Normalmente a manga de eixo tem a função de reunir os sistemas acima mencionados (direção, sustentação do veículo, feio e transmissão). No caso em estudo nesta dissertação de mestrado, o sistema de transmissão não existe, uma vez que na configuração de carros de competição a transmissão é traseira.

Na Figura A.1, pode-se observar diversos tipos de suspensão. O mais utilizado em carros de passeio é o tipo McPherson, tipo i da Figura A.1. O que foi analisado neste trabalho refere-se a uma manga de eixo utilizada numa suspensão tipo braços transversais, tipo f, onde o amortecedor está apoiado no braço inferior.

Para se calcular os esforços sobre a manga de eixo deve-se conhecer quais situações em serviço a mesma será submetida e quais forças atuam no sistema. Esta parte do trabalho se baseou na dissertação de mestrado conduzida a respeito deste tipo de componente por Klava (2003). A seguir são apresentadas as equações por ele consideradas no cálculo de esforços de uma manga de eixo de um sistema de suspensão tipo McPherson.

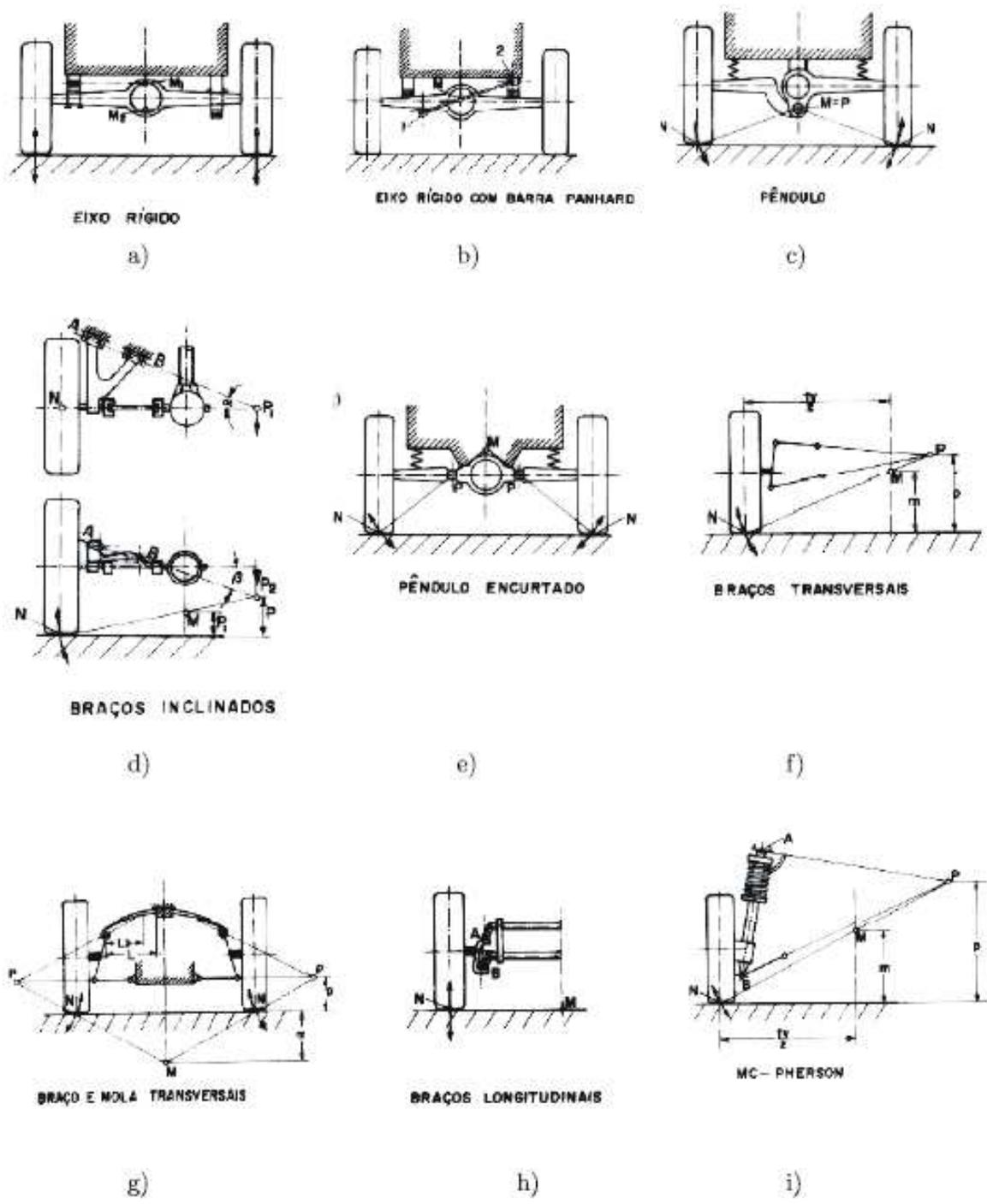


Figura A.1: Tipos de suspensões automotivas (Klava, 2003)

2. Determinações de Carregamentos

As situações que Klava (2003), baseou seu estudo foram carregamentos devido a Peso Próprio, Curva e Frenagem.

