CAPÍTULO 2

MODOS DE FALHA E CONFIABILIDADE

A falha de elementos mecânicos é um processo que pode assumir as mais distintas formas, dependendo do tipo de aplicação, do material, das condições ambientais, etc. Neste capítulo vamos procurar identificar e descrever sucintamente as principais formas pelas quais um componente mecânico pode falhar. De um modo genérico, a falha pode ser definida como a incapacidade do componente corresponder à demanda que lhe é exigida, ou seja, a sua capacidade é inferior à demanda. Os termos capacidade e demanda foram escolhidos para indicar que o desempenho do componente pode ser limitado de diversas formas, como por exemplo, um valor máximo de carga, acima do qual ocorre a ruptura do material, ou uma voltagem máxima, limitada pela capacidade de isolamento elétrico, ou uma taxa de dissipação do calor gerado, abaixo da qual a temperatura ultrapassa os valores toleráveis pelo lubrificante ou pelos materiais sintéticos dos isolamentos, etc. Aqui vamos nos preocupar apenas com os componentes mecânicos e os seus modos de falha mais característicos. As formas com que o componente estrutural pode falhar dependem do tipo de carregamento, tipo do material, condições ambientais, tempo de vida, cuidados com manutenção, etc. Uma distinção bem marcante pode ser feita, considerando os modos que não são influenciados pela idade do componente, ou tempo de aplicação do carregamento e os modos que dependem do tempo de vida ou de carregamento.

Quando do estudo da confiabilidade, a exata definição do que é a falha do produto é fundamental. A falha do produto corresponde ao instante em que este deixa de cumprir a função a que se propõe, ou seja, deixa a descoberto a funcionalidade desejada. Deste modo, esta funcionalidade deve ficar muito bem definida quando da determinação dos requisitos de projeto do produto, de forma a permitir, em todas as etapas do ciclo de vida do produto, verificar a ocorrência ou não de uma falha. Assim, de uma maneira bastante abrangente, a falha é simplesmente o fato de que a funcionalidade do produto deixa de ser atendida, em decorrência de algum evento.

2.1 - MODOS DE FALHA INDEPENDENTES DO TEMPO

Os modos de falha tratados como independentes do tempo são os que possuem igual probabilidade de ocorrer, qualquer que seja a vida ou tempo de uso do produto considerado. Estes modos se manifestam quando a estrutura em questão sofre uma sobrecarga ou um pico de solicitação, levando a uma falha na forma de uma ruptura, ou um empenamento. Os principais modos de falha deste tipo estão comentados logo a seguir, sendo que alguns são detalhados ao longo do texto, nos Capítulos seguintes.

FRATURA

Neste caso vamos considerar inicialmente os modos de falha que levam à ruptura do material, ou seja, à separação do sólido em duas ou mais partes. Em geral o processo de desenvolvimento da fratura é dividido em duas etapas distintas, início da fratura e propagação desta. Uma fratura pode ser classificada em duas categorias gerais, fratura dútil e fratura frágil. Uma fratura dútil é caracterizada por uma apreciável deformação plástica na nucleação e na propagação da trinca. Uma deformação plástica em nível macroscópico é também encontrada nas superfícies de falha. Uma fratura frágil nos metais é caracterizada por uma grande velocidade de propagação da trinca, com pequena deformação plástica, mesmo em um nível microscópico. Um metal pode ter uma ruptura dútil ou frágil, dependendo da temperatura, estado de tensões e velocidade de carregamento. Para simplificar o desenvolvimento vamos nos restringir a um carregamento estático de tração, que leva à ruptura.

Neste ponto devem ser deixados bem claros os conceitos de fratura frágil e de fratura dútil. Isto deve-se à necessidade de diferenciar uma classificação que pode ser quanto ao aspecto macroscópico da fratura, ou quanto ao mecanismo metalúrgico envolvido, logo no aspecto microscópico. Assim, uma ruptura macroscopicamente dútil possui elevadas deformações plásticas. Já uma ruptura microscopicamente dútil pode ser macroscopicamente dútil ou frágil. A discussão que segue diz respeito ao comportamento microscópico associado ao mecanismo metalúrgico de falha.

FRATURA DÚTIL

Corpos policristalinos de metais muito dúteis podem se deformar plasticamente até que a seção transversal fique reduzida a um ponto, como ilustrado na figura 2.1. Já para a ruptura sob tração, de metais moderadamente dúteis, a deformação plástica produz uma redução na seção transversal, provocando um estado triaxial de tração no interior do material. Esta triaxialidade diminui a capacidade de deformação plástica e a ruptura pode processar-se por um mecanismo de nucleação de vazios, em torno de impurezas, no centro do material. Esta nucleação passa a uma etapa de crescimento destes vazios, com a continuidade da deformação plástica, até o instante em que os vazios começam a se unir, levando à ruptura da região central, extendendo-se após por cisalhamento. O resultado é a familiar fratura tipo cone e taça. Os modos dúteis de fratura ocorrem como resultado de uma extensiva deformação plástica, ao menos a nível microscópico, seja por crescimento de vazios seja por cisalhamento. O modo de falha por crescimento de vazios ocorre quando a deformação plástica atinge um nível tal que os vazios originados nas impurezas do material passam a coalescer, formando uma trinca de dimensões comparáveis com a geometria do componente. Esta deformação plástica crítica é altamente sensível ao estado de tensões a que a região está sujeita, medido pela relação σ_m / σ_{eq}, bem como à curva tensão-deformação do material. Embora o mecanismo metalúrgico de ruptura seja dútil, macroscopicamente a falha pode ter uma aparência frágil. O critério de ruptura dútil por cisalhamento é dado pela expressão (2.1) e o critério para uma ruptura dútil por nucleação, crescimento e coalescimento de vazios é expresso pela equação (2.2).

$$\tau \geq \tau_E \tag{2.1}$$

$$\varepsilon \geq \varepsilon_f^* \left(\sigma_m / \sigma_{eq}\right) \tag{2.2}$$

FRATURA FRÁGIL

Uma ruptura metalurgicamente frágil é caracterizada pela separação das duas porções do material segundo um plano perpendicular à tensão de tração, sendo este um plano atômico da rede cristalina. Este é o chamado mecanismo de ruptura por clivagem, sendo controlado pelas tensões de tração que agem perpendicularmente ao plano cristalográfico de clivagem. Quando esta tensão ultrapassa um valor crítico tem início o processo de ruptura. A superfície rompida por clivagem aparece brilhante e granular, devido à reflexão da luz nos planos de clivagem expostos, enquanto a ruptura por cisalhamento, quando observada com pequena ampliação, se mostra cinzenta e fibrosa. Em geral, a superfície rompida apresenta uma ruptura mista, com uma fração da área fraturada de modo frágil e o restante de modo dútil. O critério de falha na ruptura frágil é dado pela máxima tensão normal que atua no material, σ_1, a qual não pode ultrapassar a tensão crítica de clivagem, σ_{cl}. Assim, o critério de ruptura frágil é:

