

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**METODOLOGIA DE PROJETO PARA SISTEMAS
MECÂNICOS DE PRECISÃO RECONFIGURÁVEIS**

MILTON PEREIRA

Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner

Co-orientador: Prof. Dr. Eng. Mec. Fernando Antônio Forcellini

Florianópolis, setembro de 2004.

**METODOLOGIA DE PROJETO PARA SISTEMAS MECÂNICOS DE
PRECISÃO RECONFIGURÁVEIS**

MILTON PEREIRA

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA,
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Prof. José A. Bellini da Cunha Neto, Dr.
Coordenador do PPGEM - UFSC

Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr. –Ing.
UFSC - Orientador

Fernando Antônio Forcellini, Dr. Eng.
UFSC – Co-orientador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr. –Ing.
UFSC - Orientador

Prof. Jaime Gilberto Duduch, Ph. D. - Relator
Escola de Engenharia de São Carlos/USP

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.
UFSC

Prof. Acires Dias, Dr. Eng.
UFSC

Prof. André Roberto de Souza, Dr. Eng.
CEFET - SC

Prof. Rodrigo Lima Stoeterau, Dr. Eng.
UFSC

BIOGRAFIA DO AUTOR

O engenheiro Milton Pereira nasceu em 12 de abril de 1972, na cidade de Florianópolis, estado de Santa Catarina, filho de Milton Ascendino Pereira e Adélia Araci Machado Pereira.

Cursou o segundo grau na Escola Técnica Federal de Santa Catarina, Florianópolis, tendo se formado técnico em mecânica, especialização em manutenção, no ano de 1989.

Em 1991 ingressou no curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, tendo concluído a Graduação ao final de 1995. No final do curso, realizou estágio obrigatório na empresa EMBRACO, na equipe de desenvolvimento de compressores rotativos.

Em 1996 ingressou no mestrado do Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), nas áreas de fabricação e projeto de máquinas, defendendo a dissertação intitulada “Desenvolvimento de uma Mesa de Retificação para a Usinagem de Sapatas Planas Circulares para Mancais Aerostáticos”, obtendo assim o título de Mestre em Engenharia Mecânica em fevereiro de 1998.

Foi Engenheiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Laboratório de Materiais da UFSC até novembro de 1999, tendo desenvolvido pesquisa nas áreas de projeto e integração de sistemas mecânicos de precisão.

Ingressou no doutorado do Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC em setembro de 1999. Durante o doutorado, realizou duas viagens de estudo a Technische Universität Ilmenau, na Alemanha, nos períodos de novembro de 1999 a fevereiro de 2000 e de dezembro de 2002 a fevereiro de 2003.

Em março de 2000 passou a fazer parte da equipe de pesquisadores do Laboratório de Metrologia da UFSC, atuando no desenvolvimento de sistemas ópticos de medição e dando suporte ao projeto mecânico do projeto ROBOTURB. A partir de março de 2003, passou a gerenciar toda a equipe do ROBOTURB no âmbito da UFSC.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Walter Weingaertner, por sempre ter dado suporte e visão em todos os passos que dei na longa caminhada dentro da UFSC, desde os tempos de calouro, à conclusão do doutorado. Tenho orgulho de ter trabalhado tanto tempo ao seu lado.

Ao amigo Rodrigo Stoeterau, por todos os ensinamentos que transmitiu e pela fundamental ajuda na reta fina deste trabalho.

Ao Professor Fernando Forcellini, por ter me mostrado a luz em vários momentos importantes desse trabalho. E também por ter me possibilitado realizar as viagens de estudo à Alemanha, períodos onde o trabalho sofreu um grande amadurecimento.

Ao Professor Günther Höehne, da Universidade Técnica de Ilmenau e toda a sua equipe, pela acolhida e por terem dado suporte durante as viagens realizadas.

Ao Professor Armando Albertazzi, por ter dado todo o apoio para que eu continuasse o desenvolvimento de minha tese, mesmo estado trabalhando ao seu lado na condução de pesquisas em outras áreas.

Ao LACTEC, em especial ao amigo Walter Kapp, gerente do projeto ROBOTURB, que permitiram que este doutorado fosse desenvolvido em paralelo à condução do projeto ROBOTURB, para o qual fui contratado para desenvolver tarefas específicas.

A todos os estagiários e bolsistas com os quais tive o prazer de trabalhar e passar alguma experiência, no LMP, no Labmat e no Labmetro.

A todos os companheiros e amigos nos diversos laboratórios, que sempre se colocaram à disposição para quaisquer necessidades durante a tese.

À minha noiva, Gisele, por todo o amor, apoio e companheirismo durante todos os momentos desta difícil caminhada.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Proposições e objetivos do trabalho	5
1.2 Relevância, utilidade e inovação	7
1.3 Estrutura do trabalho	8
2 METODOLOGIA DE PROJETO DE PRODUTOS MODULARES	9
2.1 O processo de projeto	9
2.2 Ferramentas de auxílio ao processo de projeto	16
2.3 Sistemas modulares	19
2.3.1 Benefícios do uso da modularidade nos projetos	22
2.3.2 Características de sistemas modulares	25
2.3.3 Metodologia de projeto de sistemas modulares	28
2.4 Considerações finais	34
3 SISTEMAS MECÂNICOS DE PRECISÃO RECONFIGURÁVEIS	35
3.1 Sistemas mecânicos de precisão	35
3.2 Sistemas de manufatura reconfiguráveis – RMS	39
3.2.1 Tecnologias básicas para a reconfiguração	42
3.2.2 Características requeridas para sistemas reconfiguráveis	43
3.2.3 Diretrizes de projeto em nível de sistema em RMS	44
3.2.4 Máquinas-ferramentas reconfiguráveis	46
3.2.5 Metodologia de projeto para máquinas-ferramentas reconfiguráveis	50
3.3 Abordagem proposta para o projeto de sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis	54
4 METODOLOGIA DE PROJETO PARA SISTEMAS MECÂNICOS DE PRECISÃO RECONFIGURÁVEIS	57
4.1 Decomposição de sistemas mecânicos de precisão	57
4.2 Caracterização de módulos e suas interfaces	65
4.3 Montagem da biblioteca de módulos	67

4.4 Recursos básicos da metodologia proposta	71
4.5 Metodologia de projeto para sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis	73
4.6 Considerações finais	87
5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE PROJETO PARA SISTEMAS MECÂNICOS DE PRECISÃO RECONFIGURÁVEIS	88
5.1 Desenvolvimento de um esclerômetro	88
5.1.1 ETAPA 1 – Definição da tarefa a ser cumprida pelo sistema	89
5.1.2 ETAPA 2 – Avaliação cinemática	91
5.1.3 ETAPA 3 – Identificação das necessidades de cada módulo	93
5.1.4 ETAPA 4 – Seleção dos módulos	93
5.1.5 ETAPA 5 – Avaliação das interfaces	97
5.1.6 ETAPA 6 – Montagem da concepção	100
5.1.7 ETAPA 7 – Execução da tarefa	102
5.2 Desenvolvimento de um torno de ultraprecisão para usinagem de espelhos cônicos	103
5.2.1 ETAPA 1 – Definição da tarefa a ser cumprida pelo sistema	104
5.2.2 ETAPA 2 – Avaliação cinemática	105
5.2.3 ETAPA 3 – Identificação das necessidades de cada módulo	106
5.2.4 ETAPA 4 – Seleção dos módulos	108
5.2.5 ETAPA 5 – Avaliação das interfaces	116
5.2.6 ETAPA 6 – Montagem da concepção	118
5.2.7 ETAPA 7 – Execução da tarefa	120
5.2.8 Outras aplicações do torno de ultraprecisão	121
5.3 Considerações finais	122
6 CONCLUSÕES	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
ANEXO 1	139
ANEXO 2	140

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Torno de ultraprecisão para usinagem de espelhos cilíndricos	6
Figura 2.1 - Efeito de escala de custos de mudanças do produto nas diversas fases de desenvolvimento (Huthwaite & Schneberger, 1992)	10
Figura 2.2 – Visão geral do processo de desenvolvimento de produtos conforme Wheelright e Clark (1992)	12
Figura 2.3 – Metodologia de projeto segundo Pahl e Beitz (1996)	14
Figura 2.4 – Modelo de uma cozinha modular (Pizzato, 1998)	20
Figura 2.5 – Passos da metodologia MFD de Erixon (1996)	28
Figura 2.6 – Fluxo geral da metodologia de projeto de sistemas modulares (Maribondo, 2000)	30
Figura 2.7 – Detalhamento do projeto informacional (Maribondo, 2000)	31
Figura 2.8 – Metodologia de projeto de produtos modulares segundo Scalice (2003)	33
Figura 3.1 – Classes de sistemas de manufatura (Koren 1999)	42
Figura 3.2 – Obtenção de uma máquina-ferramenta a partir de módulos (Koren 1999) ...	47
Figura 3.3 – Vista superior de uma máquina-ferramenta com múltiplos cabeçotes ativos	48
Figura 3.4 – Metodologia para o projeto cinemático de RMT (Landers e Min, 2001)	51
Figura 3.5 – Exemplos de aplicação da teoria de gráficos (Moon, 2000)	52
Figura 3.6 – Distribuição das funções para compor uma máquina-ferramenta	53
Figura 3.7 – Seleção de configuração a partir de módulos parametrizados (Moon, 2000)	54
Figura 4.1 – Formulação da função global do sistema (Forcellini, 2004)	58
Figura 4.2 – Representação esquemática de uma máquina-ferramenta de ultraprecisão ..	63
Figura 4.3 – Modelo esquemático de uma máquina genérica	64
Figura 4.4 – Elemento da biblioteca de módulos parametrizados segundo Moon (2000)	68
Figura 4.5 – Ficha de identificação de um módulo	70
Figura 4.6 – Visão geral da metodologia de projeto de sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis	73
Figura 4.7 – Detalhamento da etapa 1 da metodologia	74
Figura 4.8 – Detalhamento da etapa 2 da metodologia	77
Figura 4.9 – Detalhamento da etapa 3 da metodologia	79
Figura 4.10 – Detalhamento da etapa 4 da metodologia	80
Figura 4.11 – Detalhamento da etapa 5 da metodologia	82

Figura 4.12 – Matriz de avaliação das interfaces para uma máquina qualquer	83
Figura 4.13 – Detalhamento da etapa 6 da metodologia	85
Figura 4.14 – Detalhamento da etapa 7 da metodologia	86
Figura 4.15 – Bases de sustentação da metodologia de projeto para sistemas de precisão reconfiguráveis	87
Figura 5.1 – Função global do esclerômetro	90
Figura 5.2 – Esquema de um ensaio esclerométrico	91
Figura 5.3 – Disposição esquemática das funções do esclerômetro	92
Figura 5.4 – Penetrador de diamante para ensaio de dureza	95
Figura 5.5 – Sensor piezelétrico para medição de força	95
Figura 5.6 – Sensor de emissão acústica	95
Figura 5.7 – Sistema de visão do esclerômetro	96
Figura 5.8 – Sistema de fixação dos corpos de prova	96
Figura 5.9 – Matriz de avaliação das interfaces no esclerômetro	98
Figura 5.10 – Módulo auxiliar de suporte entre a guia Z e a guia Y	99
Figura 5.11 – Montagem entre a Guia Z, os sensores de força e o indentador	99
Figura 5.12 – Montagem virtual do esclerômetro	100
Figura 5.13 – Vista frontal do esclerômetro	100
Figura 5.14 – Vista superior do esclerômetro	101
Figura 5.15 – Tela principal do controle do esclerômetro	101
Figura 5.16 – Ensaio esclerométrico num corpo de prova cerâmico	102
Figura 5.17 – Topografia do risco gerado	102
Figura 5.18 – Soluções cinemáticas para a geração de um cone no torneamento	105
Figura 5.19 – Detalhe da fixação da ferramenta sobre o bloco padrão	112
Figura 5.20 – Sistema porta-peça	113
Figura 5.21 – Módulos de controle do torno de ultraprecisão	114
Figura 5.22 – Controle de temperatura e umidade no ambiente de usinagem	114
Figura 5.23 – Bico injetor junto à ferramenta de corte	115
Figura 5.24 – Matriz de avaliação das interfaces no torno de ultraprecisão	117
Figura 5.25 – Mesa divisora entre a base Moore e o cabeçote Kugler	118
Figura 5.26 – Montagem virtual do torno de ultraprecisão	118
Figura 5.27 – Configuração final do torno de ultraprecisão	119
Figura 5.28 – Espelho plano gerado nos ensaios preliminares de usinagem	120
Figura 5.29 – Espelhos cônicos produzidos pelo torno de ultraprecisão	120
Figura 5.30 – Outros componentes produzidos no torno de ultraprecisão	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Fases da metodologia de projeto segundo diversos autores (Romano, 2003)	13
Tabela 2.2 – Família de tornos CNC ROMI Galaxy (2004)	21
Tabela 2.3 – Diretrizes de modularização segundo Erixon (1996)	29
Tabela 3.1 - Divisão da usinagem segundo a precisão atingível (Stoeterau, 1999)	38
Tabela 3.2 - Tolerâncias em componentes de produtos atuais (Stoeterau, 1999)	39
Tabela 3.3 - Comparação entre DML e FMS (Koren, 1999)	40
Tabela 3.4 – RMS combina características dos sistemas dedicados e flexíveis	41
Tabela 4.1 – Características estáticas	65
Tabela 4.2 – Características dinâmicas	66
Tabela 4.3 – Características cinemáticas	66
Tabela 4.4 – Características geométricas	66
Tabela 4.5 – Comportamento térmico	67
Tabela 4.6 – Características do controle de movimentação, posicionamento e das demais funções do sistema	67
Tabela 4.7 – Relação de documentos a serem empregados na metodologia	71
Tabela 4.8 – Relação de ferramentas a serem empregados na metodologia	72
Tabela 4.9 - Componentes e suas tolerâncias na usinagem de ultraprecisão, conforme máquina-ferramenta desenvolvida por Stoeterau (1999)	76
Tabela 4.10 - Configurações cinemáticas aplicadas alguns tipos de componentes, Stoeterau (1999)	78
Tabela 5.1 – Módulos básicos necessários para compor o esclerômetro	92
Tabela 5.2 – Requisitos para cada módulo que irá compor o esclerômetro	94
Tabela 5.3 – Lista de módulos selecionados para o esclerômetro	97
Tabela 5.4 – Requisitos das interfaces dos módulos selecionados	97
Tabela 5.5 – Especificações dos espelhos	104
Tabela 5.6 – Módulos básicos necessários para compor o torno de ultraprecisão com mesa XY	106
Tabela 5.7 – Módulos básicos necessários para compor o torno de ultraprecisão com cabeçote com posicionamento angular	106
Tabela 5.8 – Requisitos dos módulos para a máquina com mesa XY	107
Tabela 5.9 – Requisitos dos módulos para a máquina com cabeçote com	

posicionamento angular	108
Tabela 5.10 – Comparação entre as bases disponíveis	109
Tabela 5.11– Comparação entre as guias disponíveis	110
Tabela 5.12 – Comparação entre os cabeçotes disponíveis	111
Tabela 5.13 – Lista de módulos selecionados para o torno de ultraprecisão	116
Tabela 5.14 – Requisitos das interfaces para o torno de ultraprecisão	116

LISTA DE ABREVIATURAS

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
CVMC	<i>Committee on Visionary Manufacturing Challenges</i>
DFMA	<i>Design for Manufacturing and Assembly</i>
DFX	<i>Design for X</i>
DML	<i>Dedicated Manufacturing Lines</i>
ER	Esclerômetro Reconfigurável
FMS	<i>Flexible Manufacturing Systems</i>
HTM	<i>Homogeneous Transformation Matrix</i>
LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão
MAVAL	Matriz de Avaliação
MFD	<i>Modular Function Deployment</i>
MIM	Matriz de Identificação de Módulos
PSI	Processo de Seleção de Interfaces
QFD	<i>Quality Function Deployment</i>
RMS	<i>Reconfigurable Manufacturing Systems</i>
RMT	Reconfigurable Machine Tools
TUR	Torno de Ultraprecisão Reconfigurável
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

A Engenharia de Precisão é um campo pouco explorado no Brasil devido às dificuldades financeiras para conduzir pesquisas nessa área. O maior desafio para os pesquisadores é a obtenção de resultados satisfatórios com o emprego de poucos recursos. Por meio da apresentação de uma metodologia de projeto baseada em sistemas reconfiguráveis, é possível gerar soluções para o projeto de sistemas mecânicos de precisão a partir de módulos básicos. Esses módulos são obtidos a partir de equipamentos já existentes ou podem ser adquiridos ou mesmo projetados, dependendo dos requisitos identificados para a aplicação a que se destina. Os módulos, muitas vezes, são obtidos a partir de componentes que não foram concebidos inicialmente para serem aplicados como partes modulares de um sistema. Por isto, um grande esforço é feito no sentido de garantir a qualificação adequada das interfaces entre os vários módulos, no que diz respeito à condição geométrica de integração e também no controle de efeitos incidentais entre os módulos. A garantia de qualidade final do sistema configurado provém da qualidade individual de cada módulo que o compõe. Assim, é fundamental que cada módulo do sistema possua todas as suas características conhecidas, permitindo que se possa inferir sobre as características finais do sistema montado. Cada módulo é então descrito com detalhes e adicionado a uma biblioteca de módulos. A metodologia de projeto para sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis permite que sistemas mecânicos de precisão sejam projetados de forma clara e objetiva. A metodologia também agrega uma correta documentação de todas as etapas de desenvolvimento do projeto. Além da metodologia, este trabalho apresenta um apanhado dos principais princípios de projeto de sistemas de precisão, fornecendo um material básico de consulta fundamental para os projetistas desta área. A aplicação da metodologia foi testada em dois casos distintos, o desenvolvimento de um esclerômetro e o desenvolvimento de um torno de ultraprecisão para usinagem de espelhos cônicos metálicos, ambos apresentando os resultados esperados, identificados nas fases iniciais do processo metodológico.

Palavras-chave: Metodologia de projeto; Engenharia de precisão; Sistemas reconfiguráveis; Projeto modular; Mecânica de precisão.

ABSTRACT

Precision Engineering is a work field not too much researched in Brazil due to financial difficulties to conduct these researches. The bigger challenge to researchers is to obtain satisfactory results with low resources. Presenting a design methodology based on reconfigurable systems enable the generation of precision mechanics systems design solutions by using basic modules. These modules can be obtained by using existing unused equipments or by buying or designing new components, depending on the set of identified specifications to the application needed. Mostly, the existing unused equipments were not designed to be applied as modular components to a system. Thus, a great effort is been done to assure a correct qualification in the interface connections between modules, related to geometric conditions for assembling and controlling incidental effects between modules. The final quality in the work system comes from individual quality of each module composing this system. Thus, it's very important to well know all the modules characteristics, which allows the designer to predict the final assembled system characteristics. Each module must be described in details and added to a modules library. The design methodology for reconfigurable precision mechanical systems allows these precision mechanical systems to be clearly designed and in an objective way. This methodology also induces a correct documentation in all steps during the design development. This work also presents the main design principles related to precision systems, giving an important basic consulting data to designers intending to work on this area. The methodology was applied in two cases: the development of a sclerometer and the development of an ultraprecision lathe for metallic conical mirrors machining. Both cases reached the results identified during the earlier methodological process phases.

Key words: Design Methodology; Precision Engineering; Reconfigurable Systems; Modular Design; Precision Mechanics.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Historicamente, os avanços científicos e tecnológicos possuem uma dependência muito maior de forças políticas do que econômicas. Um exemplo clássico disso pode ser visto em Arquimedes, que inventou o parafuso a partir de uma solicitação do seu Rei, que queria uma solução para elevar navios de guerra em construção. Um outro exemplo é o avião, que teve sua evolução mais drástica a partir do momento que os militares anteciparam que o mesmo seria uma máquina de guerra eficiente, antes mesmo de ser observado seu valor como meio de transporte.

De forma similar, o desenvolvimento de instrumentos e máquinas de precisão foi intensificado pelas crescentes necessidades no uso militar. Nas últimas décadas, o desenvolvimento de equipamentos militares exigiu o desenvolvimento paralelo de meios de produção de componentes com formas complexas e elevadas exigências técnicas, como exatidão nas suas dimensões e qualidade da superfície, componentes eletrônicos miniaturizados e componentes ópticos de alta qualidade com formas antes nunca imaginadas como possíveis de serem fabricadas.

O desenvolvimento de máquinas-ferramenta controladas numericamente satisfaz algumas necessidades na fabricação de formas complexas. Os reatores de deposição de vapor satisfizeram algumas necessidades de miniaturização. As máquinas de torneamento que utilizam diamante como ferramenta de corte, satisfizeram algumas necessidades na fabricação de componentes ópticos. A maioria desses desenvolvimentos foi feita nos EUA e foram resultados de financiamentos para ações estratégicas do governo.

Com o fim da Guerra Fria, o desenvolvimento na área de engenharia de precisão sofreu um decréscimo de investimento, limitando-se às necessidades de mercado e à busca por resultados economicamente viáveis nas pesquisas (McClure, 1994).

Assim, a continuidade das pesquisas em Engenharia de Precisão passa a depender de demandas comerciais, a partir de resultados de análises de custo-benefício das mesmas.

A determinação apurada do custo real da “precisão” é algo muito difícil e desafiador.

De uma forma geral, existe um grande preconceito com relação aos desenvolvimentos na Engenharia de Precisão, taxados como “muito caros”. Mas se forem analisados os benefícios que trazem, ver-se-á que os custos desses desenvolvimentos são, em grande parte, justificados.

Como exemplo, nas últimas quatro décadas viram-se os custos de fabricação de componentes ópticos reduzidos, em alguns casos, em até 90%, como resultado na mudança do processo de fabricação empregado. Um caso frequentemente citado é o dos componentes reflexivos metálicos, nos quais o torneamento por diamante substituiu o polimento abrasivo. Componentes ópticos fabricados por lapidação e polimento são restritos a ópticas “esféricas”, exigindo montagens complexas para atingir resultados específicos. Além disto o polimento abrasivo exige sucessivas etapas e um rígido controle de qualidade intermediário na confecção dos componentes. No torneamento controlado por computador, é possível trabalhar com ópticas asféricas, resultando em conjuntos ópticos com menos lentes. Em uma etapa única se alcançam resultados muito melhores, mais repetitivos e com um menor tempo de processo envolvido, resultando num custo menor de cada componente fabricado aliado à grande flexibilidade de formas possíveis de serem obtidas.

O custo da “precisão” não diz respeito somente ao custo de fabricação de um componente único. Há muitos outros exemplos de melhoramentos na precisão resultando numa redução significativa dos custos de um produto (McKeown, 1987). Por exemplo, muitos componentes incluídos no projeto de um sistema para compensar a falta de qualidade na fabricação de componentes críticos desse sistema poderão agora ser eliminados, como no caso da produção do Boeing 777, que reduziu uma tonelada de material da concepção final do avião somente eliminando esses componentes excedentes a partir da melhora da qualidade dos demais componentes críticos do avião (McClure, 1994).

Um outro fator fundamental de custo que raramente é levado em consideração nas discussões sobre “precisão” é o enorme custo que se tem por não ser capaz de produzir uma alta qualidade que seja fundamental nos componentes vitais de um sistema ou do próprio produto, resultando num produto final aquém das características funcionais que poderia possuir.

Se uma empresa sabe o que gostaria de fazer, mas não sabe como fazê-lo, e ainda uma outra descobre como fazê-lo e, conseqüentemente, domina primeiro o mercado, seu custo devido à perda que teve é muito grande. Isto é, se o mercado apresenta a demanda por um

produto inovador, o primeiro que conseguir lançar este produto dominará este mercado, e os demais geralmente amargam o prejuízo.

Essa é a situação de vários grupos de pesquisa no Brasil com relação à competitividade internacional. A falta de acesso aos meios de fabricação avançada limita as pesquisas, exigindo que os componentes vitais das pesquisas tenham que ser adquiridos no mercado internacional, o que demanda muito tempo e onde muitas vezes se depara com restrições à utilização de certas tecnologias ou mesmo uma proposital inviabilidade econômica para a compra de equipamentos ou componentes especializados.

Se os principais grupos de pesquisa na área de Engenharia de Precisão em nível mundial já estão se deparando com dificuldades financeiras para dar continuidade às suas linhas de pesquisa, no Brasil a situação se torna ainda mais crítica devido aos órgãos de fomento à pesquisa não possuírem um planejamento de investimentos de longo prazo e condições de viabilizar todas as pesquisas em andamento no país.

Assim, mais do que a obtenção de resultados técnicos apurados, o grande desafio da pesquisa na área de Engenharia de Precisão no Brasil está na capacidade de se desenvolver equipamentos de altíssima qualidade a partir de recursos limitados ou até escassos.

Com relação ao futuro, projeções de como será a Engenharia de Manufatura daqui a 20 anos (Committee on Visionary Manufacturing Challenges, 1998) mostram que uma das frentes de trabalho a serem desenvolvidas diz respeito ao desenvolvimento de tecnologias inovadoras para os processos de fabricação, que modificarão tanto o foco quanto a escala de manufatura.

Com o desenvolvimento de novos equipamentos e novas tecnologias, a tendência de produção de componentes em escalas cada vez menores continuará, exigindo muita flexibilidade desses equipamentos para poderem atender às mudanças necessárias para otimizar o processo de fabricação das diferentes famílias de componentes a serem produzidos. A nanotecnologia passará a ocupar um espaço maior na indústria de manufatura, saindo dos laboratórios de pesquisa para as grandes empresas. O trabalho na escala molecular e a precisão funcional das estruturas serão fundamentais no desenvolvimento de microcomponentes, como sensores, elementos computacionais, robôs medicinais, e outros aparatos de escala macroscópica, montados a partir de módulos de construção fundamentais.

A manufatura também exercerá um importante papel na biotecnologia, combinando também a biologia e a química, criando processos de fabricação bioderivados ou biosintéticos que ocuparão um importante papel na manufatura do futuro.

Outra grande preocupação será com relação aos processos de fabricação com mínimo desperdício, motivando o projeto de componentes e equipamentos recicláveis e reutilizáveis, o que garante benefícios para o meio ambiente.

Um dos grandes desafios da engenharia de manufatura para os próximos anos é a criação de processos inovadores e produtos com foco na diminuição da escala dimensional, conforme exposto pelo *Committee on Visionary Manufacturing Challenges* em 1998 (CVMC).

Associado a isso está a capacidade que as empresas deverão possuir de criar e produzir novos produtos rapidamente, atendendo a todas as novas exigências de qualidade dos consumidores. Com isso, a flexibilidade associada à qualidade dos seus equipamentos será a chave do seu sucesso.

As dez tecnologias e pesquisas básicas listadas pelo CVMC (1998) como prioritárias para se alcançar esse patamar na engenharia de manufatura são:

- Sistemas, processos e equipamentos integrados adaptáveis, para que possam ser rapidamente reconfigurados;
- Metodologias de projeto de produtos e processos que atendam a uma ampla faixa de requisitos de produtos;
- Processos de fabricação que minimizem o desperdício na produção e que reduzam o consumo de energia;
- Processos inovativos de projeto e produção de novos materiais e componentes;
- Emprego da biotecnologia na fabricação;
- Síntese, modelagem e simulação de sistemas para todas as operações de fabricação;
- Tecnologias que possam converter informações em conhecimento para tomadas de decisões efetivas nos projetos;
- Melhoramento da interface homem-máquina;
- Metodologias de educação e treinamento que permitam uma rápida assimilação do conhecimento; e
- Desenvolvimento de softwares para sistemas inteligentes.

Destas tecnologias, “sistemas, processos e equipamentos integrados adaptáveis, que possam ser rapidamente reconfigurados para uma ampla faixa de requisitos de produtos e

sistemas dos clientes” são uma tecnologia prioritária. Componentes de Hardware, Software, sub-processos e subsistemas terão que ser adaptados e acoplados de maneira fácil, de modo a comporem sistemas e processos de alto nível que atendam a todos os requisitos dos novos produtos. As pesquisas nesse sentido deverão abranger cinco áreas: (1) processos e ferramentas; (2) fundamentação teórica; (3) novos processos de fabricação; (4) modelamento e simulação; e (5) conceitos de comunicação e controle (CVMC, 1998).

Uma outra tecnologia dada como prioritária diz respeito às metodologias de projeto de produtos e processos que atendam a uma ampla faixa de requisitos de produtos. As metodologias de projeto modular e a modularização de ferramentas poderão ser utilizadas para rapidamente atender as mudanças de requisitos de processos e produtos dos clientes, bem como a flexibilização de equipamentos para que atendam às mais variadas solicitações de qualidade de famílias ou lotes de componentes. Os métodos e ferramentas deverão suprir as necessidades de fabricação de famílias de produtos e processos definidas de forma paramétrica ou por escala.

As metodologias de projeto também deverão considerar conceitos e processos para uma grande variedade de matérias, formas construtivas, condições ambientais e requisitos funcionais únicos, que devem se considerados como plataformas, nas quais os projetos podem ser compilados a partir de componentes modulares e projetos de subsistemas ou sintetizados a partir de projetos genéricos.

Por fim, as metodologias de projeto deverão considerar reconfigurações de produtos e processos, projetos simultâneos de produtos e processos de fabricação, otimização dos custos do ciclo de vida do produto, montagem modular, processos de fabricação robustos, flexibilidade de produção, e os objetivos sociais e relacionados ao meio ambiente.

Este trabalho traz uma proposta de metodologia de projeto para sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis, adequando-se perfeitamente a essas projeções de tecnologias para o futuro, apresentadas pelo CVMC (1998).

1.1 – Proposições e objetivos do trabalho

Desde 1986, Weingaertner (1992) atua no desenvolvimento de sistemas e máquinas de alta e ultraprecisão. O seu desenvolvimento pioneiro foi um torno de ultraprecisão para a usinagem de fotorreceptores cilíndricos para máquinas fotocopadoras, conforme mostra a figura 1.1. A qualidade espelhada da superfície usinada exigida para esses cilindros é

impossível de ser alcançada a partir de máquinas-ferramenta convencionais. Por isto, a necessidade de ter iniciado um profundo estudo na nova área de pesquisa.

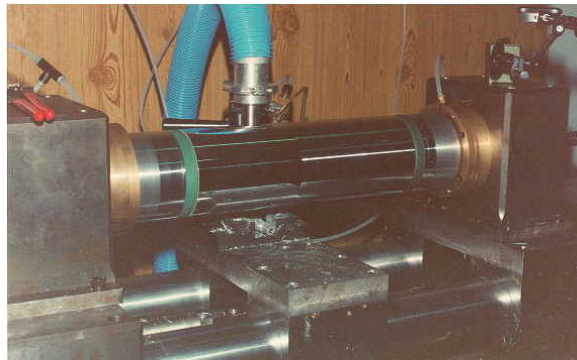


Figura 1.1 – Torno de ultraprecisão para usinagem de espelhos cilíndricos.

A partir do sucesso alcançado nesse desenvolvimento, o Laboratório de Mecânica de Precisão da UFSC passou a ser uma das referências da área no Brasil. Esse destaque despertou o interesse de diversos segmentos da indústria e de pesquisa para, em conjunto, desenvolver novos equipamentos, componentes ou mesmo promover melhorias em equipamentos existentes a partir dos fundamentos da nova linha de pesquisa do laboratório.

Um dos componentes vitais para a altíssima qualidade alcançada na geração das trajetórias desta e de outras máquinas desenvolvidas são os mancais aerostáticos. Esses mancais possuem um preço no mercado internacional muito elevado. Desta forma, foi necessário desenvolver técnicas de fabricação que garantissem a qualidade na produção desses componentes. Vários trabalhos foram desenvolvidos nesse sentido, sempre resultando em mancais aerostáticos com boa qualidade e baixo custo de fabricação, como os trabalhos de Stoeterau (1992), Rocha (1993), Oliveira (1994), Müller (1994) e Pereira (1998).

A partir do domínio da técnica de fabricação e do manuseio dos mancais aerostáticos, iniciaram-se pesquisas no intuito de transformar esses mancais individuais em conjuntos acionados prontos para equiparem máquinas, como visto nos trabalhos de Vasquez (1994), Stoeterau (1999) e de Jesus (1999). Em paralelo, estudos relacionados ao processo de usinagem de ultraprecisão com ferramentas de geometria definida deu base à formação de uma equipe capacitada para produzir componentes através desse processo, como mostrado nos trabalhos desenvolvidos por Schroeter (1997) e Santos (1998).

O crescimento do grupo de pesquisa esbarrou num problema comum entre grupos que desenvolvem tecnologia desta natureza, que é a falta de recursos. Sem recursos, não é possível

equipar adequadamente o laboratório e também não se consegue comprar componentes de alta precisão, vitais para o desenvolvimento de novos sistemas mecânicos de precisão.

Para explorar ao máximo a capacidade de uma série de componentes e sistemas de precisão disponíveis no laboratório, que são fruto desses diversos trabalhos desenvolvidos, tem-se por objetivo geral desenvolver uma metodologia de projeto para sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis que considere cada um desses sistemas como um módulo independente que pode ser agrupado a outros módulos, formando diferentes sistemas mais complexos, e que são destinados a cumprirem atividades específicas. Esta forma de composição de sistemas caracteriza a formação de sistemas reconfiguráveis.

Com essa abordagem, a partir de um conjunto apropriado de módulos funcionais, é possível formular várias concepções de equipamentos diferentes e otimizados para cada aplicação a que se destina, resultando num baixo custo aplicado a cada solução proposta.

O desenvolvimento de sistemas mecânicos de precisão exige o conhecimento de princípios de engenharia de precisão que normalmente passam despercebidos em sistemas convencionais. Desta forma, é necessário fazer um apanhado desses princípios para dar um embasamento adequado ao desenvolvimento dos sistemas.

O objetivo específico desse trabalho consiste no desenvolvimento de uma metodologia que visa sistematizar o processo de seleção de concepções para o desenvolvimento de sistemas mecânicos de precisão e ultraprecisão reconfiguráveis, utilizando ferramentas de projeto modular e a abordagem de sistemas de manufatura reconfiguráveis.

1.2 – Relevância, utilidade e inovação

Desde o início do desenvolvimento de produtos fabricados em série, a modularidade está presente em maior ou menor escala nos produtos fabricados. Na maioria dos projetos voltados para sistemas modulares, como por exemplo na indústria automobilística, os componentes do sistema são projetados para a reconfiguração, isto é, possuem interfaces próprias destinadas à composição de diferentes produtos a partir de simples substituições destes componentes.

A reconfiguração de sistemas a partir de módulos já disponíveis, obtidos de fabricantes distintos, em épocas distintas, e sem a preocupação de serem projetados para compor sistemas modulares ou reconfiguráveis, é citada na literatura, como mostrado no capítulo 3. Não existe, entretanto, uma metodologia disponível que possua essa abordagem proposta, explorando a capacidade de sistemas já existentes para a formação de novas concepções de máquinas e

equipamentos para a solução de problemas que envolvem a engenharia de precisão. Essa abordagem é nova, sendo diferente dos problemas encontrados no dia-a-dia dos projetistas.

