

5.6.1.	<i>Testes acelerados para validação da confiabilidade do produto</i>	112
5.6.2.	<i>Verificação da etapa validar design</i>	113
5.7.	Etapa Validar Fornecimento.....	113
5.8.	Etapa Controlar.....	114
5.8.1.	<i>Testes acelerados para o monitoramento da confiabilidade do produto</i>	114
5.9.	Considerações finais.....	114
6.	ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	117
6.1.	Etapa Identificar	117
6.1.1.	<i>Caracterização do sistema técnico</i>	117
6.1.2.	<i>Identificação dos requisitos de projeto para confiabilidade</i>	121
6.2.	Etapa Projetar	127
6.3.	Etapas Verificar e Validar Design.....	128
6.4.	Etapas Validar Fornecimento e Controlar	138
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	139
7.1.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	140
	REFERÊNCIAS.....	143
	ANEXO A – PLANOS EXPERIMENTAIS PARA TESTES ACELERADOS.....	147
	ANEXO B – MODELAMENTO MATEMÁTICO DA FADIGA.....	153
	ANEXO C – PONTUAÇÃO AOS ÍNDICES DE SEVERIDADE E DE PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DA FMEA.....	157

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

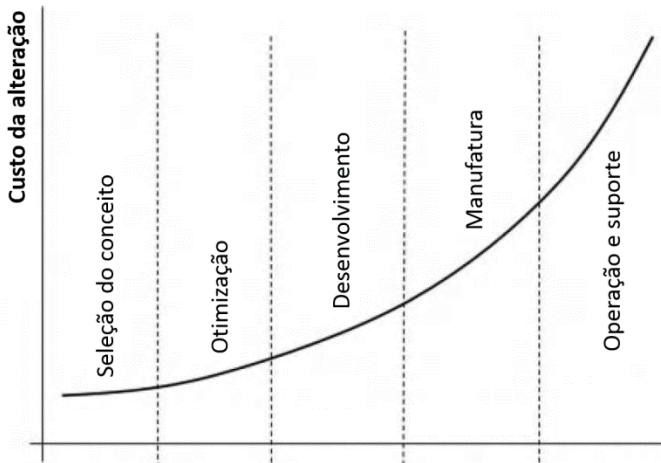
Em geral, as indústrias metalúrgicas competem no mercado global e necessitam cada vez mais entregar produtos inovadores e de maneira mais rápida, com maior confiabilidade e custo competitivo. A confiabilidade de um produto tem impacto direto na satisfação do usuário, e muitas vezes é utilizada como um fator diferenciador pelos fabricantes de produtos em geral. Outras vezes, o tempo de garantia oferecido é utilizado como argumento de venda. Portanto, é necessário estabelecer e cumprir metas relacionadas à confiabilidade. Estas metas impactam tanto a manutenção quanto a melhoria da confiabilidade do produto. São definidas através do delineamento de uma metodologia adequada para o projeto para confiabilidade de produtos, cujo objetivo é evitar desperdícios financeiros e de tempo.

Segundo Freitas (1997), os fabricantes necessitam desenvolver novos produtos com tecnologias mais avançadas, em tempo reduzido e com melhoria da produtividade, confiabilidade e qualidade. Isso significa que informações referentes à confiabilidade dos novos produtos necessitam ser obtidas em um curto período de tempo.

Para Tucci (2014), a satisfação do cliente é o ponto focal para um produto bem-sucedido. Portanto, uma das principais questões das atividades de P&D é projetar produtos com vida útil muito além da validade da garantia, assegurando longa disponibilidade e funcionamento adequado dos produtos.

De acordo com Bellini (2008), observa-se que existe forte desenvolvimento de metodologias para o projeto para confiabilidade, porém muitos de seus aspectos perdem prioridade ao longo do processo em detrimento de outros requisitos, como prazo de lançamento e limitações de custos de desenvolvimento. Desta maneira, as falhas continuam a ocorrer e os custos relacionados a estas tendem ser cada vez mais expressivos. Para O'Connor (2012), o custo associado a erros e a alterações de projeto aumenta de maneira drástica ao decorrer do processo de desenvolvimento do produto, como mostra a Figura 1.1. Este incremento pode ser tão elevado quanto um aumento de dez vezes no custo de uma fase do projeto para a seguinte.

Figura 1.1 - Custo associado à alteração de projeto.



Fonte: O'Connor (2012)

A não inserção de alguns dos aspectos relativos à confiabilidade no produto, ou sua não permanência ao longo das fases de projeto, pode ser promovida por:

- Dificuldade no acesso dos projetistas ao conhecimento referente à confiabilidade.
- Dificuldade relacionada à grande quantidade de informações sobre confiabilidade, e a generalidade da metodologia de projeto adotada.
- Defasagem entre o conhecimento do corpo técnico e os requisitos necessários para aplicação de novas tecnologias.
- Baixa capacidade das organizações em reter e transmitir o conhecimento adquirido pelo corpo técnico ao longo do tempo.

Segundo Dias (1997), além destes aspectos, por vezes os projetistas ou a instituição não considera o projeto para confiabilidade como um processo de otimização integrada à metodologia de projeto utilizada para desenvolver o produto. Ou seja, a análise de confiabilidade não está prevista na metodologia ou não é executada corretamente.

Estes fatores dificultam a avaliação da confiabilidade dos produtos e das consequências de determinados modos de falha pelo corpo técnico. Como exemplo real, pode-se citar o caso da *General Electric* (GE), descrito em Evans (2011). Em 1983, a empresa decidiu projetar e produzir um novo compressor rotativo para refrigeradores domésticos. A tecnologia empregada neste tipo de compressor o possibilitou possuir aproximadamente trinta por cento de menos componentes, é energeticamente mais eficiente do que os compressores alternativos, e é uma tecnologia amplamente conhecida pela GE, que a inventou e empregou em condicionadores de ar durante anos. O plano original da GE, de testar modelos no campo durante dois anos, foi reduzido para nove meses devido ao prazo para conclusão do projeto. Em 1987, o primeiro compressor falhou em campo, e em dezembro, a fábrica encerrou suas atividades. O custo da não confiabilidade até 1989 foi de 450 milhões de dólares e, até 1990, cerca de um milhão de compressores foram substituídos pela GE, por unidades adquiridas de seis fornecedores.

No processo de projeto adotado pela Whirlpool S/A - Unidade Compressores, nota-se que este contempla algumas ferramentas de projeto com foco em confiabilidade, como a FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*), mais recentemente o DRBFM (*Design Reliability Based on Failure Mode*), entre outros. Estas ferramentas de análise qualitativa da confiabilidade são mencionadas na descrição das tarefas ao longo do processo de projeto. Tem-se a percepção de que este procedimento poderá ser aperfeiçoado a partir da inserção de ferramentas para análise quantitativa da confiabilidade dos seus produtos.

Segundo Freitas (1997), as informações relacionadas à confiabilidade de produtos originam-se basicamente a partir de dados de campo e de dados experimentais. Os testes realizados sob condições normais de uso são bastante demorados e custosos, sendo a realização de testes acelerados uma alternativa para se obter informações de maneira mais rápida, facilitando a predição da confiabilidade. Em geral, a informação obtida sob elevado nível de estresse é extrapolada, a partir de um modelo estatístico-físico para se estimar a confiabilidade nas condições de uso. Os testes acelerados, quando bem compreendidos, cautelosamente realizados e os resultados adequadamente analisados geram informações que agregarão muito valor ao produto. Por outro lado, quando utilizados sem critério, e os dados analisados de maneira inadequada, podem levar a erros grosseiros.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é a proposição de uma metodologia de projeto para confiabilidade de produtos a partir do uso de ensaios acelerados que possa contribuir com a metodologia de desenvolvimento de produtos da empresa alvo (método C2C).

Tal metodologia é proposta porque se entende que um dos principais ganhos relacionados à proposição desta metodologia é a apropriação de ferramentas de análise da confiabilidade pelo modelo C2C de desenvolvimento de produto, como também a metodologia PRODIP. Para tal, será empregada a técnica de análise FMEA para entendimento detalhado dos modos de falha do produto, e de testes acelerados para avaliação das soluções de engenharia com procedimento para quantificação da confiabilidade e verificação do atendimento das metas do projeto. Desta forma, será possível suportar decisões da empresa em relação à execução do projeto do produto, e também no convencimento de clientes a partir de argumentos quantitativos da confiabilidade do produto. Com estas informações advindas de testes acelerados, será possível avaliar, por exemplo, como uma alteração advinda de um fornecedor impacta na confiabilidade do sistema técnico. Similarmente, podem-se delinear testes para verificação da confiabilidade de componentes em produção.

Para alcançar o objetivo principal deste estudo, faz-se necessário o cumprimento dos seguintes objetivos específicos.

- O primeiro objetivo específico é a estruturação da análise qualitativa da confiabilidade em uma metodologia de projeto a partir do estudo dos modos de falha do sistema técnico com o auxílio de ferramentas como a FMEA. De tal modo, será possível realizar o mapeamento dos componentes críticos quanto à confiabilidade do sistema técnico abordado.
- O segundo objetivo específico é a estruturação da análise quantitativa da confiabilidade, baseada no planejamento, execução e análise dos resultados de testes acelerados. Assim, será possível propor uma modelagem para a confiabilidade dos componentes críticos do sistema técnico abordado, com o auxílio de *softwares* para análise dos dados de falha de testes acelerados.
- O terceiro objetivo específico é a condução de um estudo de caso com ensaios de laboratório, em um dos componentes de um compressor, para avaliação da metodologia proposta neste trabalho. Esta metodologia será aplicada no projeto para a confiabilidade

de determinado modelo de compressor hermético para refrigeração, atualmente fabricado pela empresa Whirlpool S/A - Unidade Compressores.

- O quarto objetivo específico é contribuir com uma metodologia de projeto de compressores herméticos que seja precisa, facilite a identificação dos requisitos de confiabilidade, ajude a produzir especificações ao longo do processo de projeto, e forneça subsídios para o controle destas especificações no processo produtivo.

Por fim, propõe-se que a abordagem contemple as fases do ciclo de vida desde o projeto informacional até as fases de uso e descarte. Tem-se, contudo, limitações em relação à integração das atividades estratégicas da empresa, referentes a etapa de planejamento do projeto.

1.3. JUSTIFICATIVA

O impacto de falhas em produtos e sistemas varia desde uma inconveniência e custos até danos pessoais e morte. As causas destas falhas incluem projeto de engenharia inadequado, processos de manufatura defeituosos, erro humano, manutenção inadequada, uso indevido e falta de proteção contra intempéries. De acordo com as leis atuais, o fabricante pode ser responsabilizado por não prestar contas corretamente para a segurança e a confiabilidade do produto. Portanto, engenheiros responsáveis pelo produto precisam incluir confiabilidade como critério de projeto.

Evidentemente, a empresa alvo e o modelo de desenvolvimento de produtos C2C consideram o atributo da confiabilidade durante o desenvolvimento de produtos. Por exemplo, o modelo C2C para o desenvolvimento de produtos (descrito na Seção 4.3) associado ao manual de desenvolvimento de produtos da Whirlpool S/A - Unidade Compressores, recomendam a execução de testes de confiabilidade do tipo aceitação sob condições e durações ou número de ciclos pré-estabelecidos, para cada uma das fases do processo de desenvolvimento. Entretanto, este planejamento é generalista e não possui uma fundamentação à luz de uma metodologia adequada para identificação e tratamento de componentes ou subsistemas e seus modos de falha de interesse via testes acelerados.

As principais necessidades neste aspecto são: a uniformização da visão da empresa com relação à confiabilidade, e o cálculo da confiabilidade de seus produtos, auxiliando na otimização de recursos, pois testes são onerosos e o tempo disponível é relativamente curto. Devido a não familiaridade com metodologias para quantificar a

confiabilidade, e conseqüente desconhecimento do comportamento em vida de seus produtos, há dificuldade também na definição da meta de confiabilidade. Os critérios atuais de confiabilidade são, em geral, bastante rigorosos, porém confiabilidade excedente representa custo desnecessário. Como a melhoria da confiabilidade não é mensurada, torna-se difícil decidir pela modificação frente ao custo que esta modificação implica. Desta forma, demanda-se:

- Uniformização da visão da empresa em relação à confiabilidade;
- Cálculo da confiabilidade dos produtos;
- Familiaridade com metodologias para quantificar a confiabilidade;
- Suportar decisões em *gates*, que correspondem a autorizações para a passagem de uma fase para outra do projeto;
- Suportar decisões sobre a modificação baseado em medição da confiabilidade;
- Convencer clientes a partir de argumentos quantitativos;
- Avaliar como a alteração em fornecedor impacta na confiabilidade;
- Delinear testes para verificar a confiabilidade em produção.

Assim sendo, é de grande relevância que este trabalho capture e promova a transformação do conhecimento tácito acerca da confiabilidade de compressores herméticos alternativos em conhecimento explícito, inserido na proposta de metodologia de projeto para melhoria da confiabilidade destes produtos.

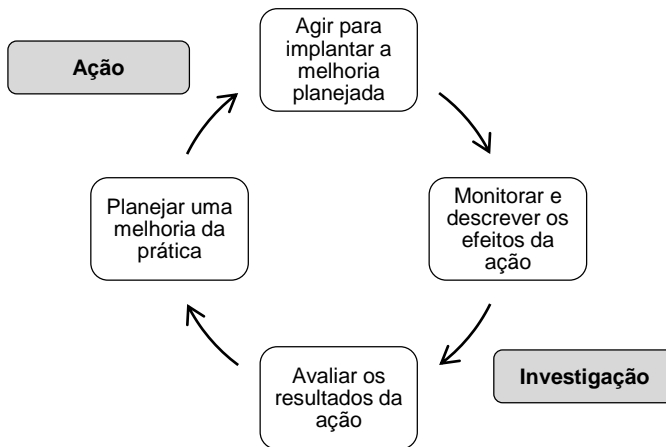
1.4. MÉTODO DA PESQUISA

A pesquisa desta dissertação pode ser classificada como pesquisação, ou pesquisa-ação. Isso porque a atividade de pesquisa está integrada ao processo de melhoria de confiabilidade de produto existente, inserido no processo de melhoria contínua dos produtos da empresa que está cedendo o espaço e o produto para a pesquisa.

Tripp (2005) define a pesquisação como um processo de investigação que adota técnicas de pesquisa consagradas para informar à ação que se decide tomar para melhorar a prática. Nesse sentido, a pesquisação requer ação em ambas as áreas da prática e da teoria, ou seja, poderá estar

próxima da prática rotineira e da pesquisa científica. Desta forma, pode-se dizer que este processo segue um ciclo no qual se aprimora a prática pela oscilação entre a ação prática e a investigação a respeito dela, a partir da teoria científica. A Figura 1.2 ilustra este processo.

Figura 1.2 - Representação do processo de pesquisação.



Fonte: Tripp (2005)

A primeira ação de pesquisa desta dissertação será a revisão bibliográfica acerca da inserção das atividades e ferramentas de projeto relacionadas à confiabilidade no processo de desenvolvimento de produtos (PDP).

A partir deste estudo, será possível definir a integração da metodologia de desenvolvimento de produto C2C utilizada na empresa-alvo e o modelo PRODIP na perspectiva de projeto para confiabilidade, de forma que permita identificar componentes e modos de falhas críticos, organizar o plano de testes, organizar laboratórios, executar e avaliar resultados destes testes e, ao final, prover informações para alimentar as decisões de projeto em relação ao atributo de confiabilidade.

Sempre que adequado, as ferramentas e métodos de projeto para confiabilidade consolidadas na empresa-alvo deste estudo serão incorporados à metodologia de projeto proposta neste trabalho. Desta forma, demandará o mínimo tempo possível para treinamento do pessoal e adaptação dos projetos de produto em andamento.

1.5. LIMITAÇÕES DO TRABALHO

A estrutura da metodologia de projeto proposta neste estudo baseia-se no modelo de PDP descrito por Romano (2003), que redundou no modelo PRODIP de Back et al. (2008), conforme representação da Figura 4.1 As atividades relacionadas à melhoria da confiabilidade do produto serão abordadas ao longo das fases de projeto e implementação do produto. Entretanto, as atividades estratégicas da empresa, referentes à etapa de planejamento do projeto, não serão consideradas.

A atividade relacionada ao desenvolvimento de métodos de projeto (*design*) de produto não será descrita no Capítulo 6 (estudo de caso e análise dos resultados).

Conforme descrito por Fortuna (2009), sistemas complexos constituídos por vários componentes que apresentam mecanismos de falha diferentes e que, conseqüentemente, são sensíveis a estresses diferentes, tornam a análise de falhas a partir de testes acelerados extremamente complexa, senão mesmo impraticável. Assim sendo, a metodologia proposta neste trabalho envolve a seleção e análise individual de alguns componentes críticos do produto em relação ao atributo da confiabilidade.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em sete capítulos, que são brevemente apresentados abaixo.

O Capítulo 1 contextualiza a importância da inserção de aspectos relativos à confiabilidade com enfoque nos testes acelerados ao longo do processo de desenvolvimento de produtos. A partir do estabelecimento da problemática, os objetivos e a justificativa do desenvolvimento deste trabalho são descritos. O método de pesquisa adotado, bem como as limitações deste trabalho são expostos ao final do capítulo.

O Capítulo 2 apresenta o desenvolvimento da revisão literária acerca da confiabilidade de produtos. Neste capítulo, são brevemente descritos a definição de termos relevantes para a confiabilidade, as distribuições de falha, a curva da taxa de falha, a análise de tempo de falha, e conceitos sobre as técnicas da confiabilidade utilizadas neste trabalho.

O Capítulo 3, assim como o anterior, apresentam uma revisão literária para testes de confiabilidade. Este tema em um capítulo específico, deveu-se a relevância e a necessidade de aprofundamento do assunto para o adequado desenvolvimento da metodologia proposta nesta dissertação.

No Capítulo 4, será apresentada uma revisão da literatura disponível acerca da inserção e integração das técnicas da confiabilidade, principalmente os testes acelerados, no processo de projetos. Será desenvolvida a racionalização das atividades de confiabilidade, a fim de possibilitar o estabelecimento da metodologia proposta nesta dissertação.

O Capítulo 5 apresenta, a partir dos conhecimentos obtidos nos capítulos anteriores, a estruturação de atividades em uma metodologia para melhoria da confiabilidade de produtos baseada em testes acelerados. O modelo PRODIP será adotado como referência para a estruturação das fases do processo de projeto.

O Capítulo 6 apresenta o desenvolvimento de um estudo de caso constituído da aplicação da metodologia proposta no capítulo anterior para um compressor hermético para refrigeração. Com isto, pretende-se demonstrar a validade do emprego desta metodologia baseada em testes acelerados para melhorar a confiabilidade.

No Capítulo 7, serão expostas as conclusões acerca do desenvolvimento deste trabalho, bem como a proposição de recomendações para trabalhos futuros.

2. CONFIABILIDADE DE PRODUTOS

2.1. INTRODUÇÃO

A confiabilidade de um produto contribui significativamente para a qualidade e competitividade da empresa que o disponibiliza ao mercado. Cada vez mais, o mercado impõe a estas empresas o desafio de desenvolver novos produtos com menores custo e tempo, garantindo que os níveis de confiabilidade sejam aumentados ou, pelo menos, mantidos.

Em engenharia, a abordagem tradicional para confiabilidade é projetar com margem de segurança, ou fator de segurança, muito elevado. Este é um método determinístico, no qual fatores de segurança comumente resultam em sobredimensionamento, potencialmente aumentando os custos do produto, ou em subdimensionamento, resultando em falha do produto. Esta visão da confiabilidade requer a análise do processo físico da falha e, através de um modelamento matemático, determinar o tempo até a falha. Esta abordagem demanda conhecimento dos mecanismos da falha e das causas básicas da falha e, principalmente, das interfaces entre componentes que compõe o sistema: no contexto da função global e das funções parciais.

Freitas (1997) citam que o estudo da confiabilidade pode ser abordado quantitativa e qualitativamente. A abordagem quantitativa é determinística e estatística, na qual a confiabilidade do sistema pode ser modelada matematicamente por funções e distribuições de probabilidade. Por outro lado, a abordagem qualitativa promove o estudo dos modos de falha e suas conseqüências para o sistema com o auxílio de ferramentas específicas para a análise da confiabilidade. Com base neste contexto, este capítulo apresentará os conceitos e termos gerais da confiabilidade de produtos, seu respectivo modelamento matemático e, por fim, as ferramentas para análise da confiabilidade que serão abordadas neste trabalho.

2.2. CONFIABILIDADE

De acordo com as normas NBR 5462 (1994) e BS 4778 (1991), a confiabilidade é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo. Alguns autores, como Freitas (1997), Kececioglu (2002), Birolini (2014) complementam esta definição considerando termos probabilísticos, estabelecendo a confiabilidade como a probabilidade, em determinado nível de confiança, com a qual um componente ou sistema desempenha satisfatoriamente uma função requerida por determinado período de tempo

quando submetido a condições de operação especificadas. Destacam-se quatro elementos nesta definição:

1. Descrição da falha: deve ser observável e estabelecida sem ambiguidade;
2. Probabilidade de falha: a fração que especifica o número de vezes que um evento ocorre para um determinado número de tentativas;
3. Unidade de tempo: precisa ser identificada e analisada sob a premissa básica de que a falha ocorrerá, mais cedo ou mais tarde, e geralmente é expressa como uma função do tempo;
4. Condições especificadas de operação: o sistema deve ser observado em uso nas condições especificadas de operação, incluindo fatores como carga de projeto e ambiente.

Em um âmbito mais amplo, Dias (2002) define a confiabilidade como um atributo caracterizado pela probabilidade de um produto cumprir sua função ao longo de seu ciclo de vida.

Comumente, a literatura relacionada ao atributo da confiabilidade menciona os termos: falha (*failure*, em inglês), defeito (*defect*, em inglês), pane (*fault*, em inglês) e erro (*error*, em inglês). É importante estabelecer uma definição clara para cada um destes termos, bem como estabelecer suas diferenças, para que a interpretação seja inequívoca.

2.3. FALHA, DEFEITO, PANE E ERRO

De acordo com as normas NBR 5462 (1994), e IEC (191) (1990), a falha pode ser definida como um evento que resulta na impossibilidade de um equipamento desempenhar a sua função. Após a falha, o item tem uma pane, que é um estado do item. Parhami (1997) afirma que a falha diz respeito somente à função, e não se um item está intacto fisicamente ou não. Para Birolini (2014), as falhas podem ser classificadas de acordo com o seu modo, causa, efeito e mecanismo, conforme abaixo:

- Modo de falha: É o sintoma (efeito local) pelo qual a falha é observada, por exemplo: fratura frágil, fluência e fadiga.
- Causa da falha: É a circunstância relativa ao projeto, fabricação ou uso que conduzem a uma falha. Pode ser intrínseca, devido a deficiências no projeto do produto ou desgaste, ou extrínseca, devido a erros, operação ou manuseio incorretos durante a produção ou uso. As causas extrínsecas comumente geram falhas sistemáticas e

determinísticas, chamadas defeitos, os quais estão presentes em $t = 0$, mesmo que não observáveis em $t = 0$.

- Efeito da falha: É a consequência da falha, e pode ser diferente se observada no próprio item ou em um nível superior.
- Mecanismo de falha: É o processo físico, químico ou outro, a partir do qual se resulta em uma falha.

A norma NBR 5462 (1994), classifica a falha em vários tipos, e agrupadas conforme suas características, conforme o Quadro 2.1. No decorrer deste trabalho, destacam-se os seguintes tipos de falha:

- Falha sistemática: É relacionada deterministicamente a uma certa causa, que somente pode ser eliminada por uma modificação do projeto, do processo de fabricação, dos procedimentos operacionais ou de outros fatores relevantes. A falha sistemática pode ser reproduzida simulando-se a causa da falha.
- Falha gradual: É resultante de uma mudança gradual com o tempo de dadas características de um item. Uma falha gradual pode ser prevista por um exame anterior ou monitoração e pode, às vezes, ser evitada por ações de manutenção.
- Falha completa: É caracterizada pelo fato de o item não conseguir desempenhar nenhuma das funções requeridas.
- Falha parcial: Resulta na incapacidade de o item desempenhar algumas, mas não todas, funções requeridas. Se a falha parcial é ao mesmo tempo gradual, diz-se que esta é uma falha por degradação.
- Falha crítica: Possivelmente resultará em condições perigosas e inseguras a pessoas, danos materiais significativos ou outras consequências inaceitáveis. O oposto da falha crítica é a falha não-crítica.
- Falha relevante: Deve ser considerada na interpretação dos resultados operacionais ou de ensaios, ou no cálculo do valor de uma medida de confiabilidade. Por outro lado, a falha não-relevante deve ser desconsiderada na interpretação dos resultados operacionais ou de ensaios, ou no cálculo do valor de uma medida de confiabilidade.

Quadro 2.1 - Tipos de falha de acordo com suas características.

Motivo da falha	Característica da falha	Importância da falha
Falha por uso incorreto	Falha aleatória	Falha crítica
Falha por manuseio	Falha sistemática	Falha não-crítica
Falha por fragilidade	Falha catastrófica	Falha relevante
Falha de projeto	Falha repentina	Falha não-relevante
Falha de fabricação	Falha gradual	
Falha por deterioração	Falha completa	
	Falha parcial	
	Falha por degradação	
	Falha primária	
	Falha secundária	

Fonte: Adaptado da norma NBR 5462 (1994).

Ainda de acordo com a norma NBR 5462 (1994), o defeito é qualquer desvio de uma característica de um item em relação aos seus requisitos, os quais podem, ou não, ser expressos na forma de uma especificação. Um defeito pode, ou não, afetar a capacidade de um item em desempenhar uma função requerida. A pane é um estado de um item caracterizado pela incapacidade de desempenhar uma função requerida, excluindo a incapacidade durante a manutenção preventiva ou outras ações planejadas, ou pela falta de recursos externos. Uma pane é geralmente o resultado de uma falha de um item, mas pode existir sem uma falha anterior. O erro é a diferença entre um valor ou uma condição observada ou medida e a correspondente condição ou valor verdadeiro especificado ou teórico. Um erro pode ser causado por um item em pane. O termo erro pode também designar um erro humano.

2.4. DISPONIBILIDADE

Conforme definição da norma NBR 5462 (1994), a disponibilidade é a capacidade de um item estar em condições de executar determinada função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade,

manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados.

A manutenibilidade, por sua vez, é a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos. Portanto, a disponibilidade é uma função de confiabilidade e de manutenibilidade. Então, se o sistema não for reparável, então a disponibilidade será igual à confiabilidade do sistema.

Para Birolini (2014), as avaliações de disponibilidade são muitas vezes complexas, uma vez que o apoio logístico da manutenção e fatores humanos devem ser considerados, além da confiabilidade e da manutenibilidade. Portanto, muitas vezes são assumidas condições de apoio humano e logístico ideais, e neste caso denomina-se disponibilidade intrínseca. Este trabalho terá enfoque no projeto de compressores herméticos alternativos, os quais são sistemas não-reparáveis e, portanto, sua disponibilidade será igual à sua confiabilidade.

2.5. SEGURANÇA E CONFIABILIDADE

Para Birolini (2014), a segurança, como um atributo do produto, é a habilidade que determinado item possui em não causar dano a pessoas, nem prejuízo material significativo ou outra consequência inaceitável durante o seu uso. A avaliação da segurança deve considerar dois aspectos: 1) Segurança quando o item funciona e é operado corretamente, e 2) Segurança quando o item, ou parte do item, sofreu falha. O primeiro aspecto diz respeito à prevenção do acidente. O segundo aspecto diz respeito à segurança técnica, a qual é investigada em cinco passos (identificar potenciais perigos, identificar suas causas, determinar seus efeitos, classificar seus efeitos, investigar possibilidades de evitar o perigo ou pelo menos mitigar seu efeito), utilizando ferramentas similares às utilizadas para análise da confiabilidade.

Enquanto que a garantia da confiabilidade diz respeito a medidas para minimizar o número total de falhas, a garantia da segurança trata de medidas que possibilitem que o item permaneça em um estado seguro em caso de falha. Para Dias (2002), confiabilidade e segurança, por vezes, são considerados sinônimos, porém na grande maioria dos casos possuem objetivos conflitantes. Em certos casos, é possível que o aumento da segurança pode acarretar na deterioração da confiabilidade, e vice-versa. Conforme exemplo citado em Bellini (2008), armas de fogo são exemplos

extremos de equipamentos que podem possuir alta confiabilidade, entretanto são inseguros. Devido a fatores como erro humano, meio ambiente e características específicas dos produtos presentes em qualquer projeto, a confiabilidade deve ser abordada não como o único, mas como um dos aspectos para incremento da segurança.

Com base neste contexto, este trabalho, que foca no tratamento do atributo confiabilidade no projeto de produtos, de certa forma abrange também o tratamento do atributo segurança. Bellini (2008) propõe uma metodologia específica para análise de modos de falha para segurança, com aplicação em condicionadores de ar.

2.6. QUALIDADE E CONFIABILIDADE

A confiabilidade está intimamente associada com a qualidade de um produto, sendo frequentemente considerada um atributo da qualidade. Para Ebeling (2005), a qualidade pode ser definida qualitativamente como a quantidade pela qual o produto satisfaz os requisitos do usuário. A qualidade do produto é em parte uma função de projeto e conformidade às especificações de projeto, e depende dos sistemas de produção e da aderência aos procedimentos de manufatura e de tolerâncias. Assim, a garantia da qualidade é um conjunto de processos e de procedimentos necessários para se atingir alta qualidade do produto. A norma internacional para sistemas da qualidade, ISO 9000, foi desenvolvida para fornecer uma estrutura de avaliação do sistema de gestão da qualidade para o qual uma organização opera em relação aos seus produtos ou serviços.

Por outro lado, a confiabilidade está enfocada na quantidade de tempo com a qual o produto continua a desempenhar satisfatoriamente sua função, a partir do momento em que este se torna operacional. Um produto com baixa qualidade provavelmente terá uma confiabilidade baixa e, similarmente, um produto com alta qualidade terá uma confiabilidade elevada. Desta forma, pode-se afirmar que a confiabilidade pode ser vista como a qualidade do desempenho do produto em relação as suas funções ao longo do tempo e, desta forma, estende a qualidade no domínio do tempo.

O modelamento matemático da confiabilidade, bem como as técnicas FMEA e diagramas de blocos da confiabilidade (RBD), aplicados à análise da confiabilidade desenvolvidas nesta dissertação, serão abordados na sequência deste trabalho.

2.7. MODELAMENTO MATEMÁTICO DA CONFIABILIDADE

Conforme mencionado anteriormente, a confiabilidade é a probabilidade que um sistema ou componente operará ao longo de um período de tempo t , onde t , ao longo do ciclo de vida, está no período de uso. Segundo Ebeling (2005), para expressar esta relação, define-se a variável aleatória contínua T como o tempo para falha, com $T \geq 0$. Então,

$$R(t) = \Pr\{T \geq t\} \quad (\text{Equação 2.1})$$

onde $R(t) \geq 0$, $R(0) = 1$.

