

CAPÍTULO 3

ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DO DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA PARA ENSAIOS DE FADIGA EM MATERIAIS PLÁSTICOS

1. Introdução

Como foi apresentado no capítulo anterior, as propostas de metodologias para desenvolvimento de produtos são de caráter genérico e bastante abordado nas engenharias sem especificar particularidades em relação a produtos mecatrônicos que envolva todo o seu ciclo de vida. Acrescido à crescente demanda por produtos mais integrados e consequentemente mais complexos em suas funcionalidades é que se busca desenvolver produtos através da engenharia simultânea, com foco em equipes multidisciplinares, que permitem levantar as várias características dos novos produtos, que agregam sistemas característicos das várias áreas da engenharia mecânica, engenharia elétrica, ciência da computação e controle.

No âmbito deste projeto, com objetivo de avaliar a aplicabilidade das ferramentas de desenvolvimento integrado de produtos, foi desenvolvida uma bancada para realizar ensaios de fadiga acompanhando uma equipe de projeto, nos moldes propostos pela engenharia simultânea. Esta equipe foi composta por estudantes de graduação em engenharia mecânica, estudantes de mestrado em mecatrônica, professores e pesquisadores em áreas de mecânica, elétrica e de controle. Além disto, no desenvolvimento desta bancada também foram consultados especialistas na área da ciência da computação.

Como será descrito ao longo deste capítulo, uma bancada para realizar ensaios de fadiga é um produto que demanda cuidados especiais, em virtude de suas características, especificações técnicas e restrições normativas. Além de apresentar resultados que permita classificar materiais, levantar dados para construção de produtos em materiais plásticos, obter certificações dentro de padrões internacionais de medidas para validação dos ensaios realizados.

Todas estas características implicam num processo de sincronia e afinidade entre os sistemas da bancada, para que os resultados obtidos estejam dentro de um mínimo grau de incerteza exigido nas normas de padronização e segurança para equipamentos de ensaios destrutivos.

2. Estudo de caso – descrição do processo de desenvolvimento da bancada

O desenvolvimento da bancada teve início com a formação da equipe de projeto composta por professores, pesquisadores, engenheiros, mestrandos, graduando com formação em engenharia mecânica e elétrica; conforme classificação apresentada na tabela 7.

Tabela 7 – Classificação dos componentes envolvidos no projeto

Integrantes	Formação	Especialidade	Condição na equipe
01	Doutor	Eng ^a Mecânica	Membro efetivo
02	Mestrando	Mecatrônica	Membro efetivo
03	Graduando	Eng ^a Mecânica	Membro efetivo
01	Graduando	Eng ^a Elétrica	Membro efetivo
01	Doutor	Eng ^a Elétrica	Membro colaborador
01	Doutor	Eng ^a Elétrica – Controle	Membro colaborador
01	Mestrando	Ciência da Computação	Membro colaborador
01	Mestrando	Eng ^a Mecânica	Membro colaborador

Estes profissionais buscaram estabelecer uma aproximação de afinidades e sinergia para conhecimento mútuos, através de uma dinâmica de apresentação com suas respectivas áreas de atuação, para em seguida, definir o objeto do projeto (o que se deseja?): “**o desenvolvimento de uma bancada para ensaios de fadiga em materiais plásticos**”, e suas possíveis características, isto é, ‘o equipamento deve permitir realizar ensaios normalizados, com controle das variáveis do ensaio, com possibilidade de emitir relatórios parciais e globais, seja de baixo custo, e, que traga inovações tecnológicas para gerar patente’, compondo deste modo todo o escopo idealizado do produto.

Este desenvolvimento envolveu as etapas do projeto informacional, conceitual e preliminar abordadas anteriormente, sem o detalhamento da concepção final. Como resultado final pode-se chegar a uma solução tecnológica viável, e economicamente possível de ser fabricada com os recursos orçados.

A seguir são apresentadas as fases auferidas no processo de desenvolvimento da bancada.

2.1 Projeto Informacional

É conveniente destacar que nesta etapa do projeto, já sabendo o escopo do problema, procura-se seguir os passos metodológicos do projeto informacional, que resumidamente envolvem: pesquisar informações sobre o problema proposto, definir a clientela do produto em todo seu ciclo de vida, consultar os prováveis clientes sobre suas necessidades, levantar possíveis restrições do produto, converter as necessidades em requisitos de engenharia e por fim estabelecer as especificações do produto.

Sendo assim, na fase inicial, ocorreu um estudo aprofundado do estado da arte do projeto, com discussões envolvendo: a fenomenologia da fadiga, dos materiais plásticos, tipos de esforços, normas de ensaios, processos de injeção, equipamentos disponíveis no mercado, ferramentas de desenvolvimento, metodologias, vantagens e desvantagens do projeto, patentes, características mecatrônicas, custos etc.

O gerenciamento das informações suscitadas necessita de muito cuidado e atenção, pois são bastante extensas e precisam ser armazenadas de modo completo para futuras análises de relevância das decisões tomadas. Para tanto, os tópicos relevantes das discussões foram registradas e transferidas para meio digital (computador) além de serem gravadas em dispositivo de áudio (fitas K7).

Destes encontros iniciais, em torno de duas reuniões semanais com duração média de três horas, foi possível definir a clientela, procurando englobar todo o ciclo de vida do produto e levantar as necessidades dos clientes envolvidos no desenvolvimento e uso do produto, conforme mostra a tabela 8.

Tabela 8 – Identificação e Classificação dos Clientes

Tipo de Cliente	Identificação	Cliente
Clientes Internos	A	Fabricante de peças da máquina
	B	Equipe de Projeto
	C	Montador
Clientes Intermediários	D	Não foram identificados
Clientes Externos	E	Estudantes de graduação e pós
	F	Empresas
	G	Usuário – Técnico de ensaio
	H	Projetista de peças
	I	Técnico de manutenção
	J	Usuário técnico de limpeza
	K	Professores

Deste modo abriu-se à fase de elaboração do projeto informacional. Os clientes, individualmente, expuseram sobre suas expectativas e necessidades, e estas foram sendo listadas numa tabela, que inicialmente atingiu um total de 50 necessidades (incluídas no apêndice G). Muitas destas necessidades bem detalhadas já sinalizavam uma provável solução, como: emitir relatório impresso detalhado com descrição das características. Este processo gera muitas discussões e sempre resulta na tomada de decisões sobre manter, agrupar ou retirar a necessidade obtida. Sendo assim, após muitas argumentações, as necessidades foram sendo agrupadas em termos mais genéricos, em face do excessivo grau de detalhes, e ficaram resumidas ao total de 22, conforme apresentadas na tabela 9.

Paralelo ao processo de agrupamento das necessidades também foi feito a classificação das necessidades por áreas adotando-se a seguinte nomenclatura: **1** – operacional, **2** – segurança, **3** – custos, **4** – manufatura, **5** – manutenção, **6** – expectativa de projeto, **7** – outros e **8** – construção. Esta classificação é aleatória, mas obedece ao ciclo de vida do produto e depende da equipe de projetos e ainda poderia ser feita de modo a separar necessidades referentes à mecânica, elétrica, controle, etc.

Tabela 9 – Identificação e Classificação das Necessidades do Produto

Classificação	Itens	Necessidades
1	01.	Apresentar relatórios padronizados
1	02.	Fácil preparação (setup reduzido)
1	03.	Flexibilidade dos parâmetros de ensaios
1	04.	Permita o acompanhamento do ensaio
1	05.	Permitir o monitoramento do ensaio
2	06.	Operar segundo as normas de segurança
3	07.	Baixo custo de manutenção
3	08.	O custo máximo seja R\$ 50.000,00
4	09.	Componentes de fácil fabricação
4	10.	Possua menor nº e variedade de peças
5	11.	Seja de fácil desmontagem
5	12.	Que as peças sejam resistentes a ataques químicos
5	13.	Ter vida útil elevada

Classificação	Itens	Necessidades
6	14.	Realizar ensaios em grande variedade de materiais
6	15.	Gerar patentes
7	16.	Realize ensaios normalizados em plásticos
7	17.	Tenha baixo consumo de energia
7	18.	Minimizar impacto ambiental
8	19.	Permita menor tempo de montagem
8	20.	Tenha peso reduzido
8	21.	Bancada com dimensões reduzidas
8	22.	Seja de fácil construção

Para se chegar ao consenso de quais deveriam ser agrupadas ou eliminadas, houve muitos questionamentos, como por exemplo: se determinada característica já não estaria induzindo uma possível solução, ou direcionando a um mecanismo específico. Este processo é bastante rico e possibilita, a cada encontro, levantar novas idéias sobre os itens listados e aprofunda a compreensão do problema em foco, entretanto, necessita coordenação para que não ocorram excessos, ou seja, há de se estabelecer um ponto de parada e assumir posições.

Em decorrência da formação técnica da equipe ser maior em engenharia mecânica observa-se que muitas opiniões já traziam embutidas questões quanto ao número de componentes, ou facilidade de montagem, aspectos estes contemplados no uso de ferramentas DFMA. Isto gerou, num primeiro momento como descrito anteriormente, 50 itens (necessidades) detalhadas e voltadas para os componentes mecânicos da bancada em detrimento dos aspectos eletroeletrônicos e de controle, apesar de, implicitamente, algumas necessidades apontarem para características eletroeletrônicas, como por exemplo: ‘permitir o monitoramento do ensaio’.

Deste modo, pode-se perceber que apesar da equipe atuar em áreas diferentes, a maioria possuía uma formação comum (Engenharia mecânica). Isto limitou a visão do problema proposto na fase informacional do projeto, contudo, não elimina soluções que possam advir de outras áreas distintas ou correlatas. Na prática esta limitação poderia ser amenizada com inclusão de outros componentes das áreas elétrica e controle, ou convidar um especialista para expor suas idéias sobre os aspectos levantados pela equipe de projeto.

Na seqüência, as necessidades (o que se deseja) foram analisadas e transformadas em requisitos de engenharia (como – de que forma realizá-los), conforme listado na tabela 10, isto é, foram descritas numa linguagem de engenharia que seja mensurável. A relação entre elas não é unívoca, isto é, uma necessidade pode estar contemplada em vários requisitos, assim como, um requisito atender várias necessidades.

Em face da formação técnica da equipe de projeto, muitas necessidades já apresentavam características de requisitos, facilitando deste modo o processo de transformação da linguagem. A subjetividade da necessidade é modificada para elementos objetivos e dimensionáveis. Nesta fase os requisitos também são classificados quanto ao que se espera deles no processo em termos de uma valoração positiva ou negativa, por exemplo: o requisito custo do produto é desejável que seja o menor possível, enquanto que o requisito número de soluções prontas seja o maior possível. Para esta classificação foi adotada a nomenclatura de duas setas ascendentes e descendentes, significando respectivamente maior e menor (↑↓).

Tabela 10 – Identificação e Classificação dos Requisitos

Itens	Unidade	Desejável ↑↓	Requisitos
01.	R\$	↓	Custo do produto
02.	R\$	↓	Custo de manutenção
03.	Kg	↓	Peso das peças manipuláveis
04.	Kg	↓	Peso da bancada
05.	%	↓	Tolerância (Rugosidade – dimensões)
06.	Nº	↑	Número de soluções prontas
07.	min	↓	Tempo de construção
08.	Nº	↑	Número de patentes
09.	%	↑	Realizar ensaios de fadiga em plásticos
10.	%	↓	Erro de posicionamento
11.	%	↓	Incerteza na medição
12.	mm	↑	Faixa de amplitude de oscilação
13.	Hz	↑	Faixa de frequência
14.	Nº	↑	Número de parâmetros de controle
15.	m	↓	Dimensões
16.	db	↓	Nível de ruído
17.	Nº	↑	Número de dispositivos de segurança
18.	Kwh	↓	Consumo de energia
19.	%	↑	Gerar relatórios impressos
20.	Nº	↑	Número de tipos de amostras
21.	min	↓	Tempo de preparo do ensaio
22.	Nº	↑	Número de etapas visíveis do processo
23.	%	↑	Apresentar resultado em tela
24.	min	↓	Tempo de manutenção
25.	ano	↑	Vida útil da bancada
26.	Nº	↑	Número de dispositivos de controle e medição
27.	h	↑	Autonomia de uso

O processo de construção do projeto resulta sempre numa sucessiva tomada de decisões por parte da equipe de projeto. A cada passo toma-se uma decisão e avança-se para o passo seguinte e, muitas vezes percebe-se, por parte de alguns, a incerteza quanto às decisões assumidas, entretanto, o comando do coordenador permite que a equipe siga para mais uma fase. A equipe ao optar por agrupar necessidades e requisitos, em detrimento dos detalhes, que muitas vezes já caracterizavam uma possível solução, argumentou quanto ao excesso de parâmetros que se teriam quando da análise entre as necessidades e requisitos. Isto demandaria uma enorme quantidade de horas para estabelecer as especificações do produto.

