

JOÃO PAULO FARIA HENRIQUE

**APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO NO ESTUDO DE TESTES DE
FADIGA EM RODAS AGRÍCOLAS**

JOÃO PAULO FARIA HENRIQUE

APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO NO ESTUDO DE TESTES DE
FADIGA EM RODAS AGRÍCOLAS

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva

Guaratinguetá

2015

H519a	Henrique, João Paulo Faria Aplicação da Simulação de Monte Carlo no estudo de testes de fadiga em rodas agrícolas / João Paulo Faria Henrique – Guaratinguetá, 2015. 41 f. : il. Bibliografia : f. 39-41 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015. Orientador: Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva 1. Método de Monte Carlo 2. Tratores agrícolas - Rodas - Fadiga 3. Método dos elementos finitos I. Título CDU 519.245
-------	---

João Paulo Faria Henrique

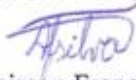
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

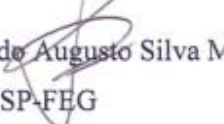
Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins

Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. José Elias Fomazini
UNESP-FEG


Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins
UNESP-FEG

Dezembro de 2015

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por todas as oportunidades e conquistas que tive durante os anos de graduação.

Aos meus pais, Marinete e Paulo, que sempre me motivaram a seguir meus sonhos e batalhar arduamente para torná-los realidade.

Ao amigo Gregor, que com seus conhecimentos na área da Engenharia de Produção foi de grande auxílio.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Aneirson, que sugeriu um tema desafiador para este trabalho e acreditou em meu potencial para sua concretização.

À minha família, por todo o suporte e motivação.

Aos engenheiros Alexandre e André, que me auxiliaram imensamente na coleta de dados para as simulações deste trabalho.

Aos meus colegas de estágio, supervisores e gestores por todo o suporte profissional.

Ao professor Cornetti, por todo o auxílio e ensino dados no meu primeiro ano de graduação.

HENRIQUE, J.P.F. **Aplicação da simulação de Monte Carlo no estudo de testes de fadiga em rodas agrícolas.** 2015. 41 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Devido à crescente exigência dos clientes e a busca por melhores desempenhos na indústria de veículos pesados, foi preciso haver uma evolução progressiva na tecnologia de modo geral. Este trabalho utiliza um método científico para validar, antes da sua execução, o projeto de uma roda agrícola para colheitadeiras de cana-de-açúcar. Foi empregada a Simulação de Monte Carlo em conjunto com o Método dos Elementos Finitos, a fim de simular o comportamento da roda num teste *cornering*, identificar os possíveis pontos de falha, bem como obter uma estimativa para a sua vida sob fadiga. Para tal, foram simuladas e obedecidas as condições de teste segundo a norma EUWA, pertinentes à fadiga. Os resultados da simulação foram interessantes, segundo os especialistas do setor envolvido com o projeto e fabricação do produto em questão, e propiciaram elementos importantes para a tomada de decisão com respeito à melhorias que poderiam ser feitas no projeto do produto antes da sua execução.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação de Monte Carlo. Teste *cornering*. Fadiga. Rodas Agrícolas.

HENRIQUE, J.P.F. **Application of Monte Carlo Simulation on the study of agricultural wheels' fatigue tests** 2015. 41 f. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

Due to the increasing demand from clients and the search for better performances in the heavy vehicles industry, a progressive evolution in technology in a general way was needed. This paper uses a scientific method to validate, prior to its manufacture, the project of an agricultural wheel for sugar cane harvesters. Monte Carlo Simulation is used in conjunction with Finite Elements Method, in order to simulate the wheel's behavior in a cornering test, identify possible failure regions and get an estimate for its life under fatigue. To this end, test conditions according to EUWA Standards were simulated and obeyed, relevant to fatigue. Simulation results were interesting, according to industry experts involved in the project and manufacture of the product in question, and have provided important elements for the decision making regarding improvements that could be made on the product project before its execution.

KEYWORDS: Monte Carlo Simulation. Cornering test. Fatigue. Agricultural wheels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Áreas de atuação para “Simulação de Monte Carlo”	10
Figura 2 – Áreas de atuação para “Simulação de Monte Carlo e Análise de Processo”	11
Figura 3 – Áreas de atuação para “Otimização via Simulação de Monte Carlo”	11
Figura 4 – Áreas de atuação para “Simulação de Monte Carlo e Testes de Fadiga”	11
Figura 5 – Passos para uso de Monte Carlo.	15
Figura 6 – Distribuição de demanda	17
Figura 7 – Distribuição acumulada de demanda	17
Figura 8 – Ciclo de vida do produto	21
Figura 9 – Contagem cíclica para fadiga multiaxial	25
Figura 10 – Vista isométrica (cheia e em corte) de uma roda soldada	28
Figura 11 – Esquema padrão da norma EUWA para teste de fadiga tipo <i>cornering</i>	30
Figura 12 – Vista frontal da roda (plano YZ)	31
Figura 13 – Histórico de γ_θ nos planos de 0° a 180°	33
Figura 14 – Plotagem da distribuição de probabilidade uniforme para σ_x [MPa]	34
Figura 15 – Probabilidade de falha em teste <i>cornering</i>	35
Figura 16 – Probabilidade de aprovação em teste <i>cornering</i>	35
Figura 17 – Análise de sensibilidade dos <i>inputs</i>	36

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
1.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	9
1.2.	OBJETIVOS, DELIMITAÇÃO DA PESQUISA E JUSTIFICATIVAS.....	9
1.3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	12
1.4.	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	12
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	13
2.2.	OTIMIZAÇÃO VIA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO.....	13
2.3.	GERAÇÃO DE NÚMEROS ALEATÓRIOS.....	16
2.3.1	Estabelecimento da distribuição de probabilidade.....	16
2.3.2	Construção da função de distribuição acumulada para cada variável.....	17
2.3.3	Estabelecimento dos números de etiqueta ou dos intervalos de classe	17
2.3.4	Simulação do experimento	18
2.4.	CAPACIDADE DE PROCESSO.....	19
2.5.	DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS.....	21
2.6.	ANÁLISE DE MODO E EFEITOS DE FALHA POTENCIAL.....	22
2.7.	FADIGA.....	22
2.8.	MODELAGEM DE FADIGA.....	24
2.8.1.	O critério de Brown-Miller	24
2.8.2.	Método <i>Rainflow</i> de contagem de ciclos	25
2.8.3.	Regra de acúmulo de dano de Palmgren-Miner	26
3.	ESTUDO TEÓRICO E PRÁTICO DA TECNOLOGIA DE RODAS AGRÍCOLAS.....	27
3.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	27
3.2.	O PROCESSO PRODUTIVO.....	28
3.3.	TESTES DE FADIGA EM RODAS.....	29
4.	DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA.....	31
4.1.	DESCRIÇÃO DA EMPRESA OBJETO DE ESTUDO.....	31
4.2.	CONSTITUIÇÃO DO MODELO E PROCEDIMENTOS.....	31
4.3.	EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO.....	34
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS...38	

5.1.	VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS.....	38
5.2.	RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	38
	REFERÊNCIAS	39

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este trabalho trata de um método de simulação que visa prever a vida em fadiga de uma roda agrícola, a fim de que, antes da fabricação propriamente dita, seja possível identificar se o projeto atenderá as especificações mínimas por norma e as exigidas pelo cliente.

1.2. OBJETIVOS, DELIMITAÇÃO DA PESQUISA E JUSTIFICATIVAS

O objetivo geral da pesquisa foi analisar a vida em fadiga de uma roda em Teste tipo *cornering* por meio da Simulação de Monte Carlo (SMC).

Os objetivos específicos:

- Comparar os resultados da Simulação com os testes em laboratório;
- Determinar os intervalos ideais das variáveis X e os valores de respostas (Y) que atendam as especificações dos clientes.

A pesquisa ficou delimitada ao estudo da aplicação da SMC em testes tipo *cornering* de rodas agrícolas para colheitadeiras de cana de açúcar e em analisar se há vantagens de se utilizar a SMC em tal teste de fadiga.

Será abordado o critério de Brown-Miller, que relaciona as deformações resultantes de um carregamento cíclico com a vida em fadiga do objeto de estudo; o método *Rainflow* de contagem de ciclos, muito usado para análise de histórico de deformações e a regra de acúmulo de dano de Palmgren-Miner, que possibilita prever a vida em fadiga de estruturas sob carregamentos cíclicos.

É importante salientar que o modelo da roda em Elementos Finitos foi gerado pelo software *HYPERWORKSTM*, portanto, a teoria de Elementos Finitos não será detalhada neste trabalho.

Segundo Juran e Gryna (1992, p. 51), uma das abordagens dadas ao termo qualidade é: “[...] qualidade como adequação ao uso do usuário [...]”. Está claro que a maior preocupação é que o produto atenda o que foi exigido pelo cliente. Desta forma, é de suma importância que haja um controle da capacidade do processo em atender tais exigências.

Em muitos problemas práticos do contexto industrial e empresarial, o decisor deve buscar a otimização de objetivos conflitantes, levando em consideração a incerteza nos coeficientes das funções objetivos e das restrições. Para tal, a SMC é bastante útil, pois permite a análise prévia de situações antes que elas aconteçam. De acordo com Parelman e Santin (2009), a SMC é um método bem conhecido, que visa contemplar as incertezas presentes em muitos problemas de decisão.

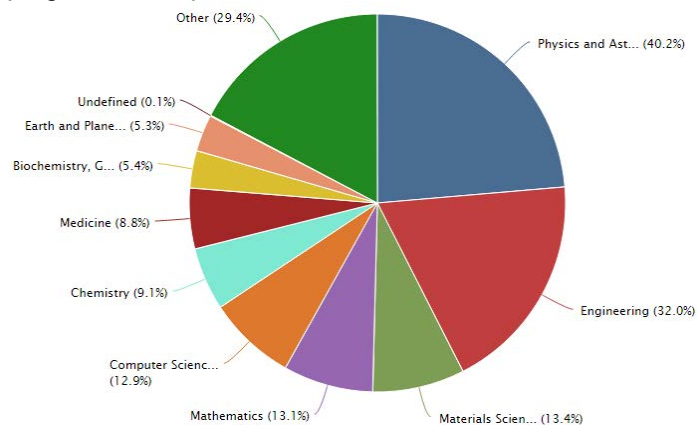
Para mostrar a relevância deste trabalho, bem como a sua contribuição para a área, segue um comparativo descrevendo as bases de dados utilizadas, as palavras-chave com as respectivas ocorrências, bem como, as áreas de aplicação envolvidas com as técnicas aqui abordadas.

