

2. Integridade Estrutural e Inspeção Baseada em Risco

No presente capítulo serão apresentadas algumas definições relacionadas ao processo de avaliação de Integridade Estrutural de máquinas. Também serão definidos e discutidos conceitos como: erros e incertezas, distribuição gaussiana, probabilidade de falha, entre outros, os quais serão utilizados no desenvolvimento da metodologia proposta.

2.1. Definições

2.1.1. Integridade Estrutural

“Diz-se que um componente estrutural está íntegro quando atende às funções para as quais foi projetado, suporta os carregamentos máximos de trabalho, e apresenta um comportamento confiável, previsível e repetitivo por tantos ciclos quanto forem necessários para a sua vida em serviço [3]”.

2.1.2. Avaliação de Integridade Estrutural, AIE

“A AIE é o resultado da aplicação de técnicas e procedimentos que permitem estabelecer a situação de dano de uma estrutura, para prever seu comportamento futuro e indicar suas necessidades de inspeção, monitoração, recuperação e reforço [3]”.

2.1.3. Inspeção

“Atividade voltada à prospecção de defeitos, realizada de forma preventiva ou preditiva que utiliza métodos e ensaios específicos. A inspeção ativa estudos de engenharia que acarretam a monitoração e a avaliação da criticidade dos defeitos nas estruturas. Os conceitos de ações corretivas, preventivas e preditivas, bastante associados às atividades de manutenção, podem ser também aplicados à Inspeção [3]”.

2.1.4. Falha

A falha de uma estrutura ou elemento desta é definida como qualquer situação que impeça o elemento de cumprir a função de transmissão de cargas ou esforços, tal como se prevê no projeto deste, ou seja, a falha é produzida quando o elemento torna-se incapaz de resistir às forças ou esforços previstos no projeto.

2.2. Erros e Incertezas

Os instrumentos ou técnicas utilizados para medir grandezas físicas não permitem obter um valor exato destas. Por mais cuidadosa que seja uma medição e por mais preciso que seja o instrumento, não é possível realizar uma medida perfeita, já que todas as medidas são afetadas por certo grau de inexatidão.

Mas é razoável admitir que o valor exato exista e que embora ele não seja conhecido, podem-se estimar os limites do intervalo em que ele se encontra. O cálculo da incerteza associada a uma medição permite avaliar o grau de confiança nos resultados obtidos.

Os resultados experimentais não são uma representação exata do valor da grandeza medida. Sempre cometem-se imprecisões. Se a medição da grandeza for repetida várias vezes, sempre nas mesmas condições, obtém-se em geral valores diferentes. Só por um acaso, algum destes valores coincidirá com o "valor verdadeiro" da grandeza.

O afastamento entre si dos vários valores obtidos para a mesma grandeza pode dar uma ideia da exatidão com que é feita a medição.

A medição de uma grandeza deve ter como objetivos adotar um valor como melhor estimativa do verdadeiro valor da grandeza e ter alguma indicação sobre a imprecisão da medida.

O erro é inerente ao próprio processo de medida, isto é, nunca será completamente eliminado. Poderá ser minimizado procurando-se eliminar o máximo possível as principais fontes de erros. Portanto, ao realizar medidas, é necessário avaliar quantitativamente os erros cometidos.

Quando efetua-se uma medida ou várias medidas, o valor dessa grandeza deve ser expresso pela relação

$$x = \bar{x} \pm n s_x \quad (2.1)$$

No caso de uma única medida, \bar{x} é a própria medida e para várias medidas é a média dos valores medidos, e $n s_x$ é chamada de incerteza. Para uma única medida ou várias medidas o valor de s_x é o desvio padrão, calculado para as medidas realizadas ou um valor arbitrado como satisfatório de acordo com experiências prévias. O valor de n é um valor arbitrado ou acordado entre as partes que usarão os resultados da medição. Muitas vezes n é usado como um valor entre 1 e 3.