Para um dado valor t , $F(t)$ será a probabilidade acumulada de falha em que o tempo para falha será maior ou igual a t . Se definirmos:

$$F(t) = 1 - R(t) = \Pr\{T < t\} \quad (\text{Equação 2.2})$$

onde $F(0) = 0$, então $F(t)$, para $t = 0$, indica que a probabilidade acumulada de falha é nula, ou seja, o item está na condição de tão bom quanto novo, e aqui, a confiabilidade é a qualidade do produto.

Define-se $R(t)$ a função confiabilidade, e $F(t)$ a função distribuição cumulativa de falha. Uma terceira função $f(t)$, definida como

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (\text{Equação 2.3})$$

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (\text{Equação 2.4})$$

é denominada função distribuição de probabilidade (*fdp*), e descreve o formato da distribuição de falha.

O tempo médio até a falha (MTTF) pode então ser definido por:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (\text{Equação 2.5})$$

MTTF é a média, ou valor esperado, da distribuição da probabilidade definida por $f(t)$.

A função taxa de falha $\lambda(t)$ descreve uma taxa de falha instantânea, no tempo t . A probabilidade condicional de uma falha ocorrer no intervalo de tempo de t a $t + \Delta t$, dado que o sistema sobreviveu ao tempo t , por unidade de tempo, é chamada de taxa de falha. Desta forma,

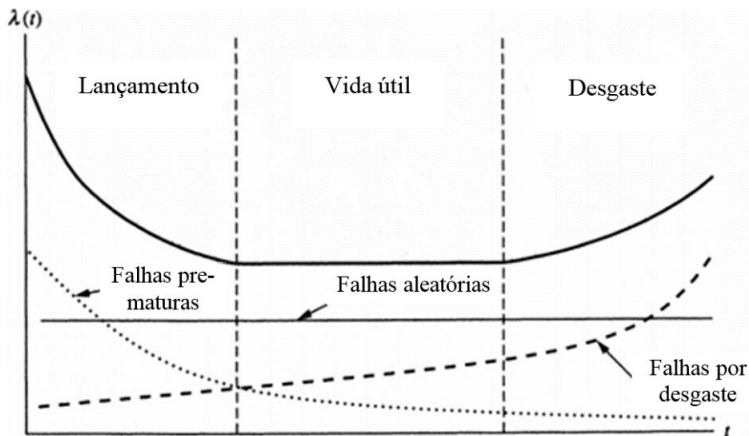
$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-[R(t + \Delta t) - R(t)]}{\Delta t} \cdot \frac{1}{R(t)} \quad (\text{Equação 2.6})$$

$$\lambda(t) = \frac{-dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} \quad (\text{Equação 2.7})$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (\text{Equação 2.8})$$

Uma forma da função taxa de falha é mostrada na Figura 2.1, curva da taxa de falha, mas que devido ao seu formato, é conhecida também por *curva da banheira*. Sistemas que apresentam esta função taxa de falha experimentam uma taxa de falha decrescente no início do seu ciclo de vida (falhas prematuras), seguido por uma taxa de falha aproximadamente constante (vida útil), e seguido por uma taxa de falha crescente (desgaste).

Figura 2.1 - Curva da taxa de falhas.



Fonte: Adaptado de Ebeling (2005)

A curva da taxa de falhas representa a taxa de falhas de uma população inteira da mesma categoria. Assim sendo, para determinada categoria, alguns produtos falharão próximos ao período de seu lançamento, outros em vida útil e ainda outros próximos ao seu período de desgaste. Para descrever o comportamento de falhas de um produto e permitir análises de confiabilidade, distribuições de probabilidade devem ser desenvolvidas. As distribuições de probabilidade Exponencial, Weibull e Log-normal ocupam posição de destaque dentre os modelos probabilísticos utilizados em análise de dados de confiabilidade, devido a sua adequação a várias situações práticas. A bibliografia disponível para o desenvolvimento destes modelos é vasta, podendo-se citar Montgomery (2003) como referência.

2.8. ANÁLISE DO MODO DE FALHA E SEUS EFEITOS (FMEA)

A FMEA é uma das primeiras técnicas desenvolvidas para análise de falhas, sendo desenvolvida por engenheiros de confiabilidade na década de 1950 a fim de estudar problemas que poderiam ocorrer a partir de disfunções de sistemas militares, podendo ser implementada tanto para o projeto de produtos quanto para projeto de processos de fabricação.

Para Rausand (2004), o desenvolvimento da FMEA é um processo iterativo que influencia o projeto através da identificação dos potenciais modos de falha, da avaliação de suas respectivas probabilidades de ocorrência e efeitos no sistema, e da determinação das causas e respectivas ações corretivas ou medidas preventivas. Através da identificação dos modos de falha, estes podem ser eliminados, ou terem suas probabilidades de ocorrência reduzidas.

Segundo Otto (2013), a FMEA ajuda na determinação da necessidade do emprego de métodos de projeto para a melhoria da confiabilidade (redundância, margens de segurança, seleção de componente, etc.), assegura que o programa de teste de confiabilidade detectará potenciais modos de falha, e facilita a determinação dos critérios de teste, planos de teste e procedimentos de diagnóstico (por exemplo, testes de confiabilidade). O uso da FMEA em estágios iniciais do processo de projeto permite projetar produzir produtos seguros e confiáveis, evitando assim modificações custosas em estágios mais avançados no processo de projeto. Com base neste contexto, a FMEA permite também medir o progresso do projeto no atingimento das metas de confiabilidade. Para Crowe (2001), os propósitos da FMEA são a coleta da voz do cliente, endereçamento de modos de falha mais cedo no processo de projeto, direcionar métodos de

projeto e gerar controle de riscos. De acordo com a definição da IEEE std. 352, apresentada em Rausand (2004), os objetivos da FMEA são:

- Auxiliar na seleção de alternativas de projeto com alta confiabilidade e elevado potencial de segurança durante a fase inicial do projeto;
- Assegurar que todos os modos de falha possíveis e seus efeitos sobre o sucesso operacional do sistema foram consideradas;
- Listar as falhas potenciais e identificar a magnitude de seus efeitos;
- Desenvolver critérios iniciais para o planejamento de testes;
- Fornecer uma base para a análise da confiabilidade quantitativa;
- Prover documentação histórica para referência futura para ajudar na análise de falhas em campo e consideração de alterações de projeto;
- Proporcionar a base para o estabelecimento de prioridades de ação corretiva;
- Auxiliar na avaliação objetiva dos requisitos de projeto relacionados a redundância, sistemas de detecção de falha, e características de segurança.

Otto (2013) cita que a FMEA não é adequada para a consideração de falhas dependentes ou falhas resultantes de uma sequência de eventos, visto que é baseado na consideração da independência de modos de falha. Para estes casos, outros métodos e técnicas, como análise Markoviana ou análise da árvore de falha (FTA), podem ser adequados.

2.8.1. Estrutura e procedimento para uso da FMEA

De acordo com Freitas (1997), o primeiro passo na construção da FMEA é a definição exata de todas as funções do componente (FMEA de produto) ou da etapa do processo de fabricação (FMEA de processo). Subsequentemente, relacionam-se os modos de falha com os seus efeitos, as causas dos respectivos modos de falha, os riscos de ocorrerem falhas e os mecanismos atuais para prevenção da ocorrência. A Figura 2.2 apresenta o formulário FMEA, contendo as colunas essenciais para desenvolvimento da ferramenta.

Figura 2.2 - Formulário FMEA.

Componente / Sistema	Função	Potencial Modo de Falha	Potencial Efeito da Falha	S (severidade)	Potencial Causa da Falha	O (ocorrência)	Atual Controle de Projeto	D (detecção)	RPN

Fonte: Adaptado de Whirlpool Corporate Product Safety (2003)

A seguir, uma descrição das colunas da FMEA, apresentadas na Figura 2.2.

- **Componente:** a identificação do componente ou etapa do processo de maneira clara e concisa.
- **Função:** Descrição exata da tarefa que o item (componente, subsistema ou etapa do processo) deve desempenhar. Se houver mais de uma função, deve-se listá-las separadamente. Segundo Moubray (2001), a descrição da função deve consistir de um verbo, um objeto e um padrão desejado de desempenho.
- **Potencial modo de falha:** É a maneira com a qual o item deixa de executar sua função. Em uma abordagem funcional, quando não há informações suficientes para detalhar a cadeia causal, descreve-se o modo de falha como o não cumprimento da função requerida. Por outro lado, em uma abordagem estrutural, o modo de falha deve ser expresso em termos físicos e não em termos do que o cliente observa. Desta forma, a causa descrita na abordagem funcional passa a ser o modo de falha na abordagem estrutural.
- **Potencial efeito da falha:** Consequência da ocorrência do modo de falha, perceptível em nível de sistema (exemplo: inoperância, queima do circuito, perda de controle, funcionamento ruidoso).
- **Potencial causa da falha:** Descrição das causas que podem originar cada um dos modos de falha listados (exemplo: aquecimento excessivo, contaminação, tratamento térmico inadequado).
- **Atual controle do projeto:** Medidas de controle existentes que podem prevenir a ocorrência ou detectar as falhas ocorridas e impedir que cheguem ao cliente (exemplo: revisão de projeto, inspeção e ensaios, controle estatístico do processo).

- **Índice de ocorrência (O):** É a estimativa da probabilidade da ocorrência de uma causa da falha, e de ela resultar no modo de falha, dentro de um intervalo de tempo especificado. Somente se altera quando ações que minimizam a probabilidade de ocorrência do modo de falha são implementadas.
- **Índice de severidade (S):** Deve refletir a avaliação das consequências que o cliente sofre assumindo-se que um modo de falha ocorreu.
- **Índice de detecção (D):** Assumindo-se que a falha tenha ocorrido, este índice é construído com base na estimativa da probabilidade de esta falha ser detectada antes de o produto chegar ao cliente.
- **Número de prioridade do risco (RPN):** É o produto dos três índices anteriores, utilizado na priorização da tomada de ação. É uma maneira prática de priorizar as falhas e avaliar quais contramedidas devem ser tomadas primeiramente.

A norma MIL STD-1629 (1980), bem como a norma IEC 60812 contêm requisitos e procedimentos para a realização de uma FMEA.

2.8.2. Aplicação da FMEA em projetos

A FMEA é uma ferramenta adequada para abordar o atributo confiabilidade no processo de projeto, uma vez que identifica potenciais modos de falha para um produto ou processo, avalia o risco associado a estes modos de falha, prioriza e conduz ações para mitigação ou eliminação destes riscos. Se adequadamente conduzida, a FMEA representa uma maneira de organizar os requisitos do cliente, bem como informações do ambiente de operação (como dados de entrada) e, através destas informações, endereça muitas atividades de confiabilidade no processo de projeto, como a função do item em relação aos requisitos explicitados. Além disso, a abordagem permite tratar o item a partir de especificidades e procedimentos como a física da falha, análise da confiabilidade a partir de dados históricos de falha, projeto de experimentos, testes acelerados de vida, entre outras.

A FMEA deve ser realizada de forma iterativa com a evolução do processo de projeto, de modo que a análise possa ser utilizada tanto para influenciar decisões, quanto para documentar as ações de projeto. O'Connor (2012) e Crowe (2001) mencionam que o desenvolvimento da FMEA deve ser iniciado o mais cedo possível no processo de projeto e, complementarmente, Bellini (2008) cita que a FMEA deve se estender por todas

as fases do projeto, iniciando na fase conceitual para auxílio na escolha do conceito, e estendendo até a fase teste de aprovação final, para validação do projeto, seja ele do produto ou dos seus processos de fabricação.

Segundo Freitas (1997), alguns campos da FMEA, a exemplo dos índices de ocorrência, podem ser determinados em função de critérios qualitativos (refletem a experiência da equipe envolvida) ou de critérios quantitativos (baseiam-se em informações a respeito das probabilidades de falha. A opção por uma ou outra abordagem depender principalmente da natureza do projeto (totalmente novo ou uma modificação de um produto implantado) e da fase do desenvolvimento na qual o projeto se encontra. No caso de projeto de um produto totalmente novo, na fase que antecede a construção dos protótipos, é provável que não existam dados disponíveis que permitam a estimação de probabilidades de falha. Entretanto, é possível obter a partir de outras fontes de informação. O manual militar MIL-HDBK-217 (1982) é uma das referências mais utilizadas pela indústria na estimação da confiabilidade de sistemas eletrônicos, que traz um extenso banco de dados contendo modelos que fornecem o valor previsto de taxas de falha para uma grande diversidade de componentes em função de diversos fatores como ambiente de uso. Outras publicações como o RAC (*Reliability Analysis Center* - 1979, 1980, 1981a, 1981b) incluem, por exemplo, dados referentes a taxas, modos e mecanismos de falha para inúmeros dispositivos não-eletrônicos. O IEEE (*The Institute of Electrical and Electronic Engineers*) também possui publicações nesta linha. Estes bancos de dados são de grande auxílio na determinação de probabilidades de falha, em uma fase do desenvolvimento do projeto em que nenhuma ou quase nenhuma informação está disponível. Desta forma, torna-se possível desde o início tomar ações preventivas. Com a evolução do projeto, é possível realizar testes acelerados de vida que permitam obter informações sobre os modos de falha dos componentes, o efeito da falha no sistema e estimar suas probabilidades de ocorrência. Tais estimativas, obtidas com base nos dados coletados experimentalmente, devem ser comparados àqueles obtidos com base nos bancos de dados citados anteriormente. Quando se tratar de uma modificação de projeto, as informações de campo podem ser utilizadas para quantificar as probabilidades de falha e, neste caso, será útil a análise do tempo de falha.

2.9. DIAGRAMA DE BLOCOS DA CONFIABILIDADE (RBD)

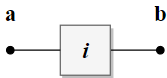
Um diagrama de blocos da confiabilidade (RBD) é uma rede orientada ao sucesso que descreve a função do sistema. Esta ferramenta mostra as conexões lógicas do funcionamento dos componentes, necessárias

para cumprir uma função específica do sistema. Se o sistema possui mais do que uma função, cada função deve ser considerada individualmente, e um diagrama de blocos de confiabilidade separado deve ser estabelecido para cada função do sistema.

De acordo com Rausand (2004), os diagramas de blocos da confiabilidade são adequados para sistemas de componentes não reparáveis e onde a ordem na qual as falhas ocorrem não importa. Quando os sistemas são reparáveis e/ou a ordem na qual as falhas ocorrem é importante, deve-se recorrer a outras técnicas mais adequadas, como os métodos de Markov.

Em um diagrama de blocos da confiabilidade, considera-se um sistema em que existem n diferentes componentes, sendo cada um dos n componentes ilustrado por um bloco conforme representação da Figura 2.3. Quando existe uma conexão entre os pontos a e b , diz-se que o componente i está em operação. O que é considerado como em operação deve ser especificado para cada caso e depende dos objetivos do estudo. É possível incluir uma descrição da função requerida para o componente dentro do bloco representado pela Figura 2.3.

Figura 2.3 - Componente i ilustrado por um bloco.

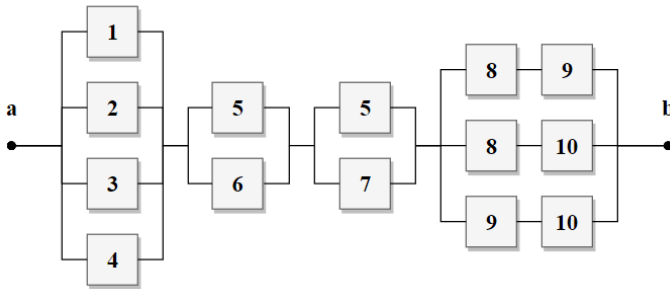


Fonte: Adaptado de Rausand (2004)

A maneira como os n componentes são conectados para se cumprir uma dada função do sistema pode ser representada por um diagrama de blocos de confiabilidade, conforme a Figura 2.4

Quando se tem conexão entre os pontos a e b , diz-se que uma determinada função do sistema é atingida, o que significa que alguns modos de falha específicos do sistema não ocorrem. Os aspectos construtivos e símbolos que são usados neste trabalho para estabelecer diagrama de blocos estão de acordo com a norma IEC 61078 (2016).

Figura 2.4 - Funcionamento do sistema ilustrado por um diagrama de blocos da confiabilidade (RBD).

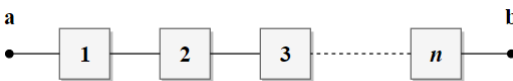


Fonte: Adaptado de Rausand (2004)

2.9.1. Sistemas com estrutura em série

Um sistema que opera se, e somente se, todos os seus n componentes estiverem operando, é chamado de estrutura em série. O correspondente diagrama de blocos de confiabilidade é mostrado na Figura 2.5. Diz-se que o sistema está operando se, e somente se, houver conexão entre todos os n blocos que representam cada um dos componentes.

Figura 2.5 - Diagrama de blocos da confiabilidade de uma estrutura em série.



Fonte: Adaptado de Rausand (2004)

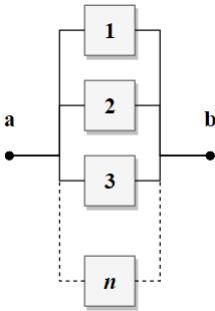
Assumindo-se que a confiabilidade dos componentes individuais seja expressa por $R_1(t)$, $R_2(t)$, \dots , $R_n(t)$, e que são independentes entre si, a confiabilidade de um sistema $R_s(t)$ com estrutura em série pode ser expressa por:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (\text{Equação 2.9})$$

2.9.2. Sistemas com estrutura em paralelo

Um sistema que está operando quando pelo menos um de seus n componentes estiver operando é chamado de estrutura em paralelo. O diagrama de blocos de confiabilidade é mostrado na Figura 2.6. Neste caso, tem-se a conexão entre os pontos a e b se houver conexão entre pelo menos um dos blocos que representam os componentes.

Figura 2.6 - Diagrama de blocos da confiabilidade de uma estrutura em paralelo.



Adaptado de Rausand (2004)

Assumindo-se que a confiabilidade dos componentes individuais seja expressa por $R_1(t)$, $R_2(t)$, \dots , $R_n(t)$, e que são independentes entre si, a confiabilidade de um sistema com estrutura em paralelo pode ser expressa por:

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (\text{Equação 2.10})$$

Para o caso particular, no qual todos os componentes tenham a mesma confiabilidade $R(t)$, então a confiabilidade do sistema com estrutura em paralelo de ordem n será expressa por:

$$R_s(t) = 1 - (1 - R(t))^n \quad (\text{Equação 2.11})$$

3. TESTES ACELERADOS

3.1. INTRODUÇÃO

De acordo com Ebeling (2005), a quantidade de tempo disponível para testar produtos em seu processo de desenvolvimento é, muitas vezes, consideravelmente menor do que o seu tempo de vida esperado. Isto é certamente verdade para produtos altamente confiáveis, nos quais testar sob condições normais de operação geraria pouca ou nenhuma falha dentro de um período de tempo razoável. A fim de identificar os pontos fracos do projeto durante os testes de confiabilidade, adotar um ou mais dos seguintes procedimentos se faz necessário: (1) aumentar o número de unidades em teste, (2) acelerar o número de ciclos por unidade de tempo, (3) aumentar os níveis dos estresses que geram falhas (testes acelerados).

Para Nelson (1990), os testes acelerados de vida consistem em uma variedade de métodos de teste a fim de reduzir a vida de produtos ou acelerar a degradação do seu desempenho. O objetivo destes testes é obter rapidamente dados os quais, apropriadamente modelados e analisados, provêm informação desejada sobre a vida do produto ou seu desempenho sob uso normal. Como resultado, tais testes economizam bastante tempo e custos. Os testes acelerados de vida servem para vários propósitos, dentre os quais destacam-se:

- Demonstração da confiabilidade do produto;
- Identificação de falhas de projeto;
- Comparações para seleção entre projetos, componentes, materiais e fornecedores;
- Identificação de defeitos de manufatura;
- Auxílio no controle de qualidade (monitoramento da confiabilidade do produto e tomada de ações corretivas quando necessário);
- Avaliação de lotes de produção ou de recebimento;
- Qualificação das alterações de projeto e de manufatura, componentes e fornecedores;
- Medição da confiabilidade, visando a liberação de um projeto para início da manufatura, ou de um produto para o cliente;
- Estimativa dos custos de garantia e de serviço;
- Validação da consistência do próprio teste acelerado ao longo do tempo, e com dados provenientes de falhas em campo;
- Determinação de uma faixa de estresses a ser aplicada em teste, e auxílio no desenvolvimento de um novo teste;

- Desenvolvimento e avaliação da adequação da relação estresse-resposta e da distribuição estatística (ver seção 3.4).

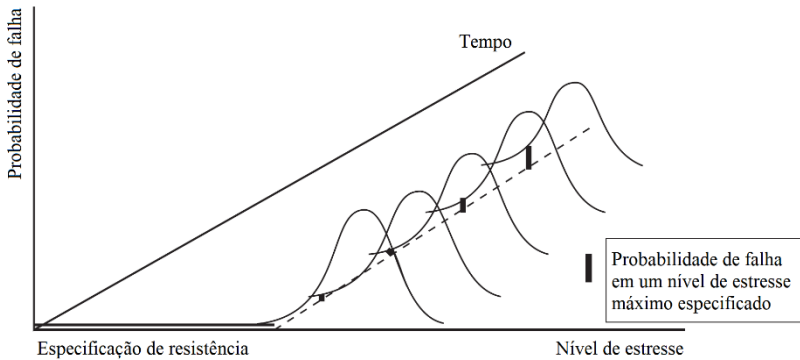
Segundo Ebeling (2005), alguns fatores devem ser endereçados antes da condução de qualquer teste de confiabilidade, que incluem:

- O objetivo do teste;
- O ambiente de operação sob o qual o teste deve ser realizado;
- O número de unidades a serem testadas;
- A duração do teste;
- Uma definição inequívoca da falha (ver seção 2.3).

O ambiente de operação do teste deve simular o ambiente de operação, no que diz respeito a variáveis como: temperatura, umidade e vibração, incluindo condições extremas que possam ser encontradas. A próxima seção fornece informações sobre a abordagem dos ambientes de operação em testes acelerados de vida. A seção 3.5 aborda o planejamento de testes acelerados, que inclui maneiras de se estabelecer o número de unidades a serem testadas, bem como a duração do teste.

O grau de incerteza entre as capacidades teóricas e reais dos produtos é associado às variáveis de estresse, resistência e tempo. Conforme a Figura 3.1 ilustra, a falha em teste após um período de tempo t , em um nível de estresse L , representará um ponto em uma distribuição tridimensional desconhecida. Para O'Connor (2012), uma característica importante dos mecanismos de desgaste é que as distribuições resultantes de tempos até a falha tornam-se mais extensas conforme o dano é acumulado, aumentando assim a incerteza. Para se reduzir a incerteza do resultado de teste, é necessário submeter uma amostragem maior em teste.

Figura 3.1 - Interação entre a variável de estresse aplicada e a resistência especificada nas falhas de testes de confiabilidade ao longo do tempo.



Fonte: O'Connor, 2012.

Na maioria das situações de engenharia, as falhas são geradas pela combinação entre a variável de estresse aplicada e a resistência projetada. Mesmo para situações de falha relativamente simples, não há apenas uma distribuição importante, mas uma variedade de possíveis distribuições e interações. A lógica que justifica o uso de níveis de estresse elevados é baseada em quatro aspectos da realidade de engenharia:

- As causas de falhas que irão ocorrer no futuro são frequentemente muito incertas;
- As probabilidades e tempos até as falhas também são altamente incertas;
- O tempo gasto em testes é caro, por isso, quanto mais rapidamente reduzir a incerteza, melhor;
- Encontrar causas de falha durante o desenvolvimento e prevenção da recorrência é muito menos caro do que encontrar novas causas de falha em uso.

Para Ebeling (2005), os testes de confiabilidade devem iniciar assim que o equipamento estiver disponível para o teste. O efeito de falhas no cronograma e os custos crescem progressivamente quanto mais tarde estes ocorrem no processo de desenvolvimento do produto. Portanto, testes devem ser planejados para mostrar modos de falha o mais cedo possível.

Como resultado de alterações de projeto, cada ciclo produz um novo componente ou sistema que possui uma distribuição de falha diferente. Conforme mencionado anteriormente, resultados provenientes de testes acelerados são úteis para estimar e prever o crescimento em termos de confiabilidade ao longo do tempo, e o desenvolvimento integrado da análise do modo de falha e seus efeitos (FMEA) pode servir para capturar os dados de falhas observados, para posterior tratamento adequado da confiabilidade. Neste contexto, a proposta de metodologia de projeto para confiabilidade apresentada neste trabalho considera a FMEA como ferramenta para integrar as atividades com foco na confiabilidade do produto, através de testes acelerados de vida, ao longo do processo de projeto.

Para O'Connor (2012), a execução de um teste acelerado sem um planejamento adequado desperdiça tempo, esforço e dinheiro, e podem sequer prover a informação desejada. Antes de iniciar um ensaio acelerado, aconselha-se ter um plano que ajude a estimar com precisão a confiabilidade em condições de funcionamento enquanto minimiza-se o tempo de teste e os custos associados. Neste sentido, as próximas seções deste capítulo apresentam um detalhamento do conteúdo literário necessário para a condução de planejamento, execução e análise dos dados oriundos dos diversos tipos de testes acelerados.

3.2. CONDIÇÕES AMBIENTAIS E VARIÁVEIS DE ESTRESSE

Segundo O'Connor (2012), testes de confiabilidade, incluindo os testes acelerados de vida, devem cobrir a faixa de condições ambientais nas quais o produto será submetido em operação. Dentre as principais condições ambientais que afetam a confiabilidade, pode-se citar temperatura, vibração, choque mecânico, umidade, tensão elétrica, ação de contaminantes, campo eletromagnético, poluição industrial, entre outros. O manual MIL-HDBK-781 (1996) apresenta métodos e planos de teste, bem como perfis de condições ambientais que podem ser empregados em testes de confiabilidade durante o desenvolvimento, qualificação e produção de produtos. A forma de aplicação das condições ambientais em testes acelerados de vida deve ser cuidadosamente avaliada, particularmente para condições combinadas, as quais podem ser muito mais severas do que qualquer condição única. Neste sentido, a aplicação de experimentos estatísticos, como o projeto de experimentos (DoE) previamente aos testes acelerados de vida pode ser útil na avaliação dos efeitos. Santos (2001) propõe uma maneira sistematizada para inserção do projeto de experimentos na melhoria de confiabilidade de produtos ao longo do seu processo de desenvolvimento.

As normas MIL-STD-810 (2012), UK Defense Standard 07-55 (2006) e ISO/IEC 60068 (2013) fornecem uma variedade de procedimentos de testes que consideram condições ambientais que representam as condições impostas ao longo da vida do produto, a fim de simular ambientes de operação, armazenamento e transporte do produto, e fornecer elementos de apoio para avaliação da capacidade do produto em satisfazer os requisitos ambientais especificados. Entretanto, a descrição de tais testes é do tipo aceitação, os quais não provêm condições para cálculo da confiabilidade, tampouco consideram condições combinadas. Para o teste assegurar a confiabilidade do produto, é necessário abordar os aspectos ambientais em maior nível de detalhe. Portanto, aspectos ambientais do teste de confiabilidade devem ser determinados considerando quais condições, únicas ou combinadas, são as mais críticas. Experiência e normas podem prover estas condições.

De acordo com a definição de Freitas (1997), variável de estresse é aquela que, utilizada em um teste em níveis diferentes daqueles considerados em condições normais de operação, reduz o tempo até a falha do produto, acelerando o teste. Neste contexto, a variável de estresse será a condição ambiental aplicada em níveis diferentes das condições normais de operação do produto.

Segundo a classificação apresentada em Freitas (1997), as variáveis de estresse podem ser classificadas de acordo com dois tipos de formas de aceleração. A primeira delas é a aceleração por alta taxa de uso, na qual submete-se o produto em operação a uma taxa de uso mais elevada do que a normal de operação, elevando-se a velocidade ou reduzindo-se o tempo de inatividade. Com a aceleração da taxa de uso, o que é adequado para produtos que não operam continuamente, sob condições normais, aplica-se uma taxa de uso maior do que a normal para simular períodos mais longos de operação sob condições normais. Os dados deste tipo de teste podem ser analisados com técnicas de análise de dados de vida padrão, sem a necessidade da aplicação de modelos de regressão.

A segunda forma é a aceleração por altos níveis de estresse, na qual se submete o produto em uso a níveis elevados das variáveis de estresse com o objetivo de reduzir o tempo de vida ou degradar a desempenho do produto de maneira acelerada.

A carga de estresse em um teste acelerado pode ser aplicada de diversas maneiras, e os conceitos apresentados abaixo podem ser estendidos para a combinação de variáveis.

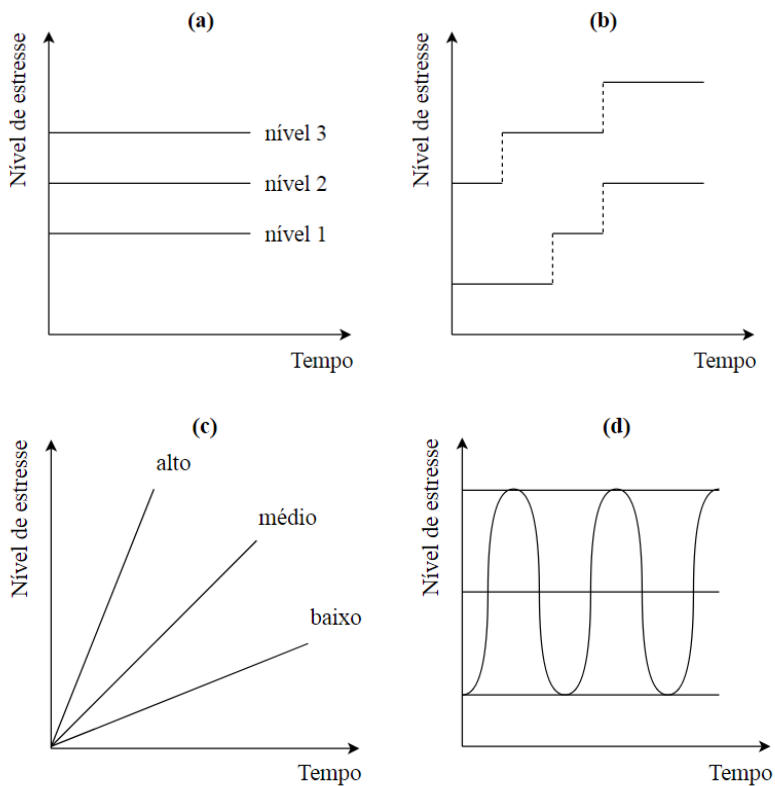
- **Constante:** Cada unidade é submetida a um nível de estresse constante, conforme representação da Figura 3.2(a). Devem-se utilizar vários níveis de estresse para que se possa realizar a modelagem

dos dados obtidos. Esta forma de aplicação de estresse tem simplicidade na realização do teste, e permite o uso de modelos simples na análise dos resultados. Estas razões tornam esta forma de aplicação da carga de estresse a mais recomendável.