Tabela 1 – Bases de dados utilizadas, palavras-chave e respectivas ocorrências

Base de dados	Palavras-chave	Ocorrência
Web of Knowledge	<i>Monte Carlo Simulation</i>	155.687
	<i>Monte Carlo Simulation and</i>	591
	<i>process capacity</i>	
	<i>Optimization via Monte Carlo Simulation</i>	543
Scopus	<i>Monte Carlo Simulation and</i>	4
	<i>wheels fatigue tests</i>	

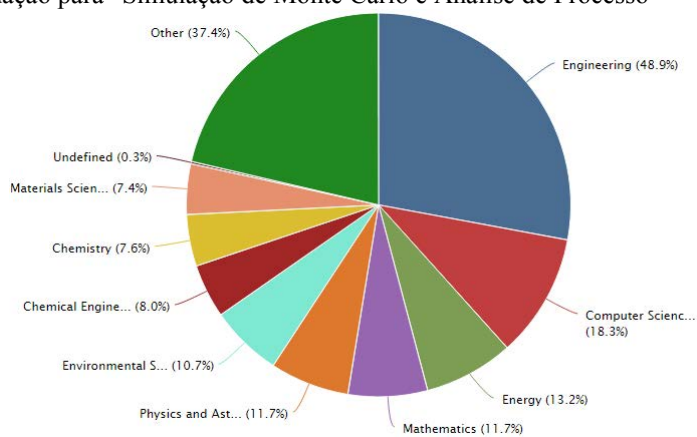
Fonte: Scopus, Web of Knowledge

Figura 1 – Áreas de atuação para “Simulação de Monte Carlo”



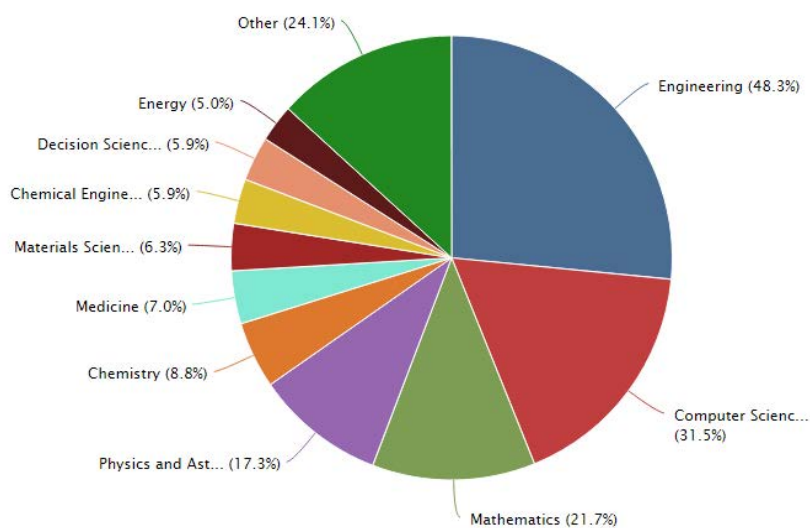
Fonte: Scopus

Figura 2 – Áreas de atuação para “Simulação de Monte Carlo e Análise de Processo”



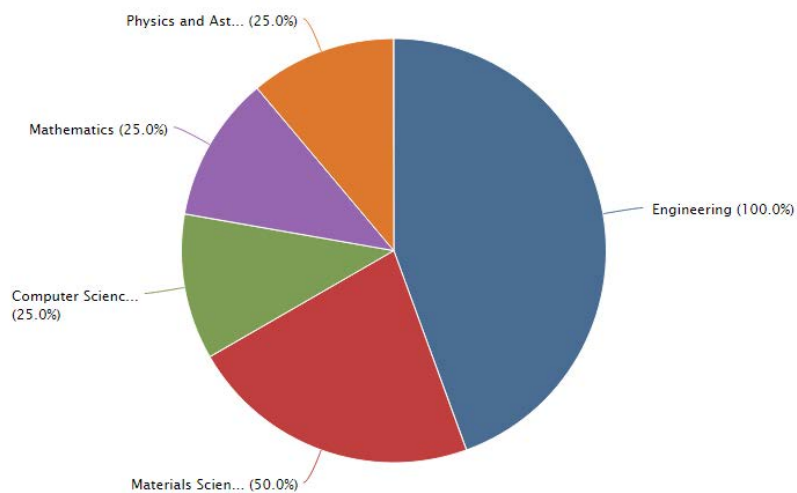
Fonte: Scopus

Figura 3 – Áreas de atuação para “Otimização via Simulação de Monte Carlo”



Fonte: Scopus

Figura 4 – Áreas de atuação para “Simulação de Monte Carlo e Testes de Fadiga”



Fonte: Scopus

Com os resultados demonstrados pelas Figuras 4, 5 e 6, fica claro que há uma relevância significativa da SMC aplicada à testes de fadiga e à problemas relacionados a engenharia. Desta forma, pode-se dizer que a SMC é uma ferramenta robusta e bem aceita para análise de processos e otimizações.

1.3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho, foi criado um modelo em elementos finitos do objeto de estudo utilizando o *software HYPERWORKSTM*, sendo possível simular um ciclo de carregamento de teste e extrair valores de tensões normal e de cisalhamento nos pontos críticos. Estas tensões foram usadas como *input* da SMC e o critério de Brown-Miller como *output* para enfim analisar o comportamento do objeto de estudo em teste *cornering*.

Portanto, pode-se classificar a pesquisa aqui descrita como sendo aplicada, pois visa gerar contribuição para a literatura, tendo objetivos empíricos normativos, pois visa desenvolver políticas e estratégias que melhorem uma situação atual. Além disso, a forma de abordar o problema é quantitativa e o método de pesquisa foi a modelagem e simulação (BERTRAND; FRANSOO, 2002).

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado como se segue. No Capítulo 2 apresenta-se a fundamentação teórica, seguida pelo Capítulo 3 que aborda a teoria e prática sobre rodas agrícolas. No Capítulo 4 está a descrição e a modelagem do problema tratado. O Capítulo 5 contempla a análise dos resultados e no Capítulo 6 estão as conclusões e recomendações para futuras pesquisas. Por fim apresenta-se as referências bibliográficas utilizadas neste texto.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo trata do referencial teórico utilizado no presente trabalho. A saber: Simulação de Monte Carlo, capacidade de processo, ferramentas de análise e avaliação de processo, processo de produção de rodas agrícolas.

2.2. OTIMIZAÇÃO VIA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

Em um problema em que há vários objetivos considerados simultaneamente, sendo que alguns podem ser conflitantes entre si, o decisor escolherá as soluções que proporcionem equilíbrio entre estes conflitos e atendam os interesses da empresa (SILVA; SILVA; MARINS, 2014).

Shahinidis (2004) comenta que a otimização estocástica é aplicada em diversas áreas do conhecimento, como, por exemplo, no planejamento da produção, gestão de recursos naturais e em finanças. Em outras palavras, a simulação no campo de conhecimento da Pesquisa Operacional (PO), é uma representação da operação de um processo ou sistema real, num determinado período de tempo, para fazer inferências relativas às características do processo real (BANKS; CARSON; NELSON, 1996). Ela tem início com o desenvolvimento de um modelo que represente o sistema a ser investigado, consistindo em uma representação explícita e externa de um extrato parcial da realidade vista pela pessoa que deseja usar um modelo para entender, mudar, gerenciar, indicar políticas e controlar parte daquela realidade (PIDD, 1996). Segundo Sakurada e Miyake (2009), a simulação pode ser dividida em dois tipos:

- A eventos discretos;
- A eventos contínuos.

As simulações a eventos discretos englobam sistemas com médio a alto nível de detalhamento, aplicadas na maioria dos casos para modelagem de sistemas com níveis mais baixos de abstração (como chão de fábrica), ao passo que simulações a eventos contínuos são usadas em modelagem de sistemas agregados com níveis mais altos de abstração (como dinâmicas populacionais) (BORSHCHEV; FILIPPOV, 2004; FORRESTER, 1961).

Para este estudo, a modelagem usada é a otimização estocástica. Em especial a Otimização via Simulação de Monte Carlo (OvSMC), que envolve o uso de números

aleatórios e probabilidades para analisar e resolver problemas (SARAIVA JÚNIOR *et al.*, 2011). Segundo Corrar (1993), a SMC foi criada em 1940, pelos pesquisadores Von Neumann e Ulam, para solucionar problemas de blindagem em reatores nucleares em um processo de fissão nuclear.

Segundo Moore e Weatherford (2006), o método de Monte Carlo é um dos vários métodos para análise da propagação da incerteza, onde sua grande vantagem é determinar como uma variação randomizada, já conhecida, ou o erro, afetam o desempenho ou a viabilidade do sistema que está sendo modelado. O termo Simulação de Monte Carlo (SMC) foi dado pelos pesquisadores S. Ulam e Nicholas Metropolis em homenagem a atividade mais popular de Monte Carlo, Mônaco, os jogos (GUJARATI, 2002).

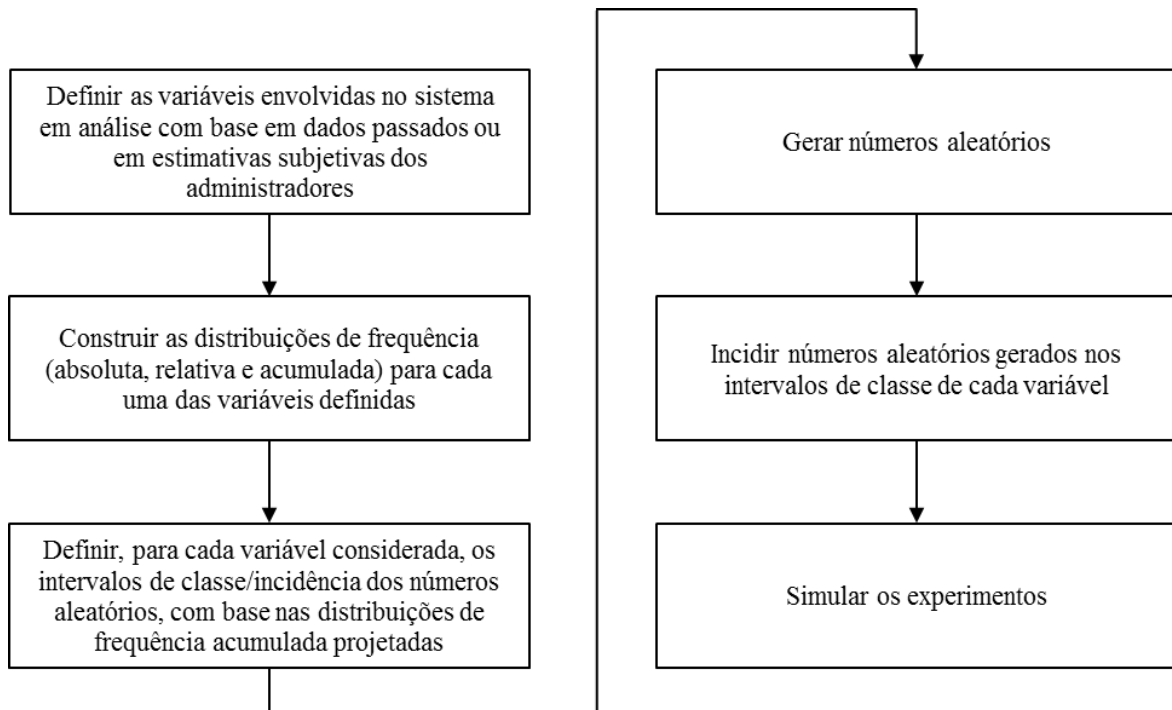
A simulação de Monte Carlo consiste em gerar números randômicos para atribuir valores às variáveis do sistema em questão. Esses números são obtidos por artifícios aleatórios ou diretamente de *softwares*, fazendo uso de funções específicas (SARAIVA JÚNIOR *et al.*, 2011).

