

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE – CONSIDERAÇÕES

1. Introdução

A literatura especializada aponta sob forma de proposições metodológicas e normas, uma série de propostas para a organização do processo de desenvolvimento integrado de produtos. Segundo Ogliari (1999), tais propostas são bastante semelhantes quanto à forma, podendo-se estabelecer um paralelo entre as mesmas e definir uma estrutura básica comum, no qual, consideram uma etapa de entendimento da tarefa de projeto, seguido de etapas de geração de conceitos, análises preliminares e, por fim, detalhamento do produto.

Dentre as técnicas propostas, aquela que tem sido mais comum e que será o balizador deste trabalho, conforme exposto no capítulo anterior, é o modelo consensual sistematizado por Ferreira (1997) e Ogliari (1999), o qual apropria um ganho cumulativo de informações que permite alimentar a fase posterior ao mesmo tempo em que melhora o entendimento da fase anterior. Além de um procedimento seqüencial e lógico, o processo permite a aplicação dos conceitos e ferramentas de apoio como, por exemplo, Projeto para montagem (Design for Assembly – DFA), Projeto para a Manufatura (Design for Manufacture – DFM), Projeto para Manufatura e Montagem (Design for Manufacture and Assembly – DFMA), Projeto para Custos (Design for Cost – DFC), Projeto para o Meio Ambiente (Design for Environment – DFE), entre outros.

Entende-se por sistematização o "ato de agrupar formando um conjunto de normas, reduzindo diversos elementos a um sistema (conjunto de princípios), enquanto que uma ferramenta é um instrumento ou utensílio empregado nas artes ou ofícios". (MICHAELIS, 2000). O processo sistematizado compreende uma série de atividades que, bem organizadas, auxiliam projetistas e equipes de desenvolvimento em suas tarefas. No caso do processo de desenvolvimento de produtos, surgiram nas últimas décadas propostas de sistematização que generalizadas formaram as metodologias de projeto de produtos.

Para Pahl e Beitz (1996), uma metodologia consiste na partição do processo de desenvolvimento de produtos em fases e etapas, com métodos de trabalhos específicos associados. Com isto, busca-se particionar um processo de grande complexidade em etapas mais simples, para melhor entendê-lo, aumentando assim a probabilidade de sucesso.

Segundo Clark e Fujimoto; Patterson, (1991, 1993 *apud* GUERRERO, 2001), o desenvolvimento de produto também pode ser entendido como um processo de transformação de informação que manipula uma grande quantidade e variedade de informações, constituindo deste modo, um aspecto crítico para o gerenciamento do processo. Em consequência, as práticas e sistemas de gerenciamento de informações tornam-se relevantes para garantir que estas informações sejam confiáveis, precisas e completas e estejam acessíveis no formato, local e tempo adequado.

A engenharia simultânea, a partir da década de 90 veio se estruturando como uma abordagem de gestão do processo de desenvolvimento de produto, com foco na redução do tempo de desenvolvimento inserindo simultaneidades nas etapas e atividades do processo. Conforme Guerrero (2001), atualmente alguns autores como Cleetus (1992), Clausing

(1996), Prasad (1996) e Chen e Tsao (1998) ela está mais abrangente, a ponto de ser vista como uma filosofia de gerenciamento.

Na literatura encontram-se diversas definições de engenharia simultânea (“Concurrent Engineering”) ou resumidamente condução simultânea das atividades de desenvolvimento de produtos, cada uma enfatizando um ou outro aspecto ou classificando-a como uma metodologia de projeto ou uma filosofia de gestão. Pode-se destacar:

1. Segundo Chen e Tsao (1998), o principal ponto da engenharia simultânea é um **processo integrado e colaborativo**, onde **pessoas em diferentes disciplinas cooperam** para projetar produtos e desenvolver os processos correspondentes através de **coordenação, comunicação e controle**.
2. É um termo aplicado para uma filosofia de **cooperação multifuncional** no projeto de engenharia, a fim de criar produtos que sejam melhores, mais baratos e introduzidos no mercado mais rapidamente. (SMITH, 1997).
3. É uma **abordagem sistemática** para o **projeto simultâneo e integrado de produtos e processo** relacionados, incluindo manufatura e suporte. Procura considerar todos os elementos do **ciclo de vida do produto** desde a concepção até o descarte, incluindo qualidade, custo, programação e requisitos do usuário. (SPRAGUE e outros, 1991).

Entretanto, é possível estabelecer um conjunto de princípios fundamentais que orientam essas definições. Estes princípios, segundo Prasad e Clausing (1996a, 1994 *apud* GUERRERO, 2001), são:

- Antecipar decisões e problemas: a quantidade de incertezas no início dos projetos é bem maior que em etapas adiantadas, gerando uma maior dificuldade de decisões neste estágio. Contudo, antecipar decisões, problemas e a utilização de informações fazem com que mais oportunidades sejam identificadas e não postergados para o final do projeto, quando são mais críticos e com custos elevados, segundo figura 6.

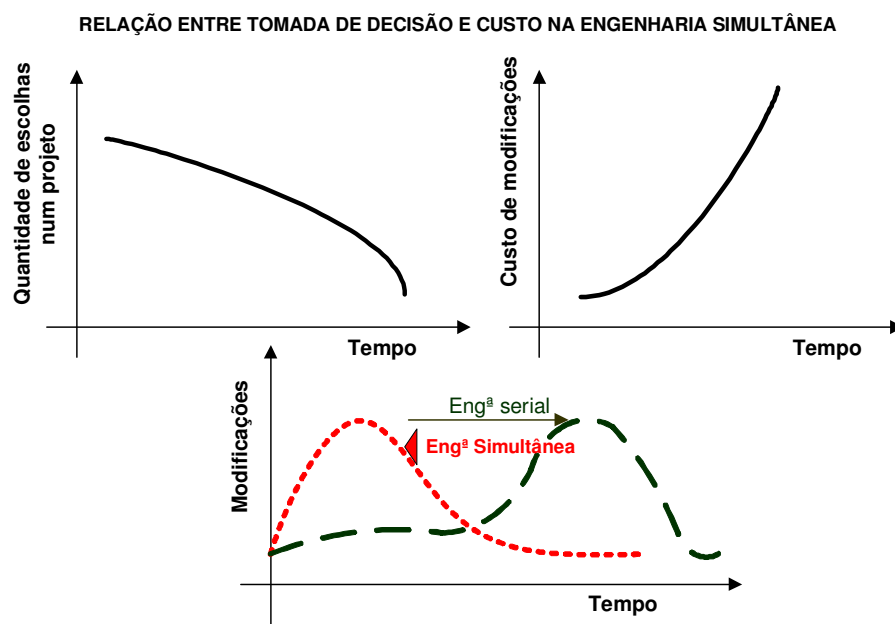


Figura 6 – Características de Desenvolvimento de produtos com foco na Engenharia Simultânea (adaptado SILVA, 2002).

- Estruturar o processo de trabalho: as pessoas não podem realizar diversas tarefas ao mesmo tempo, assim como os computadores. Contudo, estas tarefas podem ser estruturadas em um processo concorrente visível, para que sejam executadas, de forma otimizada, por pessoas, máquinas ou computadores.
- Estabelecer uma equipe de trabalho coesa e multidisciplinar: um dos principais aspectos da engenharia simultânea consiste em desenvolver o trabalho em equipes, através da afinidade e confiança entre os membros, de objetivos comuns, de decisões baseadas em consenso e da atribuição de poder e propriedade às equipes.
- Disseminar as informações para gerar o conhecimento: a utilização de técnicas e sistemas para garantir que as informações e a base de conhecimento estejam sempre disponíveis quando necessário, principalmente quando as equipes de projetos estão distribuídas, física e geograficamente. Segundo Chen & Jan, (2000 *apud* GUERRERO, 2001), a má administração das informações do projeto, são aspectos que podem dificultar a condução do desenvolvimento do projeto, baseado nos seguintes aspectos:
 - a) A necessidade de controlar a comunicação e processos entre os envolvidos (clientes, empresas). Muitas vezes o desenvolvimento ultrapassa as barreiras das organizações.
 - b) Os sistemas e processos utilizados pelas equipes e clientes são heterogêneos de diferentes padrões dificultando a comunicação.
 - c) Segurança das informações e sistemas computacionais. Em ambientes distribuídos onde há troca intensa de informações a segurança deve ser vista como algo crítico.
 - d) O uso de formato distintos de dados de engenharia e base de dados pode gerar incompatibilidades e dificultar a comunicação.

No desenvolvimento integrado de produtos onde duas ou mais equipes trabalham no projeto de um produto, deve haver coesão e colaboração mútua para que a informação e o processo possam fluir de maneira há reduzir o tempo e custo do produto. É importante destacar aqui, por mais simples que possa parecer, a diferença gradual entre os conceitos de dados, informação e conhecimento.

Os dados são os fatos em sua forma primária, a matéria prima para gerar informações e conhecimento. As informações, segundo Miller (1993 *apud* GUERRERO, 2001), são os conjuntos de fatos organizados de tal forma que adquirem valor adicional além do fato em si. É o que se precisa para fazer escolhas, tomar decisões. Esta atribuição de valor aos dados se processa através de: contextualização (qual finalidade dos dados?), categorização (quais unidades de análise?), cálculos (matemáticos ou estatísticos), correção (eliminação de erros) e condensação (resumo em forma mais concisa). (DAVENPORT e PRUSAK, 1998 *apud* GUERRERO, 2001).

Estes valores permitem dinamizar e agregar qualidade aos dados de um projeto ou empresa. Entretanto, o valor da informação está diretamente ligado à qualidade da informação, quanto maior a qualidade, maior o valor agregado. Neste foco, Stair (1998 *apud* GUERRERO, 2001) relaciona as características de uma informação de qualidade, e estes conceitos, serão úteis posteriormente para avaliar o uso das ferramentas (DIP) e o processo de desenvolvimento do estudo de caso apresentado neste trabalho. Estas características são apresentadas na tabela 1, a seguir.

Tabela 1 – Características de uma informação de qualidade

Características	Descrição
1. Precisa	Uma informação precisa é aquela que não contém erros. Em alguns casos, a imprecisão é resultado da transformação de dados incorretos;
2. Completa	A informação completa contém todos os fatos importantes que compõem seu significado;
3. Econômica	O baixo custo da informação é um fator importante para a sua qualidade;
4. Flexível	A informação flexível pode ser utilizada para diversas finalidades, ou seja, quanto maior o número de decisões que podem ser tomadas com uma determinada informação, maior é sua flexibilidade e maior sua qualidade;
5. Confiável	A confiabilidade de uma informação é um indicador de sua qualidade. Na maioria dos casos a confiabilidade está associada à fonte da informação;
6. Relevante	Toda informação é relevante pela sua definição, ou seja, a informação é um dado que faz a diferença. Contudo, diferentes níveis de relevância indicam diferentes níveis de qualidade da informação;
7. Simples	Uma informação de qualidade deve estar limitada aos aspectos essenciais, sem complexidade desnecessária;
8. Em tempo	A informação deve estar disponível ou ser enviada no tempo certo para que sua qualidade não seja comprometida;
9. Verificável	Por fim, uma informação de qualidade deve ser verificável, isto é, pode-se checá-la para saber se está correta.

(Fonte: GUERRERO, 2001).

Estas características devem ser buscadas no processo de desenvolvimento, a fim de garantir a qualidade das informações e conhecimentos gerados. O termo conhecimento e gestão do conhecimento estão cada vez mais em foco nesta década, constituindo o último estágio de valores agregados das informações. E constitui segundo Davenport e Prusak (1998 *apud* GUERRERO, 2001), “uma mistura de experiência condensada, valores, informação contextual e ‘*insight*’ experimentado, a qual proporciona uma estrutura para a avaliação e incorporação de novas experiências e informações. Para que a informação seja transformada em conhecimento todo o trabalho deve ser feito pelas pessoas através de comparações, conexões, análises de consequência e discussões”.

O conceito de desenvolvimento de produto adotado aqui, que prima por uma abordagem sistemática das atividades, segundo Roozenburg e Eekels (1995) é aquele que o considera "um processo mental orientado, pelo quais problemas são analisados, objetivos são definidos e ajustados, propostas de solução são desenvolvidas e a qualidade dessas soluções são medidas". Atualmente, o processo de desenvolvimento de produtos é realizado por uma equipe multidisciplinar integrada em um ambiente de engenharia simultânea, onde várias atividades são desenvolvidas paralelamente, e que se caracteriza por apresentar um grande intercâmbio de informações entre os envolvidos. Tal processo é denominado de Desenvolvimento Integrado de Produtos (DIP), o qual será abordado de modo global, a seguir.

2. Processo Consensual de projeto

É composto pelas fases de projeto, concatenadas por Ferreira (1997) e Ogliari (1999), e apresentados esquematicamente na figura 4, do capítulo I, as quais estabelecem uma seqüência lógica de ações que permitem organizar e documentar cada etapa de desenvolvimento do produto. O gerenciamento das informações deve ser completa e

confiável para que ao final de cada etapa tenha-se uma saída relevante de dados que servirá de base informacional para a fase seguinte. A figura 7 ilustra o fluxo de informações entre as etapas do desenvolvimento do produto.

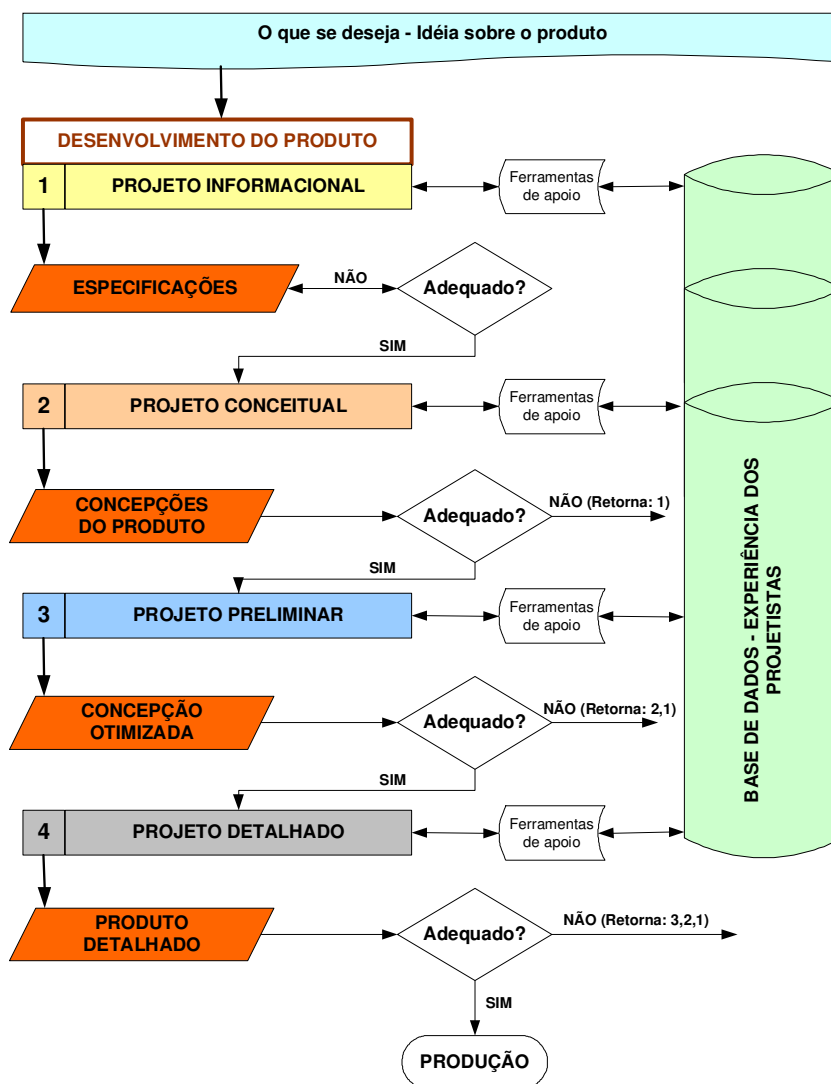


Figura 7 – Modelo de fluxo de desenvolvimento de produtos (adaptado: Forcellini, 2003).

2.1 Projeto Informativo

Para se chegar à concepção de um produto é necessário, a priori, entender o que se deseja, ou seja, compreender o “problema de projeto”. Este processo tem início no levantamento das informações pertinentes às necessidades dos clientes, qualquer que seja a área envolvida; mecânica, elétrica ou computacional (software). Entende-se por clientes, todas as pessoas envolvidas no processo, desde o projetista, operador, engenheiro etc, até o usuário final que fará o uso e disposição do produto no fim de seu ciclo de operação, conforme ilustrado na figura 8. Entretanto, a definição das necessidades do ponto de vista dos clientes nem sempre traduz de forma clara o que realmente se deseja do produto, visto que esta é na maioria da vez subjetiva, por exemplo: um cliente que deseja um produto bonito, pode significar colorido ou com formas arredondadas.

