CAPÍTULO 1

METODOLOGIA MODERNA DE PROJETO

Tradicionalmente o termo Engenharia está relacionado com a criação de algum objeto de utilidade, o que em geral envolve toda uma seqüência de atividades, desde o início da concepção do produto, até a sua produção propriamente dita, passando pelo projeto preliminar, detalhamento, análise, planejamento da produção, produção e controle de qualidade e assistência ao usuário.

No caso específico de produtos industriais, que são solicitados por cargas e esforços durante a operação, ou mesmo quando da armazenagem, um dos pontos mais críticos do projeto é o correto dimensionamento para suportar as cargas que irão se desenvolver. Assim, este trabalho preocupa-se com os vários aspectos de resistência mecânica que estão habitualmente acoplados com o projeto e a análise de sistemas de Engenharia. De uma forma geral o termo projeto é empregado no sentido de sintetizar um sistema que venha a produzir uma resposta específica, quando solicitado. Este sistema, no que diz respeito ao seu desempenho, deve satisfazer uma série de restrições e especificações, com um projeto que visa, na maioria dos casos, a minimizar o custo total ao longo do período de vida útil. Praticamente em qualquer tipo de sistema que venha a ser projetado existem componentes cuja função é suportar e transmitir cargas mecânicas. Estes componentes devem ser dimensionados de modo a resistir às cargas previstas, constituindo-se, logo, em componentes estruturais do sistema.

1.1 - O PROCESSO DE PROJETO

O desenvolvimento de um certo produto tem início quando existe uma exigência ou quando é detectada uma necessidade, em relação ao mercado consumidor, para aquele tipo de produto. A partir deste ponto é desencadeada toda uma sequência de ações, que tem como ponto de partida o estabelecimento dos chamados requisitos de projeto, ou especificações do produto, que procuram definir, da forma mais ampla possível, o que deve ser o produto, quanto à sua funcionalidade e expectativa de vida. Estes requisitos deverão ser bem elaborados, de modo a definir com precisão o que deverá ser o produto, pois estes irão orientar todo o desenvolvimento do mesmo.

No caso particular de um projeto estrutural este deve estar baseado em requisitos de operação do sistema, ou em um conjunto de condições a serem satisfeitas, que formam os requisitos de projeto do equipamento. Normalmente a definição dos requisitos de um dado equipamento ou sistema de Engenharia, quando de grande porte, é obtido após discussões entre o fabricante, o projetista de processo e o usuário deste sistema, muitas vezes com a necessidade de consultores externos que possuam experiência anterior no tipo de sistema em consideração. Os requisitos do equipamento baseiam-se em condições de operação típicas deste, bem como previsões sobre eventuais sobrecargas devidas a falhas nos componentes, ou mesmo falhas humanas na operação do sistema, em condições normais de uso ou ainda em condições de emergência. Estas últimas considerações são relevantes quando se trata de equipamentos de alto custo ou que trabalham em instalações de responsabilidade, cujas falhas tenham elevados custos econômicos ou sociais. Do ponto de vista do engenheiro de projeto, se existem os requisitos do equipamento e se estes foram elaborados de forma criteriosa, o projeto propriamente dito fica mais fácil, principalmente se for regido por um conjunto de normas coerentes, pois muitas vezes deve-se apenas seguir um roteiro pré-estabelecido. O grande problema é quando o equipamento não possui os requisitos de projeto ou, então, quando se está elaborando estes requisitos. Em casos de equipamentos e sistemas de Engenharia de grande responsabilidade torna-se necessário o ensaio de protótipos do equipamento em condições tão próximas quanto possível do real ou a simulação matemática deste, para que se tenham informações confiáveis sobre a intensidade do carregamento, temperatura de operação, ciclos de trabalho, etc.

Procurando definir de uma forma ampla, o engenheiro de projeto trabalha com um grande número de variáveis, que formam o chamado espaço de projeto, ou seja, o conjunto de todos os fatores que influem sobre a configuração do projeto, seu custo de fabricação e operação, seu desempenho em serviço, etc. Dentre as variáveis de projeto, podemos citar algumas das mais importantes como sendo:

- Valores nominais de carga, como forças, momentos e pressão;
- Valores máximos de carregamento;
- Variação de temperatura durante a operação;
- Propriedades dos materiais usados;
- Tipos de vínculos e restrições;
- Nível de segurança.

Destas variáveis, muitas são incógnitas quando da etapa de projeto preliminar, embora em muitos casos conheça-se ao menos a ordem de grandeza que os valores numéricos devem assumir. Usualmente tem-se como incógnitas em um projeto preliminar variáveis como, por exemplo, as dimensões da seção transversal do componente, a espessura de parede de um reservatório, ou a especificação do tipo de material.

Um dos grandes problemas na Engenharia de projeto é a incerteza que existe na quantificação das variáveis necessárias para o projeto e análise do sistema em questão. Esta quantificação pode, ou ser estimada por uma análise aproximada, baseada em experiência anterior, ou então pode ser feita uma determinação experimental através de ensaios, das variáveis de interesse. No caso particular de sistemas estruturais, existem três fontes bastante distintas de incertezas, quais sejam:

- Conhecimento apenas orientativo da magnitude das cargas e esforços que agem sobre o equipamento. Quando a carga é estática, pode-se estimá-la razoavelmente. No caso de cargas dinâmicas, a sua definição exige um maior envolvimento, já que um tratamento mais objetivo fica prejudicado, pela complexidade do problema. Se a carga for de natureza aleatória, o problema torna-se ainda mais difícil, sendo necessária a obtenção de dados de campo em muitos casos.

- Uma análise de tensões feita com base nos conceitos da Mecânica dos Sólidos clássica apresenta bons resultados apenas quando o componente estrutural se enquadra adequadamente no modelo usado na análise. Quando, no entanto, o componente possui uma geometria mais complexa, a precisão dos valores de tensões calculados pelos métodos simplificados da Mecânica dos Sólidos é motivo de preocupação, exigindo maior atenção.

- Finalmente, a resistência do material que forma o componente é fundamental, pois ela é o termo de comparação para se definir o nível de segurança do componente. Esta resistência deve ser compatível com o modo pelo qual o material irá falhar, cuidando-se explicitamente como são definidos os modos de falha do componente, já que para cada um destes modos o material terá uma propriedade específica.