Identificar corretamente as distribuições de probabilidade dos dados de entrada é imprescindível no processo de SMC (EVANS; OLSON, 1998). Para tal, utilizam-se análises empíricas e históricas dos dados, para então adequá-los à distribuição ou selecionar a distribuição e adequar seus parâmetros em caso de indisponibilidade de dados (EVANS; OLSON, 1998). Portanto, é necessário um algoritmo que forneça esses números aleatoriamente entre 0 e 1 e que não possuam correlação (LAW; KELTON, 2000). Antes de executar a simulação, deve-se verificar se o gerador de números aleatórios em mãos satisfaz as condições impostas, o que pode ser feito por meio de testes ou de referências que dêem suporte à sua utilização (BURATTO, 2005).

Existem muitas variáveis nos sistemas reais que são estocásticas por natureza, e que podem ser simuladas tais como: tempo das atividades de um projeto, número de empregados ausentes ao trabalho cada dia, volume de vendas, preço da matéria-prima, custo de produtos, viabilidade econômica, dentre outros (SILVA; SILVA; MARINS, 2014).

Uma sequência de passos para utilizar a simulação de Monte Carlo é contemplada pela Figura 5.

Figura 5 – Passos para uso de Monte Carlo.



Fonte: Autor, adaptado de Saraiva Júnior *et al.*, (2011)

Para que a simulação de Monte Carlo proceda corretamente, Lustosa, Ponte e Dominas (2004) recomendam, no mínimo, 100 iterações para que se tenha uma amostra representativa. No entanto, é importante frisar que não há recomendação quanto ao número máximo de simulações a serem realizadas. Como instrução básica, deve-se aplicar o maior número de iterações possíveis levando em consideração o poder de processamento do equipamento a ser utilizado, uma vez que o equilíbrio entre precisão e tempo de computação é uma característica importante das simulações baseadas na SMC (ESCUDEIRO, 1973).

Outra possibilidade, bastante comum, é fazer uso de modelos de simulação e, por meio de análise de cenários, tentar encontrar uma solução que atenda aos requisitos estabelecidos pela empresa em questão.

Uma simulação sempre será no formato $Y = f(x)$, ou seja, os valores de saída (*outputs*) sempre serão em função dos valores de entrada (*inputs*), que por sua vez são estimados por meio de funções empíricas. A partir destes valores, se faz necessário verificar se a distribuição se ajusta bem ou não aos dados da amostra. Esta verificação é feita comparando as frequências amostrais obtidas com as teóricas esperadas pelo modelo que se deseja julgar válido ou não, para então, descrever os dados observados, tal análise é feita por meio do teste de hipótese conhecido por teste de aderência.

2.3. GERAÇÃO DE NÚMEROS ALEATÓRIOS

Os números aleatórios podem ser obtidos por meio de tabelas ou gerados pelo computador. Da mesma forma, o número de dígitos usados nos números aleatórios deve ser o mesmo que o número de dígitos usado nos números de etiqueta. A Tabela 2 mostra os números aleatórios obtidos por meio do método do quadrado do meio desenvolvido por Von Neuman, sendo que, 76 é a primeira semente aleatória (arbitrada), na segunda iteração eleva-se esse número ao quadrado (76^2) = 5.776, retirando os valores do meio como referência para a segunda semente aleatória e, esse processo continua até a simulação terminar. Caso o valor seja zero, outra semente aleatória deve ser escolhida (arbitrada).

Tabela 2 - Números aleatórios.

(76,77,92,46,11,12,14, ...)

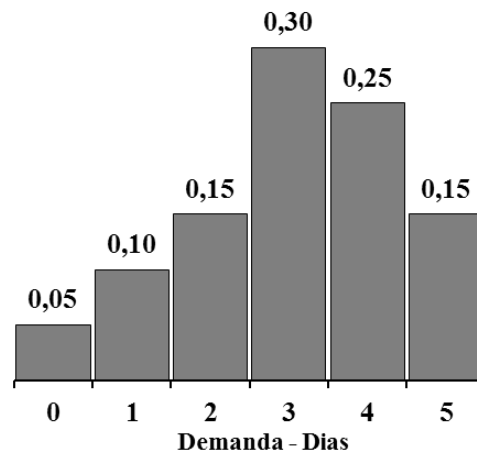
Fonte: Von Neuman (1946)

2.3.1 Estabelecimento da distribuição de probabilidade

A ideia básica da SMC é gerar valores para as variáveis que compõem o modelo a ser estudado. Existem muitas variáveis nos sistemas reais que são probabilísticas por natureza, e que podem ser simuladas tais como: tempo das atividades de um projeto, número de empregados ausentes ao trabalho cada dia, volume de vendas, preço de matéria-prima, custo de produtos, etc. Uma forma comum de estabelecer a distribuição de probabilidade para uma dada variável é por meio da consulta de dados históricos ou estimativas.

Quando se utilizam dados históricos, vale o pressuposto de que estes dados poderão descrever adequadamente o futuro. Porém, se isto não for correto, o recomendável é que se trabalhe com estimativas. Como exemplo, tem-se a demanda diária de determinado bem que pode ser expressa pela distribuição da Figura 6 e que se pretenda gerar um padrão de demanda de 10 dias.

Figura 6 – Distribuição de demanda

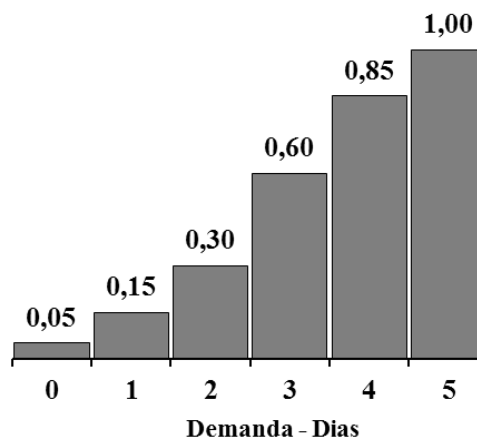


Fonte: Shamblin (1979)

2.3.2 Construção da função de distribuição acumulada para cada variável

A distribuição de probabilidade acumulada para cada nível de demanda é a soma do número de probabilidade de cada demanda adicionada da probabilidade acumulada anterior. A função de distribuição acumulada assim mostrada na Figura 7:

Figura 7 – Distribuição acumulada de demanda



Fonte: Shamblin (1979)

2.3.3 Estabelecimento dos números de etiqueta ou dos intervalos de classe

Os números de etiqueta são atribuídos de tal forma que reflitam a probabilidade dos vários valores da variável e a sequência dos mesmos deve ser fechada. O número de dígitos (por exemplo, dois dígitos de 01, 02,..., 98, 99, 00) deve ser o mesmo que o número de casas

decimais usados nas probabilidades dos valores da variável. Conforme a Tabela 3 os números de etiqueta ou intervalos de classes para o exemplo que está sendo comentado.

Tabela 3 - Intervalos de classe.

Demanda / dia	Intervalo de Classes
0	00 – 04
1	05 – 14
2	15 – 29
3	30 – 59
4	60 – 84
5	85 – 99

Fonte: Shamblin (1979)

2.3.4 Simulação do experimento

Com os números aleatórios coletados da respectiva tabela, elaborase o padrão de demanda de acordo com o interesse, neste caso para o período de 10 dias. Para cada número aleatório, por exemplo, para o número 14, observa-se que ele se situa no intervalo de classe compreendido entre 05 e 14 que corresponde a uma demanda de 1 unidade por dia. Já o número aleatório de 77 corresponde a demanda de 4 un /dia e, o último número aleatório 92 corresponde a uma demanda de 5 unidades para o décimo dia pesquisado. A Tabela 4 mostra a demanda para 10 dias.

Tabela 4 - Números esperados por vários níveis de demanda em 10.000 tentativas.

Dia	Demanda
1	1
2	4
3	2
4	5
5	1
6	3
7	2
8	4
9	2
10	5

Fonte: Shamblin (1979)

Outra possibilidade, bastante comum, é fazer uso de modelos de simulação e, por meio, de análise de cenários tenta-se encontrar uma solução que atenda aos requisitos estabelecidos pela empresa em questão.

Em resumo, programação estocástica pode ser entendida como a extensão de modelos de programação linear ou não linear (Multiobjetivo ou Monobjetivos, Mistos ou Contínuos) para modelos nos quais não se conhecem os coeficientes tecnológicos, e ou recursos (Limitações), e que para tanto são utilizadas representações probabilísticas (NEMHAUSER *et al.*, 1991).

2.4. CAPACIDADE DE PROCESSO

O controle estatístico de processos (CEP) é elemento imprescindível para a sobrevivência e crescimento das empresas na economia moderna (MINGOTI *et al.*, 2011). As empresas buscam por uma posição competitiva no mercado, por meio do aumento da produtividade e da qualidade de seus produtos. Produzir com qualidade significa ter um processo de fabricação estável (MINGOTI *et al.*, 2011).

Com isso em mente, se faz necessária a implantação de mecanismos de monitoramento do processo e medidas que quantifiquem sua capacidade em atender as exigências dos clientes a que seus produtos se destinam (MINGOTI *et al.*, 2011). Cartas de controle são úteis para o monitoramento de parâmetros que definem as estruturas de média e variabilidade dos processos, sejam eles univariados ou multivariados (MONTGOMERY, 2004; MASON; YOUNG, 2002). No entanto, sozinhos não há como avaliar se um processo está operando em conformidade com os limites de especificação definidos. Assim, surge a

necessidade de métodos específicos para tal quantificação. Em caso de processos univariados, a capacidade de processo pode ser medida por meio dos coeficientes de capacidade conhecidos como C_p , C_{pk} e C_{pm} (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2005), sendo σ o desvio padrão, μ a média do processo, $d = \frac{LSE - LIE}{2}$ é o ponto médio do intervalo de especificação, LSE o limite superior de especificação e LIE o limite inferior de especificação.

$$C_p = \frac{LSE - LSI}{6\sigma} \quad (1)$$

$$C_{pk} = \text{Min} \left\{ \frac{LSE - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \right\} \quad (2)$$

$$C_{pm} = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\sigma^2 + (d - \mu)^2}} \quad (3)$$

Segundo Costa, Epprecht e Carpinetti (2005), o índice C_p é insensível a mudanças na média do processo; portanto, só deve ser utilizado quando a média do processo permanece centrada no ponto médio das especificações. Se a média do processo não pertencer ao intervalo das especificações, o índice C_{pk} assumirá valores negativos. Já o índice C_{pm} penaliza os processos pela falta de centralidade (média do processo afastada do centro das especificações) do que pela quantidade produzida de itens não conformes.