Peso próprio

Klava, em seu trabalho, desconsiderou o efeito dos amortecedores. Assim, toda a parcela de carga nos eixos está sendo transmitida pelos amortecedores à manga de eixo sem nenhuma redução, conforme Figura A.2.

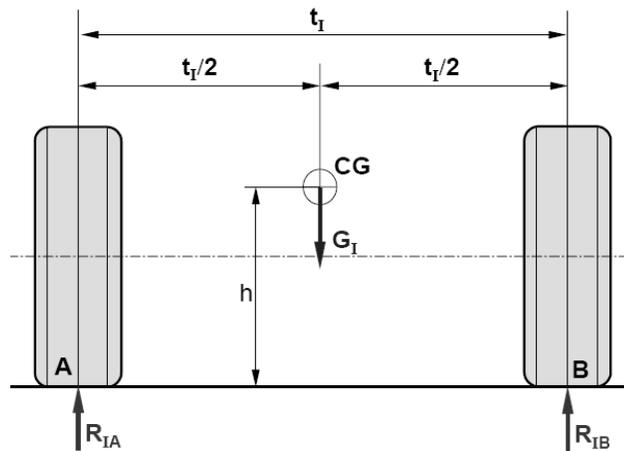


Figura A.2: Forças agindo sobre o eixo dianteiro de um veículo devido ao peso próprio (Klava, 2003)

$$G_I = m \cdot (1-x) \cdot g \quad (\text{Equação A.1})$$

Onde:

m – massa total do veículo;

g – aceleração da gravidade;

x – é a razão entre a carga normal do eixo traseiro e o peso total do veículo (é obtido experimentalmente).

Klava(2003) se refere à incógnita x , que deve ser determinada experimentalmente. No entanto, em um trabalho de Ferrati (2008) sobre freios, usou-se uma abordagem teórica que poderá ser usada aqui. Ferrati (2008) menciona que:

$$\sum M = Total_Horizontal_Force$$

$$\mathbf{m} \times \mathbf{g} \times \mathbf{X} - \mathbf{N}_{TD} \times \mathbf{L} = \mathbf{m} \times \mathbf{a} \times \mathbf{h} \quad (\text{Equação A.2})$$

Onde:

m – massa total do veículo;

g – aceleração da gravidade;

L – distancia entre eixos;

h - altura do centro de massa;

X - distancia do centro de gravidade ao eixo dianteiro;

a - máxima desaceleração = $\mu_e \times g$

μ_e – coeficiente de atrito pneu solo

N_{TD} – é a força normal sobre o eixo traseiro

Como se sabe o peso do veiculo, tem-se que:

$$\frac{N_{TD}}{m} = x \quad (\text{Equação A.3})$$

Considerando o veiculo simétrico, o calculo das reações R_{IA} e R_{IB} é dada por:

$$\mathbf{R}_{IB} = \mathbf{R}_{IA} = \frac{\mathbf{G}_I}{2} \quad (\text{Equação A.4})$$

Curva

O que influencia nas reações na roda em situações de curva, além do peso do veículo é o raio da curva “ ρ ”, que influencia na aceleração centrípeta a_c e, conseqüentemente, na força centrípeta F_{CI} . Além disso, em uma curva o equilíbrio de distribuição de massa entre as rodas é quebrado havendo uma transferência de massa para as rodas externas proporcionalmente ao raio da curva, o que altera a reação sobre a roda. O diagrama da Figura A.3 mostra as forças agindo sobre o eixo dianteiro durante uma curva. As equações para aceleração e força são:

$$a_c = \frac{v^2}{\rho} \quad (\text{Equação A.5})$$

$$F_{CI} = m \times (1 - X) \times a_c \quad (\text{Equação A.6})$$

Onde:

V – velocidade do veículo (m/s);

ρ – raio da curva (m);

m – massa total do veículo(kg);

x – é a razão entre a carga normal do eixo traseiro e o peso total do veículo (é obtida experimentalmente).