Desta maneira, após agrupamento significativo das necessidades de 50 para 22 e dos requisitos de 31 para 27, as necessidades foram classificadas por áreas de atuação. A partir do qual se levantariam as especificações ou requisitos funcionais do produto. Convém destacar que este processo de tomada de decisões quanto ao que deve ser agrupado ou retirado é longo e recorrente, isto é, quando se achava que estava concluído, novamente noutra reunião voltada à mesa de discussão e ocorriam novas alterações quanto à inclusão ou exclusão e também quanto à forma de redação do mesmo.

Para estabelecer as relações entre as necessidades e requisitos e entre os requisitos, a equipe de projeto optou por utilizar a ferramenta da casa da qualidade – QFD, no seu primeiro desdobramento. Um dos aspectos que levaram a esta escolha, foi o fato desta ferramenta ser de conhecimento dos componentes e por ser de uso comum no processo de desenvolvimento

de produtos. Embora a equipe não tivesse clareza quanto sua aplicabilidade para desenvolvimento de um produto com características multidisciplinares como a bancada de ensaios.

A montagem da matriz QFD no seu primeiro desdobramento, conforme ilustrada na figura 40 (ampliada no apêndice B), foi feita utilizando um aplicativo de planilha eletrônica, seguindo o modelo descrito no capítulo 2, onde foram listadas na primeira coluna, as necessidades dos clientes classificadas segundo as áreas. Nas colunas subsequentes listaram-se os requisitos. A matriz central corresponde à região onde foram feitas as avaliações entre as necessidades dos clientes e os requisitos adotando-se uma escala de valores (0 – 1 – 3 – 5), no qual o valor zero significa que não há relação, enquanto o valor cinco significa que existe uma forte relação entre a necessidade e o requisito avaliado.

A região abaixo da matriz principal foi atribuída às grandezas físicas (unidades) dos requisitos com seus valores totais ponderados. A pontuação total ponderada permitiu classificá-los hierarquicamente. A penúltima coluna após a matriz principal foi utilizada para atribuir os pesos (variando de 1 a 5), dados pelos clientes em grau de importância ou prioridade. Menor valor menor prioridade, maior valor maior prioridade.

Este processo de análise entre as necessidades e requisitos na matriz principal, com finalidade de atribuir um valor à relação necessidade versus requisitos, envolve muita discussão entre os componentes da equipe de projeto. Isto resultou na atribuição do valor consensual ou no mais votado quando ocorreram discordâncias.

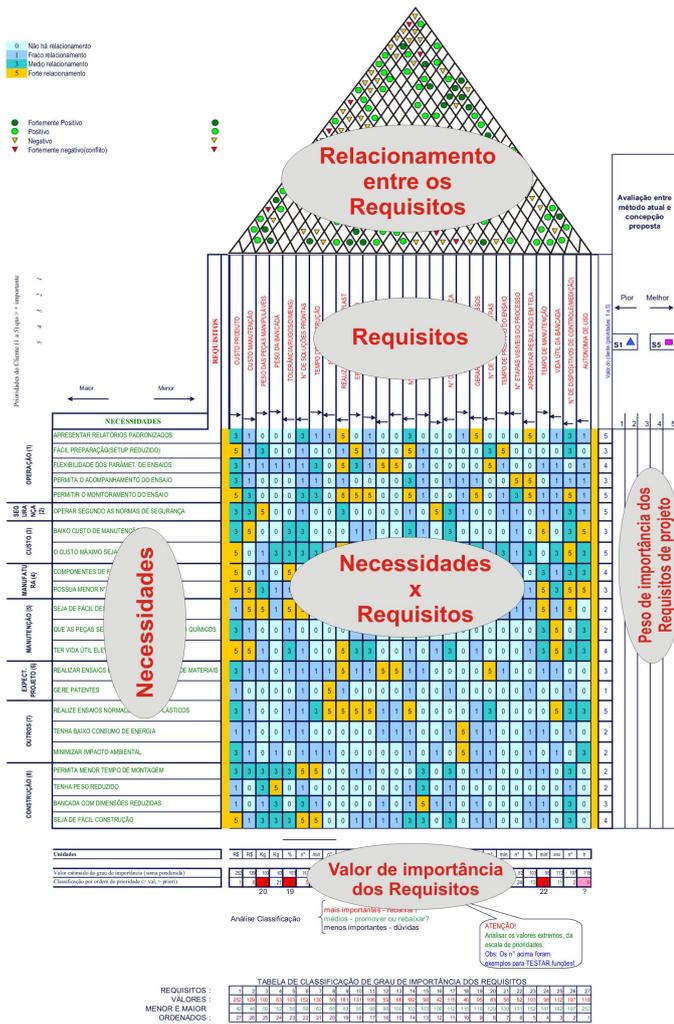


Figura 40 – Matriz da qualidade (QFD) da bancada para ensaios de fadiga.

Após conclusão desta fase, por sinal bastante extenso, por terem sido feitas 594 análises entre necessidades e requisitos (uma matriz 22x27) foi possível classificar os requisitos. Considerando uma média de 1,5 minutos por análise pode-se perceber que foram gastos em torno de 15 horas de debates divididas em cinco turnos de três horas. Com auxílio de uma planilha eletrônica calculou-se a média ponderada através da expressão 1, permitindo a hierarquização dos requisitos do projeto.

$$(1) V_{importância} = \sum_{i=1}^n P_{[pesos_clientes(1a5)]} \times GR_{[grau_de_relacionamento(0-1-3-5)]}$$

sendo n o número de necessidades listadas.

A inter-relação entre os requisitos foi feita através do telhado da QFD utilizando como simbologia o quadro da tabela 11 a seguir.

Tabela 11 – Simbologia de relação entre requisitos

●	Fortemente Positivo (desejável)
○	Positivo
▼	Negativo
▼	Fortemente negativo (conflito)

Esta análise estabeleceu o grau de relação entre os requisitos: negativo, fortemente negativo (conflitantes), positivo ou fortemente positivo (desejáveis). Como exemplo, pode ser visto na figura 41, que o requisito custo do produto tem uma relação fortemente negativa (conflitante) com o requisito número de dispositivos de controle, pois há uma contradição explícita entre eles, quando se aumenta o número de dispositivos de controle da máquina automaticamente aumenta-se o seu custo, o que não é desejável.

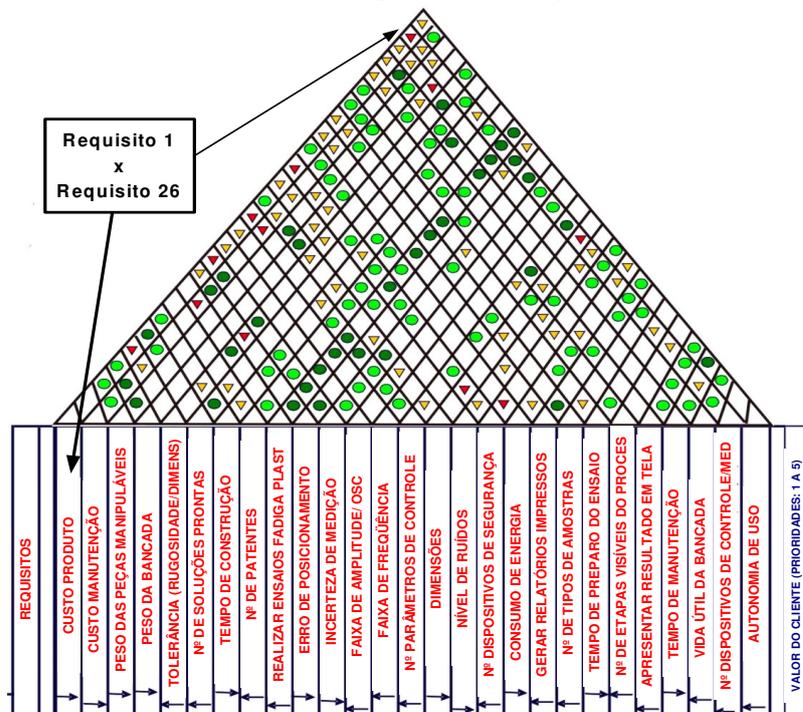


Figura 41 – Inter-relações no telhado da QFD da bancada para ensaios de fadiga.

Como pode ser visto na figura 41, a equipe de desenvolvimento precisou analisar as relações entre os requisitos para estabelecer suas prováveis contradições com objetivo de visualizar até que ponto uma característica exercia influência positiva ou negativa sobre a outra. Este processo facilitou o emprego de outra ferramenta de desenvolvimento que é a matriz contradição, ilustrada na tabela 12.

Tabela 12 – Matriz contradição (alguns requisitos da bancada).

Princípio - Descrição	Desejáveis	Param. Eng ^a - Otimizar	Princípios Inventivos			
				2, 22	27	
2. <u>Extração</u> : extraia (remova ou separe) uma parte ou propriedade indesejável			5, 28	29		
5. <u>Combinando</u> : combine no espaço e tempo objetos homogêneos ou que destinam a operações contínuas			24		28	
6. <u>Universalidade</u> : ter um objeto capaz de executar múltiplas funções eliminando a necessidade do uso de outros objetos			25, 27		27	
22. <u>Converter dano em benefício</u> : utilize fatores ou efeitos ambientais prejudiciais para obter efeito positivo						
25. <u>Auto-serviço</u> : faça o objeto se auto reparar e mantenha as operações suplementares e de reparo. Utilize material e energia perdida						
27. <u>Descartável-barato ao invés de Caro-durável</u> : substitua um objeto caro por uma coleção de barato deixando de lado propriedades, como por exemplo: longevidade						
28. <u>Substituição de sistema mecânico</u> : substitua um sistema mecânico por: óptico, acústico. Utilize campo elétrico, magnético para interagir com objetos.						
29. <u>Construção pneumática ou hidráulica</u> : substitua as partes sólidas por líquidos e gases. Podem ser utilizados ar ou água para inflar objetos						
		Param. Eng^a - Conflitante	Volume do Produto	Quantidade de Subistemas	Complexidade dos Dispositivos	Complexidade de controle
			Conflitantes			

Nesta fase também, ao aplicar-se o ferramental da TIPS (Teoria das soluções inventivas de problemas), que é composta por um conjunto de ferramentas, dentre elas, a matriz contradição, foi possível levantar alguns princípios inventivos para solucionar as prováveis contradições entre os requisitos do projeto. Por exemplo, para otimizar o parâmetro produtividade conflitante com a quantidade de subsistemas, poder-se-ia fazer uso dos princípios 25 (auto-serviço) e/ou 27 (Descartável-barato ao invés de Caro-durável).

Contudo, por decisão da equipe de projeto, em face da necessidade de se obter uma concepção do produto com maior rapidez, a fim de apresentar projeto a órgãos financiadores, a implementação dos princípios inventivos foi preterida para um momento futuro do projeto. Embora, para este trabalho o aproveitamento da ferramenta num produto de características mecatrônicas seja de grande valor experimental. E seu uso serve de base para elaboração da matriz morfológica do produto.

Para construir esta matriz foi necessário seguir basicamente os seguintes passos:

1. Identificar o problema, estabelecer a função principal, no caso, realizar ensaios de fadiga. Identificar quais os requisitos: Fortemente positivos (desejáveis) e fortemente negativos (contraditórios).
2. Reformular o problema em termo das contradições. Para tanto, utilizou-se o telhado da matriz QFD na análise das contradições.
3. Associar os requisitos aos parâmetros de engenharia.
4. Buscar uma solução análoga e adaptá-la ao problema do projeto.