Os valores numéricos desses coeficientes estão associados a uma probabilidade de que o processo gere itens não conformes em relação aos limites de especificação (MINGOTI *et al.*, 2011). Desse modo, torna-se possível estabelecer faixas de valores para esses índices que possam ser utilizadas para a classificação de processos como “altamente capazes”, “razoavelmente capazes” e “incapazes” (MINGOTI *et al.*, 2011). É muito comum, no entanto, que a qualidade de um processo seja determinada por mais de uma característica, sendo então desejável avaliar a capacidade do processo por medidas que levem em consideração todas as características simultaneamente (MINGOTI *et al.*, 2011).

O conceito de capacidade de processo está diretamente ligado ao desenvolvimento de produtos, visto que duas características essenciais devem ser levadas em consideração: a qualidade, que atende às necessidades e demandas do cliente, e a confiabilidade do produto, que atende às questões de continuidade das características iniciais projetadas no produto ao longo do seu ciclo de vida, evitando falhas e riscos que afetem a segurança do produto

projetado. Ambas as características devem ser estudadas já no projeto inicial dos componentes do produto, ajudando assim a economizar tempo e custos do projeto (FRANK *et. al.*, 2014).

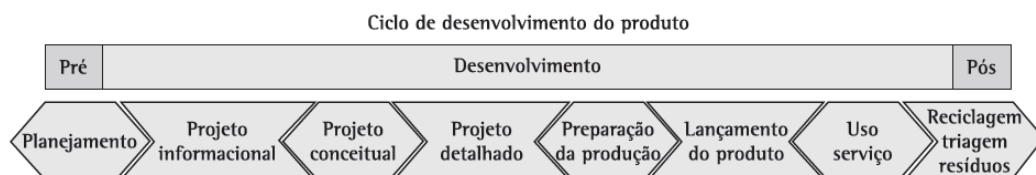
2.5. DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

O processo de desenvolvimento de produtos (PDP) tem como finalidade transformar oportunidades de mercado e possibilidades técnicas em um conjunto de informações para a produção comercial, envolvendo uma série de fases, tarefas e atividades que se complementam, variando entre simultâneas e sequenciais, apresentando suas especificidades de acordo com o produto a ser desenvolvido (ENSSLIN *et al.*, 2011).

É uma atividade complexa e que deve ser gerenciada constantemente para que um novo produto seja bem sucedido no mercado competitivo (ENSSLIN *et al.*, 2011). Para tal, devem ser levados em consideração: qual produto será oferecido, como será a produção, movimentação e armazenamento, e, por fim, velocidade e eficiência, para que o desenvolvimento do produto possa atender clientes e disputar com a concorrência da melhor maneira possível (CLARK; FUJIMOTO, 1991). Além do custo e desempenho técnico do produto, também se busca a maior qualidade do produto possível, colocar o produto no mercado o quanto antes, e, por último, mas não menos importante, o fortalecimento, a cada projeto, das capacitações necessárias para o desenvolvimento de produtos posteriormente (ROCHA *et al.*, 2014; ENSSLIN *et al.*, 2011).

O ciclo de vida do produto é dividido nas seguintes etapas: pré-desenvolvimento, desenvolvimento e pós-desenvolvimento. A Figura 8 esclarece com mais detalhes em oito fases, representando a evolução, complexidade e alocação de recursos no processo de desenvolvimento de produto.

Figura 8 – Ciclo de vida do produto



Fonte: Ensslin *et al.* (2011), adaptado de Larson e Gobeli (1988); Rozenfield *et al.* (2006).

Para todo o suporte necessário ao PDP atingirem esses objetivos, uma ferramenta merece destaque: a análise de modo e efeito de falhas (*Failure Mode and Effect Analysis* = FMEA), que visa melhorar a percepção do cliente em relação às funções do produto,

concentrando na prevenção de falhas, mantendo suas funções básicas e atingindo um nível esperado de qualidade a fim de evitar a insatisfação do cliente (FRANK *et al.*, 2014).

2.6. ANÁLISE DE MODO E EFEITOS DE FALHA POTENCIAL

A Análise de Modo e Efeitos de Falha Potencial (FMEA) pode ser definida como uma ferramenta utilizada para identificar, priorizar e eliminar falhas, problemas e erros potenciais em produtos ou sistemas em desenvolvimento antes do seu lançamento no mercado (GILCHRIST, 1993). O resultado de sua aplicação é a quantificação dos riscos de falha baseada na criticidade de cada modo de falha, provendo uma priorização de modos de falha e uma lista de ações preventivas para seu controle e remoção (FRANK *et al.*, 2014).

Essa ferramenta apresenta um caráter preditivo de falhas e pode ser aplicada ainda na fase de desenvolvimento do produto e nas fases de projeto, de forma a diminuir a frequência de ocorrências de possíveis falhas e melhorar a eficiência em detectá-las, diminuindo a necessidade de retrabalho em estágios posteriores de produção (FRANK *et al.*, 2014).

Pode ser aplicada ao sistema, ao produto ou ao processo. Sua aplicação ao produto permite definir a necessidade de alterações no projeto do produto ainda em suas primeiras fases, estabelecer prioridades para as ações de melhoria, ajudar na definição de testes e validação do produto, identificar características críticas avaliar requisitos e alternativas do projeto (FERNANDES; REBELATO, 2006).

Para executar a FMEA, de acordo com Frank *et al.* (2014), segue-se o seguinte roteiro:

- Identificar modos de falha do produto;
- Identificar efeitos e severidade;
- Identificar possíveis causas e probabilidades de ocorrência;
- Identificar a probabilidade de detecção;
- Avaliar o potencial de risco de cada modo de falha e definição de medidas para sua eliminação ou redução.

Avaliar e priorizar cada modo de falha depende de três índices: (i) ocorrência (O); (ii) severidade (S) e (iii) detecção (D). O produto destes três índices permite obter um índice de risco de cada modo de falha, possibilitando então, determinar a ordem de priorização das falhas para os componentes do produto, seja quantas existirem, de forma que mecanismos de controle sejam estabelecidos para evitar a sua ocorrência (FRANK *et al.*, 2014).

2.7. FADIGA

Falhas ocorrem em máquinas devido a cargas que variam com o tempo. De modo geral, acontecem com valores de tensão muito inferiores aos de escoamento do material. Este fenômeno é conhecido como fadiga (NORTON, 2004).

A falha por fadiga se inicia em trincas localizadas nas microestruturas do material, que surgem durante a fabricação, ou devido aos esforços cíclicos nos quais o componente é exposto ao longo de sua vida. Essas, na maioria dos casos, aparecem em entalhes ou outras geometrias que servem como concentradores de tensão, propagando-se com o tempo até que a fratura ocorra. Desta forma, saber analisar um processo de fadiga em algum componente mecânico é de extrema importância, uma vez que com o dimensionamento e especificação corretos, a segurança e confiabilidade do projeto estão garantidas.

Em análise, qualquer carga cíclica (seja representada por uma curva senoidal ou “dente de serra”) pode causar falha por fadiga. A forma de onda tensão-tempo ou deformação-tempo terá a mesma aparência geral da frequência que a onda carga-tempo. Assim, fatores como amplitude, valor médio da onda de tensão-tempo e número total de ciclos de tensão que o elemento é submetido tem influência direta no mecanismo de fratura (NORTON, 2004).

Para entender melhor o mecanismo de falha, algumas variáveis devem ser levadas em consideração: tensão máxima ($\sigma_{\max}$), tensão mínima ($\sigma_{\min}$), tensão alternada (σ_a) e razão de tensões (R):

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})}{2} \quad (4)$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (5)$$

□

□

O parâmetro R é um fator que demonstra o tipo de carregamento ao qual está sujeito o componente. Se o ciclo varia de carga zero para carga de tração, R é nulo e o carregamento é dito como repetido. Caso a carga variar de tração para compressão em mesma intensidade ($R = -1$), o carregamento é chamado totalmente reverso. Por fim, se houver apenas tração durante todo o ciclo ($R > 0$), o carregamento é flutuante.

2.8. MODELAGEM DE FADIGA

De acordo com Zheng *et al.* (2014), uma análise numérica para predição de vida em fadiga pode ser composta de quatro modelos computacionais principais. Primeiramente se devem obter as respostas locais de tensão-deformação em um ponto estrutural sob um histórico de carga cíclica. Para tal, um modelo eficiente do material é necessário. Sob uma série de carregamentos complexos, um critério de dano multiaxial é usado para abordar o início e propagação da trinca. Métodos de contagem cíclica e um modelo de acúmulo de dano em fadiga serão usados para a avaliação da vida em fadiga.

2.8.1. O critério de Brown-Miller

O critério de falha em fadiga, no qual a tensão equivalente é um vetor, é comumente conhecido como abordagem dos planos principais. Processos de dano em fadiga são definidos com os planos críticos do material, nos quais um determinado parâmetro de dano exerce seu maior valor para um dado histórico de carga (ZHENG *et al.*, 2014). Na abordagem dos planos críticos, os eventos de dano em fadiga usam geralmente funções paramétricas de tensão-deformação envolvendo componentes de tensão normal e tensão de cisalhamento, como a seguir (ZHENG *et al.*, 2014):

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_n}{2} = C_1 \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + C_2 \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (6)$$

sendo C_1 e C_2 coeficientes do material, $\Delta\gamma_{\max}$ a amplitude da deformação de cisalhamento, $\Delta\varepsilon_n$ a amplitude da deformação normal, σ'_f o coeficiente de resistência à fadiga, b o expoente de resistência à fadiga, ε'_f o coeficiente de ductilidade à fadiga, c o expoente de ductilidade à fadiga, $2N_f$ a vida em fadiga e E o módulo de elasticidade do material.