A criação desta metodologia é de fundamental utilidade para grupos de pesquisa e desenvolvimento de sistemas mecânicos de precisão e que não possuem recursos suficientes para a realização de investimentos na compra de equipamentos que supram todas as suas necessidades. Várias lacunas poderão ser preenchidas a partir do momento que alguns equipamentos existentes forem vistos como reconfiguráveis e sua capacidade técnica for devidamente explorada. Esta flexibilidade adquirida através dos sistemas reconfiguráveis é de grande relevância por permitir a criação de várias soluções a um custo global mais baixo.

1.3 – Estrutura do trabalho

Após ter sido mostrado o contexto geral do trabalho no capítulo 1, parte-se para o desenvolvimento da tese com uma extensa pesquisa bibliográfica. O capítulo 2 apresenta o embasamento para as metodologias de projeto genéricas e de produtos modulares existentes e suas principais ferramentas.

Inicialmente é feito um apanhado geral definindo o que é metodologia de projeto e suas características. A seguir, são abordadas as ferramentas de projeto mais empregadas, e o projeto modular, com suas devidas particularidades. Encerrando o capítulo, são apresentadas algumas metodologias para desenvolvimento de produtos modulares encontradas na literatura.

No capítulo 3 são conceituados os sistemas mecânicos de precisão, bem como os principais princípios de projeto relacionado a este tipo de sistema. A seguir, é apresentada a teoria sobre sistemas de manufatura reconfiguráveis, concluindo o capítulo numa proposta de desenvolvimento de uma metodologia de projeto para sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis, que é descrita de forma detalhada no capítulo 4.

O capítulo 5 mostra a aplicação da metodologia em dois sistemas mecânicos de precisão. O primeiro é o desenvolvimento de um esclerômetro e o segundo é o desenvolvimento de um torno de ultraprecisão para usinagem de espelhos cônicos, com as possibilidades de flexibilização adquirida pela máquina a partir de diversos módulos básicos para sua composição.

O capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e em seguida são listadas as referências consultadas para a formulação da tese.

CAPÍTULO 2

METODOLOGIA DE PROJETO DE PRODUTOS MODULARES

O objetivo deste capítulo é apresentar os conceitos básicos relacionados ao desenvolvimento de projeto de um produto ou sistema. Para tanto, serão explorados o processo de projeto, as principais ferramentas que auxiliam nesse processo e os fundamentos relacionados a produtos e sistemas modulares.

2.1 – O processo de projeto

O projeto de um produto é realizado para atender às necessidades dos usuários deste produto. Num mercado cada vez mais globalizado, a concorrência para o fornecimento deste produto aos usuários torna fundamental a preocupação com a competitividade neste mercado.

Esta competitividade é medida através de três parâmetros fundamentais: **a qualidade, o custo e o tempo**. As empresas devem garantir a qualidade de seus produtos, associada a um curto tempo de desenvolvimento e a um custo final acessível (Forcellini, 2004). Assim, o processo de desenvolvimento de produtos assume um papel fundamental para a garantia de competitividade das indústrias. Esse processo de desenvolvimento vai além do projeto do produto e do processo. Engloba também a produção, *marketing*, logística, entre outras ações.

O projeto do produto não é somente uma atividade de cálculo ou dimensionamento de componentes mecânicos, mas engloba todo um planejamento e controle para a garantia dos níveis desejados de qualidade, tempo de desenvolvimento e custos envolvidos.

Normalmente o homem utiliza suas experiências anteriores para resolver novos problemas, num processo chamado heurístico. Essa postura é muito adequada para a solução de problemas mais simples. Quando o problema se apresenta mais complexo, envolvendo um volume maior de informações a serem processadas, é necessária a utilização de procedimentos metodológicos e sistemáticos mais apurados (Maribondo, 2000).

Assim, uma **metodologia de projeto** se destina a fornecer ao projetista um raciocínio lógico no processamento de um projeto, capaz de identificar o problema de projeto,

conduzindo as ações para que se encontre uma solução adequada a este problema. Para tanto, utilizam-se de todos os meios práticos disponíveis para viabilizar o projeto da melhor maneira possível e explorar melhor todas as informações disponíveis neste desenvolvimento.

Vários autores, como citado por Maribondo (2000), definiram projeto, metodologia, entre outros termos, de formas diferentes. De acordo com Back (1983), o projeto de engenharia é “uma atividade orientada para o entendimento das necessidades humanas, principalmente daquelas que podem ser satisfeitas por fatores tecnológicos de nossa cultura”.

De uma forma geral, então, a metodologia de projeto consiste em uma coleção de ferramentas e documentos de apoio ao processo de projeto, que tem por objetivo maior auxiliar os projetistas a tomarem as melhores decisões, utilizando mecanismos de avaliação e retroalimentação de dados, na busca pela melhor solução de um determinado problema de projeto. A metodologia de projeto vai permitir que se saiba **o que fazer, para quem fazer, quando fazer, com que fazer e como fazer**.

Outra resposta importante que a metodologia de projeto se preocupa em fornecer é uma idéia de **quanto custa o projeto**. Como descrito por Forcellini (2004), 80% dos custos de um produto ficam comprometidos com 20% da fase de projeto realizada. Com esta projeção, toda a viabilidade de conclusão do projeto pode ser analisada com uma boa antecedência para evitar que apareçam surpresas no orçamento em fases mais avançadas do processo de projeto. Uma constatação importante diz respeito ao custo de se realizar mudanças em fases avançadas do projeto. Na figura 2.1 é apresentado um gráfico que dá idéia da ordem de grandeza dos custos necessários para realizar mudanças num produto em várias fases do seu desenvolvimento.

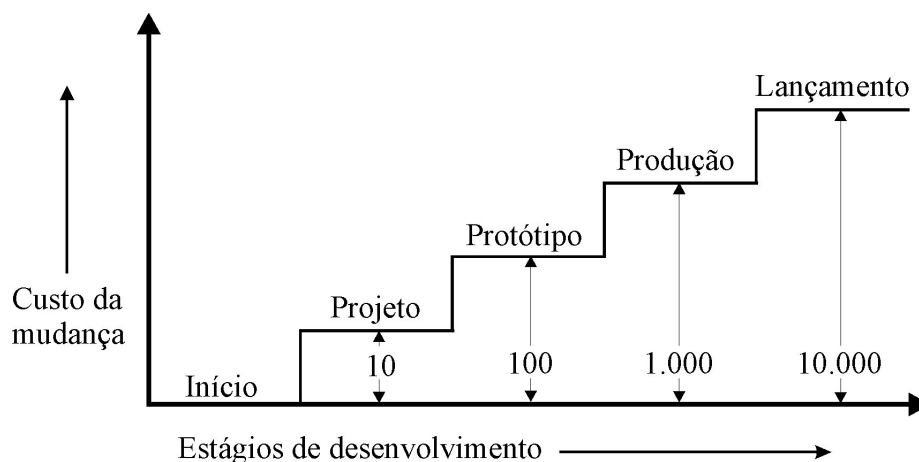


Figura 2.1 – Efeito de escala de custos de mudanças do produto nas diversas fases de desenvolvimento (Huthwaite & Schneberger, 1992).

Quanto mais avançado o estágio de desenvolvimento do produto, muito mais cara será a realização de mudanças nesse produto. Uma metodologia de projeto bem aplicada e com um forte envolvimento dos projetistas nas fases iniciais do projeto, vai prevenir a ocorrência dessas mudanças tardias no projeto do produto, mantendo os custos sob controle.

O desenvolvimento de projetos pode ser focado em diversos objetivos distintos. Dependendo do tipo de produto que será desenvolvido, o projeto pode ser classificado como:

- **Projeto inovativo** – Corresponde ao desenvolvimento de um novo princípio de solução para a formulação de um problema existente, revisado ou novo, o qual exige a aplicação de pesquisa, confecção de protótipos e realização de ensaios. Modificações feitas em produtos existentes geram produtos com um valor agregado maior.
- **Reprojeto** – Envolve modificações para satisfazer novos requisitos ou melhorar o desempenho de um projeto existente. Geralmente são discutidos na forma de projetos adaptativos de projetos variantes.
- **Projeto de produtos ou sistemas modulares** – Projeto que conserva a intercambiabilidade de algumas peças, desenvolvendo composições maiores ou menores, a fim de reduzir custos e simplificar a montagem e manutenção. Também utilizado para criar famílias de produtos com base em variantes de produtos existentes.
- **Projeto modificado** – Realiza modificações em um projeto bem estabelecido. Muitas vezes, trata-se somente da revisão da aparência do produto.
- **Projeto criativo** - Produtos novos, nunca antes vistos. Geralmente o tempo de desenvolvimento é longo e os custos de pesquisa e desenvolvimento são elevados.

Para cada tipo de projeto a ser desenvolvido, existe um conjunto equivalente de atividades distintas a serem realizadas para garantir a qualidade final do produto. Posteriormente será visto que, dependendo do ponto de partida, a metodologia proposta por essa tese pode ser classificada como sendo referente a vários dos tipos de projeto apresentados.

Normalmente a metodologia de projeto é apresentada através de diagramas de fluxo que auxiliam na visualização das ações e suas inter-relações, garantindo a otimização da seqüência cronológica das tarefas de projeto e, conseqüentemente, a qualidade final do produto.

Esses diagramas de fluxo são detalhados a partir de fases, que facilitam o gerenciamento do processo de projeto. Essas fases são caracterizadas pela conclusão de resultados ou saídas

esperadas, que são tangíveis ou verificáveis. Desta forma, a transição de uma fase para outra fica claramente explicitada e documentada.

As fases e suas saídas são parte de uma lógica geralmente seqüencial, planejada para garantir a definição correta do resultado do projeto, definindo quais trabalhos técnicos devem ser realizados e quem são os executores desses trabalhos.

Por possuírem essa característica definida de transição entre as fases, as metodologias de projeto facilmente podem ser planejadas de acordo com cronogramas de desenvolvimento, onde cada resultado de conclusão das fases pode ser previsto para ser concluído numa data especificada, permitindo um controle mais rigoroso do andamento do projeto. Em situações particulares, pode haver sobreposição do andamento de fases subseqüentes, desde que todo o desenvolvimento esteja sob controle.

Um exemplo de processo de desenvolvimento de produtos dividido em fases é apresentado na figura 2.2, como descrevem Wheelright e Clark (1992).

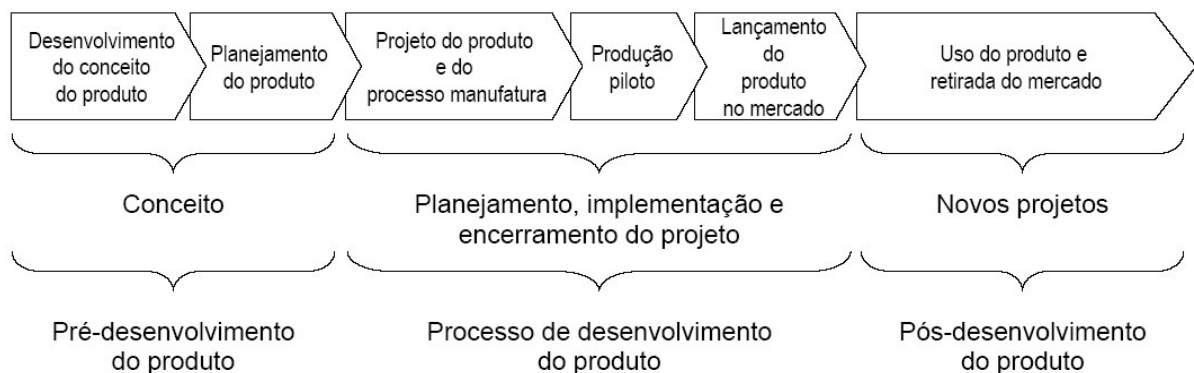


Figura 2.2 – Visão geral do processo de desenvolvimento de produtos conforme Wheelright e Clark (1992).

Diversos autores descreveram suas metodologias genéricas de projeto de acordo com seus conceitos e entendimento sobre as fases envolvidas no projeto de produtos. Uma análise comparativa dessas metodologias genéricas é apresentada por Maribondo (2000), e também por Romano (2003), conforme apresentado na tabela 2.1.

De todas as metodologias apresentadas, a mais clássica é a metodologia desenvolvida por Pahl e Beitz, apresentada com mais detalhes em 1996 (terceira edição), que serve de referência para praticamente todas as demais metodologias mais atuais. Esta metodologia foi a referência para a criação da norma VDI 2221 (Back, 1996). Um detalhamento inicial desta metodologia é apresentado na figura 2.3.

Tabela 2.1 – Fases da metodologia de projeto segundo diversos autores (Romano, 2003).

Autores	Fases						
	Elaboração do projeto				Implementação		
	1	2	3	4	5	6	7
Baxter 1998	Especificação do projeto	Projeto conceitual	Projeto de configuração	Projeto detalhado	Projeto para fabricação		
Magrab 1997	Definição do produto	Geração de projetos viáveis	Avaliação dos projetos	Projeto do produto e do processo	Manufatura e montagem		
Pahl e Beitz 1996	Clarificação da tarefa	Projeto conceitual	Projeto preliminar	Projeto detalhado			
Hubka e Eder 1996	Definição do problema	Projeto conceitual	Projeto preliminar	detalhamento	Protótipo e testes		
Clausing 1995	Conceito			Projeto	Preparação	Produção	
Ulrich e Eppinger 1995	Desenvolvimento do conceito		Projeto nível de sistema	Projeto detalhado	Teste e melhorias	Produção e lançamento	
Schulmann 1994	Estudos preliminares	Criação	Modelo tridimensional	Realização	Industrialização		
Ullman 1992	Planejamento	Projeto conceitual	Projeto do produto (documentação)		Produção		
Wheelright e Clark 1992	Projeto do produto e projeto do processo de manufatura				Produção piloto	Lançamento	
Pugh 1991	Especificações de projeto	Projeto conceitual	Projeto detalhado		Manufatura		
Andreassen e Hein 1987	Investigação da necessidade	Princípio do produto	Projeto do produto		Preparação da produção	Produção	
Bonsiepe 1984	Definição do problema	Anteprojeto geração de alternativas	Projeto (decisão e escolha)	Realização	Análise final da solução		
Back 1983	Estudo de viabilidade		Projeto preliminar	Projeto detalhado	Planejamento da produção	planejamento de marketing	
Barroso Neto 1982	Definição do produto	Anteprojeto geração de alternativas	Projeto	Construção do protótipo	Produção experimental		
Bomfim, Nagel e Rossi 1977	Compreensão da necessidade	Processos de solução e análise	Desenvolvimento		Implantação		
Archer 1974	Pesquisa preliminar	Estudos de exequibilidade	Desenvolv. do desenho	Desenvolv. do modelo	Estudo de comercialização	Desenvolv. da produção	Planejam. Produção
Cain 1969	Investigação	Concepção de projeto	Projeto de produto	Desenvolv. do produto	Teste	documentação produção	

A seqüência para o desenvolvimento de um projeto, como proposto por Pahl e Beitz e destacado na figura 2.3, divide o trabalho em quatro fases principais (Pereira e Back, 1996):

- **Fase I - a definição da tarefa:** Nesta fase, o departamento de projeto deverá esclarecer o problema apresentado. Esta fase também é chamada de projeto informacional. Para esclarecer o problema, deve objetivar:

- Clarificação da tarefa;
- Elaboração das especificações de projeto.

O primeiro objetivo é alcançado através de uma série de atividades voltadas a recolher informações sobre o problema a ser resolvido ao final do projeto. Essas informações são obtidas através de entrevistas com todos os clientes envolvidos com o projeto e devem resultar numa clara percepção deste problema. O segundo objetivo é alcançado pela tradução de todas as necessidades dos clientes do projeto na forma de requisitos para o projeto. Além

disso, esses requisitos devem ser hierarquizados de forma que os requisitos mais importantes tenham prioridade sobre os demais nas várias etapas de tomada de decisões que ocorrem durante o processo de projeto.

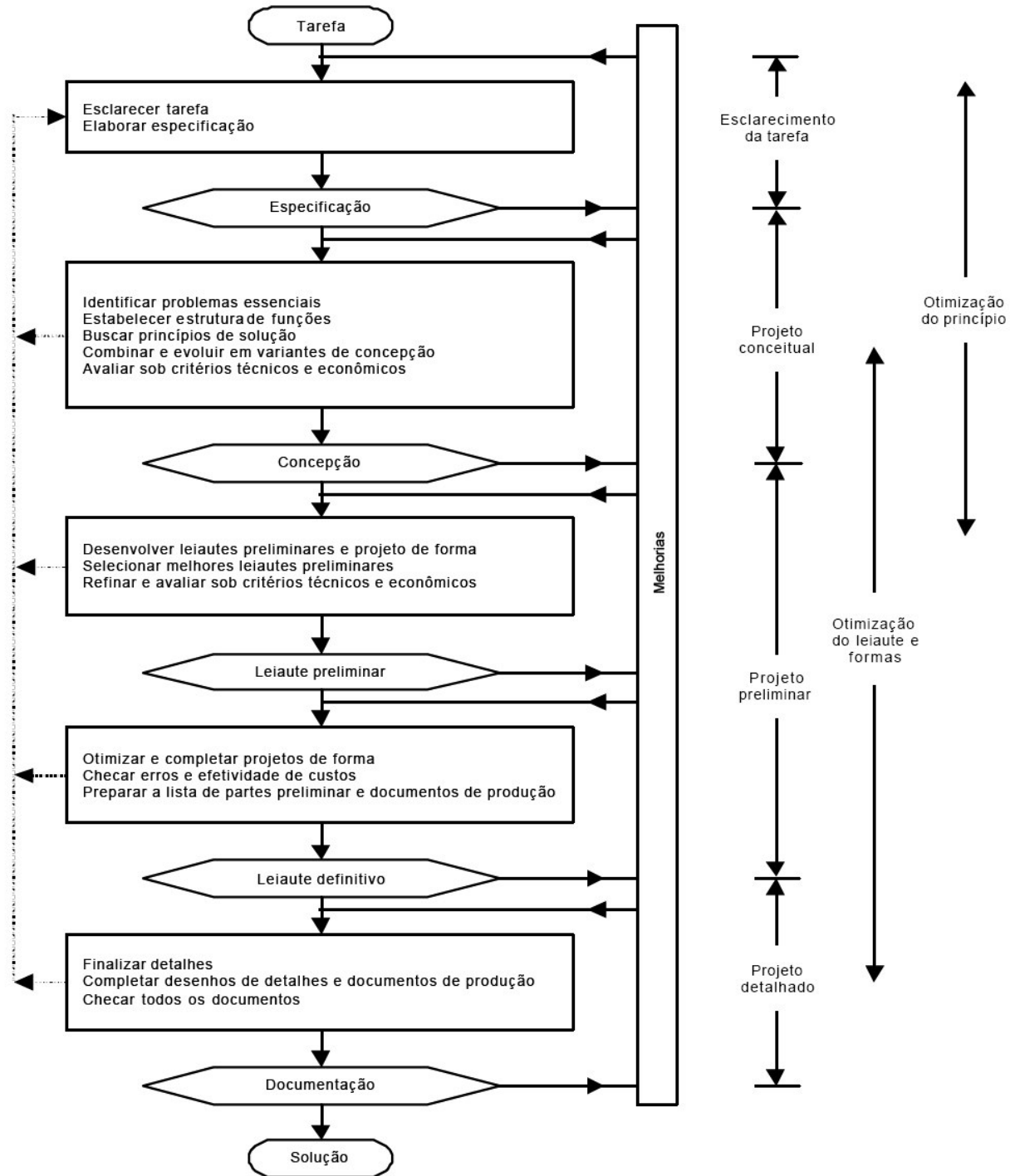


Figura 2.3 – Metodologia de projeto segundo Pahl e Beitz (1996).

▪ **Fase II - projeto conceitual**: O objetivo dessa fase é estabelecer as relações funcionais dos componentes e apresentar estruturas físicas ou concepções de projeto para a solução do problema. Para tanto, as especificações de projeto, definidas na fase anterior, são fundamentais. Esta fase compreende:

- Identificar os problemas essenciais;
- Estabelecer a estrutura de funções;
- Pesquisar os princípios de soluções;
- Combinar os princípios para obter variantes de concepções;
- Avaliar essas concepções segundo critérios técnicos e econômicos.

▪ **Fase III - projeto preliminar**: Nesta fase, algumas das soluções apresentadas no projeto conceitual são expandidas em detalhes e arrançadas. Implica em:

- Desenvolver leiautes e formas preliminares;
- Selecionar os melhores leiautes preliminares;
- Refinar e avaliar sob critérios técnicos e econômicos;
- Otimizar e completar o projeto das formas;
- Verificar erros e controlar custos;
- Preparar a lista de partes preliminares e os documentos de produção.

▪ **Fase IV - projeto detalhado**: Pode ser definido como tudo que segue o projeto preliminar com o objetivo de trazer o projeto à vida. Possui as seguintes atividades:

- Finalizar os detalhes, completar os desenhos detalhados e os documentos de produção.
- Verificar todos os documentos.

Slocum (1992), acrescenta uma quinta fase além das quatro apresentadas anteriormente:

▪ **Acompanhar o projeto** (*Design follow-up*), a qual pode ser definida como as atividades que englobam a parte de documentação e planos de manutenção, onde geralmente os projetistas tentam se esquivar desse trabalho mais burocrático e informacional.

Essa descrição das atividades realizadas em cada fase da metodologia de Pahl e Beitz foi feita de forma bastante superficial. Em seu livro (Pahl e Beitz, 1996, terceira edição), os autores detalham cada fase da metodologia, dando atividades e passos a serem seguidos para garantia da qualidade final do projeto executado. Forcellini (2004), também apresenta a

metodologia de forma bastante detalhada, subdividindo-a em atividades e tarefas, bem como as entradas, saídas, métodos, ferramentas e documentos de apoio para auxiliar em cada ação proposta.

2.2 – Ferramentas de auxílio ao processo de projeto

Algumas atividades relacionadas na metodologia se referem a ferramentas e documentos amplamente utilizados nos processos de projeto. As principais ferramentas e documentos empregados são (Maribondo, 2000):

- a. **Informações técnicas sobre o tema de projeto** – Compreendem documentos destinados a registrarem em si dados e demais aspectos ligados ao tema de estudo. Geralmente são utilizados no início do processo de projeto.
- b. **Ciclo de vida dos produtos** – Corresponde a um documento que objetiva auxiliar a equipe de projeto a levantar informações sobre a produção, consumo e descarte de produtos iguais ou semelhantes ao produto em estudo. Estas informações permitem aos projetistas que conheçam melhor seus concorrentes, descobrindo seus pontos falhos para explorá-los, visando gerar um produto mais competitivo. Geralmente é aplicado no início do processo de projeto.
- c. **Questionários estruturados e não estruturados** – Compreende uma lista de questões previamente estabelecidas, dirigidas a grupos diferentes de clientes do projeto, nas várias fases do ciclo de vida do produto, visando coletar desejos e necessidades para o desenvolvimento e clarificação do problema de projeto. Geralmente são aplicados no início do processo de projeto.
- d. **Aplicação de entrevistas** – São formas de coletar informações relativas aos desejos e necessidades junto a todos os clientes do projeto em estudo. Todas as pessoas que, de alguma forma, terão qualquer envolvimento com o projeto serão questionadas sobre suas necessidades individuais para compor uma base de informações essenciais de requisitos a serem atendidos pelo projeto, bastante completa. Geralmente são aplicadas no início do processo de projeto.
- e. **Lista de requisitos dos clientes do projeto** – Corresponde a um documento que registra as interpretações dos desejos e necessidades dos clientes do projeto, apresentadas numa linguagem mais técnica e fácil de ser aplicada no desenvolvimento do projeto. Geralmente é aplicada no início do processo de projeto.

-
- f. **Lista dos requisitos de projeto** – Corresponde a um documento que possui expressões mensuráveis que indicam como atender aos requisitos dos clientes do projeto. Corresponde à “voz de engenharia”. Geralmente é estabelecida no início do processo de projeto.
- g. **Matriz da casa da qualidade** – É uma ferramenta que tem por objetivo assegurar a qualidade do produto em cada fase do seu ciclo de vida. Além de integrar os vários participantes do projeto, inclui nas decisões tomadas e nas soluções propostas os desejos e as necessidades dos vários clientes envolvidos, de forma direta ou indireta com o desenvolvimento do produto. Além disso, prevê uma comparação com produtos concorrentes, objetivando atender a todos os requisitos propostos pelos clientes da melhor maneira possível. Geralmente é aplicada no início do processo de projeto.
- h. **Especificações de projeto** – É um documento onde são descritos com detalhes de que maneira cada um dos requisitos de projeto deve ser atendido para ser contemplado no desenvolvimento do projeto em estudo. Geralmente corresponde ao último documento utilizado no primeiro estágio do processo de projeto, o projeto informacional.
- i. **Síntese funcional** – Compreende uma série de ações necessárias à formulação de uma função geral de um sistema técnico. Também compreende outras ações necessárias à substituição desta função geral formulada por outras estruturas de função de menor complexidade. Geralmente tais ações definem o início do segundo estágio do processo de projeto, o projeto conceitual.
- j. **Matriz morfológica** – É um método destinado a estimular a criatividade da equipe de projeto através da exploração sistemática de um grande número de soluções possíveis que são organizadas com o auxílio de um quadro ou de uma matriz. Geralmente é utilizado no segundo estágio do processo de projeto.
- k. **Análise técnica** – Ações destinadas à análise das soluções apresentadas na matriz morfológica, levando em consideração a disponibilidade de máquinas, equipamentos, ferramentas manuais, e pessoal existente na empresa para atuar no desenvolvimento do projeto. Objetiva verificar a possibilidade dessas soluções serem desenvolvidas por esta ou outras empresas. Geralmente é utilizado no segundo estágio do processo de projeto.
- l. **Análise econômica** – Ações destinadas a analisar as soluções apresentadas a partir da matriz morfológica, com relação à viabilidade econômica e financeira junto à empresa responsável pelo projeto em estudo. Geralmente é utilizado no segundo estágio do processo de projeto.

- m. **Ferramentas de otimização** – Compreendem todas as ferramentas de apoio ao processo de projeto que buscam, entre outros aspectos, melhorar a solução escolhida para o problema em estudo. Neste campo destacam-se as ferramentas que avalia a fabricabilidade, a montabilidade, a testabilidade, a manutenibilidade, a disponibilidade da solução escolhida, entre outros aspectos. Geralmente é utilizado no projeto preliminar. Atualmente, diversas ferramentas computacionais de CAD/ CAE são empregadas para o projeto em ambiente virtual, minimizando as chances de erros de projeto.
- n. **Ferramentas de detalhamento** - Compreendem todas as ferramentas de apoio ao processo de projeto que buscam, entre outros aspectos, detalhar a solução escolhida para o problema em estudo. Dessas, destacam-se as ferramentas de CAD (*Computer Aided Design*). Geralmente é utilizado no quarto estágio do processo de projeto, que é o projeto detalhado. O emprego adequado desses sistemas fornece informações para os modelos cinemático, dinâmico, estrutural, design, dimensional e até a simulação da fabricação.
- o. **Ferramentas de DFX (Design for X)** – Compreende um conjunto de regras aplicadas para otimizar os projetos em cada abordagem escolhida. Algumas dessas ferramentas são:
- *Design for Manufacturing* – Projeto para manufatura – Compreende regras básicas de projeto para auxiliar e facilitar a usinagem dos componentes projetados;
 - *Design for Assembly* – Projeto para montagem – Apresenta regras que asseguram a montabilidade dos componentes projetados;
 - *Design for Disassembly* – Projeto para a desmontagem;
 - *Design for Life Cycle* – Projeto para o ciclo de vida – As decisões de projeto serão tomadas levando em consideração o ciclo de vida do produto;
 - *Design for Maintainability* – Projeto para a manutenção – Apresenta regras que facilitam a posterior manutenção do sistema projetado;
 - *Design for Reliability* – Projeto para a confiabilidade - Neste caso, o enfoque é garantir que o produto tenha vida útil assegurada para todo o período que foi projetado para funcionar, com baixa ou inexistente manutenção;
 - *Design for reuse* – Projeto para a reutilização – O projeto é direcionado para o aproveitamento do sistema depois de terminada a sua vida projetada;
 - *Design for Cost* – Projeto para o custo – A preocupação passa a ser a diminuição dos custos envolvidos no projeto;
 - *Design for Consumer* – Projeto para o consumidor – O projeto é direcionado especificamente para atender às necessidades do consumidor;

- *Design for Environment* – Projeto para o meio ambiente – A preocupação é não afetar o meio ambiente;
- *Design for quality* – Projeto para a qualidade – Ações relacionadas à garantia de qualidade final do produto;
- Outras abordagens – Assim como as ações foram direcionadas para esses conceitos relacionados, outras abordagens foram desenvolvidas para serem realizadas abrangendo outros conceitos. Os que foram considerados mais significativos são os relacionados anteriormente.

Como pode ser visto, o processo de projeto conduzido de forma metodológica recebe auxílio de diversas ferramentas que auxiliam os projetistas a buscarem as informações importantes para a condução do projeto e organizá-las de modo a que estejam explícitas as reais necessidades a serem atendidas pelo projeto. Assim, todo o processo de tomada de decisão que ocorrer durante o projeto será sempre embasado em informações concretas que refletem os objetivos finais do projeto.

O principal objetivo do uso dessas ferramentas é explorar a criatividade do projetista associado a um controle de todo o processo de projeto, visando evitar que se cometam erros principalmente pela negligência de requisitos importantes para o cumprimento dos objetivos finais do produto projetado. A seguir, serão detalhados conceitos relacionados a sistemas modulares.

2.3 – Sistemas modulares

O termo “sistemas modulares” se refere a uma técnica de projeto utilizada para criar uma variedade de produtos finais a partir da combinação de componentes intercambiáveis, funcionalmente independentes entre si, denominados de módulos.

Essa definição leva o desenvolvimento dos sistemas modulares a diversas frentes diferentes. A mais aplicada delas é a que refere à fabricação de produtos a partir de uma variedade de módulos básicos, dos quais suas diferentes combinações geram diferentes concepções para atenderem a problemas específicos, caracterizando a formação de produtos diferenciados a cada concepção criada.

Essa diferenciação entre as concepções pode ser originada em diversos aspectos do produto, como alterações na escala, atendimento de diferentes funções, questões estéticas ou mesmo aperfeiçoamento de funções específicas do produto.

De forma bem direta, o projeto modular é uma técnica de projeto que pode ser utilizada para desenvolver produtos complexos a partir de componentes similares e simplificados (Maribondo, 2000).

A maior exigência no projeto desses módulos individuais está na qualidade das suas interfaces, que garantirão sua integração com os demais módulos e a qualidade final do produto. Se um componente já existente for passar a fazer parte de um sistema modular, ações deverão ser tomadas para garantir sua intercambiabilidade com o sistema.

Os exemplos mais clássicos de aplicação de sistemas modulares são as famílias de produtos, como os vários modelos de um mesmo automóvel, a montagem de cozinhas, as casas pré-fabricadas, até mesmo os brinquedos para crianças como o Lego.

A figura 2.4 mostra o exemplo de uma cozinha montada a partir de módulos.






Figura 2.4 – Modelo de uma cozinha modular (Pizzato, 1998).

As cozinhas são montadas a partir de componentes individuais básicos, que vão sendo acoplados conforme a necessidade e desejo do cliente. Já são previstos espaços próprios para eletrodomésticos e tudo vira uma questão de projeto estético e arranjo para compor a concepção final da cozinha.

Na indústria metal-mecânica, é comum encontrarem-se modelos de máquinas-ferramentas montados em escalas diferentes para atender as necessidades de fabricação de componentes com diferentes tamanhos. Essas máquinas diferem entre si pelas dimensões de sua área de trabalho e pela potência instalada nos seus acionamentos. Mas a cinemática e a disposição de seus componentes permanecem as mesmas nos vários modelos.

Na tabela 2.2 é apresentada uma família de tornos CNC Galaxy com suas devidas características, do fabricante ROMI (2004).

Tabela 2.2 – Família de tornos CNC ROMI Galaxy (2004).

Galaxy 15SM	Galaxy 20	Galaxy 30
		
Motor principal – 15 CV	Motor principal – 20 CV	Motor principal – 30 CV
Distância entre pontas – 400 mm	Distância entre pontas – 540 mm	Distância entre pontas – 1020 mm
Diâmetro admissível - 420 mm	Diâmetro admissível - 440 mm	Diâmetro admissível - 580 mm

Na tabela 2.2 são apresentadas somente algumas das características construtivas das máquinas, mas que confirmam a modularidade do projeto baseada na escala do produto. A configuração dos componentes e sistemas da máquina é a mesma nos três modelos.

A base dos sistemas modulares está na capacidade de intercambiabilidade entre os diferentes módulos associada à presença de um padrão na construção das interfaces físicas desses módulos que permite a compatibilidade de montagem entre todos os diferentes módulos. Com isso, suas qualidades no sentido de facilitar a montagem e desmontagem dos sistemas e também a facilidade de manutenção pela substituição simples de módulos defeituosos, tornam os sistemas modulares uma ferramenta poderosa para a produção em massa de famílias de produtos.

Para Ulrich e Tung (1991), a combinação de componentes independentes entre si depende da modularidade existente entre eles. Assim, a modularidade passa a ser entendida como uma forma especial de projeto na qual, intencionalmente, cria-se um fácil acoplamento entre os componentes através da padronização das especificações das interfaces desses componentes. Mas, para se obter essa modularidade, é preciso aumentar a similaridade entre as funções e as formas do sistema e minimizar os efeitos incidentais entre os componentes desse sistema. Esses efeitos incidentais são as fontes de calor e vibrações dos módulos, e a possibilidade de corrosão, entre outros distúrbios ao sistema como um todo.

Desta forma, mesmo que os componentes não tenham sido projetados inicialmente para atuarem dentro de um contexto totalmente modular, a modularidade pode ser integrada ao componente através de uma correta preparação e controle de suas interfaces, como é a proposta de desenvolvimento a ser apresentada neste trabalho.

Devido aos efeitos incidentais na interface, nem sempre é possível desenvolver um projeto completamente modular, visto que se um módulo interferir na função do outro,

resultará numa característica não prevista do sistema montado, o que é totalmente indesejável. Se isto ocorrer, deve-se tentar alterar o módulo para eliminar seus efeitos nas interfaces com os demais módulos ou então se devem prever quais as conseqüências desses efeitos incidentais no sistema e passar a projetar o sistema levando em consideração essas alterações.

Gu et al (1997) comentam que um produto pode ser modularizado de diferentes formas, sendo desenvolvido “modularmente” visando a fabricabilidade, a montabilidade, a testabilidade, a manutenibilidade, a facilidade de uso, a execução de funções específicas, o descarte, entre outros. Esses diferentes aspectos causam diferentes impactos nas características do ciclo de vida dos produtos. Assim sendo, antes de iniciar o desenvolvimento do projeto, é importante identificar quais desses aspectos são os mais importantes na composição de todo o processo de projeto e do produto final.

Se um produto modular é projetado para atender a sua fabricabilidade, não necessariamente deverá ter as melhores características de testabilidade, manutenibilidade, entre outros. O correto seria otimizar o projeto de modo que todas essas importantes características do produto sejam atendidas, mas isto pode tornar o projeto muito complexo e demorado.

No ambiente produtivo industrial, a tendência à racionalização aumenta o emprego de componentes produzidos por terceiros. O resultado disso é que no mercado existe uma sensível expansão na oferta de componentes prontos para máquinas, equipamentos e instalações (Höhe, 2000).