- **Escada:** Cada unidade é submetida a um nível de estresse por um período de tempo, até que ocorra a falha, como mostra a Figura 3.2(b). A principal vantagem desta forma é gerar rapidamente a ocorrência de falhas, e a desvantagem está no fato de o modelo precisar levar em consideração o efeito cumulativo da exposição a estresses sucessivos, sendo mais complexo do que para estresse constante.
- **Progressivo:** Cada unidade é submetida a um nível crescente e progressivo de estresse, conforme ilustra a Figura 3.2(c), apresentando as mesmas vantagens e desvantagens do tipo escada. Considera-se difícil, em um teste acelerado, controlar o aumento progressivo do nível de estresse.
- **Cíclico:** Cada unidade é submetida a estresses de níveis alto e baixo de maneira cíclica. A Figura 3.2(d) representa esquematicamente este tipo de aplicação de carga.
- **Aleatório:** Alguns produtos estão sujeitos a níveis de estresse que se alteram de maneira aleatória. Os níveis de estresse serão aplicados segundo uma distribuição mais próxima possível da realidade, porém a níveis mais elevados.

Quando o modo de falha e o efeito de aceleração da variável de estresse são bem entendidos, e quando se deseja fazer estimativas para um ambiente cujo estresse é aproximadamente constante, utilizar testes com outra forma de aplicação de estresse que não a constante significa complicar desnecessariamente a situação.

Figura 3.2 - Formas de aplicação de Carga de estresse. (a) Constante, (b) tipo escada, (c) progressivo e (d) cíclico.



Fonte: Freitas (1997)

3.3. TIPOS DE TESTES ACELERADOS

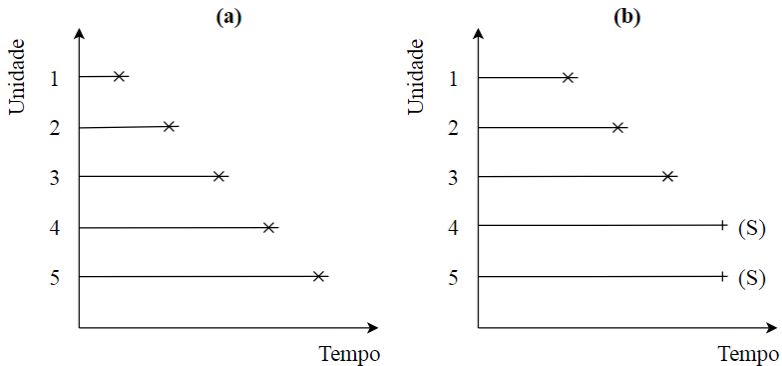
Segundo a definição de alguns autores, como Freitas (1997), os testes acelerados podem ser classificados em dois, em função da característica dos dados coletados:

- **Testes acelerados de degradação:** a resposta de interesse é uma medida de desempenho do produto ou componente obtida ao longo do tempo. O objetivo é estudar a degradação do desempenho do

produto ao longo do tempo de vida do produto. Neste teste, amostras são degradadas de maneira acelerada, e seu desempenho medido ao longo do tempo. Estes dados de desempenho são analisados por meio da montagem de um modelo de degradação aos dados para estimar a relação entre desempenho, tempo e estresse.

- **Testes acelerados de vida:** A resposta de interesse é o tempo até a ocorrência da falha. O objetivo é estimar o MTTF, a função de confiabilidade, etc. Por meio da modelagem de tais dados, extrapolam-se os resultados obtidos nos testes para as condições normais de uso. A análise dos dados de testes acelerados de vida depende do tipo destes dados. Os parágrafos seguintes descrevem os tipos de dados de vida a partir de um teste deste tipo.
 - **Completos:** Dados completos consistem da vida exata (tempo de falha) para cada unidade amostral. A Figura 3.3(a) descreve uma amostragem completa a partir de uma condição de teste único. A extensão da linha corresponde a vida da unidade em teste.
 - **Censurados:** Frequentemente, quando dados de vida são analisados, algumas unidades ainda não falharam, e sabe-se somente que seus tempos de falha são além do presente tempo de funcionamento. Estes dados são censurados a direita. Unidades que não apresentaram falha são chamadas sobreviventes, removidas ou suspensões, e são representadas por (S) na Figura 3.3(b). Estes dados censurados surgem quando unidades: (1) são removidas de teste ou operação antes de suas falhas, (2) ainda funcionam no tempo da análise dos dados, ou (3) são removidas do teste ou serviço porque falharam por alguma causa desconhecida, como falha do equipamento de teste. Similarmente, quando se sabe apenas que o tempo até a falha é anterior a determinado tempo, a falha é dita censurada a esquerda.

Figura 3.3 - Tipos de dados de vida em relação ao tempo até a falha. Em (a), observam-se dados completos para todas as unidades amostrais, e em (b) tem-se dados censurados para as unidades 4 e 5.



Fonte: Nelson (1990).

Segundo a definição descrita por Meeker e Escobar (1998) e Koelche (2014), os testes acelerados podem ainda ser divididos em dois tipos, de acordo com seu propósito:

- **Testes acelerados qualitativos:** Delineados para estressar os produtos com o objetivo de obter informações sobre o modo de falha, sem a necessidade de fazer qualquer previsão quanto à vida útil do produto, em condições normais de uso. Os testes acelerados de vida qualitativos são empregados principalmente para revelar os potenciais modos de falha de determinado produto, visando a melhoria do projeto deste produto. Estes testes são realizados em pequenas amostragens com as unidades de teste submetidas a um único nível elevado de estresse. Se a amostra não apresentar falha, diz-se que esta passou no teste. Caso contrário, devem ser tomadas medidas adequadas para melhorar o projeto do produto, a fim de eliminar a causa da falha que foi identificada em teste. Estes testes podem fornecer informações valiosas sobre os tipos de estresses e os níveis de estresse que devem ser aplicados em testes acelerados de vida quantitativos subsequentes.
- **Testes acelerados quantitativos:** Delineados para criar distribuições de probabilidade, através de dados de tempo até a falha, como

forma de prever as características de vida do produto em condições normais de uso, a partir de dados obtidos em um teste acelerado de vida. Estes testes são projetados para quantificar a vida útil do produto e para produzir os dados necessários para a análise dos dados de vida acelerada.

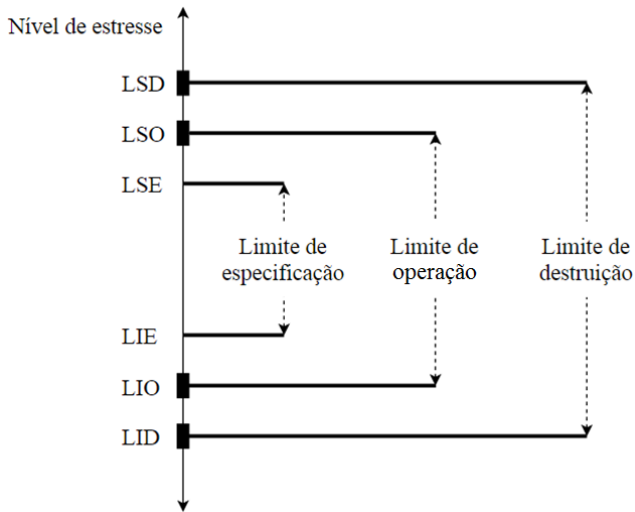
Similarmente aos testes acelerados de vida qualitativos, os testes quantitativos devem considerar os tipos de variáveis de estresse e os níveis de estresse de modo que aceleram os modos de falha para o produto, mas não introduzam modos de falha que nunca ocorreriam em condições normais de operação.

3.3.1. Teste altamente acelerado de vida (HALT)

De acordo com O'Connor (2012), no teste altamente acelerado de vida (HALT), não se busca simular o ambiente de operação, sendo que nenhum limite é definido para os tipos e níveis das variáveis de estresse a serem aplicados. Desta forma, os tempos ou ciclos até a falha, típicos em HALT, são de várias ordens de grandeza menores do que seriam observados em operação. Por não possuir um modelo de aceleração claro, é classificado como teste acelerado qualitativo.

O procedimento para HALT consiste na aplicação de quaisquer variáveis e níveis de estresse que possam causar falhas o mais cedo possível, enquanto que o equipamento de teste é continuamente operado e monitorado. Posteriormente, analisam-se as falhas e implementam-se ações para melhoria do projeto. Estas melhorias de projeto podem estender a faixa do limite de operação, conforme representação da Figura 3.4, movendo-o além do limite de especificação e, conseqüentemente, reduzindo as chances de falha. Nesta representação, os limites superior e inferior de especificação (LSE e LIE, respectivamente) definem a faixa na qual o produto é projetado para operar sem apresentar falhas. Os limites superior e inferior de operação (LSO e LIO, respectivamente) representam a fronteira na qual o produto pode apresentar falhas no cumprimento de algumas de suas funções. Entretanto, o produto submetido a condições de estresse dentro do limite de operação é apto a retornar à operação normal nos limites de especificação. Por outro lado, os limites superior e inferior de destruição (LSD e LID, respectivamente) definem a região além da qual os níveis de estresse são suficientes para provocar a falha catastrófica do produto.

Figura 3.4 - Representação esquemática dos limites de especificação, de operação e de destruição, em relação aos níveis de estresse aplicados.



Fonte: Adaptado de O'Connor (2012)

Conforme mencionado anteriormente, é importante salientar que valores de confiabilidade não podem ser calculados utilizando-se o HALT. Um teste acelerado pode prover estas informações somente se a causa da falha for um mecanismo predominante único, como fadiga, onde se conhece exatamente o tipo de estresse único aplicado, e se possui a confiança na correlação matemática que os vincula.

Crowe (2001) menciona que o crescimento da confiabilidade pode ser atingido por meio da identificação da causa do modo de falha, e pela incorporação da correção de projeto para o produto. Os testes de vida altamente acelerados podem prover os dados necessários para possibilitar este processo. A abordagem HALT pode ser aplicada a qualquer tipo de produto ou tecnologia, sendo alguns exemplos mostrados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Recomendações gerais para HALT de acordo com o tipo de produto.

Produto	Recomendações para HALT
Motores, bombas, unidades de transmissão de potência	<ul style="list-style-type: none"> • Testar com lubrificantes com prazo de validade expirado. • Conduzir testes com níveis baixos de lubrificante. • Utilizar fluidos aquecidos ou contaminados. • Utilizar filtros com prazo de validade expirado. • Desalinhar eixos, mancais, etc. • Desbalancear componentes rotativos.
Montagens eletromecânicas (impressoras, movimentadores de materiais)	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicar altas ou baixas temperaturas, vibração, umidade, etc. • Utilizar componentes com dimensional fora das tolerâncias. • Desalinhar eixos, mancais, etc. • Utilizar materiais e componentes que excedem as especificações.
Pequenos componentes ou montagens (interruptores, transdutores)	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicar altas ou baixas temperaturas, vibração, umidade, etc. • Aplicar vibração de alta frequência.

Fonte: adaptado de O'Connor (2012)

3.3.2. Teste de estresse altamente acelerado para manufatura (HASS) e teste de auditoria altamente acelerado para manufatura (HASA)

De acordo com Otto (2013), o objetivo do teste de estresse altamente acelerado para manufatura (HASS) é detectar qualquer defeito latente proveniente dos desvios nos processos de manufatura, que eventualmente apareceria em condições normais de uso do produto. Assim

sendo, o teste HASS contribui para a rapidez na execução de ações corretivas, bem como na detecção de falhas prematuras no produto antes que ocorra a entrega ao cliente.

Para O'Connor (2012) e Otto (2013), enquanto em HALT tenta-se falhar todas as amostras visando evidenciar falhas para subsequente melhoria do projeto, em HASS tenta-se evitar danificar bons produtos manufaturados, bem como falhar produtos manufaturados defeituosos visando sua correção ou segregação. O HASS permite o aumento da efetividade dos filtros de manufatura e, desta forma, HALT e HASS representam uma abordagem integrada de testes para assegurar que ambos os processos, de projeto e de manufatura, produzam produtos altamente confiáveis a custo e tempo reduzidos. Tipicamente, no teste HASS uma combinação de variáveis de estresse é empregada em níveis além dos limites de especificação de um produto.

Uma nítida desvantagem do teste HASS é o risco de estimular modos de falha que não seriam observados em condições de uso normal do produto. Além disto, como o HASS é um teste qualitativo, a confiabilidade resultante não é conhecida. Por fim, existe o risco de o HASS acumular dano de maneira excessiva no produto, se não for planejado adequadamente.

O conhecimento adquirido através da aplicação de testes HALT deve ser empregado no delineamento de testes HASS. Para Otto (2013), o procedimento para se planejar um teste HASS deve ser seguido conforme a sequência de atividades descrita abaixo.

1. O teste HALT deve ser realizado e falhas de projeto devem ser eliminadas, sendo que a primeira sugestão para o teste HASS deve ser feita com base em resultados do teste HALT;
2. Entre 3 e 5 ciclos de teste HASS devem ser realizados, e as falhas devem ser registradas em função do número de ciclos;
3. O ciclo HASS deve ser otimizado a fim de se reduzir o número de ciclos a 1. Neste caso, análises para o cálculo do dano acumulado, como o critério de Miner, podem ser aplicadas;
4. O teste HASS resultante deve ser verificado;
5. A efetividade do teste HASS deve ser verificada através da execução de 20 a 50 ciclos do HASS resultante em um determinado número de produtos, afim de se assegurar que ainda resta vida suficiente nos produtos submetidos ao teste HASS.

O teste HASS pode ser aplicado à totalidade das unidades produzidas. Entretanto, se este teste for aplicado a apenas uma fração destas

unidades, o teste passa a ser chamado teste de auditoria altamente acelerada para manufatura (HASA). Assim sendo, o teste HASS é idealmente aplicável a produções piloto, sendo frequentemente substituído pelo teste HASA conforme o processo de manufatura torna-se maduro.

3.3.3. Teste acelerado para verificação de projeto

De acordo com Otto (2013), o propósito do teste de verificação, ou qualificação de projeto é verificar se determinado produto, destinado a determinada aplicação, atende a um conjunto de requisitos especificados. Estes requisitos podem ser regulamentares, estabelecidos pelo cliente, ou internos. Sempre que possível, um teste de verificação deve ser conduzido com base em normas internacionais para que o procedimento de teste seja bem definido, reproduzível e reconhecido internacionalmente. Em geral, o resultado de um teste de verificação de projeto é a documentação do cumprimento dos requisitos avaliados, e pode ser base para aprovação ou certificação do produto testado.

Como estes testes servem para a certificação de produtos, estes devem ser conduzidos em produtos manufaturados a partir de meios produtivos definitivos. Caso seja imperativo realizar este tipo de teste em um estágio mais cedo no processo de desenvolvimento, os protótipos do produto sob teste deverão reproduzir as especificações do produto final. Caso contrário, pode ser mandatório repetir, em partes ou inteiramente, os testes de verificação do projeto utilizando-se produtos que reproduzam as especificações finais.

Como vantagens, pode-se citar que os testes de verificação de projeto documentam de maneira bem definida o atendimento de determinado produto aos requisitos especificados, geralmente de acordo com normas internacionais reconhecidas. Todavia, a desvantagem deste tipo de teste é não fornecer qualquer tipo de informação quanto às margens de segurança, devido a ser um teste de aceitação. Por este motivo, outra desvantagem é não prover informações para permitir ações para a melhoria da confiabilidade do produto. A execução deste tipo de teste deve seguir os seguintes passos:

1. Definir o produto a ser testado;
2. Estabelecer como executar o teste (considerar normas de referência, procedimentos, entre outros);
3. Determinar os critérios de aceitação (similarmente, considerar normas de referência, procedimentos, entre outros).

3.3.4. Teste acelerado de vida para calibração (CALT)

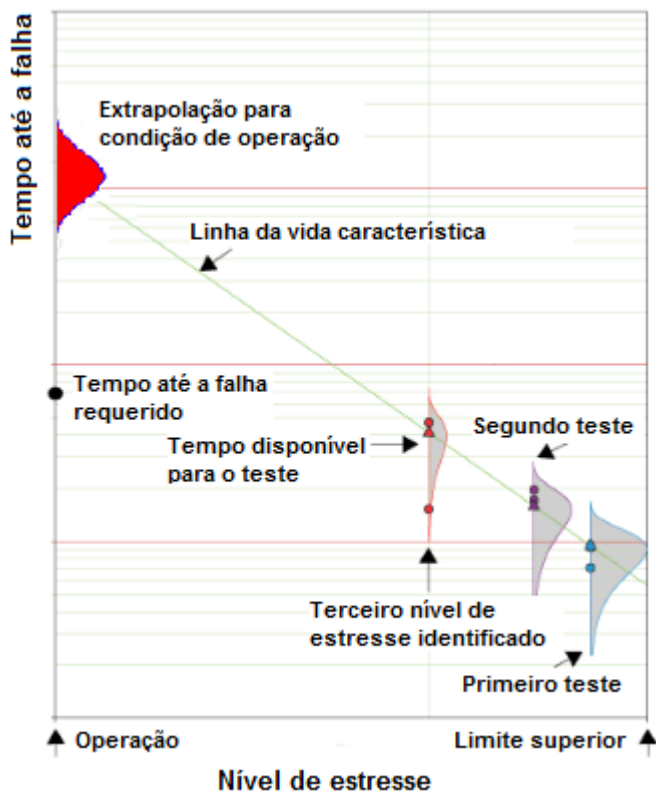
O objetivo fundamental do teste acelerado de vida para calibração (CALT) é combinar ciclos rápidos de aprendizagem em teste com a calibração para as condições normais de operação. Conforme mencionado em Otto (2013), este tipo de teste é especialmente útil quando uma redução significativa em tempo de teste é desejável, assim como a quantificação da confiabilidade. A metodologia para CALT foi desenvolvida pela empresa General Motors Corporation, e pode ser encontrada no documento GMW8758 (2011). Anteriormente à realização do CALT, é necessária a execução do HALT, a fim de se obter os limites de destruição do produto, evitando assim a eliminação de fraquezas de projeto nesta etapa.

Koeche (2014) descreve que, neste teste, aplica-se apenas uma variável de estresse, na qual o nível mais elevado é ligeiramente abaixo do limite de destruição do produto. O método de ensaio consiste nas seguintes atividades:

1. Testar o produto até a falha no maior nível de estresse possível, sendo que o tempo até a falha deve ser registrado, e o modo de falha identificado;
2. Submeter uma nova amostra do produto ao teste até sua falha em um nível de estresse menor, registrando-se o tempo até a falha;
3. Realizar a análise dos resultados, e testar um terceiro produto em um nível de estresse correspondente ao tempo disponível para o teste acelerado.

Desta forma, a vida esperada para um nível de estresse correspondente ao de operação é calculado com base em todos os resultados do teste. A Figura 3.5 explica graficamente o processo CALT, onde o eixo das abscissas representa o nível da variável de estresse a partir do nível de uso até o limite superior para o produto. O eixo das ordenadas representa a vida em unidades de ciclos ou de tempo. O requisito de vida para o produto é mostrado à esquerda do eixo vertical.

Figura 3.5 - Ilustração do processo CALT.



Fonte: Paschkewitz (2001)

Uma vantagem em executar testes CALT está associada à possibilidade de aplicação em situações em que altos níveis de confiabilidade são exigidos, e em casos em que o cálculo da confiabilidade é necessário. Em contrapartida, Otto (2013) aponta que a validade do teste CALT se restringe à avaliação de somente um mecanismo de falha por teste, podendo-se aplicar no máximo duas variáveis de estresse simultaneamente. Este fato limita a aplicabilidade do teste CALT, pois dificilmente identifica-se somente um mecanismo de falha em teste com no máximo duas variáveis de estresse que excitam este mecanismo.

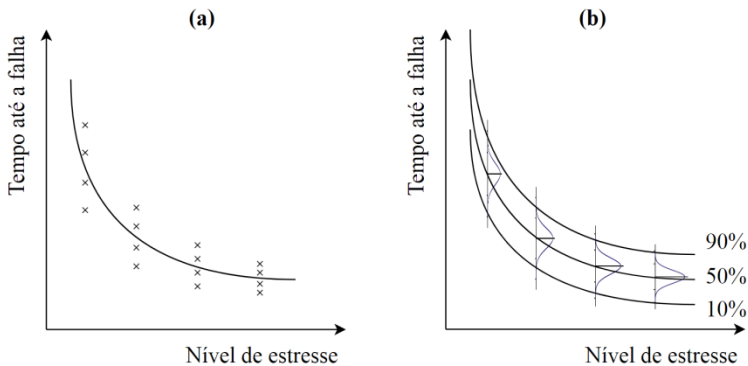
3.4. MODELOS DE REGRESSÃO PARA DADOS DE TESTES ACELERADOS QUANTITATIVOS

A Figura 3.6(a) apresenta um comportamento de resultados de um teste para vários níveis da variável de estresse. Como a tendência é diminuir o tempo até a falha com o aumento do nível de estresse, pode-se dizer que o tempo até a falha (resposta) está relacionado com o estresse (variável de estresse):

$$tempo = f(estresse) + erro \quad (\text{Equação 3.1})$$

Esta função é a relação estresse-resposta, que é representada por modelos matemáticos que descrevem o comportamento físico ou químico para determinado mecanismo de falha. Os modelos mais usualmente utilizados são Arrhenius, indicado para casos em que a variável de estresse é a temperatura, e Potência Inversa, indicada para casos em que a variável de estresse possui valores unicamente positivos. Existem diversas fontes de consulta para o modelamento matemático das relações estresse-resposta, a citar O'Connor (2012), Pham (2003) e Crowe (2001).

Figura 3.6 - Tempo de falha em função do nível de estresse.



Fonte: Adaptado de Freitas (1997)

A relação estresse-resposta é um modelo determinístico e, portanto, é necessário acrescentar um componente probabilístico que seja capaz de explicar a variabilidade dos tempos de falha das unidades sob teste em um mesmo nível de estresse. Pode-se ter um modelo que explique como

o percentil 10% se comporta com relação aos diversos níveis de estresse, conforme representação da Figura 3.6(b), na qual a parte probabilística segue a distribuição suposta para o tempo até a falha, como a Exponencial, a Weibull ou a Log-normal.

A extrapolação dos resultados de testes acelerados para as condições de uso é realizada por meio da aplicação da relação estresse-resposta. Freitas (1997) aponta a existência de uma dependência das relações estresse-resposta com constantes que são associadas a mecanismos de falha específicos. Desta forma, torna-se necessário estabelecer tais constantes a partir de valores tabelados, ou estimá-las por meio da análise de dados experimentais. Caso se utilize valores que não condizem exatamente com o mecanismo de falha observado no teste, a utilização de valores tabelados pode acarretar erros grosseiros nos resultados. A segunda alternativa exige a condução de testes sob vários níveis de estresse, utilizando mais de uma unidade, e alocando cada uma delas a um nível diferente de estresse. Os dados assim obtidos, quando adequadamente modelados, permitirão a estimação das constantes associadas às relações estresse-resposta, bem como a extrapolação de resultados para as condições de uso. A análise é realizada através de modelos de regressão, que são a utilização das relações estresse-resposta em conjunto com os modelos probabilísticos.

Como regra geral, os modelos utilizados na análise de dados de confiabilidade são construídos para o logaritmo do tempo de falha T , ou seja, $Y = \ln(T)$. Nestes modelos, supõe-se que Y tem uma distribuição com parâmetro de locação $\mu(x)$ e parâmetro de escala $\sigma > 0$, que não depende de x . Em outras palavras, $\mu(x)$ é a relação estresse-resposta. Este é o procedimento geral, qualquer que seja a distribuição suposta para Y . Neste modelo, escreve-se sempre o parâmetro de locação da distribuição de $Y = \ln(T)$ em função da variável de estresse x . O modelo toma então a seguinte forma geral:

$$Y = \ln(t) = \mu(x) + \sigma \varepsilon \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde ε tem distribuição que independe da variável de estresse x .

3.5. PLANEJAMENTO DE TESTES ACELERADOS QUANTITATIVOS

Planejar adequadamente um teste acelerado de vida é uma tarefa de complexidade elevada. Os fatores de estresse e níveis de estresse devem ser escolhidos de modo que aceleram os modos de falha em análise, mas não introduzam modos de falha que não ocorrerão em condições de utilização. Normalmente, estes níveis de estresse estarão fora dos limites de especificação do produto, porém abaixo dos limites destrutivos, conforme representado na Figura 3.4.

A escolha do estresse e dos níveis do estresse, juntamente ao processo de planejamento do experimento, é de extrema importância. Se os limites são desconhecidos, testes preliminares com pequenas amostragens podem ser realizados a fim de determinar o estresse e os níveis de estresse apropriados. O uso adequado da metodologia para projeto de experimentos (DoE) pode ser fundamental nesta etapa. Em adição à seleção adequada de estresse, a aplicação do estresse deve ser conseguida de alguma forma lógica, controlada e quantificável. Devem-se manter dados precisos sobre o estresse aplicado, bem como o comportamento observado dos corpos de prova. Qualquer erro no planejamento certamente será descoberto mais tarde, o que, em geral, significa voltar ao início do planejamento.

A precisão das informações oriundas de testes de vida acelerados depende do cuidado dispensado ao planejamento e a realização do mesmo. Um passo importante é definir os objetivos do teste antes de realizá-lo, uma vez que ele determinará os cuidados a serem seguidos durante o planejamento e sua execução. Em geral, escolhe-se um percentil baixo da distribuição do tempo de vida do produto nas condições de uso, e em função deste, planejam-se aspectos do teste de forma a maximizar as informações que poderão ser obtidas.

Na realização de um teste de vida acelerado, uma série de elementos deve ser especificada, podendo ser divididos em dois: a Forma do Teste, e o Plano Experimental. A Forma do Teste é constituída por elementos determinados a partir de condições existentes na empresa para a realização do teste e de normas técnicas de engenharia. Por outro lado, o Plano Experimental, contempla elementos determinados de forma quantitativa.

A Forma do Teste é determinada a partir de condições existentes na empresa para a realização do teste e de normas técnicas de engenharia.

O número de níveis da variável de estresse é geralmente determinado pelas condições e recursos disponíveis na empresa. Os elementos que constituem a forma do teste são:

Escolha da resposta: Para muitos produtos, há normas técnicas que definem as medidas a serem utilizadas, e sua obtenção.

Determinação de condições realistas de teste: O ideal é que um teste acelerado simule ao máximo as condições reais de uso, exceto pelos níveis utilizados da variável de estresse.

Definição das variáveis de estresse: Para alguns produtos, existem padrões para os testes e para os estresses de aceleração. Para outros, pode não haver nenhum padrão. Neste caso, é preciso determinar, através de experimentação, os estresses apropriados. O importante é reconhecer qual estresse acelera a vida do produto.

Definição da forma de aplicação da carga de estresse: Depende de como o produto é sobrecarregado nas condições de uso, e de limitações práticas e teóricas. O estresse constante é preferível aos outros tipos.

Mecanismo de censura: A censura por falha (tipo II) é utilizada quando se tem pouca ou nenhuma informação sobre a durabilidade do produto. Garante-se um número mínimo de falhas para realizar a análise estatística dos dados. Porém, não é possível determinar de forma exata o tempo de duração do teste. A censura por tempo (tipo I) é utilizada em combinação com informações anteriores sobre o produto e nos permite planejar o tempo de duração do estudo. A censura por tempo é mais utilizada, uma vez que se necessita ter uma previsão de término do teste.

O Plano Experimental contém elementos determinados de forma quantitativa:

Número de níveis de estresse: Este não deve ser pequeno, pois torna difícil a avaliação do modelo utilizado e conseqüentemente a extrapolação para as condições de uso. Por outro lado, não deve ser demasiadamente grande, pois é complicador em termos práticos.

Proporção de alocação: Dada uma amostragem, e o número de níveis de estresse, quantas unidades deverão ser submetidas em cada nível.

Níveis de estresse: Os níveis de estresse que serão utilizados não devem ser tão altos a ponto de produzir outros modos de falha que raramente ocorrem nas condições de projeto e que tornem a extrapolação imprecisa. Porém, os níveis devem provocar o aparecimento das falhas ativas no projeto. Isto muitas vezes requer experimentação anterior ao teste acelerado.

Tamanho da amostra: Quantas unidades ao todo serão submetidas a teste.

Os dados de testes acelerados não contemplam condições de projeto para a variável de estresse, pois supõe-se que o modelo utilizado na extrapolação dos dados é válido para as condições de projeto. Portanto, durante o planejamento de teste acelerado, é conveniente estabelecer o nível baixo do estresse próximo às condições de projeto, porém não muito próximo a ponto de ao final do teste nenhuma ou apenas poucas falhas serem observadas.

3.5.1. Planos experimentais de testes acelerados

A determinação dos elementos do plano experimental de teste acelerado deve ser realizada em função da precisão, em termos de variância, desejada para os estimadores da quantidade de interesse. Geralmente, estes são percentis baixos da distribuição do tempo de falha, nas condições de projeto. De acordo com Freitas (1997), existe uma regra básica que determina que quando se deseja estimar um percentil 100% da distribuição do tempo de falha, o ideal é que o percentual de falhas observado no teste seja de pelo menos 100%.

Nelson (1990) e Freitas (1997) classificam os planos experimentais de testes acelerados como tradicionais, ótimos e de compromisso.

Os **planos tradicionais** consistem em fixar três ou quatro níveis de estresse igualmente espaçados e alocar o mesmo número de unidades para cada nível. Nelson (1990) não recomenda seu uso e sim os planos ótimos e os de compromisso, com alocações desiguais de unidades em cada nível de estresse, pois os planos tradicionais têm pouca precisão. Meeker & Hahn (1985) complementam que estes planos estão longe dos ótimos porque, intuitivamente e estatisticamente, devem-se ter mais observações no nível baixo de estresse. Num método que utilize dados censurados, o valor da observação depende de ela vir de uma unidade de falha ou de uma unidade sobrevivente. Então, um esquema de alocação igual de unidades fornece mais informações para a condição de alto estresse do que para a de baixo estresse.

Os **planos ótimos** fornecem os estimadores mais precisos para as condições de projeto. Estes planos utilizam dois níveis de estresse com alocação desigual de unidades. Uma suposição de tais planos é que o nível mais alto é pré-especificado. O planejamento do teste, portanto, consiste na escolha da localização do nível mais baixo. O uso de somente dois

níveis de estresse decorre das dificuldades da realização dos cálculos para planos que envolvem mais que dois níveis.