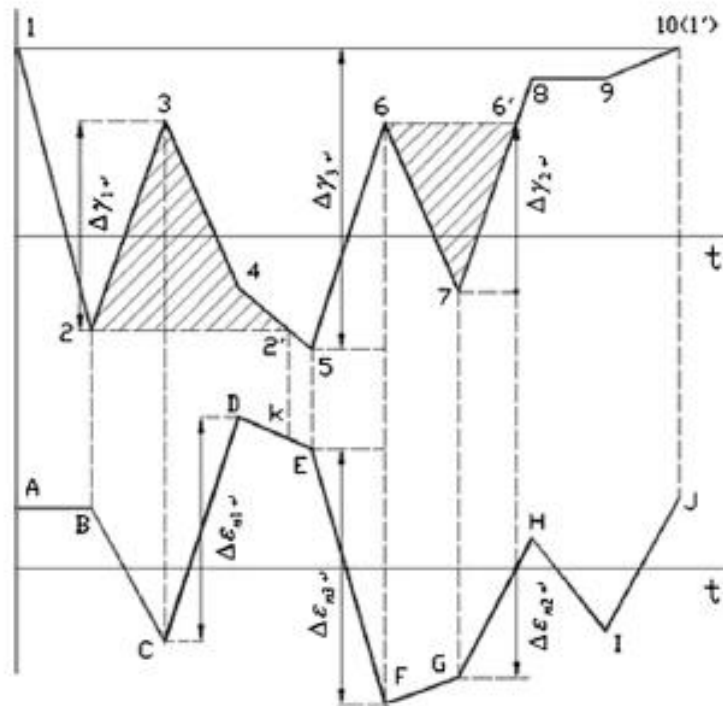
Segundo Zheng *et al.* (2014), $C_1 = 1,65$ e $C_2 = 1,75$. Substituindo em (6) tem-se:

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_n}{2} = 1,65 \cdot \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + 1,75 \cdot \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (7)$$

2.8.2. Método *Rainflow* de contagem de ciclos

Wang e Wang (2005) propuseram um método de contagem *rainflow* baseado na teoria dos planos críticos. Neste método, primeiramente, é contado o histórico de tensões de cisalhamento no plano crítico, e alguns períodos cíclicos e pontos retráteis da tensão de cisalhamento são obtidos. Então, de acordo com a relação do ponto retrátil de tensão de cisalhamento correspondente ao ponto de tensão normal, a máxima amplitude de tensão normal em um ciclo é calculada. Após este procedimento, a contagem do primeiro ciclo pode ser obtida. Repete-se, então, o mesmo procedimento para todos os ciclos até o final da contagem.

Figura 9 – Contagem cíclica para fadiga multiaxial



Fonte: Zheng *et al.* (2014)

A Figura 9 é um exemplo de aplicação deste método de contagem. Segundo o procedimento, o histórico de cisalhamento pode ser dividido em 2-3-2', 6-7-6' e 1-5-1'. No ciclo 2-3-2', a amplitude é $\Delta\gamma_1$ e os pontos de carga são 2, 3 e 5. Então, o ponto 2' é correspondente no histórico de deformação de cisalhamento ao ponto K no histórico de deformações normais. Então, a máxima amplitude (ϵ_{n1}) de tensão normal em B-C-D-K pode ser avaliada.

2.8.3. Regra de acúmulo de dano de Palmgren-Miner

Para prever a vida em fadiga de estruturas sob carregamentos cíclicos, geralmente, se usa uma regra de acúmulo de dano. Sob uma amplitude de carga constante, a regra de Palmgren-Miner (regra P-M) é bem aceita e usada (Zheng *et al.*, 2014).

Para tanto, o modelo de acúmulo de dano pode ser expresso por:

$$D = \frac{1}{N} \quad (8)$$

Sendo D o dano em fadiga e N a vida em fadiga.

Como uma amplitude constante de carga é aplicada, depois de n ciclos, o modelo de dano pode ser escrito como:

$$D = \frac{n}{N} \quad (9)$$

Se a roda falha no n -ésimo ciclo, então temos:

$$D = \frac{n}{N} = 1 \quad (10)$$

3. ESTUDO TEÓRICO E PRÁTICO DA TECNOLOGIA DE RODAS AGRÍCOLAS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Na engenharia automotiva, rodas são um dos componentes mais críticos e sua função é de vital importância na segurança. Com constantes mudanças nos requisitos da indústria automotiva na última década, produtores de rodas aumentaram sua atenção para *designs* mais leves com novos materiais e tecnologias em contradição à preocupações de durabilidade devido à complexas condições de carga nas rodas (KOCABICAK; FIRAT; 2001). Sabendo que o período médio de *design* é de seis meses ou mais dependendo dos requisitos, é preciso uma metodologia confiável para prever os parâmetros de durabilidade, como vida em fadiga, durante os testes (KOCABICAK; FIRAT; 2001).

Rodas, de modo geral, seguem o padrão TRA (*The Tire and Rim Association*), órgão americano que estabelece padrões para pneus, aros, tubos, válvulas e flaps para carros de passeio, motocicletas, caminhões, ônibus, casas móveis, trailers, veículos aéreos, veículos de terraplenagem, construtores de estrada, mineração, agrícola, industriais e outros veículos.

A distribuição de tensão na roda depende do modo de operação e a tensão em qualquer ponto da roda é composta de pré-cargas e cargas de serviço (KOCABICAK; FIRAT; 2001). As cargas de serviço são resultado de solicitações da força vertical *FV* (composta da carga estática do peso do veículo e forças dinâmicas desenvolvidas em irregularidades do terreno de serviço) e da força lateral *FL* (devido à frenagem e aceleração) (KOCABICAK; FIRAT; 2001). Para rodas agrícolas, os tipos de serviço são:

- *Earthmover* – Removedor (terraplenagem): é o ciclo de trabalho onde o equipamento se autocarrega ou recebe a carga do equipamento carregador, transportando-se para outro local e voltando descarregado;
- *Loader* – Carregador: é o ciclo de trabalho onde o equipamento é usado para recolher materiais e transportá-los a curta distância;
- *Load and Carry* – Carregador e Transportador: é o ciclo de trabalho onde o equipamento funciona primeiro para carregar, transportando a carga para outro local e retornando descarregado;
- *Dozer* – Trator de rodas: condição de trabalho onde o equipamento é usado para mover materiais (usualmente terra), empurrando, gradeando ou nivelando.

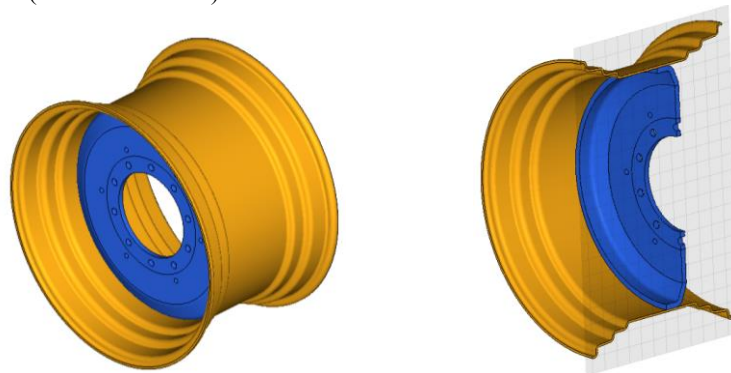
- *Grader* – Nivelador: condições de trabalho onde o equipamento é utilizado na construção e manutenção de estradas;
- *Creep* – movimento de equipamento em velocidade muito baixa;
- *Drive away* – termo usado para definir o movimento que ocorre durante o transporte do equipamento para o canteiro de obra, sem ser utilizado em condições de trabalho.

3.2. O PROCESSO PRODUTIVO

Determinar a sequência e número de operações é um dos principais problemas, e, na maioria dos casos, estes parâmetros são limitados devido a restrições geométricas e técnicas (MOGHADDAM *et al.*, 2013). Rodas com disco são componentes mecânicos produzidos a partir de uma chapa, estampadas em prensas hidráulicas e/ou mecânicas com matrizes progressivas, geralmente em três ou mais estágios (KOCABICAK; FIRAT; 2001, MOGHADDAM *et al.*, 2013), sendo eles estampagem a frio, corte de furos (fixação, central, peso, içamento) e usinagem (para correção de medidas de acordo com o projeto, bem como o acabamento da peça).

Cada disco será então montado num aro, fabricado seguindo várias laminações que darão ao aro o formato e tamanho desejado, e será soldado ou parafusado segundo normas. A Figura 10 apresenta uma roda genérica com disco soldado em vista cheia e em corte.

Figura 10 – Vista isométrica (cheia e em corte) de uma roda soldada



Fonte: *HYPERWORKS*TM

Por fim, as rodas, quando protótipos, devem ser testadas em laboratório para avaliar suas capacidades essenciais, simulando condições de uso fora de estrada em tratores, colheitadeiras, *trailers* e implementos (EUWA *Standards – Test Requirements for Agricultural Wheels*; 2004).

3.3. TESTES DE FADIGA EM RODAS

A cada introdução de produtos novos ou modificados em produção requer a condução de uma série de cálculos e experimentos que verificariam a qualidade desejada (TARASIUK *et al.*, 2013). No caso de rodas agrícolas é necessário estimar sua vida em fadiga e durabilidade a um baixo custo (TARASIUK *et al.*, 2013).

Na avaliação de fadiga do design de uma roda, o processo comumente aceito para produtores é passar em dois testes de durabilidade: teste de fadiga radial e teste de fadiga *cornering*. O teste de fadiga *cornering* é um dos mais tradicionais para verificação de protótipos. A meta desse teste é simular as solicitações dinâmicas da roda durante *cornering* na estrada. As forças relevantes que atuam na roda são a combinação de cargas verticais e laterais desenvolvidas entre o pneu e o solo. As duas componentes do carregamento resultam num momento torçor na fixação da roda (KOCABICAK; FIRAT; 2001). Durante o teste, é aplicada uma amplitude constante ou variável desse momento:

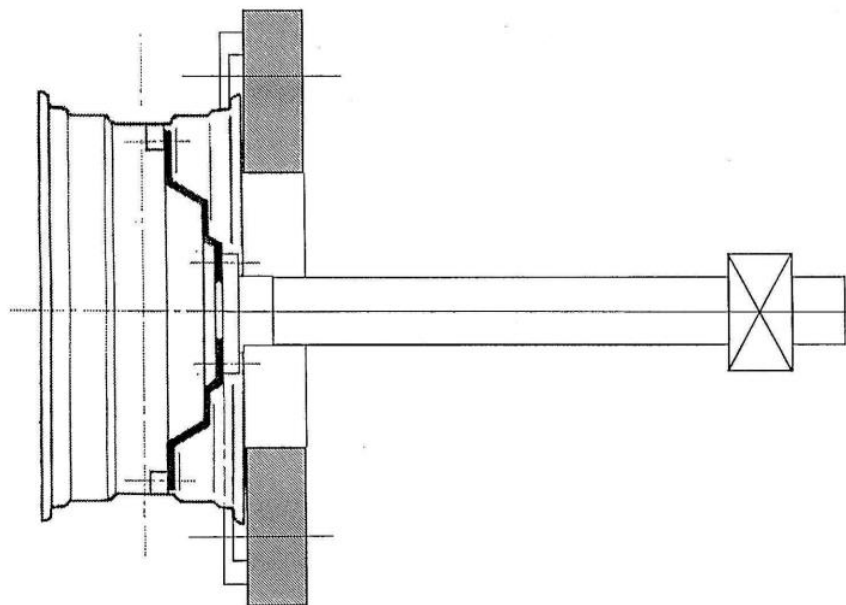
$$M = (R \cdot \mu + d) \cdot F_V \cdot S \quad (11)$$

sendo, R o raio do maior pneu a ser usado na roda, conforme especificado pelo fabricante do pneu/roda; μ o coeficiente de fricção desenvolvido na interface pneu/solo, para tratores agrícolas (40 km/h) μ , geralmente, é em torno de 0,25; 0,30, para tratores rápidos (50 km/h) e 0,35 para trailers agrícolas (65-80 km/h); d é offset da roda; FV é a carga radial atuante; S é o fator de teste ($1,4 < S < 1,7$).