Foi-se o tempo onde um fabricante de uma máquina-ferramenta, por exemplo, responsabilizava-se pela produção de todos os componentes que fossem utilizados na concepção final do seu produto.

Atualmente, é comum que determinados componentes ou sistemas que compõem um projeto final sejam produzidos por terceiros, e sua integração seja feita num estágio final da concepção do produto. Essa condição também caracteriza a modularidade no projeto. Para se obter sucesso, é fundamental uma correta caracterização das interfaces entre os módulos.

2.3.1– Benefícios do uso da modularidade nos projetos

Ulrich e Tung (1991) apresentam dez benefícios do uso de modularidade no projeto:

1. **Economia de escala de componentes** – O uso da modularidade permite que alguns componentes ou sistemas sejam utilizados em vários produtos variantes ou mesmo numa linha de produtos. Esse aspecto se verifica pela padronização existente nesses componentes e sistemas.

2. **Mudança de produtos** – O uso da modularidade permite que os produtos sofram mudanças ao longo do seu ciclo de vida. Basicamente, com a simples substituição de alguns módulos do produto é possível fornecer novas características operacionais ao mesmo. Isto implica numa redução significativa de custos e maior confiabilidade, visto que os módulos inalterados possuem suas características bem definidas e conhecidas.
3. **Variedade de produtos** – O uso de modularidade proporciona a criação de uma variedade de produtos a partir da combinação de um pequeno grupo de componentes diferentes.
4. **Planejamento dos tempos de desenvolvimento** - O uso de modularidade no projeto de produtos facilita seu planejamento, em virtude da grande adaptação desses produtos. Todas as combinações entre módulos e suas características já são bem conhecidas e já foram previstas nas fases iniciais do projeto, evitando surpresas na hora de se produzir configurações não usuais dos módulos.
5. **Divisão de tarefas** – Definidas as interfaces, componentes podem ser produzidos por diferentes fabricantes, reduzindo-se significativamente os prazos para produção dos produtos.
6. **Projeto enfocando a produção** – A divisão do produto em componentes independentes permite que as atividades de projeto e a produção sejam especializadas e focadas. Se um determinado módulo exige uma condição especial de fabricação, não necessariamente todos os demais módulos deverão ser produzidos nestas mesmas condições.
7. **Verificação e testes dos componentes** – A modularidade facilita a verificação e testes dos componentes, já que cada componente é um elemento funcional particular, sua função é bem definida e seus testes tornam-se mais simples. Além disso, a simulação das interfaces entre os módulos é fácil, permitindo que dispositivos especiais sejam desenvolvidos para testar a performance dos módulos quanto à função que se destinam.
8. **Consumos diferenciados** – O uso de modularidade proporciona o consumo de materiais de forma diferenciada, agrupando-se componentes que possuem taxas de falha ou de reposição similares, assegurando um desgaste ou uma reposição mais uniforme. Uma boa estratégia é transformar os componentes que possuem alta taxa de substituição em módulos, preservando o resto do sistema e reduzindo os custos globais dessas reposições.
9. **Facilidade para produzir, instalar e usar** - O uso de modularidade no projeto facilita a produção, a montagem e o uso desse projeto. A produção e a montagem, porque os componentes são tomados como módulos e podem ser fabricados e montados separadamente uns dos outros. Torna-se fácil de usar porque é concebido visando uma configuração particular sugerida pelo cliente ou usuário desse projeto.

10. **Facilidades para diagnosticar, manter, reparar e descartar** – Essas facilidades são obtidas em função desses produtos serem oferecidos na forma de módulos. Esse aspecto facilita as atividades de diagnóstico, reparo e troca de componentes defeituosos com uma característica importante: basta substituir, temporariamente, o módulo defeituoso por um módulo em bom estado enquanto o reparo está sendo feito.

Todos esses benefícios listados dão uma idéia da variedade de tipos de projeto modular que podem ser conduzidos de acordo com as necessidades especificadas para o produto.

Ulrich e Tung (1991) também apresentaram as principais desvantagens da utilização de sistemas modulares, principalmente no que diz respeito aos custos envolvidos:

- Produtos de arquitetura estática – É um grande obstáculo para realizar inovações;
- Otimização de desempenho – O desempenho do produto estará limitado pelo grau de modularidade imposto a este produto;
- Facilidade de cópia – O produto é facilmente copiado;
- Aumento dos custos variáveis das unidades – Um módulo sub-utilizado num produto aumenta seu custo final;
- Similaridade excessiva entre produtos – Pouca diferença entre modelos podem desagradar consumidores de um produto.

Ulrich e Tung (1991) definem cinco categorias de modularidade, também exemplificados por Menegatti (2004):

- i. **Modularidade com permuta de componentes** – Diferentes variantes de produtos pertencentes a uma mesma família de produtos são criadas pela combinação de dois ou mais tipos alternativos de componentes com um mesmo componente ou produto básico. Um exemplo desse tipo de modularidade pode ser visto nos computadores, onde uma mesma placa-mãe é combinada com diferentes tipos de teclados, monitores e outros periféricos. Essa modularidade é associada à criação de variedade.
- ii. **Modularidade com compartilhamento de componentes** – Nesta categoria, diferentes variantes de produtos pertencentes a diferentes famílias de produtos são criadas pela combinação de módulos diferentes compartilhando o mesmo componente básico. Um exemplo desse tipo de modularidade pode ser visto na aplicação de motores elétricos idênticos em máquinas e sistemas totalmente diferentes. Os projetos dos equipamentos são feitos para se adaptarem a uma interface-padrão definida nos catálogos de fabricantes de motores. É associada à padronização de componentes.

- iii. **Modularidade com adaptação para a variação** – Um ou mais componentes padrão são usados com um ou mais componentes adicionais com infinitas variações. As variações são normalmente associadas a dimensões físicas que podem ser modificadas. Um exemplo disso é a modularidade encontrada em cabos, onde conectores padrões são montados em cabos com comprimento qualquer.
- iv. **Modularidade através de barramento padrão** – Este tipo de modularidade ocorre quando um módulo pode ser associado a diferentes números de componentes básicos. A interface padrão permite que o número e localização dos componentes básicos sejam variáveis em um produto. Nos computadores esse tipo de modularidade também está presente porque estes permitem a montagem de diferentes placas, cartuchos de memória, em diferentes quantidades, já que possuem várias saídas disponíveis para essas montagens.
- v. **Modularidade seccional** – Ocorre quando grupos de componentes configuram um produto de forma arbitrária, como encontrado em sistemas de tubulação e na montagem de móveis. Componentes individuais com interface definida vão sendo encadeados até se atingir a configuração desejada para o produto final.

Todos esses conceitos e classificações dadas referem-se à definição mais ampla possível de projeto de sistemas modulares. Cada desenvolvimento de metodologia que leve em consideração a aplicação de sistemas modulares vai detalhar ações visando o desenvolvimento da família de produtos, que é objetivo final de otimização do processo de projeto descrito por essa metodologia. Dos exemplos já citados anteriormente, é fácil identificar que uma metodologia para o desenvolvimento de projeto de cozinhas vai ser totalmente diferente da metodologia para o desenvolvimento de séries de automóveis ou mesmo das máquinas-ferramentas.

A teoria que envolve sistemas modulares é ampla e exige que sejam especificadas as diretrizes para cada tipo de produto a ser desenvolvido.

2.3.2– Características de sistemas modulares

Os sistemas modulares são construídos a partir das chamadas unidades independentes ou módulos. As duas principais categorias de módulos são os módulos de função e os módulos de produção (Kamrani, 2000). Os módulos de função são projetados para atender a funções técnicas independentemente ou em combinação com outros módulos. Os módulos de produção são projetados baseados somente em considerações de produção, que são independentes de suas funções.

Os módulos de função podem ser classificados com base nos vários tipos de funções que ocorrem num sistema modular, que podem ser agrupadas como sub-funções para implementar uma função global diferente.

Essas funções encontradas nos módulos são:

- a. Funções básicas** – São funções que atendem diretamente a função global do sistema ou o fazem em combinação com outras funções. As funções básicas não são variáveis com relação ao seu princípio e são implementadas em módulos básicos.
- b. Funções auxiliares** – Essas são implementadas utilizando módulos auxiliares em concordância com os módulos básicos. Possuem o objetivo de dar auxílio, ajuda, ou favorecer outras funções a cumprirem seus objetivos.
- c. Funções especiais** – São sub-funções com tarefas específicas que não podem aparecer entre as variações da função global e são implementadas por módulos especiais.
- d. Funções adaptativas** – São funções que permitem a adaptação de um componente ou sistema a outros produtos ou sistemas. São implementadas por módulos adaptativos que previnem circunstâncias imprevisíveis.
- e. Funções específicas** – São funções não geradas pelo sistema modular e que são implementadas por não-módulos que devem ser projetados individualmente. Se utilizadas, resultam num sistema misto que combina módulos e não-módulos.

Para se definir ou identificar as funções conforme apresentado, é necessário dividir adequadamente um sistema, garantindo que os módulos gerados cumpram sua característica funcional como parte integrante do produto e justifiquem sua aplicação como módulo.

Sistemas modulares podem ser desenvolvidos pela decomposição de um sistema global em elementos funcionais básicos mapeando esses elementos em componentes físicos básicos, e então integrando os componentes básicos em um sistema modular capaz de atender às funções desejadas (Kamrani, 2000). Esta abordagem implica em dois desafios importantes:

- (1) Decomposição:** É difícil encontrar o conjunto de subsistemas mais adequado;
- (2) Integração:** Também é difícil combinar os subsistemas separados para buscar uma solução global.

Na decomposição de sistemas, se esperam obter dois benefícios, a **simplificação** e a **velocidade**. Espera-se a simplificação porque a decomposição de sistemas grandes em sistemas menores levará à redução do tamanho do problema que necessita ser resolvido, o que o torna mais fácil de ser gerenciado. Quanto à velocidade, a solução simultânea de vários problemas menores reduzirá o tempo necessário para se resolver o problema completo.

Os métodos de decomposição podem ser classificados de acordo com a área na qual estão sendo aplicados:

- A) **Decomposição de produto:** A decomposição de produto pode ser realizada em vários estágios do processo de projeto e pode ser definida como sendo um processo de separação do produto em elementos físicos dos quais uma descrição completa do produto pode ser obtida.
- B) **Decomposição de problema:** Por séculos, problemas complexos de projeto foram resolvidos através da sua separação em problemas menores. A decomposição do problema é processada até o ponto onde produtos independentes básicos ou unitários sejam obtidos. A interação entre produtos básicos deve ser identificada e introduzida como restrições impostas a subproblemas maiores.
- C) **Decomposição de processo:** A decomposição de processo consiste na decomposição de todo o processo de projeto, iniciando o reconhecimento das necessidades e finalizando no projeto detalhado. As atividades do processo de projeto são modeladas de maneira genérica independentemente do produto específico que está sendo projetado.

Um sistema modular pode ser imaginado como sendo uma integração de vários elementos funcionais que, quando combinados, fornecem uma função diferente das suas funções individuais. As similaridades entre as arquiteturas física e funcional do projeto devem ser utilizadas como um critério para o desenvolvimento de sistemas modulares. Outro critério que deve ser empregado é a minimização do grau de interação entre os componentes físicos.

O grau de interação entre os componentes físicos, o qual deve ser identificado e minimizado ou eliminado, é um aspecto importante de modularidade. Por exemplo, a resistência de um sistema modular pode ser medida pela fraqueza nas interações ou interfaces entre os componentes.

As interfaces entre os módulos possuem algumas funções básicas, como providenciar suporte, transmitir força, localizar o componente na montagem, providenciar a localização para outros componentes na montagem e transmitir movimento.

Além dessas funções genéricas, outras atribuições podem ser dadas às interfaces, como isolamento térmico ou de vibrações, transmissão de informações num circuito metrológico, entre outras.

Uma preocupação constante da equipe de projeto é com relação ao nível de detalhamento que deve ser dado à decomposição de um sistema em módulos. Cada tipo de projeto vai possuir uma configuração mais adequada de módulos para permitir as ações de

reconfiguração do produto. Muitos módulos tornam o sistema muito complexo e com muitas interfaces a serem desenvolvidas. Por outro lado, poucos módulos limitam a flexibilidade de configuração do produto.

A seguir, serão apresentadas algumas propostas de metodologia de projeto de sistemas modulares apresentadas por alguns pesquisadores. A avaliação dessas metodologias é um bom ponto de partida para uma nova proposta metodológica envolvendo sistemas modulares.

2.3.3– Metodologia de projeto de sistemas modulares

Diversos autores apresentaram metodologias genéricas de projeto para sistemas modulares. A primeira obra mais significativa relacionando o desenvolvimento de produtos e sistemas modulares, foi apresentada por Pahl e Beitz (1996), que propõem diversas recomendações para a adequação do seu processo metodológico ao desenvolvimento de produtos modulares.

Erixon et al., em 1996, apresentaram uma metodologia denominada MFD – *Modular Function Deployment* (Desdobramento da função modular), dividida em cinco passos, conforme a figura 2.5.

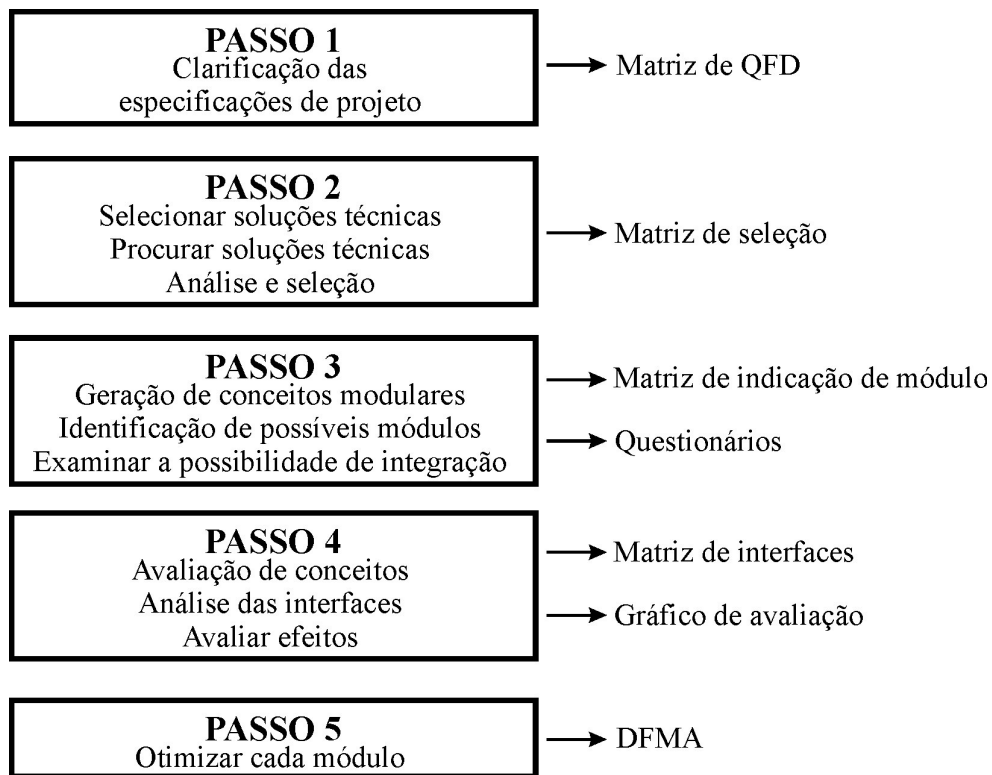


Figura 2.5 – Passos da metodologia MFD de Erixon et al (1996).

Como mostra o fluxograma da figura 2.5, são sugeridas ferramentas de projeto para serem utilizadas em cada passo da metodologia, cada qual adaptada ao projeto de sistemas modulares. Destas, uma ferramenta importante de ser apresentada é a matriz de indicação de módulo, que emprega doze diretrizes relacionadas a razões pelas quais um produto deveria ser modularizado, conforme apresenta a tabela 2.3. Quando essas diretrizes são confrontadas com as funções desempenhadas pelo produto, é possível avaliar quais dessas funções podem ser reunidas para a formação de módulos, conforme foi empregado por Pizzato (1998).

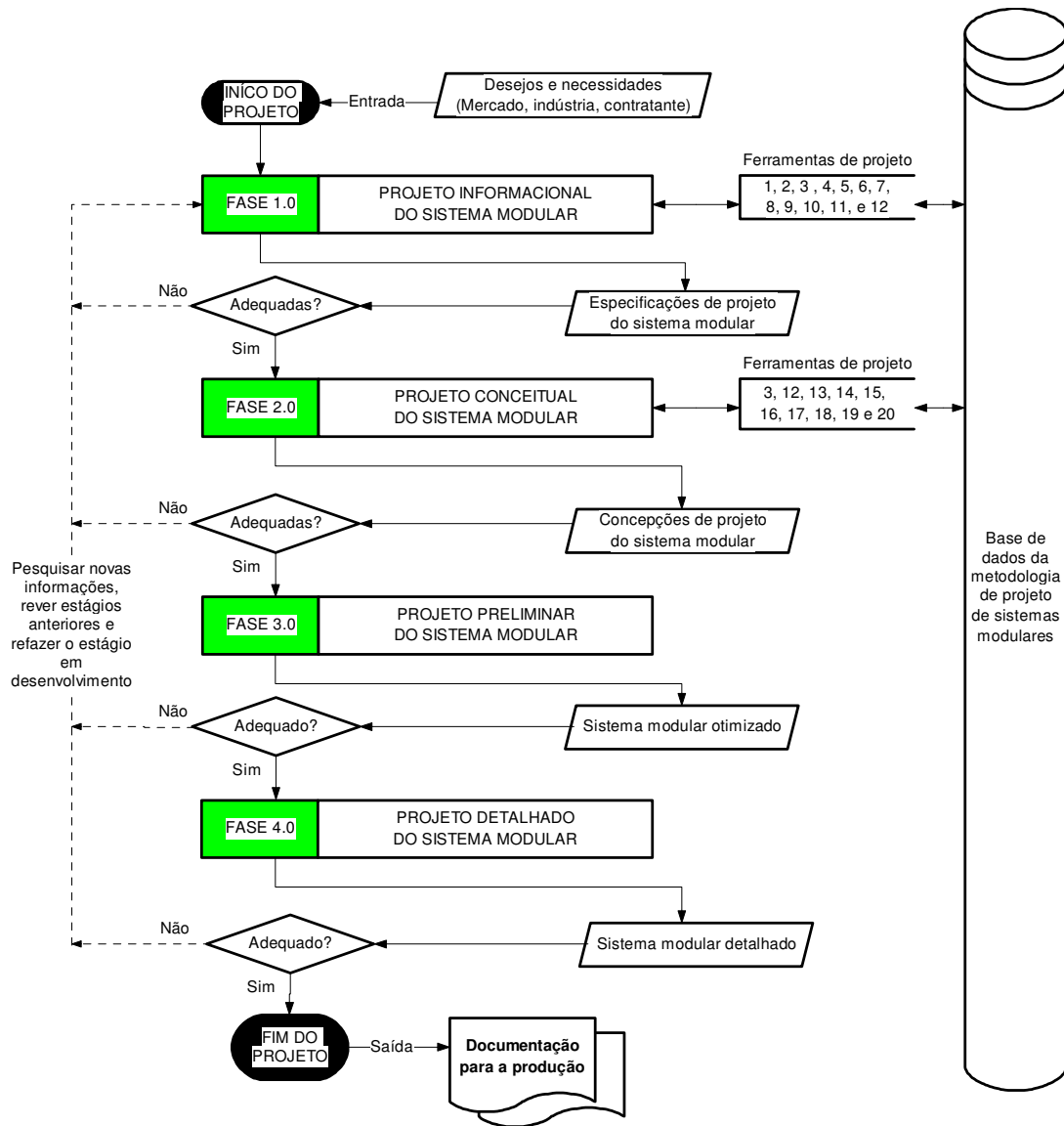
Tabela 2.3 – Diretrizes de modularização segundo Erixon et al (1996).

Desenvolvimento de produtos	Multi-aplicativo	Uma função pode ser um módulo separado onde a solução tecnológica atual poderá ser levada para uma nova geração ou família de máquinas.
	Evolução tecnológica	Uma função pode ser um módulo único se o mesmo possui uma tecnologia que irá ser superada no seu ciclo de vida.
	Planejamento de alteração de projeto	Uma função pode ser um módulo separado se esta possui características que serão alteradas segundo um plano.
Variação	Especificação técnica	Poderão ser concentradas alterações para se conseguir variantes em um módulo.
	Estilo	Uma função pode ser um módulo separado se esta é influenciada por tendências de tal maneira que as formas e/ou cores tenham que ser alteradas.
Fabricação	Unidade comum	Uma função pode ser separada em um módulo se a mesma possuir a mesma solução física em todos os produtos variantes.
	Processo e organização	Razões para separar uma função num módulo: <ul style="list-style-type: none"> • Ter uma tarefa específica num grupo; • Encaixar-se no conhecimento tecnológico da empresa; • Possuir uma montagem pedagógica; • Ter um tempo de montagem muito diferente do outros módulos;
Qualidade	Testes em separado	Uma função pode ser separada em um módulo quando esta função puder ser testada separadamente.
Aquisição	Compra de produtos prontos	Uma função pode ser tratada como uma caixa preta se houver redução dos custos logísticos.
Após estar no mercado	Manutenção e manutenibilidade	Manutenções e reparos podem ser facilitados se uma função fica bem em um módulo separado.
	Atualização	Atualizações são facilitadas se a função for um módulo.
	Reciclagem	Pode ser uma vantagem para concentrar materiais poluentes ou recicláveis em um mesmo módulo ou em separado.

Essas diretrizes estão relacionadas à decomposição do produto em funções, avaliando os benefícios da modularidade nas várias etapas do ciclo de vida do produto.

De um modo geral, essa metodologia apresentada por Erixon et al (1996), segue as fases de projeto genéricas, apresentadas no início do capítulo, concentrando ações mais detalhadas no sentido de modularização do produto.

Maribondo (2000), propôs um fluxo geral para a metodologia de projeto de sistemas modulares, como mostra a figura 2.6.



LEGENDA:

1 – Ordem de serviço	11 – Matriz da casa da qualidade
2 – Ciclo de vida dos produtos	12 – Quadro de especificações de projeto
3 – Ficha de informações técnicas	13 – Síntese funcional
4 – Ficha de informações de mercado	14 – Catálogo de princípios físicos
5 – Questionários estruturados	15 – Catálogo de princípios de solução
6 – Entrevistas	16 – Matriz de conveniência
7 – Interpretador das necessidades em requisitos dos clientes e usuários	17 – Diretrizes para otimização das interfaces
8 – Valoração dos requisitos dos clientes e usuários	18 – Matriz morfológica
9 – Ficha de análise dos produtos concorrentes	19 – Matriz de avaliação (MAVAL)
10 – Lista de requisitos de projeto do sistema modular	20 – Matrizes de decisão de apoio à seleção da alternativa de concepção

Figura 2.6 – Fluxo geral da metodologia de projeto de sistemas modulares (Maribondo, 2000).

Neste fluxo, baseado no modelo clássico de metodologia de projeto apresentado por Pahl e Beitz (1996), estão destacadas as principais fases do projeto e são sugeridas ferramentas de projeto para auxiliar na execução. Maribondo (2000) ainda detalha cada uma dessas fases apresentadas em etapas e tarefas, como mostra a figura 2.7, que mostra o detalhamento da fase de projeto informacional da metodologia apresentada.

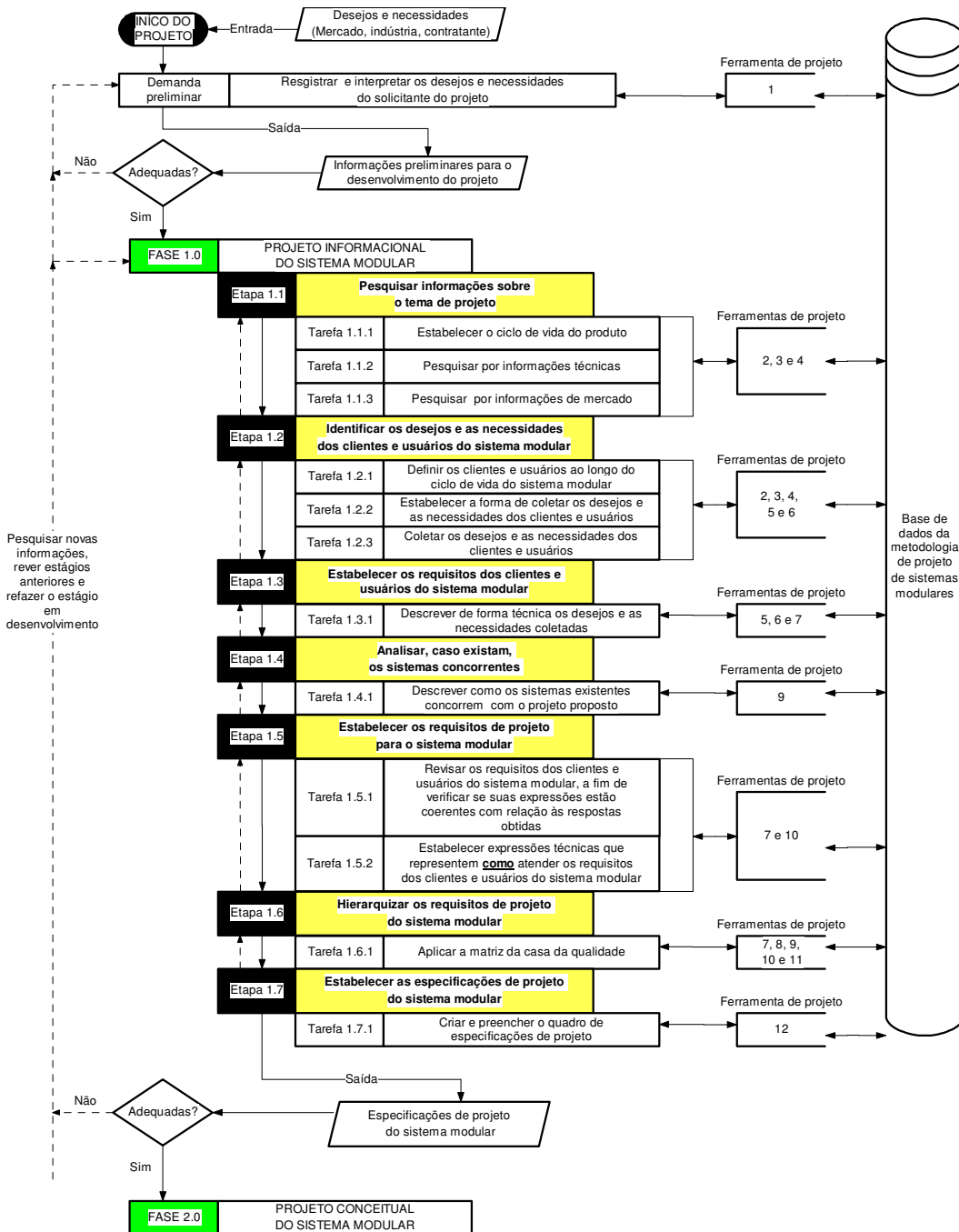


Figura 2.7 – Detalhamento do projeto informacional (Maribondo, 2000)

Em sua tese, Maribondo (2000) vai ainda mais além e apresenta todas as transições entre etapas das quatro fases do processo de projeto, definindo entradas, saídas, ferramentas, documentos de apoio e os problemas que podem ocorrer na transição de uma etapa para a seguinte na metodologia. Além disso, propõe o processo de projeto para o desenvolvimento de um sistema modular e outro para a modularização de um grupo de sistemas existentes.

A visão de metodologia apresentada por Maribondo (2000) está baseada no ciclo de vida do produto ou sistema. O encadeamento das tarefas conduz o projeto de forma bastante controlada e leva o projetista a garantir a qualidade final requerida.

Essa metodologia é bastante genérica, sem a preocupação em direcionar o processo de projeto para um tipo específico de produto ou sistema modular. Também não explora em específico nenhuma das quatro categorias de modularidade apresentadas por Ulrich e Tung (1991). Esse direcionamento deverá ser feito durante a condução do processo de projeto pelo projetista, durante as várias tomadas de decisão necessárias.

Uma outra visão de metodologia de projeto para produtos modulares foi apresentada por Scalice (2003). Também tomando como linha geral as quatro fases de projeto apresentadas por Pahl e Beitz (1996), Scalice preocupou-se em combinar os recursos disponíveis nas várias metodologias existentes para compor um processo de projeto com as seguintes características:

1. Estar de acordo com os procedimentos do estado-da-arte das metodologias de projeto de produtos modulares;
2. Abranger o maior número possível de aspectos relacionados a sistemas modulares, como o projeto de interfaces, a modularização pelo ciclo de vida, a modularização via estrutura funcional, etc.;
3. Ser adequada ao projeto simultâneo de diferentes produtos, ou seja, um sistema com várias funções globais;
4. Ser voltada à obtenção dos benefícios do projeto modular, principalmente os relacionados à economia de escala;
5. Estar em concordância com os fundamentos do projeto metodológico de produtos.

A estrutura de fases, etapas, saídas e ferramentas e métodos empregados é mostrado na figura 2.8. Além da nova metodologia apresentada, Scalice (2003) deu contribuições importantes ao desenvolvimento de projetos de sistemas modulares ao apresentar duas novas ferramentas de apoio ao processo de projeto: a Matriz para Determinação dos Núcleos Funcionais e o Processo de Seleção de Interfaces (PSI). A Matriz é responsável por analisar e agrupar funções comuns do produto, enquanto que o PSI analisa a necessidade e importância das interfaces entre cada um dos módulos.

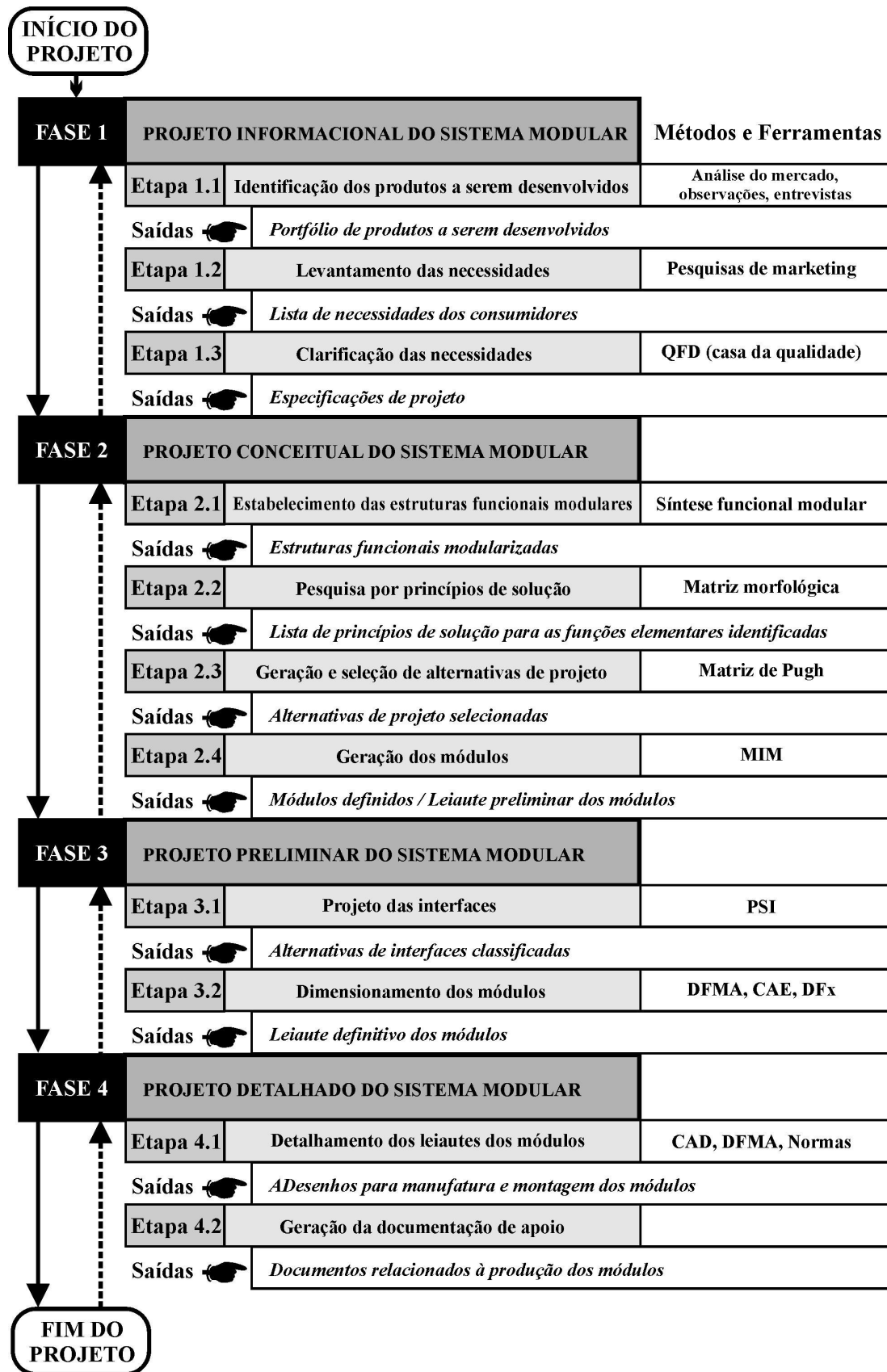


Figura 2.8 – Metodologia de projeto de produtos modulares segundo Scalice (2003).

2.4– Considerações finais

Este capítulo apresentou os fundamentos para a condução do processo de projeto. Inicialmente, foi salientada a importância de realizar o processo de projeto de forma organizada e com condições de acompanhar o cumprimento de cada fase, etapa ou tarefa. A visão metodológica do processo de projeto segundo diversos autores foi mostrada, dando ênfase na metodologia mais difundida, desenvolvida por Pahl e Beitz (1996).

A seguir, foram apresentadas diversas ferramentas de auxílio ao processo de projeto, cada qual atuando numa fase do processo. Essas ferramentas são as mais difundidas entre as principais metodologias existentes. Algumas delas serão importantes no auxílio ao desenvolvimento da metodologia a ser proposta por esta tese.

Saindo do escopo genérico das metodologias de projeto, foram apresentados os fundamentos relacionados ao desenvolvimento de sistemas modulares. Foram apresentados diversos pontos de vista relacionados ao desenvolvimento desse tipo de projeto, apresentando seus benefícios, características, e modalidades de abordagem.

Os sistemas modulares foram abordados no seu contexto mais amplo, o que faz com que seja necessário caracterizar o enfoque sobre que tipo de projeto modular será desenvolvido pela metodologia a ser apresentada.

Por fim, foram exploradas algumas metodologias de projeto já existentes para o desenvolvimento de produtos e sistemas modulares. A análise dessas metodologias fornece vários recursos importantes para se propor uma nova abordagem metodológica para sistemas modulares, visto que nenhuma das metodologias exploradas se enquadra na necessidade de desenvolvimento dos sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis.

CAPÍTULO 3

SISTEMAS MECÂNICOS DE PRECISÃO RECONFIGURÁVEIS

O objetivo deste capítulo é apresentar os fundamentos relacionados ao desenvolvimento de sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis.