A equipe de projeto detectou conforme listado na tabela 12, através da análise do telhado da QFD, alguns problemas conflitantes e classificou-os dentro dos parâmetros da matriz contradição. Isto permitiu que a equipe identificasse dificuldades que futuramente poderiam inviabilizar a manufatura do produto.

Esta fase informacional concluiu-se com as possíveis especificações técnicas do produto, apresentadas na tabela 13, que viabilizarão futuras considerações no desenvolvimento do projeto, em particular na avaliação das concepções criadas.

Tabela 13 – Especificações do projeto em ordem de importância

Requisito projeto	Metas (nº)	Observações	Saída desejável	Saída indesejável
Realizar ensaios de fadiga	1	Requisito funcional	A máquina aplique os ciclos de flexão	Os mecanismos móveis não apliquem ciclo de flexão
Custo do produto	2		Menor que R\$ 50.000,00	Acima de R\$ 50.000,00
Erro de posicionamento	3	Requisito funcional	Menor que o estabelecido nas normas da ASTM	Não conseguir posicionar os mecanismos no ponto desejado
Incerteza da medição	4	Requisito funcional	Menor ou igual ao estabelecido nas normas da ASTM	Incerteza maior do que 3%
Gerar relatórios	5	Requisito funcional	Emitir relatórios	Não ter resultados para análise
Faixa de amplitude	6	Requisito funcional	Maior ou igual do que a estabelecida nas normas da ASTM	Inferior ao estabelecido pelas normas da ASTM
Faixa de frequência	7	Requisito funcional	Maior ou igual do que a estabelecida nas normas da ASTM	Inferior ao estabelecido pelas normas da ASTM
Apresentar resultado em tela	8	Requisito funcional	Mostrar dados do ensaio	Não obter dados em tempo real
Nº de soluções prontas	9		Maior nº possível	Ter que fabricar todos os componentes
Nº de dispositivos de controle	10		Maior nº possível	Nº insuficiente para levantar os dados
Nº de parâmetro de controle	11		Maior nº possível	Nº insuficiente para levantar os dados
Tempo de construção	12		Menor do que seis meses	Maior do que seis meses

Requisito projeto	Metas (n°)	Observações	Saída desejável	Saída indesejável
Custo de manutenção	13		Baixo custo	Alto custo que inviabilize operação contínua
Autonomia de uso	14		Maior do que dez anos	Menor do que cinco anos
N° de dispositivos de segurança	15		Evitar acidentes na operação e manuseio	Insegura no manuseio e operação
Vida útil da bancada	16		Maior que o tempo de deságio	Menor que o suficiente para pagar desenvolvimento e construção
Peso das peças manipuláveis	17		Não ultrapasse 5 Kg	Peças com peso maiores do que 5 Kg
Peso da bancada	18		Menor do 150Kg	Muito pesada e não permita mobilidade
Tolerância (rugosidade/dimensional)	19		Menor ou igual a (0,001±3%)in	Maior do que (0,001±3%)in
Dimensões	20		Menor do que 1 m ³	Acima de 1 m ³
N° de tipos de amostras	21		Maior quantidade possível	Não atender aos plásticos mais usuais
Tempo de manutenção	22		Menor tempo possível	Muitas paradas para manutenção
Tempo de preparo do ensaio	23		Menor tempo possível	Longo tempo de preparo
N° de etapas visíveis do processo	24		Maior quantidade com segurança	Não permitir visualizar o funcionamento
N° de patentes	25		Maior n° possível	Não gerar pelo menos uma patente
Consumo de energia	26		Menor possível	Alto consumo inviabilizando os ensaios
Nível de ruído	27		Abaixo 64dB	Muito ruído necessitando proteção auricular

Com base nestas especificações do produto, a equipe partiu para o desenvolvimento das análises funcionais do produto, dando início ao projeto conceitual.

2.2 Projeto Conceitual

Uma visão geral das fases metodológicas do projeto conceitual após estabelecimento das especificações com suas saídas desejáveis e indesejáveis (ou restrições) consiste em: estabelecer a estrutura funcional com a função principal e suas funções alternativas (subfunções); pesquisar os princípios de soluções através dos vários métodos de busca (intuitivos, discursivos ou convencionais); combinar os princípios de soluções de modo a obter um produto ótimo; selecionar as combinações (ou concepções) e avaliá-las através de diferentes técnicas, para obter àquela que melhor se aproxima das especificações do projeto e necessidades dos clientes.

Deste modo, a etapa inicial da concepção partiu da análise funcional do produto, que mostra o desempenho deste em executar com êxito sua principal finalidade (realizar ensaios de fadiga). Para tanto, optou-se pela ferramenta da síntese funcional, no qual a função global (Total), no exemplo abordado “**realizar ensaio de fadiga**”, deve ser decomposta em subfunções parciais e específicas que permitam descrever cada passo do produto em desenvolvimento, com suas interações entre usuários e meio ambiente, entradas e saídas (produto, energia e informação), conforme ilustra a figura 42.

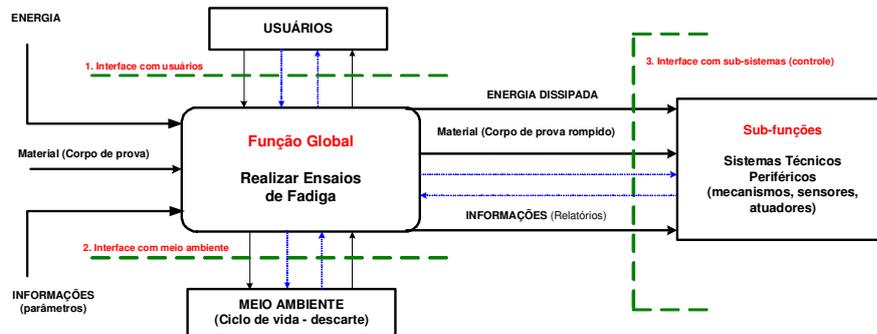


Figura 42 – Esquema genérico da análise funcional.

No bloco principal têm-se a função do sistema de forma compacta e abstrata que estabelece uma interface com o usuário, os sistemas técnicos periféricos e o meio ambiente. O usuário fixa o corpo de prova, configura os valores característicos do ensaio, liga a máquina etc. Os sistemas técnicos acionam os mecanismos, lê os sensores, acumula e atualiza os dados etc. Enquanto o meio ambiente sofre as ações de funcionamento da máquina quanto ao ruído, aumento de temperatura, agentes corrosivos e delinea o tempo de vida do produto. Assim o problema fica formulado através de sua função global e com suas condições de contorno restritivas através das entradas e saídas de cada subsistema.

O desenvolvimento da estrutura funcional de um produto novo não é tarefa trivial. E as dificuldades começam quando se tenta arranjar as funções que descrevem a funcionalidade do produto. Na prática, depende muito da experiência da equipe de projeto, na intuição, julgamentos próprios, pesquisa exaustiva e, em último caso empiricamente na tentativa e erro. A figura 43 apresenta o resultado parcial da análise funcional do sistema estudado. E, no apêndice A, têm-se a análise funcional completa da bancada para ensaios de fadiga em materiais plásticos.

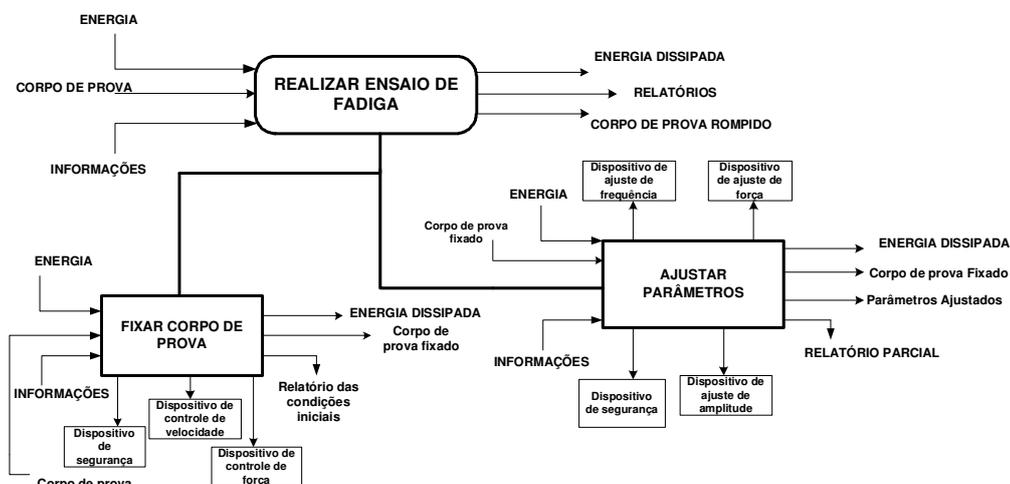


Figura 43 – Análise funcional, parcial, da bancada para ensaios de fadiga.

A construção da estrutura funcional da bancada para ensaios em fadiga baseou-se na experiência da equipe em projetos similares de desenvolvimento de produtos, numa pesquisa

exaustiva quanto aos processos de fadiga em materiais, artigos, teses e dissertações correlatas, e normas que estabelecem os parâmetros para controle do ensaio. Estes fatores foram sendo acumulados no projeto informacional e trazidos como base para construção desta nova etapa.

Em decorrência da decomposição da função global a equipe foi percebendo a partir das funções básicas, cada área distinta envolvida no projeto. Por exemplo: quando a subfunção ajustar parâmetros é especificado têm-se a clara noção que para executá-lo são necessários dispositivos elétricos e eletrônicos, que por sua vez dependem de controle de sinais de entrada e saída e uma camada de software que permita a interação dos mesmos com os usuários. Aqui os diferentes domínios da mecatrônica são destacados.

É, a partir desta fase de decomposição da função global, que Santos (2003) propõe uma maior integração da equipe de trabalho para que, de modo paralelo, desenvolva-se não somente o projeto físico e mecânico, mas também o desdobramento do sistema de controle do produto mecatrônico em estudo. Como a equipe de projeto não tinha recursos humanos de todas as áreas, buscou-se o conhecimento de especialistas nas áreas de computação, controle industrial e engenharia elétrica. Estes não participaram das fases iniciais do projeto, entretanto, puderam contribuir identificando na estrutura de funções aqueles princípios relacionados a aspectos eletroeletrônicos e de controle dos subsistemas de ajuste de parâmetros e aplicação dos ciclos de ensaio.

Estes especialistas, após reunir e debater os questionamentos e dúvidas com a equipe de projeto, propuseram algumas soluções tecnológicas já disponíveis no mercado. Além de sugerir que a equipe concluísse o projeto mecânico, para de posse de uma concepção física discutir o projeto eletrônico e de controle da máquina.

Este fato vem corroborar para as observações de Santos (2003), já apresentados no capítulo 2, onde 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). Contrapondo assim, o princípio básico da engenharia simultânea de buscar desenvolver produtos de modo concomitante e não seqüencial.

Ao concluir a análise (síntese) funcional pôde-se ter uma visão geral do funcionamento da bancada de ensaios, ainda que uma concepção não tenha sido proposta. Sabe-se o que cada subsistema irá desempenhar com as prováveis interfaces dos subsistemas, contudo, a forma e os mecanismos (sensores, atuadores, controladores) ainda são *'desconhecidos'*. Ou melhor, parcialmente desconhecidos, pois, a experiência e formação da equipe levam intuitivamente a propor mecanismos e soluções pré-existentes no dia-a-dia da indústria, e, de certo modo já validados pelo uso comum.

A etapa seguinte consistiu em gerar idéias de mecanismos (dispositivos) que permitam executar cada função elementar do produto. As sugestões foram agrupadas numa matriz que é denominada: matriz morfológica. Estas informações foram desenvolvidas através da técnica de *'brainstorming'*, com o propósito de estimular a criatividade da equipe em sugerir princípios de soluções. A figura 44 apresenta um exemplo parcial da matriz morfológica da bancada de ensaios, no qual, a função "fixar corpo de prova" para ser atendida precisa especificar: o tipo de dispositivo de fixação, o controle de velocidade e força, o dispositivo de segurança etc.