Para prever o número de ciclos num teste de fadiga tipo *cornering*, a vida de início de trinca é o principal e duas informações são de extrema importância: (a) encontrar o local em que a trinca pode ser iniciada durante o teste, (b) avaliar o histórico de tensão-esforço nas localidades críticas (KOCABICAK; FIRAT, 2001).

Em teste *cornering*, de acordo com a norma EUWA, as rodas são montadas conforme a Figura 11. A roda é posicionada em ângulos extremos e é altamente solicitada por uma haste, realizando um movimento circular ao redor do furo central do disco da roda.

Figura 11 – Esquema padrão da norma EUWA para teste de fadiga tipo *cornering*



Fonte: EUWA Standards

4. DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA

4.1. DESCRIÇÃO DA EMPRESA OBJETO DE ESTUDO

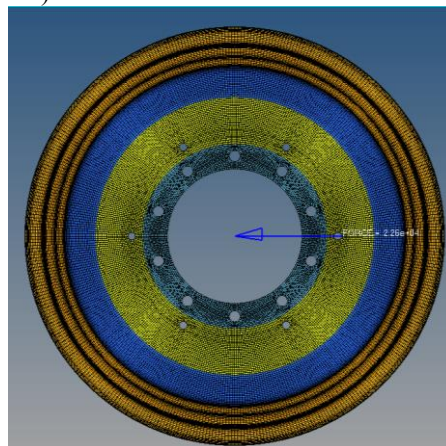
A empresa fabricante do objeto de estudo atua nos segmentos automotivo e ferroviário. Ela exporta produtos (chassis, longarinas, travessas, para-choques, componentes estampados em geral, rodas e aros para ônibus, caminhões e implementos agrícolas) para diversos países. Seus produtos são projetados por sistemas computadorizados, por meio de modelagem matemática, colocando à disposição do mercado serviços de engenharia automotiva com flexibilidades em softwares de CAD, engenharia de produto / projetos de componentes, modelagem, protótipos, análise estrutural via método de elementos finitos.

Sua capacidade fabril cresceu e expandiu apoiada na mais avançada tecnologia de desenvolvimento do produto e dos processos de fabricação e no constante aprimoramento da qualidade. Fornecendo para as principais montadoras do país e atendendo ainda a diversos clientes no exterior. Além de contar com moderno e sofisticado maquinário, a empresa adota eficientes técnicas de produção, como sistema *Just-in-time*, controle estatístico de processo, utilização de estoques mínimos e um arrojado programa de melhorias onde conta com a participação de seus colaboradores.

4.2. CONSTITUIÇÃO DO MODELO E PROCEDIMENTOS

O modelo de simulação inicia-se com a modelagem da roda em estudo pelo método de elementos finitos, obtido pelo *software* *HYPERWORKS*TM e contemplado na Figura 12.

Figura 12 – Vista frontal da roda (plano YZ)



Fonte: *HYPERWORKS*TM

Como num teste *cornering* os esforços de interesse ocorrem no disco, todos os cálculos e considerações feitas serão referentes somente ao disco. O material do disco é o aço S355JR, cujas propriedades mecânicas estão descritas na Tabela 5:

Tabela 5 – Propriedades do aço S355JR

σ'_f [MPa]	b	ε'_f	c	E [MPa]	ν	G [MPa]
921,0	-0,094	0,9	-0,6	207000	0,285	80544,7471

Fonte: Zhang *et al.*, 2009

Uma simulação foi feita no próprio *HYPERWORKS*TM, a fim de replicar o histórico de tensões aplicadas em 1/4 ciclo do teste *cornering* (de 0° a 90°) a um passo de 18°. Obtiveram-se, então, os picos de tensão normal e cisalhante aplicadas no plano XY.

No modelo, puderam ser determinadas as localidades críticas e ε_x , ε_y e γ_{xy} (deformações específicas, normais e de cisalhamento, respectivamente, no plano XY) podem ser extraídos dos históricos de tensão, nas localidades críticas, utilizando as equações de (12) a (14) e as propriedades do material do disco, sendo σ_x a tensão normal no eixo X, σ_y a tensão normal no eixo Y e τ_{xy} a tensão de cisalhamento no plano XY.

A partir dos valores de ε_x , ε_y e γ_{xy} , é possível determinar as deformações específicas normal e de cisalhamento de cada plano que faz ângulo com OX (ε_θ e γ_θ , respectivamente), utilizando-se para tanto as expressões (15) e (16):

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu \cdot \sigma_y}{E} \quad (12)$$

$$\varepsilon_y = -\frac{\nu \cdot \sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} \quad (13)$$

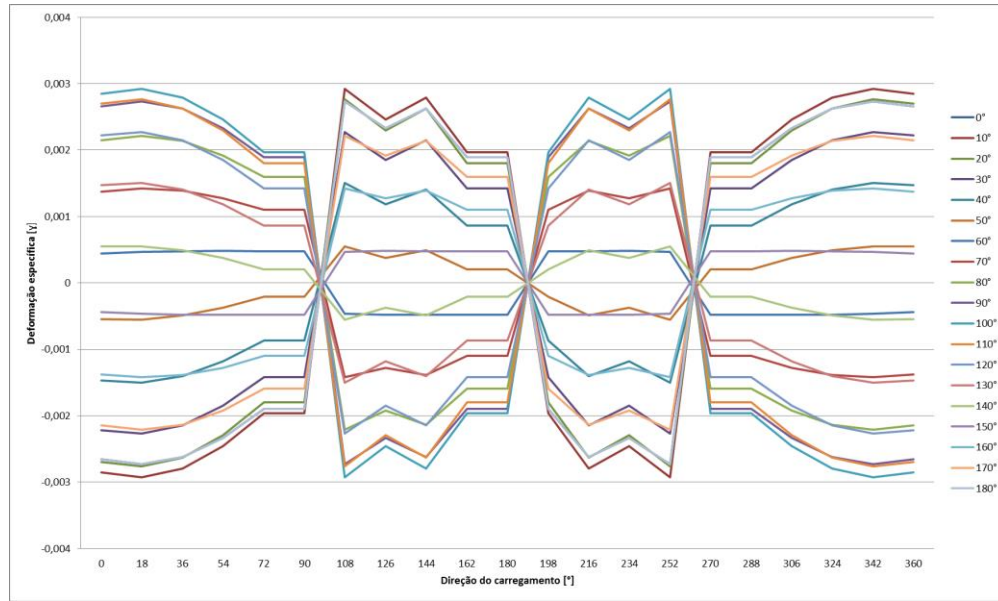
$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (14)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cdot \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \cdot \sin 2\theta \quad (15)$$

$$\gamma_\theta = -(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \sin 2\theta + \gamma_{xy} \cdot \cos 2\theta \quad (16)$$

A Figura 13 representa os valores obtidos de γ_θ , que foram usados para se determinar o plano crítico de aplicação de tensões.

Figura 13 – Histórico de γ_θ nos planos de 0° a 180°



Fonte: Autor

De acordo com a Figura 13, nota-se que os maiores pontos de deformação encontram-se nos planos a 10° e a 100° ($\gamma_\theta = 0,002924$), ocasionando um “empate” entre os possíveis planos críticos. Desta forma, como há dois planos com a mesma deformação de cisalhamento (γ_θ) máxima possível, deve-se escolher o plano em que há a maior deformação normal (ε_θ). Sendo assim, os valores obtidos para ε_θ foram: 0,00119 a 100°; 0,00114 a 10°. Portanto, o plano crítico a ser considerado é o plano a 100°.

Fazendo uso de (7), como só seria possível isolar o parâmetro $2N_f$ por séries ou métodos iterativos (o que levaria mais tempo do que o necessário e não faz parte do escopo deste trabalho), este parâmetro será fixado em 100.000 ciclos, segundo a norma EUWA. Desta forma, deve-se obter qual o valor máximo permitido do parâmetro de dano em fadiga utilizando-se:

$$P_{CR} = \frac{\Delta\gamma_{máx}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_n}{2} \quad (17)$$

Em seguida, caso atenda aos requisitos de teste segundo a norma EUWA, considerando os possíveis erros, pode-se validar o teste. Caso não atenda, é possível propor mudanças para a otimização do projeto, como, por exemplo: alteração do material usado na fabricação da roda e/ou alteração da geometria do ponto crítico.