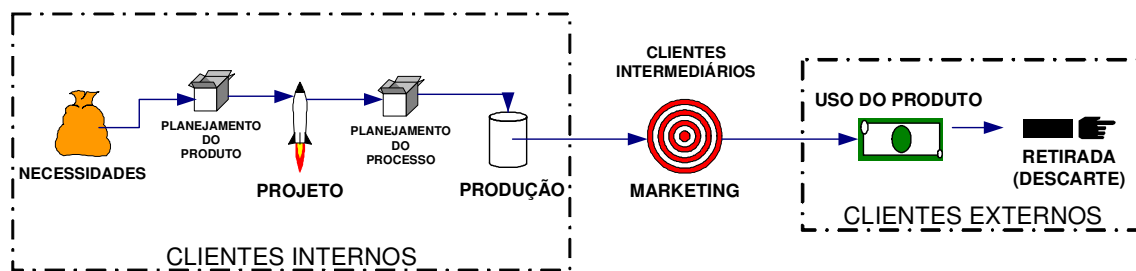


Figura 8 – Ciclo de Vida do Produto conforme atividades de desenvolvimento, uso e descarte.

Os requisitos são os meios de traduzir as necessidades em uma linguagem mensurável de engenharia, assim como a modelagem na linguagem de programação, são as características técnicas que possam ser medidas através de um sensor, ou função (ou objeto) de uma determinada linguagem. Segundo Pahl e Beitz (1996), são os “como” para atender os “o quê”. Logo, os requisitos devem ser preferencialmente características mensuráveis, tipo: força, temperatura, deslocamento etc.

No desenvolvimento integrado de produtos envolvendo uma equipe multidisciplinar, o projeto informacional necessita de um gerenciamento de informação bastante estruturado, visto que é necessário coletar as necessidades (dados), de modo agrupado e classificado, ordenado por grau de importância, para que as mesmas possam ser disponibilizadas de maneira colaborativa e esteja acessível a toda equipe de projeto; de modo a permitir uma discussão das necessidades, que muitas vezes são subjetivas, para transformá-las através de análise e síntese nos requisitos dos clientes e posteriormente do produto. Deste modo, buscase minimizar os problemas de organização e comunicação, visto a dificuldade de se obter uma representação global e um entendimento claro por todos os membros da equipe de projeto.

A análise das necessidades e requisitos do projeto obtidos de modo hierárquico e por grau de importância pode ser avaliado a partir do método da casa da qualidade (QFD – Quality function deployment), no seu primeiro desdobramento. E será apresentada com mais detalhes no item referente às ferramentas de desenvolvimento integrado de produtos (DIP).

A fase final do projeto informacional consiste em estabelecer, sob a forma de lista, os itens mais significativos da análise dos requisitos de projeto, que foi conseguido através da expressão de peso de importância (P_i), o qual apropria um valor (peso) de importância estimado pelos clientes (V_c) ao grau de relacionamento (G_r) entre os requisitos e necessidades na casa da qualidade, conforme expressão 1.

$$(1) P_i = \sum_{i=1}^n V_c * G_r, \text{ sendo "n" é o número de necessidades levantadas.}$$

Os resultados ponderados e hierarquizados geram os elementos fundamentais para posterior definição das especificações do projeto. Estas últimas envolvem os requisitos mais pontuados adicionados aos requisitos obrigatórios ou funcionais e representam de maneira geral as características principais que o produto deverá apresentar. Isto pode ser visto no exemplo da figura 9. Estas informações são levadas para a fase seguinte compondo a base informacional, em forma de especificações, para desenvolver os aspectos funcionais do projeto mecânico, elétrico, eletrônico e de controle.

Metas	Requisitos	Unidade	Objetivo	Sensor	Saidas Indesejáveis	Observações/Restrições
01	Custo	R\$	menor que R\$ 50.000,00	planilha custos	não comprometer a qualidade do equipamento	O grande número de requisitos do cliente final pode aumentar o custo
02	Disponibilidade (T.U.E/T.V.U*100)	%	maximizar	contagem	grande número de paradas para manutenção	representa o qto o equipamento foi utilizado durante sua vida útil
03	Downtime	s	minimizar	cronômetro	falta de recursos aumentando tempo de parada	Qto maior o número de recursos indisponíveis, maior será o tempo ocioso dos recursos disponíveis
04	Índice de consultas	%	maximizar	contagem	baixo índice de consultas	
05	Níveis de resistência à carga	Pa	maximizar	strain gauge	grande número de componentes	peças pouco resistentes poderão sofrer maiores danos durante a montagem, transporte ou operação
06	Níveis de ruído	dB	abaixo 60dB	decibelímetro	ruído acima dos padrões ergonômicos (NBR)	muito ruído pode produzir cansaço excessivo no operador
07	Número de cantos vivos	qtd	minimizar	visual	muitos pontos de acidentes de trabalho	
08	Número de classes	qtd	maximizar	visual	pouca classificação pode causar desinteresse pelo produto	Limitações tecnológicas, de tempo e capital

Figura 9 – Exemplo especificações de um projeto.

2.2 Projeto Conceitual

O projeto conceitual é visto como uma das fases mais importante do processo de projeto, uma vez que, é aqui que as especificações de projeto se desdobram para uma possível concepção de solução do produto. Contudo, não bastam empregar as atividades, meios e modelos da engenharia de automação para as partes de controle e da engenharia de produto para as partes físicas. É nesta fase que se devem decidir quais tecnologias deverão ser empregadas para evitar ao máximo a necessidade de alterações futuras na concepção. Por exemplo, segundo Moraes & Castrucci (2001 *apud* SANTOS, 2003), historicamente até 90% do esforço total de programação são dedicados à solução de problemas posteriores à instalação, à correção de falhas ou erros de funcionamento.

Nesta fase procura-se sair do abstrato ao concreto, onde cada subfunção da estrutura permita atribuir pelo menos um princípio de solução. O uso de ferramentas DF‘x’ (Design for ‘X’; como a DFMA – “Design for Manufacture and Assembly” – projeto para manufatura e montagem), pode levantar aspectos inconsistentes das concepções por vindouro geradas baseado nas especificações do projeto consolidadas na fase informacional. Várias técnicas de criatividade podem ser usadas para pesquisar os princípios de solução que desempenhem as funções decompostas. Contudo, destacam-se aqui os três principais: convencionais, intuitivas e discursivas, listados na tabela 2, a seguir.

Tabela 2 - Técnicas de levantamento de princípios de solução

CLASSIFICAÇÃO	TÉCNICA
CONVENCIONAIS	Pesquisa bibliográfica, análise de sistemas naturais, análise de sistemas técnicos existentes, analogias, medições e teste em modelos.
INTUITIVAS	Brainstorming, Método 635, Método Delphi, sinergia, analogia direta, analogia simbólica, combinação de métodos.
DISCURSIVAS	Estudo sistemático de sistemas técnicos, estudo sistemático com uso de esquemas de classificação, uso de catálogo de projeto, TRIZ - Teoria da solução de problemas inventivos, métodos da matriz morfológica.

(Fonte: FORCELLINI, 2003).

Neste ponto, podem-se utilizar quaisquer umas das ferramentas relacionadas na tabela 2. Entretanto, é comum o uso da técnica de ‘Brainstorming’ para gerar os princípios de solução para as diversas operações básicas do produto.

O processo tem início com a análise funcional do produto, onde os requisitos funcionais são tratados e interpretados. E, para desenvolver esta tarefa, é comum a aplicação de uma ferramenta bastante difundida que é a síntese funcional, a qual serviu de base de estudo. Por meio da síntese funcional gera-se a função global e os desdobramentos desta mesma estrutura funcional em subsistemas. O uso de métodos intuitivos ou sistemáticos de estímulo à criatividade permite identificar e ordenar princípios de solução para cada função ou subfunção.

Nesta etapa pode-se utilizar outra técnica como a matriz morfológica. Através desta é possível ordenar as subfunções possibilitando a geração de múltiplas soluções para o projeto. Uma vez gerada as concepções do produto, deve ser selecionada a concepção que melhor atende as necessidades dos clientes através dos requisitos de engenharia, contemplando assim as especificações do projeto, que por sua vez foram analisados e classificados em ordem de prioridades no projeto informacional.

O nível de detalhamento das concepções geradas deve viabilizar um projeto preliminar de pelo menos uma concepção. Dentre as múltiplas soluções qual a que melhor responde às reais necessidades dos clientes? Para responder tal questão, se faz necessária a utilização de métodos e procedimentos sistemáticos que auxiliem na tomada de decisão quanto à seleção da concepção que irão ser trabalhadas nas fases de projeto preliminar e detalhado.

A figura 10 ilustra as etapas de avaliação conceitual pelo qual se devem passar as concepções geradas para que se tenha uma proposta que correspondam as especificações do projeto e as principais necessidades dos clientes.

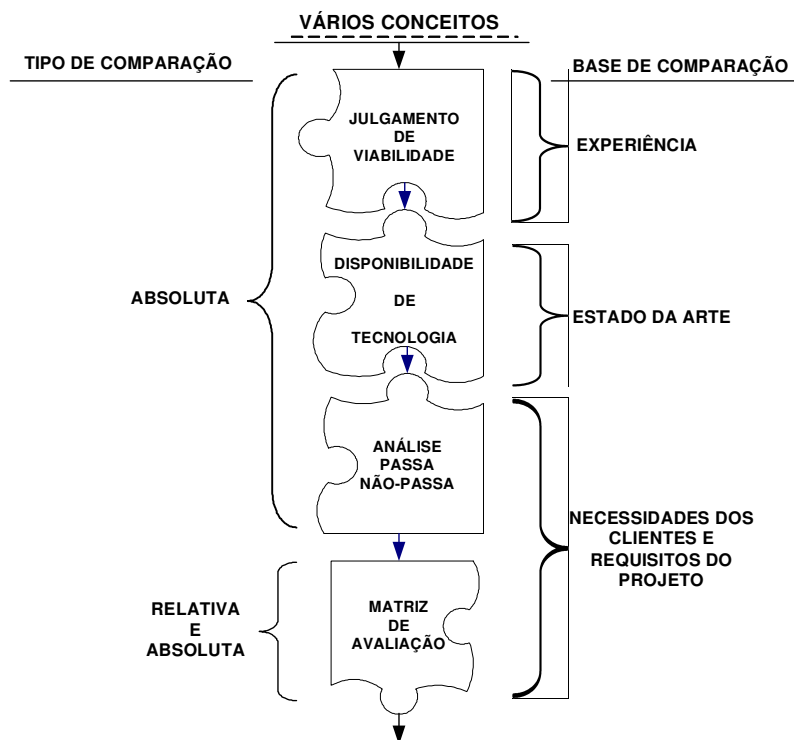


Figura 10 – Técnicas de avaliação conceitual (adaptado FORCELLINI, 2003).

Neste processo de avaliação conceitual também são utilizadas técnicas como a da matriz decisão (método de Pugh) figura 11, ou o da avaliação conceitual para redução de

múltiplas soluções em umas poucas, e, as mais promissoras resultar em produtos de maior qualidade.

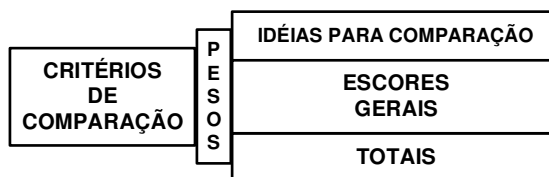


Figura 11 – Matriz decisão.

Estas técnicas se baseiam em ações de valoração, comparação e tomada de decisão. Para tanto, como citado anteriormente, as informações devem ser precisas, completas e confiáveis. Ambas constituem excelentes ferramentas para seleção de concepções, pois, fundamenta-se na viabilidade, na disponibilidade de tecnologia, na possibilidade de manufatura (passa - não passa) e na capacidade da concepção atender as necessidades dos clientes, através da escolha de critérios de comparação, seleção de itens a serem comparados, geração de escores parciais e globais em torno de uma concepção de referência.

Como os conceitos gerados nem sempre apresentam um grau de detalhamento suficiente, os parâmetros de comparação devem ser os requisitos do projeto e as necessidades dos clientes coletadas na etapa do projeto informacional.

2.3 Projeto Preliminar

O projeto preliminar inicia-se com informações vindas das fases anteriores, tais como a estrutura de funções e o(s) princípio(s) de solução(ões) advindo(s) da fase de projeto conceitual, ou seja, faz-se necessária a concepção do produto; necessidades dos clientes, requisitos e especificações de projeto; informações de gerenciamento; controle e outras informações que possam ser pertinentes e verificáveis.

O produto evolui da concepção ao leiaute otimizado do produto. Deste modo, esta etapa consiste em desenvolver o leiaute e formas para produzir os desenhos em escala dos dispositivos portadores das funções principais e auxiliares, especificando dimensionalmente os dispositivos segundo as normas técnicas. Inicialmente deve-se estabelecer uma divisão para as partes do produto, onde, de acordo com o tipo de funcionalidade e tecnologia envolvida (mecânica, hidráulica, elétrica, eletrônica etc.), dividem-se as funções, que devem ser realizadas pelo produto em sistemas, subsistemas ou funções principais e auxiliares, componentes e peças. Daí, as partes do produto são tratadas e desenvolvidas de forma diferenciada dentro das tecnologias envolvidas em cada divisão (sistemas, subsistemas, etc.).

O projeto preliminar “é a fase do processo na qual, partindo da concepção de um produto, o projeto é desenvolvido de acordo com critérios técnicos e econômicos e, à luz de informações adicionais, o projeto é levado até o detalhamento que possa conduzi-lo diretamente à produção” (PAHL e BEITZ, 1996).

Deste modo, as soluções devem se possível e a depender dos recursos tecnológicos disponíveis, passar por verificações ou simulações dos fatores de perturbação (vibração, gradientes de temperatura, agressão ambiental, etc.) das partes móveis e de sustentação. Assim prepara-se uma lista preliminar das partes com seus respectivos desenhos, através do emprego de um 'checklist' dos princípios a serem observados (como princípios de transmissão de força, controle de travamento de segurança, divisão de tarefas, etc.). As ferramentas utilizadas nessa etapa são comuns na engenharia, como: CAD, CAE, simuladores, construtores de modelos, programas de cálculo e dimensionamento.

2.4 Projeto Detalhado

Por fim, o projeto detalhado consiste em desenvolver e finalizar o projeto, no sentido de serem concluídos desenhos, documentações e dimensionamentos, para então serem encaminhados à manufatura. Isto inclui a disposição, a forma, as dimensões e as tolerâncias de todos os componentes, onde normas e procedimentos padronizados devem ser empregados conforme as necessidades dos meios de fabricação.

Alguns autores já consideram, nesta fase, a preparação e desenvolvimento de procedimentos para a fabricação, mas, por se estar tratando do processo de projeto, estas atividades podem ser realizadas em paralelo e pela área responsável pela produção do produto, principalmente quando a equipe foi constituída por componentes destas áreas. Assim, de qualquer forma, a equipe de projeto exerce a função de projetar o produto, tendo em vista características que envolvem a manufatura do mesmo, bem como as que são relacionadas às outras áreas, encaminhando-se, por fim, a documentação gerada para a manufatura.

Neste momento, as especificações dos materiais e a viabilidade econômica também devem ser reavaliadas. Há também de estabelecer decisões sobre como o produto deverá ser manufaturado, quais máquinas e ferramentas serão utilizadas e como as partes serão montadas. As regras básicas são: clareza, simplicidade e segurança (PAHL e BEITZ, 1996).

3. Ferramentas de Desenvolvimento Integrado de Produtos (DIP)

Para executar cada fase do processo de desenvolvimento integrado de um produto, podem ser empregadas diversas ferramentas, tais como: Métodos construtivos da matriz da qualidade (Matriz QFD – Quality Function Deployment), análise funcional, análise morfológica, matriz PNP (passa, não-passa), DFA, DFM, DFMA, DFE, DFC, TRIZ [ou TIPS – Theory of Inventive Problem Solving] (Teoria da solução de problemas inventivos), entre outras.

Há indícios de que as ferramentas DF‘x’ já vêm sendo estudadas e aplicadas na indústria desde 1957. O “X” do termo ‘projeto para X’, são as habilidades ou características abordadas nas áreas inerentes ao processo de desenvolvimento de produtos (manufatura, reciclagem, montagem, custo, meio ambiente entre outros).

O DFMA - Design for Manufacture and Assembly – surge da necessidade de projetar e reprojetar produtos visando facilidades na fabricação e montagem, sem comprometer a funcionalidade, ergonomia e custo. É fruto de dois métodos conjugado que é a DFM (Design for Manufacture) e a DFA (Design for Assembly).

O DFM é um método baseado na integração do planejamento proposto para o produto e o processo de fabricação, com a finalidade de obter requisitos para o produto e para o processo, de modo que o desenvolvimento integrado gere uma fabricação fácil. Segundo Boothroyd e Dewhurst (1988), a chave para o sucesso da aplicação DFM é a simplificação da manufatura do produto. Ao utilizar a DFM, o grupo de desenvolvimento trabalha de acordo com regras, princípios e recomendações, que facilitarão o processo de manufatura sem deixar de lado os requisitos oriundos das necessidades dos clientes envolvidos no ciclo de vida do produto.