Neste processo de construção da matriz morfológica, os componentes da equipe de projeto foram sugerindo mecanismos já utilizados na sua prática diária, princípios de solução e dispositivos que pudessem executar cada função em destaque. Neste momento não se descartou qualquer princípio de solução, pois, a tendência natural é criticar soluções idealistas ou simplistas, o que inibiria a criatividade de propor novos princípios inventivos. Pois, a finalidade desse passo foi obter o maior número de soluções para cada função elementar.

No apêndice C é apresentada a matriz morfológica da bancada de ensaios com todos os subsistemas propostos.

MATRIZ MORFOLÓGICA									
Função	Sub-sistema	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	Solução 5	Solução 6	Solução 7	
FIXAR CORPO DE PROVAS	DISPOSITIVO DE ACIONAMENTO	 manual (mecânico)	 botão elétrico	 pedaleira hidráulica	 botão hidráulico	 alavanca			
	DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO	 garra	 mandril	 cunha	 parafuso-porca	 tipo castelo	 rasgo em CP para desloc.	 garra com mov horizontal	
	DISPOSITIVO DE CONTROLE DE VELOCIDADE	 engrenagens	 motor de passo	 manual	 dispositivo hidráulico	 válvulas	 engrenagens + parafuso sem fim		
	DISPOSITIVO DE CONTROLE DE FORÇA PARA FIXAÇÃO	 torquímetro	 sensor - strain gauge	 mola - dinamômetro	 deslocamento				
	DISPOSITIVO DE POSICIONAMENTO DO CORPO DE PROVA	movimentação do dispositivo de fixação				movimentação da parte motora			
		 barramento manual	 eng e sem fim	 cremalheira e sem fim			 barramento manual	 eng e sem fim	 cremalheira e sem fim
DISPOSITIVO DE SEGURANÇA	 trava porta	 capela	 sensor de toque - fim de curso	 sem controle					

Figura 44 – Matriz morfológica da bancada, subsistema: fixar corpo de prova.

A partir das soluções individuais de cada função e por meio de suas combinações foram geradas as concepções do produto. Cada concepção gerada apresentou características próprias: inovação tecnológica, praticidade ou simplicidade de fabricação, alto grau de automação etc. Contudo, todas geraram discussões quanto suas características e confrontadas com as necessidades dos clientes e os requisitos desejáveis do produto, propiciaram um rico debate envolvendo uma técnica argumentativa de defesa, crítica e valoração, que levou a pelo menos uma concepção viável para dimensionamento e especificações.

É evidente que o conhecimento, por parte da equipe de projeto, dos princípios inventivos propostos por Altshuller propiciaria uma caracterização mais formal, racional e completa dos princípios gerados. Contudo, a experiência e formação da equipe de projeto foram suficientes para geração dos princípios de solução e concepções.

A figura 45 ilustra, através das setas, o processo de geração das concepções. Como exemplo, pode-se verificar na concepção 2 que: o subsistema “fixar copo de prova” será acionado por um botão elétrico, posicionado por uma garra, com controle de velocidade através de um conjunto redutor de engrenagens, tendo como controlador de força um sistema de molas com escala, será posicionado através de um barramento horizontal e terá como dispositivo de segurança uma trava de posição.

O subsistema “ajustar parâmetros” terá um servo motor para aplicar amplitude, com um torquímetro para ajuste da força, um foto sensor como dispositivo de segurança e apresentará os parâmetros através de um monitor gerenciado por software. O subsistema “aplicar ciclos” terá como dispositivo de controle de tensão um sistema de engrenagens e parafuso sem fim, controlado por um motor de passo, tendo a temperatura da amostra monitorada por um termômetro de radiação.

Os ciclos serão contados e armazenados através de encoder, tendo como dispositivo de segurança uma câmera que fornecerá imagens do processo para disparar alarme e os relatórios (informações) serão mostrados num sistema computacional que por sua vez enviará os resultados para serem impressos (subsistema “gerar relatórios”).

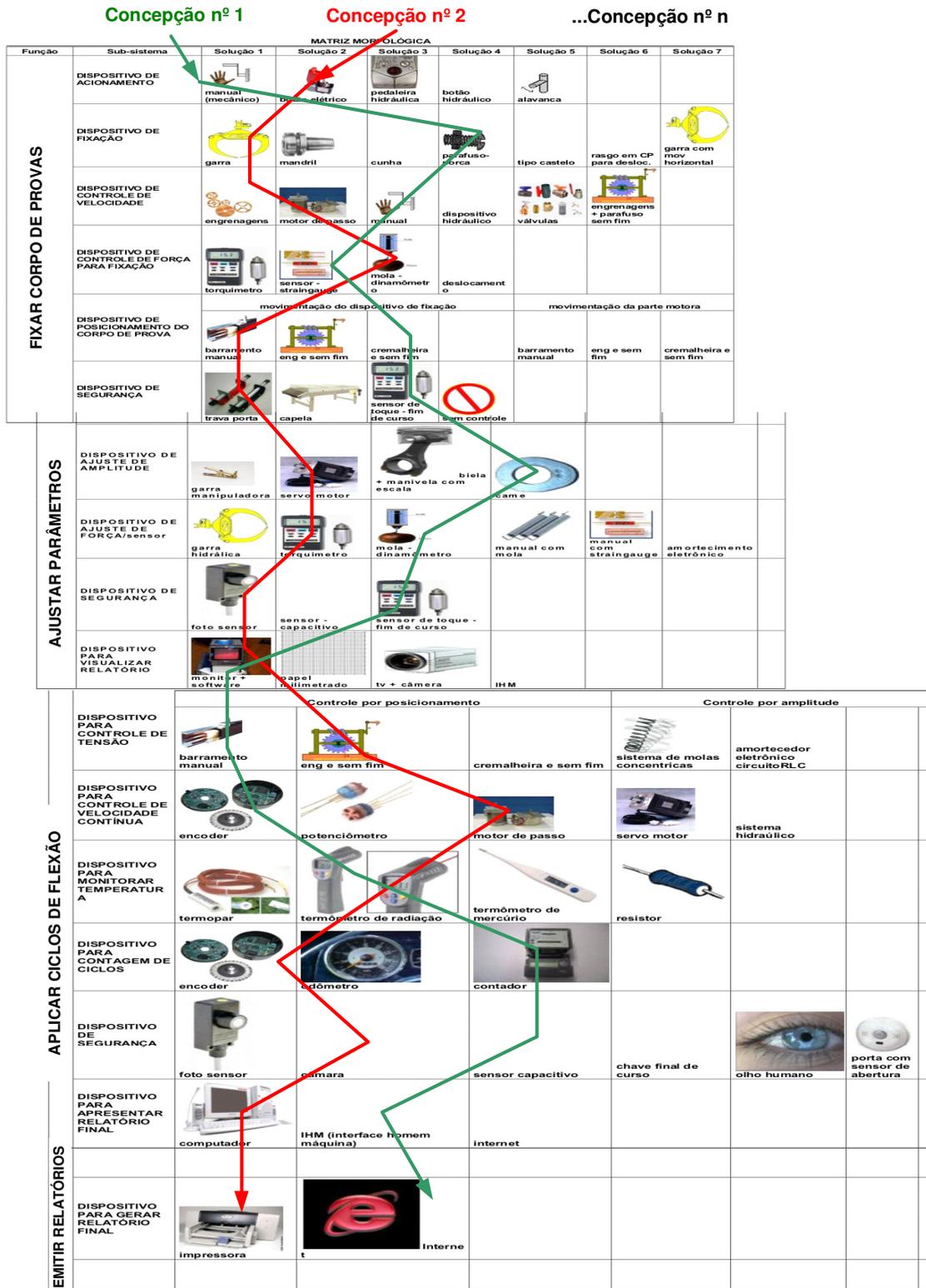


Figura 45 – Geração de concepções a partir da matriz morfológica.

A concepção escolhida após passar por um processo de seleção e avaliação terá o corpo de prova fixado manualmente através de guias e com parafusos, o controle de velocidade e força também será manual onde as guias estabelecem o fim do curso. O posicionamento será por meio de barramento horizontal com travas de segurança. O processo

de ajuste da amplitude e força será feito através de um sistema de eixos com excentricidade atuando numa haste vazada para permitir variação dos parâmetros de controle. Os sensores de posição (foto sensor) e carga (célula de carga) permitem monitoramento, cujos dados são captados por uma placa de aquisição conectada a um sistema computacional que permitirá configurar os parâmetros, via software.

O atuador de controle da tensão será um sistema de eixos sem fim acionados por um motor de passo, tendo um servo motor para aplicar e controlar a velocidade de rotação para aplicação dos ciclos. A temperatura será monitorada por um termômetro de radiação, enquanto a contagem e controle dos ciclos de ensaio serão registrados num contador do sistema de aquisição e tratados por software. A segurança será monitorada por foto sensores e de fim de curso. Todo sistema será monitorado via software, num modelo de camadas, apresentando relatórios parciais e totais num monitor de computador e também com possibilidade de serem impressos.

De posse desta concepção, e com os parâmetros de controle explicitados, algumas modelagens físicas foram estabelecidas, conforme mostra a figura 46.

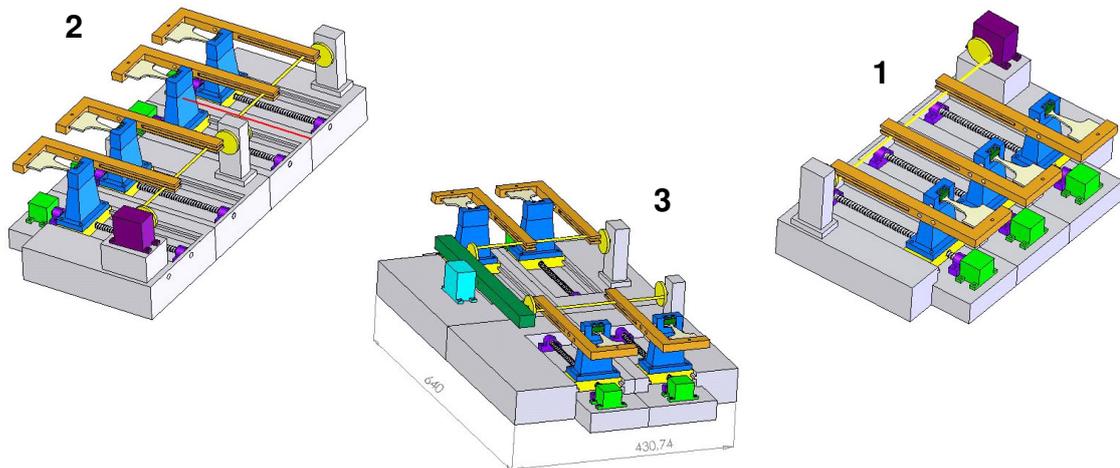


Figura 46 – Primeiras modelagens para concepção da bancada para ensaios de fadiga.

Basicamente estas concepções modeladas possuem o mesmo princípio de funcionamento, no qual um motor elétrico, servo assistido, entrará em rotação acionando um disco com um eixo excêntrico. Este eixo excêntrico estará engastado no rasgo de uma haste, que por sua vez flexionará o corpo de provas fixo em sua extremidade. O ajuste da força e amplitude será implementado por meio de um fuso, que acionado por um motor de passo, deslocará a coluna juntamente com o corpo de provas e a haste. As mudanças estão mais relacionadas à disposição dos mecanismos e a quantidade de corpo de provas a serem ensaiados.

Para se chegar a um consenso sobre qual o mecanismo, atuador, sensor etc., cada concepção passou por processo de valoração, comparação e tomada de decisões conforme abordagem da metodologia de seleção das alternativas que aplica as técnicas de verificar a viabilidade de manufatura, econômica etc., ou seja, o conceito é viável, condicionalmente viável ou inviável. A disponibilidade tecnológica que permite verificar se a tecnologia que será empregada na concepção está disponível e se está consolidada. A análise da matriz passa – não passa, baseado nas necessidades dos clientes permite avaliar os pontos fracos de um conceito e modificá-lo ajustando melhor ao problema. Isto foi verificado na concepção 1 da

figura 46, onde o eixo para aplicar os ciclos de flexão estaria sujeito a grandes tensões e teria que ter uma dimensão que inviabilizaria a aplicação dos ciclos.