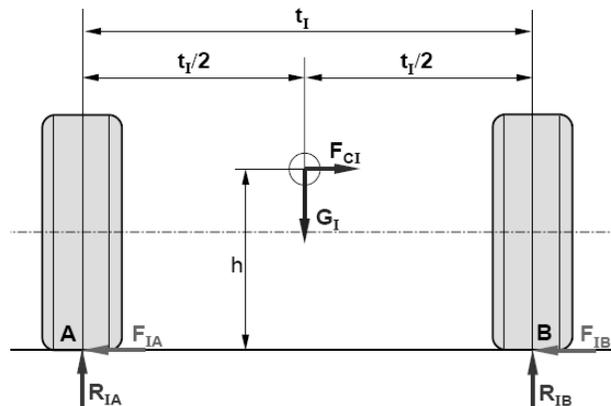


Figura A.3: Forças agindo sobre o eixo dianteiro de um veículo quando este faz curvas (Klava, 2003)

Klava desenvolve esta relação baseada no equilíbrio de momentos até chegar em:

$$R_{IB} \cdot t_I - m \cdot (1 - x) \cdot g \cdot \frac{t_I}{2} - m \cdot (1 - x) \cdot a_c \cdot h = 0 \quad (\text{Equação A.7})$$

$$R_{IB} = \frac{m(1-x)(g \frac{t_I}{2} + a_c h)}{t_I} \quad (\text{Equação A.8})$$

Onde:

m – massa total do veículo (kg);

g – aceleração da gravidade (m/s^2);

x – é a razão entre a carga normal do eixo traseiro e o peso total do veículo (é obtida experimentalmente);

t_I – bitola do eixo dianteiro (m);

h – altura do centro de gravidade do veículo (m);

a_c – Aceleração Centrípeta (m/s^2).

μ – Coeficiente atrito Pneu-Solo

A força transversal que atua na roda é dada por:

$$F_{IB} = R_{IB} \times \mu \quad (\text{Equação A.9})$$

Frenagem

Os veículos automotivos freiam quando em movimento. Tal frenagem afeta toda a distribuição de massa do veículo sobre os eixos, além de causar esforços extras sobre a manga de eixo, uma vez que o mesmo tem a função de suportar o sistema de freio (pinça). Klava propõe o seguinte diagrama, Figura A.4, de forças atuantes em um veículo durante uma frenagem.

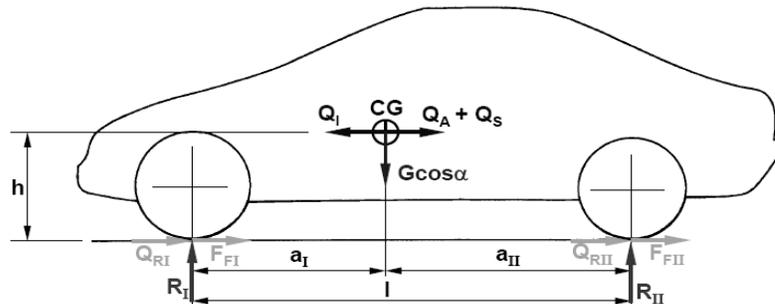


Figura A.4: Forças atuantes em um veículo em movimento (Klava, 2003)

Considerando que o veículo esteja se deslocando em um plano e a resistência aerodinâmica é desprezível, tem-se para R_I e F_{FI}

$$R_I = \frac{1}{l} [G \cdot \cos \alpha \cdot a_{II} + Q_I \cdot h - (Q_A + Q_S) \cdot h] \quad (\text{Equação A.10})$$

$$F_{FI} = \frac{\mu \cdot G}{l} [a_{II} + h \cdot \mu] \quad (\text{Equação A.11})$$

Onde:

Q_A – Resistência Aerodinâmica (igual a zero no modelo deste trabalho por ser considerada desprezível para carros de competição);

Q_I - Resistência de Inércia (calculada como $Q_I = m \cdot a$)

Q_S - Resistência de Aclive (desprezível por estar no plano);

Com estas grandezas definidas, Klava (2003) definiu a força F_M feita pela a pinça de freio sobre a manga de eixo, Figura A.5, como:

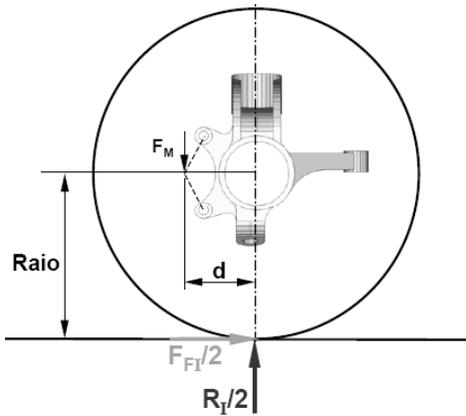


Figura A.5: Ação sobre a manga de eixo durante a frenagem de um veículo (Klava, 2003)

$$F_M = \frac{F_{FI} \times \text{Raio}}{2 \times d} \quad (\text{Equação A.12})$$

Onde:

F_{FI} – força de frenagem do eixo dianteiro (N);

Raio – raio dinâmico da roda (m);

d – raio médio do disco de freio (m).