$$\sigma_1 \geq \sigma_{cl} \tag{2.3}$$

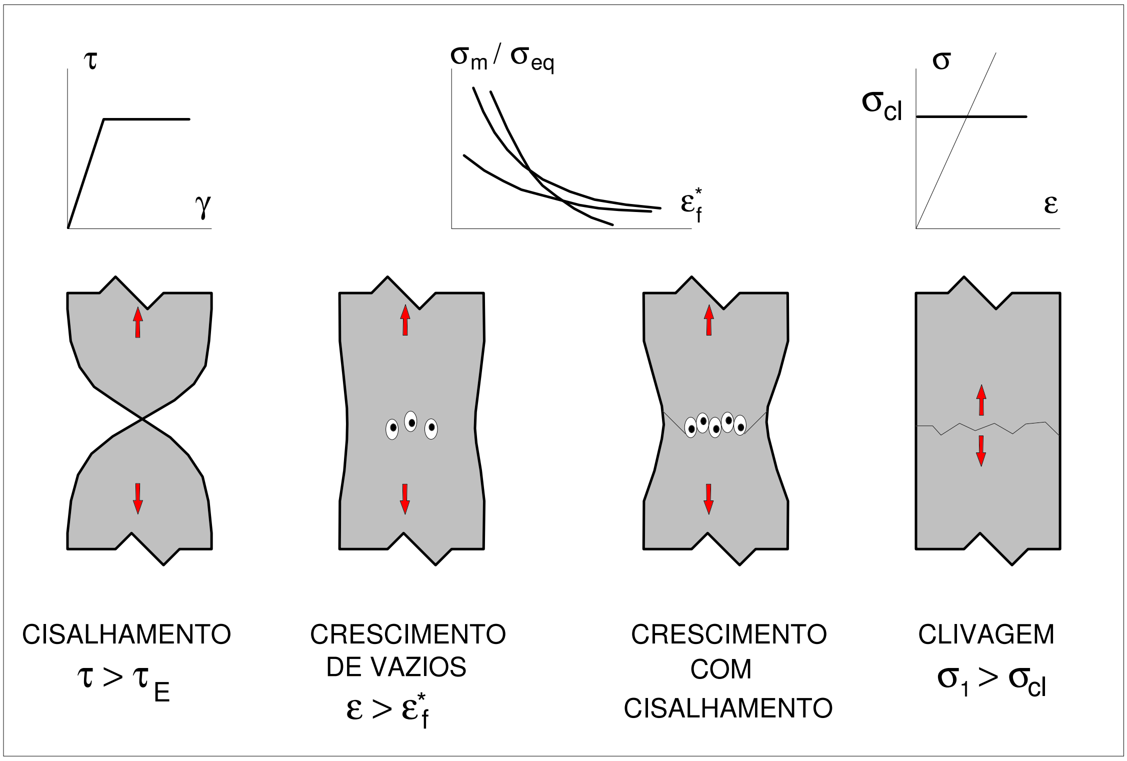

Figura 2.1 - Mecanismos de ruptura dútil e frágil de corpos de prova.

FRATURA NA PRESENÇA DE DEFEITOS

Os dois modos de falha por ruptura acima discutidos consideram o material isento de defeitos macroscópicos. Ocorre, no entanto, que em muitas situações o material da peça possui defeitos no seu interior, sejam defeitos oriundos do próprio processo de fabricação, sejam defeitos que surgiram pela operação em serviço. Em qualquer uma das duas situações o problema de analisar a ruptura do material deve ser feito com o uso das ferramentas e conceitos da Mecânica da Fratura, como discutido nos Capítulos 6 e 7. A Mecânica da fratura define o fator de intensidade de tensão, K_I, que caracteriza a solicitação no extremo da trinca, o qual não pode ultrapassar um valor crítico, K_{IC}, denominado tenacidade à fratura, uma propriedade do material da peça. O critério de falha neste caso é:

$$K_I \geq K_{IC} \tag{2.4}$$

INÍCIO DE ESCOAMENTO

Em muitas aplicações é necessário que o material esteja integralmente dentro do regime elástico, para garantir um nível de deformações baixo e recuperável, como no caso de eixos de alta velocidade, de modo a manter o balanceamento em serviço, por exemplo. Outro caso típico é o de dispositivos de medição e de controle dimensional, em que a rigidez é fundamental e as tensões devem ser bem inferiores à tensão limite de escoamento. Nestes casos o início de escoamento já caracteriza a falha do componente. Outro exemplo é quando se necessita de precisão de posicionamento do mecanismo que está sendo projetado, onde um pequeno escoamento pode provocar uma deformação permanente na geometria e levar a uma conseqüente perda de precisão do dispositivo. Para situações em que um pequeno escoamento nos pontos de concentração de tensão não é problema, este modo de falha passa a ser muito conservativo, não sendo econômico. A falha ocorre no ponto mais solicitado da peça e assim o critério de falha é:

$$\sigma_{eq\ máx} = \sigma_E \qquad (2.5)$$

PLASTIFICAÇÃO GENERALIZADA

No caso de aplicações em que pode ser tolerada uma deformação plástica, provavelmente localizada em detalhes que levam a uma concentração de tensão, considerar como critério de falha o início de escoamento é muito conservativo, a favor da segurança. Assim, é mais realista considerar como critério de falha a situação em que se tem uma plastificação generalizada na seção crítica, condição em que a capacidade de suportar carga fica esgotada. Outra possibilidade é admitir um certo nível de deformação plástica no ponto mais solicitado, como, por exemplo, igual ao nível da deformação de início de escoamento, da ordem de 0,002. Nesta situação a falha fica caracterizada por uma plastificação que ocorre sobre um volume finito do material. Este é um critério de falha em que o cálculo de uma tensão máxima no ponto mais solicitado do material não é significativo. No modo de falha por plastificação generalizada em geral considera-se que o material é do tipo elasto-plástico ideal, logo sem encruamento. Esta é uma hipótese conservativa. Neste caso o critério de falha pode ser escrito como na equação (2.6), que deve se verificar para todo e qualquer ponto da seção transversal analisada,

$$\sigma_{eq} = \sigma_E \qquad (2.6)$$

FRAGILIZAÇÃO POR HIDROGÊNIO

Um modo de falha que em certos aspectos se assemelha a uma corrosão sob tensão é a fragilização por hidrogênio. Neste caso a falha tem início quando átomos de hidrogênio são liberados, como no caso de tratamentos de galvanização, ou solda, ou então em consequência do ambiente de trabalho, difundindo-se pela estrutura cristalina do material, devido ao seu diâmetro extremamente pequeno. Estes átomos acomodam-se em certos pontos do material, onde novos átomos vão chegando, combinando-se com os existentes, gerando assim uma molécula de hidrogênio H_2, que agora não tem mais mobilidade dentro da rede cristalina, pelas suas dimensões. O acúmulo de moléculas faz com que a pressão gerada dentro do material atinja valores extremamente elevados, com a formação de um estado de tensões de tração, que pode até, em casos extremos, levar o material a sofrer uma ruptura espontânea. Neste caso pode ocorrer uma ruptura sem qualquer razão aparente, com a peça, por exemplo, apenas armazenada. Se o hidrogênio atômico penetra no material em consequência do ambiente de trabalho, este modo de falha pode ser encarado como dependente do tempo.

FLAMBAGEM

A falha por flambagem ocorre quando temos uma combinação crítica de rigidez do conjunto estrutura-sistema de aplicação de carga, na qual os deslocamentos transversais passam a crescer de uma forma significativa, mesmo para uma carga constante. Neste caso a peça perde a sua forma original, alterando a geometria e comprometendo o seu desempenho em serviço. Este modo de falha é característico de estruturas esbeltas nas quais ocorrem tensões de compressão. A instabilidade que leva a falha por flambagem pode ocorrer de um modo global, como no caso clássico de colunas, ou de uma forma local, quando a instabilidade fica restrita a uma deformação local nas paredes da peça, no início, mas que pode levar após a um colapso a nível global da estrutura em consideração.

DEFORMAÇÃO ELÁSTICA EXCESSIVA

Em muitas situações práticas as tensões que se desenvolvem no material são relativamente baixas, não levando o material a nenhum modo de falha que comprometa a sua resistência mecânica. No entanto a peça ou estrutura pode vir a falhar por uma flexibilidade excessiva, onde os deslocamentos passam a ser muito grandes, acima de um máximo admissível. Nestes casos se torna necessário atuar sobre a rigidez do projeto. Este caso pode ocorrer facilmente quando adota-se seções relativamente esbeltas para suportar a carga, qu age em uma direção. Ocorre no entanto que cargas adicionais, como devido a uma excentricidade, podem surgir em direções diferentes, levando a deslocamentos inaceitáveis.

2.2 - MODOS DE FALHA DEPENDENTES DO TEMPO

O tempo de uso do produto pode afetar a falha de componentes das mais variadas formas, dependendo do modo de falha, porém todos estes modos de falha são caracterizados por algum tipo de envelhecimento ou desgaste do material. Isto é traduzido como uma perda gradativa das propriedades que tornam o material adequado ao uso pretendido, fazendo com que a funcionalidade da peça fique pouco a pouco comprometida. Temos vários modos de falha que podem ser considerados como dependentes do tempo, ou também chamados de modos de falha por envelhecimento ou ainda, desgaste. Logo a seguir são discutidos os mais importantes.