E por fim a técnica da matriz avaliação ou método de Pugh, apresentada na tabela 14, que permite mensurar o quanto um conceito é capaz de atender as necessidades dos clientes. Aqui mais uma vez preponderam à experiência dos projetistas seguido do estado da arte, balizado pelas necessidades e requisitos do produto.

Tabela 14 – Matriz avaliação para diferentes concepções.

Necessidades de Projeto	Peso	1ª Conc	2ª Conc	3ª Conc	5ª Conc	6ª Conc
APRESENTAR RELATÓRIOS PADRONIZADOS	5	R	M	+	M	M
FÁCIL PREPARAÇÃO(SETUP REDUZIDO)	3	E	+	+	+	+
FLEXIBILIDADE DOS PARÂMET. DE ENSAIOS	4	F	+	+	+	+
PERMITA O ACOMPANHAMENTO DO ENSAIO	3	E	+	+	+	+
PERMITIR O MONITORAMENTO DO ENSAIO	5	R	+	+	+	+
OPERAR SEGUNDO AS NORMAS DE SEGURANÇA	5	Ê	-	+	-	-
BAIXO CUSTO DE MANUTENÇÃO	3	N	-	M	-	-
O CUSTO MÁXIMO SEJA R\$ 50.000,00	5	C	M	M	-	-
COMPONENTES DE FÁCIL FABRICAÇÃO	4	I	-	M	-	-
POSSUA MENOR N° E VARIEDADE DE PEÇAS	3	A	-	-	-	-
SEJA DE FÁCIL DESMONTAGEM	2		M	M	M	M
QUE AS PEÇAS SEJAM RESISTENTES A ATAQUES QUÍMICOS	2		M	M	M	M
TER VIDA ÚTIL ELEVADA	4	R	+	+	+	+
REALIZAR ENSAIOS EM GRANDE VARIEDADES DE MATERIAIS	3	E	+	+	+	+
GERE PATENTES	1	F	M	+	M	M
REALIZE ENSAIOS NORMALIZADOS EM PLÁSTICOS	5	E	+	+	+	+
TENHA BAIXO CONSUMO DE ENERGIA	2	R	+	M	+	+
MINIMIZAR IMPACTO AMBIENTAL	2	Ê	M	M	M	M
PERMITA MENOR TEMPO DE MONTAGEM	2	N	-	-	-	-
TENHA PESO REDUZIDO	2	C	+	M	+	+
BANCADA COM DIMENSÕES REDUZIDAS	3	I	+	+	+	+
SEJA DE FÁCIL CONSTRUÇÃO	4	A	-	M	-	-

TOTAL +			10	11	10	10
TOTAL -			6	2	7	7
TOTAL GLOBAL			4	9	3	3
PESO TOTAL		0	13	36	8	8
Legenda:			Concepção escolhida			
Igual:	"M" = 0					
Pior:	"-" = -1					
Melhor:	"+" = 1					

Após definida a concepção, foi realizada a modelagem da máquina em software de CAD. Para tanto, pode-se utilizar uma grande variedade de ferramentas computacionais que auxiliam os engenheiros e projetistas no cálculo e modelagem de cada subsistema e suas interfaces, tais como: as ferramentas de CAD, CAE, CASE, Diagrama de blocos, Delphi®, circuitmaker, SimuPLC211, VisObjNet, UML, MATLAB, SLAM, POWERSIM etc.

Entretanto, convém ressaltar que a concepção gerada no processo sofreu várias modificações em sua modelagem 3D, pois, durante essa fase foram identificadas através do uso da DFMA várias condições que poderiam ser otimizadas, e que somente foram detectadas na fase preliminar do projeto.

2.3 Projeto Preliminar

Os passos metodológicos do projeto preliminar para se estabelecer o leiaute do produto envolvem: identificar os requisitos determinantes para a produção das formas e leiaute, fazer os desenhos em escala, identificar os executores dos requisitos funcionais, desenvolver as soluções para estas funções e selecioná-las. Seguir os mesmos passos para as funções auxiliares e integrá-las às funções principais. Por fim, otimizar as soluções verificando os fatores de perturbação e erros, completar os desenhos e estabelecer a lista preliminar das partes.

Enfim, a etapa do projeto preliminar, que consistiu em transformar uma concepção abstrata (conceitual) em algo concreto (real), englobou o dimensionamento de todos os subsistemas com seus respectivos componentes e a seleção dos materiais a serem utilizados na sua fabricação. Esta tarefa deve ser desenvolvida baseada na experiência dos projetistas com um grande conhecimento técnico e embasamento teórico de inúmeros assuntos que formam o escopo do conhecimento das engenharias.

Durante o projeto preliminar de um produto a equipe confrontou-se com diversas subáreas da engenharia, tais como: materiais, cálculo estruturais, mecanismo, elementos de máquinas, dispositivos de controle e medições. Além de propiciar o contato, por meio de pesquisa de preços, com constantes inovações tecnológicas já disponíveis no mercado, apropriando-se dos avanços da internet, onde um grande número de empresas já disponibiliza seus catálogos em meio digitais. Este fator permite inclusive reestruturar elementos da concepção gerada visando melhorias sistemáticas no produto.

2.3.1 Projeto mecânico dos componentes

Nesta fase, a equipe de projeto estabeleceu o ponto inicial de dimensionamento da bancada como sendo o elemento atuador do movimento de flexão, que foi a haste de aplicação de ciclos, visto que este mecanismo está diretamente ligado à aplicação dos esforços, forças,

tensões, momentos e amplitude de deslocamentos aplicados ao corpo de prova. Como a haste representa uma alavanca interfixa, conforme ilustração da figura 47a e 47b, respectivamente, foi feito o dimensionamento do comprimento ($d + D$) necessário para permitir a variação de amplitude (deslocamento $X - Y$) mínima e máxima no corpo de prova, envolvendo os diversos tipos de materiais plásticos que a bancada poderá ensaiar.

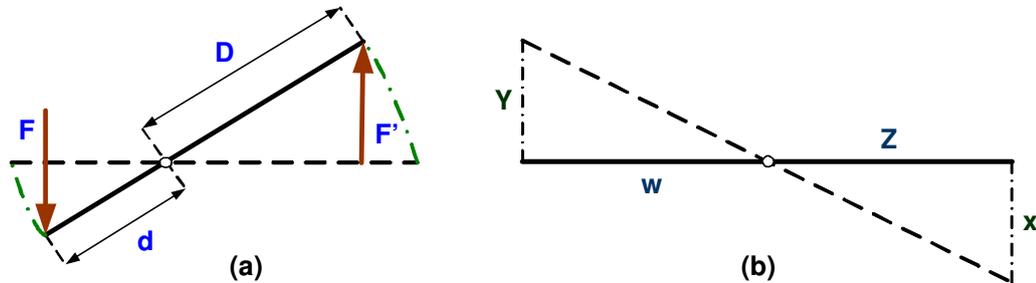


Figura 47 – Diagrama de corpo livre da haste (alavanca interfixa).

Durante o dimensionamento do comprimento da haste, verificou-se uma contradição entre os parâmetros envolvidos. Como os ciclos de flexão seriam aplicados através do deslocamento angular da haste, foi necessário avaliar qual deveria ser o comprimento mínimo considerando um material com menor valor de módulo de elasticidade e maior valor de tensão limite. Em outras palavras, há uma limitação do tipo de material que poderia ser ensaiado considerando o máximo valor de deflexão que poderia ser aplicada pelo equipamento. Entretanto, não foi possível resolver o problema de maneira simples uma vez que não necessariamente o material com maior tensão limite de ruptura teria o menor módulo de elasticidade.

Assim, quando foram considerados os valores extremos das propriedades supracitadas, as dimensões da haste calculadas ficaram muito grandes. A solução encontrada, baseada no uso da metodologia proposta por Ashby (1999), foi relacionar o módulo de elasticidade e a tensão última do material através dos valores de deslocamentos máximos da extremidade do corpo de provas, e utilizar o diagrama ilustrado na figura 48 para determinar o valor do comprimento da haste. Contudo, para adotar este procedimento, restringiu-se o uso do equipamento para ensaiar materiais no domínio dos termoplásticos mais usados nas engenharias.

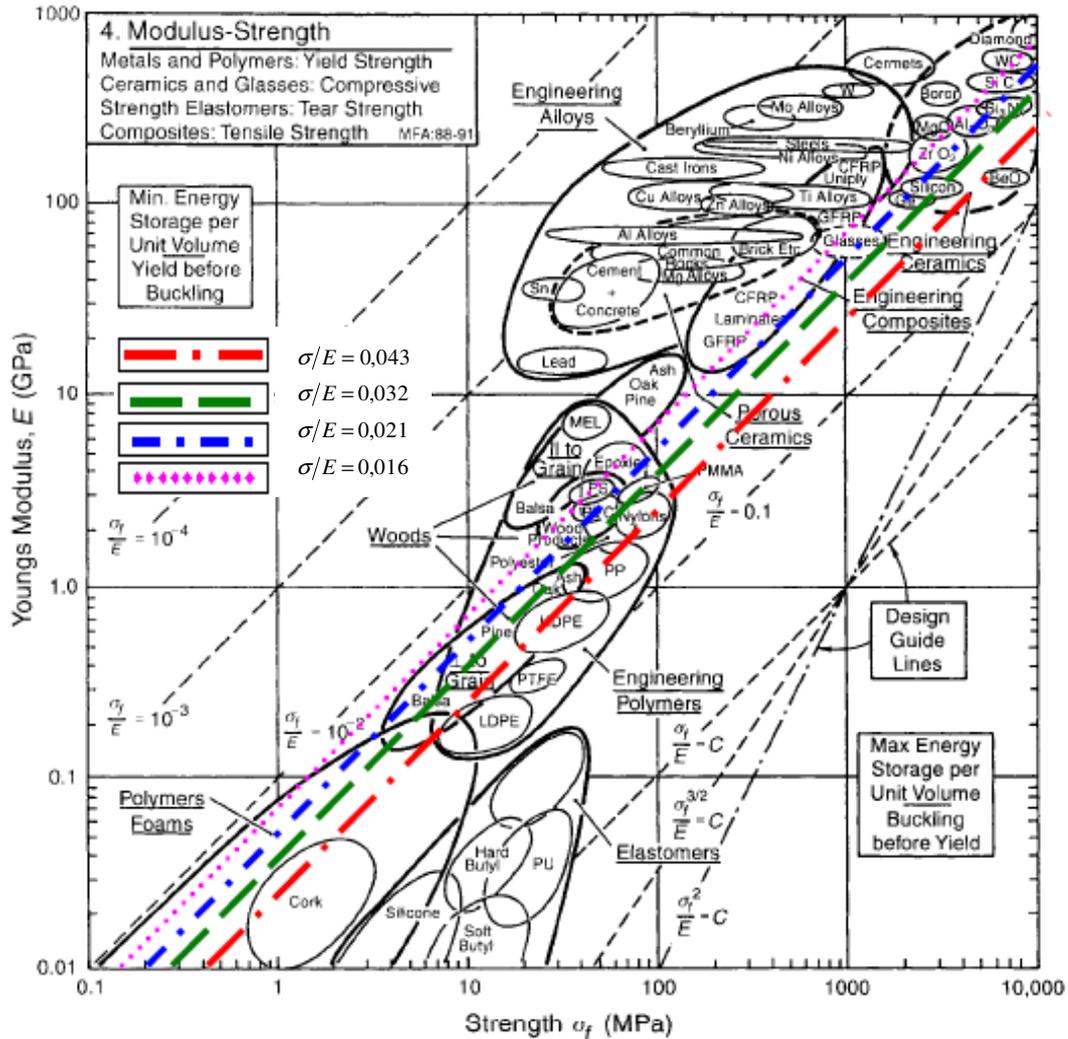


Figura 48 – Diagrama σ_f/E , Ashby (1999).

Os resultados permitem afirmar que é possível realizar ensaios de fadiga para os seguintes materiais: todos os polímeros de engenharia com exceção de alguns polietilenos de baixa e alta densidade, de alguns nylons, Poliésteres, Expoxie, PS, PVC e alguns LDPE, HDPE, PP e PTFE.

As escolhas do material para dimensionamento dos mecanismos foram feitas por meio dos catálogos e tabelas que tratam das ciências e engenharia dos materiais, onde conhecendo os esforços e propriedades desejáveis, como dureza, resistência à flexão, cisalhamento etc., pode-se verificar se existe produto disponível no mercado.