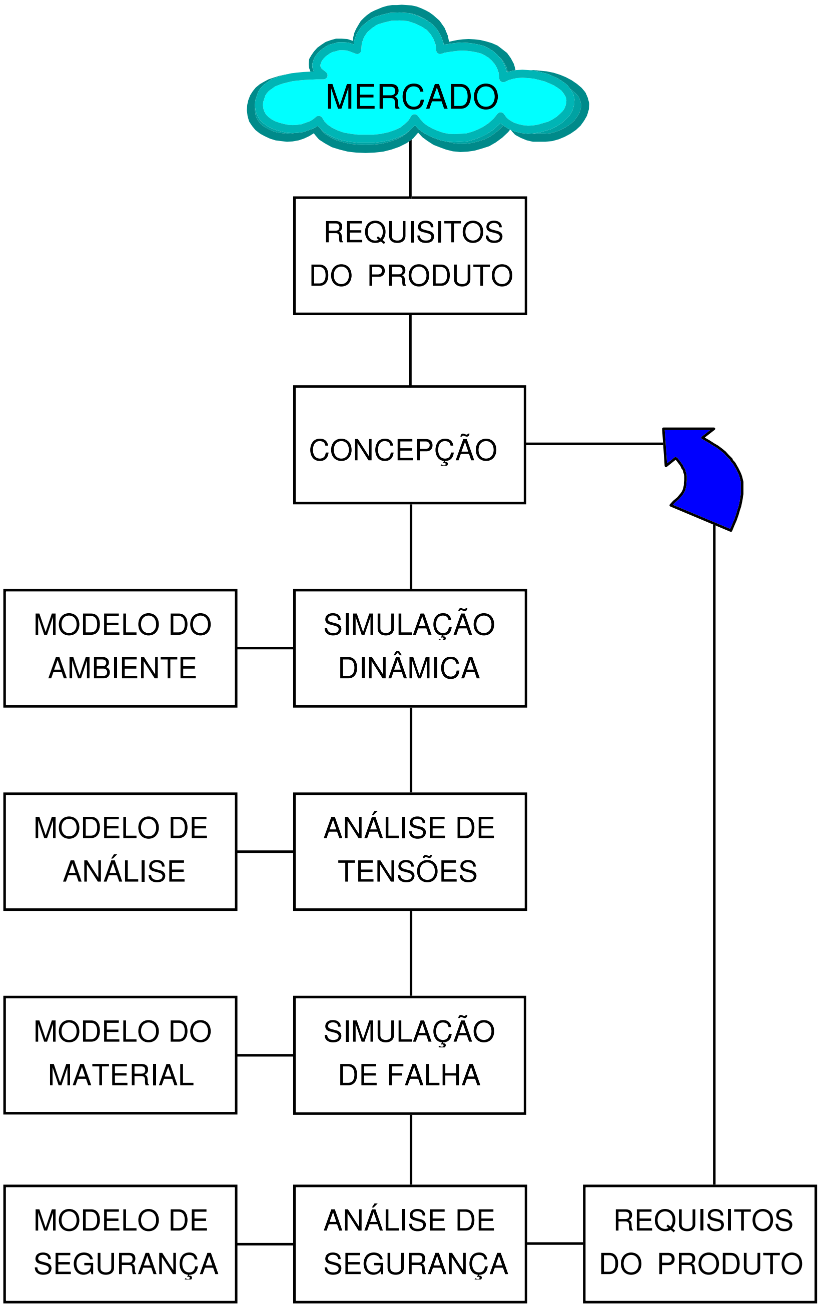

Figura 1.1 - Etapas no desenvolvimento de um produto, com ênfase estrutural.

A figura 1.1 mostra esquematicamente as diferentes etapas em um processo genérico de projeto estrutural, partindo de uma solicitação do mercado, que estabelece os requisitos de projeto. Esta etapa parte de informações que muitas vezes são um tanto nebulosas, fracamente definidas. A partir deste ponto começa a etapa de concepção do produto, que é de início uma primeira aproximação do que deverá ser este produto. Esta etapa pode gerar várias alternativas de configuração para o produto bem como diferentes princípios operacionais. Um estudo de custo, viabilidade, eficiência, etc., limita as várias tentativas e alternativas a umas poucas opções, algo como duas ou três, que passam para uma etapa de um maior detalhamento, a ser realizado ao longo do projeto de engenharia. A figura 1.2 mostra como uma solicitação do mercado gera os requisitos de projeto do produto, que tem como forma final um documento, como um relatório.

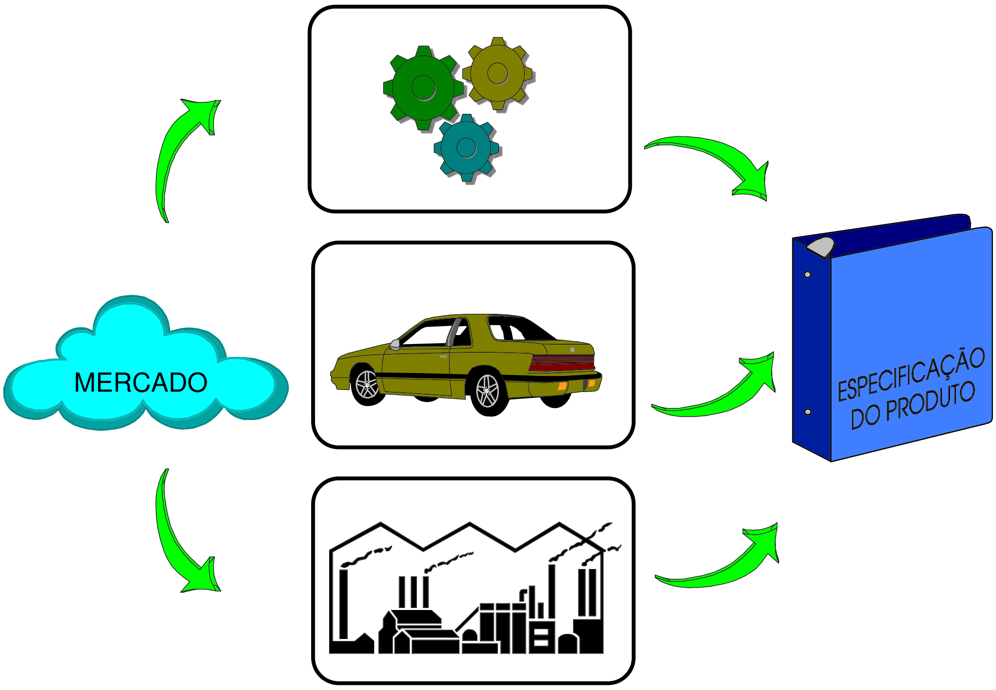

Figura 1.2 - Definição dos requisitos de projeto do produto a ser desenvolvido.