Inicialmente, será definida qual é a abordagem utilizada para conceituar sistemas mecânicos de precisão. A seguir, será apresentada uma nova linha de pesquisa que segue uma tendência mundial, o desenvolvimento de sistemas de manufatura reconfiguráveis.

A partir dessas informações, o capítulo parte para a apresentação da abordagem proposta para o projeto de sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis.

3.1 – Sistemas mecânicos de precisão

A primeira dúvida que aparece quando se fala em “sistemas de precisão” é o conceito exato de “mecânica de precisão”.

Sempre que se discutem ou se descrevem assuntos relacionados à Mecânica de Precisão, não se têm dúvidas sobre a importância estratégica deste tema no desenvolvimento tecnológico do país, e sempre se têm sugestões generalizadas acerca de seu significado.

No entanto, logo se depara com a questão de delimitar precisamente a definição. Neste intuito, apela-se, muitas vezes, ao uso de outros termos como: mecânica fina, micromecânica, técnica de aparelhos de precisão etc., que alcançaram certo entendimento, mas que também não possuem uma caracterização satisfatória ou adequada sobre todos os aspectos que se deseja ver enquadrado no termo genérico “Mecânica de Precisão”.

Considerando os aspectos que são necessários dominar na construção de sistemas físicos avançados ou sistemas mecânicos de precisão, e evitando inserir as questões de competência de outras áreas tecnológicas (instrumentação, informática, pneumática, microeletrônica etc.), Höehne (1991), propõe como definição:

“Mecânica de Precisão é o conjunto de tecnologias em aprimoramento, necessárias à conformação geométrica de componentes de precisão e/ou sistemas de precisão que se

caracterizam pelas suas tolerâncias de fabricação estreitas e/ou pelas suas dimensões muito pequenas”.

De acordo com esta definição, um componente ou sistema de precisão apresenta características de melhorias na sua exatidão e repetitividade, resultantes da aplicação das tecnologias de:

- Óptica, microeletrônica, pneumática e outras áreas de conhecimento;
- Materiais convencionais ou especiais;
- Técnicas de controle;
- Processos de fabricação avançados; e
- Metrologia avançada.

A principais razões que levam à crescente demanda pelo aumento de precisão na engenharia de manufatura, segundo Stoeterau (1999), são:

- I.** Eliminar a formação de grupos de peças por dimensões nas montagens, especialmente na aplicação de técnicas automatizadas de montagem;
- II.** Aumentar a permutabilidade entre componentes;
- III.** Melhorar o controle de qualidade através de maiores capacidades de exatidão das máquinas-ferramenta, o que reduz o volume de material a ser retirado das peças usinadas, retrabalhos e inspeções convencionais;
- IV.** Obter maior vida dos componentes com relação ao desgaste e fadiga;
- V.** Obter maiores razões de miniaturização;
- VI.** Obter avanços significativos nos desenvolvimentos em ciência e tecnologia.

Alguns exemplos de sistemas mecânicos de precisão são:

- Máquinas-ferramentas para manufatura avançada, nos mais variados processos;
- Sistemas e equipamentos de medição;
- Instrumentos médicos e biomédicos;
- Instrumentos de laboratório;
- Equipamentos miniaturizados;
- Máquinas para realização de ensaios controlados em materiais e dispositivos; e
- Aquisição, processamento, transferência, armazenamento e edição de informações.

Cada sistema de precisão necessita de elementos mecânicos que exerçam uma grande influência na sua função, estabilidade mecânica, confiabilidade, vida útil e custos.

Os requisitos especiais dos sistemas mecânicos de precisão resultam das seguintes características:

- Utilização e integração de elementos de diversos campos da física em um aparelho (elementos construtivos mecânicos, ópticos, elétricos, eletrônicos e óptico-eletrônicos);
- Aproveitamento de alguns dos princípios até os limites da física;
- Rápidos ciclos e inovações das soluções técnicas (substituição dos princípios mecânicos por eletrônicos, eletrônicos por ópticos, analógicos por digitais, *hardware* por *software*);
- Automatização de numerosas funções internas de aparelhos;
- Obtenção de precisões maiores através da estruturação especial do produto (integração de funções ou divisão, arranjo com mínimos erros pela utilização de princípios invariantes, erros de maior ordem e ajustagem etc.);
- Miniaturização das dimensões (micromecânica);
- Grande variedade de soluções construtivas e de materiais; e
- Grande variedade de processos tecnológicos.

O projeto de sistemas mecânicos de precisão, em vista de todas essas particularidades apresentadas, exige que sejam respeitados princípios e orientações de projeto que não são comuns de serem empregados em sistemas mecânicos “convencionais”.

Por isto, foi formulado um apanhado dos principais princípios da engenharia de precisão para o projeto de sistemas mecânicos de precisão e ultraprecisão, com um enfoque maior no desenvolvimento de máquinas-ferramentas, que é o assunto com abordagem teórica mais difundida na literatura. Esse apanhado de informações está condensado no anexo 1 deste trabalho, na forma de um CD, cujos arquivos estão disponibilizados em formato *.htm*.

Os princípios de engenharia estudados e detalhados no anexo são:

- 1) Repetitividade;
- 2) Determinismo;
- 3) Princípio de alinhamento;
- 4) Separação de erros sistemáticos;
- 5) Simetria;
- 6) Separação do circuito metrológico do estrutural;
- 7) Distribuição elástica do carregamento;

- 8) Centros de ação;
- 9) Seleção de mancais e guias;
- 10) Gerenciamento térmico;
- 11) Projeto por restrição exata;
- 12) Ajustagem de mecanismos de precisão;
- 13) Seleção de materiais;
- 14) Isolamento de vibrações;
- 15) Acionamentos;
- 16) Sistemas de controle; e
- 17) Sensores de medição.

Observa-se que foi utilizado o termo “ultraprecisão” para descrever um determinado conjunto de máquinas-ferramentas. Para se entender um pouco mais este conceito, levando em consideração valores absolutos de incerteza atingível, a tabela 3.1 apresenta os níveis de incerteza alcançados de acordo com a dependência cronológica do grau de modernidade das máquinas. Esta divisão engloba máquinas, equipamentos de processo e medição, assim como os transdutores de deslocamento, pelos quais pode-se obter a resolução indicada (Tanigushi, 1994).

Tabela 3.1 - Divisão da usinagem segundo a resolução atingível (Stoeterau, 1999).

USINAGEM	PRECISÃO ATINGÍVEL			
	ANO	1980	2000	2005
NORMAL		5 μm	1 μm	0,5 μm
DE PRECISÃO		0,5 μm	0,1 μm	0,05 μm
DE ULTRAPRECISÃO		0,05 μm	0,01 μm	0,001 μm

É visível que o conceito evolui com o tempo, bem como os níveis de precisão e incertezas atingíveis. O limite físico para esta evolução está nas dimensões na ordem de grandeza atômica.

Para se ter uma idéia da incerteza dimensional exigida nas das tolerâncias aplicadas em alguns componentes usados em sistemas mecânicos, eletrônicos e ópticos, a tabela 3.2 agrupa uma série desses componentes, classificados quanto à tolerância exigida na sua fabricação.

Avaliando esses valores, conclui-se que é fundamental respeitar os princípios de engenharia mostrados para garantir qualidade no projeto de sistemas mecânicos de precisão.

Tabela 3.2 – Tolerâncias em componentes de produtos atuais (Stoeterau, 1999).

	tolerância	Componente mecânico	Componente eletrônico	Componente óptico
usinagem normal	200 μm	Tolerância básica da indústria e montagens automobilísticas	Componentes elétricos de uso geral	Carcaças de binóculos, telescópios e câmeras
	50 μm	Componentes mecânicos de uso geral em motores, etc	Transistores, diodos... Cabecote magnético para toca-fitas	Obturadores de câmeras Suportes para lentes em geral
usinagem de precisão	5 μm	Componentes de relógio de pulso	Resistores, condensadores...	Lentes
		Mancais de máquinas-ferramenta	Relês elétricos	Prismas
		Engrenagens	Placas de silício	Fibra óptica e conectores
usinagem de ultraprecisão	0,5 μm	Fusos de esferas recirculantes		
		Componentes de compressores		
		Mancais e guias de rolamentos	Escalas magnéticas, CCD	Lentes de precisão
		Servo válvulas hidráulicas	Osciladores de quartzo	Escalas ópticas
usinagem de ultraprecisão	0,05 μm	Mancais aerostáticos	Transdutor de pressão de filme fino	Espelhos poligonais para laser
		Mancais aerodinâmicos	Cabecote de impressora térmica	Espelhos para raios X
		Blocos padrão	Memórias de circuito integrado	Planos ópticos
		Raio de indentadores de diamante	Integração de grande escala (LSI)	Lentes de Fresnel de precisão
		Raio de gume de ferramentas de usinagem de ultraprecisão		Grades de difração óptica
usinagem de ultraprecisão	0,005 μm	Mesas X-Y para ultraprecisão		
			Integração de escala muito grande (VSLI)	Grades de difração óptica de ultraprecisão
			Filme fino super reticulado	

3.2 – Sistemas de manufatura reconfiguráveis - RMS

Custo, qualidade e a capacidade de responder rapidamente às mudanças do mercado são as três características fundamentais com as quais todas as empresas de usinagem devem se preocupar. O baixo custo é almejado desde a introdução do conceito de produção em massa, na década de 20. A seguir, iniciou-se a busca pela garantia de alta qualidade nos produtos. Por fim, surge a necessidade de uma rápida adaptação às mudanças bruscas de mercado (Koren, 2002).

As rápidas mudanças na tecnologia de processos e nos meios de manufatura exigem que sejam criados sistemas de produção que sejam facilmente atualizados e nos quais as novas tecnologias e novas funções sejam prontamente integradas. Essas condições exigem que se possua uma abordagem de fabricação que permita (Mehrabi et al, 1998):

- O lançamento rápido de novos modelos de produtos, que deve ser obtido muito rapidamente, com um ajuste rápido da capacidade do sistema de manufatura para atender às demandas de mercado;
- Uma rápida integração de novas funções e tecnologias de processo em sistemas já existentes; e
- Uma fácil adaptação a quantidades variáveis de produtos para nichos de mercado.

O sistema de manufatura utilizado para essa nova abordagem deve ser rapidamente projetado, capaz de ser convertido rapidamente para a produção de novos modelos de um produto, capaz de ajustar rapidamente sua capacidade de produção, e capaz de integrar

tecnologia e produzir e aumentar a variedade de produtos em quaisquer quantidades.

A maioria das indústrias utiliza sistemas de manufatura dedicados ou flexíveis para produzir seus produtos (Koren et al, 1999).

As **linhas de manufatura dedicadas (DML – *Dedicated Manufacturing Lines*)**, ou linhas *Transfer*, são baseadas numa automação fixa e de baixo custo, destinadas a produzir um grande volume de componentes. Cada linha dedicada é projetada para produzir um único componente, com uma alta produtividade alcançada pela operação de várias ferramentas de corte de forma simultânea, nas várias estações de usinagem. Quando a demanda é alta, o custo de cada componente torna-se relativamente baixo. Esses sistemas são economicamente viáveis quando a demanda supera a ofertas e estes podem operar na sua capacidade máxima, o que é cada vez mais difícil de se encontrar no mercado atual.

Os **sistemas de manufatura flexíveis (FMS – *Flexible Manufacturing Systems*)** podem produzir uma grande variedade de produtos com alterações no volume e forma, num mesmo sistema. Esses sistemas são compostos por máquinas-ferramentas numericamente comandadas (CNC) de uso geral, cujo custo é bastante elevado. Por se tratar de uma máquina para operação com uma única ferramenta de corte, sua produtividade é baixa, comparada às máquinas dedicadas. Isso torna o custo de fabricação por peça usinada relativamente alto, além de possuir uma capacidade produção muito inferior às máquinas dedicadas.

A tabela 3.3 apresenta uma comparação entre os sistemas de manufatura apresentados.

Tabela 3.3 - Comparação entre DML e FMS (Koren et al, 1999).

DML	FMS
Limitações: <ul style="list-style-type: none"> • Não é flexível • Feita para um componente • Capacidade fixa • Não muda a escala 	Limitações: <ul style="list-style-type: none"> • Custo elevado • Foco na máquina • Baixa produtividade • Máquinas de ferramenta única
Vantagens: <ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo relativo • Operação com múltiplas ferramentas 	Vantagens: <ul style="list-style-type: none"> • Flexibilidade • Permite mudanças de escala

Uma resposta economicamente viável às mudanças de mercado exige uma nova abordagem de sistemas de manufatura que não combine somente a alta produtividade das linhas de manufatura dedicadas com a flexibilidade dos sistemas de manufatura flexíveis, mas que também seja capaz de reagir de forma rápida e eficiente às mudanças impostas. Essa nova classe de sistema de manufatura é o **sistema de manufatura reconfigurável (RMS – *Reconfigurable Manufacturing Systems*)**, que é obtido através de:

- Projeto do sistema e de suas máquinas para uma estrutura ajustável que permita alterações de escala em resposta a demandas de mercado e a capacidade de adaptação do sistema e das máquinas à produção de novos produtos. A estrutura deverá ser capaz de ser ajustada em nível de sistema ou de máquina.
- Projeto de um sistema de manufatura de acordo com a família de componentes a serem produzidos, com a flexibilidade exigida adaptada para cada componente de toda a família de peças solicitadas.

Algumas características do sistema de manufatura reconfigurável (RMS) podem ser vistas na tabela 3.4. O RMS é projetado para atender situações onde tanto a produtividade quanto a capacidade do sistema de se adaptar às mudanças, é de vital importância. Três coordenadas – **capacidade, funcionalidade e custo** – definem a diferença entre o RMS e os sistemas de manufatura tradicionais DML e FMS.

Tabela 3.4 – RMS combina características dos sistemas dedicados e flexíveis.

Característica	DML	RMS	FMS/CNC
Estrutura da máquina	Fixa	Ajustável	Fixa
Foco do sistema	Componente	Família comp.	Máquina
Capacidade de escala	Não	Sim	Sim
Flexibilidade	Não	Adaptável	Geral
Operação com ferramentas simultâneas	Sim	Sim	Não

Uma definição mais exata de um sistema de manufatura reconfigurável é (Koren et al., 1999):

“Um sistema de manufatura reconfigurável (RMS) é projetado desde o início do processo produtivo para permitir uma mudança rápida na estrutura, bem como nos componentes de hardware e software, de modo a se ajustar rapidamente à capacidade de produção e à funcionalidade dentro de uma família de componentes em resposta a mudanças bruscas no mercado ou nos requisitos da regulamentação.”

Se o sistema e suas máquinas não são projetados desde o início para serem reconfiguráveis, o processo de reconfiguração poderá tornar-se lento e sem praticidade. Os sistemas projetados inteiramente para serem reconfiguráveis ainda não existem, nem suas metodologias de projeto e de reconfiguração. Entretanto, muitas das tecnologias necessárias para este desenvolvimento já são empregadas mundo afora (Koren et al., 1999).

3.2.1 – Tecnologias básicas para a reconfiguração

Um denominador comum entre os sistemas de manufatura atualmente empregados, DML e FMS, é a utilização de *hardware* e *software* fixos (Koren et al., 1999). Para se trabalhar com um sistema reconfigurável, é necessário que se disponha de duas tecnologias: no *software*, controles de arquitetura aberta modular que permitam que se faça a reconfiguração do controlador (Koren et al, 1998); e no *hardware* da máquina, máquinas-ferramentas modulares que possibilitem ao usuário a obtenção de diferentes configurações de máquina (Mehrabi e Ulsoy, 1997).

Essas tecnologias emergentes mostram uma tendência para o projeto de sistemas com *hardware* reconfigurável e *software* reconfigurável, como mostrado na figura 3.1.

	Máquinas com <i>Hardware</i> fixo	<i>Hardware</i> reconfigurável
Sem <i>software</i>	Máquinas manuais ou dedicadas (DML)	_____
<i>Software</i> de controle fixo	Máquinas CNC, Robôs, FMS	Máquinas CNC modulares
<i>Software</i> reconfigurável	Controladores de arquitetura aberta e modular	Sistemas de manufatura reconfiguráveis (RMS)
Regras de configuração do sistema e modelamento econômico →		

Figura 3.1 – Classes de sistemas de manufatura (Koren, 1999).

Para ser efetiva, a aplicação de sistemas de manufatura reconfiguráveis deve ser feita de forma que permita ações de reconfiguração simultânea em todo o sistema de manufatura, no *hardware* das máquinas e no *software* de controle. Com isto, a flexibilidade adquirida pelo sistema não só vai absorver variações nos componentes produzidos, mas também no próprio sistema, caso necessite sofrer alterações drásticas de produtividade pressionadas pela demanda.

Tanto os sistemas reconfiguráveis quanto as máquinas reconfiguráveis devem ser projetados desde o início do processo produtivo para que adquiram a condição real de serem reconfiguráveis, e devem ser criadas utilizando módulos básicos de *hardware* e *software* que possam ser facilmente e rapidamente integrados através de interfaces conhecidas.

Para completar os requisitos de uma estrutura de máquina modular e aberta, os módulos e suas interfaces devem ser especificados de uma maneira bem definida e padronizada.

Quando se avalia o módulo de uma máquina, três interfaces principais podem ser identificadas: interface mecânica, alimentação de força ou potência e interface de controle ou informação. Somente com a utilização de interfaces bem definidas é que os sistemas de manufatura reconfiguráveis se tornarão abertos o suficiente para que sejam melhorados ou evoluídos, ao invés de serem simplesmente substituídos (Koren et al., 1999).

Os avanços nos sistemas RMS não acontecerão sem que se possuam máquinas-ferramentas contendo estruturas modulares com as características necessárias para uma rápida reconfiguração. Entretanto, a falta de metodologias de projeto para máquinas-ferramentas e a falta de desenvolvimentos relacionados a interfaces são as maiores barreiras que impedem os avanços na modularidade (Koren et al., 1999). A padronização de interfaces no *hardware* possui uma complexidade técnica inerente, enquanto no *software* isso é mais fácil de ser realizado.

Uma iniciativa lançada pela União Européia no início dos anos 90 (Atkins, 1990), formulou uma estratégia para o setor de máquinas-ferramentas na Europa. Numa das formulações, o relatório apresentado descreve que se máquinas-ferramentas fossem projetadas e construídas modularmente, então os fabricantes de máquinas-ferramentas poderiam se especializar em produzir módulos particulares, ao invés de produzir o sistema completo. Os sistemas completos seriam produzidos por empresas responsáveis somente pela integração, de acordo com as necessidades específicas de cada cliente.

Esta estratégia requer a divisão da máquina-ferramenta em um conjunto de unidades funcionais autônomas com interfaces adequadas que possam ser montadas para formar sistemas completos de acordo com necessidades particulares. Esta iniciativa de promover a modularização é um grande passo para o desenvolvimento de sistemas reconfiguráveis.

3.2.2 – Características requeridas para sistemas reconfiguráveis

As principais características requeridas para os sistemas reconfiguráveis são:

- **Modularidade** – Num RMS, todos os principais componentes são modulares, como os elementos estruturais, eixos, controles, software e ferramental.

- **Integrabilidade (capacidade de integração entre os componentes)** – Os módulos de controle e da máquina são projetados com interfaces adequadas para permitir a integração dos componentes. O rendimento do sistema integrado é previsto com base no rendimento dos seus componentes e das interfaces entre os módulos de *hardware* e de *software*.
- **Adaptabilidade (capacidade de adaptação do sistema)** – Essa característica possui dois aspectos: controle adaptável e flexibilidade adaptável. A flexibilidade adaptável significa que as máquinas são construídas de acordo com a família de componentes que estão sendo produzidos e permite somente a flexibilidade necessária para estes componentes específicos, entretanto com redução de custo. O controle adaptável é obtido pela integração de módulos de controle com a ajuda de uma tecnologia de arquitetura aberta, permitindo que se obtenha exatamente as funções de controle que são necessárias.
- **Convertibilidade (capacidade de conversão do sistema)** – Num sistema reconfigurável, um modo de operação otimizado é configurado em uma seqüência de ajustes para atender a cada lote de componentes fabricado durante um certo período, com um tempo de conversão pequeno entre cada ajuste do sistema. Essas conversões envolvem mudanças de ferramentas, sistemas de fixação e programa de usinagem de cada componente, bem como podem exigir operações de ajuste manual em algum grau de liberdade da máquina.
- **Diagnosticabilidade (capacidade de gerar diagnóstico)** – A detecção de componentes rejeitados pela qualidade é crítica para reduzir o tempo de colocação da máquina em regime de operação adequado em RMS. Como esses sistemas são feitos para sofrerem várias reconfigurações e modificações com mais freqüência, torna-se essencial fazer com que o novo sistema reconfigurado produza componentes com a qualidade requerida.

A modularidade, a integrabilidade e a diagnosticabilidade reduzem o tempo e o esforço para realizar a reconfiguração. A adaptabilidade e a convertibilidade reduzem os custos.

Um sistema que possua essas características listadas, possuirá um alto nível de reconfigurabilidade.

3.2.3 – Diretrizes de projeto em nível de sistema em RMS

Sistemas reconfiguráveis (RMS) podem custar menos do que sistemas flexíveis (FMS) ou mesmo as linhas dedicadas (DML). O principal motivo é que o RMS é instalado precisamente de acordo com a capacidade de produção e funcionalidade necessárias e pode sofrer evoluções tanto na capacidade quanto na funcionalidade, exatamente quando for necessário. Sistemas

RMS permitem que se obtenha uma capacidade extra exatamente quando requerida, o que resolve o problema comum da sub-utilização de capacidade produtiva das linhas dedicadas.

Da mesma forma, os sistemas RMS adicionam funcionalidade exatamente quando necessário, ao contrário de sistemas FMS, que dispõem de todos os recursos possíveis para flexibilização e, muitas vezes, não exploram toda sua capacidade, deixando parados muitos recursos dos equipamentos. O custo de não utilizar toda a potencialidade de uma máquina ou sistema de manufatura é alto, visto que todos os recursos disponíveis foram pagos.

A configuração de um sistema é definida como sendo um conjunto de máquinas, seus controles e todas as conexões existentes. As máquinas podem ser compostas por módulos ou podem ser consideradas como sendo os módulos do sistema. Assim, a definição de tarefa para configuração em nível de sistema para um RMS fica:

*“Dados um componente ou família de componentes; uma produtividade requerida para cada um dos lotes desses componentes; bibliotecas contendo um conjunto fixo de módulos de máquina (cada um descrito pela forma, interfaces, cinemática, e rigidez), as restrições relacionadas à montagem desses módulos e um conjunto fixo de máquinas (cada qual descrita por um conjunto de cinemáticas, processos etc.); e também dadas restrições que descrevem a seqüência possível de processamento de cada componente; **construir** configurações que atendam a todos esses requisitos, ou **identificar deficiências** nos conjuntos de máquinas ou módulos de máquinas fornecidos.” (Koren et al., 1999).*

O conceito de trabalho com sistemas de manufatura diz respeito à garantia de processamento de toda a cadeia produtiva para se chegar num componente com sua forma final. Assim, esse sistema envolve todas as operações necessárias para a produção, bem como uma adequada avaliação da seqüência de operações para se atingir os resultados na qualidade exigida.

A configuração de um sistema parte de um conjunto existente de máquinas e módulos construtivos de máquinas, projetados de acordo com a família de componentes que será produzida, prevendo também a produtividade e escala de produção exigidas para cada um desses componentes.

Para família de componentes semelhantes, o processo parte de um sistema reconfigurável existente, identificando suas deficiências e atuando na substituição de módulos ou máquinas para adaptá-lo à nova condição. Assim, é possível tanto um arranjo entre diferentes máquinas

para compor um sistema de manufatura ou, numa necessidade de reconfiguração mais específica, promover mudanças nas configurações das máquinas que compõem o sistema.

A capacidade de um sistema se realizar mudanças rápidas na sua configuração é altamente dependente da utilização de uma estrutura modular. Assim, um dos objetivos principais no desenvolvimento de RMS é o desenvolvimento de módulos de máquina, que podem ser rapidamente substituídos e integrar sistemas diferentes e distintos de manufatura.

Para tanto, é necessário que as várias máquinas possuam uma mesma forma de montagem e um mesmo sistema de controle baseados numa padronização das interfaces entre os diversos módulos. Essa padronização não deve ser somente física, mas também deve envolver o *software* de controle e gerenciamento do processo.

As interfaces podem ser divididas em interfaces mecânicas e interfaces para transmissão de dados, energia e material. As interfaces mecânicas transmitem forças e momentos, alinham elementos e integram módulos. As demais cuidam do suprimento com o meio requerido.

3.2.4 – Máquinas-ferramentas reconfiguráveis

As máquinas-ferramentas reconfiguráveis devem ser capazes de realizar usinagem nos processos de torneamento, fresamento, furação e rosqueamento, ou uma combinação desses processos. Numa abordagem mais abrangente de fabricação, deve-se considerar a combinação da usinagem com outras atividades como o tratamento térmico, montagem e metrologia. A discussão no desenvolvimento de sistemas RMS considera somente processos de usinagem convencional com ferramentas de geometria definida.

O desafio neste caso é projetar máquinas-ferramentas reconfiguráveis otimizadas com relação aos custos, produtividade, qualidade final dos componentes produzidos e o tempo de reconfiguração necessário.

As máquinas-ferramentas podem ser reconfiguradas por ações de remoção, adição ou substituição de módulos ou unidades constituintes do sistema ou da máquina. Uma vez constituído um conjunto de módulos que atenda às necessidades de fabricação de um componente ou família de componentes, essas operações tornam-se facilmente realizáveis, visto que todos os módulos já estarão corretamente descritos e com suas interfaces devidamente preparadas. Um modelamento em *software* apropriado permitirá realizar a montagem virtual de diversas configurações que atendam às necessidades requeridas.

Um exemplo esquemático de obtenção de uma máquina-ferramenta reconfigurável a partir de módulos disponíveis é mostrado na figura 3.2. Pela figura, os requisitos de operação para produzir os componentes especificados são inseridos num sistema com uma biblioteca de

módulos parametrizados. A partir da combinação desses módulos, várias concepções são geradas como soluções viáveis para a produção do componente ou família de componentes.

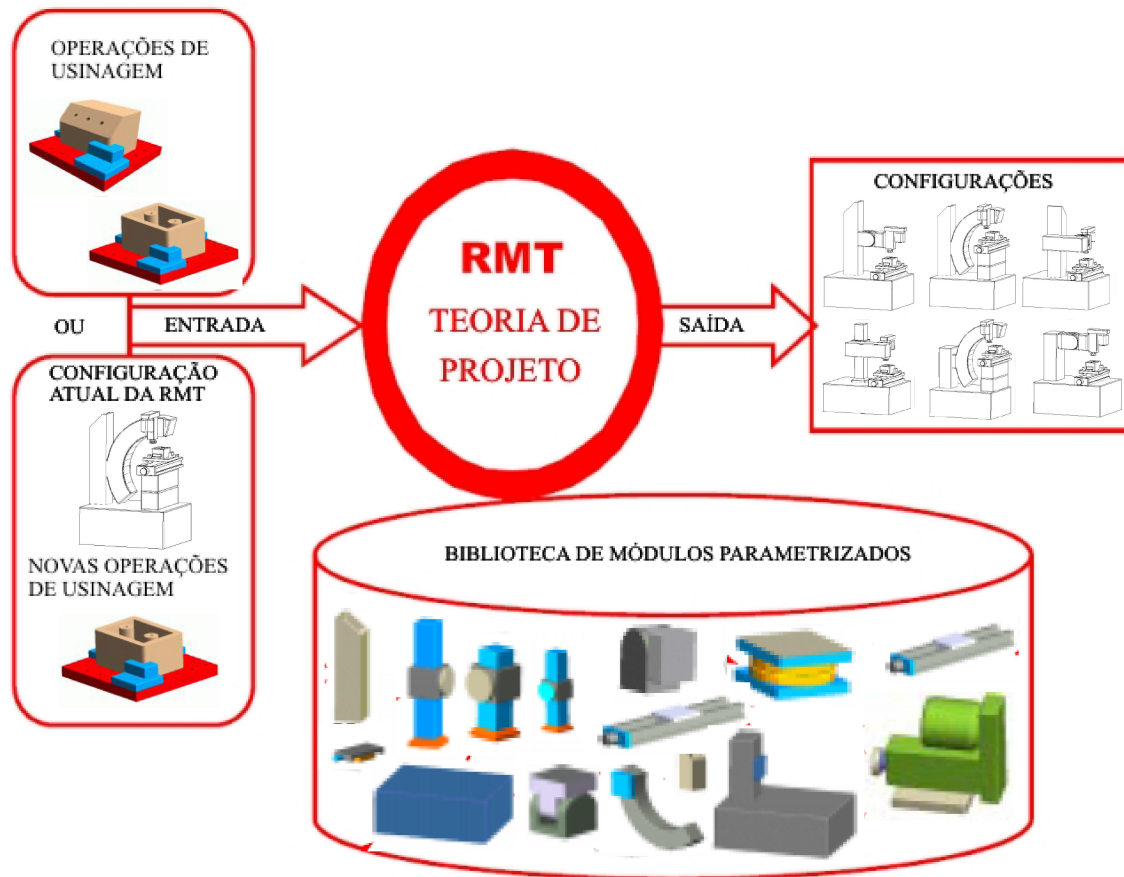


Figura 3.2 – Obtenção de uma máquina-ferramenta a partir de módulos (Koren, 1999).

A necessidade de reconfiguração de uma máquina pode ser motivada pelas seguintes razões:

- ⇒ **Variação de tamanho** – Para poder produzir componentes com diferentes tamanhos, garantindo as tolerâncias especificadas de fabricação, pode ser necessário utilizar alguns módulos da máquina com diferentes tamanhos como cabeçotes, eixos, entre outros.
- ⇒ **Variação de geometria do componente** – Se um novo componente a ser fabricado possui uma geometria mais complexa, pode ser necessário adicionar novos eixos ou graus de liberdade à máquina.
- ⇒ **Variação no volume de produção** – Com o aumento no volume de produção, pode ser necessário substituir, por exemplo, um cabeçote único de uma máquina por um cabeçote duplo ou mesmo triplo para aumentar a produtividade da mesma. Unidades de cabeçotes com diferentes faixas de velocidade e potência, ou com classes diferentes de precisão de giro são bons exemplos de aplicação em máquinas reconfiguráveis. Na figura 3.3 é

apresentado um exemplo de uma máquina que possui quatro cabeçotes ativos sobre uma mesa rotativa. Cada cabeçote possui seu avanço próprio na ferramenta. Uma configuração mais simples dessa máquina poderia possuir um só cabeçote ativo. Esta configuração poderia ser necessária caso o componente a ser furado necessitasse de um único furo e fosse grande o bastante para impedir a montagem dos demais cabeçotes na estrutura.

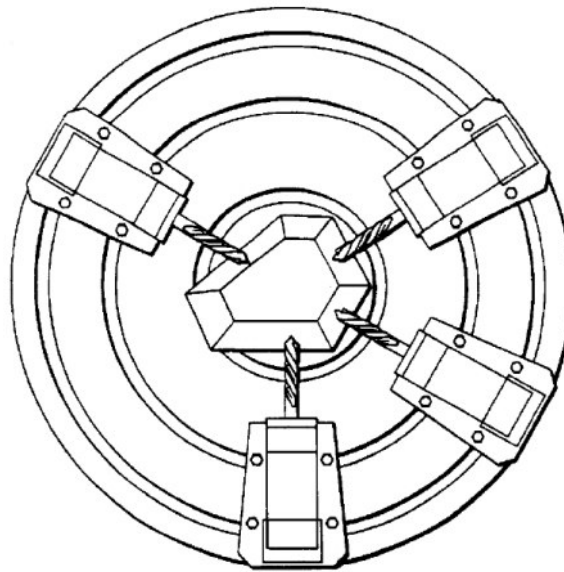


Figura 3.3 – Vista superior de uma máquina-ferramenta com múltiplos cabeçotes ativos.

- ⇒ **Variação no processo de usinagem** – Quando há mudança no processo de usinagem, não é necessário somente mudar a ferramenta de corte, pois pode ser necessário promover mudanças também na configuração da máquina. Por exemplo, pode ser necessário adicionar um cabeçote de retificação num centro de usinagem ou mesmo no caso da máquina apresentada na figura 3.3, onde pode ser necessário não só realizar furações, mas também operações de fresamento e torneamento numa mesma fixação.
- ⇒ **Variação nas tolerâncias de usinagem** – As tolerâncias atingíveis por uma máquina dependem das tolerâncias de cada um dos módulos que a compõem e também da qualidade das interfaces entre esses módulos. Assim, podem ser necessários ajustes nas interfaces ou substituições de módulos por outros com melhores características de movimento.

Todo o planejamento de concepções para atenderem a essas variações nos componentes que serão produzidos deverá ser feito nos estágios iniciais de composição do sistema de manufatura reconfigurável. Assim, todas as necessidades de concepção de máquina ou

sistema para atender à fabricação de um determinado componente já terão sido previstas e não se correrá risco de não se conseguir uma concepção de máquina ou sistema para fabricar qualquer dos componentes propostos.

A biblioteca de módulos parametrizados de um sistema reconfigurável é montada de acordo com os objetivos de produção deste sistema. Se for possível utilizar conjuntos padronizados fornecidos por terceiros, estes podem ser adquiridos somente no momento em que forem necessários, desde que sejam respeitadas e consideradas as condições de interfaceamento fornecidas pelos fabricantes.

Em alguns casos, a combinação entre os módulos disponíveis vai levar à possibilidade de se formar inúmeras concepções distintas. A escolha da concepção a ser empregada pode levar em consideração diversos fatores como um balanceamento de utilização de certos módulos mais empregados em outras concepções, prevenindo o desgaste, a condição de já existir uma montagem anterior entre alguns dos módulos previstos, a própria facilidade de integração entre os módulos, entre outras considerações.

O conceito de projeto modular para uma máquina-ferramenta não é novo, mas não vem sendo amplamente utilizado na prática. Os principais problemas encontrados no projeto modular e no projeto para reconfiguração são (Koren et al., 1999):

- (1) Metodologia de projeto para máquinas-ferramentas reconfiguráveis: o desenvolvimento de um procedimento matemático para sintetizar e validar as máquinas-ferramentas reconfiguráveis é o maior desafio.
- (2) Interfaces: não é fácil montar uma máquina modular de forma suficientemente precisa para que esta atenda aos requisitos de montagem requeridos para a máquina toda. As interfaces devem ser padronizadas e fabricadas com garantia de qualidade para a futura montagem. Um correto ajuste e medição do alinhamento entre os módulos também deve ser atingido. A redução de rigidez estática e dinâmica nas interfaces também é um problema a ser resolvido.
- (3) Autonomia do módulo: a maioria dos módulos necessita de suprimento de energia e é conectada ao controlador por cabos. Alguns necessitam de ar comprimido e pressão hidráulica. Os tubos e cabos necessários são fontes de ruído. Assim, a localização de bombas hidráulicas, compressores e acumuladores pode ser um obstáculo para a reconfiguração das máquinas. É desejável que cada módulo opere de forma independente e autônoma.