Os **planos de compromisso** de Meeker & Hahn (1985), também citados por Nelson (1990) e Freitas (1997), são uma proposta intermediária entre os tradicionais e os ótimos. Estes planos utilizam três níveis de estresse, e assim como nos planos ótimos, assume-se que o nível alto é escolhido a partir de considerações práticas. Os melhores níveis, baixo e médio, são escolhidos de forma a minimizar a variância assintótica do estimador do percentil de interesse da distribuição do tempo de vida do produto sob teste, nas condições de projeto. Os planos de compromisso sacrificam a precisão estatística em favor de uma melhoria de todas as propriedades do experimento, incluindo uma maior robustez no estabelecimento de seus parâmetros de realização. Assume-se que existe o compromisso de que a alocação será sempre na proporção 4:2:1, para respectivamente os níveis baixo, intermediário e alto.

O plano experimental de teste acelerado deve ser utilizado para se definir os níveis de estresse adequados, e a quantidade das unidades de teste que precisam ser atribuídas aos diferentes níveis de estresse. Freitas (1997) mostra o modelamento matemático para alguns dos planos experimentais de teste acelerado mais comumente utilizados na indústria, e são apresentados no ANEXO A.

3.5.2. Determinação do tamanho de amostra para testes acelerados

Uma estimativa da função de taxa de falha é frequentemente empregada como um critério para tomada de decisões. Desta forma, uma parte importante do planejamento de um teste de vida é a determinação do tamanho da amostra necessário para atingir um grau específico de precisão dessa estimativa. Todo cálculo de tamanho de amostra requisita valores iniciais para algumas quantidades, cuja estimação é muitas vezes a razão da realização do teste. É importante ressaltar que este é um processo iterativo, assumem-se determinados valores iniciais, estimam-se algumas quantidades e estas estimativas servirão como dados de entrada para o planejamento de novos testes.

Neste tópico, serão apresentados métodos que permitem dimensionar o tamanho da amostra para testes acelerados, quando o objetivo é estimar o valor da função taxa de falha em um ponto específico no tempo e o percentil 100% da distribuição do tempo até a falha. O desenvolvimento teórico que originou a construção dos gráficos que serão utilizados a seguir está apresentado nos artigos originais.

Estimativa da taxa de falha em um determinado tempo

Este procedimento foi desenvolvido por Meeker, Escobar e Hill (1992), e é baseado em um gráfico de fácil utilização. O tamanho de amostra necessário para estimar a taxa de falha no ponto t_e é dado por:

$$n \cong \left[\frac{z_\gamma}{\ln(r)} \right]^2 V(\varepsilon_e; \varepsilon_c) \quad (\text{Equação 3.3})$$

Onde:

- z_γ é o percentil 100% da distribuição normal padrão (com média zero e variância 1);
- γ é a probabilidade qual indica o nível de confiança desejado;
- $r = m + 1$, onde $m \times 100\%$ é o erro especificado para a estimativa do percentil;
- $\varepsilon_c = \ln(-\ln(1 - p_c))$;
- $\varepsilon_e = \ln(-\ln(1 - p_e))$;
- p_c é a probabilidade de falha durante o tempo de duração do teste;
- p_e é a probabilidade de falha durante o tempo de interesse, t_e .

Estimativa de percentis da distribuição do tempo médio até a falha (Weibull)

Outro procedimento é para a determinação do tamanho de amostra necessário para estimar o percentil 100% (t_p) da distribuição do tempo até a falha, com uma precisão especificada. Também neste caso, o procedimento é baseado em um gráfico, mostrado no trabalho de Meeker e Nelson (1976). O tamanho da amostra necessário para estimar o percentil 100% (t_p) da distribuição do tempo até a falha é dado por:

$$n \cong V \left[\frac{z_\gamma}{\delta \ln(r)} \right]^2 \quad (\text{Equação 3.4})$$

Onde:

- z_γ é o percentil 100% da distribuição normal com média zero e variância 1;
- γ é a probabilidade qual indica o nível de confiança desejado;
- $r = m + 1$, onde $m \times 100\%$ é o erro especificado para a estimativa do percentil;

- δ é o valor do parâmetro de forma da distribuição de Weibull. É em geral desconhecido e, portanto, necessita de um valor inicial arbitrário.

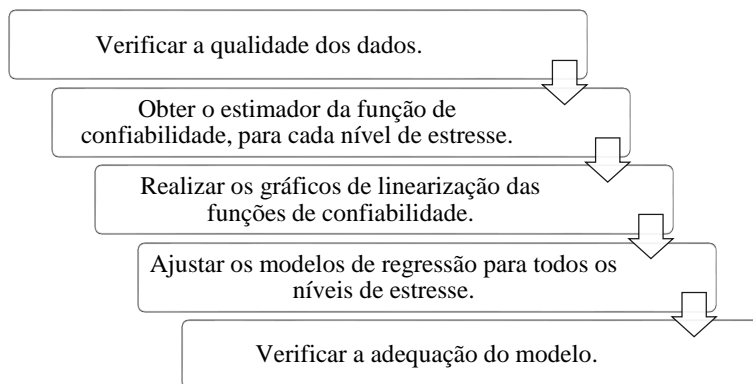
V é uma função de $\zeta = [\ln(t_c) - \ln(\alpha)]\delta$ e P . Faz-se necessário estabelecer valores iniciais para os parâmetros α e δ da Weibull no cálculo de ζ .

De acordo com Back (1992), com o planejamento concluído, o próximo passo é o início formal do teste demonstração do equipamento, o que requer a operação e o apoio na forma pré-estabelecida no plano de teste. Uma vez iniciado o teste, o que se procura é obter dados para avaliar ou verificar desempenho e eficiência do equipamento em desenvolvimento, e observar se os requisitos inicialmente especificados são alcançados.

3.6. ANÁLISE DE DADOS DE TESTES ACELERADOS QUANTITATIVOS

Freitas (1997) apresenta um roteiro que ordena as etapas para análise adequada dos dados experimentais advindos de testes acelerados quantitativos, conforme exemplificado na Figura 3.7. Neste trabalho, este procedimento será adotado. Nelson (1990) e Meeker and Escobar (1999) apresentam modelos estatísticos e técnicas para análises de dados de testes acelerados.

Figura 3.7 - Fluxo das etapas da análise de dados oriundos de testes de vida acelerados.



Fonte: Freitas (1997)

4. CONFIABILIDADE E TESTES ACELERADOS NO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

4.1. INTRODUÇÃO

Para serem competitivos, os fabricantes atualmente necessitam desenvolver produtos com tecnologias cada vez mais avançadas, em tempo reduzido e com melhoria da produtividade, confiabilidade e qualidade. Esta competitividade é alcançada principalmente durante as fases do desenvolvimento de produto. Segundo Otto (2013), é importante estabelecer quando e como os diferentes métodos, ferramentas e atividades podem ser aplicados ao longo das diferentes fases do desenvolvimento de determinado produto. Adicionalmente, de acordo com Back et al. (2008), para que se possa atingir esta competitividade, a equipe multidisciplinar de projeto de produto deve estar capacitada e suportada por um ou mais modelos de desenvolvimento integrado de produtos.

Atualmente, existem várias proposições de metodologias para desenvolvimento de produtos, entre as quais podem-se citar: Asimov (1962), Cain (1969), Pahl & Beitz (1977), Blanchard & Fabrycky (1981), Back (1983), Ullman (1992). Back et al. (2008) observa que os estudos da atividade projeto iniciaram-se após a Segunda Guerra Mundial como uma disciplina independente, e mostra a evolução do conhecimento no domínio do processo de desenvolvimento de produtos (PDP) através de uma representação cronológica das principais referências bibliográficas no assunto, apontando para uma distinção entre duas linhas de pensamento. A primeira considera a elaboração do projeto com base em determinadas características do produto, por exemplo, projetos para confiabilidade, custo, manufatura, montagem, entre outros. A segunda linha trata do processo de desenvolvimento de produto, quanto à multidisciplinaridade, ao ciclo de vida do produto, à integração de equipes e à simultaneidade de atividades de desenvolvimento, por exemplo, o projeto para o ciclo de vida do produto, a engenharia simultânea, o desenvolvimento integrado do produto, entre outros.

Conforme mencionado no Capítulo 2, a confiabilidade de um produto contribui significativamente para a qualidade e competitividade da empresa que o disponibiliza ao mercado. Segundo Dias (2002), a confiabilidade, como atributo do produto, é fortemente dependente do seu ciclo de vida e, portanto, é necessário considerá-la ao longo de todas as fases de seu ciclo de vida. Neste contexto, segundo Nelson (1990), os testes acelerados podem prover a rápida obtenção de dados os quais provêm

informação desejada sobre a vida do produto ou seu desempenho sob uso normal, economizando bastante tempo e dinheiro no processo de projeto.

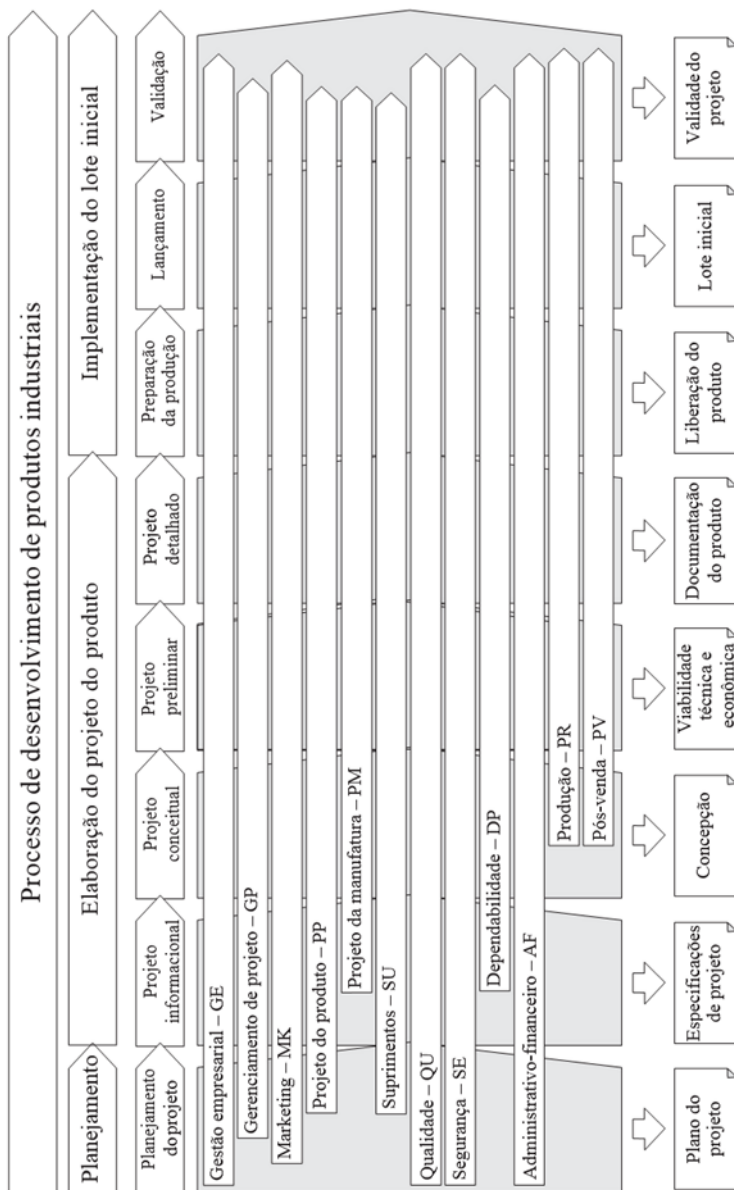
As seções seguintes apresentam uma breve descrição dos modelos de desenvolvimento de produtos de referência para a construção deste trabalho, bem como abordagens para integração da confiabilidade e testes acelerados no processo de projeto, a fim de embasar o delineamento da metodologia proposta e apresentada no Capítulo 5. Apresentam-se o modelo PRODIP como referência para o delineamento da metodologia proposta, o modelo C2C – o qual é atualmente empregado na empresa-alvo deste estudo, e o método Projeto para Confiabilidade, como referência para integração do atributo confiabilidade nas fases de projeto de produto. Por fim, será apresentada uma discussão acerca da literatura disponível no que diz respeito à integração dos testes acelerados no ciclo de vida de produtos.

4.2. MODELO PRODIP

O Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (PRODIP), descrito em Back et al. (2008), é um modelo desenvolvido a partir de pesquisas realizadas no Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (NeDIP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e integra diversas propostas de metodologias de projeto de produtos existentes. Além disso, o modelo PRODIP contempla os vários atributos do produto, dentre os quais a confiabilidade. Desta forma, o delineamento da metodologia de projeto proposta neste trabalho adotará como referência o modelo PRODIP, o qual será integrado a outros modelos que também tratam do mesmo atributo.

O modelo PRODIP abrange três macro-fases: (1) Planejamento do projeto, (2) Elaboração do projeto do produto e (3) Implementação do lote inicial. Estas macro-fases são desdobradas em fases e em diversas tarefas no processo de desenvolvimento, considerando-se suas entradas, saídas e os principais domínios de conhecimento envolvidos na execução das tarefas, conforme representação da Figura 4.1.

Figura 4.1 - Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (PRODIP).



Fonte: Back et al. (2008)

A macro-fase Planejamento do projeto inicia-se com a elaboração do planejamento de marketing, o qual deve refletir o planejamento estratégico do produto com base nas estratégias da empresa. Como resultado desta macro-fase, obtém-se a aprovação do plano do projeto, o qual deve considerar a declaração do escopo do projeto do produto, a EDT (estrutura de desdobramento do trabalho) e a avaliação de risco do projeto para as áreas envolvidas da organização. A macro-fase Elaboração do projeto do produto consiste na elaboração do projeto do produto e do plano de manufatura, sendo decomposta nas fases Projeto informacional, Projeto conceitual, Projeto preliminar e Projeto detalhado. Por fim, a macro-fase Implementação do lote piloto trata da execução do plano de manufatura do produto desenvolvido e o encerramento do projeto, por meio da condução das fases Preparação da produção, Lançamento e Validação.

O atributo de confiabilidade está integrado ao processo de desenvolvimento de produtos e contextualizado no processo de engenharia simultânea, com maior destaque para as fases do projeto Preliminar até o projeto Detalhado. Evidentemente, este atributo é requerido desde o planejamento do produto, por ser fundamental para todo o ciclo de vida de produto. As próximas seções apresentam um breve descritivo das fases que compõe as macro-fases Elaboração do projeto e Implementação do lote inicial no modelo PRODIP.

4.2.1. Projeto informacional

O Projeto informacional é a primeira fase no processo de projeto do produto, a qual tem por principal resultado a aprovação das especificações do projeto de produto, sobre as quais podem ser atribuídas as metas do projeto de produto. Esta fase inicia-se pela apresentação do plano do projeto à equipe de desenvolvimento e, a fim de estabelecer as especificações de projeto, as necessidades dos clientes ou usuários devem ser identificadas e declaradas na forma de requisitos dos clientes ou usuários. Subsequentemente, com base nos requisitos de usuários ou clientes, devem ser desenvolvidos os requisitos do projeto de produto, os quais levam em consideração diferentes atributos como ergonomia, modularidade, estética, segurança, confiabilidade, entre outros. De posse dos requisitos de projeto de produto, as especificações que o produto a ser projetado deve atender podem ser estabelecidas. Neste processo de determinação das especificações de projeto de produto, é importante avaliar a factibilidade em atendê-las, uma vez que todas as tarefas no processo de desenvolvimento do produto terão por objetivo alcançá-las.

Adicionalmente, ao final desta fase são realizadas análises econômica e financeira, bem como a atualização do plano de projeto baseado no planejamento de marketing, as quais ocorrerão ao final de todas as fases até a conclusão das análises no Lançamento do produto. Portanto, estas atividades não serão mencionadas novamente na descrição das fases seguintes. Por fim, submete-se a aprovação de passagem de fase a partir do comprometimento das áreas envolvidas no desenvolvimento do projeto do produto.

4.2.2. Projeto conceitual

O principal objetivo desta fase é o desenvolvimento da concepção do produto, iniciando-se pelo estabelecimento da estrutura funcional do produto a ser projetado. Em termos gerais, a estrutura funcional deve contemplar a função global a ser atendida, bem como suas subfunções, prosseguida pela determinação de estruturas funcionais alternativas. Por fim, estabelece-se a seleção da melhor estrutura funcional para o produto. Tal seleção deve considerar aspectos que possuem influência no atendimento às metas estabelecidas ao projeto do produto, tais como custo, prazo para implementação, segurança, confiabilidade, entre outros.

A partir da seleção da concepção do produto, iniciam-se atividades para identificar os processos de fabricação e os fornecedores que atendam as subfunções estabelecidas na estrutura funcional, permitindo a avaliação dos riscos associados a tais desenvolvimentos, como prazo, custo e nível de investimento em ativos. Simultaneamente, ocorrem avaliações iniciais acerca da segurança e confiabilidade da concepção selecionada, bem como uma avaliação quanto ao atendimento do escopo do projeto.

Visto que as demandas de mercado são dinâmicas e podem influenciar a decisão sobre a seleção da melhor concepção, ao longo de toda a fase deve ocorrer o monitoramento do planejamento de marketing.

4.2.3. Projeto preliminar

A partir da concepção selecionada para o produto durante a fase de projeto conceitual, o projeto preliminar visa estabelecer o leiaute final do produto e, subsequentemente, o plano de fabricação e de teste do protótipo, e a estrutura preliminar do protótipo – a qual ampara a estimativa de custo do produto. Com base no plano de fabricação do protótipo, é possível avaliar os requisitos e as capacidades de manufatura interna e externa, enquanto que o plano de testes do protótipo tem por objetivo avaliar a segurança do produto.

A determinação do leiaute final deve considerar a determinação das especificações do projeto do produto (dimensões, material, segurança, ergonomia, manufatura, entre outros aspectos), as patentes e os aspectos legais e de segurança vigentes, a necessidade de atender diferentes modelos do produto definidos no planejamento de marketing, a realização de testes com *mock-up* para confirmar o atendimento às necessidades do mercado, bem como a avaliação da viabilidade técnica do projeto do produto e dos seus respectivos processos de manufatura.

Visando a avaliação do desempenho do produto em relação ao cumprimento das funções previamente estabelecidas, ao longo do projeto preliminar podem ser conduzidos testes utilizando-se diferentes modelos (icônicos, analógicos, numéricos e computacionais).

4.2.4. Projeto detalhado

De acordo com Back et al. (2008), a fase de projeto detalhado tem por objetivos a construção, realização testes e aprovação do protótipo; otimização dos componentes; conclusão das especificações técnicas do produto; estabelecimento do plano de manufatura; definição de procedimentos de assistência técnica; e a aprovação da solicitação de investimentos.

Com base nos planos de fabricação e de teste do protótipo, obtidos na fase anterior, nesta fase o protótipo é construído e submetido a testes visando a avaliação de diferentes fatores, tais como confiabilidade, segurança, entre outros. Simultaneamente a esta avaliação em protótipo, ocorre a otimização da especificação dos componentes.

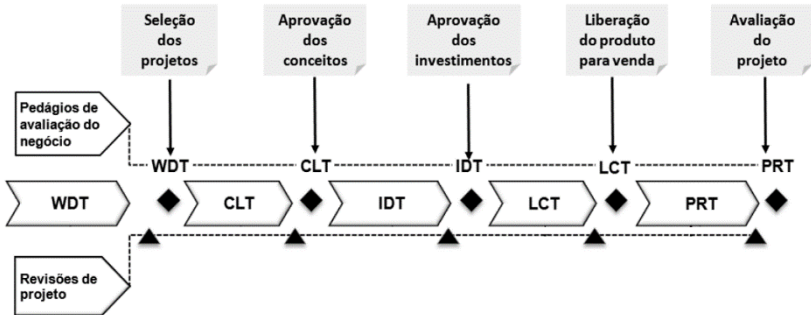
Subsequentemente, a documentação do produto é determinada, contemplando itens como a estrutura do produto, as especificações técnicas, o manual de instruções, e o catálogo de peças. Da mesma forma, define-se o plano de manufatura para as fases seguintes. Por fim, tem-se a aprovação da fase, com base na aprovação da solicitação de investimentos, análises econômica e financeira e atualização do plano de projeto. Desta forma, é possível iniciar as tarefas referentes à macrofase Implementação do lote inicial.

4.3. MODELO C2C

De acordo com o procedimento gerencial adotado na empresa alvo, o modelo C2C (*customer to customer*, em inglês) é um processo de desenvolvimento de produtos composto pelas fases WDT (*winning definition tollgate*, em inglês), CLT (*concept lockdown tollgate*, em inglês),

IDT (*investment decision tollgate*, em inglês), LCT (*launch contract tollgate*, em inglês), e PRT (*project release tollgate*, em inglês), conforme representação da Figura 4.2.

Figura 4.2 - Modelo C2C para desenvolvimento de produtos e processos.



Fonte: Pedroso (2013)

Similarmente ao modelo PRODIP, a representação das fases do modelo C2C se dá no formato de um fluxo sequencial. Todavia, para ambos os modelos, a execução de suas fases e atividades pode ocorrer de maneira simultânea ao longo do processo de projeto. No modelo C2C, todas as fases são submetidas à avaliação e aprovação em eventos chamados *gates*, com base nos resultados obtidos ao longo de seu desenvolvimento. Do ponto de vista técnico, estas avaliações se dão a partir da verificação dos resultados provenientes de modelos analíticos, simulações computacionais, testes em protótipos, e do plano de ações corretivas.

Winning Definition Tollgate - WDT

O principal objetivo da fase WDT é obter a aprovação do pré-contrato do projeto, o qual deve considerar a avaliação das vantagens competitivas que o projeto pode trazer ao negócio, a declaração dos requisitos dos usuários e de normas regulamentadoras e, por fim, as avaliações econômica e financeira. Todas as revisões do pré-contrato do projeto devem ser controladas ao longo das fases seguintes no processo de projeto.

Concept Lockdown Tollgate - CLT

Na fase CLT, devem-se desenvolver atividades visando a aprovação do conceito selecionado para se garantir o atendimento dos requisitos de produto estabelecidos. Dentre os requisitos de produto a serem avaliados, pode-se citar confiabilidade, segurança, custo, manufaturabilidade, entre outros. Adicionalmente, são identificados os processos de fabricação e fornecedores potenciais.

Investment Decision Tollgate - IDT

A partir da aprovação da concepção selecionada na fase CLT, podem-se iniciar as atividades inerentes à fase IDT. Esta fase tem o propósito de concluir a especificação técnica do produto e verificar o atendimento dos requisitos dos usuários, levando-se em consideração a gama de variações das especificações dos componentes, tais como: tolerâncias dimensionais, composição química e microestrutura dos materiais, entre outros. Adicionalmente, são definidos os processos de fabricação e fornecedores de componentes.

Subsequentemente, é realizada a revisão da viabilidade econômica e financeira do projeto, bem como a solicitação e aprovação de investimento, e o estabelecimento de contrato com os fornecedores.

Launch Contract Tollgate - LCT

A fase LCT destina-se à instalação e certificação dos equipamentos e processos de fabricação, bem como de fornecedores de componentes. Nesta fase, ocorre a implementação do lote piloto na fábrica, o qual é submetido à avaliação e aprovação com relação ao cumprimento dos requisitos estabelecidos, como aspectos de manufaturabilidade, confiabilidade, segurança, entre outros. Mediante a aprovação do lote piloto e da revisão da viabilidade técnica e econômica, tem-se a aprovação da fase LCT e, finalmente, a liberação do produto para venda.

Project Release Tollgate - PRT

Nesta última fase do modelo C2C, o objetivo é obter a confirmação do atendimento dos requisitos de projeto, sendo que o plano de ação para mitigação e eliminação dos riscos identificados ao longo das fases anteriores, nos processos de desenvolvimento do produto, fabricação e obtenção de componentes de fornecedores, deve ser concluído. Por fim, realiza-

se a elaboração, revisão e documentação das lições aprendidas ao longo do processo de desenvolvimento do projeto.

4.4. PROJETO PARA CONFIABILIDADE - DfR

O processo denominado Projeto para confiabilidade (DfR) descreve uma sistemática para desenvolvimento de várias ferramentas e práticas que uma organização necessita para incluir o atributo confiabilidade ao longo do processo de projeto de seus produtos, por exemplo, ferramentas abordadas previamente como FMEA e testes acelerados. O processo DfR tem por objetivo minimizar a possibilidade de falhas e permitir que deficiências de projeto sejam detectadas e corrigidas o mais cedo possível no processo de projeto.

A confiabilidade de um produto é fortemente influenciada por decisões tomadas durante o processo de projeto. Deficiências de projeto afetam todos os itens produzidos e são progressivamente mais caros de se corrigir conforme o progresso do desenvolvimento. O custo associado a erros e alterações de projeto aumenta drasticamente ao longo do ciclo de desenvolvimento do produto, podendo ser tão alto quanto um incremento de 10 vezes no custo de uma fase para outra, conforme representado na Figura 1.1.

Para Back et al. (2008), o DfR é um processo de otimização integrada, o qual considera simultaneamente em todas as fases do desenvolvimento os fatores que tornam o produto melhor em relação a determinado atributo ao longo de seu ciclo de vida. Processos para otimização integrada ao processo de desenvolvimento de produtos têm por objetivo buscar soluções adequadas a atributos tais como: fabricabilidade, montabilidade, manutenibilidade, apoio logístico, segurança, meio ambiente, confiabilidade, entre outros atributos. Existem diversos trabalhos visando estabelecer o delineamento do processo DfR, podendo-se citar Crowe (2001), Ebeling (2005), Silverman (2010) e O'Connor (2012).

Os testes acelerados podem ser classificados como métodos de teste, os quais possuem diferentes tipos – descritos no Capítulo 3, podendo variar de acordo com o objetivo e com o estágio do desenvolvimento do projeto do produto. Assim como para a correta aplicação de outros métodos e ferramentas no processo de desenvolvimento do produto, é fundamental sistematizar a aplicação dos testes acelerados ao longo das fases deste processo. Diversos autores apresentam maneiras de sequenciamento dos diferentes tipos de testes acelerados ao longo do processo de projeto, podendo-se citar Fortuna (2009), O'Connor (2012) e Otto et al. (2013).

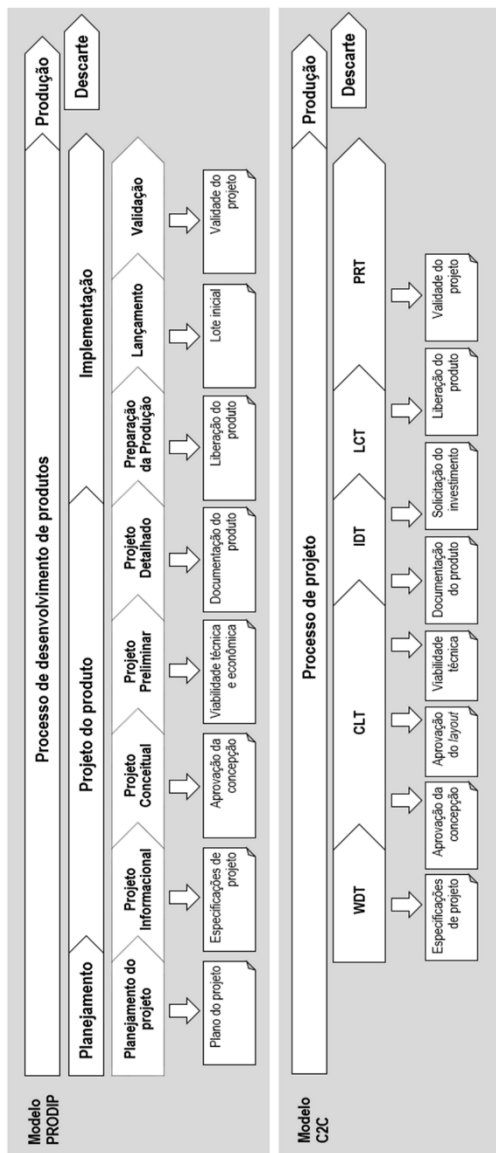
4.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o delineamento da metodologia de projeto proposta, e apresentada no Capítulo 5, considerou-se o modelo PRODIP como referência, sendo que a validação se dará através da aplicação de um estudo de caso na empresa-alvo, a qual emprega o modelo C2C no desenvolvimento de seus produtos. Assim sendo, a Figura 4.3 apresenta esquematicamente a correspondência entre as fases do modelo PRODIP e as fases do modelo C2C, as quais foram descritas anteriormente neste Capítulo. Para o estabelecimento desta relação, considerou-se a paridade entre as principais atividades e saídas de cada fase de ambos os modelos.

No capítulo seguinte, será apresentada a metodologia proposta neste trabalho, a qual sistematiza métodos, atividades e ferramentas com base na experiência do autor e em modelos de desenvolvimento de produtos existentes e atuais – apresentados ao longo deste capítulo, os quais abordam o tratamento da confiabilidade e a aplicação de testes acelerados no processo de projeto.

Na Figura 4.4, apresenta-se esquematicamente as fases dos principais modelos utilizados como base para o delineamento da metodologia apresentada no Capítulo 5, bem como as principais atividades e ferramentas aplicadas em cada fase. Os modelos considerados nesta análise são PRODIP de Back et al. (2008), C2C (2007), PRODIP com ênfase em confiabilidade de Back (1992), *Design for Reliability* (DfR) de Crowe (2001), *Design for Reliability* de Ebeling (2005) e *Design for Reliability* de O'Connor (2012). Similarmente à representação da Figura 4.3, a representação da Figura 4.4 foi elaborada considerando-se a correspondência entre fases de acordo com a similaridade entre as principais atividades e saídas de cada fase dos modelos descritos.

Figura 4.3 - Correlação entre fases dos modelos PRODIP e C2C, evidenciando-se as principais saídas de cada fase.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.4 - Correlação entre fases dos modelos PRODIP, C2C e os modelos de projeto para confiabilidade considerados na elaboração deste trabalho, considerando-se as principais saídas de cada fase, bem como as principais atividades em relação à confiabilidade.