FADIGA

A fadiga é um processo de redução da capacidade de carga de componentes estruturais pela ruptura lenta do material, através do avanço quase infinitesimal da trinca a cada ciclo de carregamento. A fadiga ocorre pela presença de tensões que variam com o tempo, que provocam deformações plásticas cíclicas localizadas nos pontos mais críticos. Estas deformações levam a uma deterioração do material que dá origem a uma trinca de fadiga que, com o prosseguimento do carregamento variável, vai crescendo, até atingir um tamanho suficiente para provocar a ruptura final. O processo de nucleação da trinca de fadiga depende das tensões cisalhantes cíclicas que atuam, enquanto que para a propagação são importantes as tensões de tração, que fazem com que as pequenas trincas que foram nucleadas venham a crescer e levem à ruptura final.

DEFORMAÇÃO PLÁSTICA PROGRESSIVA

Quando a peça sofre um carregamento cíclico de magnitude tal que o material experimenta deformações plásticas, a existência de uma carga média faz com que as deformações plásticas sejam direcionadas no sentido da carga média, produzindo um efeito de deformação progressiva da peça. Numa situação como esta, em cada ciclo de carga as deformações plásticas não são simétricas, em decorrência da carga média. Desta forma, cada ciclo de carga provoca uma pequena deformação plástica, resultante da diferença entre o escoamento em um e outro sentido, deformação esta que vai se acumulando até inviabilizar o uso da peça ou do produto, pela distorção final que resulta após um certo número de ciclos.

CORROSÃO

A corrosão pode ser definida como a destruição de um corpo sólido por uma ação química ou eletroquímica não intencional, que invariavelmente inicia na superfície do corpo. No caso dos metais o ataque ocorre quase sempre por uma ação eletroquímica, devida à característica estrutural dos metais, que permite fenômenos como o movimento de elétrons dentro da rede cristalina. Como os materiais não metálicos não exibem esta propriedade, eles podem ser atacados apenas pelos meios corrosivos capazes de reagirem quimicamente com eles dentro de certas condições. Muitos fenômenos de corrosão são em essência eletroquímicos e envolvem a presença de um eletrólito em contato com o metal. Este eletrólito é usualmente uma solução aquosa de um sal, ácido ou álcali e conseqüentemente este tipo de corrosão é denominado úmido. Todos os outros fenômenos de corrosão envolvendo reações químicas entre o metal e um líquido, ou gás, que não é um eletrólito, são classificados como corrosão a seco.

CORROSÃO SOB TENSÃO

A superposição de um esforço mecânico com um meio ambiente agressivo ao material pode levar ao surgimento de um outro tipo de corrosão, a chamada corrosão sob tensão. Este tipo de corrosão difere da corrosão tradicional por dois aspectos básicos. Em primeiro lugar, a corrosão ocorre apenas em pontos muito localizados, como por exemplo nos contornos de grão. Neste caso a aparência externa do material não evidencia a degradação que o material sofre. Este ataque localizado vai penetrando, podendo comprometer a capacidade de carga da peça pelas trincas que se formam a partir dos pontos de ataque. Em segundo lugar, o meio ambiente que provoca a corrosão sob tensão no material é um meio com composição química particular, para aquele tipo de material, que vem assim a ativar o processo. Isto significa que, para um dado material, de todos os meios agressivos que levam a uma corrosão, apenas uns poucos provocam uma corrosão sob tensão. Deste modo, a corrosão sob tensão ocorre apenas em certas combinações de material e meio ambiente, desde que somada a esta combinação tenhamos a ação de um estado de tensões. Este estado de tensões pode ser proveniente dos esforços de operação, ou produzido por um estado residual de tensões, presente no material, mesmo na ausência de cargas externas.

FLUÊNCIA

Para componentes que operam a temperatura elevadas temos a presença de outros mecanismos de falha, que se tornam operantes a temperaturas da ordem de 0,3 T_F e superiores, sendo T_F a temperatura absoluta de fusão do material. Nestas temperaturas novos mecanismos de deformação podem se tornar ativos. Estes mecanismos passam a provocar no material uma deformação irreversível que cresce de forma constante com o tempo, mesmo que o carregamento seja mantido constante. A velocidade com que a deformação ocorre depende tanto da temperatura a que o material está submetido como do nível de tensão aplicada. Outro fator a considerar é o efeito de uma exposição prolongada à alta temperatura sobre a estabilidade metalúrgica, ou seja, metais encruados irão recristalizar e sofrer um crescimento de grão, enquanto que as ligas endurecidas por precipitação podem sofrer um super envelhecimento e perder resistência devido ao crescimento das partículas de segunda fase. Outro problema é a oxidação, que se torna sensivelmente mais ativa a altas temperaturas.

DESGASTE

Aqui nos referimos ao desgaste do material, por remoção deste, seja através do processo de aderência e remoção de partículas do material de um dos elementos do par de atrito para o outro, seja por arrancamento de metal por partículas mais duras, que colidem com este. O primeiro tipo de desgaste é denominado de desgaste adesivo e depende muito das condições de lubrificação e também da compatibilidade dos dois metais em contato. O segundo tipo de desgaste é o tipo abrasivo, onde a principal variável é a dureza do material. O desgaste abrasivo pode ocorrer pela presença de partículas duras entre as duas superficies em atrito ou então pelo contato de uma superfície dura e áspera sobre outra mole. Este último caso foi praticamente eliminado nos equipamentos atuais pelo uso de um acabamento esmerado nas superfícies duras.

2.3 CONFIABILIDADE

O projeto de sistemas e componentes estruturais de muitos sistemas mecânicos, como os veiculares, possuem características peculiares, quanto ao tipo de solicitação atuante, tipicamente dinâmica e imprevisível, e quanto aos requisitos da segurança em operação. Esta segurança deve ser traduzida em parâmetros de projeto, em geral na forma do tradicional coeficiente de segurança. Com a exigência sempre crescente de competividade, em termos de desempenho de produto, redução de custos, e menores prazos de desenvolvimento do produto, aplicações em casos diferentes do habitual e o uso de modernas ferramentas de projeto, como os sistemas CAE/CAD/CAM, o procedimento tradicional de projeto mecânico deve sofrer significativas reformulações, para fazer frente a estas novas situações. O assunto deste capítulo procura enfocar um dos pontos que é, ainda hoje, tratado de uma forma subjetiva, para não dizer empírica, que é da caracterização dos níveis de segurança adequados a um dado projeto. O enfoque proposto para a análise de segurança faz uso dos conceitos probabilísticos, de forma a fornecer uma ferramenta suficientemente potente para resolver situações onde a solicitação é aleatória, excitando dinamicamente a estrutura, permitindo uma criteriosa avaliação do nível de segurança existente ao longo da vida do produto. A metodologia desenvolvida pode ser aplicada de uma forma bastante simples, quando no desenvolvimento do projeto preliminar, pelo uso de um fator de projeto calculado adequadamente, ou então em uma etapa de avaliação do projeto, onde pode ser acoplada diretamente com os modernos métodos numéricos de análise de tensões, como o método de elementos finitos ou de elementos de contorno, ou ainda com métodos experimentais.

A teoria clássica de projeto ignora o fato de que muitas variáveis em Engenharia não são valores perfeitamente definidos, mas que variam dentro de um certo intervalo. O processo clássico de projeto, com o uso de um coeficiente de segurança, é simples e fácil de empregar, mas peca pela falta de um maior rigor no tratamento quantitativo das variáveis de projeto. A necessidade de estabelecer uma base mais racional, com métodos precisos na determinação da performance estrutural, tornou-se clara com um uso cada vez maior de sistemas com requisitos de alto desempenho, com custos bastante elevados, o que implica em uma grande responsabilidade por parte do projetista. Nestes tipos de aplicações, em que um mínimo de peso, extrema segurança e confiança no desempenho são exigências primordiais, o caminho mais aceitável para trabalhar com as variáveis de projeto é adotar um procedimento probabilístico. A diferença fundamental entre o método clássico do projeto mecânico e o enfoque probabilístico consiste no fato de se admitir neste último uma probabilidade de falha. No método clássico a probabilidade de falha do projeto fica oculta por um coeficiente de segurança. Por outro lado, com o enfoque probabilístico, de uma maneira mais condizente com a realidade, admitimos a existência de uma chance de falha.