A figura 1.3 ilustra como a partir dos requisitos de projeto do produto é desenvolvido um modelo sobre o que deverá ser o produto, através da criação de um modelo geométrico. Muitas vezes ocorre a situação onde já temos um produto em fabricação, ou no estágio de protótipo, e desejamos criar um modelo geométrico deste produto. Para tal é necessário então um processo de digitalização do produto, através de um equipamento adequado, como uma máquina de medida de coordenadas, seja em 2D ou em 3D, que é o caso mais corriqueiro. Uma vez definido o modelo geométrico do produto, ao menos de uma forma preliminar, passamos então para o detalhamento do projeto de engenharia. Em um ambiente de projeto centrado sobre um sistema computacional, o modelo geométrico passa a ficar residente em um banco de dados, armazenado em disco. A partir deste banco de dados, é que o projeto tem continuidade. Este projeto, em um enfoque mais restrito ao campo estrutural, deve procurar quantificar as diferentes variáveis que estão relacionadas com o produto.

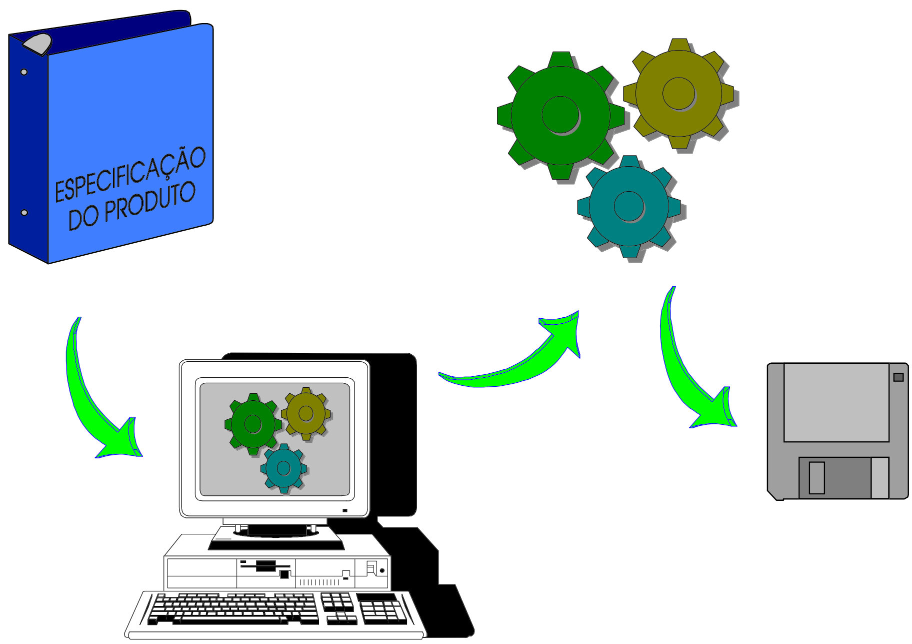

Figura 1.3 - Concepção do produto e arquivamento do modelo geométrico.

Assim, com uma estimativa inicial das cargas que agem sobre a estrutura e das tensões de falha do material, pode ser feito um pré-dimensionamento, ou projeto preliminar, dos principais componentes estruturais do equipamento, com base nas expressões clássicas da Mecânica dos Sólidos. Este projeto preliminar, é óbvio, não apresenta um grau de segurança uniforme, muitas vezes podendo pecar por falta ou por excesso. Torna-se assim necessário realizar um estudo mais detalhado, tomando por base o projeto preliminar. Uma primeira necessidade é a determinação mais precisa das cargas que agem, tanto estáticas como dinâmicas. Isto pode ser feito utilizando-se métodos mais precisos de análise, com o uso de modelos matemáticos ou através da medida e monitoração das cargas durante a operação do equipamento, ou de um protótipo, por meio de uma simulação em laboratório, ou mesmo de um ensaio em campo.

Com as cargas que atuam na estrutura já determinadas, é possível realizar o dimensionamento da estrutura ou a verificação do projeto preliminar. Apenas em estruturas bastante simples o número de variáveis envolvidas é relativamente pequeno, de forma a permitir um projeto rápido, obtido apenas com o dimensionamento. Em geral é feito um pré-dimensionamento da estrutura, usando um modelo simplificado de análise. Em seguida torna-se necessária uma verificação do pré-dimensionamento, usando a estrutura real definida na etapa anterior. Este processo de verificação consome a maior parte do tempo de projeto, já que ele envolve um número bastante grande de detalhes a ser verificado e calculado, devendo em muitas situações ser refeito várias vezes, de uma forma iterativa.

A verificação é necessária porque no projeto preliminar foram feitas várias simplificações, como o uso de modelos de comportamento dos componentes, que podem não representar adequadamente a realidade. Em geral, para sistemas mais complexos, desenvolve-se um processo iterativo de projeto e verificação, de forma a aperfeiçoar o projeto final e eliminar desta forma qualquer erro eventual.

Assim, para que seja possível o desenvolvimento criterioso de todo o projeto, é necessário que tenhamos uma idealização do sistema estrutural, através da elaboração de um conjunto de modelos, que devem descrever de forma adequada os pontos relevantes quanto ao meio ambiente onde o sistema deve operar, quanto à geometria deste sistema e também quanto ao material que será utilizado na fabricação das várias partes que formam o sistema. O modelo do meio ambiente pode ter alguma caracterização simples, como por exemplo a temperatura onde o sistema deve operar. Em outros casos, como no caso de veículos terrestres, o modelo do meio ambiente deve incluir uma caracterização do tipo de piso onde o veículo vai trafegar, de modo a fornecer dados sobre o perfil do terreno, condições de aderência, de flutuação dos pneus e alguma outra informação adicional. Este modelo, em conjunto com a idealização do sistema, permite a determinação, via simulação, dos níveis de carga nos pontos de interesse.

O modelo da geometria visa fornecer uma idealização simplificada da configuração dos componentes, para permitir uma análise de tensões nestes componentes. O modelo da geometria pode ser extremamente simples, como a idealização de uma viga sob flexão, ou significativamente mais complexo, como um modelo de elementos finitos tridimensional. Por outro lado, o modelo do material procura caracterizar o seu comportamento, quanto à curva tensão-deformação, quanto aos níveis admissíveis de resistência mecânica, etc.

1.2 - DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS

O projeto de uma estrutura requer um conhecimento prévio, se não exato ao menos aproximado, das solicitações que agem sobre a estrutura. Para estruturas estáticas não existem grandes problemas na determinação das cargas. No entanto, a situação altera-se bastante em estruturas com movimento relativo ao meio ambiente, onde a ocorrência de cargas dinâmicas é habitual. Para determinar as cargas dinâmicas pode-se adotar dois caminhos distintos, mas que são complementares na realidade:

- Análise teórica.
  Uso de um modelo matemático que representa o comportamento dinâmico do sistema, ou;
- Análise experimental.
  Determina as cargas com o equipamento em condições típicas de utilização.