<p>PRODIP (Back et al, 2008)</p> <p>Projeto do produto</p> <p>Projeto informacional</p> <ul style="list-style-type: none"> Definição dos requisitos do cliente. <p>Projeto conceitual</p> <ul style="list-style-type: none"> Seleção do conceito. <p>Projeto preliminar</p> <ul style="list-style-type: none"> Aperfeiçoamento do conceito. <p>Projeto detalhado</p> <ul style="list-style-type: none"> Aprovação do protótipo; Solicitação do investimento. <p>Preparação da produção</p> <ul style="list-style-type: none"> Construção do ferramental; Liberação do produto. <p>Lançamento</p> <ul style="list-style-type: none"> Liberação do lote inicial; Lançamento do produto no mercado. <p>Validação</p> <ul style="list-style-type: none"> Auditoria e validação do produto. 	<p>Modelo C2C</p> <p>WDT</p> <ul style="list-style-type: none"> Definição dos requisitos do cliente; Seleção do conceito. <p>CLT</p> <ul style="list-style-type: none"> Aperfeiçoamento do conceito. <p>IDT</p> <ul style="list-style-type: none"> Aprovação do protótipo; Solicitação do investimento. <p>LCT</p> <ul style="list-style-type: none"> Construção do ferramental; Liberação do produto; Lançamento do lote inicial; Lançamento do produto no mercado. <p>PRT</p> <ul style="list-style-type: none"> Auditoria e validação do produto. 	<p>PRODIP foco em confiabilidade (Back, 1992)</p> <p>Projeto informacional</p> <ul style="list-style-type: none"> Definição dos requisitos do cliente. <p>Projeto conceitual</p> <ul style="list-style-type: none"> Definição das funções e concepções para atender confiabilidade. <p>Projeto preliminar</p> <ul style="list-style-type: none"> Seleção dos sistemas; Alocação da confiabilidade; Previsão da confiabilidade; Prevenção de falhas; FMEA, DOE, etc. <p>Projeto detalhado</p> <ul style="list-style-type: none"> Execução de ensaios acelerados; Análise dos mecanismos de falha; Prevenção de falhas; Predição da confiabilidade. 	<p>Modelo DFR (Crowe, 2001)</p> <p>Idéia</p> <ul style="list-style-type: none"> Definição dos requisitos dos clientes; Seleção do conceito. <p>Avaliação</p> <ul style="list-style-type: none"> Execução de HALT/TAAP para identificar falhas no conceito. <p>Desenvolvimento</p> <ul style="list-style-type: none"> Aprovação da confiabilidade do conceito do produto. <p>Transição</p> <ul style="list-style-type: none"> Definição do teste screening apropriado. <p>Produção</p>	<p>Modelo DFR (Ebeling, 2005)</p> <p>Projeto conceitual preliminar</p> <ul style="list-style-type: none"> Especificação da confiabilidade; Alocação da confiabilidade; Métodos de projeto. <p>Projeto detalhado, desenvolvimento e protótipo</p> <ul style="list-style-type: none"> Métodos de projeto; Análises de falha via FMEA; Testes de confiabilidade HALT/ ALT; Análises de segurança via FTA. <p>Produção e manufatura</p> <ul style="list-style-type: none"> Testes de aceitação; Controle da qualidade; Testes de lançamento e manufatura. 	<p>Modelo DFR (O'Connor, 2012)</p> <p>Identificar</p> <ul style="list-style-type: none"> Benchmarking; Seleção dos aplicativos de operação; Função de desdobramento da qualidade (QFD). <p>Projetar</p> <ul style="list-style-type: none"> Atividades CAE (Computer Aided Engineering, em inglês); Análise de interferência e solicitação; HAZOPS (Hazard Study/Análise); DRBFM (Design Review Based on Failure Modes, em inglês). <p>Analisar</p> <ul style="list-style-type: none"> Análise de dados empíricos; Análise de dados de garantia. <p>Verificar</p> <ul style="list-style-type: none"> Testes acelerados do tipo HALT. <p>Validar</p> <ul style="list-style-type: none"> Testes acelerados do tipo ALT. <p>Controlar</p> <ul style="list-style-type: none"> Testes acelerados do tipo ESS e HASS.
---	--	--	--	---	---

Fonte: Elaborado pelo autor

5. DELINEAMENTO DA METODOLOGIA

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será apresentado o delineamento da metodologia de projeto para melhoria da confiabilidade de compressores herméticos alternativos para refrigeração, estruturada a partir das ferramentas, procedimentos e orientações apresentados em capítulos anteriores deste trabalho, com ênfase no planejamento, execução e análise de dados provenientes de testes acelerados.

Conforme mencionado anteriormente, os custos associados às alterações de projeto de produto crescem drasticamente conforme a fase do processo de desenvolvimento. Portanto, é essencial que uma metodologia de projeto seja empregada de modo a minimizar a probabilidade de retrabalho e mitigar erros de projeto e falhas no produto que está sendo projetado o mais cedo possível no processo de desenvolvimento do produto.

Entende-se que a confiabilidade final de um produto é influenciada pelas decisões tomadas ao longo do processo de projeto e, portanto, a identificação, o tratamento e o controle de parâmetros que podem afetar a confiabilidade devem se estender ao longo do ciclo de vida do produto, desde o planejamento até o descarte.

Desta forma, este capítulo apresentará os procedimentos e ferramentas para identificação, tratamento e controle dos potenciais riscos à confiabilidade do produto, de maneira a considerar a confiabilidade do produto ao longo de seu processo de projeto, de acordo com o que foi definido no planejamento do produto. Propõe-se apresentar o delineamento da metodologia de projeto para confiabilidade baseada em testes acelerados.

5.2. INTEGRAÇÃO ENTRE PROJETO PARA CONFIABILIDADE E TESTES ACELERADOS

O delineamento teve por base a experiência do autor, as referências, a legislação vigente, normas técnicas nacionais e internacionais, normas regulamentadoras e determinações relativas à confiabilidade de compressores herméticos alternativos para refrigeração.

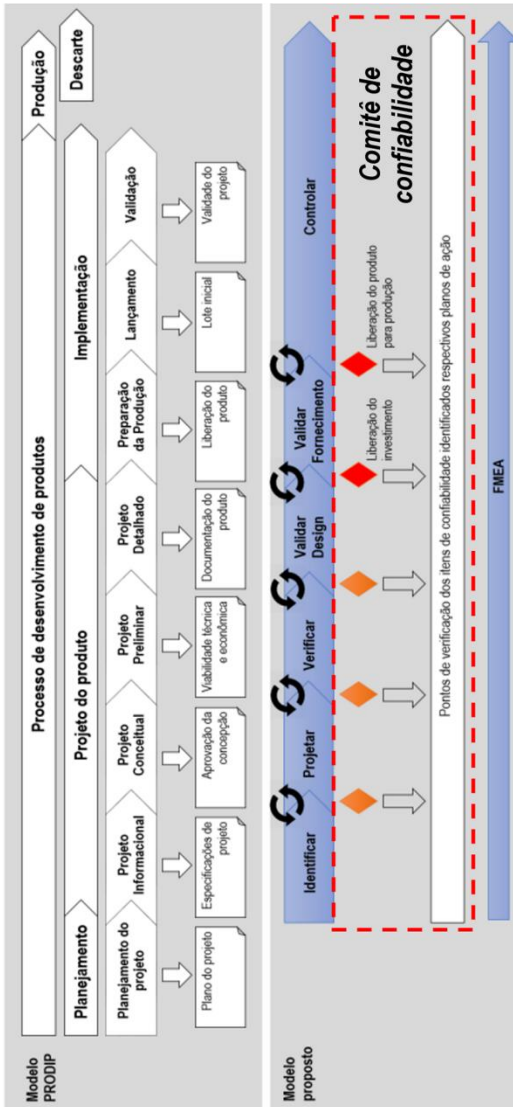
Além disso, a metodologia considera a integração das ferramentas e atividades descritas em modelos de desenvolvimento de produtos como modelo C2C (2007), modelo PRODIP (Back et al. 2008), engenharia si-

multânea, etc.), em métodos de projeto ótimo de produtos (*Design for Reliability*, *Design for Six Sigma*, etc.), e em técnicas para planejamento, execução e análise de dados oriundos de testes acelerados.

A Figura 5.1 representa a metodologia proposta neste trabalho para o tratamento do atributo da confiabilidade, constituída por seis etapas e integrada ao modelo PRODIP de Back et al. (2008), já que a confiabilidade é dos atributos do produto. Mantêm-se as três macro-fases redistribuídas em seis fases e os respectivos pontos de verificação. Em todo o ciclo de vida do desenvolvimento do projeto para confiabilidade, ações são desenvolvidas a partir da ferramenta FMEA para análise do projeto.

Observa-se ainda que esta proposição foi desenvolvida considerando que o projeto de produtos ocorre de forma simultânea. Ou seja, embora as macro-fases e fases da Figura 5.1 estejam apresentadas de forma sequencial, as ações de projeto acontecem de maneira simultânea, integradas e com progressos e retornos constantes.

Figura 5.1 - Representação gráfica da metodologia de projeto para o atributo confiabilidade, integrada ao modelo PRODIP de Back et al. (2008).



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a representação exposta na Figura 5.1, as etapas da metodologia são representações de ações que devem ser desenvolvidas na ação de projeto ou reprojeto de produto, a partir da necessidade de considerar os requisitos do cliente quanto ao atributo de confiabilidade no produto. As próximas seções deste capítulo descrevem cada uma destas etapas, em termos de atividades e interações necessárias para respectiva execução mais adequada possível.

- **Etapa Identificar**: Caracterizar o sistema técnico a ser abordado, estabelecer os requisitos de projeto, a partir dos requisitos do cliente, em relação à confiabilidade do produto, nos subsistemas e componentes, e caracterizar as condições de operação do produto.
- **Etapa Projetar**: Desenvolver soluções de projeto para atender os requisitos de confiabilidade nas condições de operação identificadas.
- **Etapa Verificar**: Examinar a efetividade das soluções de projeto desenvolvidas no atendimento aos requisitos de confiabilidade a partir de resultados de testes em protótipos funcionais.
- **Etapa Validar (design)**: Assegurar que os requisitos de confiabilidade do produto sejam atendidos, com o objetivo de aprovar o projeto de produto. Esta validação decorre da análise de resultados de testes em protótipos que possuem a especificação final do produto.
- **Etapa Validar (fornecimento)**: Validar o atendimento aos requisitos dos clientes e do projeto em relação ao atributo de confiabilidade, considerando as características dos respectivos processos produtivos, com o objetivo de aprovar o projeto para produção. Esta validação decorre da análise de resultados de testes em lotes piloto ou em lotes de produção.
- **Etapa Controlar**: Manter as características do produto que afetam a confiabilidade sob controle ao longo do ciclo produtivo, através do monitoramento dos processos de fabricação.

Bellini (2008) estabelece que a eficácia de uma metodologia de projeto para tratar o atributo segurança depende do fluxo de informações que ocorre entre suas etapas e, neste sentido, propõe o uso da FMEA para integrar o conhecimento gerado ao longo do processo de projeto e organizá-lo para aplicação adequada entre suas etapas. Conforme descrito na Seção 2.8, a FMEA auxilia também no estabelecimento dos requisitos de projeto relacionados ao atributo da confiabilidade, na identificação dos

potenciais modos de falha, e na definição de ações para seleção de alternativas de projeto. Tomando Bellini (2008) por referência, também se propõe neste trabalho o emprego da FMEA como ferramenta de integração das atividades para tratamento do atributo confiabilidade ao longo de todas as etapas apresentadas na Figura 5.1.

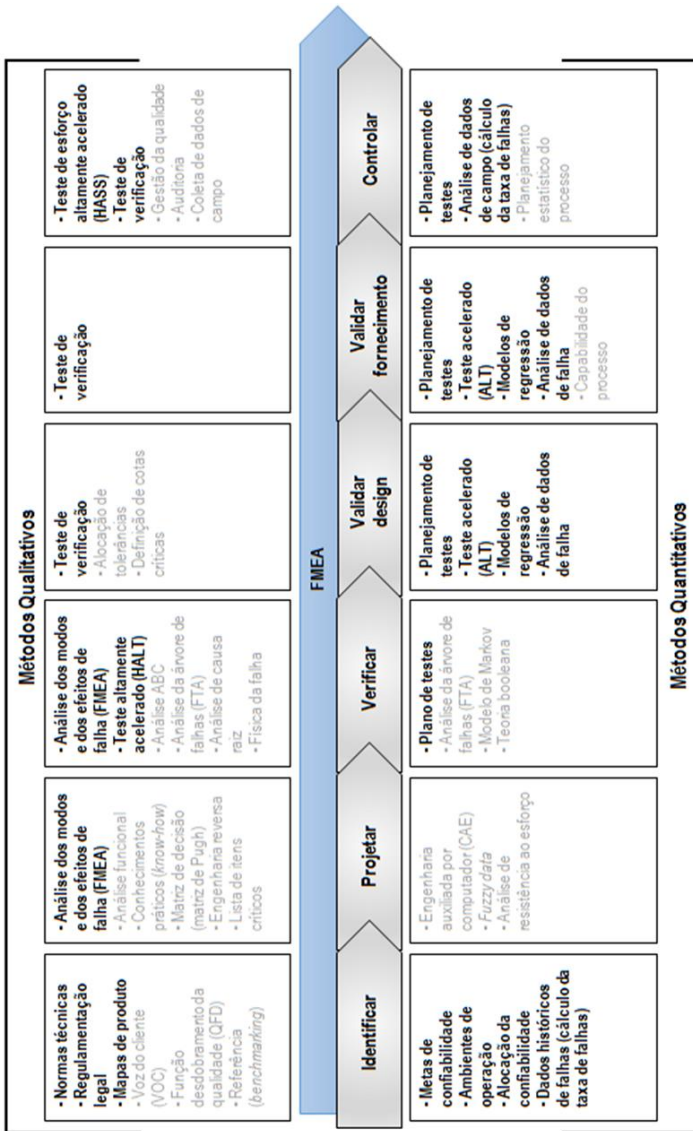
As etapas identificar, projetar, verificar, validar *design*, validar fornecimento e controlar ocorrem de maneira continuada e se desdobram ao longo do processo de desenvolvimento de produto. Ireson et al (1995) cita que as atividades de projeto relacionadas à confiabilidade devem ser aplicadas também durante as fases de desenvolvimento dos processos de manufatura, visando identificar e endereçar problemas causados por estes processos. Assim sendo, esta metodologia sugere que as atividades de projeto relacionadas à confiabilidade se ampliem até as fases de produção e descarte.

Conforme apresentado nos capítulos de revisão, existe uma vasta literatura disponível para os métodos, quantitativos e qualitativos, para auxiliar o tratamento do atributo da confiabilidade ao longo do processo de projeto de produto, bem como testes acelerados. A Figura 5.2 representa esquematicamente a maneira com a qual estes métodos são dispostos ao longo das etapas da metodologia de projeto para confiabilidade, com destaque aos métodos que serão abordados na proposta de metodologia desta dissertação. Novamente, mostra-se que a ferramenta FMEA será explorada de maneira continuada ao longo de todas as etapas da metodologia proposta.

5.2.1. Uso da FMEA na integração de atividades para tratamento da confiabilidade

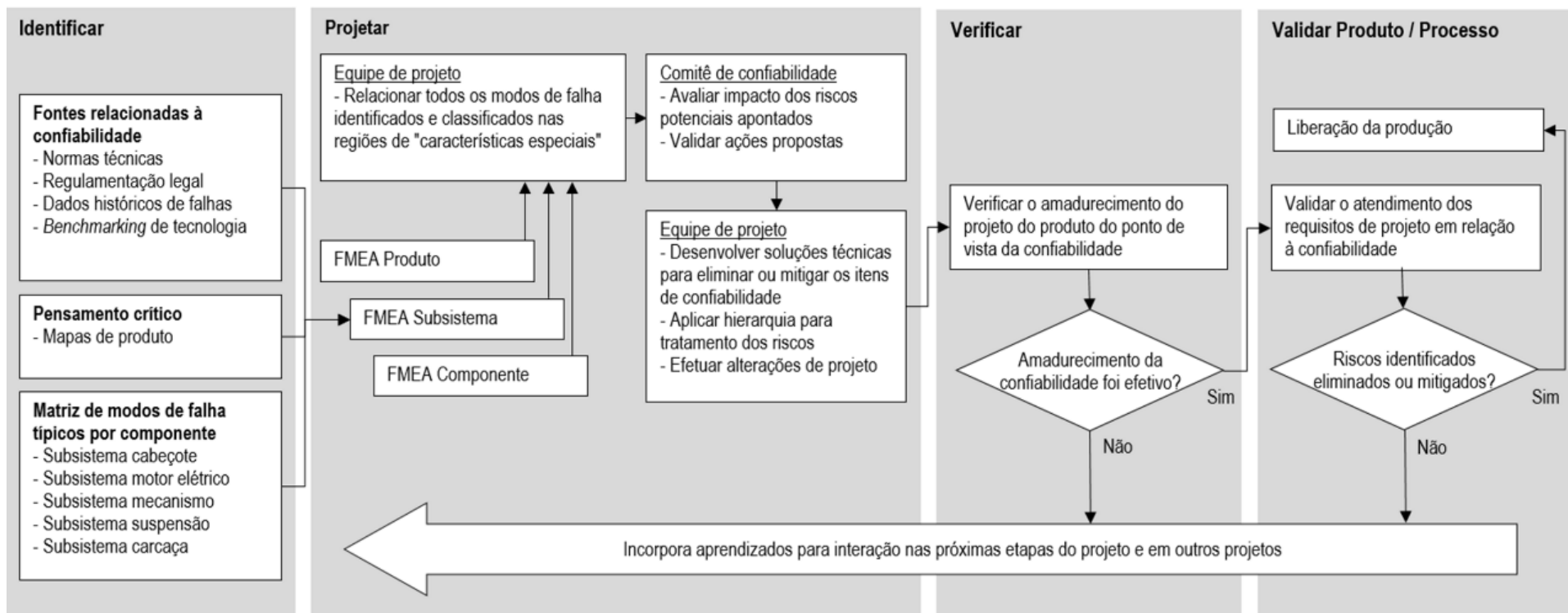
A utilização da FMEA provê à equipe de projeto um processo formal para a coleta de informações sobre as necessidades do cliente, enquanto classifica a importância de cada requisito de projeto. De acordo com a proposta de Bellini (2008), a aplicação da FMEA pode ser estendida ao longo de todas as etapas do processo de projeto, permitindo que todos os modos de falha sejam relacionados, estimulando o raciocínio crítico para definição de soluções, e auxiliando na verificação da efetividade das ações implementadas. Neste contexto, propõe-se um modelo para uso da FMEA como ferramenta de integração das diversas atividades com foco na confiabilidade do produto ao longo do processo de projeto, conforme representado na Figura 5.3.

Figura 5.2 - Ferramentas e fontes de informação para auxílio ao projeto para confiabilidade e testes acelerados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

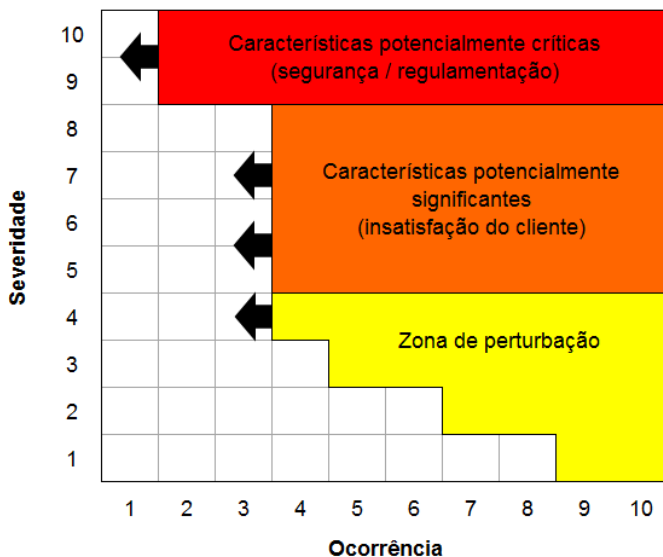
Figura 5.3 - Integração das atividades para tratamento da confiabilidade através da FMEA.



Fonte: Adaptado de Romano (2003) e Bellini (2008)

Para classificar os tipos de modos de falha identificados na FMEA, propõe-se neste trabalho o uso da matriz de características especiais, conforme apresentada na Figura 5.4. O posicionamento de cada modo de falha, em relação à sua probabilidade de ocorrência e severidade do efeito ao usuário final, determinará a sua prioridade para tratamento ao longo do projeto. Adicionalmente, propõe-se a atualização deste posicionamento ao longo do processo de projeto conforme o tratamento dos modos de falha, com base, por exemplo, na análise de dados provenientes de testes acelerados. Desta forma, o posicionamento dos modos de falha na matriz de características especiais será movido no sentido de minimizar o impacto ao usuário final.

Figura 5.4 - Matriz de características especiais.



Fonte: Adaptado de Whirlpool S/A - Manual do FMEA Embraco (2013)

O Quadro C.1 e o Quadro C.2, apresentados no ANEXO C, apresentam, respectivamente, propostas de pontuação aos índices de severidade e de probabilidade de ocorrência, as quais foram adaptadas do documento Manual do FMEA Embraco (2013).

O controle das características que afetam a confiabilidade do produto depende, tipicamente, do controle de parâmetros de processo e especificações de materiais e componentes dentro dos limites de projeto. Para potencializar a análise dos itens em relação à confiabilidade, baseado em Bellini (2008) propõe-se a inserção de uma coluna adicional para o apontamento das cotas críticas no formulário FMEA da Figura 2.2, conforme representado na Figura 5.5.


Ao longo da execução da FMEA, devem ser identificadas nessa coluna todas as cotas de produto, especificações de materiais, sistemas e subsistemas, parâmetros de processo e outras especificações cujo não atendimento possa degradar a confiabilidade requerida ao produto.

A partir da identificação da cota crítica do produto no formulário FMEA, deve ser iniciado um processo para tratamento e controle do item de confiabilidade ao longo do processo de projeto. O tratamento da cota crítica deve ser demonstrado no formulário FMEA por meio da descrição de ações de projeto que visam reduzir ou eliminar falhas, verificar e validar as soluções do projeto para confiabilidade. Similarmente, deve-se demonstrar na FMEA ações para garantir o controle adequado da cota crítica ao longo das fases de produção e descarte.

O monitoramento da eficácia destas ações para tratamento e controle dos itens de confiabilidade é tipicamente feito por meio da análise dos dados de falha, os quais podem ser provenientes de normas técnicas, regulamentação legal, dados históricos e de campo, projeto de experimentos (DoE), ou ensaios acelerados. No contexto da proposta desta dissertação, será dado enfoque ao tratamento dos itens de confiabilidade cujo monitoramento possa ser realizado através da análise de dados provenientes de ensaios acelerados. Neste sentido, propõe-se a inclusão de uma segunda coluna adicional na FMEA para a indicação da aplicabilidade do teste acelerado, conforme representado na Figura 5.5.

Figura 5.5 - Identificação das cotas críticas de controle e aplicabilidade do teste acelerado.

Componente/ Sistema	Função	Potencial Modo de Falha	Potencial Efeito da Falha	Severidade	Potencial Causa da Falha	Ocorrência	Cota Crítica	Atual Controle de Projeto	Deteção	RPN	Ações Recomendadas	Teste Acelerado é Aplicável?	Responsável	Ações tomadas	Severidade	Ocorrência	Deteção	RPN



Fonte: Adaptado de Bellini (2008)

5.2.2. Comitê para avaliação da confiabilidade do produto

O uso adequado das ferramentas e técnicas para a identificação de problemas associados à confiabilidade de produtos ocorre, em geral, de maneira eficaz ao longo das etapas do projeto. Entretanto, possíveis pressões relativas ao atendimento do cronograma e custo podem induzir as equipes de projeto a adotarem soluções não adequadas para a mitigação ou eliminação do problema de confiabilidade identificado. Portanto, propõe-se neste trabalho a formação de um comitê composto por representantes das diversas especialidades da área de engenharia de desenvolvimento de produtos, para avaliar os riscos relacionados à confiabilidade de produtos em desenvolvimento. Para que este comitê seja imune às pressões exercidas sobre a equipe do projeto, estes profissionais não devem ser parte integrante da equipe.

De acordo com a Figura 5.1, o comitê de confiabilidade avalia todos os modos de falha listados na FMEA e classificados como relevantes, de acordo com a matriz de características especiais apresentada na Figura 5.4, e valida as ações e planos de ações para eliminação ou mitigação dos problemas de confiabilidade identificados. A Figura 5.1 apresenta a proposta desta dissertação para os momentos de atuação do comitê de confiabilidade ao longo do processo de desenvolvimento do produto.

O comitê de confiabilidade deverá ter responsabilidade pela aprovação ou reprovação da continuidade do projeto ao final de cada etapa do

desenvolvimento do projeto, no que diz respeito aos aspectos relacionados à confiabilidade do produto. Além da responsabilidade pela aprovação ou reprovação das etapas do processo de projeto, o comitê de confiabilidade deve ser responsável também por orientar a equipe do projeto ao longo do desenvolvimento quanto a maneira mais adequada para tratar os problemas de confiabilidade identificados e comunicados.

Assim sendo, o comitê (a) avaliará os problemas relacionados à confiabilidade comunicados pela equipe do projeto, (b) validará as soluções implementadas e (c) influenciará o tratamento dos problemas de confiabilidade ainda não solucionados.

Independentemente do grau de complexidade do projeto, existem no mínimo dois momentos nos quais a intervenção do comitê é indispensável devido a sua relevância frente ao impacto da decisão pela aprovação ou reprovação da continuidade do projeto. O primeiro momento é ao final da etapa validar *design*, uma vez que a aprovação desta é diretamente relacionada à liberação do investimento necessário para a aquisição dos ativos e estabelecimento de contratos com terceiros para implementação do projeto. O segundo momento é ao final da etapa validar fornecimento, pois a sua aprovação implica na liberação da produção do produto desenvolvido, conforme apresentado na Figura 5.1.

O grau de complexidade do projeto do produto balizará a intensidade da atuação do comitê, na medida em que projetos de produtos inovadores demandarão mais intervenções do que projetos de produtos com caráter de melhoria incremental.

5.3. ETAPA IDENTIFICAR

Na metodologia de projeto para confiabilidade proposta neste trabalho, a etapa identificar compreende atividades relacionadas à identificação e caracterização do sistema técnico de referência para o desenvolvimento e ao estabelecimento dos requisitos de projeto em relação à confiabilidade. Para ser conduzida de forma clara e criteriosa, a etapa identificar compreende a identificação dos requisitos do usuário em relação à confiabilidade e o estabelecimento dos respectivos requisitos de projeto para desenvolvimento do processo de projeto. A configuração clara destes parâmetros poderá prover uma redução do tempo necessário para o tratamento dos pontos para melhoria confiabilidade.

De acordo com a definição estabelecida por Freitas (1997), o processo de melhoria de confiabilidade pode pertencer a duas categorias:

- 1) Com base nos requisitos do mercado, ou metas de confiabilidade;
- 2) A partir de problemas crônicos associados à confiabilidade.

De um modo geral, quando a abordagem de projeto é voltada ao atendimento dos requisitos do mercado, é de grande relevância a condução de atividades direcionadas ao estabelecimento das metas de confiabilidade requeridas pelo mercado. Em contrapartida, quando a abordagem de projeto é voltada para a resolução de um problema crônico de confiabilidade de um produto implantado, evidencia-se a necessidade de conduzir atividades com enfoque na identificação dos modos de falha.

5.3.1. Caracterização do sistema técnico

A primeira atividade no projeto para melhoria de confiabilidade de um produto é a caracterização do sistema técnico, compreendendo o detalhamento de aspectos físicos e funcionais do sistema, bem como a maneira como se dá o acoplamento físico e funcional de seus componentes.

Segundo O'Connor (2012), o processo de desenvolvimento de produtos possui uma natureza evolucionária; portanto, na maioria dos casos, um novo produto é um passo adiante do desenvolvimento do programa existente. Assim sendo, a Etapa Identificar é importante para entender o nível de alteração introduzido ao novo produto comparado ao anterior.

Para suportar o processo de projeto para melhoria da confiabilidade de compressores herméticos, propõe-se o emprego de mapas de produto. Segundo Bellini (2008), o uso de mapas de produto simplifica a descrição funcional de um produto e auxilia a ilustração das relações existentes entre os componentes e sistemas do sistema técnico em estudo, fornecendo ainda informações essenciais para incorporação em ferramentas, tais como FTA e FMEA.

Fazem parte da composição dos mapas de produto (1) a descrição dos componentes, subsistemas e sistema técnico em estudo; (2) as funções para as quais estes elementos desempenham; e (3) a forma como se dá o acoplamento entre estes elementos.

5.3.2. Identificação dos requisitos de projeto para confiabilidade

Freitas (1997) e Ebeling (2005) estabelecem que uma definição completa dos requisitos de projeto acerca do atributo confiabilidade ocorre quando se detém um claro entendimento sobre os cinco aspectos abaixo listados, de forma a permitir identificar com facilidade o problema que se deseja resolver.

1. A descrição das funções para as quais o produto é projetado;
2. Os possíveis modos de falha das funções do produto;

3. O período de tempo ou número de ciclos para o qual as funções globais do produto devem operar sem apresentar as falhas descritas;
4. A probabilidade de a falha ocorrer no período de tempo de funcionamento especificado;
5. As condições de operação, ou fatores ambientais, os quais serão posteriormente adotadas também como variáveis de estresse para os testes acelerados.

Na metodologia de projeto proposta neste trabalho, os dois primeiros aspectos acima listados devem ser desenvolvidos com o amparo de análise funcional (do ponto de vista da função ou do processo de funcionamento do sistema pelo uso de ferramentas como IDEF0 e FMEA), e de análise estrutural (do ponto de vista da mecânica dos sólidos, fadiga, mecânica da fratura, materiais, entre outros), conforme previamente descrito.

Santos (2001) menciona que a identificação dos potenciais modos de falha e de suas respectivas causas pode ser auxiliada pelo emprego de técnicas de análise e solução de problemas, tais como a estratificação (gráfico de Pareto), o histograma, e o diagrama de causa-e-efeito (diagrama de Ishikawa), análise dos dados históricos e de garantia, FTA e FMEA. A aplicação destas técnicas fornece informações para a descrição completa e objetiva do problema de confiabilidade, para a priorização adequada dos modos de falha e para a determinação das causas da falha.

Crowe (2001) define o terceiro e o quarto aspectos acima descritos como meta de confiabilidade. Por exemplo, pode-se descrever a meta como 95% de confiabilidade para uma vida operacional de três anos. A maneira mais eficaz para obtenção de informações sobre as condições de operação do produto é através da comunicação direta com o usuário do produto.

A maioria dos sistemas técnicos, incluindo compressores herméticos para refrigeração, são submetidos a condições de operação distintas ao longo do seu período de uso. Assim sendo, uma definição completa dos requisitos de confiabilidade deve considerar também os períodos de tempo (ou ciclos) nos quais o produto em desenvolvimento será submetido, para cada uma das condições de operação. Adicionalmente, O'Connor (2012) estabelece que os ambientes de teste precisam ser avaliados considerando-se a taxa de mudança de condições (por exemplo, uma alta taxa de mudança de temperatura pode causar fratura ou fadiga), condições latentes (por exemplo, corrosão induzida por umidade causa mais problemas quando o equipamento está ocioso), e os efeitos de condições combinadas.