2.3. Distribuição Normal ou Gaussiana

Uma das distribuições mais estudadas e utilizadas na estatística é a distribuição normal. A importância desta distribuição deve-se à existência de muitas variáveis associadas a fenômenos naturais que seguem o modelo normal. A distribuição normal ou gaussiana é definida para todos os números reais, é simétrica com média \bar{x} e variância s_x^2 e é definida por:

$$f(x) = \frac{1}{s_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2s_x^2}} \quad (2.2)$$

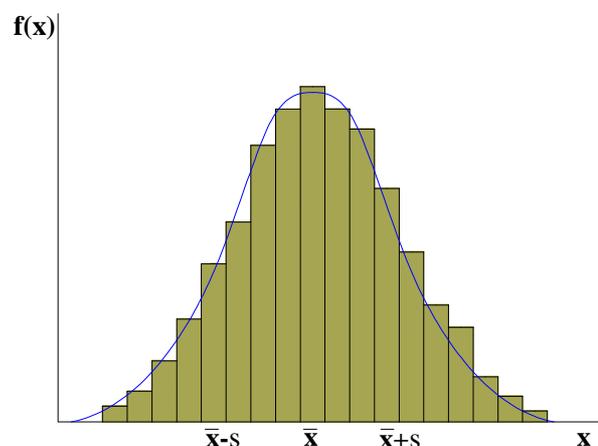


Figura 2.1 – Distribuição Normal ou Gaussiana

Esta distribuição descreve bem a estatística de muitos fenômenos contínuos e simétricos em relação à média, por exemplo:

- Medições repetidas em metrologia;
- Resistências (ao escoamento, à tração, dureza, etc.) de componentes estruturais de um mesmo lote;
- Velocidade das moléculas de gases numa temperatura fixa;
- Dimensão das peças de um mesmo lote de produção;
- Propriedades físicas como altura ou peso;
- Desgaste de peças que trabalham sob condições similares, etc. [4].

2.4. Probabilidade de Falha – POF

A probabilidade mede a incerteza que se tem sobre o resultado de uma experiência aleatória. A probabilidade de Falha (POF) é definida então como a susceptibilidade de falha de um determinado componente da máquina devido a um determinado mecanismo de dano.

Uma forma analítica para a determinação da *POF* pode ser perpetrada pelo uso da Resistência dos Materiais. A Resistência dos Materiais procura definir e analisar os estados de tensões nos diversos pontos críticos de componentes que podem apresentar algum tipo de deterioração pelo uso ou modo de falha estrutural, e verificar a admissibilidade de sua utilização segura.

Uma apresentação generalizada do modo analítico de cálculo da probabilidade de falha é descrita a seguir:

Define-se *Capacidade C* como a carga ou tensão máxima que um componente suporta antes de atingir algum tipo de estado limite, tal como a ruptura, o escoamento, a fadiga ou a flambagem. *Demanda D* é a carga ou tensão que atua em um componente dentro de sua realidade de funcionamento. A demanda é, por exemplo, a carga máxima de operação que, para o componente

novo, sem defeito, é determinada por um código de projeto. Se C e D forem duas variáveis aleatórias com médias e desvios padrões respectivamente definidos como \bar{C} , \bar{D} , s_C e s_D , a *margem de segurança* M também será uma variável aleatória com média e desvio padrão definidos como:

$$M = C - D \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \bar{M} = \bar{C} - \bar{D} \\ s_M = \sqrt{s_C^2 + s_D^2} \end{array} \right\} \quad (2.3)$$

A variável padrão z_M de M é dada por:

$$z_M = \frac{M - \bar{M}}{s_M} \quad (2.4)$$

A probabilidade de falha é a probabilidade da variável M ser menor que zero, e é dada por:

$$POF(M < 0) = POF\left(z_M < -\frac{\bar{M}}{s_M}\right) \quad (2.5)$$

A figura 2.2 mostra um esquema resumido do modo analítico do cálculo da probabilidade de falha:

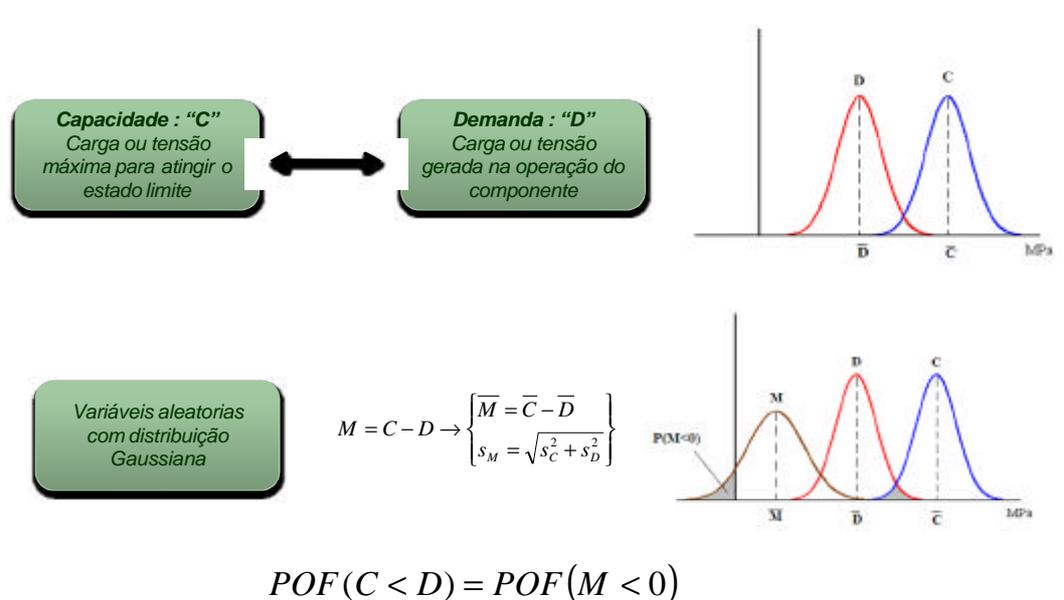


Figura 2.2 – Esquema do cálculo da Probabilidade de Falha

2.5. Confiabilidade Estrutural

A confiabilidade de uma estrutura é definida como o complemento da Probabilidade de falha, POF, de acordo com a seguinte expressão:

$$\text{Confiabilidade} = 1 - \text{POF} \quad (2.6)$$

Geralmente, é comum usar a probabilidade de falha como a medida da confiabilidade de uma estrutura. A probabilidade de falha depende do tipo de distribuição de probabilidade. Uma escolha apropriada está sujeita às características físicas dos processos de deterioração que causam o dano nos componentes.

Para problemas reais, onde podem existir várias variáveis e com distribuição não normal, o cálculo da probabilidade de falha é mais complexo. Por este motivo, métodos alternativos são geralmente empregados na sua avaliação. Estes métodos se dividem basicamente em métodos analíticos, tal como o método de confiabilidade de primeira ordem conhecido como FORM (First Order Reliability Method) e métodos baseados na simulação de Monte Carlo. A utilização destes métodos não formam parte do escopo deste trabalho desde que serão assumidas como gaussianas todas as variáveis utilizadas para o cálculo da probabilidade de falha, uma descrição e exemplos da utilização destes métodos podem-se encontrar em [5].

2.6. Consequência de Falha – COF

A consequência de falha (COF) é definida como um prejuízo produzido pela falha da estrutura e se manifesta principalmente das seguintes formas:

- Aumentando os custos ou reduzindo o benefício econômico da empresa (consequências econômicas).
- Causando dano à integridade das pessoas ou da máquina (consequências de segurança).

- Afetando o meio ambiente (consequências ambientais).