A solução teórica é obtida com o uso dos conceitos da dinâmica, onde o sistema é idealizado através de um modelo que considera os efeitos relevantes de inércia, flexibilidade e amortecimento. Por outro lado, o meio ambiente onde o sistema irá operar é uma das principais fontes das cargas que irão atuar sobre o sistema, e deve ser idealizado e definido na forma de um modelo. Assim, unindo o modelo do sistema com o modelo do meio ambiente, temos informações adequadas para prever o desempenho em operação do sistema. O equacionamento das condições de equilíbrio leva habitualmente a um sistema de equações diferenciais de segunda ordem, que pode ser resolvido analiticamente no caso de modelos simples.

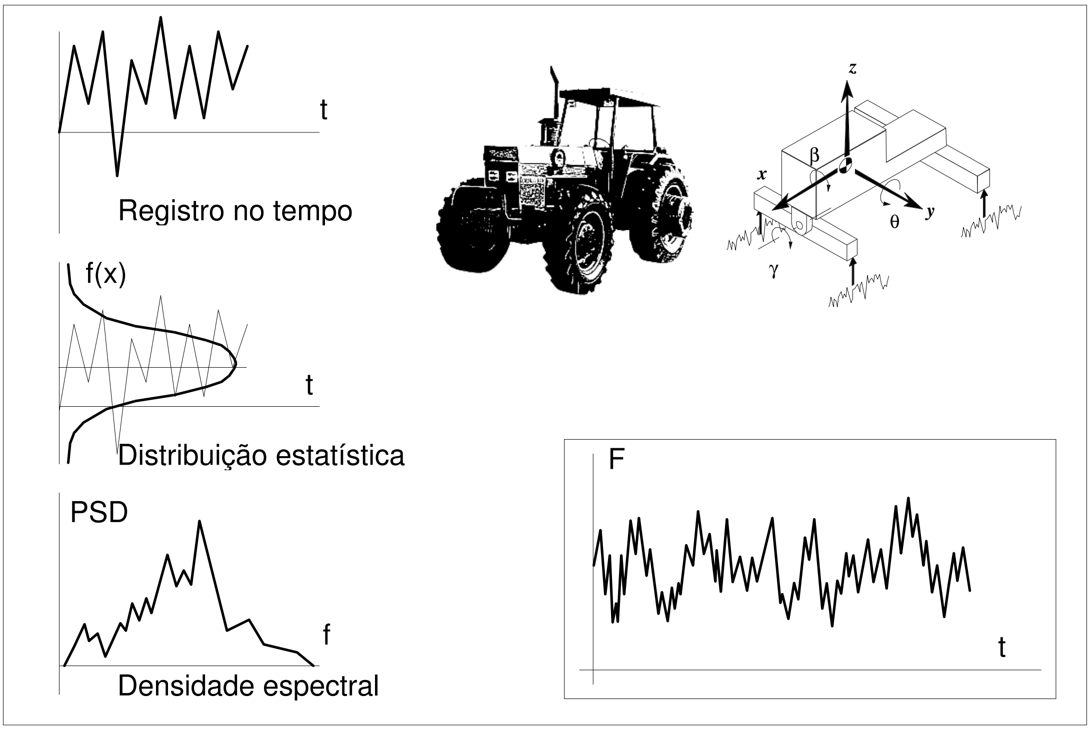

Figura 1.4 - Análise dinâmica de um sistema mecânico.

Para situações mais complexas é necessário recorrer a processos numéricos para obter-se solução, através da integração numérica ao longo do tempo. A figura 1.4 mostra um modelo de simulação de um veículo, rodando sobre um terreno irregular. Com a solução é possível determinar a resposta deste sistema, ao longo do tempo, e assim obter as informações de interesse, como forças ou cargas em determinados pontos, ou acelerações nestes pontos. A figura mostra um resultado típico de esforços obtidos desta forma, bem como a sua caracterização através de uma redução de dados, por uma análise estatística, fornecendo a função densidade de probabilidade, PDF, e por uma análise de Fourier, através da função densidade espectral, PSD. Outra possibilidade é o uso de um ensaio experimental, onde buscamos cruzar informações entre o modelo numérico de análise e o modelo físico ensaiado, seja em laboratório, seja em campo. Com o cruzamento de informações é possível um ganho significativo do conhecimento sobre o sistema, o que de uma forma isolada, trabalhando só com o modelo numérico ou só com o modelo físico, não seria possível de ser obtido.

A análise experimental exige o uso de equipamentos adequados para a medida e o registro das grandezas em que existe interesse, como por exemplo forças, momentos, deslocamentos, etc. A determinação experimental das cargas sobre a estrutura é feita normalmente com um protótipo instrumentado, com transdutores de força nos pontos de interesse. Este protótipo é posto a operar em condições análogas às que se espera em serviço e as cargas atuantes são então registradas. A forma mais atual e difundida de transdutores de força são dinamômetros com extensômetros de resistência. O registro obtido experimentalmente fornece informações valiosas ao projetista, desde que analisado de forma correta. Com o registro da solicitação é possível compactar os dados usando os conceitos da função densidade de probabilidade do sinal e do espectro de frequência deste mesmo sinal. A função densidade de probabilidade fornece as informações quanto à maior ou menor possibilidade de ocorrer um dado valor do sinal. No entanto, nada informa sobre a frequência da solicitação, que no caso de cargas dinâmicas é fundamental. O conteúdo de frequência é fornecido pelo espectro de frequência, ou função densidade espectral, que indica qual a contribuição, em termos de energia, de cada frequência contida no sinal. A área sob a curva da densidade espectral é a energia total do sinal, ou seja, o seu valor médio quadrático, outro dado importante.

1.3 - ANÁLISE DE TENSÕES

Em estruturas complexas o processo de análise de tensões deve ser capaz de tratar com formas geométricas e casos de carregamento que não são triviais. Assim, deve ser buscada uma solução para o cálculo das tensões, o que pode ser feito de diversos modos, dependendo da conveniência, disponibilidade e responsabilidade da estrutura. A análise de tensões pode ser feita usando vários métodos, sendo que os principais são classificados como:

MÉTODOS ANALÍTICOS

O mais simples dos métodos analíticos para a análise de tensões está baseado na metodologia da Mecânica dos Sólidos, porém tem uma grande desvantagem, já que parte de uma distribuição de tensões, ou de deformações, pré-concebida, não necessariamente verdadeira, o que pode levar a erros. Apenas em casos particulares é que aquelas soluções são corretas. Para estruturas e máquinas mais complexas o método usual começa a tornar-se muito laborioso e sujeito a erros decorrentes das simplificações feitas no problema para tornar possível a solução. Uma análise feita baseando-se nos conceitos da Mecânica dos Sólidos clássica apresenta bons resultados apenas quando o componente estrutural se enquadra adequadamente no modelo usado para realizar a análise.