A ferramenta DFA é semelhante ao DFM, embora tenha como objetivo a facilidade na montagem do produto. Segundo Boothroyd e Dewhurst (1988), as técnicas de DFA visam primeiramente à simplificação da forma do produto, assim os custos com a montagem são reduzidos. Esta apresenta algumas regras comuns a DFM, como, reduzir n° de peças, usar

materiais e componentes padronizados etc., além de minimizar manipulação, usar união e fixação eficientes, usar geometria que promova autolocalização, etc.

Algumas recomendações para aplicação destas ferramentas são: minimizar o número de peças, desenvolver projetos modulares, projetar componentes multifuncionais e de fácil fabricação, diminuir ou evitar o número de componentes de fixação (tipo rebites, pinos, parafusos), priorizar a padronização dos componentes, eliminar necessidades de ajustes e tolerâncias, reduzir o número de partes para facilitar a manipulação e montagem; enfim, simplificar a estrutura para reduzir custos sem comprometimento da funcionalidade.

Estas características trazem como principais benefícios a simplificação dos produtos, redução do custo de montagem e manufatura, melhoria da qualidade, redução do tempo de produção, aumento das possibilidades de automação do processo de montagem, dentre outras.

A Figura 12 ilustra a aplicação da técnica de DFMA. No exemplo, um mouse contendo 22 peças que levou em média 3 minutos para desmontar e 13 minutos para montagem; após uso da ferramenta DFMA passou a ter 4 componentes e seu tempo de montagem e desmontagem foi de apenas 30 segundos.



Figura 12 – Exemplo de aplicação da ferramenta de DFMA.

Segundo Pizzato e Forcellini (1998), a DFMA é uma das ferramentas de desenvolvimento integrado que apresentam potencial para fornecer uma avaliação quantitativa e de valor agregado à equipe de projeto em diversos estágios do desenvolvimento, conforme esquema apresentado na figura 13, propiciando tomada de decisões e avaliando a estrutura do produto de modo a simplificá-la. Entretanto, apesar de incrementar eficiência ao projeto e gerar bons resultados, esta continua sendo subutilizada pelos projetistas, pelo fato destes conhecerem pouco sobre montagem e operações de manipulação, acrescido à inadequada formação das equipes de trabalho, conforme a filosofia da engenharia simultânea.

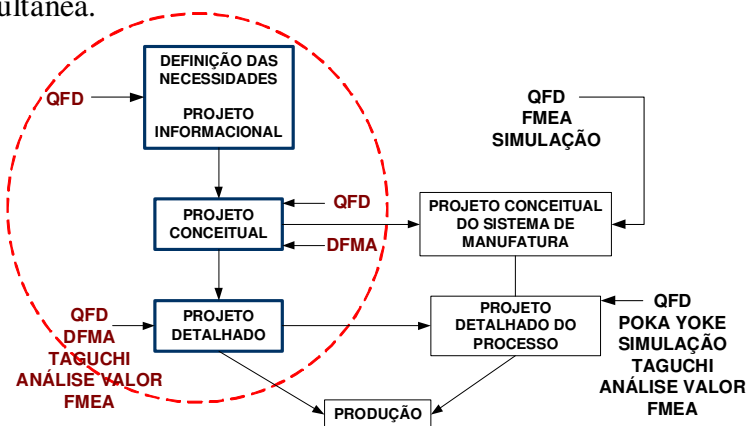


Figura 13 – Utilização de DFMA em diferentes fases do desenvolvimento de Produtos (adaptado PIZZATO, 1998).

O QFD – Quality Function Deployment -, por intermédio da sua Primeira Matriz, a Casa da Qualidade, conforme ilustrado na figura 14, busca estabelecer as relações entre necessidades dos clientes e requisitos de projeto, e entre estes requisitos, permitindo uma análise bastante realista do que se pretende desenvolver. De acordo com Hauser e Clausing (1988), citado por FORCELLINI (2003); "todo requisito de projeto se relaciona fortemente, com aquele(s) requisito(s) de cliente que o originaram".

A primeira coluna da matriz QFD representa as necessidades dos clientes ordenadas, linha a linha, de acordo com critérios adotados pela equipe, como: manufatura, segurança, operação, impacto ambiental etc. Os requisitos são dispostos na parte superior, numa seqüência de colunas correspondente à quantidade de requisitos. A região central da matriz permite estabelecer as relações entre as linhas (necessidades) e as colunas (requisitos), atribuindo valores, numa escala quantitativa (por exemplo: 0 – 1 – 3 – 5). Uma forte relação corresponde uma avaliação máxima.

No telhado da matriz são feitas às avaliações entre os próprios requisitos do produto, que podem ser do tipo “quando se incrementa um deles o outro também se incrementa, ou quando um se incrementa o outro diminui”. Estabelecendo desta forma graus de inter-relacionamentos: fortemente relacionados, fracamente relacionados etc. A última coluna após os requisitos é usada para atribuir valores dado pelos clientes do grau de importância da necessidade (por exemplo: de 1 a 5), de modo que possibilite ponderar a relação necessidade versus requisitos e classificá-la hierarquicamente.

A ferramenta de auxílio QFD busca de modo geral entender ‘o que’ os clientes desejam e delinear da melhor forma disponível ‘o como’ satisfazer estas necessidades. Esta pode ser percebida como sendo uma das principais ferramentas para implantação da Engenharia Simultânea. Visto que, propicia analisar as inter-relações entre as necessidades e requisitos e estabelecer hierarquicamente as especificações do produto, gerando assim a base de conhecimentos para a funcionalidade do produto, por meio da síntese funcional e matriz morfológica.

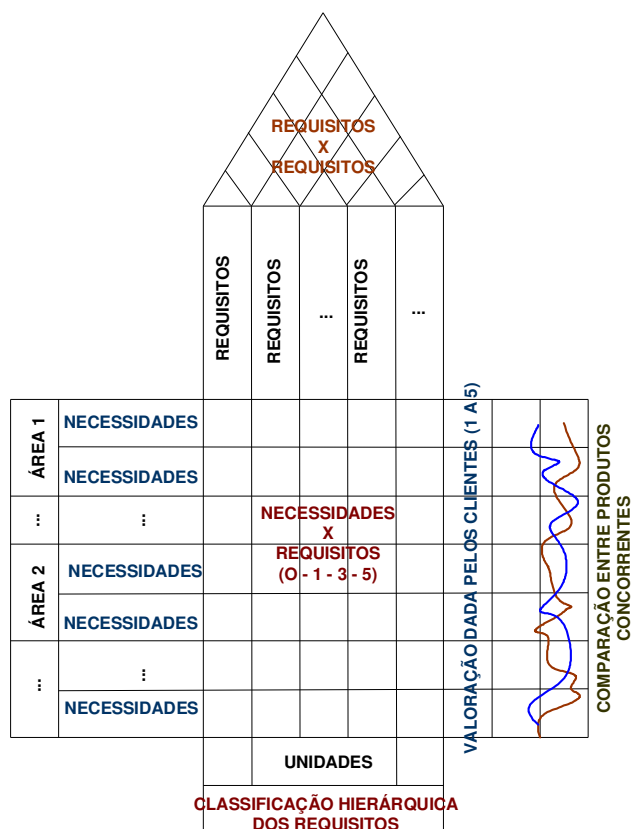


Figura 14 - Modelo Matriz QFD (primeiro desdobramento).

Ao concluir-se a casa da qualidade tem-se uma grande quantidade de dados sumarizados (informações), de alto valor agregado e de razoável confiabilidade, que permitem serem utilizadas para tomada de decisões pela equipe de desenvolvimento de produtos. Além do que, tais relações permitem identificar os requisitos que deverão ser tratados de modo conjugado, minimizando suas possíveis contradições. Daí a necessidade de combinar o uso da casa da qualidade com outra ferramenta auxiliar que permita identificar possíveis restrições técnicas que possam vir a surgir, que é a TRIZ ou TIPS.

A TRIZ (TIPS) – Theory of Inventive Solving Problem – é na verdade, um conjunto de ferramentas que favorecem através de um procedimento sistemático a busca de soluções alternativas para concepção de produtos. Enquanto o método QFD apresenta “o que” deve ser resolvido, a TRIZ mostra “o como” solucionar os eventuais entraves tecnológicos. Segundo Ferreira C. (2000), “o emprego da TRIZ, juntamente, com a QFD permite aumentar a qualidade dos produtos, maximizarem os lucros, aumentar a parcela de mercado e, principalmente, aumentar o grau de inovação do produto”.

Entretanto, em vários casos, a resolução de um conflito entre requisitos pode estar fora da área de conhecimento da equipe de projeto, conforme ilustra a figura 15, tornando assim, mais difícil e complexo a busca de soluções decorrente da chamada ‘inércia psicológica’ dos indivíduos que, procuram naturalmente confiar em suas próprias experiências do que pensar fora de suas especialidades. E, experiência e intuição são difíceis de serem transferidas para outras pessoas dentro de um mesmo ambiente; tanto mais dificuldades terão as equipes de projeto que estejam separadas física e geograficamente.

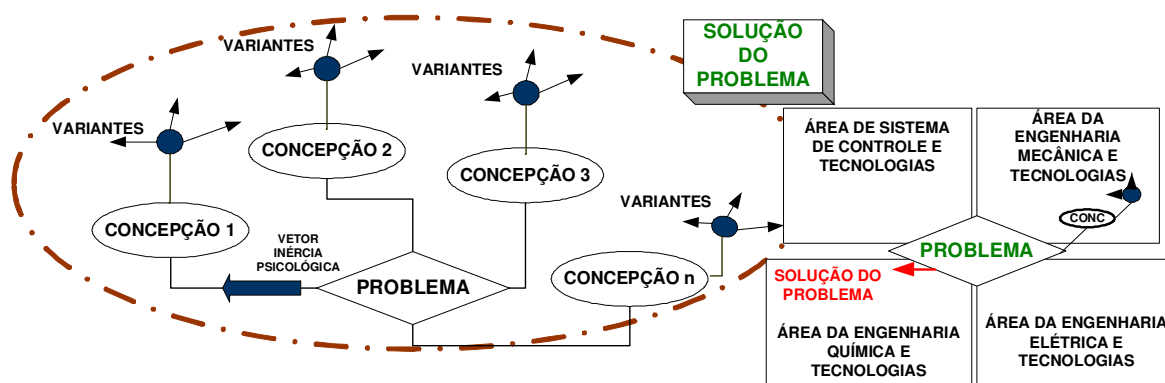


Figura 15 – Efeito da inércia psicológica (adaptado: FERREIRA C., 2000).

O russo Genrich S. Altshuller, da antiga URSS (1926) idealizou um caminho para buscar soluções, sem depender, totalmente dos aspectos psicológicos (intuição e experiência) dos indivíduos envolvidos no desenvolvimento de produtos. Segundo o autor, a Teoria da Solução de Problemas Inventivos (TIPS) deveria satisfazer algumas condições:

- ser sistemática, com procedimentos passo a passo;
- ser um guia, sem restringir o espaço de busca da solução ideal;
- apresentar repetibilidade, confiabilidade e não depender de ferramentas psicológicas;
- permitir o acesso ao corpo de conhecimento inventivo;
- permitir adicionar ao corpo de conhecimento inventivo;
- ser bastante familiar para os inventores.

Altshuller, atuando como perito em patentes, na Marinha Soviética, pesquisou uma enorme quantidade de patentes procurando classificá-las em níveis de inovação. Conclui que

um problema inventivo “é aquele cuja solução gera outro problema”. No caso da bancada, por exemplo, ao aumentar a dimensão da haste de aplicação de ciclos na flexão do corpo de prova, visando obter maior amplitude de flexão da amostra; seu peso aumenta, e consequentemente a dimensão da bancada. Uma solução seria adotar um compromisso entre a dimensão da haste e o peso para não ultrapassar certo valor, ou melhorar as características do material empregado na haste e, assim, aumentar o custo. Cada tentativa de solucionar o conflito gera um novo problema a ser estudado. É evidente que nenhuma destas soluções seria inovadora e ideal. Entretanto, pode existir uma solução que satisfaça a resolução do conflito fora do escopo da mecânica, como fixar uma pequena chapa de material ferro magnético na extremidade da amostra e inseri-la em campos magnéticos alternados que proporcione a sua flexão sem necessidade de uma haste mecânica.

Uma solução inventiva é uma que não altera a dimensão da haste, nem seu peso e muito menos o custo. A dimensão da haste e seu peso são parâmetros conflitantes. Então conforme definido, soluções inventivas são aquelas que resolvem os problemas conflitantes com o objetivo de obter considerável avanço na solução. O método dos princípios inventivos é a base de todos os desenvolvimentos e procura maximizar, minimizar ou manter, dentro de determinadas metas, os parâmetros de engenharia através da matriz contradição e dos princípios inventivos.

Baseado nestas descrições, Ferreira C. (2000), apresenta as etapas constituintes da TIPS, como sendo: identificação do problema, formulação do problema dentro da abordagem da TIPS (identificação das contradições), classificação dos parâmetros de engenharia (P.E), busca de uma solução análoga para o problema do projeto (princípio inventivo) e por fim, adaptação da solução análoga ao problema do projeto.

Uma análise, através da matriz contradição é apresentada na tabela 3, entre os parâmetros de engenharia (39 parâmetros) com os princípios inventivos (40 princípios, segundo Altshuller), obtêm-se as possíveis soluções para o problema do projeto. Nas linhas estão 5 parâmetros que são desejáveis e nas colunas têm 5 parâmetros indesejáveis. Há conflito de interesses, contradições entre eles, portanto, a região de interseção corresponde às soluções baseadas nos princípios inventivos.

Os parâmetros de engenharia e os princípios de solução inventivos estão descritos no apêndice E e F.

Tabela 3 – Exemplo Matriz Contradição.

Características a serem melhoradas	Resultados indesejáveis (conflitos)	1. Peso do objeto em movimento	2. Peso do objeto em repouso	...	37. Complexidade de Controle	38. Nível de automação	39. Produtividade
		1. Peso do objeto em movimento					26,35, 18,19
2. Peso do objeto em repouso					2,26, 35	35,1, 28,15	
:							
29. Precisão da Manufatura					28		
:							
38. Nível de automação	28,26, 18,35	28,26, 10,35				5,12, 35,26	
39. Produtividade	35,26, 24,37	3,15, 27,28				5,12, 35,26	

Tomando-se como exemplo o parâmetro de número 29 (precisão da manufatura) em contraposição ao parâmetro de número 37 (complexidade de controle), pode-se ter como uma provável solução o princípio inventivo 28 (substituição de sistema mecânico). Este princípio implica na substituição de sistemas mecânicos por: ópticos, acústicos; utilização de campo elétrico ou magnético para interagir com os objetos.

Este método é baseado na tecnologia e foi desenvolvido na década de 30 pela observação da prática de resolução de problemas descritos nos pedidos de patentes. Os dados podem ser questionados e reavaliados, entretanto, os procedimentos e informações ainda são atuais e de muito valor agregado.

O Método da síntese funcional precede a busca de soluções e segue um procedimento bem definido que busca desenvolver uma estrutura de funções do produto (análise funcional). Este processo compreende o estabelecimento de uma função global (total) do produto para em seguida realizar o seu desdobramento em funções parciais (básicas ou elementares), conforme exemplo da figura 16. Através deste método é possível estabelecer as interfaces com os sistemas técnicos periféricos, os usuários e o meio ambiente.

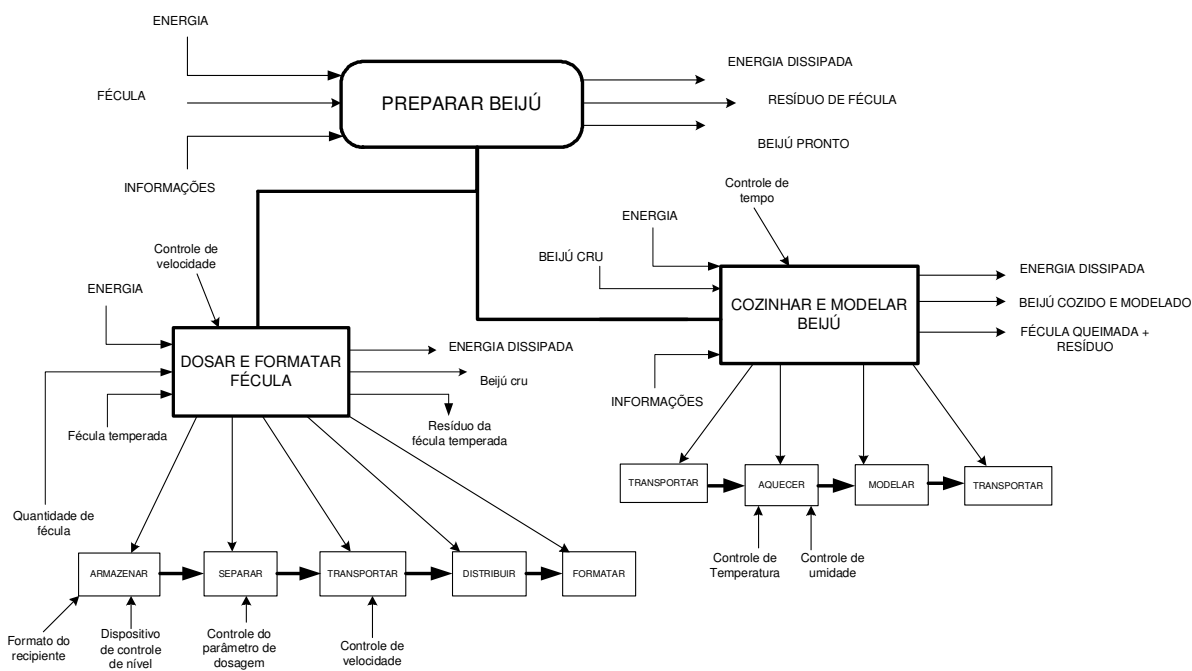


Figura 16 – Exemplo de Análise Funcional com uma função global e subfunções.