No exemplo da haste de aplicação de ciclos, após determinar os esforços e estabelecer um fator de segurança de ordem três, foi possível escolher o material de fabricação baseado nas tabelas (B4) do Callister (2002), cujo resultado está apresentado na tabela 15, a seguir.

Tabela 15 – Características do material da haste de aplicação de ciclos para bancada de ensaios

Material	Condições	Limite de escoamento (MPa)	Limite resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Liga de aço 1040	Laminado a quente	290	520	207

Para dimensionamento da carga que a haste deverá suportar foi levado em consideração o material do corpo de prova de maior tensão de escoamento (o ABS = 100MPa), assim como o tipo de esforço ao qual estará submetido, segundo a norma ASTM – D671 que normaliza os ensaios de fadiga em plásticos por flexão. Chegando-se as equações de resistência dos materiais que permitiram determinar a força máxima que será aplicada ao corpo de prova, conforme equações apresentada a seguir.

$$(2) \sigma = \frac{M * c}{I} = \frac{F * d * c}{I}, \text{ onde para uma seção retangular, temos:}$$

$$(3) I = \frac{b * h^3}{12}, \text{ sendo:}$$

σ	=	Tensão de escoamento do material
M	=	Momento fletor atuante na seção
c	=	Distância da linha neutra até extremidade da seção transversal
F	=	Força aplicada ao corpo de provas
d	=	Distância da extremidade do corpo de provas até a seção de menor largura
I	=	Momento de inércia da seção

A figura 49 apresenta as seções mais solicitadas do corpo de prova e da haste, enquanto a figura 50 mostra a haste de aplicação dos ciclos completamente dimensionada. Este processo foi sendo aplicado para cada mecanismo e pode ser visto em detalhes no trabalho final do curso de engenharia mecânica da UFBA, por Pimentel (2006).

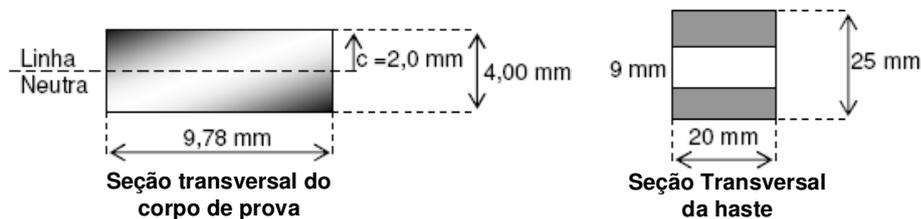
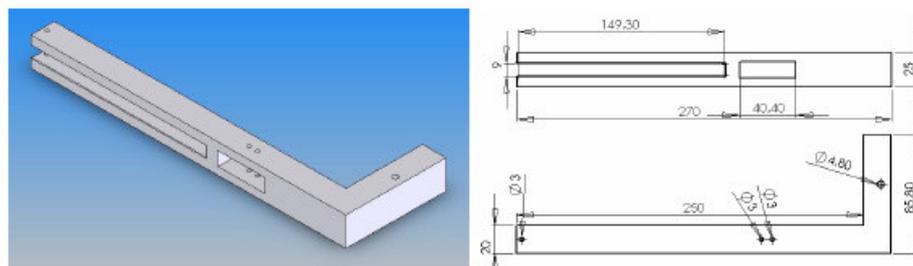


Figura 49 – Seções transversais mais solicitadas do corpo de prova e haste, respectivamente.



Haste para aplicação de ciclos

Figura 50 – Haste de aplicação dos ciclos para o ensaio de fadiga.

A concepção final da bancada para ensaios de fadiga em materiais plásticos, apresentada na figura 51, foi idealizada para realizar quatro ensaios simultâneos e independentes, seguindo as especificações levantadas no projeto informacional descritas neste trabalho. Em destaque apresentam-se alguns componentes mecânicos e elétricos que foram dimensionados e descritos de acordo com a legenda.

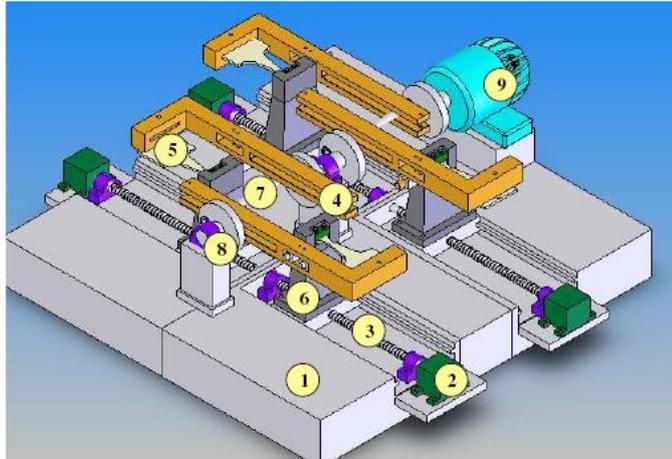


Figura 51 – Conceção da bancada para ensaios de fadiga em materiais plásticos.

1 – Bancada (base de fixação) – Tem como função sustentar a coluna de fixação do corpo de prova e da haste de aplicação dos ciclos de flexão e os demais componentes. A base de fixação sofre ação dos pesos dos componentes e do carregamento dinâmico. Foi escolhido o ferro fundido cinzento G4000, devido ao fato de que esse material é muito eficiente no amortecimento de energia vibracional, além de possuir elevada resistência ao desgaste, conforme ilustrado na figura 52.

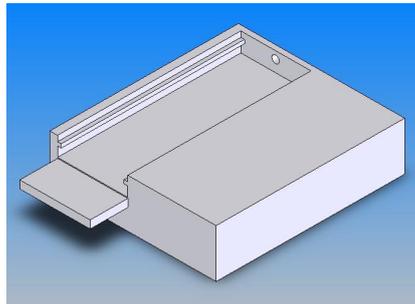


Figura 52 – Base da bancada.

2 – Motor de Passo – é o atuador responsável pelo deslocamento da coluna de fixação do corpo de prova. Este atuador possui uma grande precisão sendo capaz de girar entre $1,8^\circ$ a $0,72^\circ$ por passo. Ele permitirá o ajuste de amplitude e força que atuam no corpo de prova. O qual será transmitido por meio do fuso. Sua realimentação para os ajustes finos da máquina são provenientes dos sensores de carga e posição. A figura 53 apresenta um modelo bipolar.

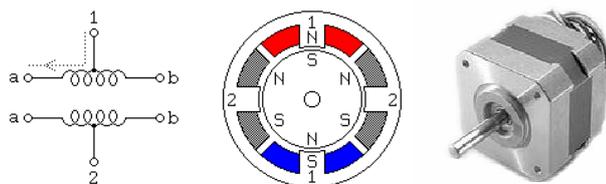


Figura 53 – Exemplo de um motor de passo da bancada.

3 – Fuso – Responsável pela transmissão do movimento do motor de passo para a coluna de fixação da haste, o qual permite variar a posição do excêntrico e conseqüentemente a amplitude e as forças sobre o corpo de prova, conforme figura 54.

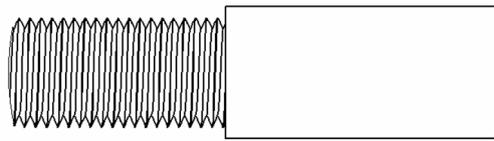


Figura 54 – Fuso.

4 – Haste de aplicação dos ciclos de ensaios – Fixada na coluna e no corpo de prova permite flexioná-lo a fim de produzir os ciclos do ensaio, conforme apresentado na figura 55.

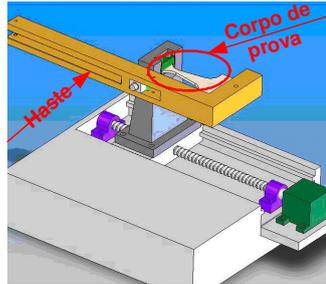


Figura 55 – Haste de aplicação dos ciclos.

5 – Coluna de fixação da haste – é o componente responsável pela fixação da peça e do eixo. Por ser um elemento de sustentação de componentes móveis e por ter um furo que gera uma região de muitos esforços, foi escolhido o ferro fundido cinzento G4000, devido ao fato de que esse material é muito eficiente no amortecimento de energia vibracional, conforme ilustra a figura 56.

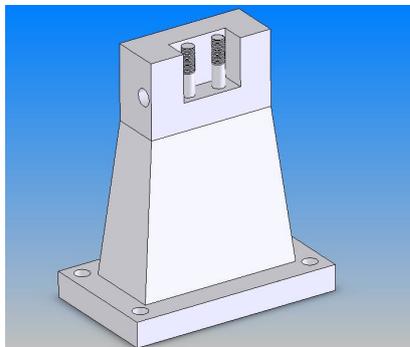


Figura 56 – Coluna de fixação da haste e corpo de prova.

6 – Eixo do excêntrico – Transmitirá o movimento circular do servo motor em movimento alternado junto a excentricidade do disco, conforme figura 57. Será fabricado com liga de aço 1040 laminado a quente, submetido a tratamento térmico superficial para aumentar a dureza e diminuir o desgaste.

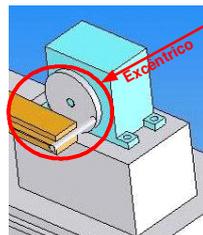


Figura 57 – Disco excêntrico para transmissão de movimento alternado.

7 – Mancal de rolamentos – Tem a função de apoiar os eixos de rotação do excêntrico e dos fusos na base da coluna. Facilitará a montagem e desmontagem e reduzirá o atrito no movimento, conforme mostra a figura 58.

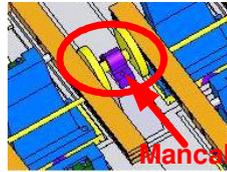


Figura 58 – Mancal de rolamento do eixo de aplicação de ciclos.

8 – Motor servo elétrico para acionamento – Atuador que aciona o eixo de rotação com o excêntrico. Permite alterar a frequência de rotação e conseqüentemente os ciclos de oscilação dos ensaios. Também será retro alimentado por sinais dos sensores de carga e posição a fim de manter constante a frequência durante o ensaio. A figura 59 apresenta um modelo dimensionado para a bancada.



Figura 59 – Servo Motor com controlador de frequência.

Outros componentes além dos supracitados, de dimensões menores foram especificados, mas não foram identificadas na legenda, como: eixo da haste/coluna (é o eixo que suporta e articula a haste na coluna de fixação), guia do eixo da haste/coluna (cuja função é variar a posição do eixo para adaptar o equipamento ao comprimento do corpo de prova a ser ensaiado), parafuso Allen (cuja função é impedir o deslocamento do guia citado anteriormente), bucha de bronze (é encaixada no eixo da haste/coluna para evitar o desgaste do eixo), guia da coluna de fixação (cuja função é movimentar a coluna de fixação por meio do fuso para modificar a amplitude de ensaio do corpo de prova) parafusos da coluna de fixação (para fixar a coluna no guia da coluna), dentre outros.

O mecanismo de transmissão do movimento rotatório do motor elétrico à haste sofreu modificação após aplicação dos princípios da ferramenta DFMA, reduzindo o número de componentes, de um sistema com três engrenagens redutoras acionando dois cames e uma haste, para um disco com eixo excêntrico. Estas mudanças otimizaram o acoplamento e facilitaram o processo de montagem, mantendo sua múltipla funcionalidade, conforme apresentada na figura 60, a seguir.

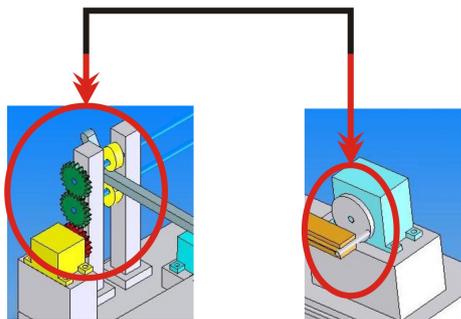


Figura 60 – Aplicação da ferramenta DFMA em mecanismo da bancada de ensaios.