3.2.5 – Metodologia de projeto para máquinas-ferramentas reconfiguráveis

Dentro do escopo de desenvolvimento de sistemas reconfiguráveis, alguns pesquisadores têm concentrado seus esforços no desenvolvimento de uma metodologia própria para máquinas-ferramentas reconfiguráveis.

Landers, Min e Koren (2002), apresentaram requisitos mecânicos para as máquinas-ferramentas reconfiguráveis. Estes requisitos estão baseados em duas características básicas para a máquina-ferramenta: a capacidade de gerar os movimentos relativos especificados, e a capacidade de satisfazer as exigências de tolerâncias para os componentes usinados. A geração dos movimentos relativos é função da configuração cinemática da máquina. O atendimento das tolerâncias especificadas depende do controle das fontes de erro, como os erros geométricos dos componentes, erros de montagem, deformações térmicas, entre outras fontes.

A viabilidade cinemática de uma máquina é a capacidade que esta máquina possui de realizar os movimentos relativos especificados para produzir as operações de usinagem pré-determinadas. Como o projeto de uma máquina reconfigurável é feito depois de se analisar o conjunto de operações a serem realizadas pela mesma em todos os componentes a serem produzidos, a escolha dos graus de liberdade da máquina vai envolver todas as necessidades cinemáticas para a usinagem desses componentes. Cada componente será produzido com uma configuração de máquina apropriada. A cada reconfiguração, os módulos que irão compor a nova estrutura já estarão disponíveis por já terem sido previstos no planejamento.

Um dos pontos mais críticos para o projeto de máquinas-ferramentas é a rigidez estrutural. Deformações estáticas causam erros geométricos, enquanto que características estruturais dinâmicas mal dimensionadas podem causar a ocorrência de ruído. Baseado na experiência dos projetistas, as máquinas reconfiguráveis são projetadas para possuir as características de rigidez necessárias para cada operação específica. Assim, a rigidez estrutural da máquina deve ser garantida para todas as suas configurações e para todas as operações que for realizar.

Durante o processo de análise, deve-se tomar cuidado com a rigidez nas interfaces, pois estas influenciam drasticamente no comportamento global da máquina.

Uma alternativa para o projeto de rigidez estrutural da máquina é o uso de sistemas de isolamento de vibrações, como proposto por Yigit e Ulsoy, 2000.

Um outro ponto crítico no projeto de máquinas-ferramentas é a qualidade geométrica. Os erros geométricos da máquina induzem erros nos componentes usinados, comprometendo sua qualidade. Fontes de erros geométricos em máquinas-ferramentas incluem erros de tolerância em componentes da máquina, erros de trajetória nos movimentos da máquina, deformações

provenientes do peso ou forças de usinagem, deformações térmicas, batimento em cabeçotes e erros na montagem de componentes da máquina.

A estrutura mecânica das máquinas reconfiguráveis é projetada de modo que os erros geométricos não comprometam a qualidade dos componentes usinados. O projeto é realizado com base na experiência dos projetistas.

Duas considerações importantes devem ser levadas em conta. Primeiramente, como as máquinas reconfiguráveis são projetadas para produzir um conjunto de componentes diferentes, a qualidade da máquina deve atender às exigências do componente com tolerâncias mais apertadas, permanecendo com essa característica na usinagem de todos os demais componentes. Em segundo lugar, deverão existir procedimentos de montagem para garantir a qualidade na formulação de todas as configurações da máquina, já que alguns módulos podem necessitar ser reposicionados ou substituídos.

De um modo geral, a formulação das configurações das máquinas-ferramentas reconfiguráveis segue a metodologia proposta na figura 3.4.

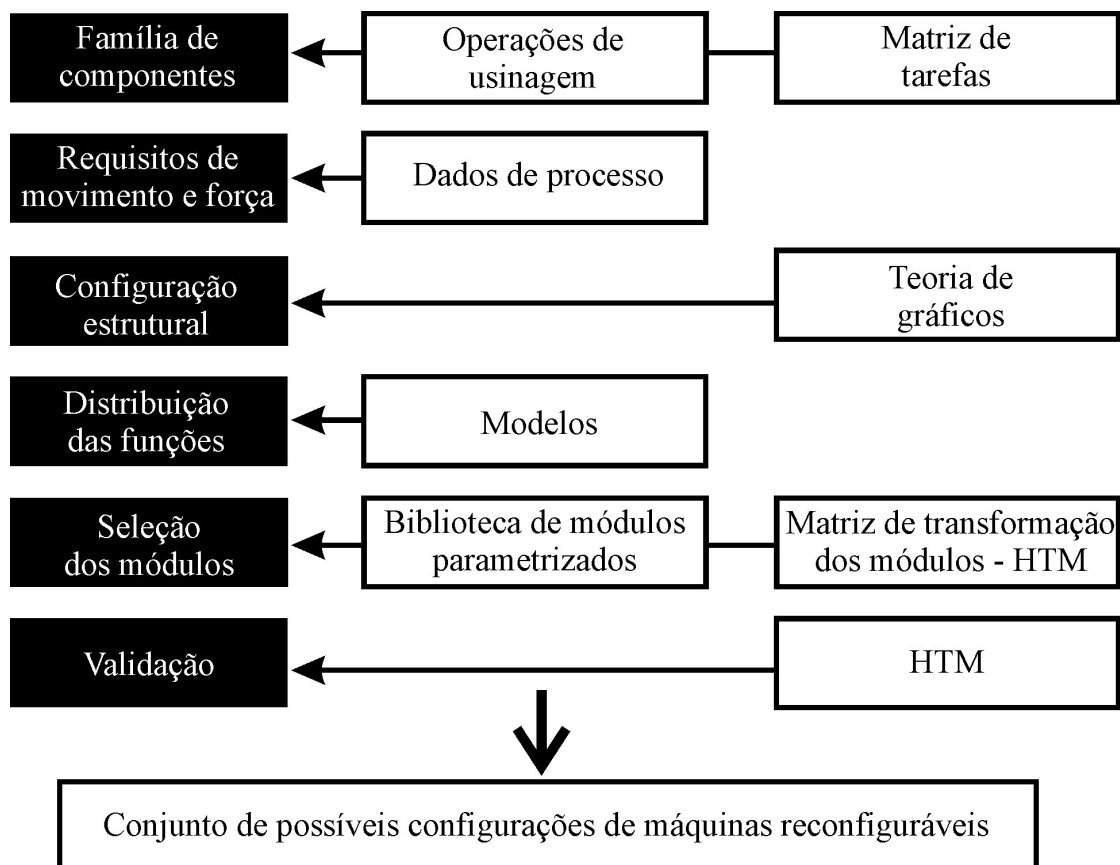


Figura 3.4 – Metodologia para o projeto cinemático de uma RMT (Landers e Min, 2001).

A partir do componente ou da família de componentes, são avaliadas todas as operações de usinagem necessárias. Estas operações são descritas na forma de matrizes de tarefas, através do emprego de matrizes de transformação homogênea, descritas por Slocum (1992).

Das operações de usinagem, são identificadas as necessidades de cinemática e de dinâmica para cada operação. Essas necessidades são transformadas em dados de processo para a programação de cada operação. Além disso, são identificados os graus de liberdade necessários para realizar cada uma das operações.

O próximo passo consiste em identificar configurações estruturais que abranjam todas as necessidades das operações de usinagem. Para estudar essas configurações, Moon (2000), desenvolveu uma teoria de gráficos, que permite que sejam avaliadas as necessidades cinemáticas de cada módulo que irá compor a máquina. A teoria se baseia no estudo dos componentes que formam a máquina e suas interfaces.

Um exemplo da aplicação da teoria de gráficos é apresentado na figura 3.5, onde duas configurações de máquina são mostradas. A numeração 0 ou 1 indica se o componente possui atuação paralela ou perpendicular com relação à ferramenta de corte da máquina.

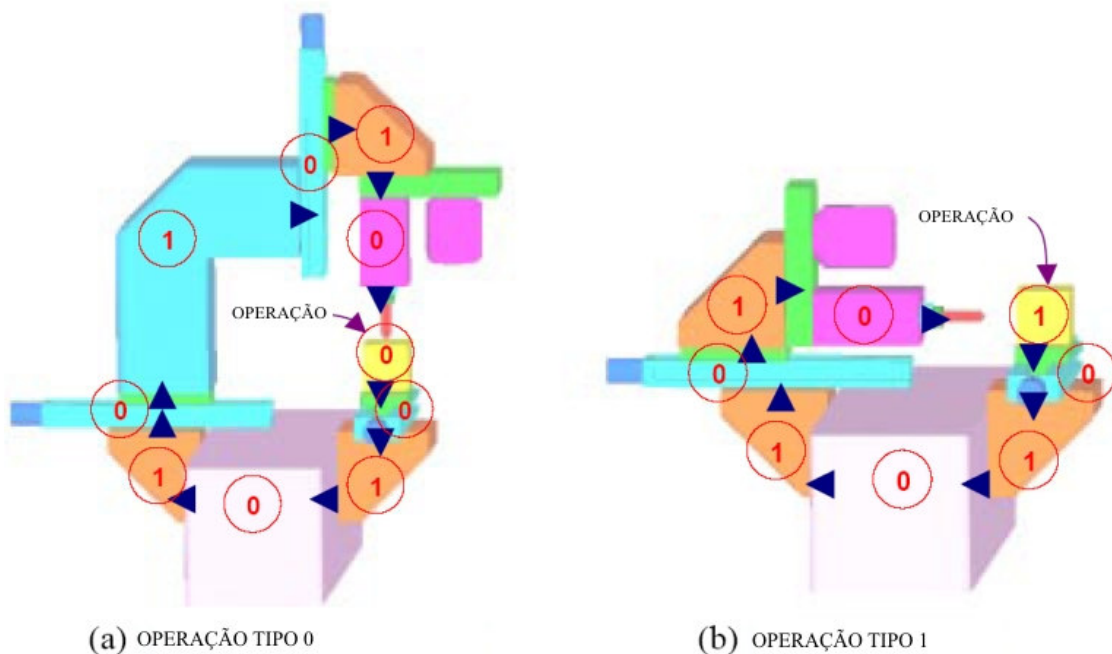


Figura 3.5 – Exemplos de aplicação da teoria de gráficos (Moon, 2000).

A partir da definição da forma global da máquina, é feito um estudo para a distribuição das funções responsáveis pelos movimentos requeridos entre os diversos módulos previstos. Cada operação de usinagem prevista possui um modelo cinemático teórico próprio. Estes modelos permitirão distribuir as funções entre os módulos, como exemplificado na figura 3.6.

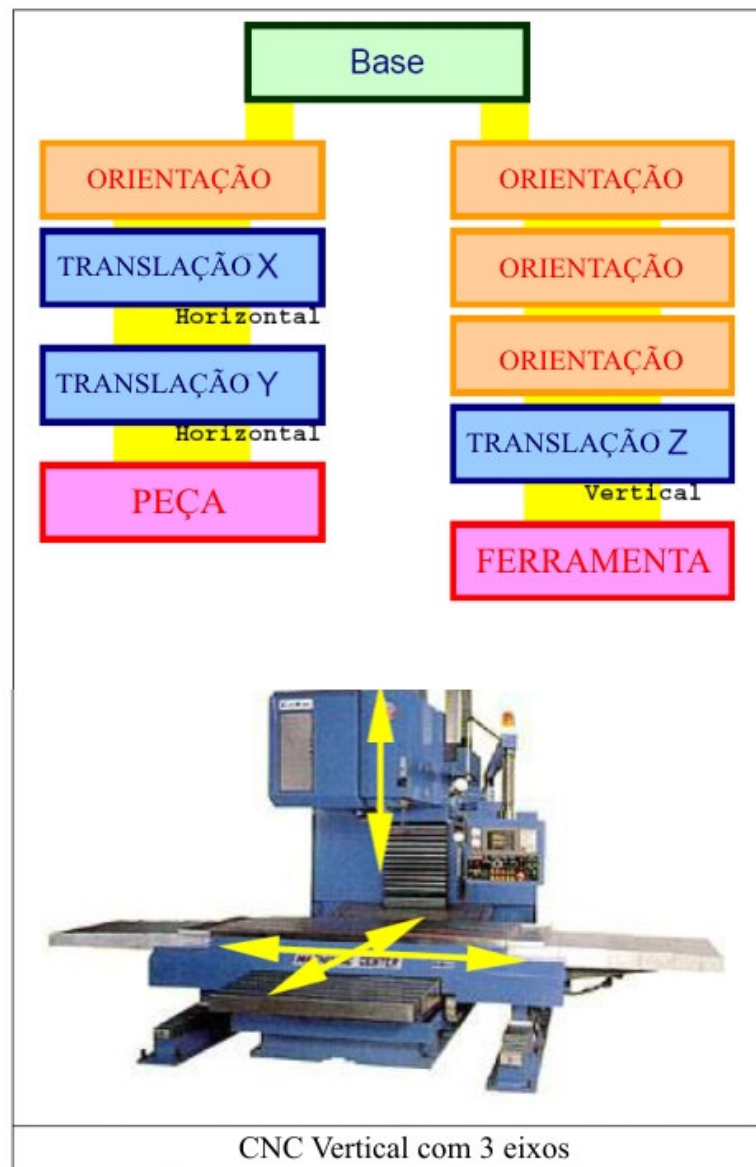


Figura 3.6 – Distribuição das funções para compor uma máquina-ferramenta.

Definida a distribuição das funções, o próximo passo consiste em selecionar os módulos que irão compor a máquina, a partir de uma biblioteca de módulos parametrizados. Cada módulo está representado nessa biblioteca através de uma matriz de transformação homogênea que descreve seus movimentos, bem como uma indicação sobre a compatibilidade deste módulo com os demais módulos existentes na biblioteca, os requisitos de alimentação de energia e interfaces de controle.

A figura 3.7 exemplifica a geração de uma concepção a partir de módulos existentes na biblioteca de componentes parametrizados, com indicação da matriz de transformação homogênea do módulo, da tarefa e da solução encontrada.

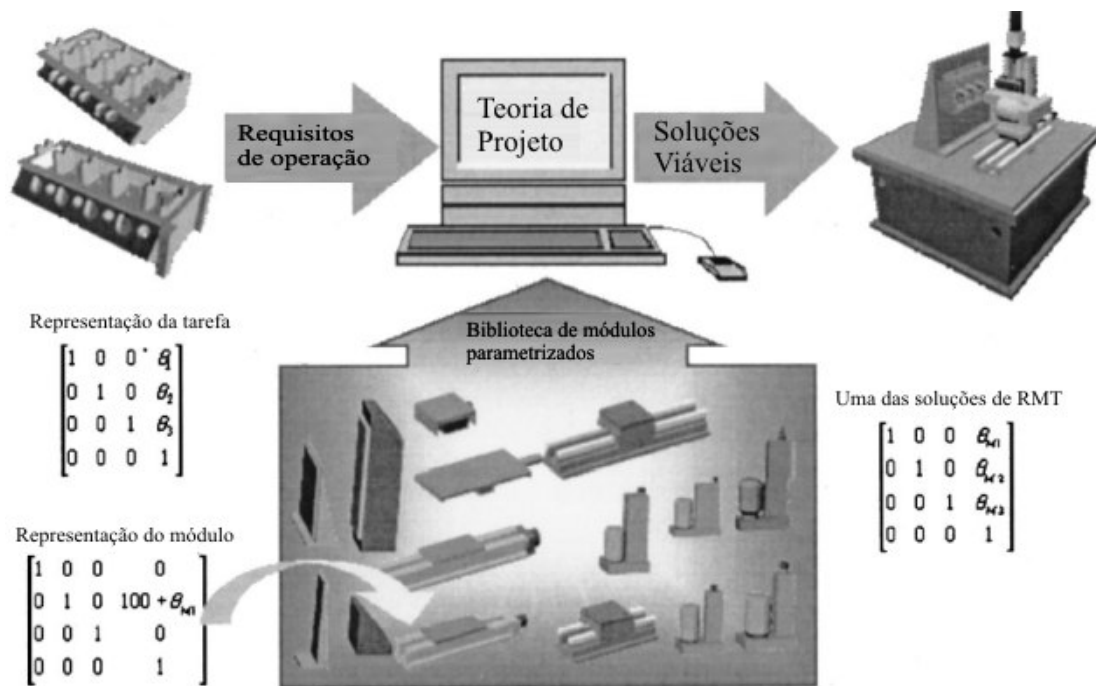


Figura 3.7 – Seleção de uma configuração a partir de módulos parametrizados (Moon, 2000).

A última atividade consiste na validação cinemática da máquina. Isto é realizado pela comparação entre as matrizes homogêneas das tarefas que serão realizadas com a matriz resultante da integração dos módulos individuais. Se a máquina for adequada, sua matriz deve possuir pelo menos os mesmos graus de liberdade e amplitudes de movimentos exigidos pelas operações de usinagem.

Dependendo da variedade de módulos parametrizados disponíveis, várias soluções de concepções podem ser encontradas para realizar as tarefas de usinagem de um componente.

Cabe ao projetista escolher qual é a mais adequada para atender às suas necessidades, levando em consideração a complexidade da máquina, a facilidade de montagem e desmontagem, as características geométricas globais, entre outros aspectos.

3.3 – Abordagem proposta para o projeto de sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis

Como foi proposto no início deste capítulo, e devidamente documentado no anexo 1, trabalhar com sistemas mecânicos de precisão ou ultraprecisão exige o domínio de princípios de engenharia bem mais complexos do que os utilizados para sistemas mecânicos convencionais.

Além disso, o custo envolvido para a aquisição de componentes e sistemas de altíssima qualidade, bem como do ferramental utilizado para construir ou controlar a qualidade destes sistemas, é muito mais alto do que os sistemas convencionais. Outro agravante é que a disponibilidade destes componentes é muito menor. Em alguns casos, pouquíssimos fabricantes possuem condições de fornecer um determinado componente ou sistema, havendo até a possibilidade de existirem restrições de fornecimento desses componentes, se forem utilizados para aplicação em áreas estratégicas.

Componentes importados podem levar meses para serem disponibilizados no Brasil. A pouca procura por alguns desses produtos, por serem altamente especializados, torna sua fabricação realizada por encomenda, o que leva muito tempo, além de todo o procedimento de importação, que também consome um tempo considerável.

Citando um exemplo, suponha-se que seja identificada a necessidade de um componente especializado, como um espelho com características geométricas que exijam o emprego de usinagem de ultraprecisão para a sua fabricação. Para se obter um espelho desses, existem três saídas possíveis. A primeira seria encomendar a fabricação deste espelho com algum dos fornecedores desse tipo de serviço. A segunda saída seria comprar uma máquina que permita a realização da fabricação deste espelho. A terceira saída é o desenvolvimento da máquina para usinar o espelho.

Em um ambiente de pesquisa é comum que os projetos sofram evoluções. Assim, o espelho dado como exemplo pode sofrer alterações na sua geometria para se adaptar aos avanços desta pesquisa. Isto é muito comum e caracteriza a necessidade de fabricação de uma família de componentes, e não somente uma única geometria do componente. Se a cada alteração necessária for feita uma nova encomenda de componentes, a dependência dos prazos de fabricação e entrega podem inviabilizar a pesquisa.

Por outro lado, o custo de aquisição de um equipamento com a flexibilidade necessária para produzir esta família de componentes pode ser muito mais alto do que todo o montante direcionado ao projeto de pesquisa, que necessita de somente algumas unidades dos componentes em questão e não justifica o valor necessário para adquirir uma máquina.

Esta lacuna de disponibilidade de sistemas de precisão para atenderem a necessidades específicas de pequenos lotes de componentes com características especiais pode ser preenchida através do emprego de sistemas reconfiguráveis. Fica então criada a terminologia referente aos “sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis”, abrangendo todas as aplicações de sistemas mecânicos de precisão apresentadas no início deste capítulo.

Da mesma forma que foi explorada no desenvolvimento de sistemas de manufatura e máquinas-ferramentas reconfiguráveis, a obtenção de diferentes concepções de máquinas-ferramentas ou sistemas de precisão e ultraprecisão pode ser feita a partir de módulos funcionais básicos disponíveis numa biblioteca de módulos. Esses sistemas podem ser máquinas para medição, máquinas para realização de ensaios específicos, instrumentos etc.

A partir de um conjunto inicial de módulos disponíveis, a cada nova necessidade, reconfigurações do sistema existente podem ser realizadas para atender aos novos requisitos, ou pode-se agregar novos módulos à biblioteca de módulos a fim de dar mais flexibilidade ao sistema reconfigurável.

Esses módulos disponíveis podem ser obtidos a partir de sistemas que integram equipamentos ociosos dentro do ambiente de trabalho. Neste caso, esses módulos não foram projetados inicialmente para ser parte de um sistema modular, o que torna necessário um trabalho de adequação das suas interfaces e um levantamento detalhado de suas características funcionais.

Esse problema de integração de componentes inicialmente não integráveis foge às características dos processos de projeto mais difundidos.

Se for considerada a dificuldade de obtenção de recursos para a compra de novos módulos, uma outra saída é a realização de um reprojeto em alguns dos módulos disponíveis para que estes passem a atender aos requisitos impostos pela nova reconfiguração projetada para o sistema, ou mesmo um projeto completo de um novo módulo necessário.

Em se tratando de sistemas de precisão e ultraprecisão, diversas considerações adicionais devem ser seguidas para garantir a qualidade do produto final, conforme as recomendações apresentadas no anexo 1. Muitas dessas considerações incidem diretamente sobre as interfaces entre os módulos do sistema. Assim, é necessário um controle adequado das condições de interfaceamento entre os módulos para garantir a qualidade global do sistema. Este é um dos grandes desafios a serem vencidos neste trabalho.

No próximo capítulo será apresentada uma metodologia para o projeto de sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis levando em consideração as observações aqui destacadas, surgindo como uma nova abordagem para a geração de soluções para sistemas mecânicos.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA DE PROJETO PARA SISTEMAS MECÂNICOS DE PRECISÃO RECONFIGURÁVEIS

O projeto de sistemas reconfiguráveis é uma abordagem particular sobre sistemas e produtos modulares. Sendo assim, as diretrizes gerais do projeto modular se aplicam a esses sistemas. O primeiro desafio que se encontra é a decomposição de um sistema complexo em unidades básicas independentes. O grau de detalhamento nesta decomposição vai determinar a complexidade dos módulos e sua interdependência.

A montagem de uma biblioteca de módulos exige uma correta caracterização de cada um desses módulos para que a qualidade de cada concepção gerada seja garantida. Da mesma forma, é necessário conhecer as condições das interfaces dos módulos, garantindo a montagem entre módulos e evitando que efeitos incidentais sejam transferidos de um módulo para o outro, alterando suas características operacionais e, conseqüentemente, as características globais esperadas para o sistema completo montado.

O próximo passo é apresentar a forma com que a metodologia proposta será mostrada, identificando-se todos os recursos básicos utilizados pela mesma.

Por fim, a metodologia pode ser devidamente descrita, enfocando o desenvolvimento de sistemas mecânicos de precisão de uma forma genérica, através da realização de várias etapas e atividades.

4.1 – Decomposição de sistemas mecânicos de precisão

Como apresentado no capítulo 2, os sistemas modulares são desenvolvidos pela decomposição de um sistema global em elementos funcionais básicos, que são mapeados em componentes físicos básicos. A seguir, há a necessidade de integrar esses componentes de modo que o sistema modular concebido atenda às funções desejadas.

Um requisito para se obter um projeto modular otimizado é a independência funcional entre os módulos. A independência funcional torna possível a realização de um projeto modular robusto, com mínimas interações entre os módulos.

Uma das ferramentas mais utilizadas para realizar a decomposição de um sistema é a síntese funcional, descrita por Pahl e Beitz, 1996, e Maribondo, 2000.

O desenvolvimento da síntese funcional inicia na formulação da função global do sistema em desenvolvimento. Esta formulação é feita a partir das especificações de projeto, estabelecendo uma declaração condensada da função do sistema e as interfaces com outros sistemas técnicos e o meio ambiente, apresentando todas as entradas e saídas de energia, material e sinais que passam pelo sistema. A figura 4.1 esquematiza a formulação da função global de um sistema.

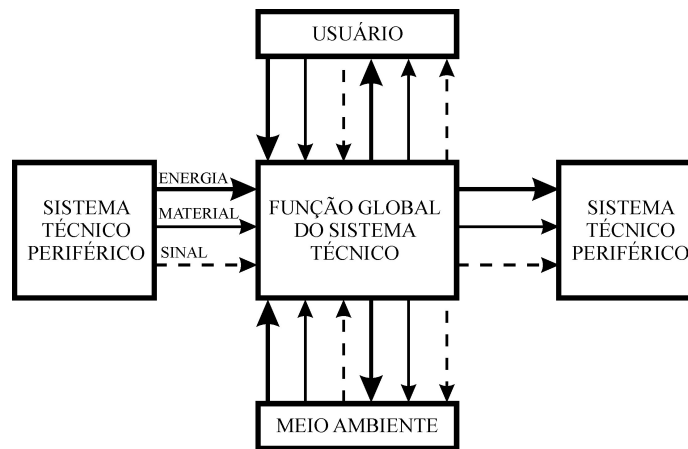


Figura 4.1 – Formulação da função global do sistema (Forcellini, 2004).

Difícilmente se consegue visualizar ou encontrar uma solução para a função global do sistema que está sendo projetado, transformando diretamente as entradas nas saídas desejadas.

A dificuldade consiste em identificar as funções que o sistema deve ter e, em seguida, arranjar estas funções de modo que representem funcionalmente o produto.

Um primeiro passo consiste em decompor a função global em um conjunto de funções parciais. Essas funções parciais, caso não reflitam corretamente o detalhamento necessário para o entendimento do sistema, podem ir sendo decompostas até o nível das funções elementares, que não permitem mais subdivisões.

Este procedimento remete a uma dúvida com relação ao nível necessário de detalhamento para o sistema. Quanto mais detalhada é a decomposição, ou seja, quanto mais decomposições sucessivas vão sendo feitas, mais complexa fica a descrição do sistema.

As metodologias de projeto para produtos modulares apresentadas no capítulo 2 sugerem a realização de uma síntese funcional ampla, justamente para permitir que uma análise do

agrupamento e inter-relações entre funções comuns permita que se formem os módulos independentes que formam o produto. Nessas metodologias, esta fase de seleção das funções é uma das mais importantes do procedimento, justamente porque define o grau de modularidade e os benefícios da modularidade do produto em desenvolvimento.

Em se tratando do projeto de sistemas mecânicos de precisão, nota-se uma tendência de forma de construção para esses sistemas. Os diversos sistemas mecânicos de precisão exemplificados no capítulo 3 constituem-se de equipamentos onde a função global consiste em uma tarefa técnica sendo realizada em um componente. Essa tarefa pode ser:

- Medição de dimensões ou outras grandezas;
- Remoção de material (processos de usinagem);
- Aplicação de distúrbios em um componente para avaliar sua resposta a essas perturbações (ensaios);
- Alteração das características do componente etc.

Com base nessas tarefas genéricas, é possível identificar que esses sistemas são constituídos por componentes que permitam a correta interação entre um atuador e a peça de trabalho. Esse atuador pode ser um sistema de medição, uma ferramenta de corte, ou um outro dispositivo relacionado ao cumprimento da tarefa técnica do sistema.

Na maioria dessas operações é necessário que exista um movimento relativo entre esse atuador e a peça. Esse movimento relativo possuirá tantos graus de liberdade quanto forem necessários para o cumprimento adequado da tarefa.

Desta forma, uma classificação geral dos tipos de módulos que compõem sistemas mecânicos de precisão contempla:

1. Módulos de movimento relativo;
2. Módulos de suporte ou sustentação; e
3. Módulos de funções complementares.

Com esta visão, torna-se desnecessário realizar todo o procedimento de síntese funcional para descrever os sistemas mecânicos de precisão, visto que a concepção básica dos módulos já está definida.

Os módulos de movimento relativo podem ser guias, cabeçotes, mesas rotativas, mesas de inclinação, mesas XY, robôs paralelos, entre outros. Para os módulos de suporte, podem ser citados as bases, sistemas de fixação de ferramentas e de peças, elementos estruturais para

a máquina ou outros elementos que façam parte do circuito estrutural da máquina, conforme definição apresentada no anexo 1. Os módulos de funções complementares englobam o sistema de controle de movimento da máquina, o controle do ambiente, sistemas independentes de medição, sistemas de aspersão de fluido de corte, sistemas de retirada de cavacos, e quaisquer outros sistemas responsáveis por atividades complementares, necessárias ao correto funcionamento da máquina.

Muitos desses módulos dados como exemplo, se forem usados em sistemas de precisão, devem seguir a descrição técnica apresentada com mais detalhes no anexo 1, que descreve princípios da engenharia de precisão para o projeto desse tipo de sistema.

A máquina-ferramenta é o tipo de sistema mecânico de precisão mais difundido e cujos procedimentos de projeto são mais estudados. Por isso, boa parte do estudo apresentado no anexo 1 relaciona-se a máquinas-ferramentas.

Alguns autores preocuparam-se em apresentar formas de decomposição de máquinas-ferramentas de precisão e ultraprecisão. Um trabalho apresentado por Müller (1993) sugere que uma máquina-ferramenta de ultraprecisão seja decomposta nos seguintes elementos:

- a) **Cabeçote** - o cabeçote, também chamado de árvore, deve promover um movimento de rotação suave e preciso, com rigidez e capacidade de carga suficiente para suportar os esforços de usinagem. Dentre as diferentes soluções possíveis, incluem-se os mancais rotativos apresentados no anexo 1. Os mais empregados são os mancais aerostáticos, por oferecerem um baixo coeficiente de atrito, boa rigidez, baixa geração de calor, amortecimento adequado, suavidade de movimentação e precisão de movimentação.
- b) **Acionamento do cabeçote** - o acionamento do cabeçote gera a força de rotação para acionar a peça, sua fixação e o mancal, o que em máquinas de ultraprecisão deve ser isento de vibrações. O torque de acionamento necessário é usualmente pequeno, já que as forças envolvidas são também pequenas. Alguns cabeçotes necessitam de uma redução na velocidade de rotação para que os motores operem dentro de uma faixa otimizada.
- c) **Acoplamentos** - para transmitir o torque do acionamento ao cabeçote são empregados os acoplamentos, que são peças destinadas a unir eixos, compensando erros de alinhamento e afastamento radial, sendo exigidos dos mesmos isenção de folgas, resistência à torção e inércia reduzida. Os tipos de acoplamentos mais utilizados em máquinas de ultraprecisão são os de fole ou sanfona, pino-ranhura e por correia.
- d) **Guias** - são os elementos que permitem o posicionamento da ferramenta e da peça para o trabalho, e devem ter excelentes características de suavidade, retidão, rigidez, precisão e

repetitividade de movimento. Tais exigências são usualmente satisfeitas com a utilização de guias aerostáticas ou hidrostáticas. As guias também foram detalhadas no anexo 1.

- e) **Acionamento das guias** - o acionamento das guias deve promover um acionamento suave, com velocidade constante, com a força de acionamento sendo aplicada no centro de massa do elemento que se desloca, para evitar possíveis erros de tombamento, guinamento ou rolamento, conforme as recomendações de aplicação de força no centro de ação do componente, apresentadas no anexo 1. Normalmente o acionamento das guias é feito através de roda de atrito, motores elétricos rotativos e lineares, sistemas hidráulicos ou pneumáticos e sistemas de gravidade controlada, entre outros.
- f) **Base da máquina** - serve como sistema de montagem para os diversos elementos da máquina-ferramenta, além de proporcionar uma base estável, de modo que seja evitada ao máximo a propagação de vibrações geradas por componentes móveis da máquina para outras partes do sistema. A base da máquina de ultraprecisão deve ter também boa capacidade de amortecimento, estabilidade térmica, resistência química e resistência mecânica. São normalmente fabricados em ferro-fundido, concreto polimérico, granito, “zerodur”, ínvar e cerâmicas em geral, entre outros materiais.
- g) **Sistema de suporte da máquina** - é o sistema que, acoplado à base da máquina, tem a função de promover o suporte da máquina e isolá-la de vibrações externas. Tais sistemas podem possuir isolamentos passivos, como os baseados em amortecedores pneumáticos, ou ativos, como os de colchões de ar com pressão variável.
- h) **Sistema de fixação da ferramenta** - os sistemas de fixação da ferramenta para operações de usinagem com diamante são semelhantes aos empregados na usinagem convencional, com a diferença de permitirem ajustes de posição da ferramenta com muito mais precisão, principalmente no que se refere ao ajuste de altura da ferramenta.
- i) **Estação de "presetting"** - é um sistema utilizado para informar a posição da ferramenta ao controle de posição da mesma. Serve normalmente para os ajustes grosseiros de posição da ferramenta, visto que ajustes finos são usualmente realizados iterativamente através da observação dos resultados de trabalho.
- j) **Sistema de controle** - é o centro de comando para o controle da posição, velocidade de avanço, rotação e direções de movimento dos elementos da máquina, sendo normalmente composto de um sistema de medição interferométrico, sensores e um comando numérico de alta resolução.
- k) **Sistema de controle ambiental** - a existência de um sistema de controle ambiental é usual em ambientes onde são realizadas operações de usinagem com diamante, de modo a

garantir a estabilidade ambiental necessária para assegurar a precisão dimensional e de forma no processo de fabricação.

Uma avaliação desta lista de componentes básicos que compõem uma máquina-ferramenta de ultraprecisão permite que os mesmos sejam classificados conforme os tipos de módulos apresentados, adequando-se à classificação proposta no trabalho.

Em primeiro lugar, para que sejam considerados módulos independentes, os elementos apresentados por Müller devem ser reorganizados. Os elementos cabeçote, acionamento do cabeçote e acoplamento formam um módulo independente se forem devidamente integrados. Da mesma forma, isso deve ocorrer com as guias e seus acionamentos. Ambos os conjuntos integrados são do tipo módulo de movimento relativo ou acionados.

Os elementos: base da máquina, sistema de suporte da máquina e sistema de fixação da ferramenta são do tipo módulo de suporte. Os demais elementos, a estação de *presetting*, o sistema de controle da máquina e o sistema de controle ambiental são do tipo módulo de funções complementares.

Uma representação esquemática de uma máquina-ferramenta de ultraprecisão foi apresentada por Stoeterau (1999), conforme mostrado na figura 4.2. Nela, os componentes e sistemas que compõem uma máquina-ferramenta de ultraprecisão são representados e interrelacionados. Esta representação possui uma abordagem mais próxima da síntese funcional da máquina. A disposição dos elementos básicos e o fluxo de sinais e formação do circuito estrutural fornecem uma idéia da concepção mecânica da máquina.

Apesar de fornecer uma visão geral de todo o sistema, essa representação esquemática não favorece o trabalho de reconfiguração da máquina.

Mais uma vez, é possível identificar os três tipos de módulos sugeridos para classificar os elementos de um sistema mecânico de precisão. A árvore, com todos os demais componentes devidamente integrados, é um módulo de movimento relativo. Da mesma forma acontece com as guias X e Z. O sistema de suporte, bem como o porta-ferramentas e o sistema de fixação da peça, são módulos de suporte. Os módulos de funções complementares são o controle e os dispositivos de lubrificação, refrigeração e aspiração, posicionados na região de corte da máquina.