O termo confiabilidade está intimamente ligado à confiança em algo. No caso do projeto em Engenharia, está relacionado com a confiança sobre um projeto executado. Tal pode ser traduzido pela segurança do projeto quando em uso. A segurança de um sistema estrutural é habitualmente obtida através de um coeficiente de segurança, de escolha um tanto arbitrária. O uso de uma margem de segurança se faz necessário, pois apenas em raras ocasiões o projetista conhece com exatidão o valor de todas as variáveis de projeto. Por outro lado, uma análise feita com todo o cuidado e rigor pode ficar desprovida de valor, se a precisão de seus resultados for diluida pelo uso de fatores empíricos, de escolha arbitraria, baseados em considerações as vezes pouco relevantes. Assim, um dos objetivos da análise de confiabilidade é justamente definir a margem de segurança a usar, através de um fator de projeto, definido como a relação entre os valores médios da resistência e da solicitação. O coeficiente de segurança real que existe é tratado como uma variável aleatória, podendo assumir qualquer valor. O fator de projeto é determinado a partir das dispersões das variáveis de projeto e do grau de segurança necessário.

É conveniente neste ponto definir com precisão o termo confiabilidade, o qual pode ser então colocado como:

"Confiabilidade é a probabilidade de que um componente, ou sistema, operando dentro dos limites de projeto, não falhe durante o período de tempo previsto para a sua vida, dentro das condições de agressividade do meio".

Desta definição vemos que três fatores são relacionados com a confiabilidade, que são, em primeiro lugar a definição do que é a falha do sistema. Em segundo lugar tem-se o período de vida e em terceiro lugar, o meio ambiente onde o produto foi posto a operar.

Da teoria da confiabilidade, esta pode ser expressa, de modo aproximado, para um conjunto de produtos idênticos postos a operar, como sendo a fração destes produtos que ainda é operacional, no instante de tempo considerado. Assim, considerando um conjunto com N_0 produtos idênticos entre sí, postos a operar em iguais condições de trabalho, após um certo tempo de operação, teremos um número de produtos ainda operacionais N(t), menor ou igual ao número inicial, N_0. Assim, para um instante de tempo qualquer, a confiabilidade pode ser fornecida por

$$C(t) = N(t) / N_0$$

Introduzindo o conceito de taxa de falhas, h(t), como a fração de produtos que falham, na unidade de tempo, e considerando que durante um intervalo de tempo Δ t falham Δ N produtos, podemos escrever,

$$h(t) = \Delta N / N(t) / \Delta t$$

e aplicando a expressão da confiabilidade, para $\Delta t \Rightarrow 0$, chegamos a

$$h(t) = -\frac{dC(t)}{dt}\frac{1}{C(t)}$$

Desenvolvendo esta equação obtemos uma expressão para a confiabilidade, a partir da taxa de falhas, h(t), como

$$C(t) = \exp [- \int h(t)\, dt] \qquad (2.7)$$

A taxa de falhas pode ser pensada como a fração de produtos que falham, na média, por unidade de tempo. O comportamento típico da taxa de falhas em função do tempo está ilustrado na figura 2.2.

A taxa de falhas tem sua curva característica dividida em três regiões, ou períodos de vida bem distintos. No primeiro período temos as chamadas falhas prematuras, ou de infância, onde o produto apresenta um percentual elevado de falhas. Estas falhas são decorrentes de produtos que foram colocados em operação, mas que estão fora das especificações, por problemas de peças fora de tolerância, montagem errada, falta de lubrificante, folgas e calibração erradas, etc. Assim, esta região tem como ponto central a qualidade do produto, ou seja, a gestão da qualidade é que atua sobre a intensidade da taxa de falhas. No segundo período, que inicia após o instante t_1, a taxa de falhas tem um comportamento que é praticamente constante, assumindo um valor mínimo. Neste período as falhas ocorrem de uma maneira totalmente aleatória, como consequência de sobrecargas eventuais que o produto sofre. Os modos de falha que ocorrem são os modos de falha independentes do tempo, ou por sobrecarga. O valor da taxa de falhas depende aqui da distância relativa entre os níveis de solicitação e de resistência do produto. Isto está relacionado com o grau de segurança que o produto possui, ou em outras palavras, a confiabilidade depende diretamente do projeto do produto. Esta região corresponde ao período de vida útil do produto, onde a taxa de falhas é denominada de taxa média de falhas, λ.

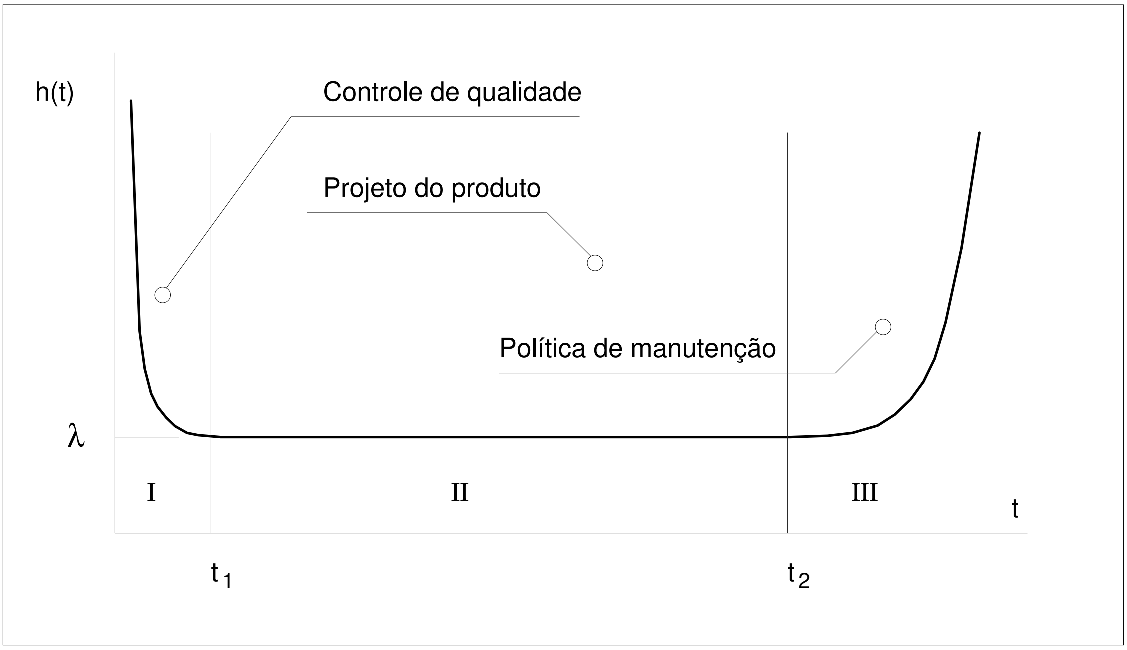

Figura 2.2 - Curva típica da taxa de falhas função do tempo.

Finalmente, o terceiro período corresponde ao início da deterioração de certas propriedades dos materiais que formam o produto, decorrência da vida deste. Estes modos de falha correspondem aos modos de falha dependentes do tempo, que necessitam de um certo tempo de vida para ativar os mecanismos de deterioração. Estes modos de falha começam a se manifestar apenas após o instante t_2. Esta é a região de desgaste, onde as peças mais sensíveis a um ou outro modo de falha dependente do tempo começam a comprometer o desempenho do produto. Neste período a política de manutenção é essencial para garantir uma confiabilidade adequada.

A avaliação da confiabilidade para um produto é feita considerando que, para uma dada vida, correspondente ao instante de tempo t, ela é a probabilidade de que não ocorra uma falha. Assim,

$$C(t) = P\ [\text{não ocorra falha para vida} < t]$$

onde a não ocorrência de falha implica que o sistema não venha a falhar por nenhum dos modos de falha possiveis de ocorrerem, seja um dos modos por sobrecarga ou um modo de falha por desgaste.

Os modos de falha por sobrecarga, também designados de modos de falha independentes do tempo, ou ainda de modos de falha por chance, são os modos que caracterizam-se por terem igual probabilidade de ocorrerem, seja nos primeiros cinco minutos de operação do produto, seja nos últimos cinco minutos da vida deste produto. Estes modos atuam em geral quando a demanda que é exigida do sistema, ou seja, a solicitação atuante, ultrapassa pela primeira vez a capacidade deste mesmo sistema, ou seja, a sua resistência, levando-o à falha. Esta categoria engloba os modos de falha por ruptura, plastificação, flambagem, etc.