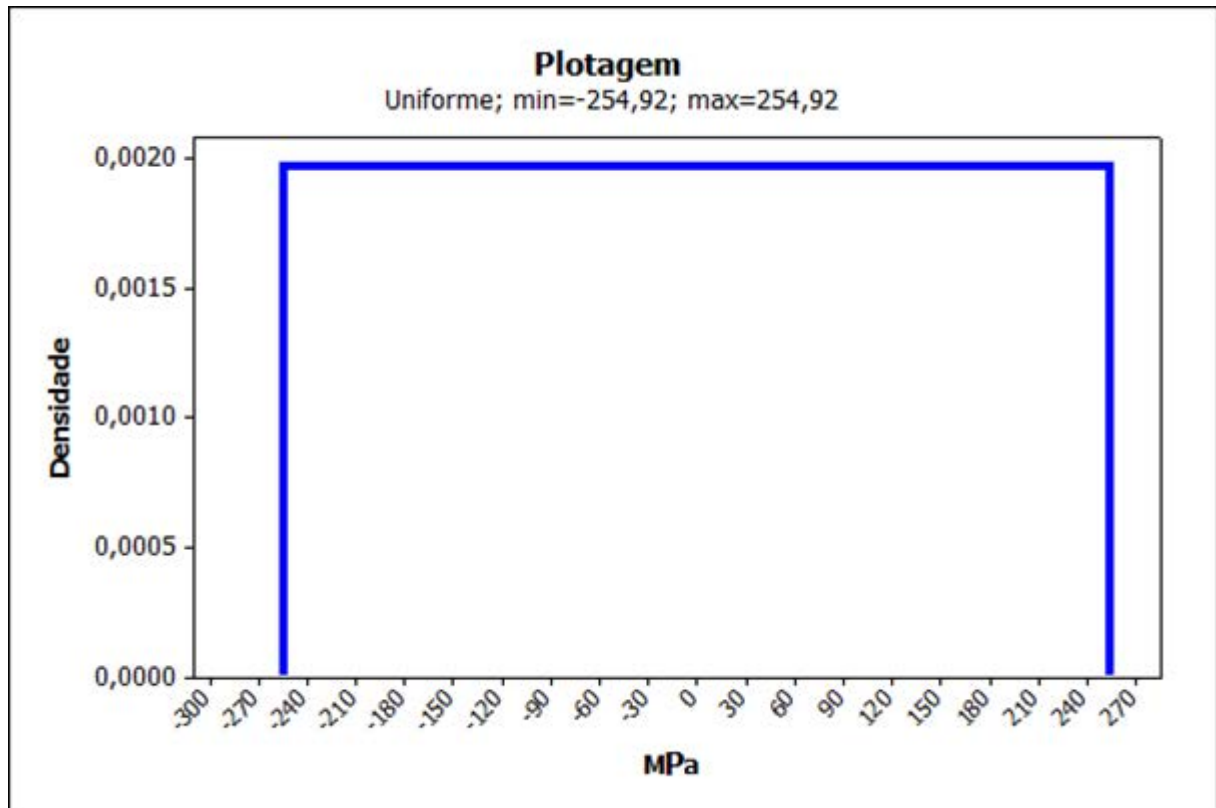
4.3. EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

Esta simulação foi definida como $Y = f(x)$, ou seja, um valor de saída igual a uma função dos valores de entrada (X ou *input*). As variáveis de entrada, ou *inputs* (X), utilizados foram σ_x (tensão normal no eixo X), σ_y (tensão normal no eixo Y) e τ_{xy} (tensão de cisalhamento em uma face no plano XY). A função de saída é dada por (17).

Com base no *software* *HYPERWORKS*TM, os valores dos *inputs* variam nos intervalos descritos pela Tabela 6, sendo que, para realizar a simulação destes fatores (X) utilizou-se a distribuição uniforme contínua, visando assim, simulação todos os pontos entre o intervalos Máximos e mínimos.

A Figura 14 contempla o comportamento da distribuição uniforme contínua para a variável (*input*) σ_x . Em outras palavras, qual valor entre os intervalos mínimos (-254,92) e máximos (254,92), têm a mesma probabilidade de ocorrência.

Figura 14 – Plotagem da distribuição de probabilidade uniforme para σ_x [MPa]



Fonte: Autor

Tabela 6 – Max e Min de tensão aplicadas

	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	τ_{xy} [MPa]
MAX	254,92	422,925	220,078
MIN	-254,92	-422,925	-220,078

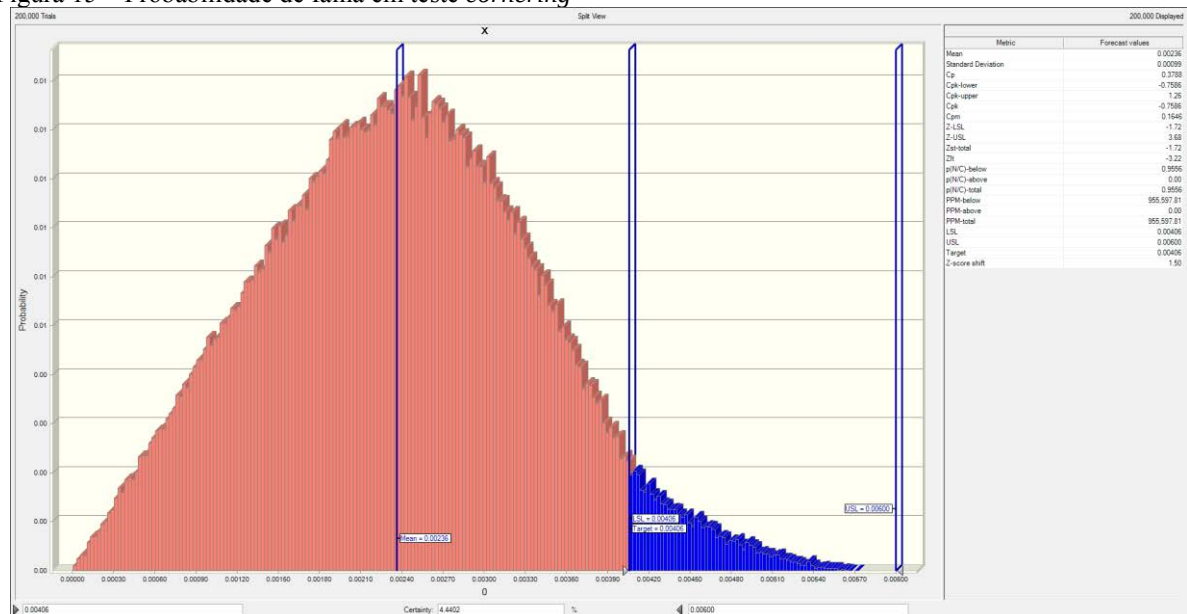
Fonte: *HYPERWORKS*TM

No *Crystal Ball*TM, que foi o *software* utilizado para executar a SMC, as variáveis de *input* foram configuradas como uma distribuição uniforme, que percorrerá todos os valores possíveis dentre os máximos e mínimos estabelecidos. Durante o processo, serão obtidos valores de ε_x , ε_y , τ_{xy} , ε_θ e γ_θ . Por fim, serão obtidos valores de $P_{CR} = \frac{\Delta\gamma_{máx}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_n}{2}$.

Segundo a norma EUWA, a vida em fadiga mínima a ser obedecida é de 100.000 ciclos, o que resulta em $P_{CR} = 0,004063$.

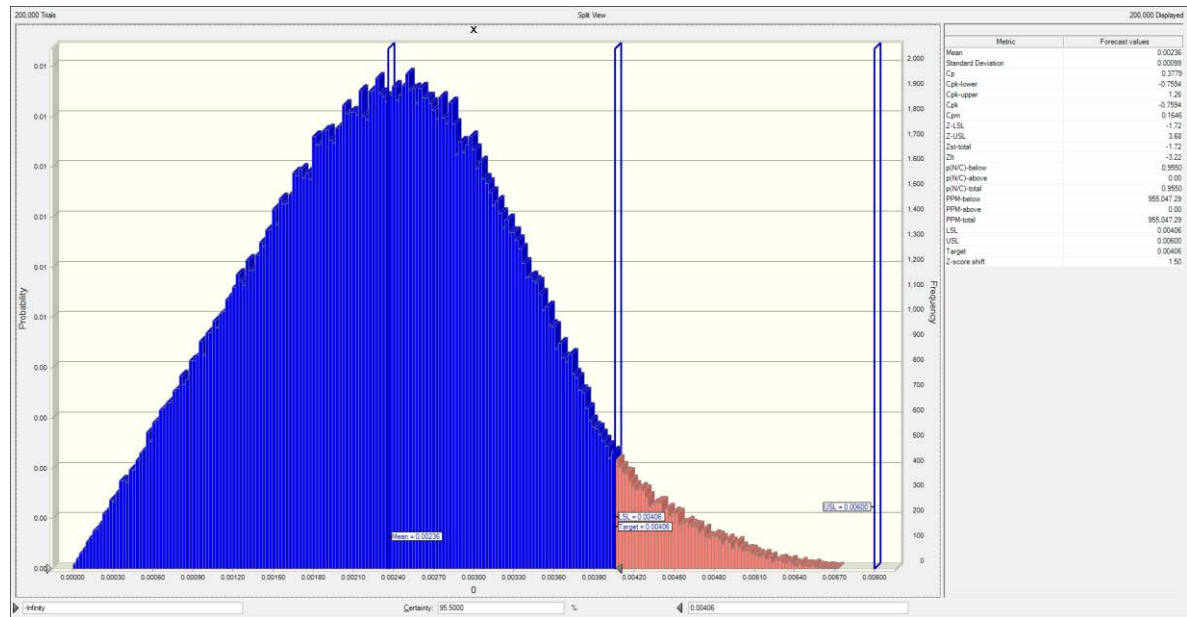
O resultado da simulação é ilustrado nas Figura 15 e 16. Percebe-se, que a probabilidade em 200.000 corridas (simulações), de a roda falhar em teste *cornering* abaixo de 100.000 ciclos é 4,44%, probabilidade esta centrada entre 28.000 ciclos e 90.000 ciclos. Já a probabilidade de a roda atender aos requisitos do teste é de 95,5%.

A Figura 17 contempla a análise de sensibilidade dos *inputs*.

Figura 15 – Probabilidade de falha em teste *cornering*

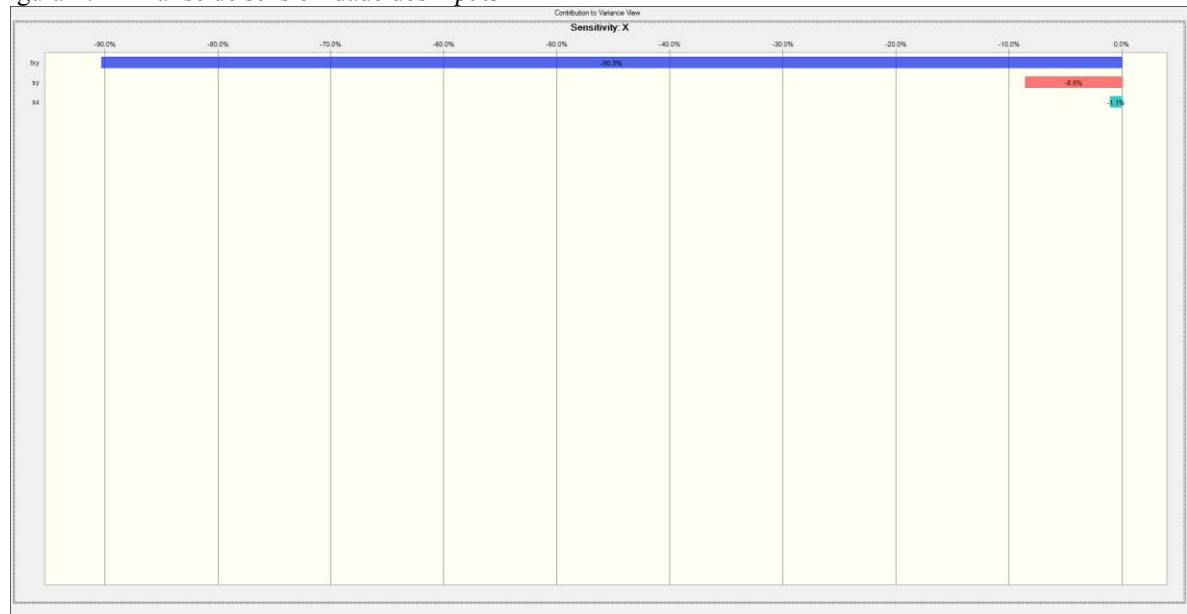
Fonte: *CrystalBall*TM

Figura 16 – Probabilidade de aprovação em teste *cornering*



Fonte: CrystalBall™

Figura 17 – Análise de sensibilidade dos inputs



Fonte: CrystalBall™

Comparando os resultados da simulação com os parâmetros de dano calculados previamente, nota-se que os valores com maior probabilidade de ocorrência são bem menores do que o mínimo estabelecido. Historicamente, discos produzidos com aço S355JR apresentaram uma vida em fadiga de até 775.768 ciclos, o que resulta em $P_{CR} = 0,002513$. Já rodas que falharam em teste antes da especificação apresentaram uma vida em fadiga entre

28.881 ciclos e 88.288 ciclos, resultando em $P_{CR} > 0,004063$. Desta forma, é seguro afirmar que a simulação se aproximou bastante da realidade.