Para suportar o projeto para melhoria da confiabilidade, primeiramente é necessário identificar os requisitos de confiabilidade para o produto abordado, em nível de sistema. De posse dos requisitos do produto, deve-se desdobrá-los a seus subsistemas e, finalmente, a seus componentes únicos, para que suportem o atendimento aos requisitos do produto em nível de sistema.

De modo geral, o processo de desenvolvimento de produtos possui caráter evolucionário e, portanto, para simplificar o processo de identificação dos requisitos de confiabilidade, pode-se limitar o desdobramento aos subsistemas e componentes submetidos a alterações de projeto em relação ao produto anterior.

Existem diversas fontes de informação para o estabelecimento dos requisitos de projeto em relação à confiabilidade. Crowe (2001), Bellini (2008) e O'Connor (2012) descrevem uma série de atividades com esse fim, a saber:

- Normas técnicas e regulamentações legais referente ao mercado ao qual o produto se destina. Os requisitos advindos das normas e regulamentações devem ser desdobrados na FMEA como funções a serem atendidas pelo produto a ser desenvolvido.
- Dados históricos de falhas de projetos anteriores, e até mesmo do projeto em andamento, devem ser avaliados e utilizados como entrada para novos projetos. A ferramenta FMEA, incorporada à metodologia proposta neste trabalho pode auxiliar neste processo.
- *Benchmarking* de tecnologia, conforme apresentado no Capítulo 4, é um importante passo na definição dos requisitos do cliente, a fim de identificar os requisitos atuais do produto.
- Engenharia reversa, permitindo oportunidades de melhoria para preencher as lacunas competitivas e expandir a vantagem competitiva da empresa no mercado, através de ações corretivas em áreas onde as melhorias de projeto são necessárias.

A fim de consolidar as informações relativas à identificação dos requisitos de projeto de produto, propõe-se a transcrição das mesmas para as colunas referentes aos modos de falha no formulário FMEA do objeto de estudo.

Alocação da confiabilidade

Uma vez que as metas de confiabilidade foram definidas ao sistema técnico, a confiabilidade deve ser alocada aos subsistemas e aos componentes, a partir das metas estabelecidas pelos requisitos dos clientes e usuários, e pelos requisitos de projeto. Esta atividade ocorre de maneira complementar à identificação dos requisitos de confiabilidade.

Um referencial de confiabilidade deve ser indicado para cada item, na forma de um valor de confiabilidade ou na forma de taxas de falha e distribuição. A composição dos itens para cumprir a função, na forma de blocos da confiabilidade, é uma solução possível para se obter a confiabilidade de subsistemas e do sistema geral.

Para auxiliar na execução desta atividade, pode-se recorrer ao emprego de softwares para o modelamento e simulação de diagramas de blocos de confiabilidade, conforme explorado ao longo da Seção 2.9.

5.3.3. Verificação da etapa identificar

Ao término das atividades descritas na etapa identificar, a equipe do projeto deverá ser apta a responder os principais pontos relacionados à descrição dos requisitos de confiabilidade do produto em desenvolvimento. Esta verificação pode ser realizada pelo questionamento das seguintes indagações.

- Como se dão as condições de operação ao longo do uso?
- Quais são as metas de confiabilidade para o projeto do produto?
- Quais são os potenciais modos de falha?
- Quais são os componentes críticos para análise da confiabilidade do produto?
- Quais modos de falha podem ser avaliados mediante execução de testes acelerados?

O comitê de confiabilidade deverá atuar ao final da etapa identificar, conforme representado na Figura 5.1, avaliando os problemas de confiabilidade identificados e apontados no formulário FMEA.

5.4. ETAPA PROJETAR

Nesta etapa, atividades específicas para mitigação ou eliminação dos riscos associados aos potenciais modos de falha iniciam no projeto do

produto, com a seleção de componentes, elaboração de desenhos mecânicos, entre outros. Para Crowe (2001), a implementação destas atividades pode prover uma melhoria de confiabilidade de aproximadamente 65% em relação ao ponto inicial do projeto.

5.4.1. Tratamento dos riscos relacionados à confiabilidade

Neste trabalho, propõe-se o emprego da FMEA ao longo da etapa projetar com a finalidade de integrar as atividades e organizar as informações do projeto para o tratamento dos riscos relacionados à confiabilidade, bem como para a avaliação das soluções implementadas. A Seção 5.2.1 descreve a proposta de inserção da FMEA na etapa projetar. Para mitigação ou eliminação dos potenciais modos de falha e seus respectivos efeitos apontados na região de características especiais, propõe-se que os mesmos sejam classificados quanto à severidade e à probabilidade de ocorrência, conforme a matriz apresentada na Figura 5.4. As definições para cada nível das escalas de probabilidade de ocorrência e severidade desta matriz são mencionadas no Quadro C.1Quadro C.1 e no Quadro C.2Quadro C.2 do ANEXO C. Os itens que se encontram nas regiões de características potencialmente críticas, potencialmente significantes, ou na zona de perturbação em relação a confiabilidade deverão ser tratados nesta etapa pela equipe do projeto.

Para Bellini (2008), tão importante quanto identificar de forma eficiente os riscos inerentes a um novo produto, é definir ações para que estes riscos sejam eliminados, protegidos ou controlados de tal maneira que os requisitos dos usuários do produto sejam atendidos. Conforme mencionado na Seção 5.2.1, será dado enfoque ao tratamento dos itens de confiabilidade cuja melhoria da confiabilidade possa ser avaliada a partir da condução de testes acelerados.

Como a etapa projetar contempla atividades de alteração do projeto, a fim de tratar os itens de confiabilidade identificados pela equipe de projeto, é necessário avaliar se a alteração de projeto introduz novas falhas no ciclo de vida do produto. Para Freitas (1997), uma das ferramentas apropriadas para auxiliar na execução desta atividade é a FMEA e, portanto, propõe-se neste trabalho que a FMEA seja revisada após a alteração do projeto.

Ao final da etapa projetar, a concepção do produto deve ser aprovada. Deve-se estabelecer uma definição dos tipos de testes acelerados mais adequados para tratar os itens de confiabilidade que se deseja abordar ao longo das próximas fases. A Seção 3.3 fornece uma descrição acerca dos tipos de testes acelerados, qualitativos e quantitativos.

Conforme apresentado no Capítulo 3, em geral, a realização de ensaios acelerados atende a diversos propósitos, tais como: identificar falhas no projeto do produto; realizar comparações entre conceitos, fornecedores, condições de operação; identificar defeitos nos processos de manufatura; determinar falhas prematuras; entre outros.

Propõe-se a priorização do tratamento destes itens conforme seus respectivos índices de severidade e ocorrência apontados na ferramenta FMEA. O grau de inovação inerente ao produto em desenvolvimento também deve ser levado em consideração, uma vez que a disponibilidade de informações relativas à análise da confiabilidade ainda precisa ser levantada.

5.4.2. Verificação da etapa projetar

O comitê de confiabilidade deverá atuar no encerramento da Etapa Projetar, conforme representa a Figura 5.1, validando as soluções de confiabilidade implementadas no projeto do produto, bem como o plano de ação estabelecido pela equipe do projeto para resolução dos itens de confiabilidade que estão em aberto.

5.5. ETAPA VERIFICAR

Na etapa verificar, objetiva-se amadurecer o projeto do produto do ponto de vista da confiabilidade através da verificação da efetividade das ações corretivas implementadas para o tratamento dos modos de falha do produto. Esta verificação advém da análise de resultados de testes em protótipos funcionais que reproduzem as funções do conceito selecionado para o produto em desenvolvimento. Estes testes podem também ter por objetivo auxiliar na decisão entre diferentes possíveis soluções técnicas ou concepções desenvolvidas na etapa projetar.

Conforme apresentado na Figura 5.1, conjuntamente à aprovação desta etapa, tem-se a aprovação da viabilidade técnica quanto ao potencial do conceito selecionado para o atingimento dos requisitos de produto, estabelecidos na etapa identificar.

De acordo com Bellini (2008), as informações necessárias para se determinar a efetividade das ações corretivas implementadas podem advir de testes funcionais em componentes, sistemas e subsistemas, testes de protótipos, simulação de uso e aplicação de componentes e produto, testes estruturais, testes de certificação, e testes altamente acelerados de vida

(HALT). Atendendo a proposta deste trabalho, estas informações são obtidas nos resultados de testes acelerados aplicados na etapa verificar, os testes acelerados qualitativos.

5.5.1. Testes acelerados para verificação da confiabilidade do produto

Para Crowe (2001), o amadurecimento da confiabilidade pode ser viabilizado através da condução de testes de confiabilidade qualitativos, os quais podem revelar modos de falha e efeitos não percebidos durante as etapas de projeto anteriores. Neste caso, é necessário retomar as atividades iniciais do projeto do produto, a fim de mitigar ou eliminar as causas que potencializam estes modos de falha. Estes testes não são amostrados estatisticamente, mas têm o propósito de investigar potenciais falhas presentes em um conceito selecionado, identificando os limites funcionais e destrutivos de um produto o mais cedo possível no processo de desenvolvimento. O'Connor (2012) cita uma sequência de atividades para execução dos testes acelerados, descrita abaixo, e que será incorporada à proposta deste trabalho.

1. Listar os estresses de aplicação, ambientais e de processos que podem causar falhas.
2. Definir como o estresse que pode estimular as falhas previstas e não previstas pode ser aplicado no teste.
3. Aplicar um estresse único, no mesmo nível da especificação de projeto, e elevá-lo passo a passo até que a falha seja detectada.
4. Determinar a causa da falha e tomar ações para aumentar a resistência do projeto de modo que suporte níveis de estresse maiores. Esta ação pode ser uma melhoria contínua, ou uma medida temporária para permitir que os testes sejam continuados.
5. Continuar a elevar o estresse para revelar outras causas da falha (ou a mesma causa em estresses maiores), e tomar ações conforme acima.
6. Continuar até que todos os modos de falha para o estresse aplicado sejam revelados e, até que seja tecnologicamente e economicamente praticável, aumentar a resistência do projeto (limite de tecnologia, limite de estresse que pode ser aplicado, custo ou limite de peso). Repetir para outros estresses únicos.
7. Repetir o processo empregando estresses combinados, quando apropriado, e dentro das capacidades dos equipamentos disponíveis.

5.5.2. Verificação da etapa verificar

Ao final da etapa verificar, o comitê deverá avaliar se houve efetividade nas soluções de confiabilidade implementadas no projeto do produto, a partir dos dados oriundos dos testes acelerados. Similarmente às etapas anteriores, o comitê tem a responsabilidade de validar o plano de ação estabelecido pela equipe do projeto para resolução dos itens de confiabilidade que eventualmente possam estar em aberto.

5.6. ETAPA VALIDAR *DESIGN*

Nesta etapa, tem-se por objetivo a verificação do atendimento aos requisitos de projeto em relação à confiabilidade, por meio da análise de resultados de testes em protótipos finais, que reproduzam a especificação do produto mais próxima possível da especificação final. Conforme mostrado na Figura 5.1, nesta etapa do processo de projeto não foram adquiridos os meios de transformação ou estabelecidos contratos com fornecedores referentes aos componentes ou subsistemas em desenvolvimento. Portanto, protótipos a serem submetidos a testes nesta etapa podem ser advindos de meios produtivos não-definitivos.

Conforme apresentado na Figura 5.1, conjuntamente à aprovação desta etapa, tem-se a liberação do investimento necessário para desenvolvimento dos processos de manufatura, aquisição de maquinário e ferramentas, bem como o estabelecimento de contratos com terceiros. Portanto, o custo associado à alteração do projeto do produto a partir desta fase será elevado em relação às etapas anteriores.

Para atingir este objetivo, devem-se obter medidas de confiabilidade (taxas de falha, tempo médio até a falha) através da análise de resultados de testes acelerados quantitativos. Em alguns casos específicos, pode-se conduzir testes acelerados qualitativos do tipo verificação, estabelecidos através de normas técnicas, regulamentações governamentais ou internas, para aprovação desta etapa, conforme descrito na Seção 3.3.3.

5.6.1. Testes acelerados para validação da confiabilidade do produto

Os testes acelerados inerentes à etapa validar devem ser delineados a fim de estimular a ocorrência de modos de falha associados aos itens de confiabilidade identificados, classificados e tratados pela equipe de projeto nas etapas anteriores no processo de projeto. Estes testes acelerados

devem ser baseados em planos estatisticamente amostrados, a fim de assegurar significância estatística dos resultados para o nível de confiança desejado. O Capítulo 3 descreve ferramentas para planejamento e análise dos dados de testes acelerados quantitativos.

5.6.2. Verificação da etapa validar *design*

Ao final da etapa validar *design*, a atuação do comitê de confiabilidade é imprescindível, uma vez que o custo associado à alteração do projeto do produto a partir desta fase será elevado em relação às etapas anteriores, conforme representa a Figura 5.1.

Nesta etapa, o comitê tem a responsabilidade de validar o plano de ação estabelecido pela equipe do projeto para resolução dos itens de confiabilidade que eventualmente possam estar em aberto.

5.7. ETAPA VALIDAR FORNECIMENTO

Nesta etapa, objetiva-se estabelecer a validação do atendimento aos requisitos de projeto em relação à confiabilidade estabelecidos e tratados nas etapas anteriores, de modo a assegurar que o projeto está pronto para a liberação para produção. A validação das soluções de confiabilidade adotadas pela equipe de projeto advém da análise de resultados de testes em protótipos fabricados essencialmente a partir de meios produtivos definitivos. Similarmente à etapa validar *design*, nesta etapa deve-se obter medidas de confiabilidade através da análise de resultados de testes acelerados quantitativos.

A aprovação desta etapa culmina na liberação para produção, conforme representado pela Figura 5.1. Se houver a necessidade de mais alteração do projeto do produto a partir desta etapa, isto acarretará aumento de custos em relação às etapas anteriores. Poderá até implicar em danos à imagem da empresa fabricante perante os clientes e multas decorrentes da falha do produto em campo.

Novamente, a atuação do comitê de confiabilidade é mandatória ao final da etapa validar processo, uma vez que a aprovação implica na liberação para produção. O comitê deverá avaliar os resultados obtidos dos testes acelerados a fim de validar o atendimento dos requisitos de confiabilidade estabelecidos na etapa identificar. Ao término desta etapa, não devem existir pendências de projeto com relação aos itens de confiabilidade identificados e classificados para tratamento pela equipe do projeto.

5.8. ETAPA CONTROLAR

A etapa controlar tem início simultâneo à liberação do produto para produção, e estende-se ao longo do processo produtivo. Nesta etapa, o objetivo é manter sob controle as especificações determinadas no projeto como cotas, processos, composição química, as quais variações além do especificado em projeto podem acarretar em problemas de confiabilidade do produto para o usuário.

Conforme mencionado anteriormente, o apontamento dos itens a serem controlados deve ocorrer durante o desenvolvimento das etapas anteriores, sendo esses itens identificados na coluna “cota crítica” da FMEA, conforme apresentado na Figura 5.5

5.8.1. Testes acelerados para o monitoramento da confiabilidade do produto

Para se atingir o objetivo desta etapa no contexto de testes acelerados, devem-se planejar e analisar resultados de testes acelerados em amostragens representativas do meio produtivo definitivo. Tipicamente, estes testes são do tipo HASS ou verificação, conforme descrito no Capítulo 3.

5.9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme exposto ao longo do presente capítulo, cada etapa da metodologia proposta possui diferentes objetivos e saídas, sendo imprescindível o estabelecimento dos tipos mais adequados de teste acelerado em cada uma destas etapas, visando o cumprimento de tais objetivos. O Quadro 5.1 apresenta esta correlação.

A definição da equipe de trabalho é uma atividade de gerenciamento essencial para a condução adequada de qualquer metodologia de projeto para melhoria da confiabilidade. Os membros da equipe devem ser profissionais que suportam o processo no cotidiano, bem como as pessoas afetadas por este processo. Deve-se definir um membro desta equipe para atuar como facilitador, habilitado para desenvolver e liderar as técnicas da confiabilidade e de testes acelerados, conforme exploradas nos Capítulos 2 e 3, respectivamente.

Quadro 5.1 - Etapas da metodologia proposta e suas principais saídas e atributos de testes acelerados.

	Identificar	Projetar	Verificar	Validar Design	Validar Fornecimento	Controlar
Saídas de projeto	-	-	-	Aprovação da solicitação de investimento	Liberação do produto para produção	Liberação do lote inicial e Encerramento do projeto
Saídas de produto	Requisitos do projeto	Aprovação da concepção	Aprovação do layout final	Aprovação do protótipo	Aprovação do lote piloto	Aprovação do lote inicial e Monitoramento do desempenho do produto
Tipo de teste acelerado	-	-	HALT CALT	Verificação ALT	Verificação ALT	HASS Verificação
Especificação do produto	-	Protótipo	Protótipo	Final	Controlada	Controlada
Maturidade do protótipo	-	-	Protótipo funcional	Protótipo final	Lote piloto	Lote inicial e/ou produção

Fonte: Elaborado pelo autor.

6. ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, demonstra-se a aplicação da metodologia proposta no Capítulo 5 no projeto para melhoria da confiabilidade de um compressor hermético alternativo para refrigeração. Objetiva-se verificar a aplicabilidade da metodologia proposta neste estudo ao longo das etapas de projeto do produto. Serão aplicados os procedimentos e ferramentas apresentados visando a melhoria da confiabilidade de compressores herméticos.

6.1. ETAPA IDENTIFICAR

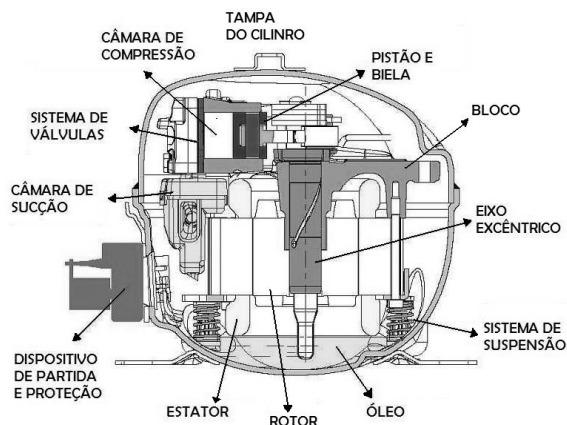
6.1.1. Caracterização do sistema técnico

O compressor alternativo é composto essencialmente de um pistão movimentando-se de forma alternada no interior de um cilindro, sendo que o pistão é acionado por um sistema simples de biela e manivela. O controle de entrada e saída da massa de gás refrigerante através dos orifícios de sucção e descarga é feito automaticamente pelas válvulas, as quais têm geometria, massa e rigidez projetadas para maximizar o desempenho do compressor.

Nos compressores herméticos, o motor elétrico é integrado ao mecanismo responsável pelo processo de compressão, e ambos são montados no interior da carcaça do compressor, de forma a ficar hermeticamente fechado. O fechamento hermético elimina o risco de vazamento do gás refrigerante ou contaminação, entretanto, elimina também a possibilidade de reparo do compressor. Quando alguma falha de um ou mais de seus componentes internos ocorre, um novo compressor precisa ser montado no sistema. Por isto, cada um dos itens necessários para a função precisa ter alta confiabilidade.

Em compressores herméticos alternativos, o gás refrigerante de sucção entra no compressor pelo passador de sucção e toma o espaço da cavidade, que é a região interna entre a carcaça e o conjunto de componentes acoplados ao motor. O gás refrigerante é então aspirado, entra na câmara de sucção, flui até o orifício de sucção e entra no cilindro, onde é comprimido e descarregado para o sistema de descarga. Por fim, o gás refrigerante segue para o passador de descarga do compressor. De maneira geral, os compressores herméticos produzidos atualmente em escala industrial têm denominações e disposição de seus componentes conforme representação esquemática da Figura 6.1.

Figura 6.1 - Elementos construtivos de um compressor hermético alternativo.



Fonte: Pedroso (2013).

Para suportar o processo de caracterização do compressor hermético alternativo para refrigeração, utilizou-se a ferramenta Mapa de Produto, a qual descreve os subsistemas e componentes que compõe o sistema técnico, suas principais funções e requisitos, e as relações existentes entre estes subsistemas e componentes.

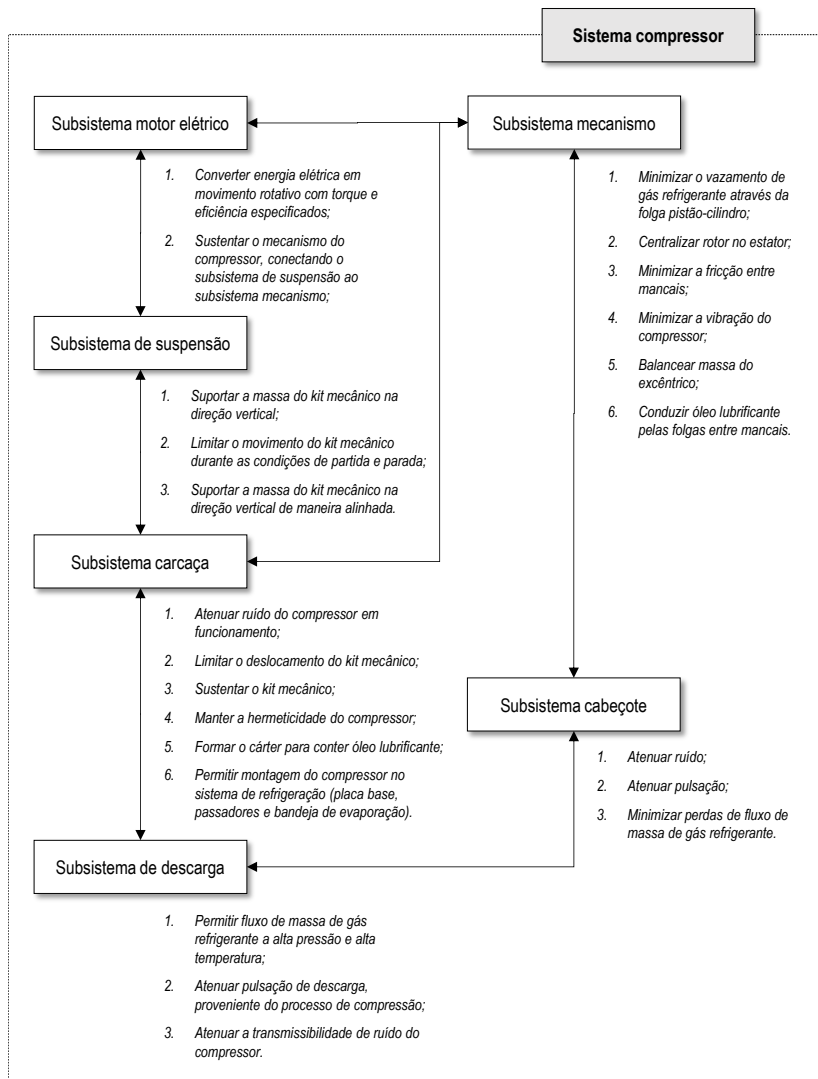
O procedimento para mapas de produto consiste em estabelecer as funções e requisitos do sistema técnico a ser estudado e, em seguida, desdobrá-las em funções e requisitos de seus subsistemas, que serão representados graficamente considerando suas relações. Similarmente, pode-se desdobrar os mapas de produto até o nível de componente individual, representando suas funções e requisitos, bem como a forma como se relaciona com demais componentes.

O sistema compressor tem duas funções principais, a saber: estabelecer uma diferença de pressão entre o evaporador e o condensador e proporcionar a vazão necessária para o fluxo de massa de refrigerante do sistema de refrigeração. O fluxo de gás refrigerante entra pelo sistema de sucção do compressor, é comprimido e sai pelo sistema de descarga.

O sistema técnico compressor hermético alternativo é composto pelos seguintes subsistemas: de partida, motor elétrico, mecanismo, cabeçote, de descarga, carcaça, inversor de potência e de suspensão. A Figura 6.2 apresenta o mapa de produto desenvolvido para os subsistemas de um

compressor hermético alternativo, no qual as setas representam a existência de algum tipo de relação entre tais subsistemas.

Figura 6.2 - Mapa de produto desenvolvido para os subsistemas do compressor hermético.



Fonte: Elaborado pelo autor.

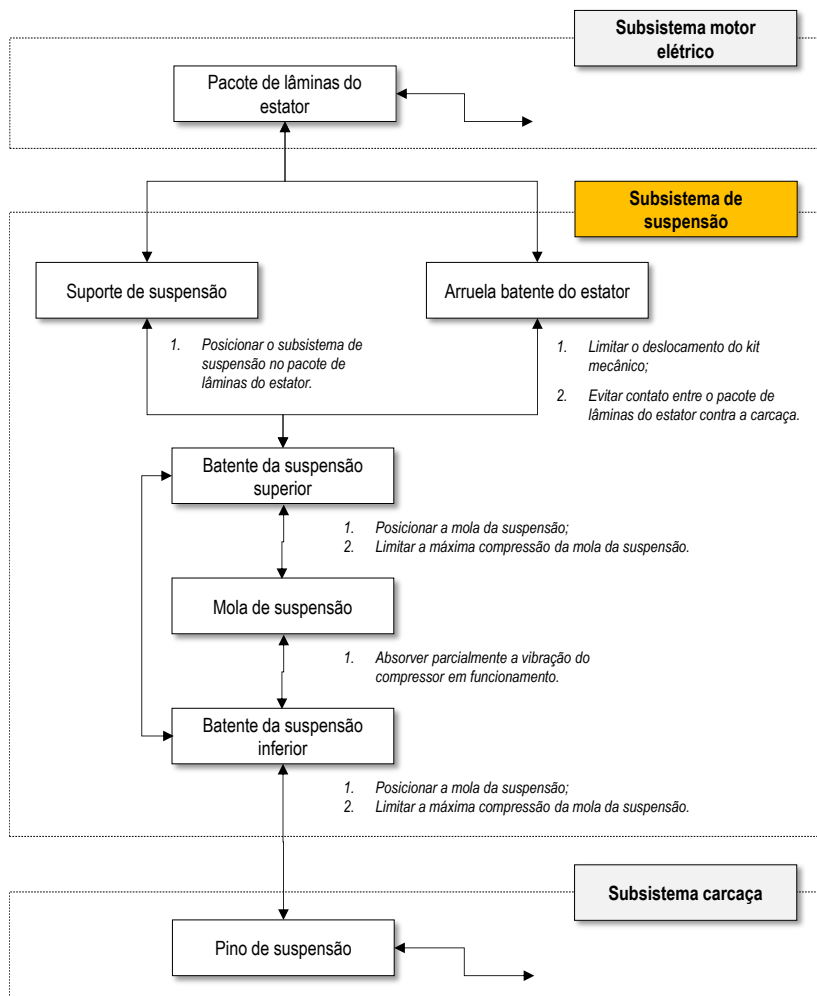
A complexidade dos componentes, subsistemas e sistemas que integram um compressor hermético alternativo para refrigeração levaria a uma quantidade de tarefas muito grande, demandando muito tempo para desenvolver a atividade. Dessa forma, para fim de validação da metodologia, os mapas de produto serão desenvolvidos com direcionamento ao subsistema de suspensão.

O subsistema de suspensão é constituído por batentes inferiores e superiores, suporte de suspensão e molas helicoidais, e tem a função principal de minimizar a transmissão do nível de vibração para a carcaça. A suspensão precisa ser projetada adequadamente para minimizar o efeito do desbalanceamento das forças e momentos do kit mecânico e reduzir o nível de vibração transmitido para a carcaça. A seguir, será apresentada a sistemática para apropriar o subsistema de suspensão às condições de confiabilidade requeridas para o ciclo de vida útil projetado.

Conforme descrito na Seção 5.3.1, os mapas de produto devem levar em consideração também a forma de acoplamento entre os componentes de interface do sistema ou subsistema em estudo. A Figura 6.3 apresenta o mapa de produto desenvolvido para o subsistema de suspensão, considerando também as interfaces com demais subsistemas.

As principais funções e requisitos apontados nos mapas de produto servem como base para preenchimento do formulário FMEA, de modo que os modos de falha serão determinados a partir do não atendimento da função ou do requisito, ou na falha em estabelecer adequadamente a relação com os demais componentes.

Figura 6.3 - Mapa de produto desenvolvido para o subsistema de suspensão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.1.2. Identificação dos requisitos de projeto para confiabilidade

Conforme descrito na Seção 5.3.2, para que se possam identificar adequadamente os requisitos para confiabilidade de determinado projeto,

primeiramente é necessário a apropriação de um entendimento inequívoco acerca das funções para as quais o produto em estudo está projetado, assim como os possíveis modos falhas destas funções.

Tipicamente, compressores herméticos alternativos são constituídos por subsistemas e componentes de concepções e funções bem estabelecidas e consolidadas. Obviamente, os requisitos funcionais podem variar de acordo com os requisitos do projeto do produto, tais como capacidade de refrigeração, eficiência energética, nível de ruído, nível de vibração e confiabilidade.

No subsistema de suspensão, as molas helicoidais comumente apresentam maior ocorrência de falha, em comparação aos demais componentes. O modo de falha predominante para a mola helicoidal em um compressor hermético é a fratura por fadiga e, portanto, este trabalho será enfoque na abordagem para a melhoria da confiabilidade da mola helicoidal em relação à fratura por fadiga.

Estabelecimento das metas de confiabilidade

De acordo com Puff (2010), o subsistema suspensão de compressores herméticos é usualmente avaliado em 500.000 ciclos de ligamento e desligamento, sendo que se estima que este número de ciclos representa entre 10 e 15 anos da vida do compressor. Este valor será utilizado ao longo de todo o processo de projeto adotado no estudo de caso desenvolvido neste trabalho.