Os modos de falha por desgaste, ou seja, dependentes do tempo de operação do produto, são também chamados de modos de falha por acúmulo de dano ou por envelhecimento. Estes modos caracterizam-se por necessitar um certo tempo de operação do sistema, em serviço ou não, para que iniciem a atuar, sendo portanto mais prováveis de ocorrerem conforme a vida vai aumentando. Estes modos atuam na forma de uma redução gradativa das propriedades dos materiais que formam as diferentes peças do sistema, que influem diretamente sobre sua capacidade. Esta categoria engloba as falhas por desgaste, por corrosão, por fadiga, por corrosão sob tensão, por fluência, etc.

Esta divisão entre os modos de falha é fundamental, pois a análise de resistência mecânica bem como a análise de confiabilidade, para cada uma das duas categorias, são feitas de forma independente, considerando as características específicas de cada uma, envolvendo diferentes modelos para caracterizar tanto o carregamento que atua, como a resistência do componente à cada modo de falha. Uma cuidadosa definição do que consiste a falha do produto deve ser realizada, conforme discutido no Capítulo 1, função dos requisitos do produto, que foram gerados quando do início do desenvolvimento do projeto. Adicionalmente, devemos analizar como que a falha do produto se relaciona com os modos de falha das peças, para permitir uma análise de resistência e de confiabilidade consistentes. De uma forma geral é possível dizer que a confiabilidade é dada por

$$C(t) = C_S(t)\ .\ C_D(t) \qquad (2.8)$$

sendo $C_S(t)$ a confiabilidade para os modos de falha por sobrecarga e $C_D(t)$ a confiabilidade para os modos de falha por desgaste. O objetivo passa a ser agora o de detalhar os modelos de falha por sobrecarga, que vão permitir o cálculo da confiabilidade do sistema para os modos de falha que se enquadram neste caso e após, apresentar os modelos de falha por desgaste ou acúmulo de dano, para permitir o cálculo da confiabilidade correspondente.

2.4. MODELOS PARA FALHA POR SOBRECARGA

Quando um sistema é solicitado por um carregamento aleatório, possui como possibilidade de falha mais provável um modo em que a falha se caracteriza pelo evento $S(t) \geq R(t)$, onde $S(t)$ é a variável aleatória da solicitação e $R(t)$ é a variável aleatória correspondente à resistência do sistema no instante considerado, diz-se que se trata de uma falha por sobrecarga. A figura 2.3 a seguir ilustra o comportamento que pode-se esperar para $S(t)$ e $R(t)$. A variável $R(t)$ vai sofrendo o efeito do tempo de uso do equipamento, com uma degradação crescente nas propriedades dos materiais empregados na fabricação do sistema. Esta degração é traduzida por uma redução dos níveis de $R(t)$ com o tempo, bem como por um aumento na faixa de dispersão dos valores da resistência.

CONFIABILIDADE PARA FALHA POR SOBRECARGA

Para a falha por sobrecarga passam a ser relevantes, como solicitação que atua no componente, os pontos de máximo do carregamento. Isto é decorrência do fato de que a falha ocorre não porque o carregamento, num dado instante, atingiu o valor da resistência, mas sim porque um pico da solicitação ultrapassou a resistência. Desta forma, para os modos de falha por sobrecarga, é relevante a distribuição estatística dos máximos do carregamento. Estes máximos é que serão considerados como a solicitação que atua sobre o carregamento mecânico. Analisando um único ponto de máximo, a probabilidade de que este valor tenha atingido o nível da resistência, e portanto leve à falha, é denominada de probabilidade de interferência, P_I , calculada como

$$P_I = P [S \geq R]$$

e usando as distribuições estatísticas dos máximos da solicitação e da resistência, pode ser calculada, seja analitica ou seja numericamente, dependendo do caso. Deste modo, a probabilidade de interferência corresponde ao que se denomina na teoria da confiabilidade de caso fundamental, onde é estudado o efeito de uma única aplicação de carga. Para este caso a probabilidade de falha do sistema, por sobrecarga, é a própria probabilidade de interferência. Para outras situações, é necessário agora considerar as peculiaridades de cada caso. Como o interesse é para uma solicitação dinâmica, além da distribuição dos máximos desta solicitação, as informações relativas à freqüência com que estes máximos ocorrem passam a ser também fundamentais. Com a caracterização dada pela figura 2.2 a probabilidade de interferência é função do tempo, já que a resistência do material sofre uma degradação.

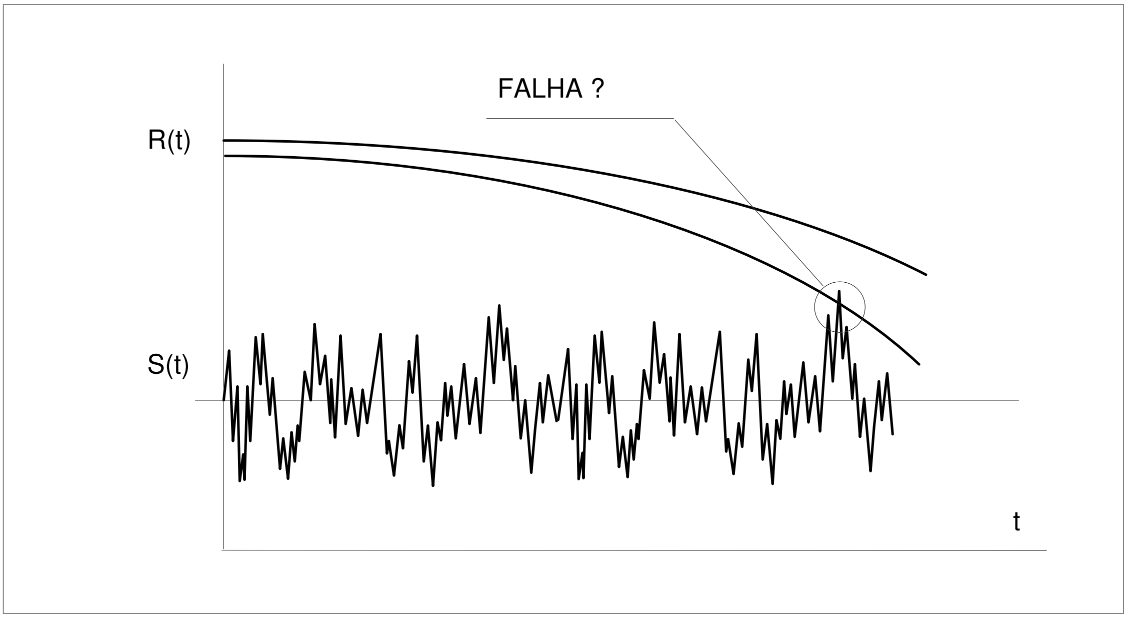

Figura 2.3 - Solicitação aleatória, com indicação de um provável ponto de falha, em um sistema com degradação da resistência.

De modo a desacoplar os efeitos de uma falha por sobrecarga com os efeitos de degradação da resistência, que são decorrentes dos modos de falha por envelhecimento, será considerado que R(t) não é afetado pela vida, sendo portanto constante no tempo.