A apresentação detalhada de todos os componentes com os referidos cálculos e simulação dos esforços utilizando métodos de elementos finitos por meio de software de CAE, tipo NASTRAN NX, FEMAP, ABAQUS etc., foram implementados e estão detalhados no trabalho final de curso de PIMENTEL (2006). Entretanto, ficaria bastante extenso apresentá-los aqui afastando assim do escopo deste trabalho.

2.3.2 Projeto de modelagem do sistema computacional pela UML

A modelagem do sistema computacional seguiu os princípios da linguagem simbólica orientada a objetos nos padrões da UML sendo implementada a partir da análise funcional, onde se conhecendo a funcionalidade de cada subsistema com suas relações, foi possível estabelecer um primeiro nível de estruturação com os respectivos diagramas de classes, caso de uso e seqüência de ação. Deste modo, buscou-se estabelecer a lógica da programação, identificando os parâmetros de entrada e saída de dados com seus atributos e métodos de atuação para cada classe, conforme apresentado nas figuras 61, 62 e 63.

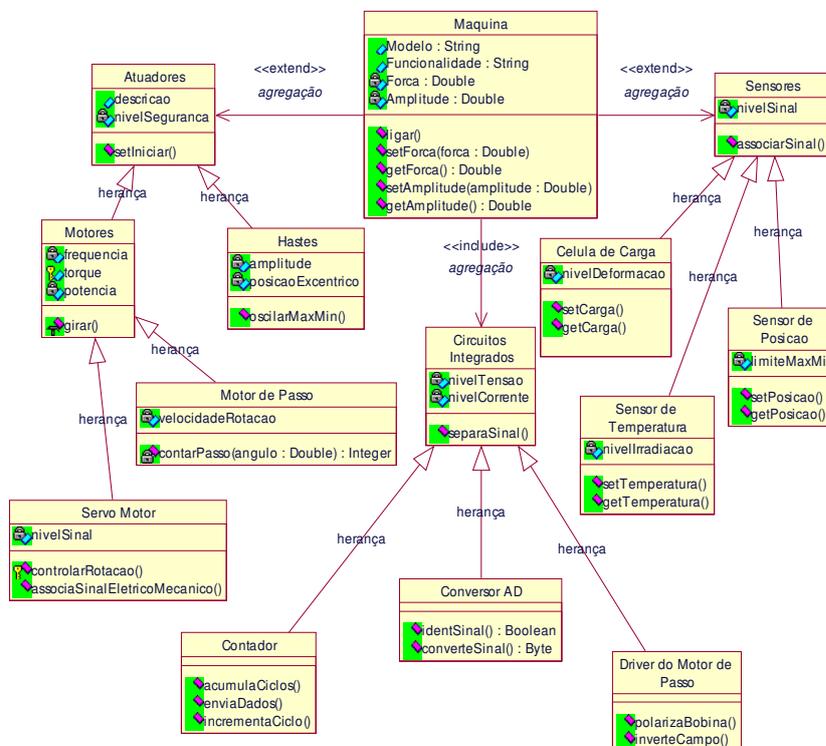


Figura 61 – Diagrama de classe (Bancada de ensaios).

Para estabelecer a modelagem parcial do sistema em UML, a equipe recorreu a um especialista em ciência da computação. Este teve acesso à análise funcional da bancada através de seu diagrama e de uma explanação sobre o projeto da bancada com os requisitos desejáveis para controle. O mesmo questionou sobre os dispositivos de sensoriamento e atuadores. Então, foi-lhe perguntado se era possível desenvolver a modelagem sem uma concepção física da máquina? A resposta foi positiva, entretanto, ele gostaria de saber mais detalhes do funcionamento do produto.

O diagrama de classe da bancada foi montado a partir da análise funcional onde se buscou identificar os objetos do produto e suas funcionalidades, de que modo estas se relacionam (por exemplo: herança), que tipo de ação (método) executa e com quais atributos (propriedades). Portanto, o diagrama de classe nos mostrou os aspectos estáticos e estruturais do sistema.

Convém destacar que a utilização das ferramentas de modelagem do sistema foram utilizadas aqui com o propósito de verificar sua aplicabilidade no processo de desenvolvimento do produto, não tendo a pretensão de descrever todo o sistema da bancada nem gerar os códigos de programação. Este processo em sua completude é bastante amplo e possivelmente poderá gerar outros trabalhos de dissertação.

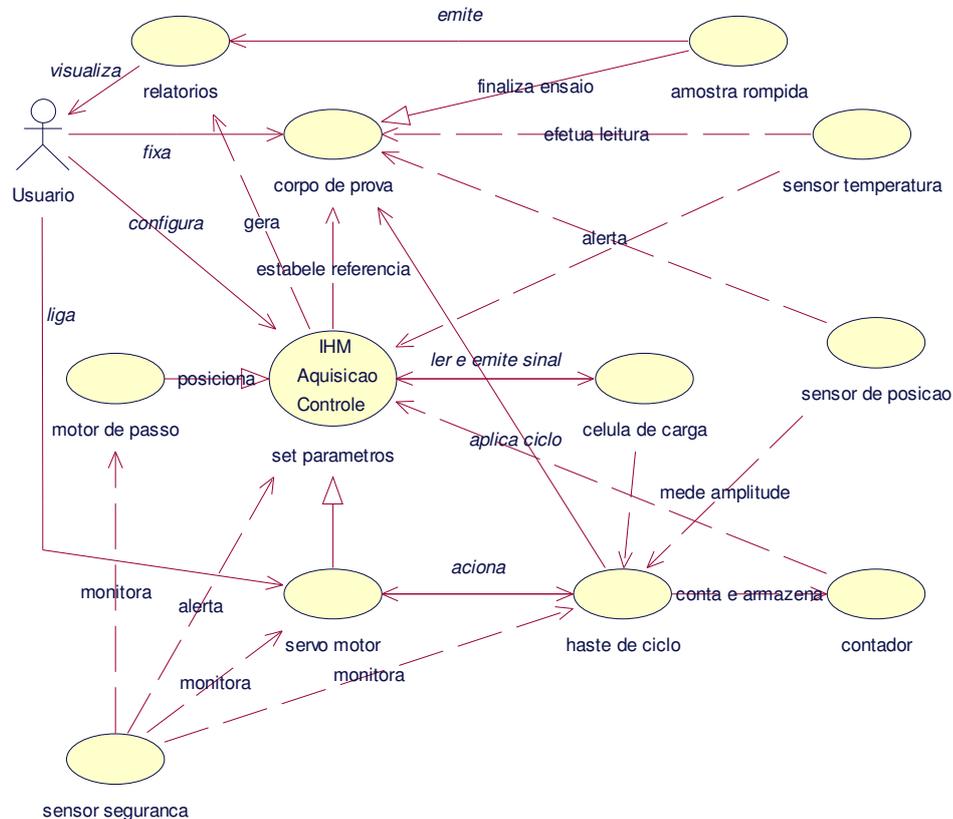


Figura 62 – Diagrama de Caso de uso (Bancada de ensaios).

O processo de construção dos diagramas foi feito juntamente com um componente da equipe de projeto, no qual ia esclarecendo dúvidas sobre as interfaces de relacionamento dos subsistemas, o que era fornecido na entrada, o que se esperava na saída e que tipo de sinais seria tratado. O diagrama de caso de uso parcial da bancada teve como finalidade principal mostrar esta inter-relação dos sistemas, ou seja, de que forma o sistema está interagindo com os usuários, que podem ser pessoas ou outros sistemas computacionais.

A figura 62 ilustra este processo que permitiu visualizar as múltiplas interações. Quanto mais detalhada forem descritas as relações, maior será a probabilidade do sistema em atender as diferentes requisições e consequentemente terá mais flexibilidade à implementação de mudanças.

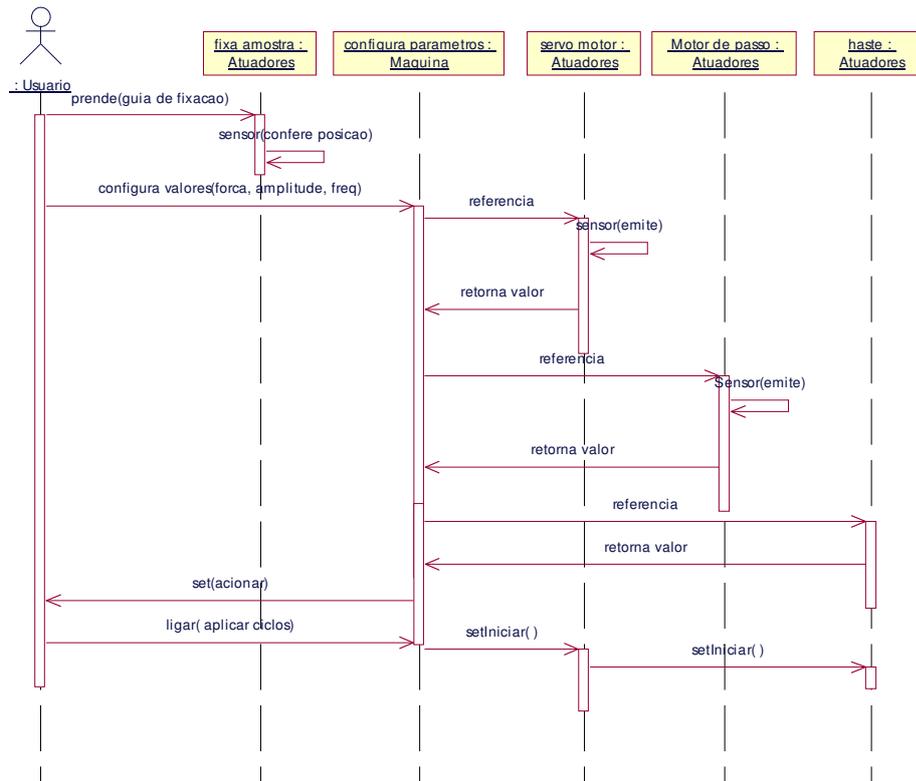


Figura 63 – Diagrama de seqüência (Bancada de ensaios).

A construção do diagrama de seqüência representou o desenvolvimento temporal do sistema, pois mapeou a seqüência de processos, mais especificamente, de mensagens passadas entre os objetos num programa de supervisão e controle do ensaio da bancada.

O diagrama de seqüência descreveu a maneira como os grupos de objetos colaboram em algum comportamento ao longo do tempo. No exemplo, foi registrado apenas o comportamento de um único caso de uso, portanto, quando existirem muitos ‘atores’, como no caso da bancada, será necessário construir vários diagramas de caso de uso. No exemplo da figura 63, verifica-se que ele exibiu os objetos e as mensagens passadas entre esses objetos. Esse diagrama é simples e lógico, a fim de tornar óbvios a seqüência e o fluxo de controle.

2.3.3 Projeto de modelagem do sistema de controle através das RdP

As redes de Petri como ferramenta matemática e gráfica permitiu uma visualização simultânea da estrutura e seu comportamento, mais especificamente os eventos, condições e suas relações. Ou seja, uma ocorrência de eventos que ocasionam as mudanças de estado do sistema, como por exemplo: quando o corpo de prova for rompido, o sistema deverá acionar algum dispositivo de segurança ou alarme etc., que por sua vez levará a máquina ao estado de repouso.

Ao se modelar o sistema através de uma rede de Petri criou-se necessariamente uma interpretação da Rede (RdP). Segundo Barros (1996), as redes de Petri não apenas fornecem uma representação da estrutura e funcionamento de um sistema, mas também permitem visualizar seu comportamento por meio do “movimento” das marcas capturando a dinâmica do sistema e tornando-as úteis nas simulações.

Para estabelecer a modelagem do subsistema de aplicação de ciclos da bancada para ensaios de fadiga utilizou-se as redes de Petri temporalizada por meio da ferramenta de

modelagem Visobjnet++, desenvolvida pela equipe de projetos da Ilmenau University of Technology (Department of Automatic Control and Systems Engineering – Germany).

Os passos metodológicos para implementar a rede de Petri do subsistema da bancada: “aplicar ciclos de flexão” foi: 1. Identificar os recursos e ações do subsistema, 2. Estabelecer uma ordem cronológica para as atividades principais, 3. Criar a rede com seqüência básica, 4. Estabelecer as atividades intermediárias a fim de fechar o ciclo, e, por fim, 5. Colocar as marcações (fichas) começando pela marcação inicial.