A análise de sensibilidade da Figura 17 demonstra que a tensão de cisalhamento em uma face no plano XY tem uma influência de 90,3% em P_{CR} . Isto pode ser confirmado pelo fato de o teste *cornering* analisar os efeitos de altas solicitações com a roda posicionada em ângulos extremos, ocasionando tensões de cisalhamento.

Sobre a capacidade deste processo, foi examinado o C_{pk} superior (o C_{pk} inferior pode ser desconsiderado, uma vez que valores abaixo de 100.000 ciclos não são de interesse) de 1,26, demonstrando que o processo de fabricação é capaz de atender as especificações dos clientes.

É importante frisar, no entanto, que esta simulação foi feita considerando uma situação próxima do ideal, justamente por não haver como afirmar como é, de fato, o comportamento da microestrutura do material utilizado. Isto é, não se sabe ao certo da existência de micro trincas, concentradores de tensão, impurezas que possam afetar as propriedades do material, a influência da temperatura da roda no teste.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

5.1. VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS

Com a simulação completa descrita no Capítulo anterior e pelas Figura 15 e 16 com os valores mais prováveis para P_{CR} , nota-se que o método foi eficaz em replicar como a roda estudada se comporta em testes *cornering*. No entanto, é importante lembrar que se trata de uma situação ideal, ou seja, não é possível saber como é, de fato, o comportamento da microestrutura do material da roda e somente os esforços de interesse foram levados em consideração. Mas, ainda assim, comparando os resultados simulados com os testes físicos em laboratório e os dados históricos, observa-se que, mesmo com tantas aproximações, os resultados se aproximaram muito do real.

Desta forma, é possível descrever algumas vantagens para o uso da SMC em testes de fadiga *cornering*. A primeira delas é o ganho com relação ao tempo, uma vez que é possível realizar diversas simulações em intervalos de tempo bem menores do que nos testes físicos, que costumam durar de 3 a 4 dias, aproximadamente.

Outra vantagem é o ganho financeiro. Para se executar um teste *cornering* é necessário uma máquina de alto consumo de energia e um alto custo de mão-de-obra especializada para o acompanhamento do teste.

Em suma, os resultados desse trabalho indicam que este método de simulação é apropriado para a análise de projetos de rodas.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Para futuras pesquisas:

- Aplicação deste método de simulação para outras rodas, de diferentes dimensões e diferentes materiais, a fim de verificar a abrangência do método;
- Aplicação deste método de simulação para outros tipos de teste de fadiga em rodas.

REFERÊNCIAS

- BANKS, J.; CARSON, J.; NELSON, B. **Discrete-event system simulation**. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, Eindhoven, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.
- BORSHCHEV, A.; FILIPPOV, A. From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE SYSTEM DYNAMICS SOCIETY, 22, 2004, Oxford. **Proceedings...** Oxford: St. Petersburg Technical University, 2004. Disponível em: <http://www.systemdynamics.org/conferences/2004/SDS_2004/PAPERS/381BORSH.pdf>. Acesso em: 30 set. 2015.
- BURATTO, M. V. **Construção e avaliação de um modelo de simulação Monte Carlo para analisar a capacidade de pagamento das empresas em financiamentos de longo prazo**. 2005. 140 f. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Contabilidade e Finanças) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
- CLARK, K. B.; FUJIMOTO, T. **Product development performance: strategy, organization and management in the world auto industry**. Boston: Harvard Business School Press, 1991.
- CORRAR, L. J. **O modelo econômico da empresa em condições de incerteza - aplicação do método de simulação de Monte Carlo**. Caderno de Estudos, São Paulo: FIECAFI/FEA/USP, n. 8, p. 1-13, 1993.
- COSTA, F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle estatístico de qualidade**. São Paulo: Editora Atlas, 2005.
- ENSSLIN, L.; QUEIROZ, S.; GRZEBIELUCKAS, C.; ENSSLIN, S. R.; NICKEL, E.; BUSON, A.; BALBIM JUNIOR, A., Identificação das necessidades do consumidor no processo de desenvolvimento de produtos: uma proposta de inovação ilustrada para o segmento automotivo. **Produção**, Florianópolis, v. 21, n. 4, p. 555-569, 2011.
- ESCUADERO, L. F. **La simulación en la empresa**. Bilbao: Ediciones Deusto, 1973.
- EUWA Standards 3.12: **Tests Requirements for Agricultural Wheels**, 2004. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/0B-o2PbhwYWzYZI9qdjF1dmNIYjQ/view?usp=drive_web>. Acesso em: 29 set. 2015.
- EVANS, J. R.; OLSON, D. L. **Introduction to Simulation and Risk Analysis**. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- FERNANDES, J. M. R.; REBELATO, M. G. Proposta de um método para integração entre QFD e FMEA. **Revista Gestão & Produção**, Curitiba, v. 13, n. 2, p. 245-259, 2006.

FORRESTER, J. W. **Industrial dynamics**. Cambridge: MIT Press, 1961.

FRANK, A. G.; PEDRINI, D. C.; ECHEVESTE, M. E.; RIBEIRO, J. L. D. Integração do QFD e da FMEA por meio de uma sistemática para tomada de decisões no processo de desenvolvimento de produtos. **Production**, Porto Alegre, v. 24, n. 2, p. 295-310, 2014.

GILCHRIST, W. Modelling Failure Modes and Effects Analysis. **International Journal of Quality and Reliability Management**, Sheffield, v. 10, n. 5, p. 16-23, 1993.

GUJARATI, D.N.; **Econometria básica**. 3. ed. São Paulo: Makron Books, 2002.

JURAN, J. M.; GRZYNA, F. M. **Controle da qualidade: handbook**. São Paulo: Makron, 1992.

KOCABICAK, U.; FIRAT, M. Numerical analysis of wheel cornering fatigue tests. **Engineering Failure Analysis**, Adapazari, v. 8, n. 4, p. 339-354, 2001.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modelling and analysis**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2000.

LUSTOSA, P. R. B.; PONTE, V. M. R.; DOMINAS, W. R. Simulação. In: CORRAR, L. J.; THEÓPHILO, C. R. (Orgs.). **Pesquisa Operacional para decisão em contabilidade e administração**. São Paulo: Atlas, 2004. p. 242-284.

MASON, R. L.; YOUNG, J. C. **Multivariate statistical process control with industrial applications**. Pennsylvania: Siam, 2002.

MINGOTI, S. A.; OLIVEIRA, F. L. P.; CONCEIÇÃO, M. M. C., Índices de capacidade para processos multivariados independentes: extensões dos índices de Niverthi e Dey e Mingoti e Glória. **Produção**, Belo Horizonte, v. 21, n. 1, p. 94-105, 2011.

MOGHADDAM, M. J.; SOLEYMANI, M. R.; FARSI, M. A., 2013 Sequence planning for stamping operations in progressive dies. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Tehran, v. 26, n. 1, p. 347-357, 2015.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MOORE, J. & WEATHERFORD, L.R. **Tomada de decisão em administração com planilhas eletrônicas**. 6.ed. Porto Alegre: Bookman Companhia Editora, 2006.

NEMHAUSER, G. L.; RINNOOY KAN, A. H. G.; TODD, M. J. **Optimization**. Atlanta: Northholland, 1991. (Handbooks in Operations Research and Management Science, v. 1).

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada** / Robert L. Norton: tradução João Batista de Aguiar- 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004

PERELMAN, S.; SANTIN, D. How to generate regularly behaved production data? A Monte Carlo experimentation on DEA scale efficiency measurement. **European Journal of Operational Research**, Liège, v. 199, n. 1, p. 303–310, 2009.

PIDD, M. **Modelagem empresarial: ferramentas para tomada de decisão**. Porto Alegre: Artes Médicas Sul, 1996.

ROCHA, J. R. P; SALERNO, M. S, O papel do APQP – Advanced Planning for Product Quality no desenvolvimento de produtos: análise de casos na relação montadora-autopeças. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 21, n. 2, p. 231-243, 2014.

SAKURADA, N.; MIYAKE, D. I. Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços. **Gestão & Produção**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 25-43, 2009.

SARAIVA JUNIOR, A. F.; TABOSA C. M., COSTA, R. P., Simulação de Monte Carlo aplicada à análise econômica de pedido. **Produção**, São Paulo v. 21, n. 1, p. 149-164, 2011.

SHAHINIDIS, N. V. Optimization under uncertainty: state of the art and opportunities. **Computers and Chemical Engineering**, Urbana, v. 28, n. 6-7, p. 971–983, 2004.

SILVA, A. F., SILVA, M. F. F., MARINS, F. A. S., Otimização estocástica com múltiplos objetivos e Simulação de Monte Carlo no desenvolvimento de estratégias de vendas. **Revista eletrônica Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, Rio de Janeiro, v.6, n.1, p. 35-53, 2014.

TARASIUK, P.; MOLSKI, K. L; SZYMANIUK, A., Fatigue designing of welded agricultural wheels. **Eksploatacja i Niezawodnosc**, Białystok v.15, n.2, p.123-128, 2013.

WANG, L; WANG, D.; Life prediction approach for random multiaxial fatigue. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, Shenyang, v. 18, n. 1, p. 145-148, 2005 .

ZHANG, Y. -H.; MADDOX, S. J., Fatigue life prediction for toe ground welded joints. **International Journal of Fatigue**, Cambridge, v. 31, n 7, p. 1124-1136, 2009.

ZHENG, Z. -G.; SUN, T.; XU, X. -Y; PAN, S. -Q; YUAN, S., Numerical simulation of steel wheel dynamic cornering fatigue test. **Engineering Failure Analysis**, Nanning, v. 39, p. 124–134, 2014.