Um procedimento mais elaborado pode fazer uso da Teoria da Elasticidade, a qual procura determinar o campo de tensões e de deformações, tomando por base apenas a geometria, carregamento e condições de contorno. Assim, a solução é exata, embora mais trabalhosa. A desvantagem básica é a limitação da forma das peças que podem ser analisados. Formas mais complexas são difíceis de analisar, pois o contorno deve ser representado através de uma função matemática, a qual pode ser difícil, ou mesmo impossível de determinar analiticamente, [22], [95], [99].

MÉTODOS NUMÉRICOS

Quando, em casos de estruturas complexas, não é possível tolerar imprecisões na análise, o uso de Métodos Numéricos torna-se uma exigência. Devido à limitação dos métodos analíticos é que se desenvolveram os Métodos Numéricos de Análise Estrutural, que estão baseados na Mecânica do Contínuo, como a Teoria da Elasticidade e a Teoria da Plasticidade. Estes métodos possibilitam a análise para geometrias quaisquer, dando assim grande flexibilidade na solução de problemas. Os principais Métodos Numéricos em uso são o de diferenças finitas, o de elementos finitos e o de elementos de contorno. Pela relativa facilidade de uso, o Método de Elementos Finitos tem uma aplicação cada vez mais abrangente e generalizada, seguido de perto, ultimamente, pelo Método de Elementos de Contorno. O Método de Elementos Finitos é um processo numérico que usa a solução de um "elemento" de forma geométrica relativamente simples, solução esta normalmente obtida com auxílio da Mecânica do Contínuo, para então obter o comportamento de toda uma estrutura, com forma qualquer. A estrutura sob análise é dividida em um conjunto de elementos com dimensões finitas. Assim, a partir do comportamento de um elemento, é obtida a solução da estrutura. O método exige, para ser utilizado de maneira eficiente, pessoal especializado para preparar o modelo a ser analisado. Mesmo em casos mais simples estes processos podem se tornar atrativos, desde que disponível o programa de cálculo, pois alguns minutos de computador fornecem todos os resultados, com maior exatidão do que se fosse feita uma análise usual, consumindo dezenas ou mesmo centenas de horas. Esta etapa não está em discussão no presente trabalho, existindo várias publicações de excelente nível, como, por exemplo, as referências [17], [23], [31], [103], [Fancello].

MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Outra possibilidade para determinar as tensões no material é usar uma análise efetuada diretamente sobre o produto. Normalmente o interesse é sobre os deslocamentos da estrutura, quando carregada, ou então sobre as tensões e deformações nos pontos críticos. Maiores detalhes sobre os métodos apresentados podem ser obtidos nas referências [32], [99]. A análise experimental pode ser feita utilizando:

- Extensômetros de resistência;
- Método de Moiré;
- Foto-elasticidade;
- Métodos holográficos;
- Emissão térmica.

Com o uso de extensômetros de resistência é possível determinar a solicitação, em termos de deformações, em apenas alguns pontos do componente, onde foram instalados os extensômetros. Apresentam como vantagem uma aplicação direta sobre a peça e interpretação bastante fácil dos resultados obtidos. Exigem, no entanto, um conhecimento prévio de quais são os pontos mais solicitados, bem como uma estimativa das direções principais das tensões que agem. Uma vez conhecido o estado de deformações pode-se obter o estado de tensões no ponto pelo uso da lei de Hooke, desde que o material esteja seguramente dentro do regime elástico.

O método de Moiré, bem como a holografia, determina o campo de deslocamentos na superfície da peça, necessitando uma análise mais complexa dos resultados. O método de Moiré exige que a peça a ser ensaiada seja previamente gravada com uma malha e, a menos que as deformações sejam grandes, torna-se necessário o uso de malhas de alta precisão, com espaçamento entre linha da ordem de 10 a 50 μm.

Uma análise por foto-elasticidade exige a confecção de um modelo, da peça, de plástico birefringente, o qual será carregado e submetido a luz polarizada, que tem o seu plano de polarização alterado, conforme a solicitação no ponto. Este efeito gera franjas de interferência, que são linhas de igual tensão cisalhante, ou de igual direção das tensões principais. A análise dos resultados é bastante trabalhosa, porém permite obter todo o campo de tensões sobre o modelo.

O método por emissão térmica utiliza um processo de leitura da temperatura sobre a peça com precisão da ordem de 0,001 °C. A peça é submetida a um carregamento típico de modo que pode ser obtido um mapeamento da temperatura que o material da peça atinge sob carga, devido ao efeito de histerese. Através de uma calibração, específica para o material, temos definida a relação temperatura-tensão e assim gera-se um mapeamento do estado de tensões na peça. Este método é sensível ao valor da tensão equivalente, que caracteriza o trabalho de deformação gerado em cada ponto e portanto a energia dissipada na forma de calor.

A figura 1.5 mostra um modelo para análise por elementos finitos de uma peça, bem como os resultados típicos que obtemos. A figura mostra também alguns extensômetros de resistência. Em problemas complexos, um ponto crucial é estabelecer as condições de validade dos resultados obtidos pela análise de tensões, seja uma análise numérica, seja uma análise experimental. Em ambos os casos temos vários aspectos que podem fazer com que o modelo idealizado não corresponda bem à realidade física, como por exemplo a definição das condições de contorno (engastado, apoiado, flexível), a região e a intensidade com que a carga externa atua, o efeito de folgas, atrito, etc. Assim, o cruzamento de resultados, obtidos com o modelo numérico, com os resultados obtidos com o modelo experimental, permite um refino da solução, pela melhor correspondência entre os modelos de análise e a realidade.