Nesta fase o projeto do sistema de controle pode caminhar simultâneo as concepções geradas, visto que as variáveis e suas inter-relações funcionais foram sendo levantadas a partir da funcionalidade de todos os subsistemas. Contudo, mesmo considerando que algumas abordagens estabeleçam o processo concomitante, na prática sua realização ainda é construída de modo seqüencial. E, segundo Santos (2003), do ponto de vista do especialista em automação é natural que o sistema de controle tenha início após a concepção de uma planta física (produto), assim como os especialistas no projeto mecânico não observam inicialmente os aspectos voltados à automação.

É conveniente destacar que o sistema de controle é usado para modificar o comportamento do sistema ou especificar um comportamento aceitável do sistema no decorrer do tempo. Ou seja, quando se quer de algum modo medir ou estabelecer um valor para determinada grandeza, como: a velocidade ou freqüência de oscilação, ou ainda a amplitude do deslocamento, ou a força a ser aplicada e mantida etc. E, de certo modo

substituir a intervenção humana em processos repetitivos, insalubres ou perigosos, que exigem interação contínua e muitas vezes ininterrupta na execução dos processos.

Entretanto, verifica-se pelo explanado que existem vantagens do trabalho da engenharia simultânea onde uma equipe bem integrada e comprometida busca levantar todos os aspectos inerentes ao produto mecatrônico, evitando deste modo a dissociação das áreas envolvidas no projeto.

O Método da Matriz Morfológica, ilustrado na figura 17, consiste numa pesquisa sistemática de diferentes combinações de elementos, com objetivo de encontrar uma nova solução para o problema. Para tanto, deve-se criar uma tabela onde a primeira coluna contenha as funções, subfunções classificadas com suas respectivas tarefas básicas (elementares). E, para cada função, descrita ou representada, deve-se ter no mínimo uma solução. As combinações geradas são analisadas e algumas, por diferentes motivos, podem ser eliminadas ou aproveitadas conforme critérios pré-estabelecidos.

Fixar corpo de prova	Dispositivo de Segurança	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6		
	Controle de Velocidade	5.1 1/f	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8
	Tipo de dispositivo	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5			

Figura 17 – Exemplo do Método da Matriz Morfológica.

As ferramentas de DIP são utilizadas na maioria das vezes para auxiliar e organizar o processo de desenvolvimento do produto. Devido à natureza generalista, tais técnicas podem ser utilizadas nos mais diversos tipos de aplicações. Entretanto, as particularidades do produto podem facilitar ou dificultar o uso de uma determinada ferramenta tornando-a mais ou menos adequada para aquela aplicação específica. Neste caso, a avaliação da sua utilização para o desenvolvimento de produtos com características similares, como os produtos mecatrônicos, pode fornecer informações que irão auxiliar a sua aplicação no desenvolvimento de sistemas semelhantes.

Além disto, existem ferramentas específicas a determinados domínios de conhecimento. Por exemplo, a computação tem o diagrama de use-cases, classes de uso, entre outros que serão apresentadas no tópico: Sistema de controle.

4. Peças plásticas e Ensaio de Fadiga

O conhecimento de um maior número de parâmetros que envolvam o projeto de um produto é essencial para atender as reais necessidades dos clientes, inclusive a que se destina. No estudo de caso de uma bancada para ensaios de fadiga em plásticos, a equipe de projeto foi solicitada a aprofundar suas visões sobre as propriedades e características dos materiais a serem testados pelo produto, bem como os processos pelos quais estes materiais serão avaliados. Sendo assim, faz-se necessário obter informações mais completas e de natureza confiável para prováveis tomadas de decisões no decorrer do processo de desenvolvimento.

Os componentes em plásticos injetados estão cada vez mais presentes nos produtos industriais, principalmente na indústria automobilística. Este crescimento tem exigido uma melhoria da produtividade e na qualidade do ferramental necessário para a moldagem por

injeção. A qualidade da peça injetada por sua vez depende de vários parâmetros como o material injetado, a geometria da peça e do molde e os parâmetros de injeção adotados. Contudo, apesar da aplicação de peças plásticas moldadas por injeção na engenharia ser cada vez mais comum, vários aspectos da utilização dos materiais poliméricos ainda não foram completamente estudados, o que evidencia a necessidade de desenvolver pesquisas que aprimorem os critérios considerados no projeto e na fabricação de peças moldadas por injeção.

Embora tenha havido um avanço significativo no estudo do processo de moldagem por injeção, existem poucos trabalhos que abordam a utilização de materiais termoplásticos, em particular dos reciclados, na fabricação de componentes para a indústria. Isto ocorre devido à falta de confiança dos projetistas em utilizar tais materiais, uma vez que não há um controle no processo de reciclagem, tampouco o conhecimento quanto às suas propriedades térmicas e mecânicas. Adicionalmente, o processo de moldagem por injeção altera as propriedades dos materiais e conseqüentemente as características das peças plásticas injetadas. Assim sendo, o conhecimento das propriedades dos materiais plásticos, incluindo os reciclados, são necessários para que a sua utilização, e para que a fabricação dos componentes seja possível.

O que se observa, a grosso modo é uma analogia dos materiais plásticos com os materiais metálicos, como se ambos tivessem propriedades e estruturas semelhantes. Todo processo de dimensionamento e levantamento das curvas de cargas são feitos levando em consideração o comportamento dos metais, em particular, do aço, acrescidos de altos fatores de segurança, produzindo deste modo componentes superdimensionados. No caso particular de peças plásticas submetidas a carregamentos dinâmicos, pouco tem sido abordado quanto a resistência à fadiga dos materiais poliméricos. Tais efeitos devem ser considerados de maneira a ter-se um dimensionamento criterioso do componente.

Os efeitos de fadiga são considerados no projeto da peça avaliando diagramas que relacionam a vida útil do material (em número de ciclos) e o estado de tensões-deformações ao qual este estará submetido. Assim, pode-se dimensionar o componente de acordo com a quantidade de ciclos de carregamentos que este deve suportar sem falhar por fadiga. Tais diagramas, levantados através de ensaios experimentais, podem ser encontrados na literatura para poucos materiais poliméricos, porém não são encontradas informações a respeito da resistência à fadiga de materiais termoplásticos reciclados. Assim, os ensaios de fadiga são de fundamental importância para o levantamento das características de resistência a cargas dinâmicas em materiais plásticos, viabilizando o desenvolvimento de produtos com maior grau de confiabilidade e durabilidade.

4.1 Materiais Poliméricos

Atualmente 80% dos produtos industriais estão sendo manufaturados em polímeros (plástico) em face de suas propriedades físico-químicas. Em decorrência desta demanda, faz-se necessário estabelecer parâmetros de controle e qualidade dos seus diversos tipos, conforme sua utilidade, trazendo maior segurança no manuseio.

O termo Polímero vem da associação de Poli = vários e Meros = unidades, associação de várias cadeias carbônicas (CH_n), que podem apresentar ligações cruzadas internamente. Quando os polímeros possuem ligações cruzadas em baixa e alta densidade, têm-se respectivamente, os elastômeros e os termofixos. Os elastômeros degradam facilmente com o calor, não são reversíveis e não servem para reutilização. Já os termofixos, não podem ser fundidos e moldados por injeção. Possuem um alto grau de cruzamento de suas cadeias proporcionando maior estabilidade dimensional a altas temperaturas. Estes materiais quando tornam-se duros e quebradiços quando submetidos ao calor, conseqüentemente não são

moldados por injeção. Quando os polímeros não apresentam cruzamento de suas cadeias, ou apresentam ramificações não-entrelaçadas, são considerados termoplásticos (Termo = temperatura e Plástico = derreter, amolecer), ou seja, material que pode ser amolecido e moldado por injeção, além de serem reutilizáveis ou recicláveis.

Os termoplásticos, segundo Postsca & Michaeli (1995), são os polímeros que, com uma pequena influência do calor, são capazes de aumentar sua viscosidade (capacidade de fluir) em estado semi-sólido ou estado viscoelástico e adotar uma forma que, ao resfriar-se são capazes de mantê-la. Microscopicamente são formadas por uma cadeia linear de polímeros com ou sem ramificações. Os termoplásticos ainda possuem uma estrutura molecular dividida em amorfos, sem forma definida, e semicristalina, isto é, parte de sua cadeia está agrupada em forma de cristais, bem definida, como nos metais.

Há diversas formas de classificar os polímeros, sendo o principal critério de classificação a distribuição do espaço entre as cadeias depois de solidificado, conforme figura 18, a seguir.

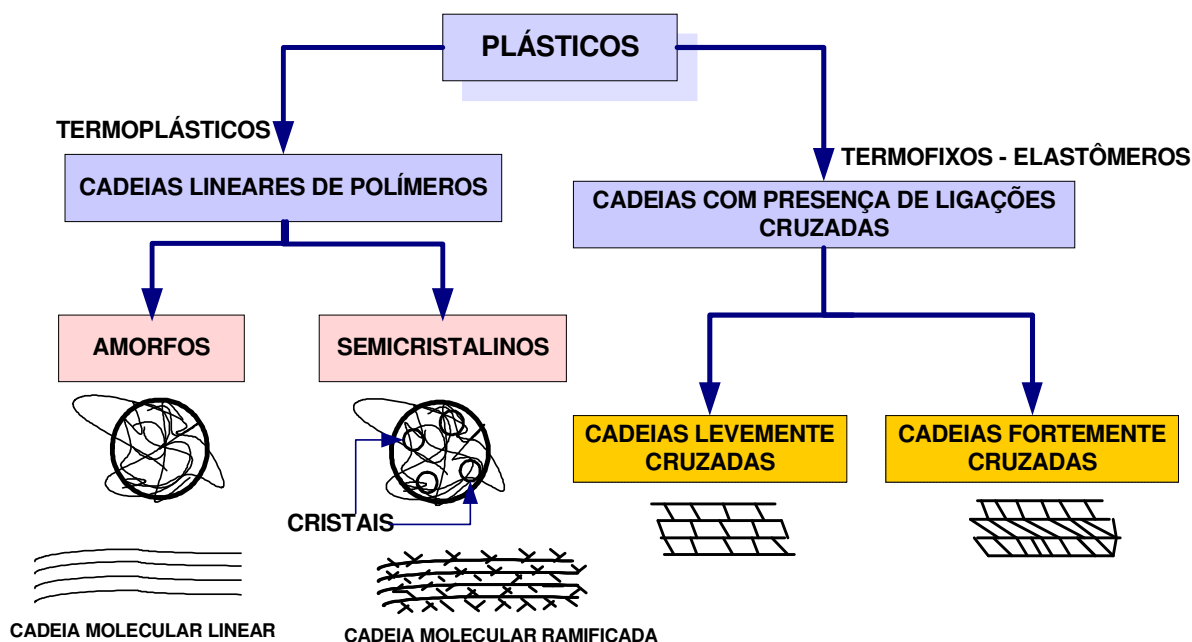


Figura 18 – Esquema classificatório dos plásticos.

Os polímeros são obtidos através de processos catalisadores, gerando produtos como o polipropileno, polietileno, metacrilato etc., ou processos de poli condensação – enlace de monômeros distintos, como as poliamidas e os policarbonatos, ou, por processos de poli adição – processo de poli condensação restrita e fixa de monômeros, tendo como exemplo a espuma de poliuretano.

As propriedades termoplásticas dos plásticos amorfos e cristalinos podem ser resumidas na tabela 4, a seguir, onde os sinais de ‘+’ e ‘-’, representam respectivamente, maior e menor grau da propriedade citada, por exemplo: os termoplásticos com estrutura amorfa são mais resistentes ao impacto.

Tabela 4 – Propriedades termoplásticas.

Amorfos	Crítérios	Cristalinos
-	Resistência Térmica	+
-	Rigidez	+
+	Impacto	-
-	Contração	+
+	Transparência	-

(Fonte: Postsca & Michaeli, 1995)

A seguir, na tabela 5, são apresentados alguns dos produtos comercialmente conhecidos, de acordo com suas estruturas e nome popular, como por exemplo, as garrafas PET, são plásticos de estrutura semicristalina, cuja composição química é um polietilentereftálato.

Tabela 5 – Exemplos de termoplásticos.

Amorfos	Cristalinos ou Semicristalinos
ABS – Acrilo Nitrilo Butadieno Estireno	PPN ou PP – Polipropileno
PS – Poliestireno	PBT – Polibutilenteraftálato
ASA – Éster Acrílico elastomérico	PET – Polietilentereftálato
PC – Policarbonato	PA – Poliamida
PMMA – Polimetacrilato	POM – Resina
PVC – Cloniro de Polivinila	-

(Fonte: Postsca & Michaeli, 1995)

Observa-se, na figura 19 que se seguem, algumas estruturas básicas de polímeros e uma cadeia genérica cruzada.

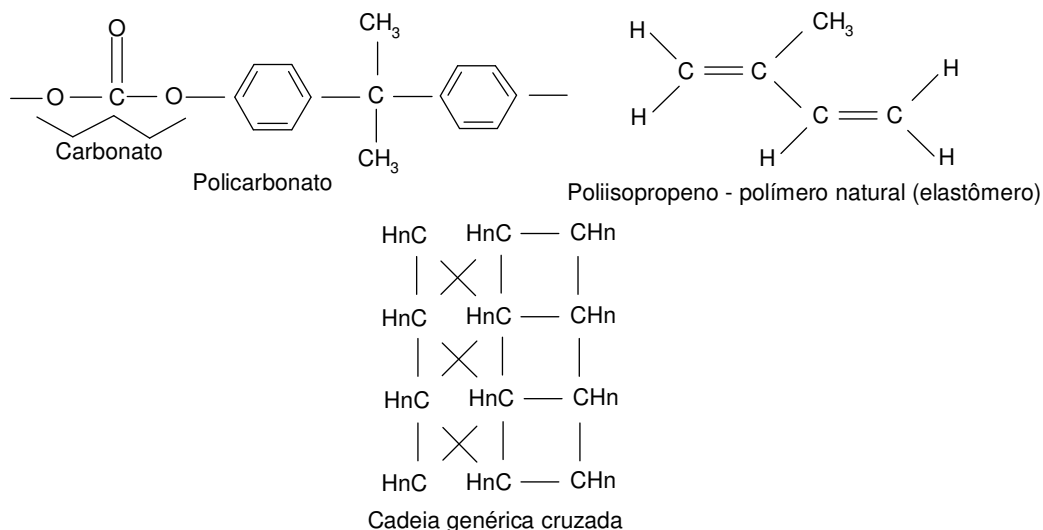


Figura 19 – Exemplos de cadeias poliméricas.

A grande significância econômica dos plásticos está intimamente relacionada à suas propriedades, variedades de formas, texturas, cores e a possibilidade de modificações combinadas, podendo gerar diversidades desconhecidas de outros grupos de materiais. Os plásticos possuem uma faixa de densidade entre 0,8 a 2,2 g/cm³, além de um amplo limite de propriedades mecânicas, fácil processabilidade, modificação por aditivos, baixo fator térmico

e condutibilidade elétrica, podendo ser transparentes, com alta resistência química, reciclável e baixo consumo de energia de produção para materiais brutos, comparados com os metais.

Devido a esta grande variedade e tamanha complexidade de polímeros, o trabalho de desenvolvimento de uma bancada para ensaios de fadiga em materiais plásticos, busca explorar este universo ainda em fase embrionária, para que seja possível estabelecer os parâmetros de controle destes materiais, principalmente pela possibilidade de reutilização, minimizando deste modo os aspectos de descarte no meio ambiente.

4.2 Projeto de Peças

O desenvolvimento de peças plásticas injetadas passa primeiramente pela determinação dos processos, formas e suas características mecânicas, delimitadas pelo uso a qual serão submetidos. Neste sentido preocupa-se com a definição de critérios de projeto considerando os tipos de carregamentos aplicados, bem como o comportamento dos materiais plásticos escolhidos, visto que são normalmente bastante distintos daquele apresentado pelos metais, tradicionalmente utilizados na fabricação de componentes. Além destes fatores, é de interesse tecnológico e científico estabelecer o ciclo de vida destes materiais quando submetidos a grandes esforços e agressões ambientais causados pela exposição ao calor, salinidade e intempéries naturais, visto que seu emprego é cada vez mais crescente na indústria e no meio domiciliar.

Como não se tem delineado o comportamento destes materiais, a aplicação tem sido feita utilizando altos coeficientes de segurança, produzindo peças super-dimensionadas. Outro aspecto que tem sido pouco explorado pelos pesquisadores refere-se aos critérios para dimensionamento de peças plásticas injetadas submetidas a carregamentos dinâmicos e repetitivos (dentes de engrenagens, *snap-fits*, etc...). Neste caso, o componente estará suscetível à falhas por fadiga do material, portanto, este fenômeno deve ser considerado durante o seu dimensionamento.