É importante ressaltar que as consequências de falha são funções das condições operacionais, das medidas de prevenção e da possível mitigação de acidentes, não sendo influenciadas pelos planos de inspeção, que são agentes redutores da probabilidade de falha estrutural

2.7. Risco

Quantitativamente, o risco é definido como o produto da probabilidade de falha *POF* por sua consequência *COF*.

$$RISCO = POF \times COF \quad (2.7)$$

2.8. Inspeção Baseada em Risco – IBR

A IBR segundo a Norma API 581 RBD - Risk-Based Inspection-Base Resource Document [6], publicada em maio de 2000 pelo Instituto Americano do Petróleo, é uma metodologia integrada que evidencia o risco na tomada de decisões no programa de inspeção e manutenção.

A IBR é considerada “integrada” porque combina, sistematicamente, tanto a probabilidade quanto a consequência da falha para estabelecer uma lista priorizada das partes do equipamento, usando o risco total como uma base. Desta lista, o usuário pode projetar um programa de inspeção que gerencia o risco das falhas nas partes do equipamento pela redução do risco ou mantendo um nível aceitável de risco [7].

A IBR se propõe a fornecer uma combinação ótima do método ou técnica de inspeção e sua frequência. Através desta combinação são concentrados esforços para cobrir os itens de risco elevado, aplicar esforço apropriado nos equipamentos de baixo risco ou não reparar até que eles sofram dano. O aumento do custo de inspeção em equipamentos de alto risco pode ser compensado pela redução da

inspeção em equipamentos de baixo risco. A IBR permite também um aumento na vida operacional dos equipamentos, pois, identificando os mecanismos de dano atuantes e mitigando ou controlando tanto a probabilidade como a consequência de falha, pode-se aumentar o período de vida normal do equipamento.

Deve-se saber também que o Risco não pode ser reduzido a zero, pois diversos fatores inesperados podem ocorrer, tais como: erro humano, desastres naturais, eventos externos, sabotagem, limitação dos métodos de inspeção, erro de projeto e desconhecimento de mecanismos de deterioração [8].

A figura 2.3 mostra, de forma qualitativa, o comportamento do risco em função do grau da atividade da inspeção. A curva superior mostra um típico programa de inspeção que indica que quando não há inspeções, o nível de risco é muito alto. Aumentando o nível e a eficácia da atividade de inspeção, o risco pode ser reduzido de forma significativa. A curva inferior mostra um programa de Inspeção baseado em Risco, o qual indica que níveis de risco mais baixos podem ser obtidos com um mesmo nível de atividade de inspeção que, entretanto é otimizada e direcionada para os equipamentos de maior risco. Pode-se notar também na Figura 2.3 que mesmo que as atividades de inspeção sejam otimizadas, o nível de risco atinge um ponto a partir do qual não há mais redução.