Para uma solicitação dinâmica, já raciocinando em termos de máximos do carregamento, que atua várias vezes ao longo do tempo, com a resistência não degradando-se com a vida, a probabilidade de falha para cada sobrecarga será P_I (caso fundamental) e assim, para cada aplicação de carga,

- Probabilidade de que ocorra a falha P_I
- Probabilidade de que não ocorra a falha $1 - P_I$

Esta situação é caracterizada estatisticamente através de uma distribuição de Bernoulli e se a ocorrência dos picos for repetida um número N de vezes, desde que em cada novo pico a probabilidade de falha permaneça igual, então existe uma seqüência de eventos de Bernoulli, o que leva a uma distribuição binomial. Considerando agora a função como variável no tempo, se o interesse é sobre o número de eventos de Bernoulli, sobre um intervalo de tempo, e se este intervalo de tempo for levado ao limite, para zero, chega-se assim a uma distribuição de Poisson, que fornece a probabilidade de ocorrer um certo número de falhas para uma dada vida. Como o interesse é em geral sobre o tempo de vida até a primeira falha, este tempo passa a seguir uma distribuição exponencial, o que leva para a confiabilidade uma expressão simplificada, já que a taxa de falhas, equação (2.7), passa a ser constante. Isto é válido quando se considera, portanto, que as propriedades estatísticas de S(t) não variem no tempo, ou seja, que a solicitação seja um processo estocástico estacionário, e ergódico, então a equação da confiabilidade fica sensivelmente simplificada, pois a taxa de falhas h(t) passa a ter um valor constante λ, denominada de taxa média de falhas e portanto

$$C(t) = \exp [- \lambda t] \qquad (2.9)$$

A taxa média de falhas é dada pela probabilidade de ocorrência dos eventos de Bernoulli, ou seja, pela probabilidade de interferência do caso fundamental, e pela freqüência com que os pontos de máximo ocorrem, f_p, freqüência de picos, ou

$$\lambda = f_p P_I$$

e assim finalmente a confiabilidade é calculada por

$$C(t) = \exp [- P_I f_p t] \qquad (2.10)$$

O ponto agora passa a ser o cálculo da probabilidade de interferência, em que para alguns casos particulares é possível uma solução analítica.

A PROBABILIDADE DE INTERFERÊNCIA

Vamos considerar que a solicitação que atua sobre o ponto crítico seja um processo estocástico ergódico, ou seja, um processo aleatório estacionário, onde as propriedades estatísticas não variam com o tempo, que é uma hipótese bastante viável, e geralmente feita. Adicionalmente, vamos adotar para a solicitação a hipótese de que tenha uma distribuição gaussiana, ou seja, que sua função densidade de probabilidade siga a distribuição normal. Para a resistência que o sistema apresenta é possível também adotar, na maioria dos casos, uma distribuição normal. Com estas hipóteses, então tanto a solicitação atuante como a resistência seguem distribuições normais, o que permite que se chegue a soluções analíticas para o cálculo da probabilidade de interferência. A figura 2.4 ilustra a situação em que ambas as distribuições são normais, como discutido.

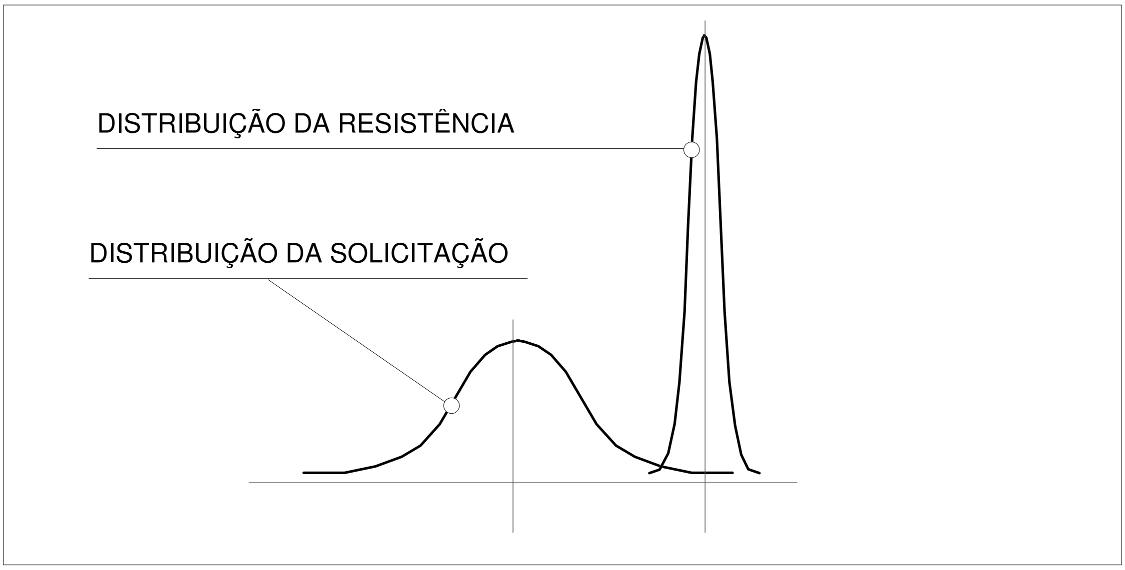

Figura 2.4 - Solicitação segundo um processo estocástico gaussiano e a resistência também seguindo uma distribuição normal.

Para o cálculo da probabilidade da interferência é necessário no entanto trabalhar com a distribuição dos máximos da solicitação S e não com a distribuição de S diretamente, conforme já comentado. A distribuição de máximos de S pode ser deduzida a partir do conteúdo de freqüência de S e temos dois casos extremos. Em um extremo, a solicitação é tratada como um processo de banda larga, ou seja, o conteúdo de freqüência de S(f) está distribuido sobre uma ampla faixa de freqüências, e no outro caso, como um processo de banda estreita, onde o conteúdo de freqüência fica restrito a uma pequena faixa, conforme mostra a figura 2.5.

Para a condição em que a densidade espectral é de banda larga, a distribuição de máximos coincide com a distribuição do sinal, ou seja, os máximos seguem também uma distribuição normal. Desta forma, a probabilidade de interferência é calculada diretamente pela expressão (2.11) abaixo, onde $\phi(z)$ é a função de probabilidade acumulada da distribuição normal, em geral tabelada.

$$P_I = 1 - \phi(z) \qquad (2.11)$$

Nesta equação z é a variável normal padronizada, dada por:

$$z = (\mu_S - \mu_R) / (\sigma_R^2 + \sigma_S^2)^{1/2}$$

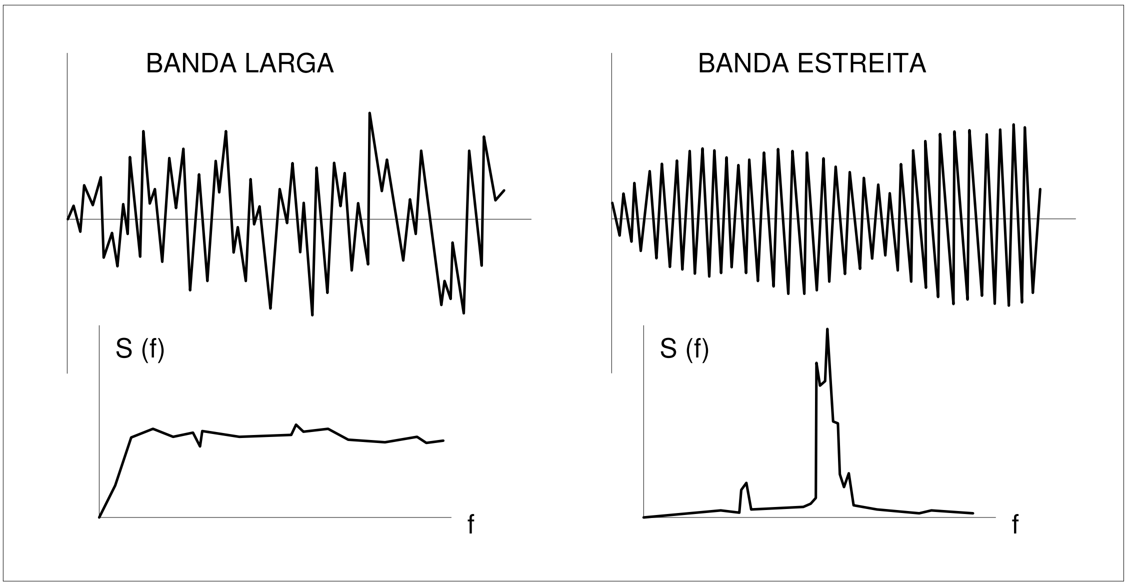

Figura 2.5 - Solicitação gaussiana de banda larga e de banda estreita.