Estes passos foram construídos a partir da análise funcional da bancada justamente para verificar a aplicabilidade da ferramenta independente de se ter uma concepção física do produto, apenas tendo conhecimento da funcionalidade de cada subsistema. Para tanto foi escolhido a subsistema “aplicar ciclos de flexão”, conforme ilustra a figura 64.

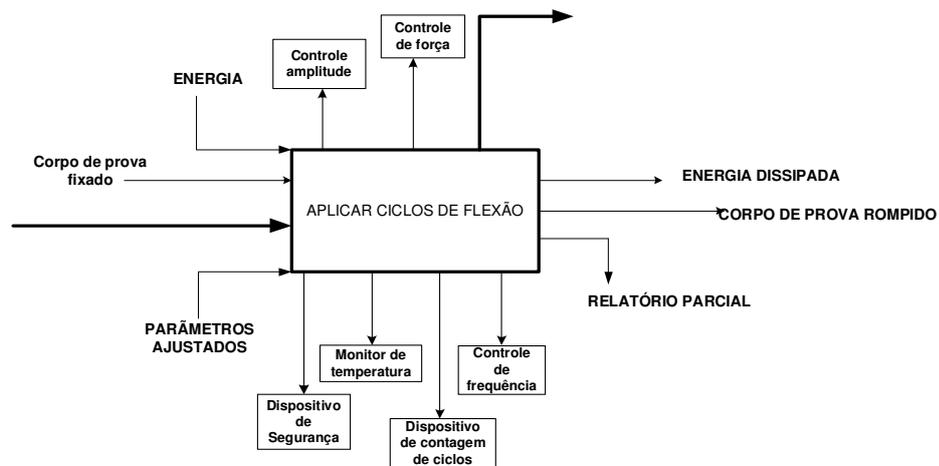


Figura 64 – Subsistema da bancada de ensaios: Aplicar ciclos de flexão.

O primeiro passo de identificação dos recursos e ações, com seus códigos, estão listadas na tabela 16, a seguir.

Tabela 16 – Rede de Petri: Identificação dos recursos e ações.

Código	Descrição – Recursos e ações	Obs.
C _{pf}	Corpo de prova fixado	
P _{aj}	Parâmetros ajustados	
B _a	Botão de acionamento	
R _s	Dispositivo de segurança	
R _t	Dispositivo de temperatura	
R _c	Dispositivo contador (+ buffer)	
R _a	Dispositivo controlador de amplitude	Motor de passo
R _f	Dispositivo aplicador de força (+ controle de força)	Motor de passo
R _{hz}	Dispositivo controlador de frequência	Servo motor
F _{cp}	Flexionador do corpo de prova	Haste
C _{pr}	Corpo de prova rompido	
R _{lt}	Relatórios	Monitor/IHM
B _d	Botão de desligamento	

O segundo passo consistiu na elaboração de uma ordem de atividades principais. Estas atividades seguiram o fluxo de entrada e saída do subsistema, onde se pode verificar que entram: energia, corpo de prova fixado mais parâmetros ajustados, e saem energia dissipada,

corpo de prova rompido mais relatórios parciais. Deste modo, têm-se as atividades listadas, com respectivos códigos, na tabela 17, a seguir.

Tabela 17 – Rede de Petri: Atividades principais ordenadas cronologicamente.

Código	Descrição – Atividades principais	Obs.
P1	C_{pf} e P_{aj} estão prontos	T1 e T2
P2	B_a liga o R_{hz}	T2 e T3
P3	R_{hz} aciona F_{cp}	T3 e T4
P4	F_{cp} flexiona C_{pf} e R_c no processo P11	T4 e T5
P5	C_{pf} rompe em C_{pr}	T5 e T6
P6	C_{pr} gera R_{lt}	T6 e T7
P7	C_{pr} aciona B_d que retorna a P1	T6 e T1

O terceiro passo consistiu em criar a rede de Petri com a seqüência de atividades principais, a qual é apresentada na figura 65.

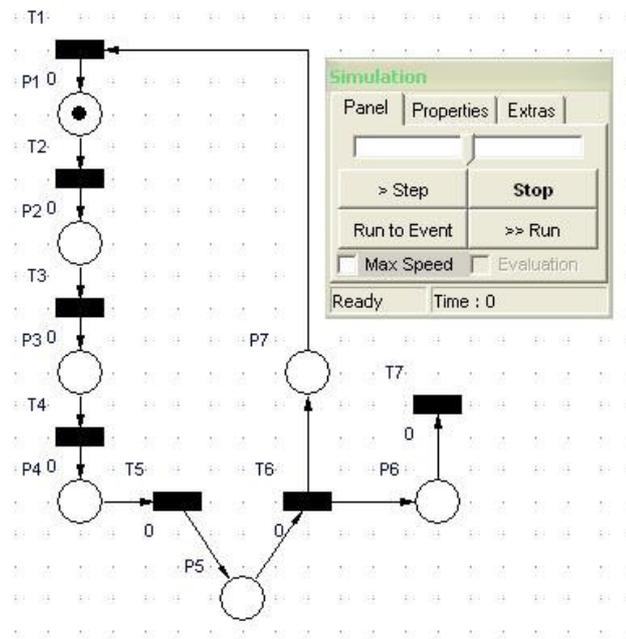


Figura 65 – Rede de Petri primária.

O quarto passo consistiu em estabelecer as ações intermediárias, a fim de fechar o ciclo de atividades do subsistema. Estas foram apresentadas na tabela 18, a seguir.

Tabela 18 – Rede de Petri: Atividades intermediárias.

Código	Descrição – Atividades intermediárias	Obs.
P8	C_{pf} aciona controle de amplitude R_a	T5 e T4
P9	C_{pf} aciona controle de força R_f	T5 e T4
P10	C_{pr} rompe e ativa R_s	T6 e T1
P11	F_{cp} ativa R_c	T4 e T6
P12	R_{lt} são mostrados no monitor ou IHM	T7

O quinto e último passo na construção da rede de Petri foi introduzir as marcações dos estados, representadas pelas fichas (círculos pretos), começando pela marcação inicial que

representa o estado inicial do sistema. Para tanto, foi considerado duas fichas no lugar P1 representando que o corpo de prova estava fixado e os parâmetros estavam ajustados para iniciar o ensaio. Uma ficha no lugar P8 e outra em P9 representando o controle da amplitude e força sobre o corpo de prova.

A rede de Petri foi simulada no programa Visobjnet++, sendo executado sem apresentar conflitos. Deste modo, pode-se verificar que é possível elaborar de maneira simultânea tanto o projeto físico quanto o de controle da bancada para ensaios de fadiga. A rede de Petri do subsistema “aplicar ciclos de flexão” é apresentada na figura 66, a seguir.

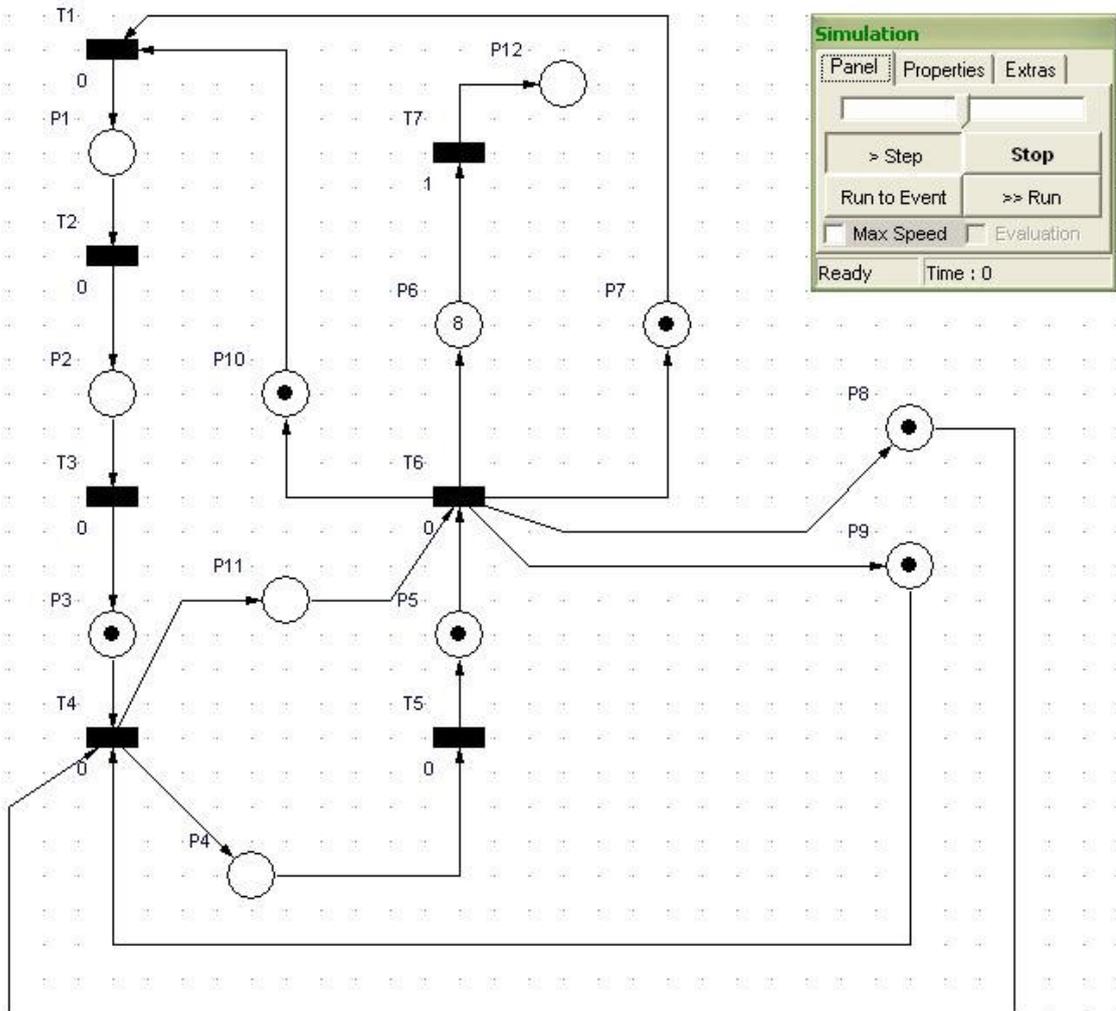


Figura 66 – Rede de Petri do subsistema da bancada: aplicar ciclos de flexão.

3. Considerações finais

Durante o desenvolvimento da bancada para ensaios de fadiga foram levadas em consideração as três fases do projeto consensual: informacional, conceitual e preliminar, observando a aplicação das ferramentas de desenvolvimento integrado em cada etapa do projeto.

As ferramentas exclusivas de cada domínio foram sendo empregadas a fim de validar sua aplicação no desenvolvimento de um produto de características multidisciplinar. No processo pôde-se perceber quanto a aplicação da matriz QFD aproxima os componentes da

equipe de projeto quando se estabelece as análises, gerando profícuos debates que resultaram nos requisitos de projeto.

O que ficou evidenciado por meio do uso da ferramenta síntese funcional é que esta técnica caracteriza-se como elemento agregador para o projeto de um produto mecatrônico. Ao mesmo tempo em que permitiu discriminar a ação de cada área envolvida dentro do projeto, quando ao extrair as subfunções viu-se a necessidade de um sistema de controle de velocidade ou um dispositivo que retornasse um valor de força ou tensão aplicada ao corpo de provas.

Nesta linha, pôde-se perceber a importância de gerenciar as informações com bastante cautela, pois, o acúmulo de conhecimento gerado numa etapa será a base para implementação subsequente. A experiência dos projetistas associada às intervenções dos especialistas de outras áreas também enriquece o processo e abre novas possibilidades de crescimento da equipe.

Ao se agregar um elemento novo que permita trocar informações sobre as concepções do projeto, estimula-se a criatividade e sedimentam-se novos conhecimentos importantes à formação, de modo a permitir a transdisciplinaridade do saber fazer.

No capítulo seguinte procura-se levantar outros aspectos da aplicação das ferramentas de desenvolvimento integrado de produtos por meio da visão dos demais componentes da equipe de projeto, de modo a complementar aqueles aqui descritos.