Em relação à suspensão Nicolazzi, Rosa e Leal, 2001, consideraram a seguinte distribuição de cargas para os pivôs de uma suspensão plana (Figura A.6), como a que se está tratando neste trabalho.

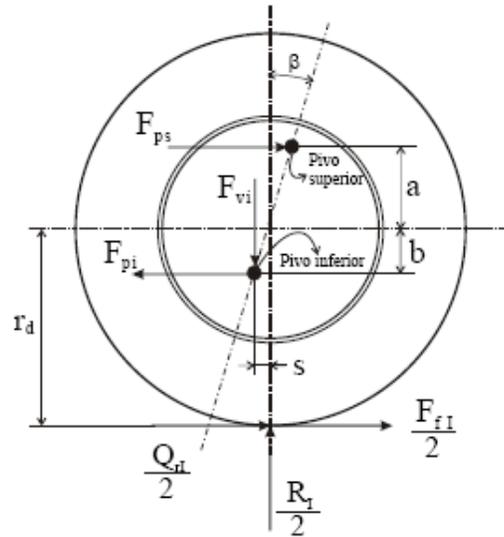


Figura A.6: Cargas de reação dos pivôs da suspensão sobre a manga de eixo (Nicolazzi, Rosa e Leal 2001)

Desenvolvendo as equações de equilíbrio das forças para o sistema da Figura A.6 têm-se as forças aplicadas ao pivô inferior F_{pi} e superior F_{ps} como se define a seguir:

$$F_{ps} = \frac{1}{2(a+b)} [R_I s + (F_{fI} + Q_{rI})(r_d - b)] \quad \text{(Equação A.13)}$$

$$F_{ps} = \frac{1}{2(a+b)} [R_I s + (F_{fI} + Q_{rI})(r_d + a)] \quad \text{(Equação A.14)}$$

Material - Alumínio

As ligas de alumínio são largamente usadas na confecção de componentes devido a sua baixa densidade e a relação peso/resistência muito favorável. É cerca de 3 vezes mais leve que o aço. A resistência do alumínio não é muito elevada, mas a adição de elementos de liga, como o cobre e o zinco, aliado a tratamentos térmicos, permite obter resistências mais elevadas.

A liga de Al + Si + Mg Fundido AA 356 é o material original da manga de eixo fraturada. É um material leve e seu uso na indústria da competição automobilística já está consagrado há um bom tempo. O processo de fabricação utilizado é de fundição por gravidade em molde de areia.

Uma possível mudança nas dimensões geométricas da peça poderá permitir a utilização do material em um novo projeto, que inclua as eventuais alterações decorrentes do estudo com a árvore de falhas e o DOE. A Tabela A.1 mostra as principais propriedades físicas do material em estudo.

Tabela A.1: Propriedades do material da manga de eixo

Aluminio 356.0-T6, SandCast	
Propriedades Físicas	Sistema Métrico
Densidade	2.68 g/cc
Propriedades Mecânicas	Sistema Métrico
Dureza, Brinell	55.0 - 90.0
Tensão de Ruptura	≥ 207 MPa
Tensão de Escoamento	≥ 138 MPa
Elongação na Ruptura	≥ 3.00 %
Módulo de Elasticidade	72.4 GPa
Coefficiente de Poisson	0.330
Tensão de fadiga	60.0 MPa
	# of Cycles 5.00e+8
Usinabilidade	50%
Propriedades Térmicas	Sistema Métrico
Calor de fusão	389 J/g
Ponto de fusão	557.2 - 612.8 °C
Propriedades de Processo	Sistema Métrico
Temperatura de Fundição	677 - 788 °C
Composição Química	Sistema Métrico
Aluminio, Al	90.1 - 93.3 %
Cobre, Cu	≤ 0.25 %
Ferro, Fe	≤ 0.60 %
Magnésio, Mg	0.20 - 0.45 %
Manganês, Mn	≤ 0.35 %
Outros, cada	≤ 0.050 %
Outros, total	≤ 0.15 %
Silício, Si	6.50 - 7.50 %
Titanio, Ti	≤ 0.25 %
Zinc, Zn	≤ 0.35 %