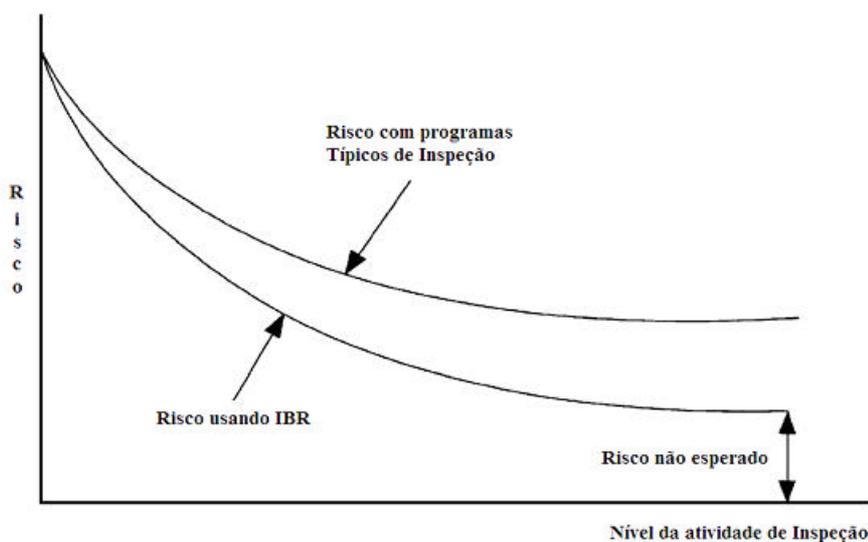


Figura 2.3 – Risco vs. Atividade de Inspeção

2.8.1. Análise Qualitativa do Risco

A análise qualitativa é baseada no conhecimento que se tem do processo, na experiência do analista, no histórico do equipamento ou de equipamentos similares. Os resultados podem ser expressos em termos qualitativos como baixo, médio e alto [9]. A análise qualitativa tem como objetivo principal identificar a priori os equipamentos ou partes destes com maior nível de risco, para enquadramento numa das três regiões da matriz da figura 2.4

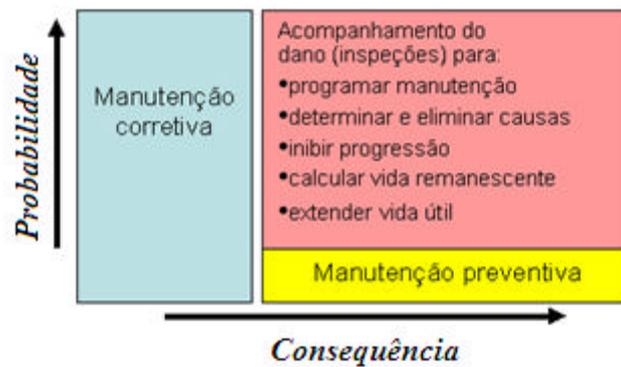


Figura 2.4 – Matriz de Risco

Equipamentos que tenham seu risco classificado na área à direita e acima da Figura 2.4 são submetidos a análises de risco mais detalhadas, denominadas de análises quantitativas. Outro tipo de matriz de risco é mostrado na Figura 2.5. Ela classifica tanto a Probabilidade de Falha como a Consequência de Falha em diferentes níveis.

Probabilidade de Falha	4				
	3				
	2				
	1				
		1	2	3	4
		Consequência de Falha			

Figura 2.5 – Matriz de Risco Qualitativa

2.8.2. Análise Quantitativa do Risco

Um fluxograma resumido da análise quantitativa do Risco é mostrado na figura 2.6. A análise considera não somente a inspeção, projeto do equipamento e registros de manutenção, mas também questões de gerência de segurança de processo e todas as outras questões significativas que possam afetar a integridade mecânica e a segurança em geral de um equipamento. A análise não considera unicamente os programas de inspeção para estabelecer o risco.

Quantitativamente, o risco é definido como o produto da probabilidade de falha *POF* por sua consequência *COF*, expressa em termos de alguma unidade, tal como volume vazado, área atingida ou perdas em unidades monetárias.

$$Risco = POF \times COF \quad (2.8)$$

O conhecimento do risco de uma falha estrutural exige que se realize a avaliação de integridade estrutural. No final da avaliação, entre outras conclusões, chega-se ao o valor da *POF* do equipamento ou componente que será, usada junto com a *COF* para a determinação do risco.

O objetivo da análise quantitativa é identificar os mecanismos de falha mais influentes na degradação do equipamento ou na parte dele, estimar a extensão do dano, modelar as possíveis consequências em caso de falha, calcular quando a inspeção deveria ser executada e propor qual técnica de inspeção e com que eficácia esta deva ser usada para assegurar que o nível de risco não exceda o limite permissível.