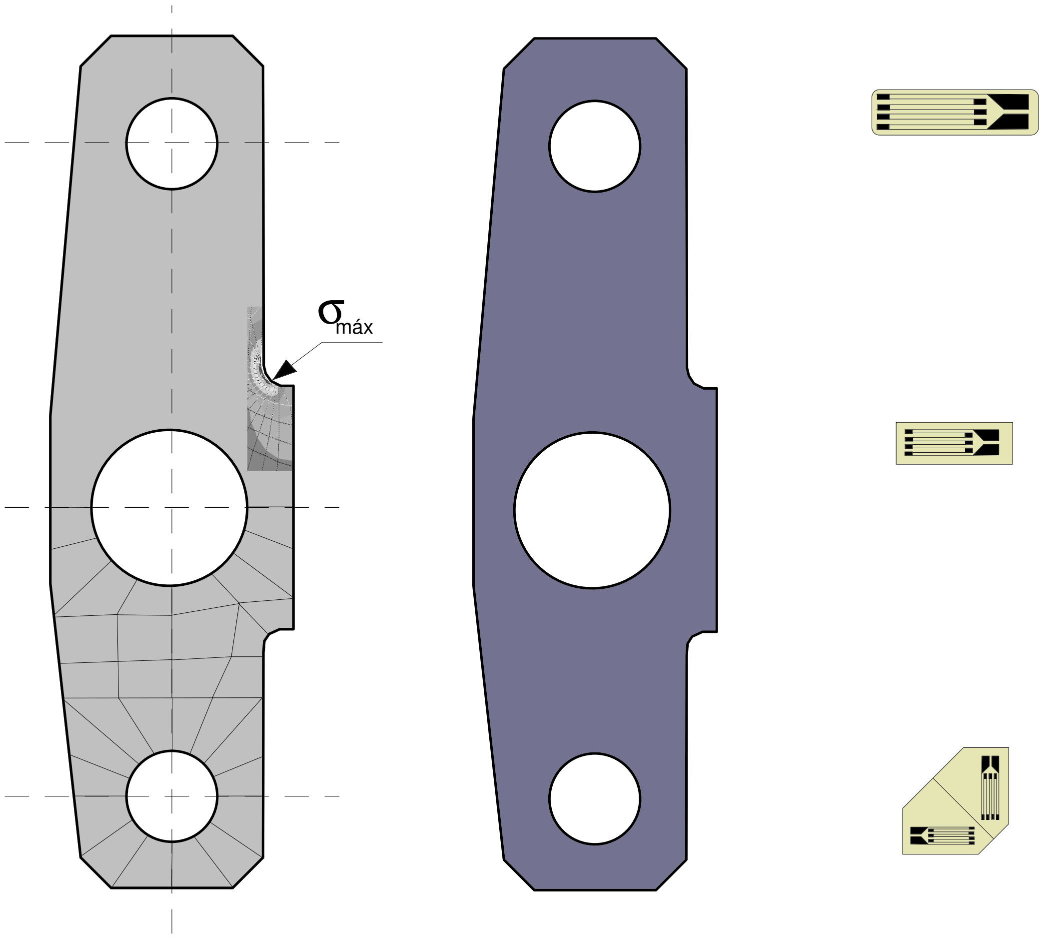

Figura 1.5 - Análise de tensões numérica e experimental.

Com a verificação experimental das tensões nos pontos críticos é possível determinar, de uma forma mais precisa, qual a margem de segurança existente, ou qual a confiabilidade do projeto, dentro do prazo estabelecido para a vida do componente.

1.4 - ANÁLISE DE FALHA

A resistência do material que forma o componente é fundamental, pois ela é o termo de comparação para se definir o nível de segurança do componente. Esta resistência deve ser compatível com o modo de falha pelo qual o material irá romper. Isto implica na obtenção das características de resistência mecânica do material, tanto para cargas estáticas como para cargas dinâmicas, pelo uso de corpos de prova adequados. Esta etapa preocupa-se em determinar a tensão nominal que pode solicitar o material, sem provocar falhas, para o período de vida previsto para o componente. Aqui são usados os métodos mais recentes para a Análise de Fadiga, bem como os conceitos da Mecânica da Fratura, para a análise do efeito nocivo de fissuras e eventuais defeitos internos do material. Atualmente é possível prever a vida de um componente sujeito à fadiga, dentro de uma faixa estreita, mesmo para solicitações aleatórias. Neste caso o processo usado para definir os ciclos de carga que vão sendo completados passa a ser de importância vital. Algumas referências básicas neste tópico são [4], [34], [86]. Em componentes estruturais, a falha se inicia sempre nos pontos mais solicitados. Quando a solicitação é dinâmica, esta falha começa na forma de pequenas trincas de fadiga, que vão crescendo e reduzindo a seção resistente, até que uma sobrecarga faz com que ocorra a ruptura final, por uma propagação brusca da trinca. Deste modo, em ambiente não agressivo, o material deve ter sua capacidade de suportar cargas analisada de diferentes formas, quais sejam:

- Resistência à fadiga. Neste caso é necessário distinguir os dois períodos, o de nucleação e o de propagação da trinca, porque os fenômenos envolvidos são distintos.

- Resistência à falha estática, para o material isento de defeitos. Esta falha pode estar associada a um escoamento, uma instabilidade, ou mesmo com a ruptura do material.

- Resistência à ruptura estática, quando o material possui defeitos. Tal define o tamanho admissível de trinca para não ocorrer a ruptura final do componente.

A figura 1.6 ilustra esquematicamente esta etapa da análise de falha, onde buscamos definir o que se pode chamar de dano generalizado, que corresponde a uma medida do comprometimento do material para um dado modo de falha. Para quantificar este dano devemos utilizar um modelo que descreva o comportamento do material para o modo de falha em estudo. Para o caso de solicitações dinâmicas, que excitam uma falha por fadiga, é necessário um procedimento experimental para validar a análise efetuada, já que as dispersões e incertezas são significativas, levando a variações no dano e logo na vida prevista para o produto.