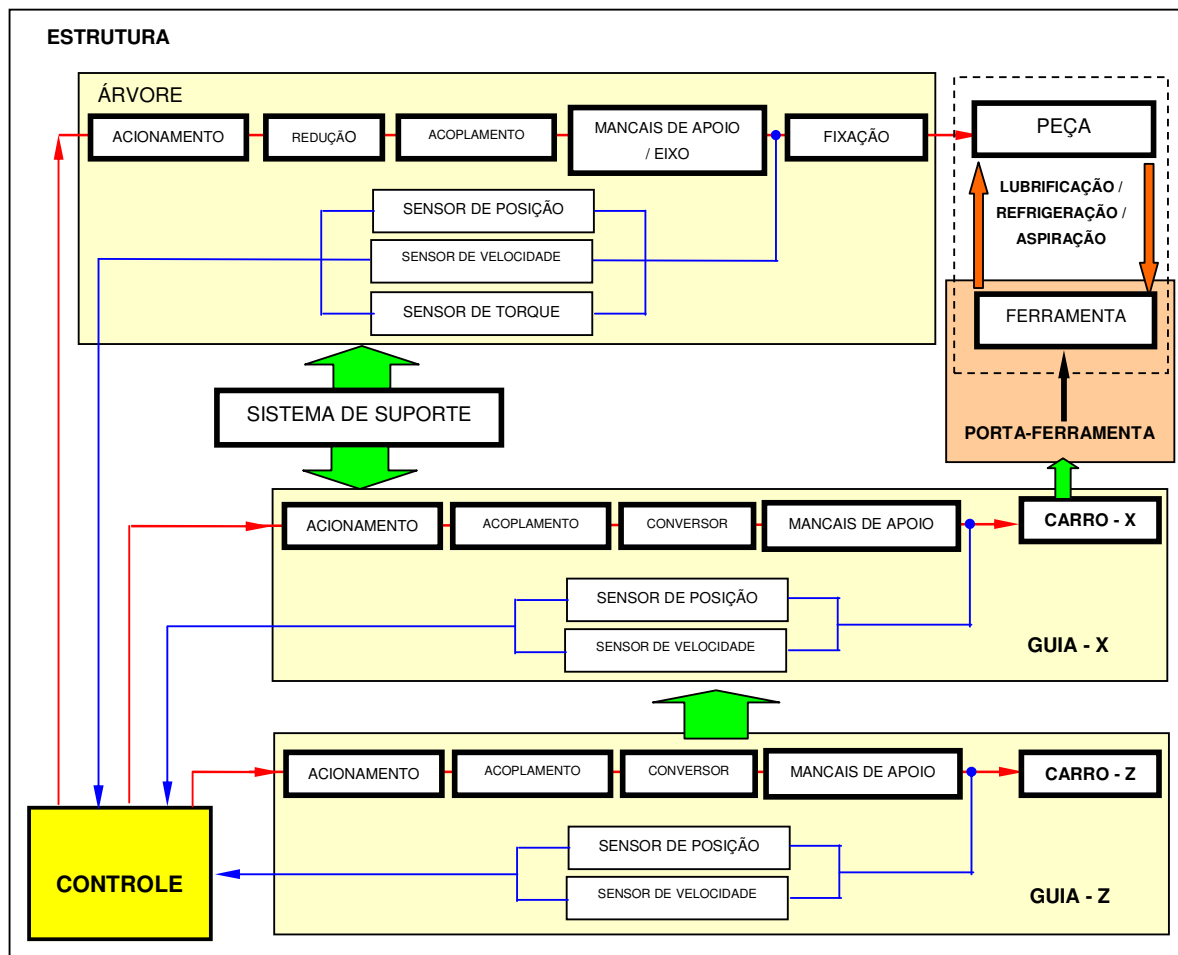


Figura 4.2 – Representação esquemática de uma máquina-ferramenta de ultraprecisão.

Um modelo esquemático que contempla a possibilidade de reconfiguração é apresentado na figura 4.3, que apresenta alguns detalhes interessantes:

- Os módulos dentro da concepção cinemática não foram organizados nem interrelacionados de forma a caracterizarem uma concepção única. Isto serve para mostrar que é essa organização que vai definir a concepção final da máquina. Assim, a máquina possui a característica de ser reconfigurável;
- Foram inseridos dois módulos de guias na concepção. Isto serviu para destacar que serão utilizados tantos módulos desses quanto forem necessários para se obter a concepção cinemática ideal para a aplicação da máquina-ferramenta;
- Os módulos de retirada de cavaco e de aspensão de fluido estão fora da região com controle de ambiente. Propositadamente isto foi feito para mostrar que esta é uma saída para diminuir a influência desses sistemas no ambiente de trabalho da máquina;

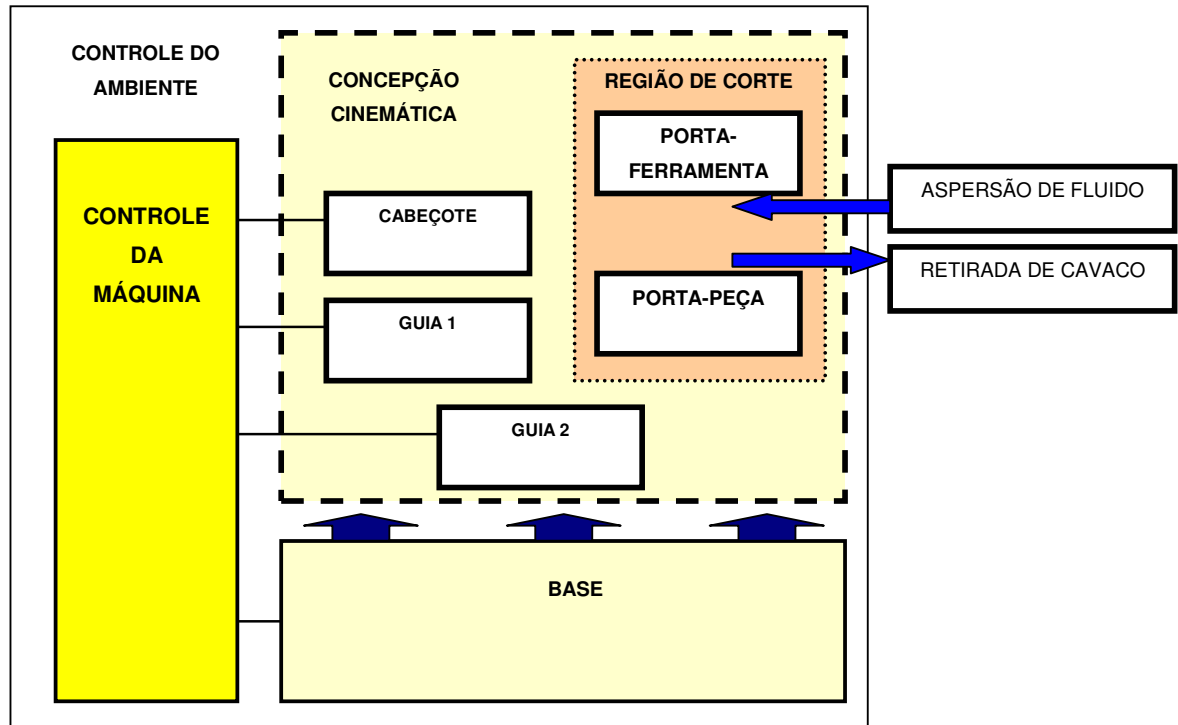


Figura 4.3 – Modelo esquemático de uma máquina genérica.

- O controle da máquina está ligado à base. A base da máquina-ferramenta pode possuir um princípio ativo de isolamento de vibrações, o que exige um controle adequado. Além disso, se a mesma for equipada com sensores, pode fornecer informações que serão utilizadas no processo de compensação de erros ou no monitoramento do processo de usinagem;
- Como módulo de suporte foram inseridas uma base para a máquina e os sistemas de porta-ferramentas e porta-peça. Caso haja a necessidade de elementos intermediários entre os módulos de movimento relativo, estes podem ser inseridos na formulação da concepção cinemática da máquina.

A qualidade da máquina-ferramenta é inteiramente dependente da qualidade de cada um dos seus módulos. Um ponto crítico está nas interfaces entre esses módulos e na influência que cada um dos módulos tem sobre os demais e sobre a máquina como um todo. Desta forma, o projeto da máquina deve ser conduzido utilizando o máximo de informações possível sobre cada módulo e suas interfaces para que sua performance e qualidade sejam garantidas nas fases iniciais do projeto.

4.2 – Caracterização de módulos e suas interfaces

Com base no determinismo, apresentado no anexo 1, sabe-se que a qualidade final de um sistema depende do encadeamento dos erros de todos os elementos que compõem este sistema. Assim, se todos os erros de cada um dos módulos forem conhecidos, é possível inferir sobre a qualidade final do sistema montado, garantindo que este erro fique dentro de uma faixa aceitável para a tarefa que o sistema deverá realizar.

A caracterização dos módulos e de suas interfaces deve ser feita levando-se em consideração todos os princípios de projeto de sistemas e máquinas-ferramenta de precisão e ultraprecisão abordados no anexo 1 deste trabalho.

Desta forma, cada módulo deverá trazer consigo todas as informações sobre suas características estáticas, dinâmicas, cinemáticas, geométricas, comportamento térmico e condições de controle, bem como detalhes sobre as suas interfaces.

Nas tabelas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 são apresentados vários questionamentos a serem feitos sobre cada um dos módulos básicos que compõem uma máquina-ferramenta ou sistema de precisão para que suas características sejam corretamente explicitadas. Além disso, são explorados os requisitos necessários para a sua interface, de modo que a montagem entre os módulos ocorra com garantia de qualidade.

Esses questionamentos são válidos para todos os três tipos de módulos, de movimento relativo, de suporte e de funções complementares.

Tabela 4.1 – Características estáticas.

Características estáticas
<input checked="" type="checkbox"/> Qual é a massa do módulo?
<input checked="" type="checkbox"/> Qual a capacidade de carga do módulo?
<input checked="" type="checkbox"/> A massa de outros módulos interfere no cumprimento da função deste módulo?
<input checked="" type="checkbox"/> Há interface definida para montagem com os demais módulos?
<input checked="" type="checkbox"/> Que tipo de restrição há na interface para montagem?
<input checked="" type="checkbox"/> Há algum grau de liberdade livre na montagem entre módulos?
<input checked="" type="checkbox"/> A fixação entre os módulos possui uma única interface possível? Há uma única posição para fixação de outros módulos?
<input checked="" type="checkbox"/> Há garantia física de reposicionamento na remontagem entre módulos?
<input checked="" type="checkbox"/> A fixação gera tensões residuais que prejudiquem o cumprimento da tarefa da máquina-ferramenta?
<input checked="" type="checkbox"/> O módulo possui rigidez suficiente para fazer parte do circuito estrutural da máquina?
<input checked="" type="checkbox"/> O módulo possui estabilidade estrutural?

Tabela 4.2 – Características dinâmicas.

Características dinâmicas
<input checked="" type="checkbox"/> Qual é a frequência natural do módulo?
<input checked="" type="checkbox"/> Há fontes de vibrações no módulo?
<input checked="" type="checkbox"/> Há controle ou isolamento dessas fontes?
<input checked="" type="checkbox"/> Há controle passivo ou ativo de vibrações no módulo?
<input checked="" type="checkbox"/> O módulo transmite vibrações para outros módulos?
<input checked="" type="checkbox"/> Como pode se alterar sua característica dinâmica após montado em outro módulo?
<input checked="" type="checkbox"/> O módulo é afetado por vibrações vindas de outros módulos?
<input checked="" type="checkbox"/> Sua rigidez e amortecimento são suficientes para comporem o conjunto de uma máquina-ferramenta de ultraprecisão?
<input checked="" type="checkbox"/> Há geração de ruído no módulo?

Tabela 4.3 – Características cinemáticas.

Características cinemáticas
<input checked="" type="checkbox"/> Há algum grau de liberdade de movimento no módulo?
<input checked="" type="checkbox"/> Qual o princípio de geração, transmissão e controle desse movimento no módulo?
<input checked="" type="checkbox"/> Quais são as características desse movimento? Linear ou rotativo? Curso de movimentação? Faixa de velocidades? Faixa de acelerações?
<input checked="" type="checkbox"/> Há geração de forças dinâmicas causadas por velocidades ou acelerações nos movimentos gerados nesse módulo?
<input checked="" type="checkbox"/> Há uma região preferencial de trabalho no curso de movimento desse eixo?

Tabela 4.4 – Características geométricas.

Características geométricas
<input checked="" type="checkbox"/> Qual é a qualidade das trajetórias dos movimentos gerados pelo módulo?
<input checked="" type="checkbox"/> Quais são os erros gerados nesses movimentos? Tipo e quantificação?
<input checked="" type="checkbox"/> Qual é a qualidade do sistema de medição empregado para medir os movimentos do módulo? Exatidão, resolução e repetitividade associadas?
<input checked="" type="checkbox"/> O sistema de medição opera de acordo com a lei de Abbé?
<input checked="" type="checkbox"/> Quais são as transformações necessárias para que os eixos operem sob um sistema de coordenadas único?
<input checked="" type="checkbox"/> Qual é a posição dos pontos de fixação nas interfaces com outros módulos?
<input checked="" type="checkbox"/> As características geométricas do módulo são alteradas após a montagem em outros?
<input checked="" type="checkbox"/> Há referências físicas para reposicionamento e sistemas de coordenadas?
<input checked="" type="checkbox"/> Qual é a exigência de reposicionamento entre módulos?
<input checked="" type="checkbox"/> Qual é a exigência de qualidade de superfície e de forma nas superfícies de contato entre os módulos?
<input checked="" type="checkbox"/> Há algum sistema de ajustagem operando no módulo?
<input checked="" type="checkbox"/> Há a possibilidade de acoplar um sistema de ajustagem na interface entre os módulos?

Tabela 4.5 – Comportamento térmico.

Comportamento térmico
<input checked="" type="checkbox"/> Há fontes de calor dentro do módulo?
<input checked="" type="checkbox"/> O módulo apresenta isolamento térmico para conter a influência dessa fonte de calor?
<input checked="" type="checkbox"/> A fonte de calor é contínua ou intermitente?
<input checked="" type="checkbox"/> O módulo opera na temperatura padrão ou adequada?
<input checked="" type="checkbox"/> O módulo altera suas características ao receber calor de um módulo vizinho?
<input checked="" type="checkbox"/> Há isolamento térmico na interface?

Tabela 4.6 – Características do controle de movimentação, posicionamento e das demais funções do sistema.

Características do controle de movimentação, posicionamento e das demais funções do sistema
<input checked="" type="checkbox"/> Qual a necessidade de exatidão no controle de temperatura do ambiente da máquina?
<input checked="" type="checkbox"/> Há necessidade de um controle diferenciado na região de trabalho?
<input checked="" type="checkbox"/> Qual o grau de controle de umidade exigido para o ambiente da máquina?
<input checked="" type="checkbox"/> Qual o grau de pureza do ar exigido para o ambiente da máquina?
<input checked="" type="checkbox"/> Há monitoramento das deformações térmicas sofridas pelo módulo?
<input checked="" type="checkbox"/> Há monitoramento das deformações mecânicas sofridas pelo módulo?
<input checked="" type="checkbox"/> De que formas são transmitidas informações dos sensores para o controle da máquina?
<input checked="" type="checkbox"/> Qual a exigência de controle de movimento para a máquina-ferramenta?
<input checked="" type="checkbox"/> Os softwares de controle dos diversos módulos são compatíveis?
<input checked="" type="checkbox"/> O gerenciamento de toda a máquina pode ser feito por um único sistema?
<input checked="" type="checkbox"/> Quais são as exigências de alimentação de energia para o controle e os demais módulos?
<input checked="" type="checkbox"/> Quais são as características dos sensores montados nos módulos?
<input checked="" type="checkbox"/> Há possibilidade de se executar um procedimento de compensação de erros?

4.3 – Montagem da biblioteca de módulos

Destas questões apresentadas, nem todas se referem a todos os módulos. Mas mesmo assim, é importante fazê-las para que todos os detalhes significativos sejam avaliados nos módulos, evitando que erros sejam cometidos na montagem final do sistema.

O projetista deve sempre olhar cada elemento do projeto com uma visão do sistema completo. É comum que os elementos apresentem alterações nas suas características quando acoplados a outros elementos. Por isso, também é importante definir quais são as restrições para um perfeito acoplamento entre módulos. Da mesma forma, módulos originalmente integrados devem ser avaliados em conjunto, como se fosse um único elemento.

Tomando como base o desenvolvimento de máquinas-ferramentas reconfiguráveis (RMT), propõe-se a criação de uma biblioteca de módulos. Em RMT, Moon (2000) apresentou uma biblioteca de módulos parametrizados conforme exemplo na figura 4.4.


Campo	Informações		
Nome módulo	Módulo de inclinação 0001		
Fabricante	ERC / RMS Machine Tools		
Fonte info	Em estoque		
Tipo interface	Entrada: Tipo 1; Saída: Tipo 1; Alinhamento e fixação: OK		
Localização	1T		
Transformação	Lista de vetores duais		
	Nome	Tipo	Vetor dual
	Configuração	Estático	$\left[\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2} \right] (1 + \varepsilon 0) \left[\begin{matrix} 0 & 1 & 0 \end{matrix} \right]^T + \varepsilon \left[\begin{matrix} -200 & 0 & 0 \end{matrix} \right]^T$
Movimento	Ativo: PI = 3	$\left[-\pi; 0; 0 \right] (1 + \varepsilon 0) \left[\begin{matrix} 0 & 1 & 0 \end{matrix} \right]^T + \varepsilon \left[\begin{matrix} -200 & 0 & 0 \end{matrix} \right]^T$	
Potência	1 HP		
Carregamento	Max: 300 kgf		
Aceleração	Max: 3 m/s ²		
Velocidade	Max: 2 m/s		
Rigidez estática	$\begin{bmatrix} 0.74574E-07 & -0.10413E-19 & 0.78634E-08 & -0.23294E-20 & -0.10603E-07 & 0.23622E-21 \\ 0.23353E-19 & 0.31605E-06 & -0.21706E-16 & 0.42861E-07 & 0.30437E-20 & -0.58459E-08 \\ 0.16598E-07 & 0.21838E-19 & 0.27936E-06 & 0.50836E-20 & 0.54177E-08 & -0.53998E-21 \\ 0.43388E-19 & 0.41326E-06 & -0.42435E-16 & 0.79722E-07 & 0.60246E-20 & -0.85464E-08 \\ -0.11622E-06 & 0.26611E-19 & 0.49936E-07 & 0.59829E-20 & 0.22058E-07 & -0.61098E-21 \\ -0.46539E-20 & -0.59410E-07 & 0.44356E-17 & -0.85546E-08 & -0.60337E-21 & 0.15216E-08 \end{bmatrix}$		
Rigidez dinâmica	No arquivo: tilt001.dss		
Observações	Exemplo do módulo:		
			

Figura 4.4 – Elemento da biblioteca de módulos parametrizados segundo Moon (2000).

Na biblioteca de módulos parametrizados apresentada por Moon (2000), como todos os módulos disponíveis já estão direcionados para aplicação em um conjunto de reconfigurações pré-definidas, existe a preocupação em fornecer informações quantitativas. Um software próprio avalia todas essas informações dos módulos e propõe as configurações possíveis para cada problema de usinagem proposto.

As interfaces desses módulos já são padronizadas, restando apenas a identificação de qual dos tipos possíveis é o utilizado na interface do módulo descrito.

As informações com relação à rigidez e capacidades de movimento do módulo permitirão uma seleção por faixas de valores ótimos de cada parâmetro para cada situação, simplesmente inserindo-se alguns valores no *software*.

No caso dos sistemas mecânicos de precisão, onde as reconfigurações não são efetuadas para um conjunto definido de tarefas a executar, são necessárias muitas outras informações técnicas relativas a cada módulo. Os módulos passam a ser de uso genérico e, quanto mais informações forem extraídas dos mesmos, maior vai ser a garantia de qualidade do sistema configurado com este módulo.

Além disso, como vários módulos são obtidos a partir de sistemas que não foram projetados para formarem módulos, as informações detalhadas permitirão a preparação de uma integração mais adequada destes módulos com os demais.

Para formar a biblioteca de módulos para sistemas mecânicos de precisão, é necessário um modelo em CAD de cada módulo e uma ficha de identificação e acompanhamento do módulo. O modelo em CAD é o ponto de partida para geração das configurações necessárias. Nele, deverão constar todas as informações relativas ao dimensionamento dos módulos, as restrições nas interfaces, os graus de liberdade e outros dados necessários para a realização de simulações numéricas de características estáticas e dinâmicas tanto do módulo quanto do sistema montado.

Na ficha de identificação, conforme modelo apresentado na figura 4.5, deve constar o levantamento de todas as características do módulo segundo os questionamentos apresentados anteriormente.

O trabalho de levantamento das características de cada módulo exige equipamentos adequados e um conhecimento técnico adequado para a realização dos ensaios. Muitas das características são fornecidas pelos fabricantes dos elementos.

Em alguns casos, quando se trata de tarefas consideradas mais simples, é necessário que sejam empregados módulos sem um levantamento completo de suas características, desde que a falta de algumas informações não comprometa a qualidade final do sistema montado. O levantamento mais detalhado das condições dos módulos pode ir sendo realizado conforme a necessidade.

Na definição das interfaces, geralmente existem planos de montagem. Assim, um desenho em duas dimensões, com as tolerâncias de posicionamento de elementos de fixação necessários à montagem, pode acompanhar a documentação do módulo. Isto facilitará a vida do projetista que necessite integrar módulos não compatíveis através de elementos auxiliares de montagem. Estes elementos geralmente devem ser fabricados e a qualidade final da montagem do sistema depende da qualidade de fabricação destes elementos.

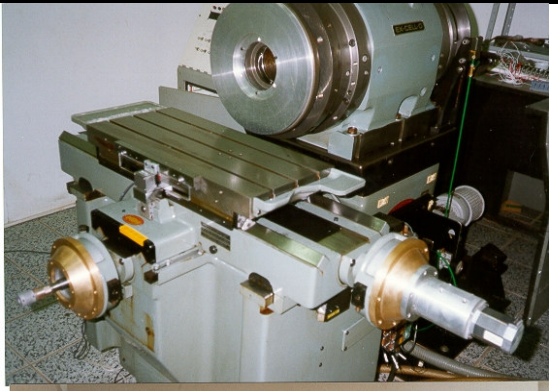
BASE COM GUIAS CRUZADAS MOORE		
Nº: 001	Tipo: Módulo de suporte acoplado a um módulo de movimento relativo	
Fabricante: Moore Tools		
Localização: Laboratório de Mecânica de Precisão		
Descrição: Base de ferro fundido, integrada a uma mesa XY com guias de escorregamento. A guia longitudinal é acionada por motor de passo. A base é montada sobre um bloco de concreto de 3 m ³ , que está enterrado no solo. O sistema encontra-se numa sala própria, isolada e controlada termicamente.		
Características estáticas:		Características dinâmicas:
<ul style="list-style-type: none"> - Base de Ferro fundido montada sobre um bloco com 3 m³ de concreto, enterrado no solo. - Capacidade de carga de 500 N na mesa longitudinal; - Capacidade de carga de 2000 N na superfície de montagem do cabeçote; - Sistema concebido com alta estabilidade estrutural; 		<ul style="list-style-type: none"> - Isolamento passivo de vibrações externas e internas pela massa do bloco de concreto; - O motor de passo que aciona o eixo longitudinal gera vibrações e deve ser utilizado nas velocidades de avanço entre 5 e 20 mm/min, faixa onde essas vibrações são aceitáveis.
Características cinemáticas:		Características geométricas:
<ul style="list-style-type: none"> - Mesa de guias de escorregamento cruzadas montadas a 90°, com curso transversal linear de 160 mm e longitudinal linear de 241,3 mm; - Acionamento transversal manual e longitudinal por motor de passo montado em um redutor de 1:25 composto por engrenagem e rosca sem fim; 		<ul style="list-style-type: none"> - Guias com erro de perpendicularismo de 0,0045+/-0,0052 mm; - Erro de linearidade inferior a 1 µm / 100 mm; - Medição do deslocamento transversal por nônio e longitudinal pelo motor de passo em malha aberta;
Comportamento térmico:		Características de controle:
<ul style="list-style-type: none"> - Há geração de calor no motor de passo, mas sua montagem impede a propagação deste calor a ponto de interferir no comportamento geométrico do sistema; - Sistema desenvolvido para operar em ambiente com temperatura e umidade controlada; 		<ul style="list-style-type: none"> - Motor de passo alimentado por hardware próprio e controlado por software próprio, exigindo o acompanhamento de um microcomputador; - Não há necessidade de condições especiais de alimentação de energia;
Interfaces:		
<ul style="list-style-type: none"> - O sistema está montado numa sala apropriada, isolada e com controle de ambiente; - A mesa longitudinal possui um plano de montagem com ranhuras em “T”, conforme modelo; - Existe um plano de referência para montagem no topo da base com furação apropriada, conforme modelo em CAD; 		
Observações:		
<ul style="list-style-type: none"> - Sistema está sofrendo um <i>retrofitting</i> no acionamento do carro longitudinal; 		

Figura 4.5 – Ficha de identificação de um módulo.

Conforme modelo da figura 4.5, a ficha de identificação do módulo fornece as informações básicas do módulo, com nome, tipo, fabricante e uma descrição resumida. A seguir, são apresentadas todas as características estáticas, dinâmicas, cinemáticas, geométricas, de controle e comportamento térmico.

Para concluir a caracterização, são detalhadas as condições das interfaces. Se necessário, um modelo em desenho técnico da interface é inserido na ficha para facilitar o projeto. Todas as informações adicionais consideradas relevantes são apresentadas nas observações finais

sobre o módulo, como exemplificado. Junto à ficha de acompanhamento, deve ser mostrada uma representação virtual do módulo num modelo em CAD. Esse modelo permitirá que se faça uma montagem virtual do sistema. Esse é um passo importante do processo de projeto.

O conjunto das fichas de identificação dos módulos disponíveis para este trabalho está apresentado no anexo 2.

4.4 – Recursos básicos da metodologia proposta

Como foi visto no capítulo 2, um processo metodológico se apóia na aplicação de diversos recursos auxiliares para garantir a qualidade e controle do projeto em andamento. Esses recursos são basicamente documentos (tabela 4.7) e ferramentas (tabela 4.8).

Tabela 4.7 – Relação de documentos a serem empregados na metodologia.

Código	Recurso	Comentários
D1	Função global do sistema	Descreve qual a tarefa a ser cumprida pelo sistema
D2	Especificações da tarefa	Descreve especificações técnicas necessárias para o cumprimento da tarefa e sua abrangência
D3	Graus de liberdade	Descreve os graus de liberdade necessários para o cumprimento da tarefa e requisitos de integração
D4	Soluções cinemáticas	Apresenta arranjos cinemáticos possíveis para o cumprimento da tarefa do sistema
D5	Módulos necessários	Relação dos módulos necessários para compor as soluções cinemáticas propostas
D6	Requisitos dos módulos	Requisitos técnicos para cada um dos módulos necessários para compor as soluções cinemáticas
D7	Biblioteca de módulos	Relação dos módulos disponíveis para compor o sistema (anexo 2)
D8	Catálogos de fabricantes	Catálogos de componentes e sistemas comerciais que podem compor módulos
D9	Módulos selecionados	Relação de módulos selecionados para cada configuração cinemática
D10	Requisitos das interfaces	Requisitos necessários às interfaces para garantir qualidade final do sistema
D11	Identificação interfaces	Relação das interfaces, suas interdependências e soluções para efeitos incidentais
D12	Documentação montagem	Documentação de todo o processo de montagem e dos recursos utilizados
D13	Documentação <i>TRYOUT</i> 1	Documentação dos procedimentos e resultados do <i>TRYOUT</i> realizado em vazio
D14	Documentação <i>TRYOUT</i> 2	Documentação dos procedimentos e resultados do <i>TRYOUT</i> realizado em condições de operação

A tabela 4.7 apresenta um conjunto de documentos sugeridos para aplicação na metodologia de projeto de sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis. Esses documentos constituem-se das entradas e saídas das diversas etapas da metodologia, como será mostrado posteriormente.

A tabela 4.8 apresenta as ferramentas de auxílio para o desenvolvimento da metodologia e conseqüente geração dos documentos propostos. No capítulo 2 foram apresentadas diversas ferramentas bastante difundidas nos procedimentos metodológicos que não são aqui utilizadas, mas que podem ser empregadas sempre que necessário.

Tabela 4.8 – Relação de ferramentas a serem empregados na metodologia.

Código	Recurso	Comentários
F1	Síntese funcional	Auxilia na definição da função global do sistema e na decomposição das funções do sistema
F2	Questionário para levantar especificações da tarefa	Diretrizes para a coleta de informações sobre as especificações para o cumprimento da tarefa
F3	Princípios de engenharia de precisão no projeto	Levantamento bibliográfico sobre princípios de engenharia de precisão no projeto de sistemas mecânicos de precisão e ultraprecisão (anexo 1)
F4	Tolerância de componentes usinados por ultraprecisão	Tolerâncias dimensionais encontradas em componentes usinados por ultraprecisão
F5	Configurações cinemáticas para usinagem	Tabela de configurações cinemáticas aplicadas na usinagem de algumas formas de componentes
F6	Decomposição de uma máquina genérica	Modelo genérico de decomposição para sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis
F7	Sistema CAD	<i>Software</i> CAD para projeto virtual das soluções cinemáticas
F8	<i>Internet</i>	Ferramentas de busca de catálogos <i>on line</i>
F9	Metodologia de projeto tradicional	Metodologia de projeto e reprojeto para obtenção de módulos necessários ao sistema mecânico de precisão
F10	Sistema CAE	<i>Software</i> CAE para simulação das características dos módulos e propagação de efeitos incidentais
F11	Matriz de avaliação das interfaces	Matriz de correlação entre os módulos para identificação de influências entre os módulos
F12	Ensaio geométricos	Ensaio geométricos necessários para caracterizar interfaces e o sistema na configuração final
F13	Ensaio dinâmicos	Ensaio dinâmicos necessários para caracterizar interfaces e o sistema na configuração final
F14	Ensaio térmicos	Avaliação da propagação de calor e sua influência na estrutura do sistema
F15	<i>TRYOUT 1</i>	Ensaio de funcionamento do sistema montado na configuração final em vazio
F16	<i>TRYOUT 2</i>	Ensaio de funcionamento do sistema montado na configuração final em condições de operação

4.5 – Metodologia de projeto para sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis

A visão geral da metodologia pode ser vista na figura 4.6.

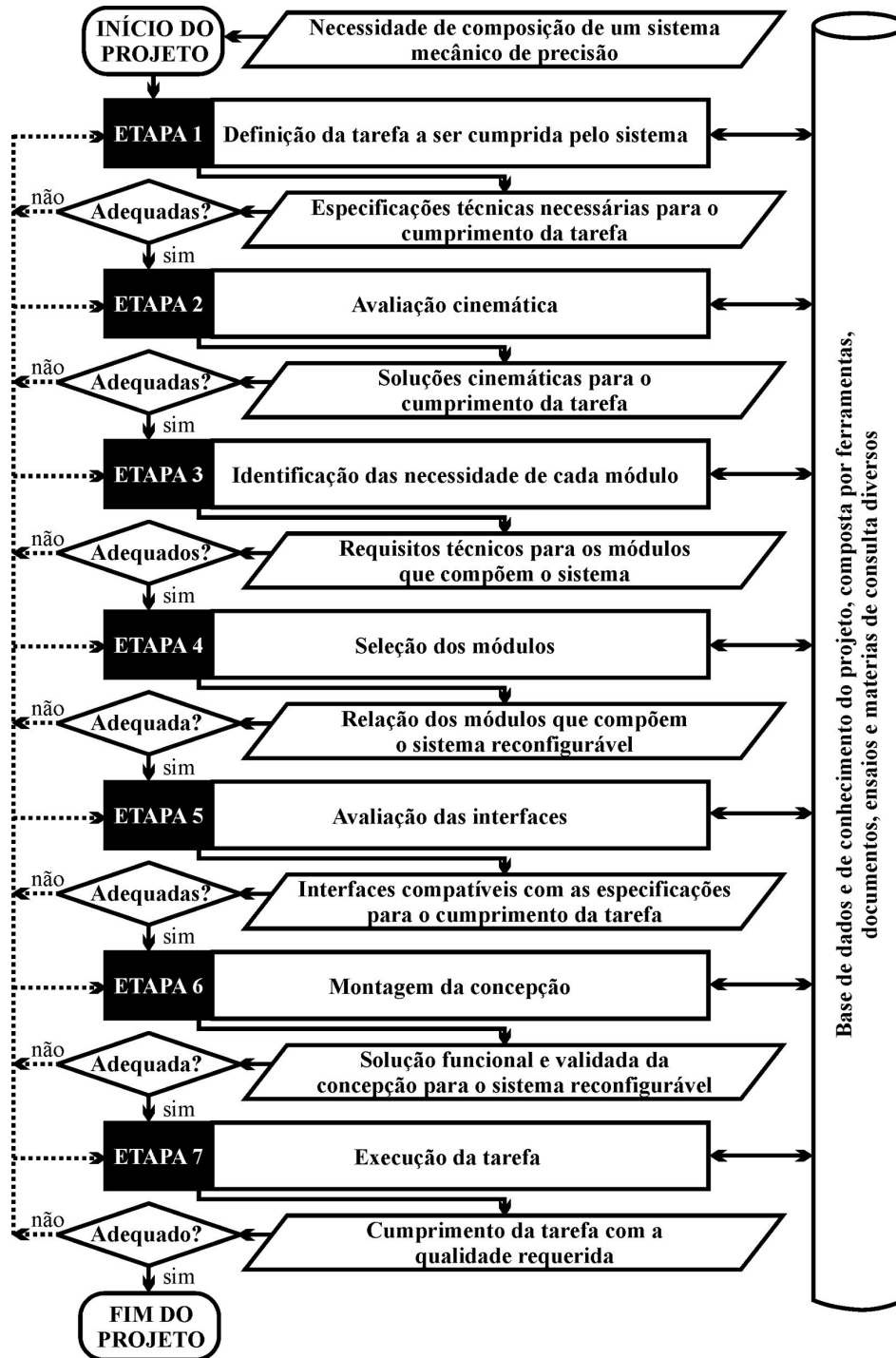


Figura 4.6 – Visão geral da metodologia de projeto de sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis.

A figura 4.7 detalha o início do projeto e a etapa 1 da metodologia.