Na análise quantitativa do risco, valores numéricos são calculados com unidade de medidas. Valores quantitativos podem ser expressos e mostrados em termos qualitativos, para simplicidade do reconhecimento dos intervalos da probabilidade e consequência de falha, e para um melhor gerenciamento do risco. A vantagem da análise quantitativa é que os resultados podem ser usados para calcular com certa exatidão quando o limite permissível de risco será atingido [10].

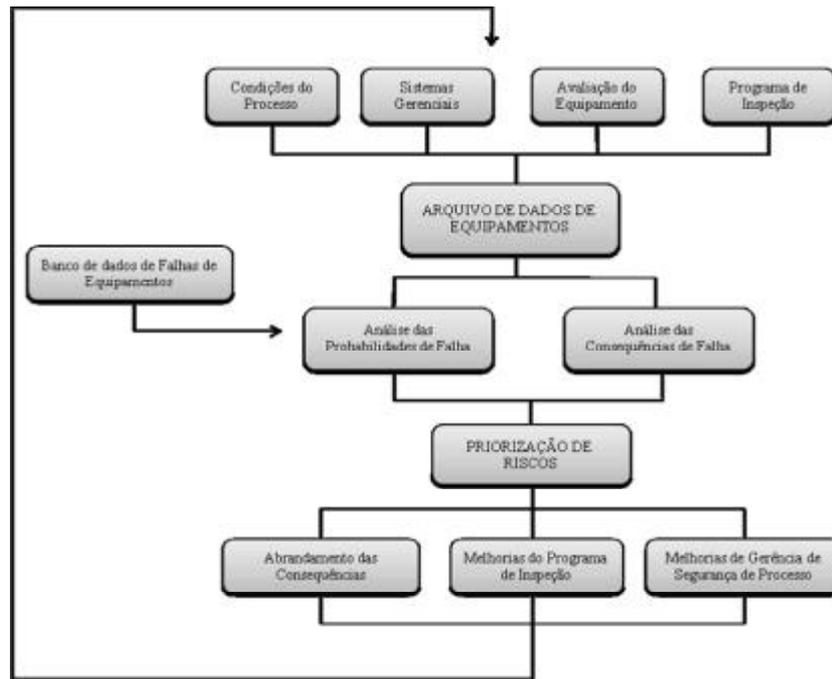


Figura 2.6 – Fluxograma geral de Análise Quantitativa do Risco [7].

2.8.3. Análise Semi-Quantitativa do Risco

A análise semi-quantitativa é um termo que descreve qualquer abordagem que possui aspectos derivados de ambas as abordagens qualitativas e quantitativas. É orientada para a obtenção dos maiores benefícios das abordagens anteriores. Normalmente, a maioria dos dados utilizados na análise quantitativa é necessária para esta abordagem, mas em menor detalhamento. Os modelos também podem não ser tão rigorosos como os utilizados para a abordagem quantitativa como demonstrado na figura 2.7. Os resultados são geralmente dados em categorias de consequência e probabilidade e não como números de risco, mas valores numéricos podem ser associados com cada categoria para permitir o cálculo de risco e à aplicação de risco adequada para os critérios de aceitação [11].

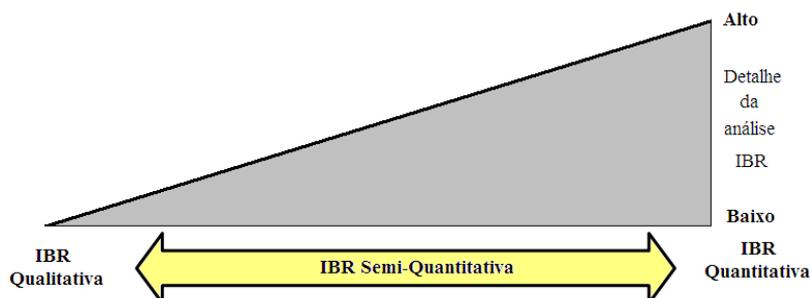


Figura 2.7 – Diagrama de Análise Semi-Quantitativa do Risco.