Alocação da confiabilidade

A metodologia proposta neste trabalho será empregada ao projeto para confiabilidade de componentes de um compressor hermético alternativo, cujos componentes não são reparáveis. O modelo do compressor abordado neste estudo de caso possui quatro molas helicoidais de suspensão, sendo que o sucesso da operação do compressor ocorre se, e somente se, as quatro molas estiverem operando sem falha. Desta forma, a confiabilidade do sistema compressor em função da confiabilidade de suas molas possui estrutura em série. Assim, a função confiabilidade do sistema compressor no instante t , pode ser modelada conforme a Equação 6.1, onde $R_{m1}(t)$, $R_{m2}(t)$, $R_{m3}(t)$ e $R_{m4}(t)$ são, respectivamente, as funções de confiabilidade de cada uma das quatro molas helicoidais no instante t .

$$R_s(t) = R_{m1}(t) \times R_{m2}(t) \times R_{m3}(t) \times R_{m4}(t) \quad \text{Equação 6.1}$$

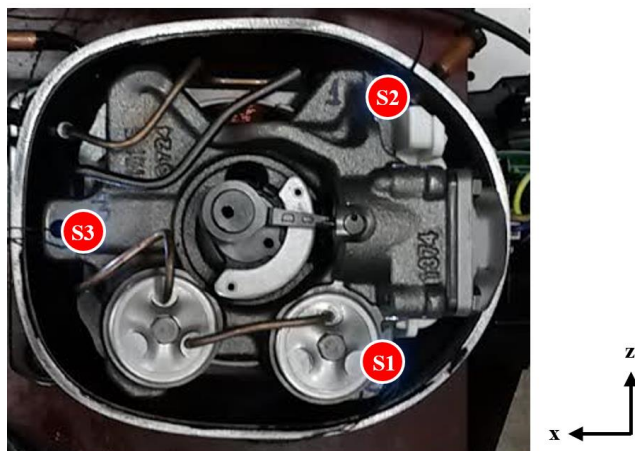
Determinação das condições de operação

Este estudo de caso terá enfoque na determinação das condições de operação do compressor que afetam a resistência à fratura por fadiga das molas helicoidais do subsistema de suspensão. Conforme descrito no ANEXO B, o processo de fratura por fadiga evolui por meio do crescimento de uma trinca, como consequência de deformações plásticas cíclicas, as quais se devem à imposição de tensões de cisalhamento cíclicas. Em um compressor hermético, a imposição destas tensões ocorre nos momentos de partida e de parada, devido à rotação do kit mecânico sobre as molas. Para o estudo do fenômeno de fadiga das molas, é necessário determinar as deformações e as tensões impostas nestas condições.

Experiências anteriores indicam que a condição de operação crítica para o deslocamento do kit mecânico em relação à operação do compressor é sua parada, quando este está em máxima rotação do motor elétrico. Neste sentido, foram realizados experimentos em um laboratório da empresa alvo a fim de se registrar o perfil de deslocamento de pontos pré-determinados no bloco de um kit mecânico em diferentes condições parada de determinado modelo de compressor, conforme indicação da Figura 6.4. A fim de se estabelecer a condição crítica para a análise da confiabilidade das molas, os experimentos foram realizados considerando-se inclinações em cinco posições do compressor, sendo impostos para cada inclinação cinco níveis de contrapressão, simulando condições de operação realísticas. Trinta réplicas foram realizadas para cada uma das vinte e cinco combinações de experimento acima expostas.

Após a realização dos experimentos, estabeleceu-se a condição de maior deslocamento do ponto identificado como S3 no plano x-z, sendo esta condição definida crítica para a confiabilidade em fadiga das molas e considerada para as subsequentes análises deste estudo.

Figura 6.4 - Representação esquemática do posicionamento dos pontos S1, S2 e S3 no bloco de um kit mecânico, a fim de se registrar o perfil de deslocamento em diferentes condições parada do compressor.

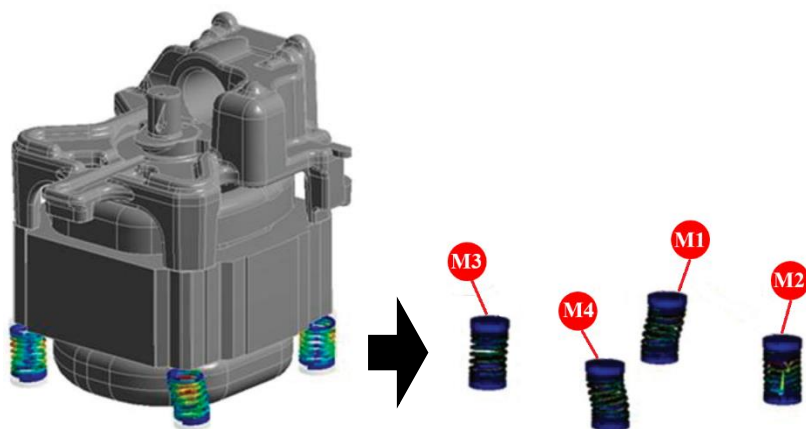


Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando-se os dados obtidos experimentalmente para o perfil de deslocamento dos pontos S1, S2 e S3 da condição crítica no plano x-z, realizou-se simulação pelo método dos elementos finitos em software ANSYS® 18.0 para determinação do perfil de deslocamento de cada uma das molas neste plano, bem como o deslocamento axial devido à massa do kit mecânico. A Figura 6.5 representa o posicionamento das molas M1, M2, M3 e M4, bem como dos pontos para registro do perfil de deslocamento no plano x-z.

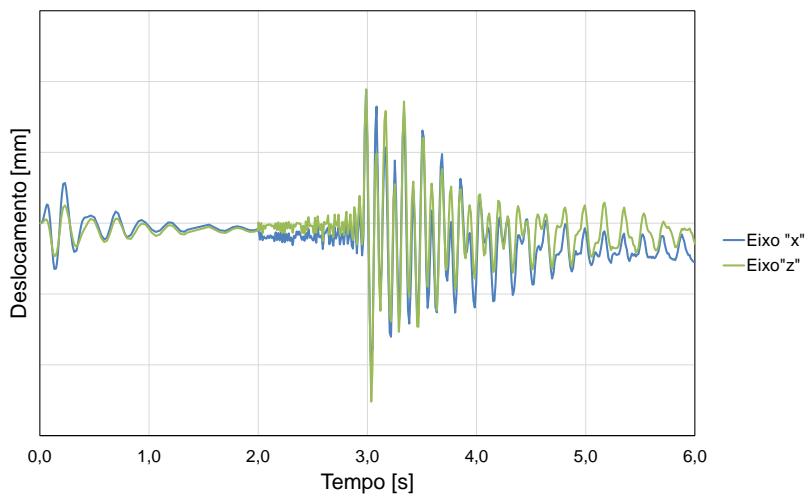
A Figura 6.6 apresenta o perfil de deslocamento lateral da mola M1 no momento de parada do compressor, nas direções dos eixos x e z. O momento da parada do compressor é identificado ao instante $t = 3,0$ s. O deslocamento axial obtido via simulação para as quatro molas foi de 7,0 mm.

Figura 6.5 - Representação esquemática do posicionamento dos pontos de deslocamento das molas de suspensão M1, M2, M3 e M4.



Fonte: Adaptado de Puff (2010)

Figura 6.6 - Perfil de deslocamento lateral da mola M1 no momento de parada do compressor, nas direções dos eixos x e z.



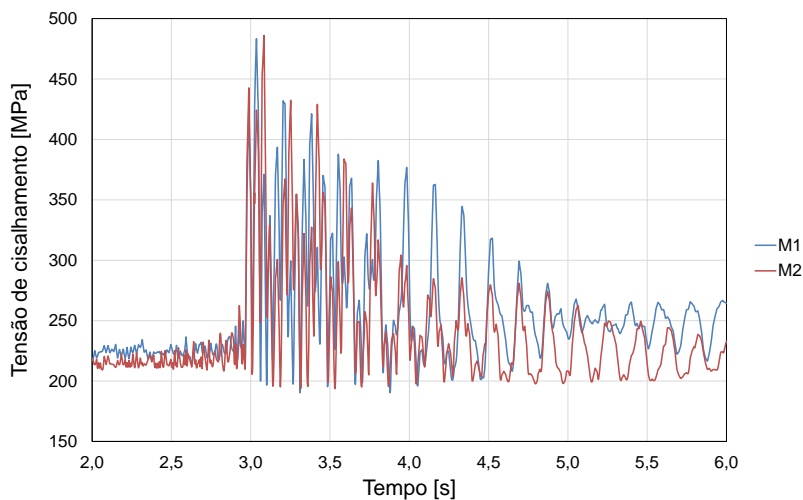
Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez que o perfil de deslocamento no plano x-z das molas helicoidais foi determinado para a condição de operação crítica, pôde-se submeter estes dados ao pós-processamento via software ANSYS® 18.0, visando a determinação da intensidade de tensão (σ_I) na seção transversal do fio das molas helicoidais. Conforme ANSYS Help® 18.0, a intensidade de tensão correlaciona-se com a tensão máxima de cisalhamento (τ_{MAX}) de acordo com a relação abaixo.

$$\sigma_I = 2 \cdot \tau_{MAX} \quad \text{Equação 6.2}$$

Aplicando-se a Equação 6.2, pôde-se obter o perfil de tensões de cisalhamento máximo para cada uma das molas, conforme a representação da Figura 6.7.

Figura 6.7 - Perfil de tensão de cisalhamento máxima na seção transversal do fio das molas M1 e M2, considerando-se o momento de parada do compressor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A curva S-N, utilizada para análises de vida em fadiga, representa situações em que uma carga cíclica uniforme é aplicada. Neste estudo de caso, no qual são verificadas tensões distribuídas aleatoriamente, e com picos de estresse acima do limite de vida infinita, é necessário quantificar

os danos causados a cada pico. Para tal, o método Palmgren-Miner, descrito em O'Connor (2012), deve ser empregado para se analisar o dano acumulado. Entretanto, este método para análise de fadiga exige o cálculo do perfil de tensões de cisalhamento em um ponto específico do material em estudo. De acordo com Puff (2010), simulações por elementos finitos para obtenção destes dados mostram-se impraticáveis devido ao elevado tempo necessário para concluir a análise.

Portanto, considerou-se os dados de deslocamento das molas para a determinação da condição de operação e realização das análises subsequentes. Por condição de operação, considerou-se o máximo pico de deslocamento no plano x-z dentre as quatro molas no momento da parada do compressor. Este valor foi correspondente a 9,6 mm, combinado a uma compressão axial de 7,0 mm.

6.2. ETAPA PROJETAR

Na Etapa Projetar, almeja-se cumprir atividades para mitigar ou eliminar os riscos associados aos potenciais modos de falha no projeto do produto, como elaboração de desenhos mecânicos, seleção de materiais, entre outros. O componente em análise neste estudo – mola helicoidal do subsistema de suspensão, é atualmente aplicado a um modelo de compressor em produção e sem indícios de falha em campo e, portanto, considera-se tais atividades completas.

Para projetos de novos produtos, o cumprimento dos passos descritos na Etapa Identificar previamente à execução destas atividades torna o projeto do produto mais robusto, uma vez que considera uma clara caracterização do sistema técnico, bem como a identificação dos requisitos referentes à confiabilidade do produto.

Nesta etapa, a FMEA deve integrar as atividades e organizar as informações do projeto para o tratamento dos riscos relacionados à confiabilidade. Conforme mencionado na Seção 6.1.2, para molas helicoidais, a fratura por fadiga é tipicamente priorizada na matriz de características especiais (ver Figura 5.4).

Neste trabalho, será realizada a análise da confiabilidade de molas helicoidais em relação à fratura por fadiga por meio de testes acelerados. Através destas avaliações, almeja-se identificar possíveis falhas no projeto do produto, comparar condições de operação, identificar defeitos nos processos de manufatura, determinar falhas prematuras, entre outros. Para tal, nas etapas seguintes serão executados testes acelerados quantitativos do tipo CALT (ver Seção 3.3.4).

6.3. ETAPAS VERIFICAR E VALIDAR DESIGN

Uma vez que o componente mola helicoidal é empregado em um modelo de compressor em produção e não apresenta indícios de falha em campo, considera-se que a efetividade das ações corretivas implementadas em projeto estão completas. Portanto, neste estudo de caso não serão realizados testes altamente acelerados de vida (HALT), os quais visam revelar modos de falha e efeitos não percebidos durante as etapas de projeto anteriores, e são tipicamente aplicados na Etapa Verificar.

A fim de se submeter molas helicoidais a testes acelerados quantitativos, inerentes à Etapa Validar *Design*, utilizou-se um equipamento para fadiga de molas atualmente disponível nos laboratórios da empresa alvo. Tal equipamento opera de maneira a permitir a imposição de deslocamento lateral cíclico de amplitude fixa. Neste equipamento, dez molas helicoidais podem ser submetidas ao teste acelerado simultaneamente.

O primeiro teste acelerado foi executado, no qual o deslocamento lateral imposto foi 14,4 mm, correspondente ao máximo possível para o equipamento de fadiga de molas. Similarmente, o deslocamento axial correspondente a 7,0 mm foi aplicado a todas as molas, o qual corresponde ao nível médio de deslocamento devido à massa do kit mecânico montado sobre as quatro molas. Os dados de falha deste primeiro teste acelerado seguem conforme representado no Quadro 6.1. Suspendeu-se o teste dado o número de ciclos igual a 910.000.

Quadro 6.1 - Resultados do teste acelerado de molas de suspensão em bancada, para deslocamento lateral de 14,4 mm.

Identificação da mola	Número de ciclos	Falha (F) ou suspensão (S)
01	910.000	S
02	147.400	F
03	147.400	F
04	147.400	F
05	147.400	F
06	910.000	S
07	147.400	F
08	174.000	F
09	910.000	S
10	910.000	S

Fonte: Elaborado pelo autor.

Um segundo teste foi executado aplicando-se novamente uma deformação axial de 7,0 mm para todas as molas, com deslocamento lateral de 13,1 mm. Os resultados seguem conforme representado no Quadro 6.2.

Quadro 6.2 - Resultados do teste acelerado de molas de suspensão em bancada, para deslocamento lateral de 13,1 mm.

Identificação da mola	Número de ciclos	Falha (F) ou suspensão (S)
11	1.240.000	S
12	1.240.000	S
13	1.240.000	S
14	1.240.000	S
15	207.400	F
16	1.154.300	F
17	1.240.000	S
18	1.110.000	S
19	225.600	F
20	1.110.000	S

Fonte: Elaborado pelo autor.

Finalmente, realizou-se o teste reproduzindo-se as condições de operação em relação aos deslocamentos axial e lateral, 7,0 mm e 9,6 mm, respectivamente. Os resultados seguem conforme representado no Quadro 6.3.

Quadro 6.3 - Resultados do teste acelerado de molas de suspensão em bancada, para deslocamento lateral de 9,6 mm.

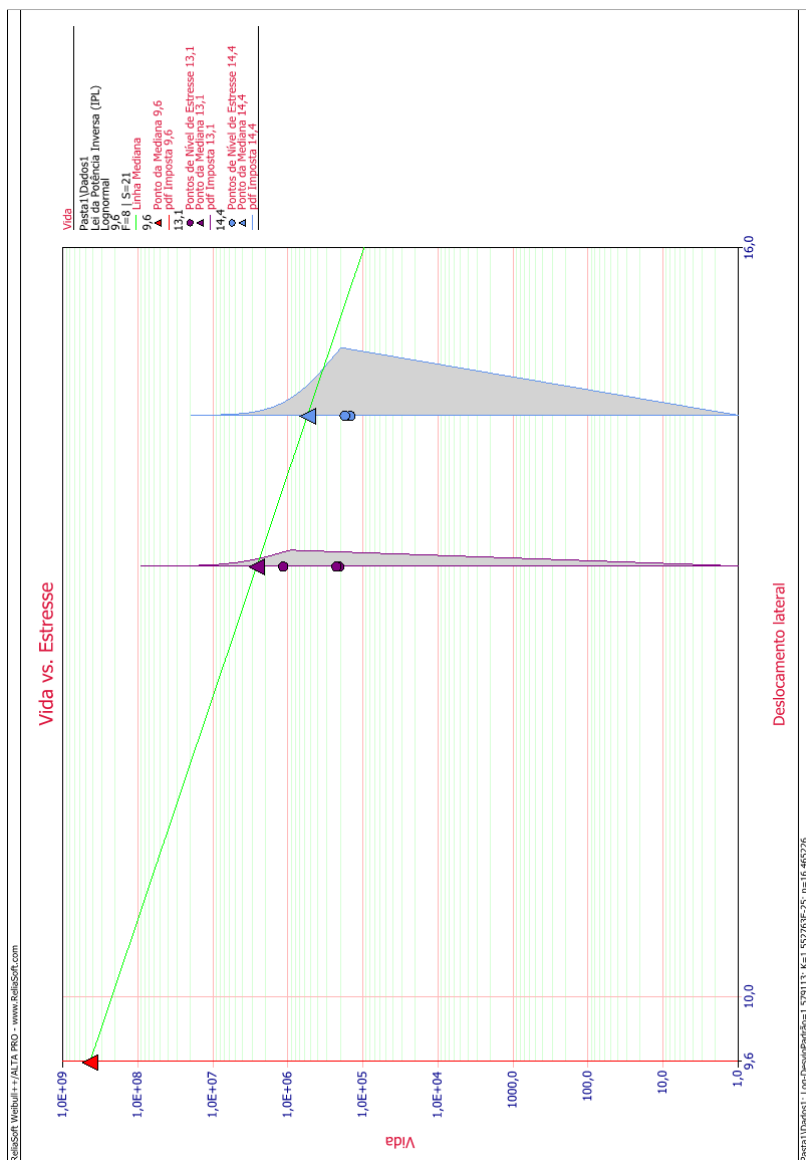
Identificação da mola	Número de ciclos	Falha (F) ou suspensão (S)
21	1.750.000	S
22	1.750.000	S
23	1.750.000	S
24	1.750.000	S
25	1.750.000	S
26	1.750.000	S
27	1.750.000	S
28	1.750.000	S
29	1.750.000	S
30	1.750.000	S

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados de falha foram tratados por meio do software ReliaSoft ALTA 9. Para modelar matematicamente o mecanismo de falha observado, considerou-se a relação estresse-resposta da Potência Inversa, sendo a componente estatística representada pela distribuição Lognormal. Foi aplicado o método de análise de máxima verossimilhança.

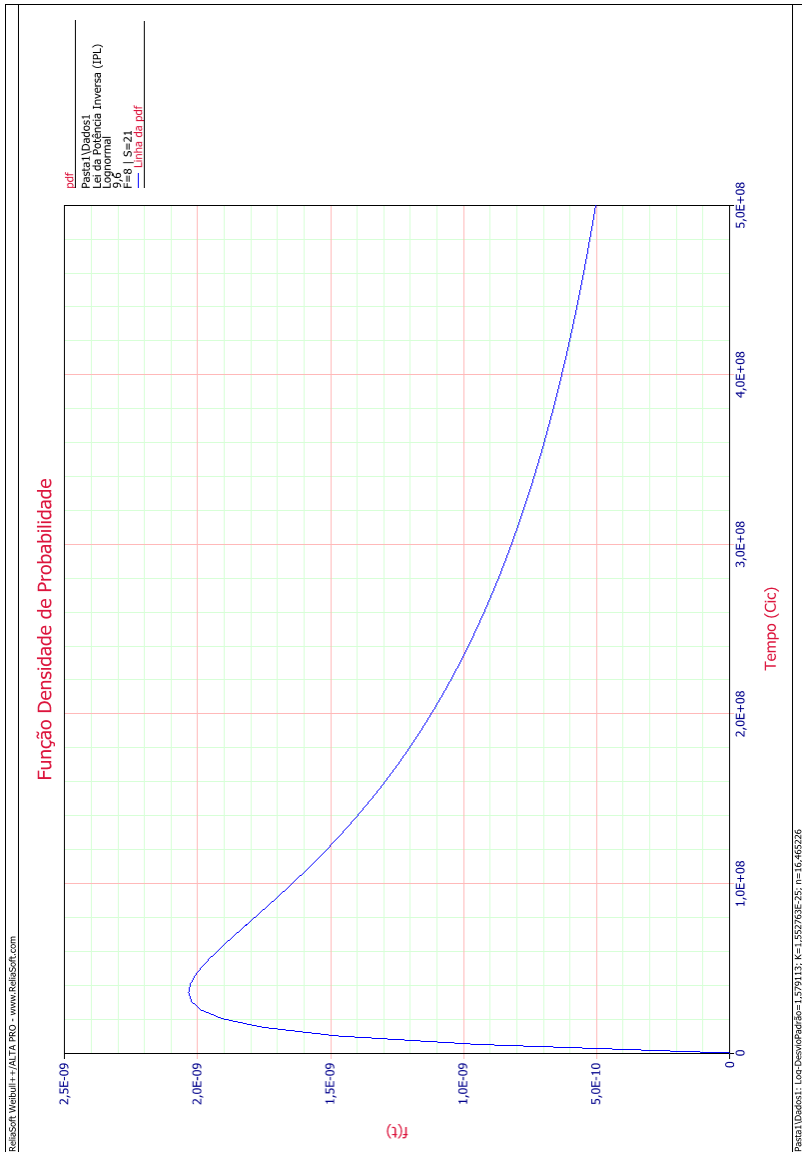
A Figura 6.8 apresenta o tempo médio até a falha (MTTF), ou vida, em função do deslocamento lateral da mola, considerando-se a função distribuição de probabilidade (fdp) para cada um dos níveis da variável de estresse (deslocamento lateral da mola) aplicados nos testes acelerados. Percebe-se o decaimento da MTTF conforme o aumento do deslocamento. Na Figura 6.9 e na Figura 6.10 são mostrados respectivamente, a fdp e a curva de taxa de falha a partir da regressão dos dados de falha provenientes dos testes acelerados para o nível de deslocamento de operação, de 9,6 mm.

Figura 6.8 - Tempo médio até a falha (MTTF), ou vida, em função do deslocamento lateral da mola, em milímetros.



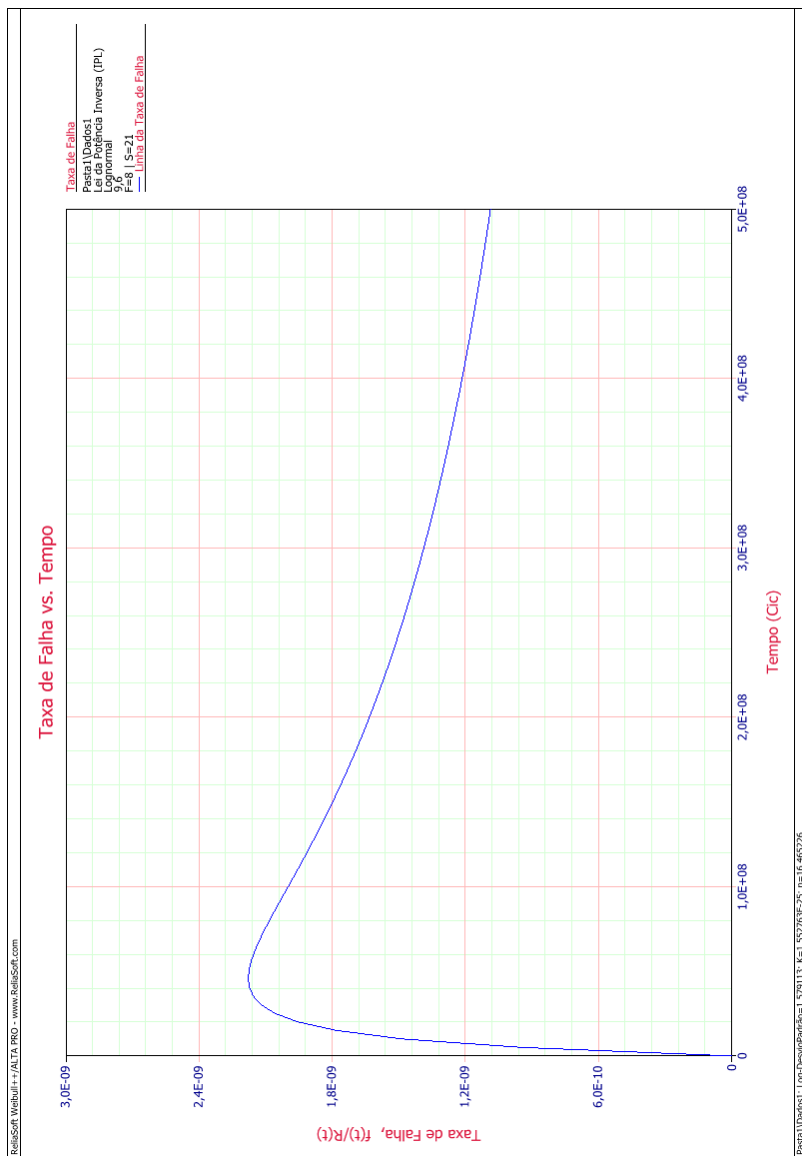
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.9 - Função densidade de probabilidade (fdp) considerando-se deslocamento lateral da mola em nível de operação (9,6 mm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.10 - Taxa de falha considerando-se deslocamento lateral da mola em nível de operação (9,6 mm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

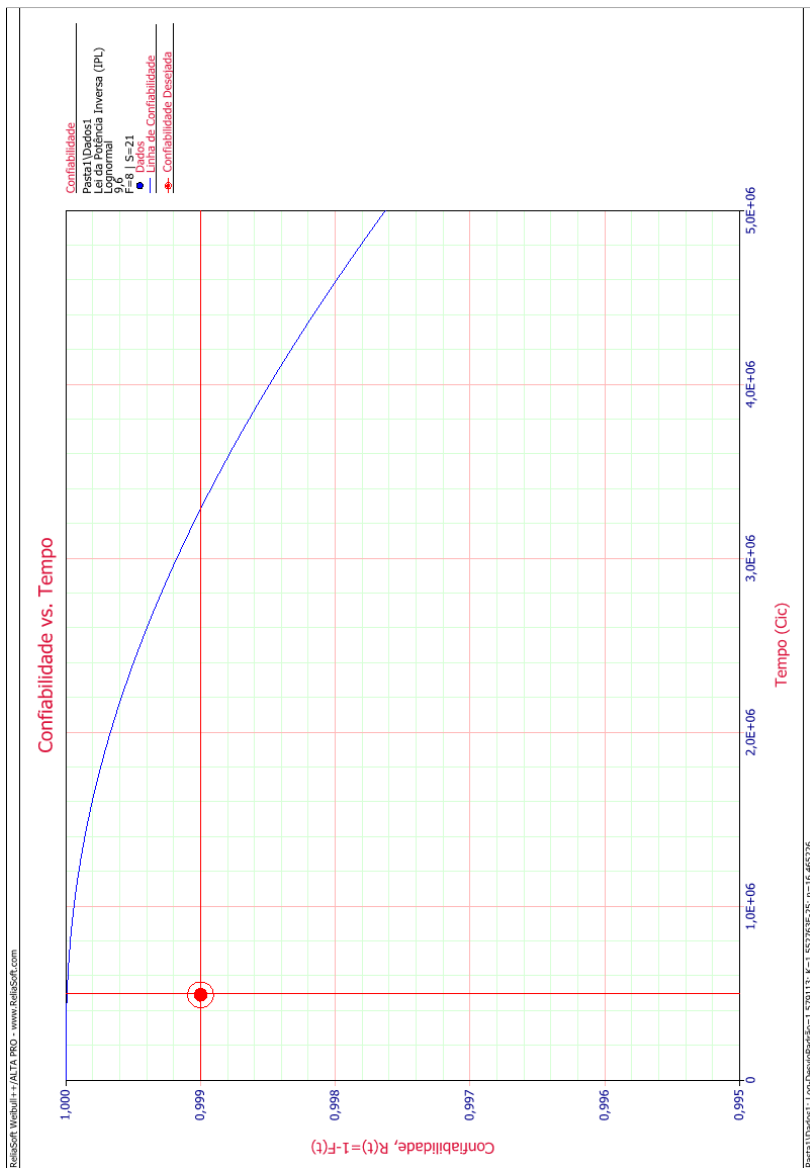
A Figura 6.11 apresenta a curva de confiabilidade considerando-se a regressão dos dados de falha provenientes dos testes acelerados para o nível de deslocamento lateral de operação (9,6 mm).

A fim de se avaliar os resultados obtidos, arbitrou-se como meta para uma mola helicoidal individual 99,9% de confiabilidade para 500.000 ciclos na condição de operação (deslocamento lateral de 9,6 mm). Esta meta está representada por “confiabilidade desejada” na Figura 6.11. Neste caso, desenvolvendo-se a Equação 6.1, então a confiabilidade meta do compressor em relação à fadiga de molas pode ser expressa por $R_s(t) = 99,6\%$.

A partir das regressões realizadas por meio do software ReliaSoft ALTA 9, pôde-se verificar elevadas dispersões da pdf, bem como a constatação de possíveis modos de falha adicionais à fratura por fadiga que induzem falhas prematuras, tais como inclusões, trincas pré-existentes, entre outros.

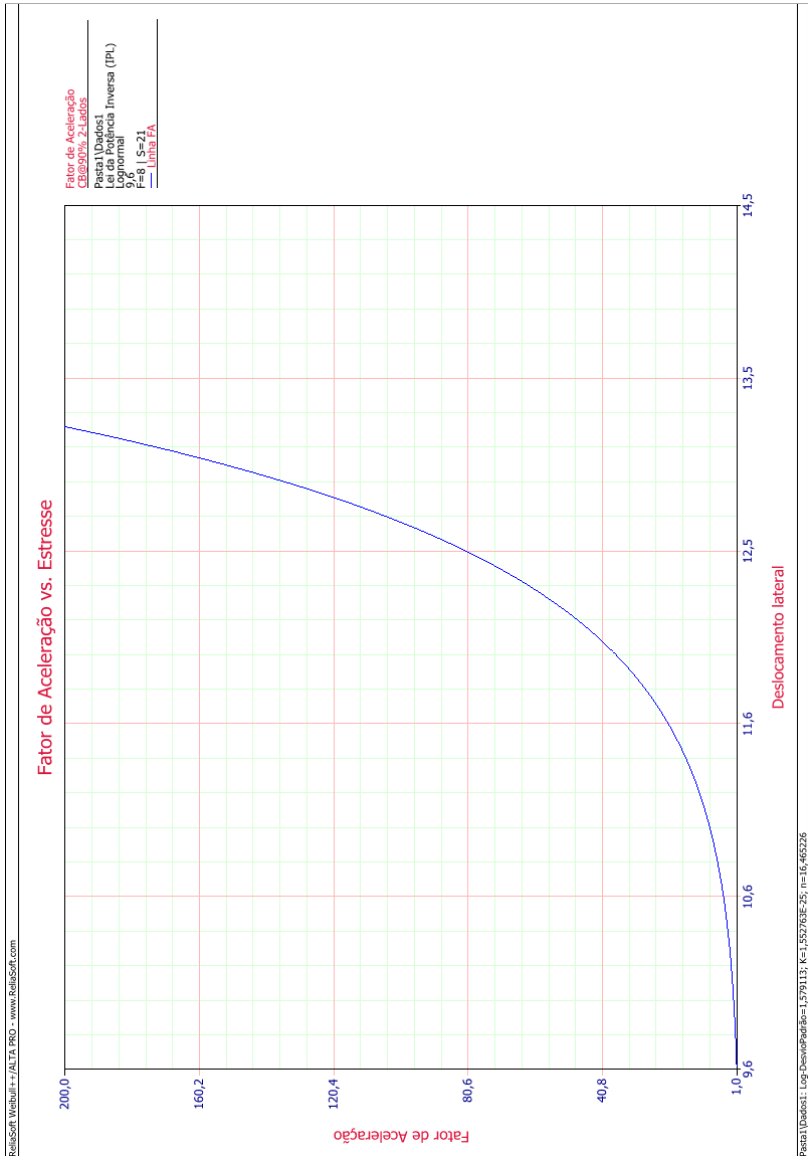
A Figura 6.12 apresenta a curva correspondente ao fator de aceleração de acordo com o nível de deslocamento lateral aplicado à mola helicoidal.