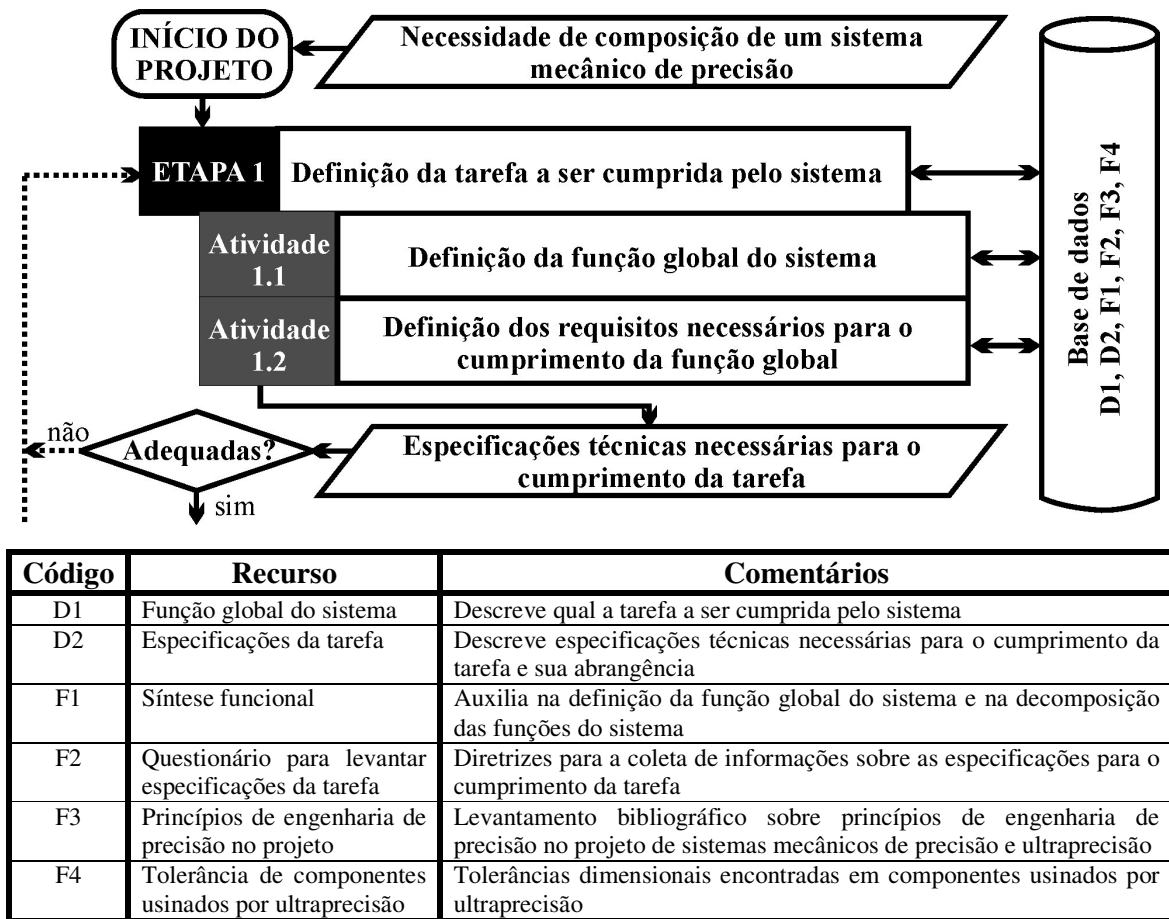


Figura 4.7 – Detalhamento da etapa 1 da metodologia.

O projeto de um sistema mecânico de precisão reconfigurável se inicia a partir de uma necessidade de composição de um sistema deste nível a partir de recursos escassos. Esta escassez de recursos significa a impossibilidade de se adquirir um sistema comercial adequado para a realização da tarefa que se pretende, ou mesmo a impossibilidade de se pagar pelos serviços requeridos.

As dificuldades de financiamentos nesta área foram exploradas no capítulo 1 deste trabalho.

Dada a necessidade, é preciso definir corretamente a tarefa que o sistema deverá cumprir. E a primeira atividade (atividade 1.1) do processo de projeto é a definição da função global do sistema. Esta função global dará idéia de todas as finalidades do sistema projetado e deve ser corretamente documentada (D1). A ferramenta de síntese funcional (F1) auxilia na definição da função global do sistema.

A próxima atividade (atividade 1.2) consiste em definir adequadamente os requisitos necessários para o cumprimento da função global do sistema. As especificações da tarefa (D2) darão idéia da qualidade exigida nos componentes que compõem o sistema. E o resultado final de performance do sistema vai depender de uma correta especificação desta tarefa.

Para se ter uma idéia do nível de detalhamento dessas especificações, é importante que o projetista tenha conhecimento dos princípios de engenharia de precisão para o projeto de sistemas de precisão (F3), relacionados e detalhados no anexo 2 deste trabalho. O conhecimento destes princípios dá ao projetista uma noção de todos os parâmetros que influenciam na qualidade final do sistema.

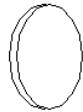
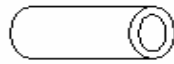
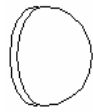
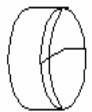

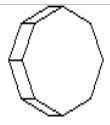
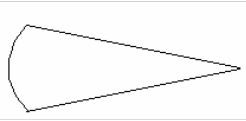
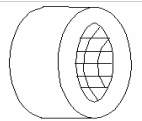
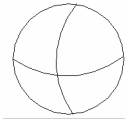
Se o sistema mecânico de precisão for uma máquina-ferramenta, algumas ferramentas que auxiliam na definição dos requisitos o questionário para obtenção das especificações da tarefa (F2), mostrado abaixo, e a tabela de tolerâncias dos componentes usinados por ultraprecisão (F4), apresentada na tabela 4.9 (Stoeterau, 1999).

FERRAMENTA 2 – Questionário para especificação do componente a ser usinado:

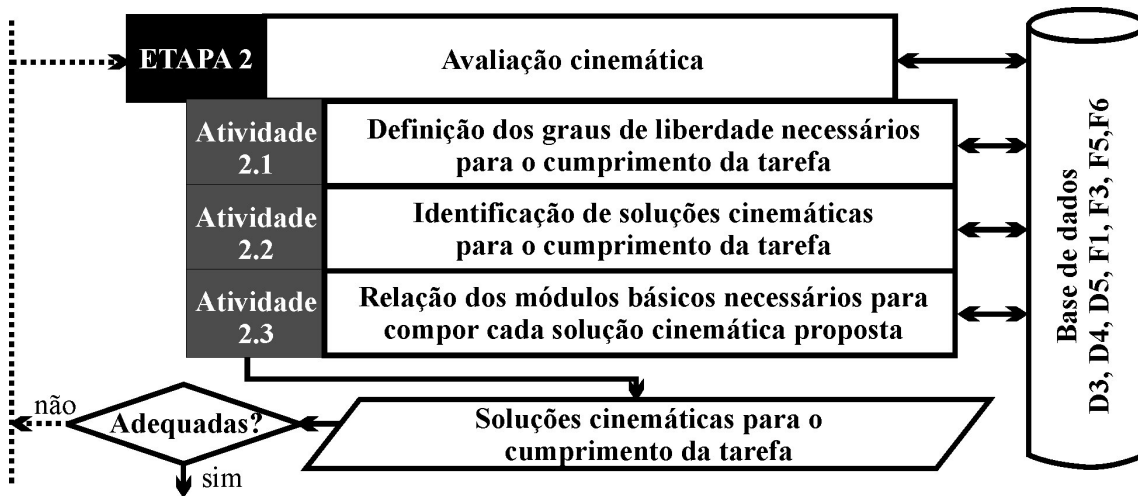
1. Quantas e quais as formas dos componentes que serão usinados?
2. Quais são os requisitos para famílias de componentes semelhantes?
3. Qual é a forma de cada componente?
4. Quais são as dimensões requeridas?
 - 4.1. Faixa de diâmetro interno e externo;
 - 4.2. Faixa de comprimentos das peças;
 - 4.3. Espessuras;
 - 4.4. Larguras e profundidades;
 - 4.5. Informações adicionais sobre a geometria.
5. Quais são as tolerâncias dimensionais requeridas?
6. Quais são as tolerâncias de forma, posição e orientação requeridas?
7. Qual é a qualidade superficial desejada?
 - 7.1. Qual é a rugosidade esperada?
 - 7.2. É exigida alguma topografia específica na superfície?

- 7.3. Há alguma exigência com relação à integridade da superfície?
- 8. Qual é o material a ser usinado?
- 9. Qual é a produtividade esperada pela máquina?
 - 9.1. Quantos componentes serão usinados?
 - 9.2. Qual é a frequência de produção desses componentes?
 - 9.3. Qual é a capacidade exigida pelo processo?

Tabela 4.9 - Componentes e suas tolerâncias na usinagem de ultraprecisão, conforme máquina-ferramenta desenvolvida por Stoeterau (1999).

DISCOS	CILINDROS	SEMI ESFERAS CÔNCAVAS
		
Diâmetro Máximo = 220 mm	Diâmetro Máximo = 200 mm Comprimento máximo = 400 mm	Diâmetro Máximo = 200 mm (raio de 100 mm)
Tolerância = $\pm 0,1 \mu\text{m}$	Tolerância = $\pm 0,1 \mu\text{m}$ (diâmetro) Tolerância = $\pm 1 \mu\text{m}$ (comprimento)	Tolerância = $\pm 0,1 \mu\text{m}$ (r)
Planeza = $3 \mu\text{m}$ Perpendicularidade = $2,5 \mu\text{m}$	Cilindricidade = $1 \mu\text{m}$ Retilidade = $1 \mu\text{m}$	Esfericidade = $0,5 \mu\text{m}$
Rugosidade (R_a) $\leq 10 \text{ nm}$	Rugosidade (R_a) $\leq 20 \text{ nm}$	Rugosidade (R_a) $\leq 10 \text{ nm}$
SEMI ESFERAS CONVEXAS	ANESFERAS	POLÍGONOS
		
Diâmetro Máximo = 220 mm		Diâmetro Máximo = 200 mm
Tolerância = $\pm 0,1 \mu\text{m}$ (raio)	Tolerância = $\pm 1 \mu\text{m}$	Tolerância = $\pm 0,1$ a $0,5 \mu\text{m}$
Esfericidade = $\pm 0,1 \mu\text{m}$		Perpendicularismo $> 5''$ Indexação $> 2'$
Rugosidade (R_a) $\leq 50 \text{ nm}$	Rugosidade (R_a) $\leq 50 \text{ nm}$	Rugosidade (R_a) $\leq 20 \text{ nm}$
CONES	FORMAS FACETADAS	ESFERAS
		
Diâmetro Máximo = 200 mm / $l_{\text{max.}} = 400 \text{ mm}$	Diâmetro Máximo = 100 mm	Diâmetro Máximo = 150 mm
Tolerância = $\pm 1 \mu\text{m}$ (l)	Tolerância = $\pm 0,01 \mu\text{m}$ (diâmetro) Tolerância = $\pm 0,1 \mu\text{m}$ (l)	Tolerância = $\pm 1 \mu\text{m}$ (raio)
Conicidade = $\pm 0,1 \mu\text{m}$	Esfericidade = $0,1 \mu\text{m}$ (faces adjacentes)	Esfericidade = $0,1 \mu\text{m}$
Rugosidade (R_a) $\leq 20 \text{ nm}$	Rugosidade (R_a) $\leq 50 \text{ nm}$	Rugosidade (R_a) $\leq 30 \text{ nm}$

Se as especificações técnicas necessárias para o cumprimento da tarefa forem adequadas, a metodologia segue para a etapa 2, conforme figura 4.8.



Código	Recurso	Comentários
D1	Função global do sistema	Descreve qual a tarefa a ser cumprida pelo sistema
D2	Especificações da tarefa	Descreve especificações técnicas necessárias para o cumprimento da tarefa e sua abrangência
D3	Graus de liberdade	Descreve os graus de liberdade necessários para o cumprimento da tarefa e requisitos de integração
D4	Soluções cinemáticas	Arranjos cinemáticos possíveis para o cumprimento da tarefa
D5	Módulos necessários	Relação dos módulos necessários para compor as soluções cinemáticas propostas
F1	Síntese funcional	Auxilia na definição da função global do sistema e na decomposição das funções do sistema
F3	Princípios de engenharia de precisão no projeto	Levantamento bibliográfico sobre princípios de engenharia de precisão no projeto de sistemas mecânicos de precisão e ultraprecisão
F5	Configurações cinemáticas para usinagem	Tabela de configurações cinemáticas aplicadas na usinagem de algumas formas de componentes
F6	Decomposição de uma máquina genérica	Modelo genérico de decomposição para sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis

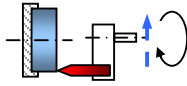
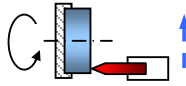
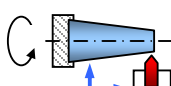
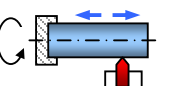
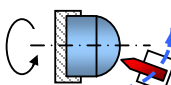
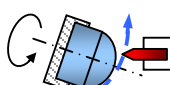
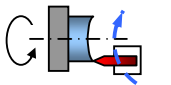
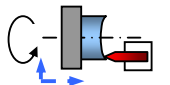
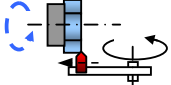
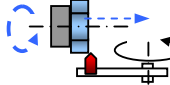
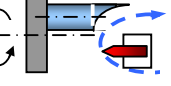
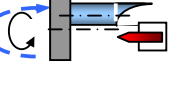
Figura 4.8 – Detalhamento da etapa 2 da metodologia.

A etapa 2 consiste na avaliação cinemática para compor soluções capazes de realizar a função global do sistema. A primeira atividade (atividade 2.1) consiste em, a partir da função global (D1) e do conjunto de especificações da tarefa (D2), definir quais são os graus de liberdade necessários para o correto cumprimento da tarefa (D3). A partir desses graus de liberdade, podem ser propostas (atividade 2.2) soluções cinemáticas para o problema (D4).

Mais uma vez, o conhecimento sobre síntese funcional (F1) e os princípios de engenharia de precisão para o projeto de sistemas mecânicos de precisão (F3), auxiliarão no desenvolvimento dessas atividades.

No projeto de máquinas-ferramentas algumas configurações cinemáticas (F5) foram apresentadas por Stoeterau (1999), conforme tabela 4.10.

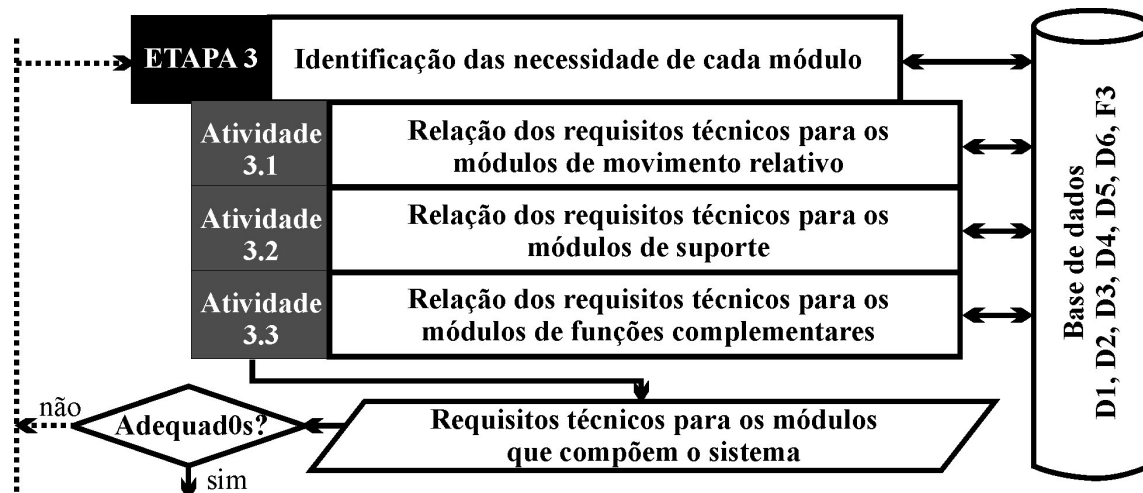
Tabela 4.10 - Configurações cinemáticas aplicadas alguns tipos de componentes, Stoeterau, 1999.

Componente a ser usinado	Movimento principal na ferramenta	Movimento principal na peça
DISCOS		
CILINDROS E CONES		
SEMI-ESFERAS CONVEXAS		
SEMI-ESFERAS CÔNCAVAS		
POLÍGONOS		
ANESFERAS		

Definidas algumas soluções cinemáticas, a próxima atividade (atividade 2.3) consiste em relacionar quantos e quais módulos de movimento relativo, de suporte e de funções complementares (F6) são necessários para compor essas soluções cinemáticas (D5).

Esta relação de módulos é somente um ponto de partida para a definição de quais módulos serão empregados pelo sistema. É possível que sejam adicionados mais módulos posteriormente conforme a necessidade técnica ou funcional. Por exemplo, um sistema de medição independente pode ser adicionado ao sistema se for necessário.

Se as soluções cinemáticas propostas (D4) forem adequadas, a metodologia segue para a etapa 3, conforme figura 4.9.



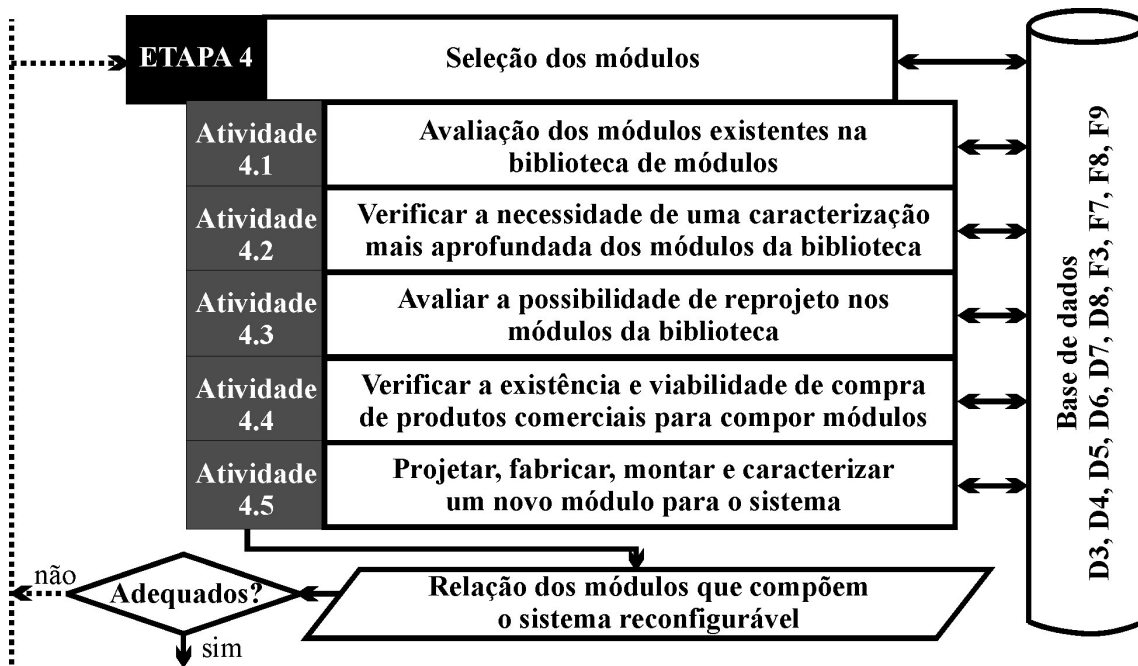
Código	Recurso	Comentários
D1	Função global do sistema	Descreve qual a tarefa a ser cumprida pelo sistema
D2	Especificações da tarefa	Descreve especificações técnicas necessárias para o cumprimento da tarefa e sua abrangência
D3	Graus de liberdade	Descreve os graus de liberdade necessários para o cumprimento da tarefa e requisitos de integração
D4	Soluções cinemáticas	Arranjos cinemáticos possíveis para o cumprimento da tarefa
D5	Módulos necessários	Relação dos módulos necessários para compor as soluções cinemáticas propostas
D6	Requisitos dos módulos	Requisitos técnicos para cada um dos módulos necessários para compor as soluções cinemáticas
F3	Princípios de engenharia de precisão no projeto	Levantamento bibliográfico sobre princípios de engenharia de precisão no projeto de sistemas mecânicos de precisão e ultraprecisão

Figura 4.9 – Detalhamento da etapa 3 da metodologia.

A etapa 3 consiste na identificação das necessidades de cada módulo que irá compor o sistema. A partir da função global do sistema (D1), das especificações da tarefa, ou desta função global (D2), das informações sobre os graus de liberdade necessários (D3), das soluções cinemáticas propostas (D4) e da relação prévia de módulos necessários (D5), é possível identificar quais são os requisitos técnicos necessários para cada módulo que irá compor o sistema (D6). A qualidade final do sistema é consequência da qualidade de cada um dos componentes utilizados nesse sistema, num encadeamento de erros apresentado no princípio de determinismo (F3).

A etapa 3 então busca relacionar os requisitos técnicos para os módulos de movimento relativo (atividade 3.1), para os módulos de suporte (atividade 3.2) e para os módulos de funções complementares (atividade 3.3).

Se os requisitos relacionados (D6) forem adequados, a metodologia segue para a etapa 4, conforme figura 4.10.



Código	Recurso	Comentários
D3	Graus de liberdade	Descreve os graus de liberdade necessários para o cumprimento da tarefa e requisitos de integração
D4	Soluções cinemáticas	Arranjos cinemáticos possíveis para o cumprimento da tarefa
D5	Módulos necessários	Relação dos módulos necessários para compor as soluções cinemáticas propostas
D6	Requisitos dos módulos	Requisitos técnicos para cada um dos módulos necessários para compor as soluções cinemáticas
D7	Biblioteca de módulos	Relação dos módulos disponíveis para compor o sistema (anexo 2)
D8	Catálogos de fabricantes	Catálogos de componentes e sistemas comerciais que podem compor módulos
D9	Módulos selecionados	Relação de módulos selecionados para cada configuração cinemática
F3	Princípios de engenharia de precisão no projeto	Levantamento bibliográfico sobre princípios de engenharia de precisão no projeto de sistemas mecânicos de precisão e ultraprecisão
F7	Sistema CAD	Software CAD para projeto virtual das soluções cinemáticas
F8	Internet	Ferramentas de busca de catálogos <i>on line</i>
F9	Metodologia de projeto tradicional	Metodologia de projeto e reprojetar para obtenção de módulos necessários ao sistema mecânico de precisão

Figura 4.10 – Detalhamento da etapa 4 da metodologia.

A etapa 4 consiste na seleção dos módulos que irão compor o sistema. A partir das informações sobre os graus de liberdade necessários (D3), das soluções cinemáticas propostas (D4) da relação prévia de módulos necessários (D5), e dos requisitos técnicos para todos os módulos que compõem as soluções cinemáticas propostas (D6), parte-se para a avaliação (atividade 4.1) da biblioteca de módulos disponíveis (D7) para a composição do conjunto de módulos selecionados para cada solução cinemática.

A avaliação da biblioteca de módulos deve levar em consideração os princípios de engenharia de precisão apresentados (F3). É importante verificar (atividade 4.2) se as informações contidas na caracterização dos módulos disponíveis são suficientes para uma correta seleção de acordo com os requisitos. Caso sejam insuficientes, deve-se providenciar um levantamento mais aprofundado das características dos módulos.

Os módulos que forem adequados vão sendo colocados numa relação de módulos selecionados (D9). É importante que o modelo em CAD 3D (F7) destes módulos seja disponibilizado desde já para auxiliar nas próximas etapas da metodologia.

É possível que alguns módulos não se enquadrem às necessidades identificadas. Assim, recomenda-se avaliar a possibilidade (atividade 4.3) de reprojeter (F9) módulos disponíveis para que passem a se enquadrar nos requisitos do projeto. Os módulos reprojeterados devem passar por uma bateria de ensaios para verificação das novas características adquiridas, atualizando assim a biblioteca.

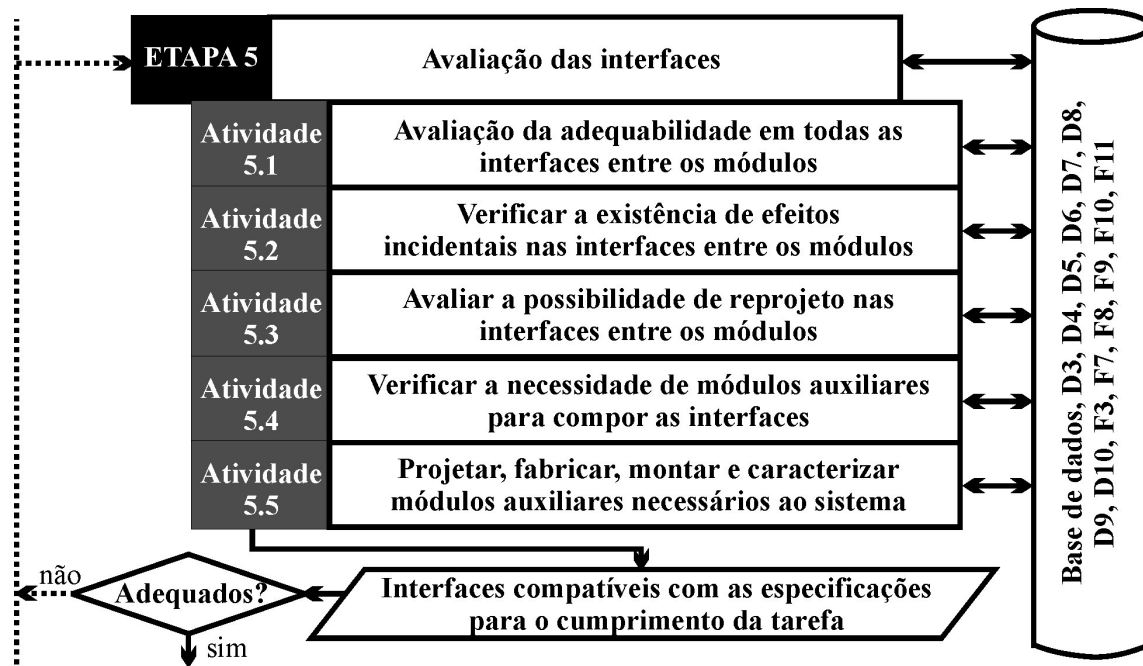
Esta é a saída de menor custo, mas se isto não for possível, pode-se verificar (atividade 4.4) a existência e a viabilidade de compra de produtos comerciais para compor os módulos que estão faltando, empregando catálogos de produtos adequados (D8) e buscas na *Internet* (F8). Se forem comprados módulos prontos ou até mesmo se forem modificados módulos comerciais, é importante extrair adequadamente suas características para a correta documentação na biblioteca de módulos.

Por fim, caso não seja possível realizar a compra ou não existam produtos adequados, resta realizar (atividade 4.5) o projeto de um novo módulo. Esse projeto pode ser conduzido com o auxílio de uma metodologia clássica de projeto (F9), como demonstrado no capítulo 2. Esse projeto deve ser acompanhado da fabricação, montagem e qualificação do novo módulo, passando a fazer parte da biblioteca de módulos (D7).

A etapa 4 se encerra quando uma relação completa de módulos estiver disponível (D9) para compor o sistema.

Neste ponto, se houver módulos suficientes para compor várias soluções cinemáticas, todas as soluções possíveis devem ser levadas adiante, permitindo que a escolha da melhor solução seja feita mais tarde, avaliando-se outros aspectos para compor o sistema final.

Se a relação de módulos selecionados (D9) for adequada, a metodologia segue para a etapa 5, conforme figura 4.11.



Código	Recurso	Comentários
D3	Graus de liberdade	Descreve os graus de liberdade necessários para o cumprimento da tarefa e requisitos de integração
D4	Soluções cinemáticas	Arranjos cinemáticos possíveis para o cumprimento da tarefa
D6	Requisitos dos módulos	Requisitos técnicos para cada um dos módulos necessários para compor as soluções cinemáticas
D7	Biblioteca de módulos	Relação de módulos disponíveis para compor sistema (anexo 2)
D8	Catálogos de fabricantes	Catálogos de componentes e sistemas comerciais que podem compor módulos
D9	Módulos selecionados	Relação de módulos selecionados para cada configuração cinemática
D10	Requisitos das interfaces	Requisitos necessários às interfaces para garantir qualidade final
D11	Identificação interfaces	Relação das interfaces, suas interdependências e soluções para efeitos incidentais
F3	Princípios de engenharia de precisão no projeto	Levantamento bibliográfico sobre princípios de engenharia de precisão no projeto de sistemas mecânicos de precisão e ultraprecisão
F7	Sistema CAD	Software CAD para projeto virtual das soluções cinemáticas
F8	Internet	Ferramentas de busca de catálogos on line
F9	Metodologia de projeto tradicional	Metodologia de projeto e reprojeção para obtenção de módulos necessários ao sistema mecânico de precisão
F10	Sistema CAE	Software CAE para simulação das características dos módulos e propagação de efeitos incidentais
F11	Matriz de avaliação das interfaces	Matriz de correlação entre os módulos para identificação de influências entre os módulos

Figura 4.11 – Detalhamento da etapa 5 da metodologia.

A etapa 5 consiste na avaliação das interfaces entre os módulos que compõem cada sistema. As interfaces devem garantir a qualidade de montagem dos módulos selecionados (D9) para compor o sistema, de acordo com os graus de liberdade previstos (D3) e com as soluções cinemáticas (D4) encontradas.

No levantamento dos requisitos necessários aos módulos (D6), muitas questões relativas às interfaces já foram identificadas. Da mesma forma, a caracterização dos módulos na biblioteca (D7) possui os dados relativos às interfaces de cada módulo. Desta forma, é possível relacionar requisitos específicos para as interfaces (D10) entre os módulos que compõem cada sistema.

A primeira atividade da etapa (atividade 5.1) consiste em avaliar a adequação de montagem entre todos os módulos do sistema em cada configuração proposta. Essa avaliação é feita com auxílio de um sistema CAD (F7) e deve levar em consideração os princípios de engenharia de precisão no projeto (F3). Uma outra ferramenta que auxilia na avaliação das interfaces é a matriz de avaliação das interfaces (F11), conforme exemplo na figura 4.12.

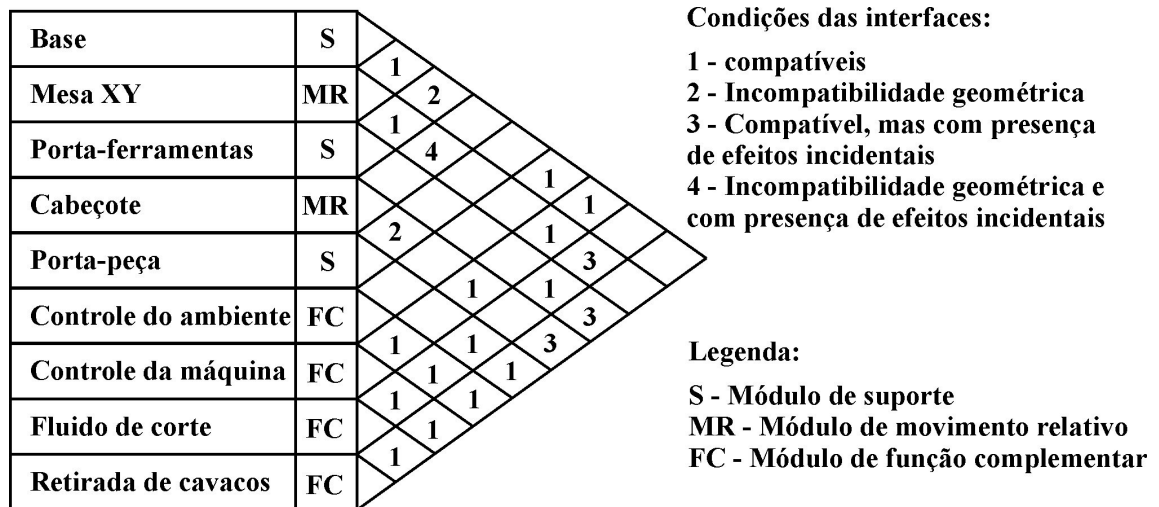


Figura 4.12 – Matriz de avaliação das interfaces para uma máquina qualquer.

Como mostra a figura 4.12, a avaliação das interfaces não deve se preocupar somente com questões geométricas de montagem, mas também com a existência de efeitos incidentais (atividade 5.2) entre os módulos. Qualquer propagação de calor, vibrações, energia, alteração na rigidez e amortecimento, entre outros efeitos, vai alterar as características individuais de cada módulo e, conseqüentemente, pode causar efeitos indesejáveis no sistema final montado. Sistemas CAE (F10) podem ser empregados para simular a ação desses efeitos incidentais e sua influência no comportamento do sistema montado. O resultado da matriz de avaliação das interfaces (F11) auxilia na correta identificação das interfaces existentes em cada concepção (D11). Também podem ser avaliadas transferências de sinais e energia entre módulos.

A compatibilidade entre módulos, bem como a existência de efeitos incidentais indesejáveis, são parâmetros que devem ser levados em consideração para a seleção da

solução cinemática a ser utilizada. Até esta etapa, todas as soluções cinemáticas possíveis de serem concebidas foram consideradas e estruturadas. Com a adição dessas informações sobre as interfaces, é possível decidir sobre qual é a solução mais adequada.

Caso todos os requisitos das interfaces (D10) não tenham sido cumpridos, é possível realizar um reprojeto (F9) (atividade 5.3) nas interfaces de alguns módulos para torná-los compatíveis com os demais. Uma outra saída é a utilização de módulos auxiliares (atividade 5.4) para garantir a qualidade da montagem (atividade 5.4). Alguns fabricantes (D8) (F8) comercializam componentes próprios para auxiliar e compatibilizar montagens.

Caso não haja possibilidade de encontrar módulos auxiliares prontos, parte-se então para o projeto (F9), fabricação e caracterização (atividade 5.5) destes módulos auxiliares que garantam a qualidade das interfaces para a montagem do sistema.

Com a definição e solução de todos os problemas incidentais nas interfaces, é importante identificar todas essas interfaces (D11) para aplicações futuras dos módulos.

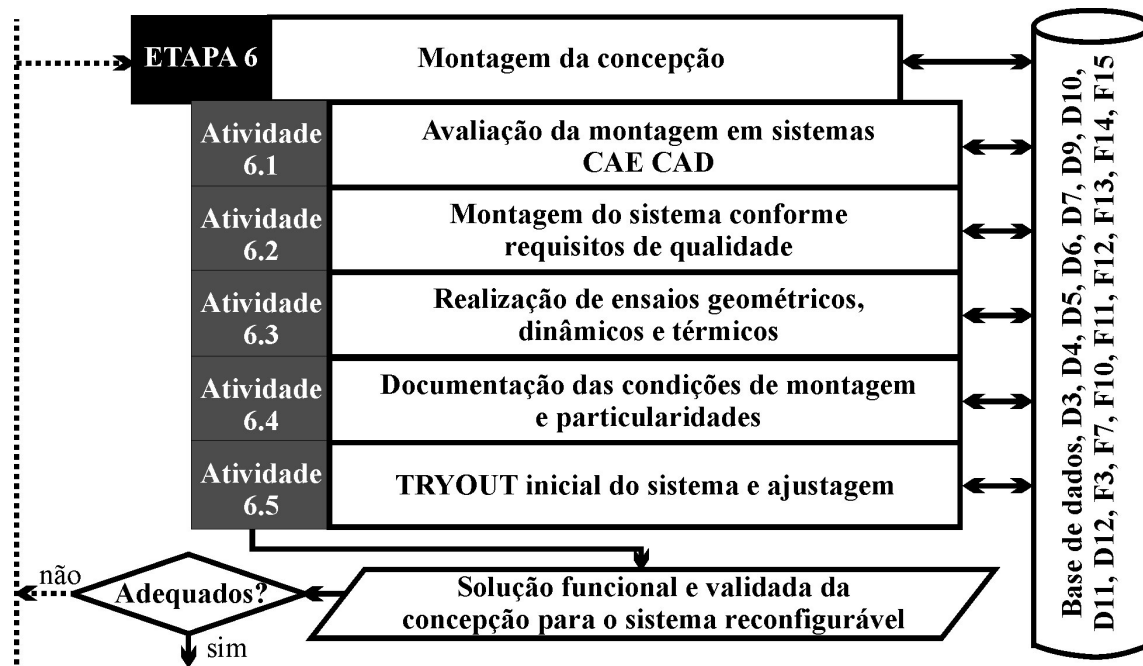
Se todas as interfaces do sistema (D11) são compatíveis com as especificações para o cumprimento da tarefa, a metodologia segue para a etapa 6, conforme figura 4.13.