Entende-se por fadiga o processo pelo qual um material submetido a esforços repetitivos de tensão-deformação e forças externas, quebra e/ou amolece, por histerese mecânica, devido a fissuras internas que culminam na ruptura do material (TROTIGNON, 1994).

Segundo a American Society for Testing and Materials – ASTM (1993), a fadiga implica num “processo progressivo e localizado que modifica permanentemente a estrutura dos materiais submetidos às condições que produzem tensões-deformações e forças cíclicas flutuantes ou variáveis em cada ponto ou pontos da estrutura interna; e que, provavelmente culmine em fissuras, ruptura completa ou amolecimento térmico após um número suficiente de oscilações”.

O projeto de peças considerando os efeitos da fadiga é realizado avaliando os diagramas de tensões-deformações versus o número de ciclos de falha (ou ciclos de vida) do material, conforme ilustrado na figura 20. Tais diagramas são obtidos através de um ensaio de resistência a fadiga, onde uma amostra de material é submetida a esforços dinâmicos e contínuos até apresentar amolecimento térmico ou ruptura, de modo a simular as condições de uso do material.

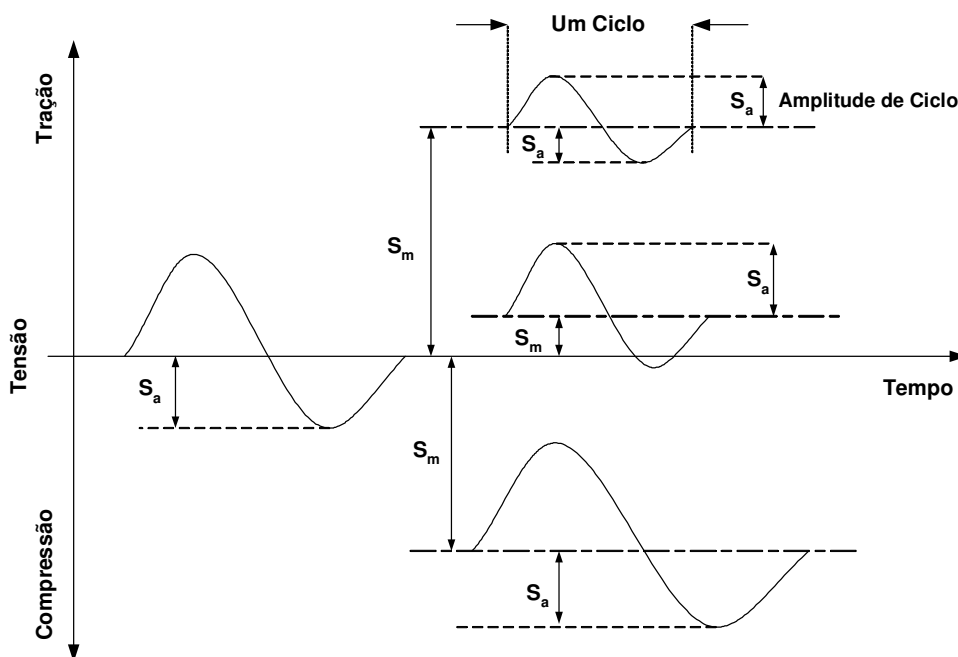


Figura 20 – Curva Tensão X Tempo para diferentes valores de Tensão média.

4.3 Ensaio de Fadiga

O processo de falha por fadiga pode ser sempre descrita como uma seqüência de dois passos: Primeiro o começo de fissuras e, segundo, a propagação da ruptura. O próprio processo de manufatura do produto introduz tensões internas que propiciam a formação das fissuras. Segundo Fisher e Yen (1999 *apud* ULMANN, 2003), “toda estrutura tem virtualmente um círculo de discontinuidades indo do microscópio (<0,010in) ao macroscópico, introduzido na manufatura ou processo de fabricação”. Geralmente iniciado a partir de entalhe¹ ou outras fontes de concentrações de tensões.

O teste de fadiga fornece informações e qualificação aos materiais, em particular, aos plásticos, de resistirem ao desenvolvimento de rupturas ou deteriorações mecânicas gerais quando submetidos a um número relativamente grande de ciclos de esforços. Estes dados podem ser levantados basicamente através de dois modos: flexão do eixo da amostra seguida por torção, ou fixando a amostra em uma das extremidades para que a mesma fique em balanço e seja submetida à ação de uma força de intensidade constante produzindo tensões e deformações. Conforme ilustrado na figura 21, a seguir.

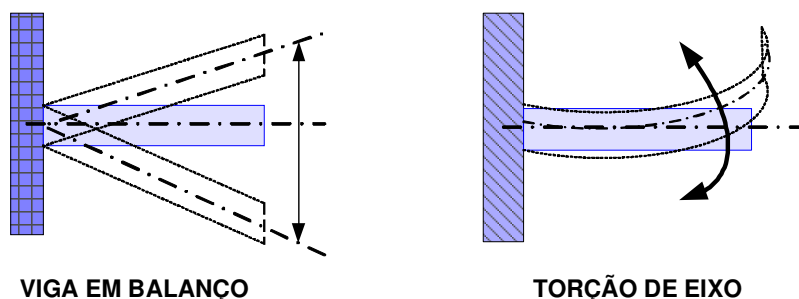


Figura 21 – Esboço dos métodos de aplicação de carregamento no ensaio de fadiga.

O método de teste proposto pela ‘American Society for Testing and Materials’ (ASTM, dec 1993) permite medir a capacidade dos materiais plásticos de resistirem à

¹ Termo genérico que representa qualquer contorno geométrico que incrementa tensões locais.

deterioração por ciclos de tensões. Os resultados devem prover dados do número de ciclos de tensões que produzirão na amostra falha por fratura, amolecimento, ou redução da dureza por aquecimento como resultado de fricções internas (amortecimento histerético). Especificamente, a norma D 671-93 da ASTM, propõe cobrir a determinação do efeito da repetição de tensões de flexão de mesma magnitude, em plástico, pelo método de viga engastada em balanço, típica das máquinas de teste, desenvolvida para produzir forças de intensidade constante para testar as amostra em cada ciclo.

O ensaio, de modo resumido, consiste em fixar a amostra (cuja geometria é apresentada na figura 22), como uma viga em balanço, segundo especificações dimensionais explícitas na norma D671-93 (ASTM), e aplicar tensões cíclicas ou dinâmicas de intensidade constante, no decorrer do tempo e coletar dados referentes à frequência de oscilação, temperatura da amostra e tempo de duração dos esforços sobre a amostra. Os dados coletados são utilizados para levantar a referida curva de Tensão x N° de Ciclos.

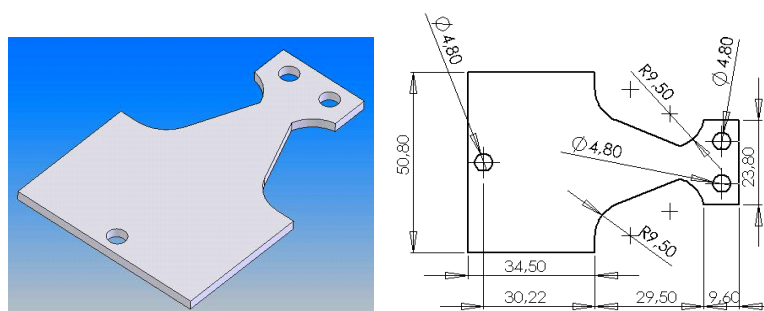


Figura 22 – Modelo da amostra para ensaios de fadiga em materiais plásticos. Fonte: ASTM, Norma D 671-93.

Para realização do ensaio de fadiga é necessário um equipamento especializado, uma bancada de ensaios, com roteiro de procedimentos, que possibilite levantar dados para análise de resultados. Os dispositivos eletrônicos e mecânicos devem estar sincronizados de modo a permitir formas variáveis de carga, sinal e frequência de oscilação. A configuração básica de uma máquina de testes de fadiga deve atentar para alguns dispositivos, como:

- a) Os aparatos de fixação da amostra.
- b) Um contador – para registrar o número de ciclos aplicados.
- c) Uma chave de interrupção – para interromper a máquina quando houver falha ou ruptura da amostra.
- d) Um termômetro – para medir a temperatura da superfície da amostra. Usualmente termômetros de radiação ou termopares.
- e) Sistema de aplicação dos ciclos.

Segundo Trotignon (1994), um sistema de aquisição de dados pode ser configurado para obter as entradas que caracterizam o ensaio. O modo de carga, por exemplo, pode ser definido através de cinco parâmetros: 1. A amplitude do sinal através do deslocamento do corpo de prova; 2. O tipo de excitação; se triangular, quadrada ou senoidal emitido ao atuador; 3. Os valores médios das intensidades de forças; 4. A frequência de aplicação dos ciclos; 5. A natureza da carga a ser aplicada se torção, compressão, tração ou flexão.

No caso da bancada para ensaios de fadiga projetada, a carga aplicada produzirá flexão e o tipo de excitação será senoidal, a fim de garantir uma ruptura por fadiga por amortecimento histerético. Um esboço gerado da parte mecânica de uma das concepções da bancada para ensaios de fadiga, com os dispositivos de fixação e aplicação dos ciclos de oscilação, bem como alguns atuadores é mostrado na figura 23, a seguir.

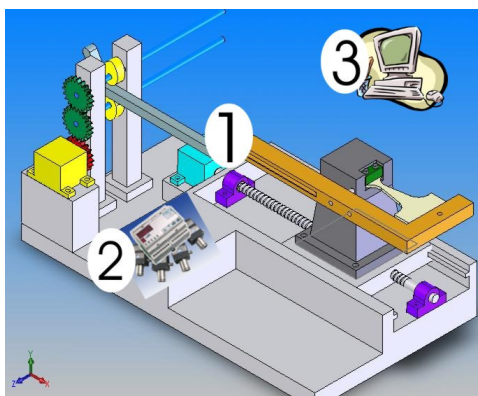


Figura 23 – Esboço de uma concepção da bancada para ensaios de fadiga em materiais plásticos.

Esta concepção deve conter pelo menos três módulos: 1. O módulo gerador do tipo de carga, 2. O módulo de aquisição de dados e 3. O módulo de tratamento e controle das condições de teste, especificamente das condições de segurança e operação da máquina.

O módulo de carga é bastante crítico numa bancada de ensaios de fadiga, visto que, todo controle de esforços é proveniente deste e, portanto, deve ser dimensionada de maneira a permitir um ajuste fino e com baixo grau de incerteza. Para tanto, o dimensionamento dos componentes devem ser feitos levando em consideração pequenos valores de deformações admissíveis e tensões dentro do regime elástico linear. Assim, pode-se garantir que as deformações que poderão ocorrer nestes componentes não alterem os resultados do ensaio de fadiga.

4.3.1 Determinação dos parâmetros do ensaio de fadiga

O ensaio de fadiga, conforme proposto pela norma ASTM 671-93, permite executar o ensaio de fadiga com deformações constantes. Neste caso, é imposto um deslocamento fixo ao corpo de prova durante todo o processo de aplicação dos ciclos de flexão. Ou, por meio de uma tensão constante, onde se determina o valor de deslocamento necessário para causar a tensão desejada ao corpo de prova. Este deslocamento é corrigido ao longo do ensaio, de maneira a manter o valor da tensão máxima atuante aproximadamente constante. Deste modo, o ensaio é realizado para vários valores de tensão de teste permitindo obter o diagrama tensão versus ciclos de vida (falha).

O cálculo da carga (força) necessária para provocar a tensão desejada nos pontos mais solicitados da seção crítica do corpo de prova, conforme esquema da figura 24 pode ser determinado considerando os parâmetros a seguir:

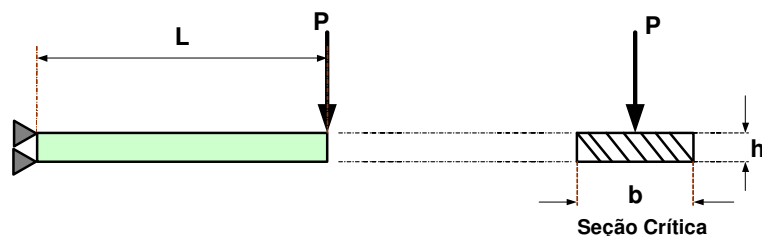


Figura 24 – Diagrama do carregamento aplicado no corpo de prova.

Onde o momento linear será $M = P * L$, e o momento de 2ª ordem para uma seção retangular é dado por $I = \frac{bh^3}{12}$.

Considerando o esquema apresentado na figura 25 pode-se determinar as equações que envolvem as tensões atuantes sobre o corpo de prova fixado e assim levantar os parâmetros desconhecidos do ensaio.

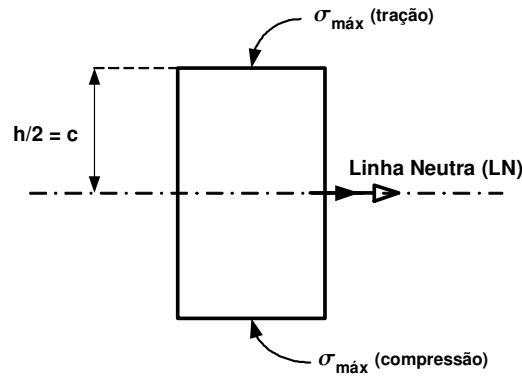


Figura 25 – Diagrama de esforços numa seção do corpo de prova.

$$\text{Assim, a tensão máxima será: } \sigma_{máx(t)} = \frac{M * c}{I} = \frac{P * L * c}{I} = \frac{P * L * \frac{h}{2}}{\frac{bh^3}{12}} = \frac{P * L * 6}{bh^2}$$

De posse destes parâmetros iniciais impostos pode-se demonstrar, segundo a norma D 671-93 (ASTM, 1993), que os cálculos envolvidos para execução dos ensaios de fadiga são referentes à massa efetiva da amostra e da carga de teste, onde,

- A massa efetiva w para a forma esquematizada, na figura 24, é dada pela expressão: $w = k\rho h$, onde k é a área da amostra em balanço, ρ é a densidade do material e h é a espessura média da amostra.
- A carga de teste a ser aplicada na amostra (P) é dada por: $P = \frac{\sigma_{máx}bh^2}{6L}$, considerando o

comportamento elástico linear, onde $\sigma_{máx}$ a tensão de teste desejável, b é a largura da seção crítica, h é a altura da seção crítica que corresponde à espessura do corpo de prova e L é a distância entre o ponto de aplicação da força à seção crítica. Portanto, para uma carga P , é necessário produzir uma tensão desejável σ na amostra através de um mecanismo ajustável (ex: excêntrico).

Os testes dos ensaios de fadiga em plásticos têm uma resposta de carga dependente do tempo, conforme ilustra a figura 26. Assim, os testes de fadiga poderão ser conduzidos até a frequência de interesse ou condições reais de trabalho da amostra. Quando não for especificada a frequência de trabalho, os testes deverão ser conduzidos numa frequência que varia de 1hz até 30hz \pm 5%, conforme ASTM – Norma D 671-93.

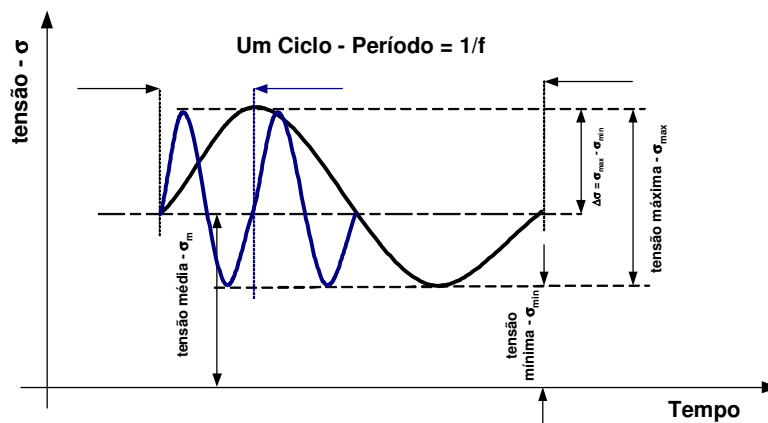


Figura 26 – Curvas frequência de tensão em função do tempo.

Segundo Fuchs e Stephens, (1980); citado por Norton (1998), o efeito das tensões médias no ciclo de fadiga dos metais, ou seus resultados, serão gerados a partir do levantamento da curva de Tensão-Força (σ) versus Número de ciclos de falha (vida) tendo como resposta os diagramas da figura 27, que se seguem exemplificados.