As variáveis μ_R e σ_R são respectivamente a média e o desvio padrão da resistência e μ_R e σ_S são os correspondentes valores para a solicitação. Em uma condição de projeto, em que não se tem o dimensionamento da peça e se procura determinar qual o coeficiente de projeto a adotar, definindo este como a relação entre a média da resistência e a média da solicitação, tem-se

$$n = [\, 1 + \sqrt{1 - \delta_R \delta_S}\,] \,/\, \delta_R \qquad (2.12)$$

onde

$$n = \mu_R \,/\, \mu_S \qquad (2.13)$$

$$\delta_i = 1 - [z\, V_i\,]^2$$

$$V_R = \sigma_R \,/\, \mu_R$$

$$V_S = \sigma_S \,/\, \mu_S$$

sendo:

n - Fator de projeto, análogo ao usual coeficiente de segurança;

V_R - Coeficiente de dispersão da resistência, um índice da maior ou menor aleatoriedade das propriedades do material. Pode ser pensado como um índice de homogeneidade das propriedades do material. Situa-se, em geral, na faixa de 0,02 a 0,08 para materiais metálicos;

V_S - Coeficiente de dispersão da solicitação. Indica o grau de aleatoriedade da excitação dinâmica que é sobreposta ao valor de carga estática. É muito dependente da aplicação e do meio ambiente em que o produto deve operar. Valores típicos na faixa de 0,02 a 0,30.

Para a condição onde a densidade espectral é de banda estreita, a distribuição dos máximos segue uma distribuição de Rayleigh, cujo parâmetro de definição é o desvio padrão da distribuição normal da solicitação. A probabilidade de interferência deve ser calculada entre a distribuição de Rayleigh dos máximos e a distribuição normal da resistência. O desenvolvimento analítico leva à expressão:

$$P_I = \frac{V_S}{\sqrt{E}} \exp\left[- \frac{(n-1)}{2E} \right] \qquad (2.14)$$

onde E vale:

$E = V_S^2 + (n\, V_R)^2$

Pela estrutura da expressão de P_I não é possível neste caso explicitar o fator de projeto como uma função de P_I, sendo necessária uma solução iterativa, ou gráfica, para determinar qual n deve ser usado em um dado projeto, para atingir uma probabilidade de interferência compatível com o nível de segurança desejado para o produto, dentro da vida especificada.

As duas condições limites, de uma densidade espectral da solicitação de banda estreita, que leva a uma distribuição de Rayleigh para os máximos e a de uma densidade espectral de banda larga, que leva a uma distribuição normal para os máximos, podem não ser adequadas a um caso real, em que se tem que a densidade espectral da solicitação não se enquadra nos casos extremos. Uma maneira de avaliar o tipo de densidade espectral do sinal é através do chamado fator de irregularidade α, definido por

$$\alpha = f_0 / f_p \qquad (2.15)$$

onde f_0 é a freqüência esperada do sinal e f_p é a frequência dos máximos, que podem ser obtidas por

$$f_0^2 = m_2 / m_0 \ ; \ f_p^2 = m_4 / m_2$$

onde m_i é o momento de ordem i da densidade espectral unilateral W(f) do sinal da solicitação, [29],

$$m_i = \int f^i\, W(f)\, df \qquad (2.16)$$

Para uma densidade espectral de banda estreita, a frequência de picos praticamente coincidente com a freqüência do sinal, e logo $\alpha = 1$. Para um sinal agora com uma densidade espectral da banda larga, idealmente o número de picos é muito maior do que as passagens pelo valor médio do sinal. Isto leva a que, para um processo ideal de banda larga, $\alpha = 0$, caracterizando assim uma distribuição gaussiana para os máximos, [106]. Para uma situação mais geral em que $0 < \alpha < 1$, a probabilidade de interferência assume um valor intermediário entre a situação com $\alpha = 0$ (menor P_I) e com $\alpha = 1$ (maior P_I). Um extenso trabalho analítico de integração permite calcular, para o caso geral, a probabilidade de interferência P_I como sendo:

$$P_I = [1 - \phi(z_1)] + \alpha\, P_{IR}\, [1 - \phi(z_3)] \qquad (2.17)$$

onde P_{IR} é dado para o caso em que $\alpha = 1$, equação (2.14), como já visto, e z_1 e z_3 são funções de α, n, V_R e V_S, [89]. Esta expressão converge para a solução de banda larga quando $\alpha = 0$, e converge para a solução de banda estreita quando $\alpha = 1$.

2.5. MODELOS PARA FALHA POR DESGASTE

Uma falha por desgaste fica caracterizada por uma perda gradativa das propriedades que tornam o material usado na fabricação do equipamento adequado ao uso. Esta perda gradativa de propriedades está quase sempre relacionada com fenômenos químicos, físicos ou metalúrgicos, sobre o material. De uma forma geral pode-se dizer que o material vai sofrendo um acúmulo de dano, dano este que aumenta com o tempo, até atingir um valor crítico, que leva o material ao colapso. É possível dizer que o valor crítico de dano, que indica o colapso do material, é uma característica deste, e como tal possui uma dispersão em torno de um valor médio. Assim, tanto o dano solicitante, que vai se acumulando com o aumento da vida, como o dano crítico, que o material suporta, são variáveis aleatórias, de comportamento similar ao mostrado na figura 2.6.

Caracterizando a distribuição estatística da vida de desgaste, seja experimental, seja analiticamente, é possível então calcular a confiabilidade devida ao desgaste, como

$$C_D(t) = 1 - F_T(t) \qquad (2.18)$$

onde F_T (t) é a função de probabilidade acumulada, considerando a vida como aleatória, para a falha por desgaste.

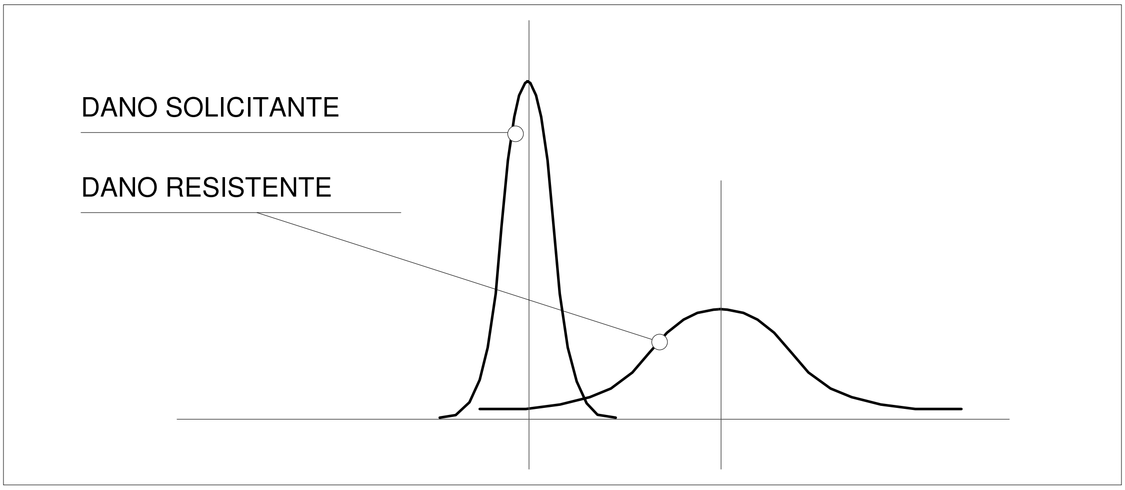

Figura 2.6 - Dano acumulado, que solicita o material, e dano crítico, que o material consegue suportar.