Figura 6.11 - Confiabilidade considerando-se deslocamento lateral da mola em nível de operação (9,6 mm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.12 - Fator de aceleração (FA) em função do nível de deslocamento lateral, em milímetros.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.4. ETAPAS VALIDAR FORNECIMENTO E CONTROLAR

Na Etapa Validar Fornecimento, objetiva-se a validação das soluções de confiabilidade por meio da análise de resultados de testes quantitativos em protótipos fabricados a partir de meios produtivos definitivos. Portanto, pode-se estabelecer critérios de escolha ou aprovação de fornecedores a partir da execução de testes acelerados em componentes ou subsistemas.

Na Etapa Controlar, objetiva-se manter sob controle as especificações determinadas no projeto como cotas, processos, composição química, visando assegurar as especificações de projeto e consequentemente garantindo a confiabilidade requerida ao usuário. Pode-se, a partir de testes acelerados definidos e executados nas etapas anteriores, planejar testes acelerados em amostragens do meio produtivo (testes HASS ou verificação).

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os capítulos iniciais deste trabalho apresentaram uma revisão dos conceitos básicos relativos à confiabilidade de produtos e de testes acelerados, bem como uma descrição dos principais métodos de projeto desenvolvidos com abordagem na avaliação do atributo confiabilidade de produtos.

O capítulo de delineamento da metodologia apresentou o estabelecimento de um processo de projeto para confiabilidade de produtos com ênfase no uso de testes acelerados, de maneira a contribuir com a metodologia de desenvolvimento de produtos da empresa alvo (método C2C) e com a metodologia PRODIP de Back et al. (2008).

No estudo de caso, o componente mola helicoidal do subsistema de suspensão foi submetido ao processo de projeto proposto, no qual pôde-se verificar a aplicação satisfatória dos métodos e técnicas apresentados na metodologia proposta.

O capítulo de conclusões expõe as principais contribuições e conclusões obtidas com o desenvolvimento da metodologia proposta, e as sugestões para continuidade do trabalho, seja no campo acadêmico ou em um projeto específico da empresa alvo.

Segundo O'Connor (2012), o papel do engenheiro de confiabilidade é tornar-se o responsável pela seleção dos melhores métodos de projeto e técnicas para confiabilidade, e pelo treinamento dos projetistas em como os utilizar. Como resultado deste processo, os projetistas adquirem responsabilidade sobre a confiabilidade do produto. Neste sentido, o desenvolvimento deste trabalho contribui através do aporte de métodos de projeto e técnicas para confiabilidade ao engenheiro de confiabilidade e aos projetistas.

De modo geral, com base nos resultados e conclusões obtidas neste trabalho, acredita-se ter contribuído para a condução efetiva do desenvolvimento de produtos com enfoque no atributo confiabilidade, possibilitando-se avançar nesta área de conhecimento, a qual representa extrema importância na obtenção de produtos competitivos e confiáveis.

A estruturação da metodologia de projeto proposta nesta dissertação teve por base o emprego das ferramentas, procedimentos e orientações descritas em modelos de desenvolvimento de produtos tais como engenharia simultânea, *Design for Reliability* e *Design for Six Sigma*. Desta forma, pode-se afirmar que a sua aplicabilidade não limita-se à contribuição para o processo de desenvolvimento de compressores herméticos al-

ternativos, podendo ser utilizada para o tratamento do atributo confiabilidade com ênfase em testes acelerados no processo de projeto de produtos em geral.

Os objetivos estabelecidos para este trabalho foram atingidos satisfatoriamente, com o desenvolvimento da metodologia de projeto e sua validação através da condução de um estudo de caso. Os resultados mostram que é possível beneficiar-se da metodologia de projeto proposta ao longo de todas as etapas do processo de desenvolvimento e produção de compressores herméticos.

7.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O processo de proposição da metodologia de projeto apresentada neste trabalho foi iterativo, na medida em que se desenvolveram as atividades para o estudo de caso. Este processo provocou discussões sobre como a metodologia proposta poderia ser implantada e ampliada na empresa alvo. A seguir, é apresentado um sumário das principais recomendações para trabalhos futuros.

- Por meio deste trabalho, evidenciou-se a importância do formulário FMEA na integração das atividades referentes ao tratamento do atributo confiabilidade de produto ao longo do ciclo de vida. Neste sentido, observa-se a possibilidade de expandir a aplicação desta ferramenta, por meio da inclusão de campos para o registro de informações referentes a dados provenientes de testes acelerados.
- A fim de se consolidar uma base de dados para uso na empresa alvo, propõe-se desenvolvimento de um banco de dados considerando-se os principais modos e mecanismos de falha inerentes aos componentes do compressor hermético, bem como uma recomendação da relação estresse-resposta adequada para descrever tal mecanismo. Desta forma, entende-se que haverá a facilitação de análises referentes às falhas destes componentes em testes acelerados.
- Na execução do estudo de caso, foi impraticável se obter as tensões cisalhantes (variável de estresse) que determinam o fenômeno da falha por fadiga das molas helicoidais, devido ao tempo de processamento necessário por meio do software ANSYS®. Para trabalhos futuros, recomenda-se a simplificação do modelo, utilizando-se

por exemplo, uma geometria que considere apenas a mola helicoidal e seus componentes adjacentes.

REFERÊNCIAS

- BACK, N. **Projeto Integrado de Produtos: Planejamento, concepção e modelagem**. Manole, 2008.
- BACK, N.; LEAL, L. C. M. **Uma metodologia de planejamento de teste de produtos industriais**. Prod., São Paulo, v. 2, n. 1, p. 61-69, Junho de 1992.
- BASSETTO, I. F. F. **Estudos de confiabilidade de compressores alternativos semi-herméticos de sistemas de refrigeração**.
- BELLINI, V. **Metodologia para análise dos modos de falha aplicada à segurança de condicionadores de ar**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- CROWE, D; FEINBERG, A. **Stage-gating accelerated reliability growth in an industrial environment**. Proceedings Institute of Environmental Sciences, 1998.
- CROWE, D; FEINBERG, A. **Design for Reliability**. CRC Press, Boca Raton, 2001.
- DHILLON, B. S. **Reliability in the mechanical design process**. Mechanical Engineers' Handbook: Materials and Mechanical Design, Volume 1, Third Edition. Chapter 31. 2006.
- DIAS, A. **Confiabilidade e manutenibilidade aplicadas ao projeto mecânico**. Florianópolis, 1997. Apostila utilizada como texto básico da disciplina Confiabilidade do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC.
- DIAS, A. **Design for reliability: an application to natural gas pipelines**. Product: Management & Development Vol.1 n° 2 March 2002.
- EBELING, C. E. **An introduction to reliability and maintainability engineering**. Dayton, 2005. Waveland Press, Inc.
- EDSON, L. **GMW3172 - The electrical validation engineers handbook series**. 2008. General Motors Corporation.
- ESCOBAR, L. A.; MEEKER, W. Q. A. **Review of Accelerated Test Models**. Statist. Sci. 21 (2006), no. 4, 552-577.
- EVANS, J. R. **Quality and Performance Excellence: Management, Organization, and Strategy**. Mason, OH: South-Western Cengage Learning, Sixth Edition. 2011.
- FELIX, E. P. **Análise de confiabilidade de sistemas eletrônicos complexos baseada em ensaios acelerados de vida**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

- FERNANDES, C. G. **Metodologia para melhorar a confiabilidade de subsistemas através de análise de falhas e testes acelerados**. Dissertação Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010
- FORTUNA, F. R. Q. **HALT/QALT/HASS testing support na Bosch Termotecnologia S.A.** 2009. Dissertação de mestrado - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- FREITAS, M. A. **Confiabilidade: análise de tempo de falha e testes de vida acelerados**. Belo Horizonte: UFMG. 1997. 309 p. Vol. Único.
- GENERAL MOTORS WORLDWIDE. **GMW8758, Calibrated Accelerated Life Testing**, 2nd edition, (2011).
- HOENISCH, P. R. **Projeto de experimentos no planejamento e ensaio de motores elétricos para condicionadores de ar**. 2006. (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- IRESON, W. G.; COOMBS, C. F.; MOSS, R. Y. **Handbook of reliability engineering and management**. 2a. edição, 1995.
- KOECHER, R. A. **Como fazer a confiabilidade acontecer utilizando ensaios acelerados no desenvolvimento de produtos**. 12º Simpósio Internacional de Confiabilidade. 2014
- LU, Y.; LOH, H. T.; BROMBACHER, A. C.; OUDEN, E. D. **Accelerated stress testing in a time-driven product development process**. International Journal of Production Economics 67 (2000) 17-26.
- MEEKER, W. Q.; ESCOBAR, L. A. **Statistical methods for reliability data**. New York: Wiley, 1999, capítulo 20.
- MINDERHOUD, S. **Quality and reliability in product creation – extending the traditional approach**, QREI (1999).
- MONTGOMERY, D.C. & RUNGER, G.C. **Applied statistics and probability for engineers**. New York, 2003 - 3a. Edição. John Wiley & Sons.
- NELSON, W. **Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analyses**. New York: Wiley, 1990, capítulo 6.
- O'CONNOR, P.; KLEYNER, A. **Practical Reliability Engineering**. John Wiley & Sons, Ltd - 5th Edition, 2012. Chichester, United Kingdom.
- OTTO, S.; SCHMIDT, K. A.; JOHANSEN, J. **Practically applicable reliability tools: A guide with practical cases**. SPM reliability management. 2013.

- PASCHKEWITZ, J. **Calibrated Accelerated Life Testing (CALT) with Time Varying Stress Profiles**. ReliaSoft. Reliability Edge, Volume 10, Issue 1 (2001).
- PEDROSO, A. P. (2013). **Desenvolvimento de um sistema especialista protótipo para suporte ao diagnóstico de problemas de baixo desempenho de compressores herméticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- PUFF, R.; BORTOLI, M. G. D.; BOSCO Jr, R. **Fatigue Analysis of Helical Suspension Springs for Reciprocating Compressors**. International Compressor Engineering Conference. 2010
- RAUSAND, M.; HOYLANC, A. **System Reliability Theory: Models and Statistical Methods**. 2004
- SANDER, P. C.; BROMBACHER, A. C. **The use of reliability information fows as a maturity index for quality management**, QREI (1999).
- SANTOS, M. Q. C. **Sistematização para aplicar o projeto de experimentos na melhoria da confiabilidade de produtos**. 2001. (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- SMITH, P.G.; REINERTSEN, D.G. **Developing Products in Half the Time**. Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- SHEK, M. **Reciprocating hermetic compressors faults and small air conditioning systems problems**, (2004).
- TUCCI, M.; DE CARLO, F.; BORGIA, O.; FANCIULLACCI, N. **Accelerated life tests as an integrated methodology for product design, qualification and production control: a case study in household appliances**, Production & Manufacturing Research: An Open Access Journal, 2:1, 112-127 (2014).
- TRIPP, D.. **Pesquisa-ação: uma introdução metodológica**. Educação e Pesquisa. São Paulo, v. 31, n. 3, p. 443-466, dez., 2005.
- ZHANG, H., **Modeling and Planning Accelerated Life Testing with Proportional Odds**. Tese de doutorado. Rutgers University, EUA, (2007).
- WHIRLPOOL. **Corporate Product Safety**, 2003. CPS Standards.
- C2C. **Manual do Processo de Desenvolvimento e Criação de Produtos**, Whirlpool, 2007.

ANEXO A – Planos experimentais para testes acelerados

A maioria dos planos experimentais para testes acelerados aplicam os modelos abaixo descritos e considerações de teste que correspondem a muitos problemas quantitativos práticos de testes de vida acelerados.

1. O logaritmo do tempo até a falha para cada unidade segue uma distribuição de localização e escala conforme abaixo:

$$Pr(Y \leq y) = \Phi\left(\frac{y - \mu}{\sigma}\right) \quad (\text{Equação A.1})$$

onde μ e σ são os parâmetros de escala e de localização, respectivamente, e $\Phi(\cdot)$ é a forma padrão da distribuição de escala e localização.

2. Os tempos até a falha, para todas as unidades em teste e em qualquer nível de estresse, são estatisticamente independentes.
3. O parâmetro de localização μ é uma função linear do estresse. Especificamente, assume-se que:

$$\mu = \mu(z_1) = \gamma_0 + \gamma_1 x \quad (\text{Equação A.2})$$

4. O parâmetro de escala, σ , não depende dos níveis de estresse. Todas as unidades são testadas até um tempo pré estabelecido.
5. Os dois modelos mais comumente utilizados em testes acelerados de vida quantitativos são os modelos Weibull linear e lognormal. O modelo Weibull é dado por:

$$Y \sim SEV[\mu(z) = \gamma_0 + \gamma_1 x, \sigma] \quad (\text{Equação A.3})$$

onde *SEV* denota a distribuição do menor valor extremo. O modelo lognormal é dado por:

$$Y \sim Normal[\mu(z) = \gamma_0 + \gamma_1 z, \sigma] \quad (\text{Equação A.4})$$

Isto é, assume-se que a vida log Y possui uma distribuição *SEV* ou normal com parâmetro de localização $\mu(z)$, expresso como uma função linear de z e parâmetro de escala constante σ .

Para fins de formulação do problema de planejamento experimental do teste acelerado, considera-se que um estresse pode ser padronizado como:

$$\xi = \frac{x - x_D}{x_H - x_D} \quad (\text{Equação A.5})$$

onde

x_D é o estresse de uso ou estresse de projeto no qual a vida do produto é de interesse primário

x_H é o nível máximo de estresse

Os valores de x , x_D e x_H referem-se aos valores reais de estresse ou aos valores transformados no caso de uma transformação (por exemplo, transformação recíproca para se obter a relação de Arrhenius ou a relação logarítmica para se obter a relação de poder).

Tipicamente, haverá um limite no nível máximo de estresse para o teste porque a distribuição e as suposições quanto a relação estresse-vida tem-se somente para uma faixa limitada de estresse. O nível máximo de estresse, x_H , pode ser determinado baseando-se em conhecimento de engenharia, em testes preliminares, ou experiência com produtos similares. Níveis de estresse mais altos auxiliam na conclusão do teste mais rapidamente, mas podem violar as considerações sobre a distribuição e a relação de estresse-vida. Portanto, $\xi = 0$ no nível de estresse de projeto e $\xi = 1$ no nível de estresse máximo.

Um propósito comum de um teste acelerado de vida é estimar um percentil particular (valor de não confiabilidade de p , $T(p)$, na cauda inferior da distribuição de falha no estresse de uso. Assim, um critério natural é minimizar $Var(\hat{T}_p)$ ou $Var(\hat{Y}_p)$ tal que $Y_p = \ln(T_p)Var(\hat{Y}_p)$ mede a precisão do estimador quantil p ; valores mais baixos significam menos variação no valor de \hat{Y}_p em amostragens repetidas. Consequentemente, um bom plano de teste deve resultar em um baixo valor de $Var(\hat{Y}_p)$. Para o problema de minimização, as variáveis de decisão são ξ_i (o nível de estresse padronizado aplicado no teste) e π_i (a porcentagem de unidades de teste totais alocadas neste nível). O problema de otimização pode ser equacionado como abaixo:

Minimizar:

$$Var(\hat{Y}_p) = f(\xi_i, \pi_i) \quad (\text{Equação A.6})$$

Sujeito a:

$$0 \leq \pi_i \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{Equação A.7})$$

Onde:

$$\sum_{i=1}^n \pi_i = 1 \quad (\text{Equação A.8})$$

Um plano ótimo requer algoritmos para minimizar $Var(\hat{Y}_p)$.

O planejamento de testes pode envolver um compromisso entre eficiência e extrapolação. Mais falhas correspondem a uma estimação melhor de eficiência, requerendo níveis de estresse mais altos, mas mais extrapolação para as condições de uso. Escolher pelo melhor plano a ser considerado deve levar em consideração as trocas entre eficiência e extrapolação. Planos de teste com mais níveis de estresse são mais robustos que planos com menos níveis de estresse, pois dependem menos na validade da suposição da relação vida-estresse. Entretanto, planos de teste com menos níveis de estresse podem ser mais convenientes.

Alguns dos planos experimentais de teste acelerado mais populares, usados quando apenas uma variável de estresse é aplicada no teste, serão discutidos abaixo. Para se projetar um teste, as informações abaixo precisam ser determinadas antecipadamente:

1. O nível de estresse de projeto, x_D , e o nível de estresse máximo, x_H .
2. A duração do teste (ou tempo de censura), T .
3. A probabilidade de falha em x_D ($\xi = 0$) por T , denotada por P_D , e em x_H ($\xi = 1$) por T , denotada por P_H .

Plano estatisticamente ótimo de dois níveis

O plano estatisticamente ótimo de dois níveis é o plano mais importante, pois quase todos os outros planos derivam deste. Para este plano, o estresse mais alto, x_H , e o estresse de projeto, x_D , são pré-determinados. O teste é conduzido em dois níveis. O nível alto de teste é fixado em x_H . O nível baixo de teste, x_L , juntamente com a proporção das unidades de teste alocada ao nível baixo, x_L , são calculados de tal forma que $Var(\hat{Y}_p)$ é minimizada. Meeker e Hahn apresentam mais detalhes sobre este plano.

Melhor plano padrão de três níveis

Neste plano, três níveis de estresse são utilizados. Denominam-se ξ_L , ξ_M e ξ_H os três níveis de estresse padronizados do menor para o maior com:

$$\xi_M = \frac{\xi_L + \xi_H}{2} = \frac{\xi_L + 1}{2} \quad (\text{Equação A.9})$$

Um número igual de unidades é testado em cada nível, $\pi_L = \pi_M = \pi_H = 1/3$. Portanto, o plano de teste é $(\xi_L, \xi_M, \xi_H, \pi_L, \pi_M, \pi_H) = (\xi_L, \frac{\xi_L+1}{2}, 1, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$. Então, ξ_L é a única variável de decisão. ξ_L é determinado de modo que $Var(\hat{Y}_p)$ é minimizada. Escobar e Meeker apresentam mais detalhes sobre este plano de teste.

Plano de melhor compromisso de três níveis

Neste plano, três níveis de estresse são utilizados $(\xi_L, \frac{\xi_L+1}{2}, 1)$. π_M , que é um valor entre 0 e 1, é pré-determinado. $\pi_M = 0,1$ e $\pi_M = 0,2$ são comumente utilizados. Valores menores que 0,2 podem prover bons resultados. O plano de teste é $(\xi_L, \xi_M, \xi_H, \pi_L, \pi_M, \pi_H) = (\xi_L, \frac{\xi_L+1}{2}, 1, \pi_L, \pi_M, 1 - \pi_L - \pi_M)$ com ξ_L e π_L sendo as variáveis de decisão determinadas de modo que $Var(\hat{Y}_p)$ é minimizada. Meeker apresenta mais detalhes sobre este plano de teste.

Plano de melhor número esperado de falhas de três níveis

Neste plano, três níveis de estresse são utilizados $(\xi_L, \frac{\xi_L+1}{2}, 1)$, e existe uma restrição de que um número igual de falhas em cada nível de estresse é esperado. A restrição pode ser escrita como:

$$\pi_L \cdot P_L = \pi_M \cdot P_M = \pi_H \cdot P_H \quad (\text{Equação A.10})$$

onde P_L , P_M e P_H são a probabilidade de falha na nível baixo, médio e alto, respectivamente.

P_L e P_M podem ser expressos em termos de ξ_L e ξ_M . Portanto, todas as variáveis podem ser expressas em termos de ξ_L , a qual é determinada de modo que $Var(\hat{Y}_p)$ é minimizada. Meeker apresenta mais detalhes sobre este plano de teste.

Plano de alocação 4:2:1 de três níveis

Neste plano, três níveis de estresse são utilizados $(\xi_L, \frac{\xi_L+1}{2}, 1)$. A alocação das unidades em cada nível é pré-estabelecida como $\pi_L:\pi_M:\pi_H = 4:2:1$. Portanto, $\pi_L = \frac{4}{7}, \pi_M = \frac{2}{7}, \pi_H = \frac{1}{7}$. ξ_L é a única variável de decisão que é escolhida de maneira que $Var(\hat{Y}_p)$ é minimizada. O valor ótimo de ξ_L pode ser também multiplicado por um fator k (definido pelo usuário) para fazer com que o nível baixo de estresse fique mais próximo ao estresse de uso do que o plano otimizado., para que se possa realizar uma extrapolação melhor nos níveis de estresse de uso. Meeker e Hahn apresentam mais detalhes sobre este plano de teste.

ANEXO B – Modelamento matemático da fadiga

De acordo com MSC/ Institute of Technology (1999), a fadiga é o processo onde variações repetidas na carga resulta em falha mesmo quando as cargas nominais são abaixo da tensão de escoamento do material. Este processo se dá pela iniciação de trincas e subsequente crescimento da trinca como resultado de deformações plásticas cíclicas.

Análise de tensões em molas helicoidais de suspensão

De acordo com Zaccone (2001), para carregamentos exclusivamente axiais, a rigidez axial de uma mola helicoidal pode ser expressa por:

$$k_x = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot N_a \cdot D_m^3} \quad (\text{Equação B.1})$$

onde:

G é o módulo de cisalhamento da mola;

d é o diâmetro do fio da mola;

D_m é o diâmetro externo médio das espiras da mola;

N é o número de espiras da mola.

A tensão de cisalhamento da mola helicoidal, para carregamentos exclusivamente axiais, pode ser dada por:

$$\tau_x = \frac{8 \cdot P \cdot D_m}{\pi \cdot d^3} \quad (\text{Equação B.2})$$

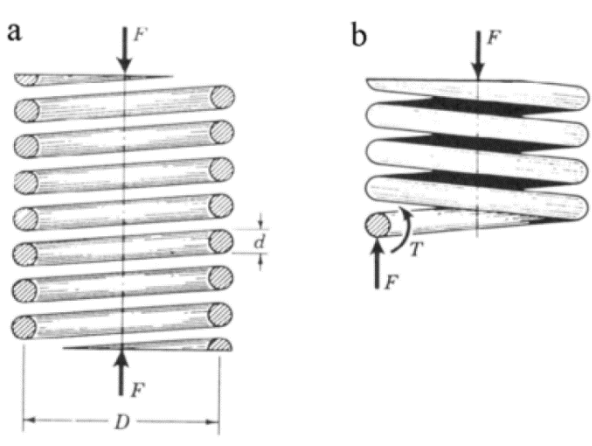
onde P é a carga axial

A tensão de cisalhamento corrigida é obtida pela multiplicação desta tensão por um fator de correção K , que depende no índice de mola, $C = D_m/d$, o qual leva em consideração o componente de tensão devido a curvatura e ao cisalhamento direto. O fator de correção é calculado a partir de:

$$K = \frac{4 \cdot C - 1}{4 \cdot C - 4} + \frac{0,615}{C} \quad (\text{Equação B.3})$$

A tensão de torção corrigida combina a tensão de cisalhamento direta com a tensão torsional pura mostrada na Figura B.1 para prover a tensão torsional resultante total.

Figura B.1 - (a) Esquema da mola helicoidal axialmente carregada. (b) Diagrama de corpo livre mostrando que o fio da mola é sujeito a cisalhamento direto e um cisalhamento torsional.



Fonte: Zaccone (2001)

Quando o compressor é submetido a condições de partida e parada, o kit mecânico rotaciona dentro da carcaça, como mostra a Figura B.2. A adição deste movimento impõe uma tensão cisalhante adicional na mola conforme o kit mecânico rotaciona na carcaça. A rigidez ao longo do eixo da mola é dada por k_x . A razão entre a rigidez lateral e a rigidez axial é avaliada baseando-se no momento adicional devido à deflexão lateral, conforme abaixo:

$$\frac{k_y}{k_x} = 1,44 \cdot \alpha \cdot \left(0,204 \cdot \frac{h^2}{D_m} + 0,256 \right) \quad (\text{Equação B.4})$$

Onde:

k_y é a rigidez lateral;

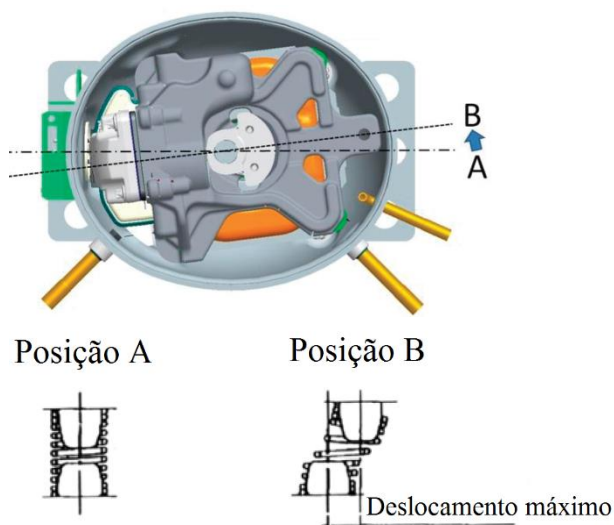
α é o fator de correção para o efeito da carga axial na rigidez lateral.

O aumento na tensão sobre o valor nominal para molas carregadas lateralmente pode ser estimado por:

$$C = 1 + \frac{\delta_x}{2 \cdot r} + \frac{F \cdot l}{2 \cdot P \cdot r} \quad (\text{Equação B.5})$$

O momento de torção devido à carga P pode ser expresso por $P \cdot r$. O raio efetivo será aumentado por um acréscimo de $\delta_x/2$. Em adição a força lateral F produz um momento de torção $P \cdot r/2$. Como uma estimativa grosseira, pode-se esperar que a tensão máxima será C vezes o valor de τ_x com o fator de correção K aplicado.

Figura B.2 - Diagrama esquemático mostrando o movimento do kit mecânico do compressor dentro da carcaça durante condições de partida e de parada.



Fonte: Zaccone (2001) e Puff (2010)

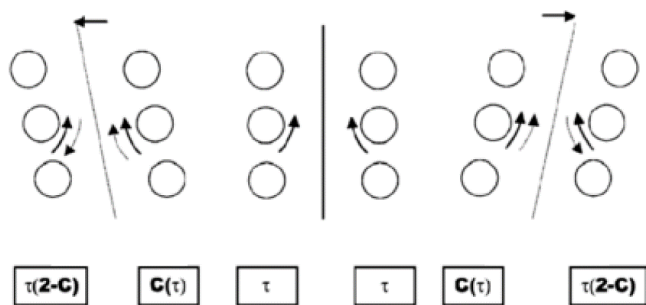
Análise de fadiga em molas helicoidais de suspensão

A Figura B.3 mostra esquematicamente o efeito do momento nas tensões na mola. As linhas sólidas representam o torque devido à compressão da mola. A magnitude da tensão de cisalhamento associada com as condições de tensão em A e B é mostrada nas caixas abaixo de cada caso. A deflexão lateral da mola resulta em um momento tal que a tensão

de cisalhamento é máxima em 0 e 180° (vista superior da Figura B.2), dependendo da direção do momento. A tensão de flexão máxima ocorre em 90 e 270° , em um plano perpendicular ao eixo da mola. A tensão de flexão ocorre nas fibras superiores e inferiores considerando-se a vista da secção transversal do fio da mola, enquanto que a tensão máxima de cisalhamento ocorre no interior do fio da mola na mesma localidade onde ocorre a máxima tensão de cisalhamento devido à compressão da mola. Neste trabalho, a tensão de flexão não será considerada, uma vez que a iniciação da falha observada ocorre no ponto de máxima tensão de cisalhamento, e não no ponto de máxima tensão de flexão.

Considerando-se a tensão de cisalhamento, o efeito líquido para uma deflexão para a direita é uma tensão de cisalhamento máxima de C_τ em 0° , e uma tensão de cisalhamento mínima de $\tau \cdot (2 - C)$ em 180° em relação ao eixo axial da mola. Conforme a mola inverte a direção de deslocamento, o oposto ocorre, e então as fibras interiores da mola experimentam uma tensão cíclica de C_τ a $\tau \cdot (2 - C)$, com tensão média igual a τ e amplitude de $(C - 1) \cdot \tau$.

Figura B.3 - Diagrama mostrando a adição em tensão de cisalhamento (linha pontilhada) devido a deflexão lateral na mola.



Fonte: Zaccone (2001)

A maioria dos dados de fadiga para molas de compressão são expressos em tensões de cisalhamento mínimas positivas, devido a compressão inicial da mola. Para se examinar as características em fadiga de um material, pode-se utilizar diagramas de Goodman, onde se têm curvas correspondentes a estimativa da vida do material de acordo com a tensão média e a amplitude de tensão sob as quais o material está submetido. Pode-se obter mais informações acerca de análise de fadiga em molas helicoidais em Wahl (1944).

ANEXO C – Pontuação aos índices de severidade e de probabilidade de ocorrência da FMEA

Quadro C.1 - Pontuação do índice de severidade.

Efeito	Severidade do Efeito no Produto Final Percebido pelo Cliente	Índice de Severidade
Falha no Atendimento de Requisitos de Segurança e/ou Regulatórios e/ou Contratuais	Danosa	10
	Séria	9
Perda ou Degradação de Função Principal	Extrema	8
	Maior	7
Perda ou Degradação de Função Secundária	Significante	6
	Moderada	5
Perturbação ou Incômodo	Menor	4
	Leve	3
	Imperceptível	2
Nenhum Efeito	Nulo	1

Fonte: Adaptado de Whirlpool S/A - Manual do FMEA Embraco (2013)

Quadro C.2 - Pontuação do índice de probabilidade de ocorrência.

Ocorrência da Falha considerando características do produto e seu ciclo de vida	Índice de ocorrência
Nova tecnologia, inexistência de dados de histórico ou aplicação em condições extremas desconhecidas	10
Em projetos de tecnologia nova ou nova aplicação do produto onde a falha é inevitável para parte da população.	9
Em projetos de tecnologia nova ou nova aplicação do produto onde a falha é provável para parte da população.	8
Em projetos de tecnologia nova ou nova aplicação do produto onde a falha é pouco provável mais ainda possível para parte da população.	7
Em projetos similares existe histórico ou simulações e testes demonstram que falhas frequentes podem ocorrer em parte da população	6
Em projetos similares existe histórico ou simulações e testes demonstram que falhas ocasionais podem ocorrer em parte da população	5
Em projetos similares existe histórico ou simulações e testes demonstram que falhas isoladas podem ocorrer.	4
Em projetos similares existe histórico de falhas isoladas em testes e simulações com argumentos técnicos convincentes para considerá-las como causa especial.	3
Em projetos similares não existe histórico de falhas isoladas em testes e simulações	2
A falha é eliminada através de mudança de conceito do projeto ou por controle total	1

Fonte: Adaptado de Whirlpool S/A - Manual do FMEA Embraco (2013)