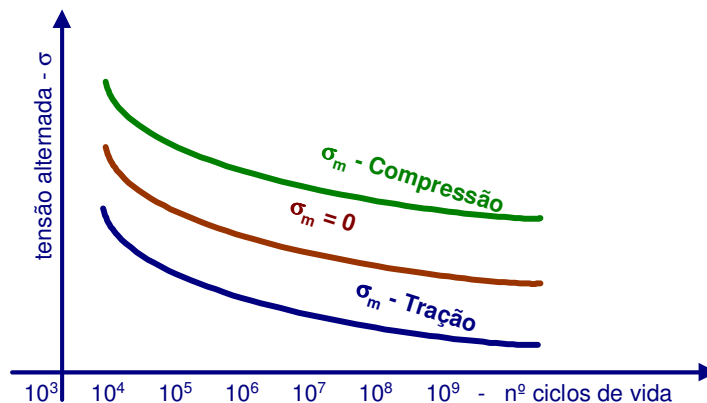


Figura 27 – Efeito das Tensões média no ciclo de vida de fadiga (Para fadiga em metais de engenharia). Fonte: NORTON, 1998.

Cabe, portanto, ao módulo de aquisição de dados monitorar a amostra diretamente no decorrer dos testes e levantar os dados referentes aos parâmetros de tensão-força, temperatura da amostra e ambiente, bem como as deformações produzidas devido às cargas aplicadas no decorrer do tempo. Este módulo deve conter um conjunto de sensores, condicionadores e amplificadores operacionais, conversores AD, que possibilite acoplar um sistema computacional com software que produza os relatórios completos do comportamento da amostra, diga-se curva de tensão ' σ ' versus número de ciclos de falha (vida) ' N ' submetida aos esforços de fadiga, para cada tipo de amostra.

5. Sistema de Controle

Nos primórdios da humanidade não se conhecia o meio para obter energia da matéria, e, portanto, todo trabalho era realizado pelos animais domesticos. Somente no século XVIII, com o advento da máquina a vapor, James Watt constrói o primeiro controle automático de velocidade de uma máquina a vapor. De acordo com Ogata (2003), outros trabalhos se seguiram com destaque aos trabalhos desenvolvidos por Minorsky (1922), Nyquist (1932), Hazen (1934), Evans (1940-50), e com o advento dos computadores digitais, a partir de 1960, foi possível análise de sistemas complexos no domínio do tempo com emprego de variáveis de estado, estendendo-se até início da década de 80 com o controle de sistemas determinísticos e estocásticos. Com o aumento do poder de processamento, compactação e diminuição do custo dos computadores, estes se tornaram parte dos sistemas de controle.

Segundo Ogata (2003), algumas definições da terminologia básica empregada na área de sistemas de controle são necessárias e permite uma melhor compreensão dos termos usados, tais como:

- Sistemas – são as combinações de componentes que agem em conjunto para atingir determinado objetivo. A palavra 'sistemas' pode ser empregada para se referir a sistemas físicos, biológicos, econômicos e outros.

- Sistemas a controlar – pode ser parte de um equipamento ou apenas um conjunto de componentes de um equipamento que funcione de forma integrada, com objetivo de realizar determinada operação.
- Processos – são operações contínuas progressiva, artificiais ou voluntárias, que consistem em uma série de ações ou movimentos controlados, sistematicamente destinados a atingir determinados fins ou resultados.
- Variável controlada – é a grandeza ou condição que é medida ou controlada. Normalmente é a saída do sistema. Controlar significa medir o valor da variável controlada e utilizar a variável manipulada para corrigir ou limitar os desvios dos valores medidos a partir de um valor desejado.
- Variável manipulada – é a grandeza ou condição modificada pelo controlador, de modo que afete o valor da variável controlada.
- Distúrbios – São sinais que tendem a afetar de maneira adversa o valor da variável de saída de um sistema. Ele pode ser de origem interna (gerado dentro do sistema) ou externa (gerado fora e afetando a entrada do sistema).
- Sistemas de controle com realimentação ou de malha fechada – refere-se a uma operação que, na presença de distúrbios, tende a diminuir a diferença entre a saída de um sistema e alguma entrada de referência, buscando realimentar o controlador, de modo a minimizar o erro configurando a saída do sistema ao valor desejado.
- Sistemas de malha aberta – São aqueles em que o sinal de saída não exerce nenhuma ação de controle no sistema. Significa que o sinal de saída não é medido nem realimentado para comparação com a entrada. Tomando como exemplo uma máquina de lavar roupas, onde as operações de colocar de molho, lavar e enxugar são executados numa seqüência em função do tempo. A saída, em cada fase, não é medida, isto é, não se verifica se as roupas estão bem lavadas. Este tipo de controle só pode ser utilizado se a relação entre a entrada e saída for conhecida e se não houver nenhum distúrbio interno ou externo.

Sendo assim, pode-se inferir que o sistema de controle de uma bancada para ensaios não pode ter seu controle auferido sem realimentação, visto que as variáveis controladas necessitam ser corrigidas e limitadas para atender as especificações do ensaio, que por sua vez estão balizadas por normas internacionais de controle.

Os sistemas de controle possuem, em geral, diversos componentes. E, para mostrar as relações executadas por tais componentes é comum utilizar a ferramenta diagramas de blocos, que são representações gráficas (desenho) das funções desempenhadas com os respectivos fluxos de sinais entre eles. Estes diagramas descrevem as inter-relações existentes entre os vários componentes através dos blocos funcionais, que representam as operações físicas e matemáticas aplicadas ao sinal de entrada para produzir o sinal de saída. Estas conexões são implementadas por setas que indicam univocamente a direção e sentido do fluxo de sinais.

Os diagramas de blocos são de fácil construção e permitem visualizar com mais clareza a operação funcional do sistema, ou seja, os blocos contêm informações sobre o comportamento dinâmico do sistema, mas não especifica informações sobre a construção física do sistema, isto é, quais dispositivos estão sendo utilizados para manipular ou controlar o sistema físico.

Uma variedade de diagramas de blocos pode ser desenhada para um mesmo sistema, dependendo da análise que se pretende fazer, inclusive, muitos sistemas que não apresentam semelhança e não estão relacionados podem ser representados pelo mesmo diagrama de blocos. A seguir mostra-se, na figura 28, um exemplo simplificado de um diagrama de bloco de um sistema de malha fechada.

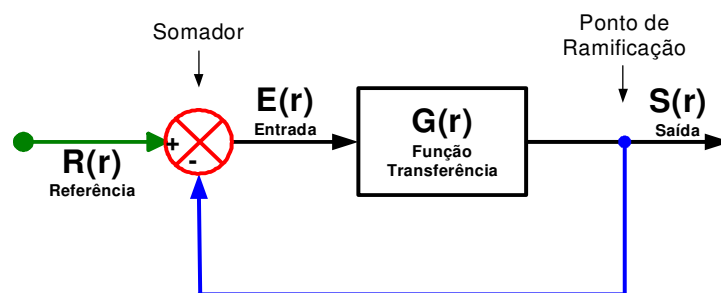


Figura 28 – Diagrama de bloco de um sistema de malha fechada.

A saída $S(r)$ é realimentada ao somador, onde é comparada à referência de entrada $R(r)$. A saída do bloco, $S(r)$, é obtida pelo produto de uma função de transferência $G(r)$ à entrada do bloco $E(r)$ (OGATA, 2003). Quando a saída é realimentada ao somador para comparação com a entrada, é necessário converter a forma de sinal de saída à do sinal de entrada, isto porque as dimensões das grandezas físicas envolvidas são geralmente diferentes, por exemplo: temperatura em corrente elétrica.

A tarefa de projetar sistemas automatizados seria relativamente simples se metodologias de projeto de cada um dos sistemas (físico e controle) pudessem ser reunidas e aplicadas diretamente. No entanto esta tentativa não funciona e, ao contrário, traz maiores dificuldades que auxílio (DE NEGRI e PAES, 2003). Em parte pela falta de cooperação e experiência em projetos mecatrônicos seguindo os princípios básicos da engenharia simultânea de se executar projetos com equipes multidisciplinares.

Este fato é apontado por De Negri (1997), que relata que o projeto de sistemas automáticos tem sido conduzido tradicionalmente de acordo com as orientações dadas pelos fabricantes de hardware e de aplicativos computacionais, pressupondo que o processo físico já esteja projetado ou implementado. Pode-se justificar em parte tal procedimento observando-se que o ensino na engenharia mecânica como nas engenharias elétrica, de computação ou mecatrônica (controle e automação) ocorre de modo fragmentado.

Entretanto, segundo Bonfe, Donati e Fantuzzi (2002), a idéia de um projeto integrado não tem sido seguida naturalmente pela indústria, sendo o início da concepção do sistema de controle realizado posterior à concepção física do produto, decorrente das restrições de tempo, especificações dos engenheiros mecânicos envolvidos no projeto e o usuário final do sistema. Além desta situação, as especificações comportamentais (voltadas ao sistema de controle) são geralmente expressas informalmente, através de descrições textuais ou mesmo verbais. Este procedimento conduz à ineficiência no desenvolvimento do sistema de controle, em especial nos procedimentos posteriores de teste e manutenção que não estarão suportados por uma documentação de projeto rigorosa e não ambígua. Alguns destes aspectos também foram vivenciados no estudo de caso em foco.

5.1 Modelagem de Sistemas usando rede de Petri (RdP)

As Redes de Petri surgem em 1962, quando o então doutorando Carl Adam Petri apresenta sua tese *Kommunikation mit Automaten (Communication with Automata)* a Faculdade de Matemática e Física da Universidade Técnica de Darmstadt, na Alemanha, que buscava desenvolver um modelo onde às máquinas de estado² pudessem se comunicar. A

² Uma máquina de estado finito é uma modelagem de um comportamento composto por estados (passado, presente), transições (futuro) e ações.

relevância principal alcançada por este modelo foi à possibilidade de representar a concorrência de estado de um processo. Em sua homenagem, o método é batizado como Redes de Petri (RdP).

As Redes de Petri são um importante recurso para a modelagem de sistemas, particularmente de sistemas computacionais com alto índice de concorrência (paralelismo), como os encontrados na automação e protocolos de comunicação de dados, que possibilitam descrever o comportamento de sistemas a eventos discretos (SED). Os sistemas a eventos discretos (SED) são aqueles cujo simples transcorrer do tempo não é suficiente para garantir que haja evolução do estado do sistema, necessitando de interações internas e ou externas para que o sistema mude de estado e complete sua finalidade.

Segundo Souto (2005), um sistema a eventos discretos é um sistema dinâmico que evolui de acordo com a ocorrência abrupta de eventos físicos, em intervalos de tempo em geral irregulares e desconhecidos. Segundo Santos (2003), um sistema a eventos discretos (SED) é dinâmico e regido a estados discretos evoluindo conforme ocorrência assíncrona de eventos, isto é, suas características principais são: espaço de estado discreto e mecanismo de transição de estados dirigidos por eventos.

A modelagem e controle de SED é uma área de pesquisa de grande interesse atual, estimulada pela diversidade de aplicações, pois, são através da utilização de modelos que tratam do problema de modelagem e controle dos SED que se obtêm os controladores para a parte física do sistema.

A importância das redes de Petri, segundo Costa e Góes (2003) é fundamentada nas suas propriedades inerentes que facilitam a modelagem de características típicas dos sistemas computacionais regidos por SED, entre as quais podem se destacar além da concorrência: o compartilhamento, o conflito, exclusão mútua, relações de precedência, não determinismo, o controle e a sincronização.

Atualmente podem ser encontrar variações do modelo original sendo usados em diversas áreas da ciência, como: economia, biologia, engenharia, computação, entre outras; visando ajudar no estudo do comportamento e desempenho de diferentes sistemas. Entretanto, as variações das RdP tais como Redes de Petri coloridas, temporizadas ou estocásticas são modelos mais refinados e que não fazem parte da teoria original. Mas, estas representações ganharam relevância por serem capazes de modelar sistemas de forma mais simplificada ou intuitiva ou simplesmente porque ainda não havia um modelo capaz de representar sistemas que envolviam temporizações ou comportamentos probabilísticos (estocásticos).

A modelagem de um sistema computacional se justifica pelos aspectos de facilidade e entendimento do comportamento do sistema, também por poder ser verificado e validado antes da construção de um protótipo, assim como pela definição das métricas de desempenho do modelo. Isto permite avançar no projeto, para novas etapas, antes de atingir a etapa final de avaliação.

Uma rede de Petri genérica é constituída por:

1. Lugares ou *Places* → que representam uma atividade, um recurso ou uma condição. Onde $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_m\}$ é um conjunto de *Places* para $m > 0$.
2. Transições → que representam eventos. Sendo $T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_n\}$ um conjunto de transições para $n > 0$.
3. Arcos → sinalizam os lugares das entradas e saídas das transições. Assim, $A_e: P \rightarrow T$ são os conjuntos de arcos de entrada de um *place* para uma transição; enquanto, $A_s: T \rightarrow P$ são os conjuntos de arcos de saída de uma transição para um *place*.

4. Pesos dos arcos (PA) \rightarrow indicam quantos *Tokens* (marcas) são necessárias para disparar uma transição
5. Marcas, fichas ou *Tokens* \rightarrow que representam um estado de um sistema. Onde $M_0: P \rightarrow \mathbb{N}_0$ é a marcação do estado (condição) inicial do *place*.

Deste modo, pode-se definir uma rede de Petri como sendo uma tupla $R = \{P, T, A, PA, M_0\}$, que será representada pelos elementos apresentados na figura 29, onde:

A: $P \rightarrow T \cup T \rightarrow P$ é o conjunto dos arcos;

$P \cap T = \emptyset \wedge P \cup T \neq \emptyset$, os conjuntos P e T são disjuntos e não vazios.³

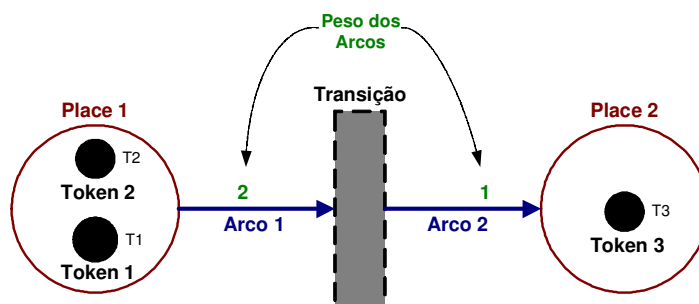


Figura 29 – Elementos de uma rede de Petri.

Ao modelar uma rede de Petri procura-se representar os estados antes e depois de cada evento do sistema. O elemento responsável por descrever estas condições são os *tokens*. Portanto, deve-se estabelecer uma marcação inicial, como no exemplo da figura 30, que pode ser descrita através da notação $M_0 = (1, 1, 0)$. Sendo o primeiro campo a quantidade de *tokens* no *place* 1, o segundo campo a quantidade de *tokens* no *place* 2 e o terceiro campo a quantidade de *tokens* no *place* 3. Além dos *tokens* têm-se os pesos associados a cada arco, que são importantes e muitas vezes necessários durante o projeto do modelo.

A marcação inicial faz parte do projeto do modelo, e, uma falha na definição da marcação inicial pode resultar num modelo inconsistente ou com falhas de execução.

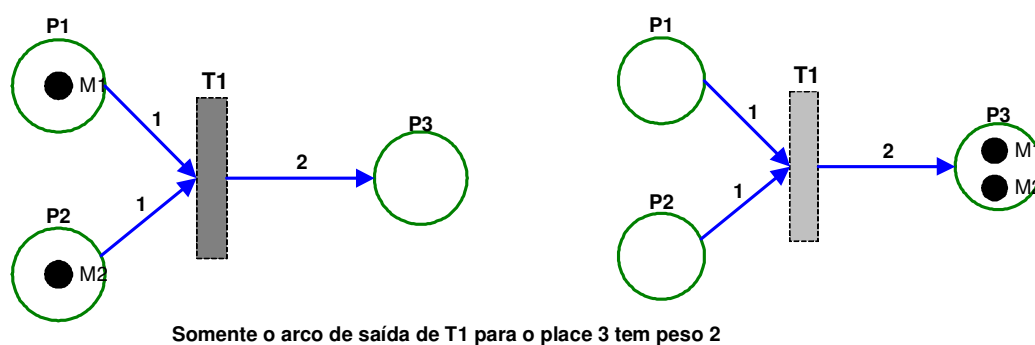


Figura 30 – Exemplo marcação inicial e final de uma rede de Petri.

Pode-se perceber, no exemplo, que existem dois momentos (estados) distintos: um estado em que os *places* 1 e 2 possuem *tokens* e outro que somente o *place* 3 possui 2 *tokens*. Logo, pode-se considerar que existem duas marcações: uma inicial $M_0 = (1, 1, 0)$ e outra final $M_f = (0, 0, 2)$.

³ Quando a **interseção** de dois conjuntos P e T é o **conjunto vazio**, dizemos que estes conjuntos são **disjuntos**.

A mudança de estado foi realizada pela função transição (T1). A transição é responsável por modificar os estados em uma rede de Petri. Sendo assim, para modificar uma marcação da rede de Petri basta disparar as transições existentes. Como resultado de um disparo, os *tokens* dos *places* de entrada são retirados e novos *tokens* são colocados nos *places* de saída. Esta movimentação dos *tokens* é baseada nos pesos dos arcos. No exemplo, o peso do terceiro arco é 2, e, por este motivo chegam ao *place* 3 dois *tokens*.