Dentre os vários modelos de falha que são classificados como dependentes do tempo, uma falha por fadiga é a que se apresenta como de maior importância, pela complexidade dos fenômenos envolvidos e pela freqüência com que ocorre nos problemas de projeto mecânico do dia a dia. A caracterização da resistência à fadiga do material deve considerar de uma forma explícita o período sob estudo, se o período de nucleação das trincas, ou se o período de propagação, pois os fenômenos envolvidos em um e outro período são totalmente diferentes, sendo analisados por modelos também diferentes. Para o período de nucleação os modelos mais usados estão divididos em modelos com base nas tensões atuantes e em modelos com base nas deformações que agem. O mecanismo que atua no período de nucleação está ligado às deformações plásticas cíclicas que se desenvolvem localizadamente, que levam a um dano, microscópico, mas irreversível, em especial em meios ambiente não inócuos. Com a continuidade da solicitação cíclica o dano provocado no material vai se acumulando, o que leva finalmente à formação de uma trinca. Quando o comportamento do material é caracterizado pelo nível de deformação cíclica que atua, a resistência à fadiga fica definida pelas equações de Coffin-Mason, Capítulo 9, que relacionam a flutuação de deformação com a vida que o material suporta, na forma

$$\Delta\varepsilon = M\,N^{c} + B\,N^{b} \qquad (2.19)$$

sendo N a vida em ciclos e os demais são constantes específicas do material. Outra possibilidade é adotar a solicitação cíclica em termos da tensão atuante, quando então a resistência do material à fadiga fica caracterizada pela curva de Woehler, na forma

$$\sigma = C\, N^{m} \tag{2.20}$$

A aplicação destes modelos de fadiga para o caso de solicitações aleatórias exige que consideremos o conceito de dano, que no contexto da fadiga é dado por

$$D_i = n_i / N_i \tag{2.21}$$

ou seja, a relação entre o número de ciclos que um dado nível de tensão e o número de ciclos que o material resistiria sob este mesmo nível de tensão. Para a atuação de vários níveis de tensão, a regra linear de acúmulo de dano é traduzida por

$$D = \Sigma\, D_i$$

Considerando que o carregamento é um processo gaussiano de banda estreita, é possível determinar o dano médio esperado após uma vida específica como, [29, 34],

$$D = f_0\, t\, [\, \sqrt{2}\, \sigma_S / C]^{w}\, \Gamma\, (1 + w / 2) \tag{2.22}$$

onde σ_S é o desvio padrão da solicitação, f_0 é a frequência média, Γ é a função gama e finalmente, da equação (2.20),

$$w = -\, 1 / m \tag{2.23}$$

Tipicamente consideramos como valor limite para o dano que o material pode resistir, sem romper, o valor unitário. Assim, para haver segurança é necessário que $D < 1$.

É possível ainda obter o coeficiente de dispersão do dano, V_D desde que o sistema sob análise seja considerado de baixo amortecimento. Assim, sendo ξ o coeficiente de amortecimento, e para um número elevado de ciclos para a ruptura, vem

$$V_D^{2} = f_1\, (w) / [\, \xi\, f_0\, t\,] \tag{2.24}$$

onde $f_1\,(w)$ é função que pode ser aproximada por [83]

$$f_1(w) = 0{,}075 \exp [\, 0{,}553\, w \,] \qquad (2.25)$$

Este modelo integral para a análise de dano é bastante útil, pois fornece uma estimativa do comprometimento que o produto apresenta quanto à fadiga, de uma forma explícita e simples. Por outro lado, o modelo está baseado em um sinal gaussiano de banda estreita, o que para aplicações práticas pode não corresponder exatamente à realidade. Torna-se assim necessário validar certas hipóteses, o que deve ser feito com a comparação com outros resultados.

EXEMPLO 2.1

Nesta seção é apresentada uma aplicação das formulações e procedimentos discutidos, com o objetivo de ilustrar de forma clara como devem ser usadas em uma situação de projeto.

Um dado componente estrutural deve ser dimensionado para suportar uma solicitação que apresenta um valor estático (médio) de 25 kN e uma parcela dinâmica com um desvio padrão de 21 kN. A frequência média do sinal é de 0,38 Hz, tendo um fator de irregularidade de 0,85. Deseja-se uma confiabilidade, quando à falha por sobrecarga, de 50% para uma vida de 18000 horas de operação. O material a ser usado apresenta as propriedades abaixo

$\sigma_R = 620$ MPa

$\sigma_E = 345$ MPa

$\sigma_N = 2103\, N^{-0{,}1921}$

$V_R = 0{,}05$

O primeiro passo é calcular qual a probabilidade de interferência que deve ser usada de modo a garantir a confiabilidade de 50%. Da expressão da confiabilidade, vem

$\lambda = -\ln(1 - C) / t$, e como $\lambda = P_I\, f_p$, resulta

$P_I = -\ln(1 - C) / (t\, f_p)$

A solicitação tem $f_0 = 0{,}38$ Hz e $\alpha = 0{,}85$, assim $f_p = 0{,}45$ Hz. Logo, $P_I = 2{,}38 \cdot 10^{-8}$. Para calcular o fator de projeto que leva à esta probabilidade de interferência, é necessário um processo iterativo, como indica a tabela abaixo, onde V_S foi calculado em 0,84.

n	3	4	5	6	6,3	6,31
P_I	6,31E-2	2,33E-2	2,87E-5	1,41E-7	2,47E-8	2,33E-8

Desta forma, o fator de projeto a usar deve ser de 6,31, que corresponde à relação entre a média da resistência e a média da solicitação. Assumindo que o critério de falha seja quanto ao colapso plástico, a tensão resistente que é relevante é a tensão limite de escoamento do material, o que fornece portanto uma tensão admissível de 54,7 MPa. Esta tensão deve ser usada com o valor médio do carregamento, no caso a força de 25 kN, o que leva a uma seção transversal de 457 mm^2, e a um diâmetro de 24,1 mm. Adotando 25 mm, o fator de projeto passa a ser de 6,77, o que leva a uma probabilidade de interferência de 1,39E-9 e a uma confiabilidade de 96% para a vida prevista. Isto leva a um valor de resistência média da peça de 170 kN, ou seja, a 6,9 desvios padrão da média da solicitação. Este valor, quando comparado com a informação de que estamos seguros a três desvios padrão da média, mostra que esta indicação não se aplica nas situações em que é exigida uma confiabilidade elevada para o produto, como no caso do presente exemplo.

Para este dimensionamento, a análise de dano é imediata, necessitando-se apenas calcular o desvio padrão da solicitação em termos de tensões, a partir do desvio padrão da força atuante, de 21 kN, o que leva a um valor de σ_S de 42,78 MPa. Usando estes valores, bem como w = 5,205, resulta

D = 0,38 . 6,48E7 [√2 . 42,78 / 2103] ^{5,205}. 3,52 , ou seja,

D = 0,825, o que indica uma vida de fadiga adequada para o projeto.

2.6 CONCLUSÃO

Este Capítulo apresentou um conjunto de técnicas e procedimentos para o desenvolvimento de um processo de projeto mecânico, em ambientes aleatórios, que usa direta e explicitamente as características estatísticas da solicitação, seja a solicitação imposta ao sistema mecânico, como a solicitação que atua no material, nos pontos críticos. Como critério para o projeto preliminar é definido o conceito de fator de projeto, com base nos modelos de falha por sobrecarga, o que torna o processo de dimensionamento análogo ao processo usual, que usa o conceito do coeficiente de segurança. Quanto aos modelos para o cálculo da probabilidade de interferência, o caso extremo de banda estreita, que leva a uma distribuição de Rayleigh para os máximos, é a situação mais conservativa, já que fornece a maior probabilidade de interferência, para um dado desvio padrão da solicitação. No caso extremo de uma solicitação de banda larga, os máximos têm uma distribuição normal e no caso geral, para um coeficiente de irregularidade qualquer, é possível usar a expressão (2.11).

Quanto à falha por fadiga, para uma etapa de projeto preliminar, uma alternativa viável é o uso da expressão integral do dano, conforme usado no exemplo de aplicação, o que permite, de uma forma rápida, fazer uma avaliação do grau de comprometimento quanto a uma falha para fadiga. Neste caso o efeito de tensão média ou de tensões residuais deve ser usado diretamente nas constantes que definem a curva de fadiga do material, corrigida para o ponto crítico da peça.

Finalmente, quanto à determinação dos esforços que atuam no material, em casos simples estes estão diretamente relacionados com as forças e solicitações atuantes no sistema. Em outras situações, a determinação não é imediata, exigindo, ou uma análise dinâmica com integração no tempo, ou uma análise com o uso de métodos numéricos, com excitação via a função densidade espectral. No primeiro caso o resultado é o histórico de solicitações, o qual pode ser usado para uma análise de dano ponto a ponto, ou sofrer uma análise estatística. No segundo caso obtém-se diretamente a densidade espectral dos esforços nos pontos de interesse, o que permite a aplicação direta dos modelos descritos para a análise de falha por sobrecarga, como para a análise de dano, na forma integral.

Deste modo, é possível dizer que, embora muitas vezes o uso das ferramentas probabilísticas no projeto mecânico seja visto com reservas, o desenvolvimento de modelos adequados para uma análise expedita, conforme visto no exemplo de aplicação, permite um ganho de conhecimento sobre o real desempenho do produto em operação, levando a critérios de projeto mais objetivos e versáteis.