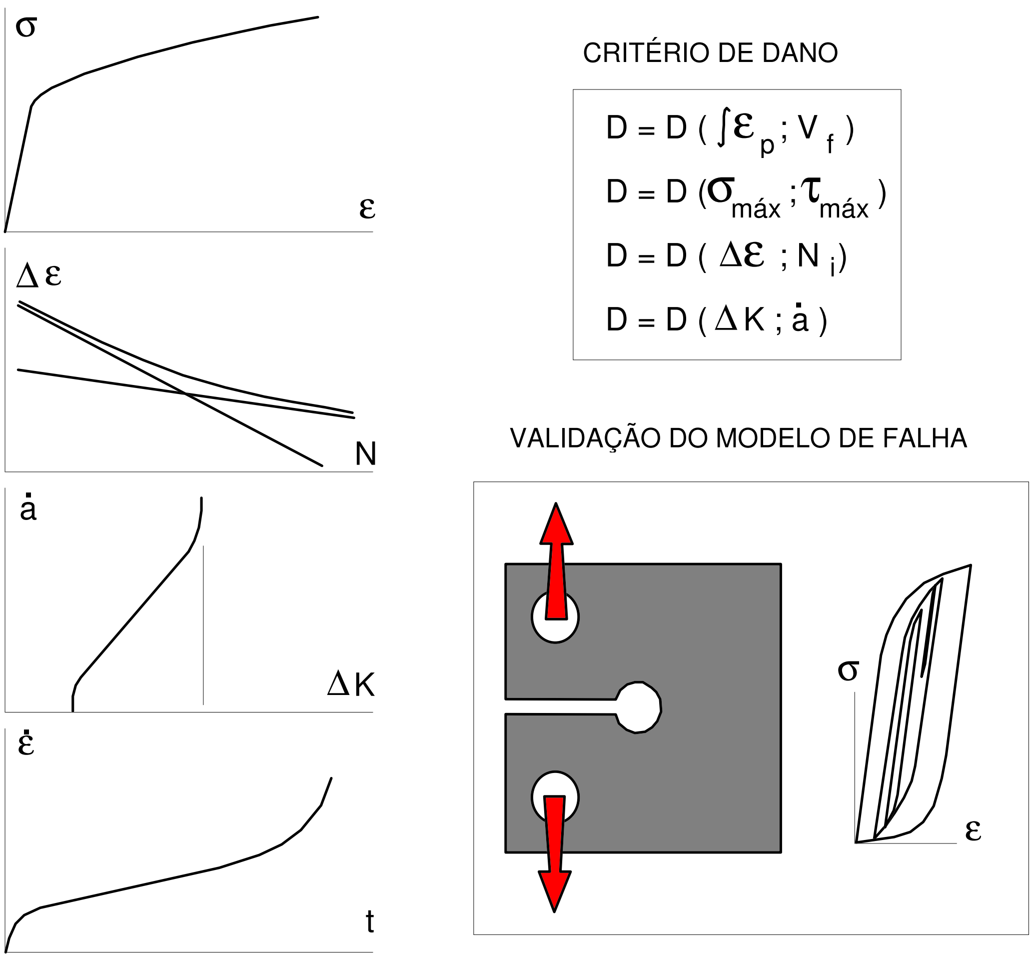

Figura 1.6 - Análise de falha, definindo o dano sobre o material.

1.5 ANÁLISE DE SEGURANÇA

Finalmente temos a última etapa, que une os resultados das anteriores com as informações referentes ao grau de segurança necessário, bem como com as dispersões que ocorrem nos dados, para definir o coeficiente de segurança ou o fator de projeto adequado. Nesta etapa entram os conceitos de Confiabilidade Estrutural, onde o aspecto aleatório das variáveis de projeto é considerado. Esta aleatoriedade ocorre no carregamento que atua sobre o produto, como também nas propriedades do material. As tolerâncias dimensionais são outra fonte de aleatoriedade, significativa quando tratamos com ajuste. Apenas quando todo o conjunto de informações relacionadas com o produto está disponível, de uma forma coerente, é possível desenvolver o projeto com um nível de confiabilidade adequado, sem onerar ou aumentar de forma excessiva os custos.

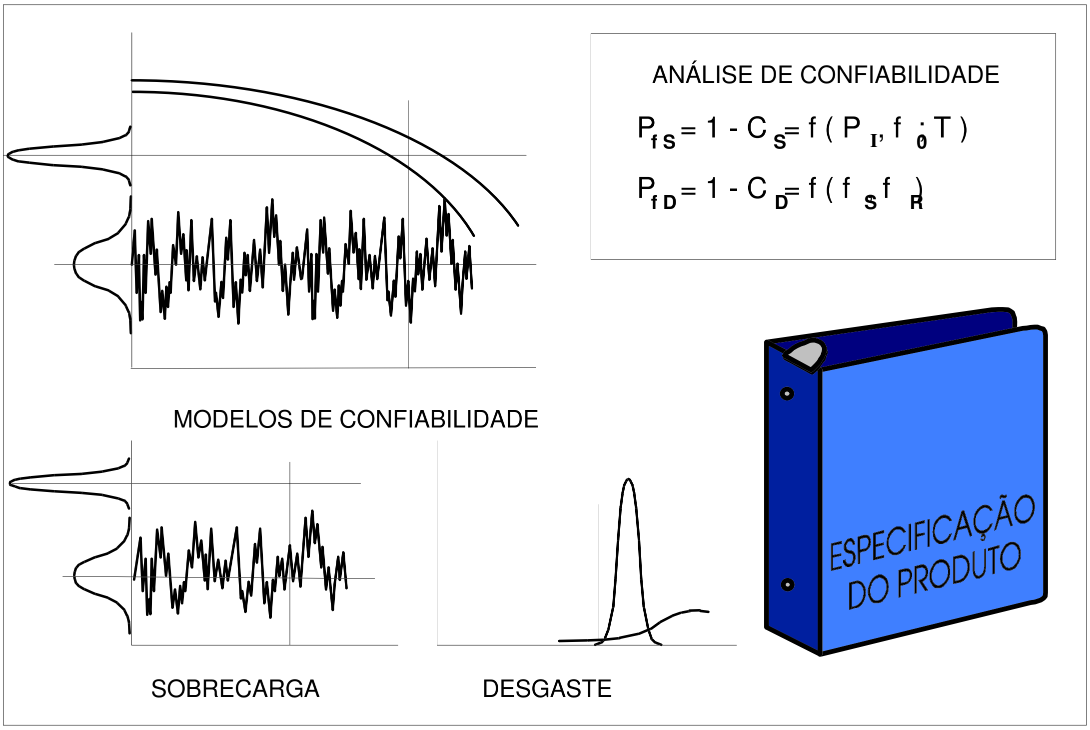

Figura 1.7 - Análise de segurança para falha por sobrecarga e por desgaste.

Na análise de segurança o objetivo é verificar se o nível de resistência é adequado, comparativamente com as flutuações de carga induzidas pelo uso do sistema. A figura 1.7 ilustra de forma esquemática o procedimento. Considerando a carga variável ao longo do tempo, existe uma imprevisibilidade quanto ao seu valor absoluto, porém é possível trabalhar com as suas características estatísticas, ou seja, com a sua função densidade de probabilidade. Quanto à resistência do sistema, esta também possui alguma aleatoriedade, devido às heterogeneidades do material, imperfeições de fabricação ou montagem, etc. Dependendo dos modos de falha que são relevantes, pode ser que o nível de resistência seja pouco influenciado pelo tempo de uso do sistema, mas também pode ocorrer que a vida afete de forma significativa o nível de resistência. Seja em uma ou em outra situação, sempre teremos, em um dado instante de tempo, que a carga atuante possui uma distribuição estatística e, de igual forma, a resistência também possui a sua distribuição estatística. Na análise de segurança, o importante é reconhecermos a possibilidade, expressa na forma de uma probabilidade, de que a carga venha a exceder a resistência. Esta probabilidade pode ser obtida através das distribuições estatísticas da solicitação e da resistência e será tanto maior quanto maior a vida, se a resistência sofrer uma deterioração ao longo do tempo. A confiabilidade é definida como a probabilidade de que o sistema não falhe, em um dado intervalo de tempo, ou vida. Assim, torna-se necessário inicialmente definirmos com exatidão em que consiste a falha do sistema e quais modos de falha devem ser observados. Para tal a funcionalidade do produto, definida nos requisitos do projeto, é essencial.

A confiabilidade assim determinada deve ser comparada com os critérios de segurança estabelecidos inicialmente, quando foram definidos os requisitos de projeto do produto. Assim podemos avaliar se o projeto está de acordo com os requisitos, sendo portanto liberado para fabricação, ou se deve ser revisado, retornando às etapas anteriores.