É possível perceber que haverá situações em que a transição não poderá ser disparada, por exemplo, basta que um dos *places* 1 ou 2 não possua um token, pois o arco 3 necessita de dois *tokens* (peso 2) para iniciar a transição para o *place* 3. Entretanto, há outras situações de conflito quando ocorre concorrência, conforme exemplo da figura 31, onde existem duas transições que para serem habilitadas precisam de um token em cada uma de suas entradas. O problema é que o *place* P1 é único, e, portanto, compartilhado. Então, qual transição será disparada T1 ou T2? Se não houver uma regra de prioridade ela será aleatória. Logo é possível atribuir funções as transições para que se tenha uma situação típica de *if* e *else*.

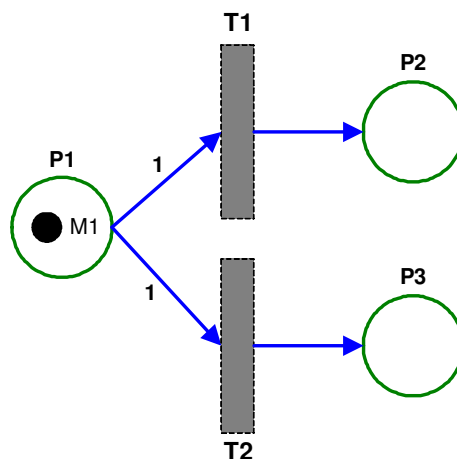


Figura 31 – Exemplo de conflito devido a uma concorrência numa rede de Petri.

As redes de Petri também podem ser representadas por uma notação matricial ou por uma árvore de alcançabilidade. A notação matricial apresenta as matrizes de entrada com a quantidade de arcos de entrada em cada transição, as matrizes de saídas com as quantidades de arcos de saída de cada transição e a matriz de incidência que representa a diferença entre as matrizes de saída e entrada. A representação através da árvore de alcançabilidade, apresentada na figura 32 permite estabelecer quantos estados ou marcações podem ser extraídos de uma rede de Petri, no exemplo citado um conjunto finito de cinco marcações $[M = \{M0, M1, M2, M3, M4\}]$. Esta árvore somente será finita se em algum momento uma determinada marcação levar à marcação inicial.

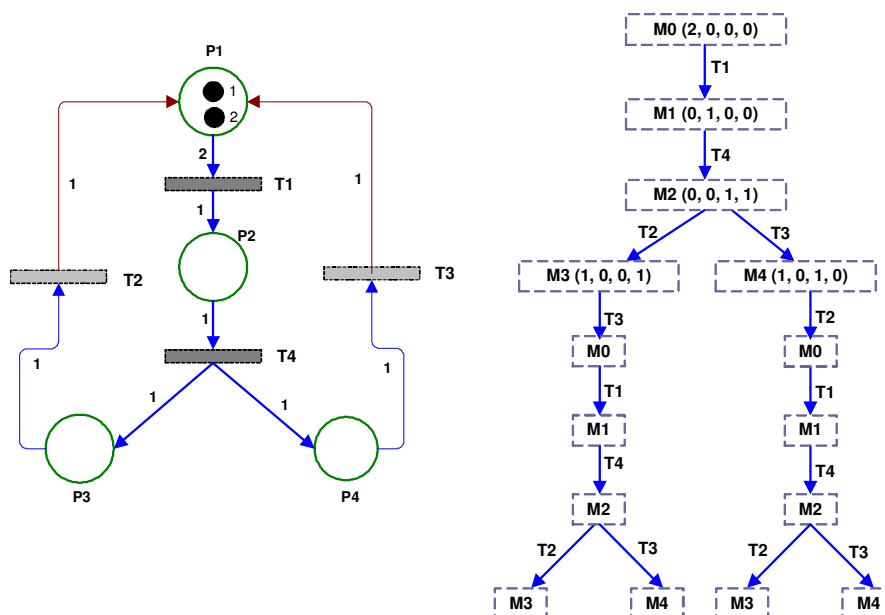


Figura 32 – Exemplo de Rede de Petri com sua árvore de alcançabilidade.

Quando numa modelagem do sistema é necessário que um disparo ocorra com certo retardo de tempo fixo e constante, usam-se redes de Petri temporizadas determinísticas. Nestes casos, para cada transição atribui-se um valor de tempo, conforme figura 33. A principal vantagem é poder alterar a definição de estado da rede. Há também redes de Petri probabilísticas (RdP – E, estocásticas) que possuem taxas aleatórias. Nestes casos associa-se uma distribuição exponencial ao tempo de disparo de cada transição habilitada da rede, descrevendo deste modo um processo estocástico. De modo formal, uma rede de Petri estocástica é definida como: $RdP-E = \{P, T, A, PA, M_0, D\}$, onde;

→ P [conjunto de *places*], T [conjunto de transições], A [conjunto de arcos], PA [pesos dos arcos], M_0 [marcação inicial] e D [conjunto das taxas de disparos associadas às transições que obedecem a uma transição exponencial. Tais taxas de disparo podem ter o seu valor dependente da marcação. A dependência da taxa de disparo da transição j sobre uma marcação M é denotada por $D_j(M)$].

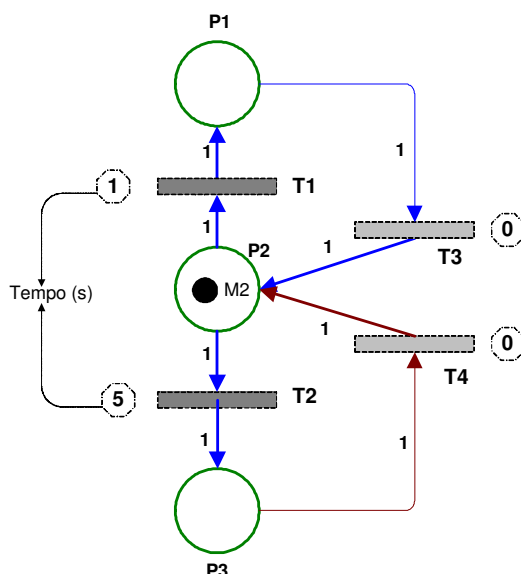


Figura 33 – Exemplo de uma rede de Petri temporizada com tempos fixos.

Outra variação das redes de Petri são as “coloridas” (RdP – C), cujo principal objetivo é a redução do tamanho do modelo, permitindo que *tokens* individualizados (coloridos = distintos) representem diferentes processos ou recursos em uma mesma sub-rede. Inicialmente, os *tokens* das RdP Coloridas eram representados por cores ou mesmo por padrões que possibilitam a distinção dos *tokens*. Em trabalhos mais recentes, os *tokens* são representados por estruturas de dados complexas não relacionando cores aos *tokens*, a não ser pelo fato de que estes são distinguíveis. Deste modo, os *tokens* podem conter informações. Além disso, cada *place* armazena *tokens* de certo tipo definido e arcos realizam operações sobre os *tokens*. As transições são consideradas “expressões de guarda (expressão booleana contendo algumas variáveis)”.

Uma RdP-C é composta por três partes: estrutura, inscrições e declarações. A estrutura é um grafo direcionado com dois tipos de nós (*places* e transições), com arcos interconectando nós de diferentes tipos. As inscrições são associadas aos *places*, transições e arcos. As declarações são tipos, funções, operações e variáveis. Na figura 34 verifica-se um exemplo de uma RdP-C.

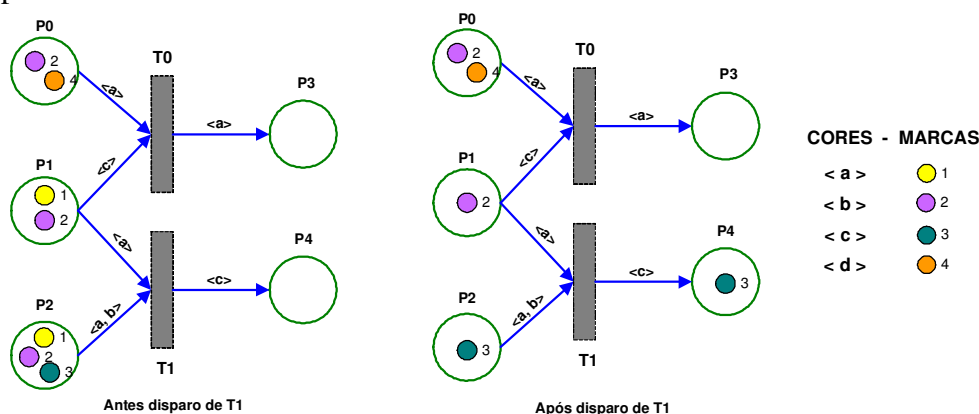


Figura 34 – Exemplo de uma rede de Petri colorida.

Conforme exposto anteriormente, a modelagem usando Redes de Petri Coloridas, normalmente permite uma redução no tamanho do modelo devido à unificação de *places*, transições e arcos. O grau de redução da Rede de Petri é dependente dos modelos originais (grau de complexidade) e principalmente da quantidade de repetições (*places*, transições e arcos) existentes.

Em seu trabalho, Costa e Góes (2003) apresentam um exemplo de modelagem, utilizando Redes de Petri, de um sistema de manufatura que consiste de duas estações de processamento com máquinas, M_1 e M_2 ; um braço robô compartilhado R para descarga e um *buffer* B para armazenamento temporário de peças intermediárias, conforme esquematizado na figura 35.

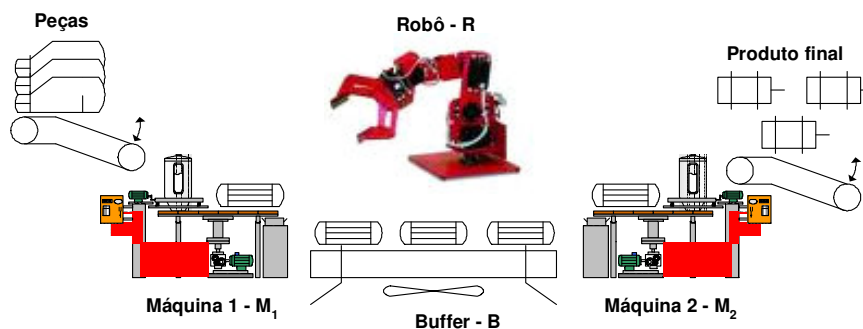


Figura 35 – Exemplo de um sistema simplificado de manufatura com recursos compartilhados (adaptado: Costa e Góes, 2003).

Cada peça é processada primeiramente em M_1 e depois em M_2 . As peças entram no sistema e na estação de processamento sendo automaticamente fixadas a uma esteira e carregadas na máquina M_1 . Após processamento, o robô R descarrega de M_1 a peça intermediária e a coloca no *buffer* B . Na seqüência as peças intermediárias são automaticamente carregadas em M_2 e processadas. Quando M_2 encerra o processamento de uma peça, o robô R descarrega o produto final e libera a primeira estação de trabalho. Assume-se que peças de entrada estão sempre disponíveis para serem processadas e que o produto final é sempre retirado.

Seguindo a metodologia de modelagem de sistemas, tem-se que primeiramente identificar as atividades e recursos, que são: estações de processamento (fixação de peça na esteira, carga e processamento de peças), armazenamento (*buffer*) e descarga (intermediária e final). Os recursos são M_1 , M_2 , R , B , fixadores e peças. O segundo passo implica em identificar a ordem das atividades, no caso:

M_1P : M_1 carrega, fixa e processa a peça;

RD_1 : R descarrega uma peça intermediária no *buffer*;

BA : B armazena uma peça intermediária;

M_2P : M_2 carrega e processa uma peça intermediária;

RD_2 : R descarrega o produto final de M_2 , libera esteira e retorna a primeira estação de trabalho.

O terceiro passo é criar a rede com a seqüência básica ordenada, conforme apresentado na figura 36a.

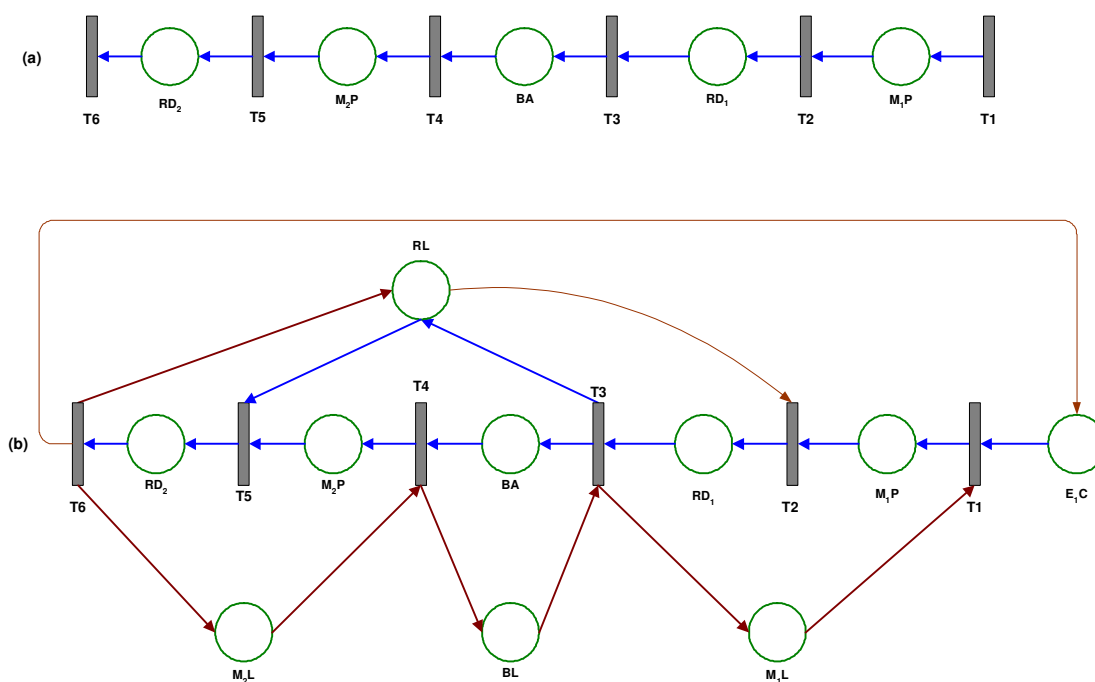


Figura 36 – Estágios de criação da rede de Petri do sistema de manufatura (ordem das atividades).

No quarto passo verificam-se as atividades intermediárias para fechar o ciclo. No caso, a atividade M_1P requer uma esteira com peças (representada pelo lugar E_1C) e a máquina M_1 pode estar livre (representada pelo lugar M_1L). O *buffer*, o robô e a máquina M_2 também podem estar livres e são representadas respectivamente pelos lugares (BL , RL e M_2L). Os arcos são ligados às transições satisfazendo o fluxo e requerimentos do sistema, conforme ilustrado na figura 36b.

Por fim, colocam-se as marcações (estados), começando pela inicial: Foi considerado inicialmente que ambas as máquinas estão livres (uma ficha para M_1L e M_2L), supuseram-se quatro peças disponíveis na esteira (quatro fichas no lugar E_1C). O robô está livre (uma ficha no lugar RL) e há espaço livre no *buffer* para duas peças intermediárias (duas fichas no lugar BL). Desta forma, constrói-se a rede de Petri que modela o sistema de manufatura do exemplo proposto, a qual é apresentada na figura 37.

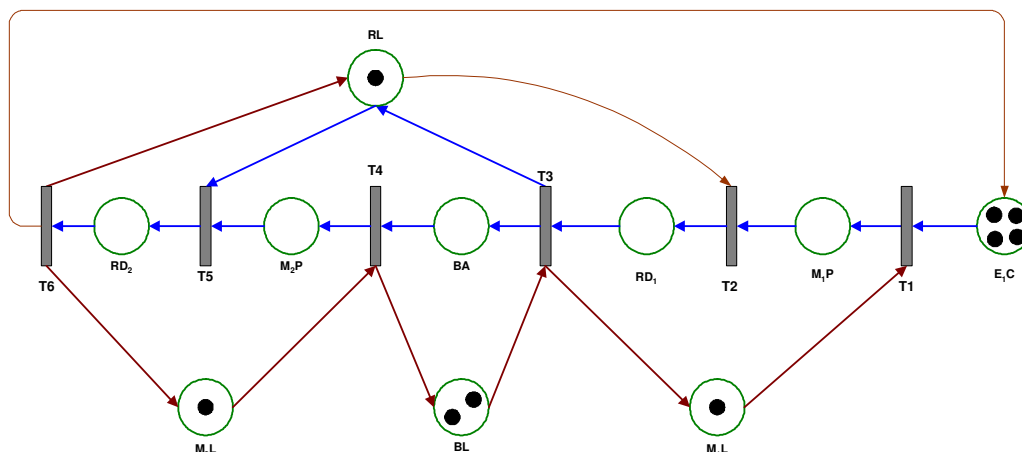


Figura 37 – Rede de Petri que modela o exemplo do sistema de manufatura com recursos compartilhados.

A modelagem de um sistema, segundo De Negri (2004) é realizada basicamente sobre três perspectivas: estrutural, funcional e comportamental. A perspectiva estrutural representa o conjunto de elementos em um sistema e as relações que os conectam uns aos outros, que podem indicar conexões físicas, de comunicação ou relações hierárquicas. A perspectiva funcional estabelece de forma inequívoca a função de cada componente no sistema e qual é a inter-relação entre estas funções. Enquanto a perspectiva comportamental informa quando e como as funções de um sistema serão executadas. As características de modelos comportamentais dependem do tipo de sinal de entrada e saída envolvido na execução da função do sistema, sendo divididos em: modelos a estado contínuo e a estado discreto.