1.6 - INTEGRAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL

Dentro do moderno contexto de projeto, as diferentes etapas que são seguidas durante o desenvolvimento estão suportadas por sistemas computacionais, onde as informações geradas em uma etapa formam um banco de dados que vai sendo complementado conforme novas informações vão sendo agregadas pelas novas etapas. Neste aspecto não só as atividades baseadas em um modelo numérico-computacional estão conectadas ao banco de dados, mas também as atividades experimentais, baseadas em um modelo físico, estão conectadas ao sistema computacional e logo ao banco de dados. A figura 1.8 ilustra a situação discutida. Esta integração forma então o conceito do CIE, Computer Integrated Engineering.

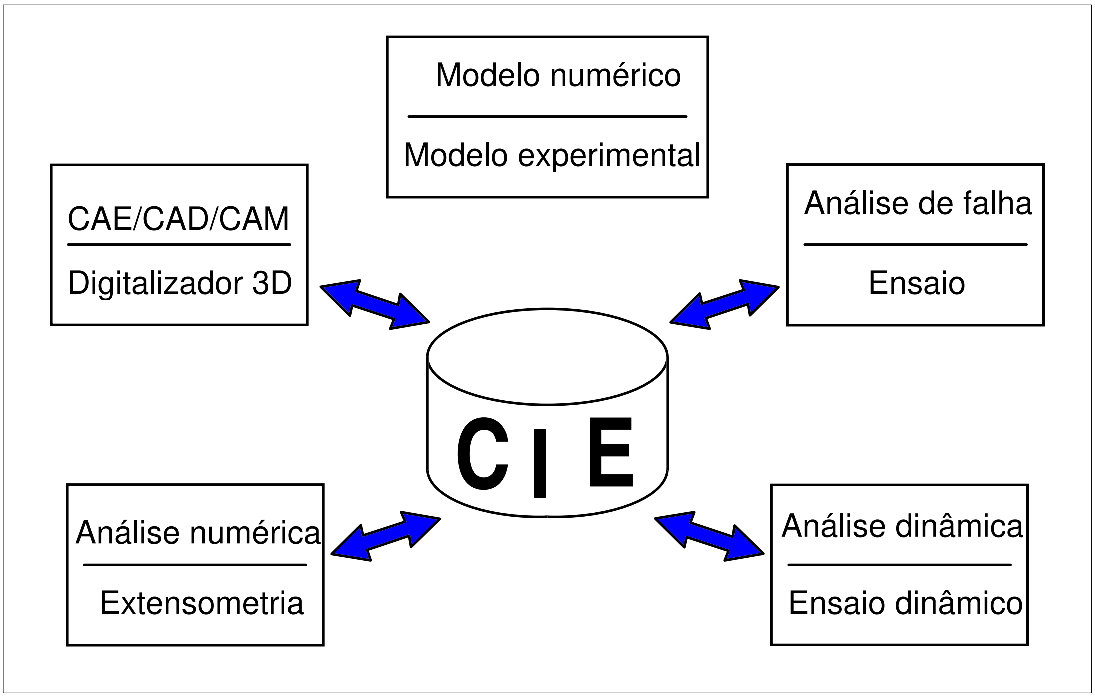

Figura 1.8 - O conceito do Computer Integrated Engineering.

Assim, a tendência é o uso de uma integração cada vez maior entre as técnicas analítico-numéricas e as técnicas experimentais, buscando como objetivo final um conhecimento mais profundo e detalhado do comportamento do produto, otimizando o seu projeto e aumentando a confiabilidade em operação. A integração entre as técnicas de análise estrutural, experimental e numérica, até a pouco tempo divorciadas, permite, por exemplo, a realimentação de resultados experimentais sobre o modelo numérico, permitindo assim um avanço neste, bem como a simulação numérica do ensaio, melhorando o conhecimento do modelo experimental, com indicações sobre o que deve ser esperado como resultados, bem como identificar o melhor procedimento experimental para atingir os objetivos propostos no experimento.

Como objetivo final deve-se ter a integração entre todos os sistemas de Engenharia, onde os dados e informações são igualmente acessados por qualquer sistema e o processo iterativo de refino do produto é acelerado, viabilizando um rápido desenvolvimento deste. Isto permite uma análise totalmente integrada sobre todo e qualquer aspecto do projeto mecânico, seja numérico-computacional, seja experimento-computacional, onde os dados e informações podem ser compartilhados e transmitidos entre os vários sistemas. Exemplificando, o acoplamento entre um analisador digital de tensões e o sistema CAD/CAM, juntamente com um software de CAE, permite uma verificação experimental para os resultados numéricos obtidos. Por outro lado, o sistema de atuadores servocontrolados, para a aplicação de esforços sobre a peça ou componente mecânico, pode ser controlado digitalmente e assim ser usado para simular condições típicas de uso, ou mesmo condições extremas de operação do produto.

Quanto à análise experimental sobre a peça propriamente dita, esta pode ser quanto ao comportamento estático, para levantamento dos campos de tensões sob várias condições de carregamento, bem como quanto ao comportamento dinâmico, para uma determinação dos modos de vibração, resposta dinâmica a excitações controladas, identificação de parâmetros e outras aplicações. Adicionalmente, após o esgotamento dos dados possíveis de serem obtidos com a peça, esta pode passar a sofrer a ação de um ensaio destrutivo, para caracterizar o comportamento da resistência mecânica do sistema geometria-material-carregamento, sob condições de carga estática ou dinâmica, bem como ainda a simulação das condições de serviço em testes de durabilidade, de modo a estabelecer a vida de fadiga da peça. Desta forma o máximo de informações é obtido a partir de uma peça ou de um protótipo desta.

Devemos finalmente lembrar que mesmo com o grande desenvolvimento nos sistemas computacionais, quanto aos softwares de simulação, é sempre necessário termos um aguçado senso crítico sobre os resultados obtidos, pois estes não são melhores do que o são os dados de entrada para o software.

1.7 CONCLUSÃO

Este Capítulo apresentou uma visão geral e abrangente sobre os princípios sobre os quais todo e qualquer projeto estrutural está baseado, com uma ênfase bastante grande sobre os últimos desenvolvimentos e técnicas. Resumidamente podemos dizer que todo problema de projeto, quanto à capacidade de carga das diferentes peças e componentes, necessita dos passos:

Definição do carregamento atuante;

Determinação dos modos de falha prováveis;

Caracterização do material para cada modo de falha;

Cálculo da solicitação no material, função do carregamento;

Verificação da segurança do projeto, pelo cálculo da confiabilidade.

Estando executados estes cinco passos, seja de uma forma sequencial, seja de uma forma iterativa, no caso de grandes projetos, esta seqüência é o que podemos caraterizar como sendo a metodologia recomendada para o desenvolvimento do projeto.