De Negri (2004) apresenta uma síntese de modelos utilizados nas engenharias, classificadas em suas perspectivas, forma de representação e área de uso. Na tabela 6, a seguir têm-se alguns exemplos.

Tabela 6 – Síntese de modelos em uso nas engenharias (adaptado De Negri, 2004)

MODELO	PERSPECTIVA	REPRESENTAÇÃO	ÁREA DE USO
Estrutura de funções	Funcional	Diagramática	Projeto de produtos (múltiplas áreas com ênfase na mecânica)
Diagrama de blocos	Comportamental	Diagramática e matemática	Múltiplas áreas: elétrica, mecânica, hidráulica, pneumática.
Redes de Petri	Comportamental	Diagramática	Sistema de Manufatura
Diagrama de circuitos elétricos	Funcional	Diagramática	Elétrica

MODELO	PERSPECTIVA	REPRESENTAÇÃO	ÁREA DE USO
UML – Diagrama de classes	Estrutural	Diagramática	Software
Desenho mecânico	Estrutural	Icônica	Mecânica
Função de transferência	Comportamental	Matemática	Múltiplas áreas
Diagrama de fluxo de dados	Funcional	Diagramática	Software

5.2 Modelagem do Sistema usando a Linguagem de modelagem unificada (UML)

Na área de software a representação diagramática permite estabelecer uma estrutura sequencial de fluxo de informações que facilitam a geração dos códigos de programação em diferentes linguagens, possibilitando que um programador especifique precisamente sobre quais dados um sistema computacional vai atuar, como estes dados serão armazenados ou transmitidos e quais ações devem ser tomadas sob várias circunstâncias.

No princípio, de forma dominante, e ainda hoje com certa influência, a programação estruturada estabelece uma forma padronizada de escrever um conjunto concreto de instruções para que um sistema computacional desempenhe suas funções. E, preconiza que todos os programas podem ser reduzidos a apenas três estruturas: sequência, decisão e iteração⁴.

Em contraposição a uma programação estruturada surge no final da década de 80 uma nova filosofia de programação orientada a objetos (POO), como uma importante ferramenta de desenvolvimento de software, baseado na composição e interação entre diversas unidades de software chamadas de objetos. Segundo Rumbaugh et al (1996), programar na perspectiva orientada a objetos é “uma nova maneira de pensar problemas utilizando modelos organizados a partir de conceitos de mundo real”.

A análise e modelagem orientadas a objetos têm como meta identificar o melhor conjunto de objetos para descrever um sistema de software. O funcionamento deste sistema se dá através do relacionamento e troca de mensagens entre estes objetos. E tem como um de seus pressupostos básicos a reutilização destes objetos (entidades únicas que tem sua estrutura, comportamento, propriedades-métodos e atributos genéricos combinados), que por serem modulares podem ser utilizados em diferentes projetos de software, dispensando a reescrita das linhas de código de programação.

Na programação orientada a objetos procura-se implementar um conjunto de classes que definem os objetos presentes no sistema de software. Cada classe determina o comportamento (definidos nos métodos) e estados possíveis (atributos) de seus objetos, assim como estes devem se relacionar com outros objetos.

Atualmente existem diversas linguagens de programação que suportam uma modelagem orientada a objetos, como: C++, Java, Object Pascal, Javascript, C#, PHP, Perl etc. Todas necessitam obedecer mesma padronização a fim de manter coerência e evitar os conflitos de diferentes plataformas operacionais. Alguns conceitos fundamentais da linguagem são apresentados a seguir, visando torná-la mais compreensível.

⁴ Processo de repetição de uma ou mais ações.

- **Classe** → representa um conjunto de objetos com características comuns. Uma classe define o comportamento dos objetos, através de métodos, e quais estados ele é capaz de manter, através de atributos. Exemplo de uma classe: Os felinos.
- **Objeto** → é uma instância (subconjunto) de uma classe. Um objeto é capaz de armazenar estados através de seus atributos e reagir a mensagens enviadas a ele, assim como se relacionar e enviar mensagens a outros objetos. Exemplo de objetos da classe Felinos: gato (siamês, angorá, persa), onça (pintada, parda, preta), tigre (dente de sabre, asiático), pantera.
- **Mensagem** → é uma chamada a um objeto para invocar um de seus métodos, ativando um comportamento descrito por sua classe. Também pode ser direcionada diretamente a uma classe (através de uma invocação a um método dinâmico).
- **Herança** (ou generalização) → é o organismo pelo qual uma classe (subclasse) pode estender outra classe (superclasse), aproveitando seus comportamentos (métodos) e estados possíveis (atributos). Há Herança múltipla quando uma subclasse possui mais de uma superclasse, contudo nem todas as linguagens orientadas a objetos suportam este tipo de propriedade. Um exemplo de herança: Mamífero é superclasse de Felinos. Ou seja, um Felino é um mamífero.
- **Associação** → é a construção pela qual um objeto utiliza os recursos de outro. Pode tratar-se de uma associação simples "usa um" ou de um acoplamento "parte de". Por exemplo: Um felino usa suas patas para caçar. As garras (unhas) são partes de uma pata.
- **Encapsulamento** → consiste na separação de aspectos internos e externos de um objeto. Este mecanismo é utilizado amplamente para impedir o acesso direto ao estado de um objeto (seus atributos), disponibilizando externamente apenas os métodos que alteram estes estados. Exemplo: você não precisa conhecer os detalhes da formação das imagens numa câmara fotográfica para utilizá-la. A carcaça com seus botões externos encapsulam esses detalhes, provendo a você uma interface simples e amigável.
- **Abstração** → é a habilidade de concentrar nos aspectos essenciais de um contexto qualquer, ignorando características menos importantes ou acidentais. Em modelagem orientada a objetos, uma classe é uma abstração de entidades existentes no domínio do sistema de software.
- **Polimorfismo** → é o princípio pelo qual duas ou mais classes derivadas de uma mesma superclasse podem invocar métodos que têm a mesma lista de parâmetros, mas comportamentos distintos, especializados para cada classe derivada, usando para tanto uma referência a um objeto do tipo da superclasse. A decisão sobre qual o método que deve ser selecionado, de acordo com o tipo da classe derivada, é tomada em tempo de execução, através do organismo de ligação tardia.

A Unified Modeling Language (UML) é uma linguagem de modelagem não proprietária utilizada para administrar e organizar o desenvolvimento de software complexo. A UML pretende ser a linguagem de modelagem padrão para modelar sistemas concorrentes e distribuídos. Todavia, não é um método de desenvolvimento, o que significa que ela não diz para você o que fazer primeiro e em seguida como desenhar seu sistema, mas ele lhe auxilia a visualizar seu desenho e a comunicação entre objetos.

Basicamente, a UML permite que desenvolvedores visualizem os produtos de seu trabalho em diagramas padronizados. Junto com uma notação gráfica, a UML também especifica significados, isto é, semântica. É importante distinguir entre um modelo UML e um diagrama (ou conjunto de diagramas) de UML: o último é uma representação gráfica da informação do primeiro.

A UML ainda não é um padrão da indústria, mas esse objetivo tem tomado forma sob as promessas do Object Management Group (OMG). A finalidade da UML é descrever e modelar qualquer tipo de sistema, em termos de diagramas de POO. Naturalmente, o uso mais comum é a criação de modelos de sistemas de software, mas a UML pode também ser utilizada para descrever sistemas mecânicos sem qualquer software ou mesmo a organização de um negócio.

Seus diagramas traçam a representação gráfica de um conjunto de elementos, geralmente símbolos e arcos de relacionamentos. São esquematizados de modo a permitir

uma visualização de um sistema sob diferentes perspectivas. Nesse sentido, um diagrama constitui uma projeção de um determinado sistema. A UML dispõe de nove diagramas citados a seguir.

1. Diagrama Caso de Uso;
2. Diagramas Interação:
 - 2.1 - Seqüências;
 - 2.2 - Colaborações;
4. Diagrama de Classes;
5. Diagrama de Objetos;
6. Diagrama de Gráficos de Estados;
7. Diagrama de Atividades;
8. Diagrama de Componentes;
9. Diagrama de Implementação.

É importante destacar que nem sempre o projetista fará uso de todos os diagramas para modelar um sistema. Em seu trabalho, Paes (2001) cita exemplo de alguns autores que utilizam alguns diagramas para modelagem de sistemas técnicos, como “Colle (1999) que utiliza os diagramas de: Interação, Estados e de Implementação. Por outro lado, trabalhos como o de McLaughlin e Moore (1998) emprega: Caso de Uso, Colaboração (Seqüência e Colaborações), Classe, Atividades e Implementação. Enquanto Selic e Rumbaugh (1998) usam: Classe, Colaboração e Estados. Já em Douglass (1999) vê-se: Caso de Uso, Estados e Seqüência”. A escolha dependerá do tipo de sistema a ser modelado, da sua complexidade, da disponibilidade de tempo para o projeto, da vivência dos projetistas, dentre outras.

Na figura 38, tem-se um exemplo de um diagrama de caso de uso e classe com seus elementos. No diagrama de Caso de uso tem-se o comportamento de uma classe sem mostrar sua estrutura interna. Estes especificam as necessidades e funções oferecidas pelas classes. O ator representa um agente que interage com o sistema através do envio e recebimento de mensagens e desempenha um papel podendo ser dispositivos (sensores, disjuntores etc.), máquinas (computadores, tornos, braço mecânico etc.) ou seres humanos.

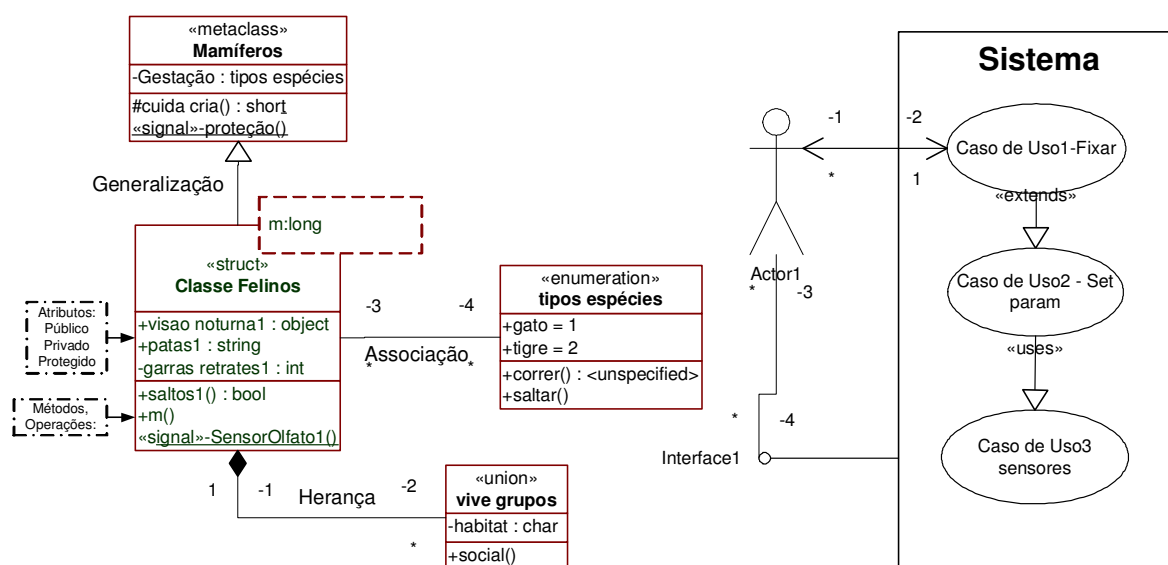


Figura 38 – Exemplo de diagrama: de Classe, de Caso de uso e seus elementos.

O diagrama de seqüência modela a parte dinâmica (evolutiva no tempo) do sistema. Propicia uma idéia temporal e a ordem em que às interações acontecem. Na figura 39, mostra-se um exemplo do diagrama de seqüência e seus elementos. A análise (leitura) é feita da direita para esquerda e de cima para baixo.

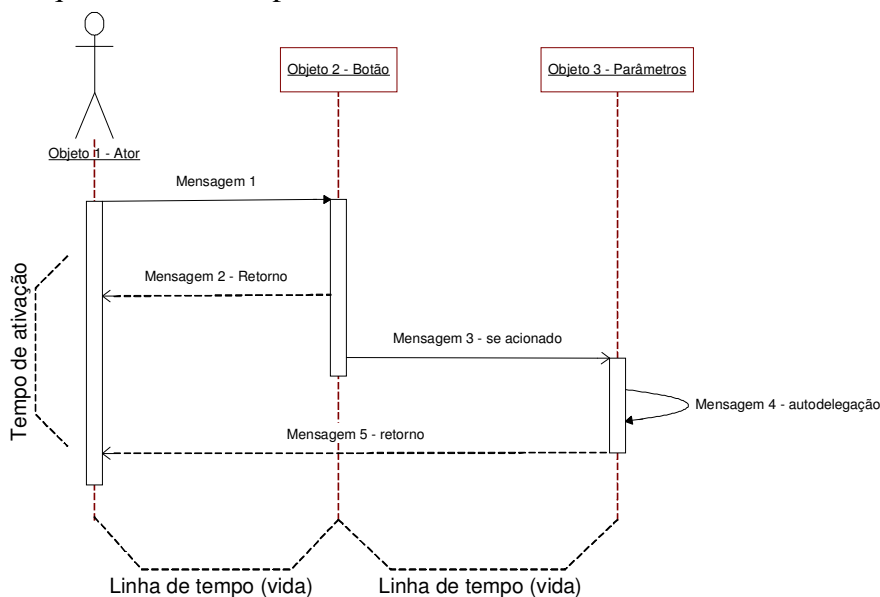


Figura 39 – Exemplo de diagrama de Seqüência.

Elaborar grandes projetos com vários níveis de complexidade e camadas seria extremamente dispendioso e muitos dos benefícios de uma programação orientada a objetos poderia se tornar irrelevantes diante do esforço despendido para implementá-la. Entretanto, atualmente tem-se a disposição ferramentas CASE (Computer Aided Software Engineering), que permitem um suporte ao desenvolvimento de projetos de software mais estruturado, sem a qual a metodologia se tornaria inviável. Neste trabalho foi possível utilizar as ferramentas CASE: VISIO® e Rational ROSE®.

Pode-se perceber que o desenvolvimento de produtos cada vez mais complexos, como os mecatrônicos, envolve uma gama de conhecimento multidisciplinar ainda não totalmente estruturada e, portanto, em construção. Este trabalho levanta alguns aspectos necessários na formação de uma nova massa crítica de engenheiros e pesquisadores que se predispõe a desenvolver produtos com tais especificidades. Além de ratificar o caráter transdisciplinar do conhecimento humano. Para tanto, o trabalho em equipes multidisciplinar constituem um caminho obrigatório a ser trilhado para construção de novas metodologias.

6. Considerações finais

Neste capítulo foram discutidos temas correlatos ao processo de desenvolvimento integrado de produtos, onde muitos dos assuntos abordados surgiram nas discussões do problema de projeto de uma máquina para realizar ensaios de fadiga em materiais plásticos; tendo em vista que, apesar da sua crescente utilização na indústria em diferentes aplicações tecnológicas atuais, o projeto mecânico dos componentes plásticos é realizado, na maioria das vezes, sem considerar os aspectos característicos do seu comportamento quando submetidos a carregamentos dinâmicos.

Em face de tratar-se do projeto de uma máquina que envolve distintas áreas, optou-se em executá-lo em equipe com características multidisciplinares, atendendo os princípios da

engenharia simultânea, com propósito de obter um ganho no tempo de desenvolvimento e também na necessidade de avaliar em que fase do projeto as características mecatrônicas são evidenciadas. Nesta linha de ação, a equipe seguiu os passos metodológicos de um projeto mecânico adequando-o as especificidades do estudo de caso da bancada.

Feita a conceituação fenomenológica da fadiga, estabeleceu-se as pontes para classificar as diferenças entre os materiais poliméricos usuais na engenharia, distinguindo-o dos metais, com o intuito de destacar a relevância desta pesquisa descritiva.

Ao apresentar algumas ferramentas usuais de desenvolvimento integrado empregadas nas várias etapas do projeto consensual de um produto, sistematizados por Ferreira (1997) e Ogliari (1999), tenta-se constituir uma base comum e de caráter generalista para se estabelecer os parâmetros mínimos para uma análise crítica do processo. Em fim, o estudo evidencia as distintas áreas que permeiam o desenvolvimento de um produto mecatrônico, suas ferramentas específicas de trabalho e como devem ser utilizadas, com a finalidade de alcançar as metas desejáveis do projeto.

No próximo capítulo procura-se descrever cada etapa do desenvolvimento da bancada para ensaios de fadiga em materiais plásticos, elaborada por uma equipe multidisciplinar, conforme pressupostos da engenharia simultânea, abordando o uso de alguma das ferramentas aqui descritas.