A etapa 6 consiste na montagem da concepção final do sistema reconfigurável, de acordo com a solução cinemática selecionada (D4) e os graus de liberdade previstos (D3). É importante garantir a qualidade de posicionamento relativo entre módulos de movimento relativo.

A primeira atividade (atividade 6.1) é a avaliação da montagem com auxílio de sistemas CAD (F7) e CAE (F10), respeitando os princípios de engenharia de precisão (F3) e os requisitos individuais de cada módulo (D6) e suas interfaces (D10). O modelo em CAD de cada módulo selecionado (D9) faz parte da documentação do módulo junto à biblioteca de módulos (D7), bem como a identificação de todas as interfaces previstas (D11).

Quando houver a garantia de qualidade da montagem através da simulação, parte-se para a montagem propriamente dita (atividade 6.2), que deve ser seguida da realização de ensaios geométricos (F12), ensaios dinâmicos (F13) e ensaios térmicos (F14) para avaliar a condição global do sistema (atividade 6.3). A realização desses ensaios depende, logicamente, da disponibilidade de tempo e de equipamentos adequados.

A próxima atividade (atividade 6.4) é a documentação (D12) de todos esses procedimentos, descrevendo dispositivos e ferramentas especiais eventualmente necessárias nessa montagem e as condições e resultados dos ensaios.

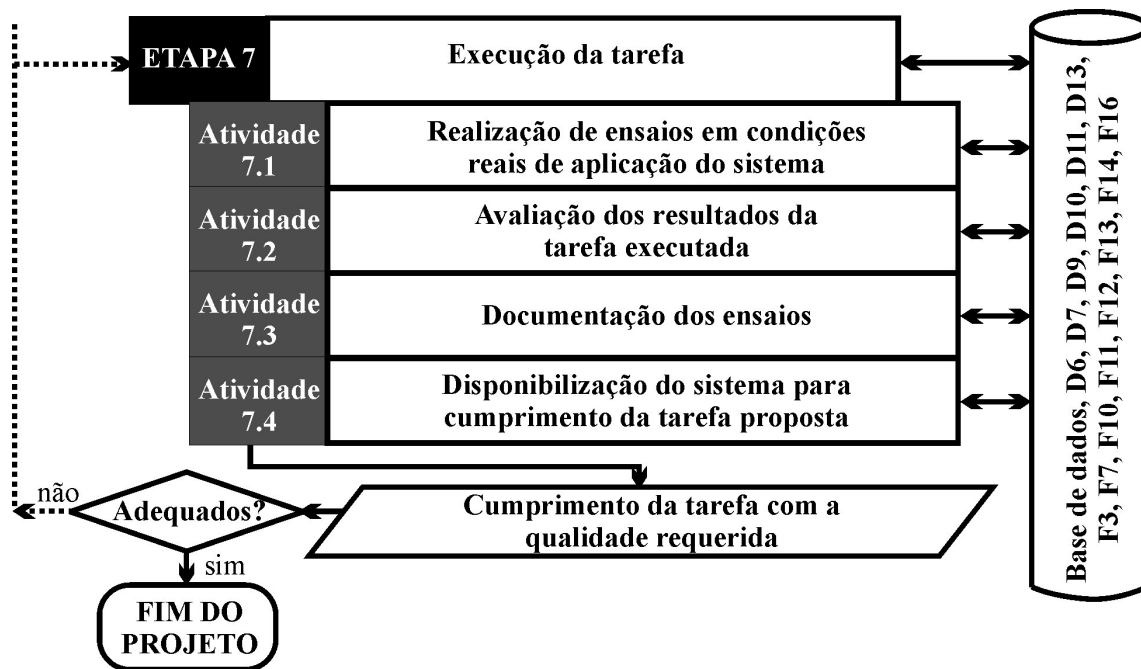


Código	Recurso	Comentários
D3	Graus de liberdade	Descreve os graus de liberdade necessários para o cumprimento da tarefa e requisitos de integração
D4	Soluções cinemáticas	Arranjos cinemáticos possíveis para o cumprimento da tarefa
D6	Requisitos dos módulos	Requisitos técnicos para cada um dos módulos necessários para compor as soluções cinemáticas
D7	Biblioteca de módulos	Relação de módulos disponíveis para compor sistema (anexo 2)
D9	Módulos selecionados	Relação de módulos selecionados para cada configuração cinemática
D10	Requisitos das interfaces	Requisitos necessários às interfaces para garantir qualidade final
D11	Identificação interfaces	Relação das interfaces, suas interdependências e soluções para efeitos incidentais
D12	Documentação montagem	Documentação de todo o processo de montagem e recursos utilizados
D13	Documentação TRYOUT 1	Documentação dos procedimentos do TRYOUT realizado em vazio
F3	Princípios de engenharia de precisão no projeto	Levantamento bibliográfico sobre princípios de engenharia de precisão no projeto de sistemas mecânicos de precisão e ultraprecisão
F7	Sistema CAD	Software CAD para projeto virtual das soluções cinemáticas
F10	Sistema CAE	Software CAE para simulação das características dos módulos e propagação de efeitos incidentais
F12	Ensaio geométricos	Ensaio geométricos necessários para caracterizar interfaces e o sistema na configuração final
F13	Ensaio dinâmicos	Ensaio dinâmicos necessários para caracterizar interfaces e o sistema na configuração final
F14	Ensaio térmicos	Avaliação da propagação de calor e sua influência na estrutura
F15	TRYOUT 1	Ensaio em vazio de funcionamento do sistema montado

Figura 4.13 – Detalhamento da etapa 6 da metodologia.

A atividade final desta etapa (atividade 6.5) é a realização (F15) e documentação (D13) de um *tryout* do sistema em vazio, simulando toda a operação do sistema.

Se o sistema cumpre sua tarefa ou função global com a qualidade requerida, a metodologia segue para a etapa 7, conforme a figura 4.14.



Código	Recurso	Comentários
D6	Requisitos dos módulos	Requisitos técnicos para cada um dos módulos necessários para compor as soluções cinemáticas
D7	Biblioteca de módulos	Relação de módulos disponíveis para compor sistema (anexo 2)
D10	Requisitos das interfaces	Requisitos necessários às interfaces para garantir qualidade final
D11	Identificação interfaces	Relação das interfaces, suas interdependências e soluções para efeitos incidentais
D12	Documentação montagem	Documentação de todo o processo de montagem e recursos utilizados
D14	Documentação <i>TRYOUT 2</i>	Documentação dos procedimentos e resultados do <i>TRYOUT</i> realizado em condições de operação
F3	Princípios de engenharia de precisão no projeto	Levantamento bibliográfico sobre princípios de engenharia de precisão no projeto de sistemas mecânicos de precisão e ultraprecisão
F12	Ensaio geométricos	Ensaio geométricos necessários para caracterizar interfaces e o sistema na configuração final
F13	Ensaio dinâmicos	Ensaio dinâmicos necessários para caracterizar interfaces e o sistema na configuração final
F14	Ensaio térmicos	Avaliação da propagação de calor e sua influência na estrutura
F16	<i>TRYOUT 2</i>	Ensaio de funcionamento do sistema montado na configuração final em condições de operação

Figura 4.14 – Detalhamento da etapa 7 da metodologia.

A etapa 7 é a execução da tarefa para a qual o sistema foi configurado. Dependendo do tipo de sistema, é importante realizar uma série de aplicações preliminares para avaliar o seu comportamento em condições reais de utilização (atividade 7.1).

Esses ensaios devem ser avaliados (atividade 7.2) e comparados com todas as informações levantadas durante a metodologia, como os requisitos dos módulos (D6), a caracterização dos mesmos na biblioteca (D7), a identificação das interfaces (D11) e a

documentação produzida durante a montagem. Essas informações vão permitir que pequenos ajustes sejam feitos para otimizar o comportamento do sistema.

Esses ensaios (F16) devem ser devidamente documentados (atividade 7.3) (D14) e o sistema passa então a estar disponível para realizar suas tarefas nas condições requeridas, encerrando o processo de projeto conduzido.

4.6 – Considerações finais

A metodologia de projeto para sistemas de precisão reconfiguráveis foi desenvolvida com base em três conjuntos estruturados de informações, como demonstra esquematicamente a figura 4.15.

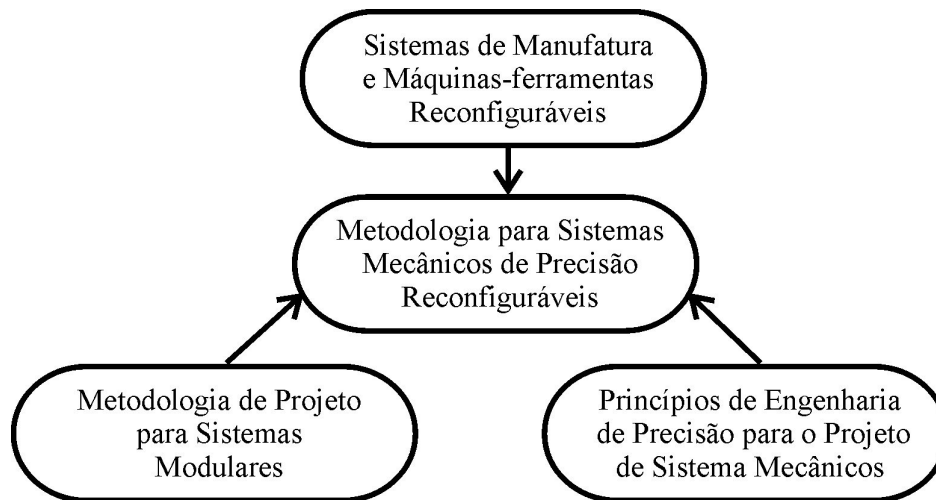


Figura 4.15 – Bases de sustentação da metodologia de projeto para sistemas de precisão reconfiguráveis.

Da metodologia de projeto para sistemas modulares, a metodologia proposta herdou a forma de apresentação estruturada e os conceitos gerais de utilização de sistemas modulares. Dos sistemas de manufatura reconfiguráveis extraiu-se a filosofia de trabalho com estruturação de módulos independentes a partir de uma biblioteca e as análises para geração de concepções cinemáticas. Dos princípios de engenharia de precisão, buscou-se toda a teoria necessária para garantia da qualidade final do sistema configurado, embasando tecnicamente todos os passos da metodologia.

No próximo capítulo serão apresentados exemplos de aplicação da metodologia proposta no desenvolvimento de um torno de ultraprecisão e de um esclerômetro.

CAPÍTULO 5

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE PROJETO PARA SISTEMAS MECÂNICOS DE PRECISÃO RECONFIGURÁVEIS

O projeto de um sistema mecânico de precisão reconfigurável se inicia a partir de uma necessidade de composição de um sistema com a característica de reconfigurabilidade. Desde os primeiros passos no processo de projeto, deve ficar clara a necessidade de reconfigurabilidade no sistema, seja por motivações puramente econômicas, como a possibilidade de aproveitamento de sistemas independentes disponíveis, ou mesmo motivado pela necessidade de reconfigurações sucessivas do sistema.

A seguir, serão apresentados dois exemplos de aplicação da metodologia de projeto para sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis, o desenvolvimento de um esclerômetro e o desenvolvimento de um torno de ultraprecisão para usinagem de espelhos cônicos.

5.1 – Desenvolvimento de um esclerômetro

O desgaste abrasivo é um fenômeno interfacial bastante complexo no qual a superfície ativa de uma peça perde material pelo movimento relativo com partículas abrasivas e/ou com uma outra superfície rugosa. Este tipo de desgaste corresponde a 50% dos casos de falha por desgaste, o que lhe confere grande importância econômica (Mello, 1994).

A compreensão desse fenômeno pode ser obtida pela aplicação de técnicas controladas de desgaste. O processo abrasivo pode ser estudado através de contatos elementares, supondo seus efeitos independentes, através de técnicas esclerométricas; ou com o contato de vários elementos abrasivos simultaneamente na superfície ensaiada, através de técnicas abrasométricas.

Na técnica esclerométrica, as partículas isoladas são assimiladas como sendo penetradores duros e de geometria simples e conhecida, que vão riscar superfícies dos materiais ensaiados. Nestas condições, é possível avaliar aspectos fundamentais do processo abrasivo, como:

- Determinar os esforços atuantes nas diferentes fases constituintes do material;
- A partir de considerações da mecânica de contato, e para cada fase considerada isoladamente, pode-se determinar: dureza ao risco, tenacidade, energia específica e índice de fragilidade;
- Estudar a morfologia da deformação nas proximidades do penetrador e determinar: efeito da geometria do penetrador, fator de perda de material, ângulo crítico de ataque etc; e
- Estabelecer critérios para a transição “abrasão dúctil / abrasão frágil” e discriminar a contribuição de cada uma no processo abrasivo;

De uma forma bem generalizada, pode-se definir um ensaio esclerométrico como sendo a aplicação de um riscamento com uma ponta dura na superfície ensaiada, monitorando-se as forças nas direções normal e tangencial à superfície e a geometria do risco produzido.

No contexto de uma linha de pesquisa desenvolvida junto ao Laboratório de Materiais da UFSC, surgiu a necessidade de desenvolvimento de um esclerômetro de baixo custo para equipar laboratórios de controle de qualidade em indústrias cerâmicas.

Por se tratar de um equipamento para certificação da qualidade de materiais produzidos, é fundamental que esses aparelhos possuam confiabilidade metrológica garantida. Sendo assim, antes de se desenvolver um esclerômetro a partir de componentes convencionais, é necessário que seja construído um esclerômetro montado a partir de componentes com altíssima qualidade para servir de modelo de comparação dos resultados alcançados e também para permitir uma avaliação da influência de cada componente a ser empregado no modelo simplificado na incerteza global do equipamento.

Esta característica de avaliação dos componentes individualmente junto a um sistema com baixíssima incerteza, simplesmente substituindo-se cada componente de precisão por um convencional e avaliando-se os novos resultados alcançados, é típica de um sistema reconfigurável. A montagem do esclerômetro em módulos permite a realização desses ensaios com diferentes tipos e qualidades de componentes.

5.1.1– ETAPA 1 – Definição da tarefa a ser cumprida pelo sistema

A função global do esclerômetro, como solicitado pela atividade 1.1 da metodologia, é **permitir que toda a gama de ensaios esclerométricos possa ser realizada garantindo**

confiabilidade metrológica e baixa incerteza nos resultados alcançados. Esses ensaios devem permitir que se possa avaliar os aspectos fundamentais do processo abrasivo, como descrito anteriormente. A figura 5.1 esquematiza a função global do sistema, caracterizando o documento 1 do esclerômetro reconfigurável (**ER D1**).

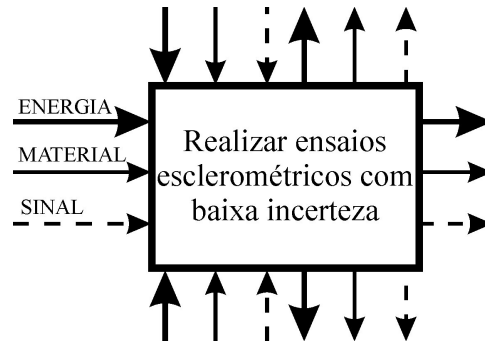


Figura 5.1 – Função global do esclerômetro (**ER D1**).

Uma avaliação das necessidades a serem atendidas no projeto do esclerômetro levou a uma lista de requisitos de projeto a serem cumpridos, que especificam melhor a tarefa a ser cumprida pelo sistema.

A lista de especificações é (atividade 1.2, **ER D2**):

- ⇒ Dimensões de trabalho = 100, 100, 50;
- ⇒ Deslocamento principal de riscamento (X) com baixos erros na sua trajetória, até 3 μm de desvio máximo de linearidade;
- ⇒ Deslocamento X com velocidade controlada e variável, de 0 a 1 mm/s;
- ⇒ O deslocamento Y para posicionamento dos riscos na amostra pode ser manual;
- ⇒ Fixação rígida do indentador;
- ⇒ Sistema de medição de forças rígido;
- ⇒ Medição de força com sensibilidade de 0,1 N nas direções normal e tangencial;
- ⇒ Aplicação de carregamento de 0,5 a 40 N, com carga constante ou variável;
- ⇒ Realização de ensaios em corpos de prova planos, mas sem preparação prévia da superfície a ser ensaiada para que possua baixo erro de planicidade;
- ⇒ Controle do processo, aquisição e análise dos resultados via PC;
- ⇒ Análise óptica do risco para avaliação geométrica do mesmo;
- ⇒ Interface de controle de fácil manuseio;
- ⇒ Análise da emissão acústica durante os riscamentos.

5.1.2– ETAPA 2 – Avaliação cinemática

A atividade 2.1 consiste em definir os graus de liberdade necessários para o cumprimento da tarefa. A figura 5.2 apresenta um esquema de realização do ensaio de resistência ao risco (esclerométrico).

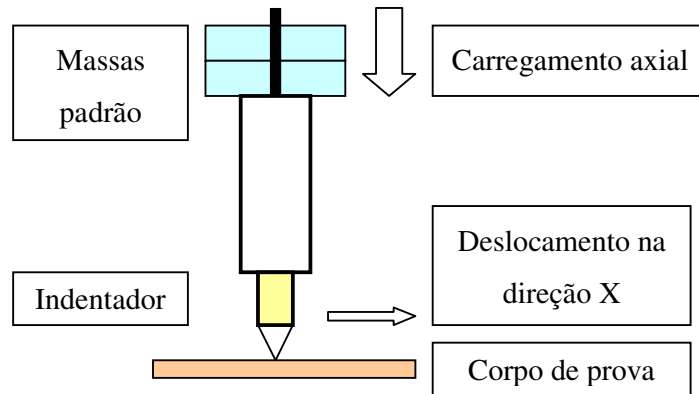


Figura 5.2 – Esquema de um ensaio esclerométrico.

Como pode ser visto na figura 5.2, um indentador posicionado perpendicularmente com relação ao corpo de prova sofre um movimento relativo em uma direção tangencial com relação à superfície deste corpo de prova (direção X), para que seja produzido um riscamento da mesma. Além desse movimento principal, é necessário um grau de liberdade na direção axial (direção Z) para permitir que diferentes forças axiais sejam aplicadas ao indentador. A orientação do indentador com relação ao corpo de prova é fixa, sendo sempre perpendicular. Um outro movimento na direção perpendicular ao deslocamento principal de riscamento (direção Y) é necessário para simplesmente posicionar o indentador sobre o corpo de prova de modo que este possa produzir riscos paralelos na amostra ensaiada.

O esclerômetro caracteriza-se por ser um sistema tipicamente cartesiano XYZ (**ER D3**).

Como já está claro que o sistema é cartesiano XYZ, as soluções cinemáticas para o esclerômetro (atividade 2.2) possuem variações possíveis somente no referencial a ser empregado. Pode-se fixar o indentador e mover o corpo de prova para gerar o movimento principal de riscamento ou deixar o corpo de prova fixo, movendo-se o indentador para gerar o mesmo movimento(**ER D4**).

O próximo passo (atividade 2.3) é relacionar quantos e quais módulos de deslocamento relativo, de suporte e de funções complementares são necessários para compor o esclerômetro. A tabela 5.1 relaciona estes módulos (**ER D5**).

Tabela 5.1 – Módulos básicos necessários para compor o esclerômetro.

Tipo de módulo	Descrição	Função no sistema
Movimento relativo	Guia X	Deslocamento principal para o riscamento
Movimento relativo	Guia Y	Posiciona o indentador no corpo de prova
Movimento relativo	Guia Z	Deslocamento axial do indentador
Suporte	Mesa de suporte	Suporte de todo o sistema
Suporte	Indentador	Fixação rígida do indentador na guia Z
Suporte	Porta-peça	Fixação do corpo de prova
Função complementar	Força tangencial	Medição de força tangencial
Função complementar	Força axial	Medição de força axial
Função complementar	Emissão acústica	Medição de emissão acústica
Função complementar	Câmera	Medição da geometria do risco
Função complementar	Controle	Controla movimentos, adquire e analisa os dados

Uma disposição esquemática das funções do esclerômetro é dada na figura 5.3.

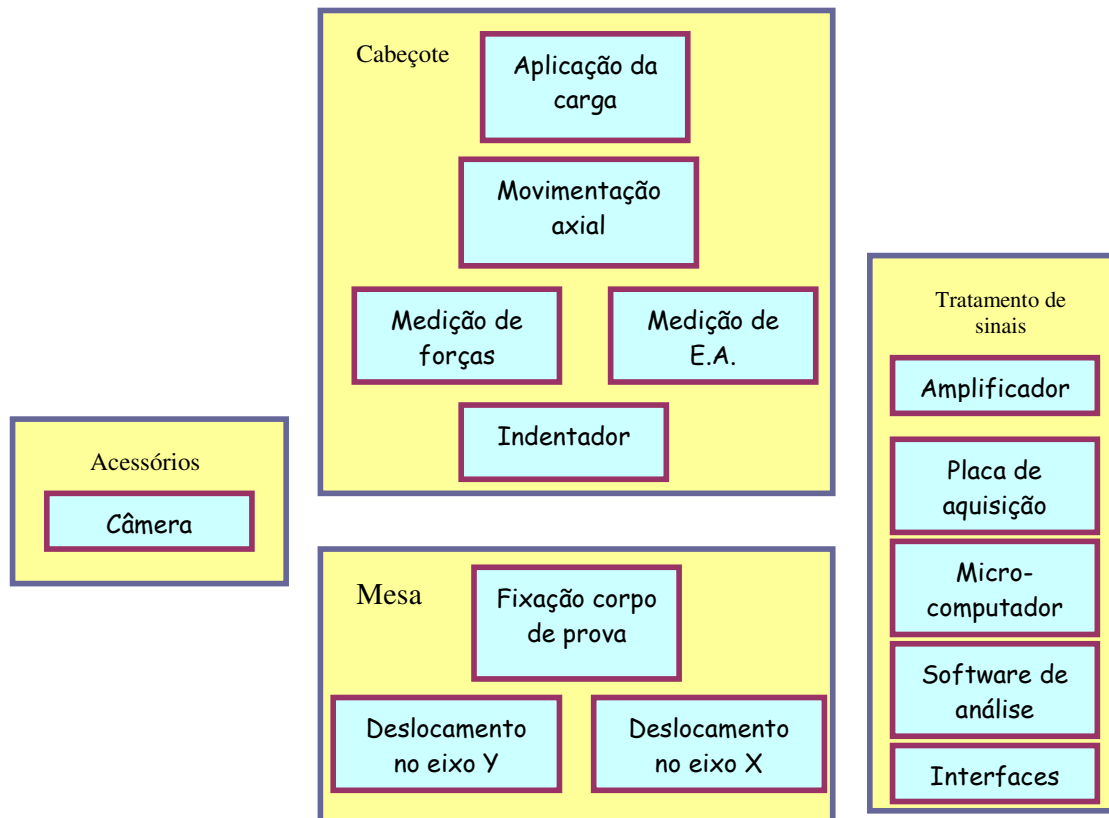


Figura 5.3 – Disposição esquemática das funções do esclerômetro.

Nessa disposição, opta-se por realizar o movimento principal de riscamento deixando-se o indentador fixo e movendo-se a amostra a ser riscada. Se fosse o contrário, seria necessário ter-se uma guia X com muito mais robustez e, conseqüentemente, com menor sensibilidade no controle de movimento e com erros de trajetória maiores.

O esclerômetro é dividido em dois sistemas mecânicos principais, o cabeçote e a mesa. O cabeçote possui o indentador com seu sistema de deslocamento axial e os sensores de medição de força e de emissão acústica. A mesa é responsável por fixar a amostra e realizar o movimento principal de riscamento. Além disso, é necessário um módulo de controle de movimento, aquisição e tratamento de sinais e a câmera para medição da geometria dos riscos produzidos.

O módulo de controle do sistema deverá ser capaz de realizar ensaios com carregamento variável ao longo do risco, independente do acabamento superficial da amostra. Sendo assim, a guia Z do sistema deverá operar num sistema de malha fechada, controlado pelo sensor de força axial. Desta forma, a guia Z permitirá que o indentador acompanhe a topografia da superfície riscada, mantendo os valores de carga axial conforme planejado no ensaio.

5.1.3– ETAPA 3 – Identificação das necessidades de cada módulo

As atividades 3.1, 3.2 e 3.3 consistem em identificar, a partir de todos os requisitos globais do sistema que foram relacionados, as especificações para cada módulo que irá compor o esclerômetro.

Os módulos listados na tabela 5.1 (**ER D5**) devem possuir características que atendam à lista de especificações para o esclerômetro (**ER D2**) e as questões cinemáticas avaliadas (**ER D3** e **ER D4**). A tabela 5.2 apresenta uma relação dos módulos e seus requisitos (**ER D6**).

5.1.4– ETAPA 4 – Seleção dos módulos

Definidos os requisitos para cada módulo que irá compor o esclerômetro, faz-se uma avaliação dos módulos existentes (atividade 4.1) para identificar se estes se enquadram nos requisitos para o esclerômetro.

Os módulos existentes estão disponíveis numa biblioteca de módulos (anexo 2 e **ER D7**). Uma avaliação nesta biblioteca resultou na escolha dos módulos de número 005 (guia linear PI M-410.DG) para servir de guia Z, número 006 (guia linear PI M-521.DD) para servir de guia X, número 013 (guia manual de escorregamento) para servir de Guia Y e número 014 (Mesa de granito) para servir de mesa de suporte para o esclerômetro. Todos os módulos selecionados possuem características adequadas para a necessidade do esclerômetro, pois atendem aos requisitos listados na tabela 5.2..

Tabela 5.2 – Requisitos para cada módulo que irá compor o esclerômetro.

Módulo	Requisitos
Guia X	<ul style="list-style-type: none"> - Curso mínimo de 100 mm - Erro de retilineidade máximo de 3 μm - Acionamento suave com velocidade controlada de 0 a 10 mm/s - Capacidade de carga axial mínima de 100 N - Capacidade de carga tangencial mínima de 50 N
Guia Y	<ul style="list-style-type: none"> - Curso mínimo de 100 mm - Acionamento pode ser manual - Capacidade de carga axial mínima de 200 N
Guia Z	<ul style="list-style-type: none"> - Curso mínimo de 50 mm - Erro de retilineidade máximo de 3 μm - Acionamento suave com velocidade controlada de 0 a 1 mm/s - Capacidade de carga axial mínima de 50 N - Capacidade de carga tangencial mínima de 50 N
Mesa de suporte	<ul style="list-style-type: none"> - Isolamento passivo de vibrações - Dimensões mínimas de 500 x 400 mm
Indentador	<ul style="list-style-type: none"> - Fixação rígida - Ponta de diamante com dimensões padrão de ensaios de dureza
Porta-peça	<ul style="list-style-type: none"> - Fixação rígida do corpo de prova - Capacidade de fixação de corpos de prova com até 50 x 50 x 20 mm
Força tangencial	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilidade de medição de 0,1 N - Faixa de medição de 0 a 40 N - Fixação rígida
Força axial	<ul style="list-style-type: none"> - Resolução de medição de 0,1 N - Faixa de medição de 0 a 40 N - Fixação rígida
Emissão acústica	<ul style="list-style-type: none"> - Medição de emissão acústica
Câmera	<ul style="list-style-type: none"> - Medição da geometria do risco
Controle	<ul style="list-style-type: none"> - Controle automático da velocidade de riscamento - Controle automático da força axial de riscamento - Controle de rampa de aplicação de força de riscamento - Medição e tratamento das forças adquiridas nos ensaios - Medição e tratamento da emissão acústica adquirida nos ensaios

Dos demais módulos disponíveis, nenhum se enquadra para esta aplicação e nem é necessária uma avaliação mais detalhada de qualquer dos módulos disponíveis (atividade 4.2) para averiguar a possível adequação. Também não é possível reprojeter (atividade 4.3) módulos da biblioteca para que se enquadrem.

Uma avaliação (atividade 4.4) em catálogos de fabricantes (**ER D8**) levou à escolha de alguns componentes comerciais para comporem o esclerômetro.

O indentador consiste num penetrador de diamante modelo PDR 1001 para ensaios de dureza Rockwell C do fabricante Dimafer (www.dimafer.com.br), conforme figura 5.4.

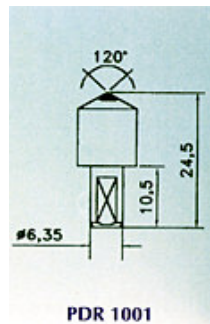


Figura 5.4 – Penetrador de diamante para ensaio de dureza.

Os sensores de medição de força tangencial e axial são sensores piezelétricos ICP, + - 44 N de faixa de medição, com 114 mV/N modelo M208B01, acompanhados de condicionadores de sinal ICP, 1 canal com DC/Ganho x1, x10, x100 modelo 484B11 e seus respectivos cabos coaxiais, 3 m, 10-32 plug para BNC modelo 002C10, do fabricante *PCB Piezotronics* (www.pcb.com). O sensor é mostrado na figura 5.5.



Figura 5.5 – Sensor piezelétrico para medição de força.

O sensor de emissão acústica é do modelo Nano 30S do fabricante *Physical Acoustics Corporation* (www.pacndt.com), com seu respectivo amplificador de sinais. A figura 5.6 apresenta o sensor.



Figura 5.6 – Sensor de emissão acústica.

A câmera é parte de um sistema de visão completo, adquirido junto à *Edmund Industrial Optics* (www.edmundoptics.com), com ampliação de 20X a 80X, modelo VZM 200i, como mostra a figura 5.7.



Figura 5.7 – Sistema de visão do esclerômetro.

Por fim, para compor o sistema de controle do esclerômetro, foi adquirida uma placa de aquisição de sinais modelo AT-MIO-16E1 da empresa *National Instruments* (www.ni.com), com seus acessórios e acompanhada do *software LabView 3.1* da mesma empresa, responsável por gerenciar todas as funções de operação do esclerômetro. A placa de aquisição e o *software* possuem características adequadas para o controle dos movimentos automáticos dos ensaios e para a aquisição e tratamento de todos os sinais adquiridos durante os ensaios.

Para finalizar a lista de módulos a serem empregados no esclerômetro, foi necessário o projeto (atividade 4.5) de um sistema porta-peça para fixar os corpos de prova durante os ensaios. Esse sistema foi projetado com base no carro de deslocamento da guia X, como mostra a figura 5.8.

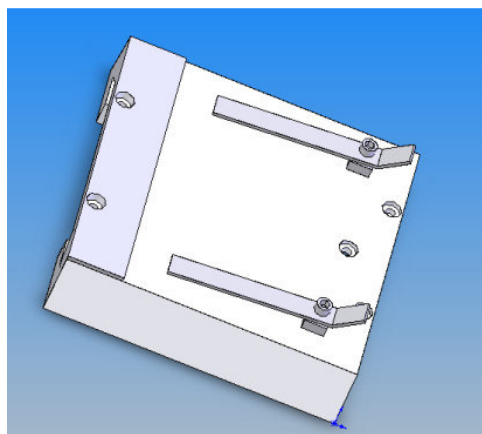


Figura 5.8 – Sistema de fixação dos corpos de prova.

A lista de módulos selecionados (**ER D9**) é apresentada na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Lista de módulos selecionados para o esclerômetro.

Tipo de módulo	Descrição	Módulo selecionado
Movimento relativo	Guia X	Módulo 006 da biblioteca
Movimento relativo	Guia Y	Módulo 013 da biblioteca
Movimento relativo	Guia Z	Módulo 005 da biblioteca
Suporte	Mesa de suporte	Módulo 014 da biblioteca
Suporte	Indentador	Penetrador de diamante PDR 1001
Suporte	Porta-peça	Sistema projetado
Função complementar	Força tangencial	Piezo M208B01
Função complementar	Força axial	Piezo M208B01
Função complementar	Emissão acústica	Sensor Nano 30S
Função complementar	Câmera	Sistema de visão VZM 200i
Função complementar	Controle	Sistema de aquisição de dados com LabView

5.1.5– ETAPA 5 – Avaliação das interfaces

Os requisitos (ER D10) para as interfaces dos módulos do esclerômetro são listados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Requisitos das interfaces dos módulos selecionados.

Descrição	Requisitos das interfaces
Guia X	- Fixação rígida com a mesa de suporte - Posicionamento adequado sob a câmera - Controle de movimento dado pelo software
Guia Y	- Fixação rígida com a mesa de suporte - Fixação rígida com a Guia Z
Guia Z	- Fixação rígida com o indentador e com os sensores de medição de força - Fixação adequada com o sensor de emissão acústica - Controle de movimento dado pelo software
Mesa de suporte	- Fixação rígida da câmera - Fixação dos acessórios do sistema de controle
Indentador	- Fixação rígida com os sensores de medição de força - Fixação adequada com o sensor de emissão acústica
Porta-peça	- Compatibilidade com a área de visão da câmera
Força tangencial	- Fixação rígida com o outro sensor de medição de força - Transmissão adequada de sinais para o controle
Força axial	- Fixação rígida com o outro sensor de medição de força - Transmissão adequada de sinais para o controle
Emissão acústica	- Transmissão adequada de sinais para o controle
Câmera	- Transmissão adequada de sinais para o controle
Controle	- Gerenciamento paralelo de todas as funções do esclerômetro

Para avaliar a adequabilidade entre as interfaces (atividade 5.1) e a existência de efeitos incidentais entre os módulos (atividade 5.2), foi elaborada uma matriz de avaliação das interfaces no esclerômetro, como mostra a figura 5.9 (ER D11).

Guia X										
Guia Y										
Guia Z		2	2							
Mesa de suporte			2			1				
Indentador					2					
Porta-peça						2			1	1
Força tangencial							2		1	1
Força axial								2	1	1
Emissão acústica									1	1
Câmera										1
Controle										

Condições das interfaces:
 1 - compatíveis
 2 - Incompatibilidade geométrica
 3 - Compatível, mas com presença de efeitos incidentais
 4 - Incompatibilidade geométrica e com presença de efeitos incidentais

Figura 5.9 – Matriz de avaliação das interfaces no esclerômetro.

No esclerômetro não há a ocorrência de efeitos incidentais significativos.

Devido às incompatibilidades entre algumas interfaces do esclerômetro, algumas delas necessitaram ser reprojatadas (atividade 5.3) e outras necessitaram de módulos auxiliares para sua composição (atividades 5.4 e 5.5). As ações tomadas para solucionar os problemas em algumas das interfaces foram:

- **Interface Guia X com mesa de suporte e Guia Y com mesa de suporte** – Conforme descrito na ficha de acompanhamento da mesa de granito selecionada como mesa de suporte para o esclerômetro (anexo 2), esta mesa não possui qualquer sistema de fixação próprio. Assim, foi necessário realizar uma furação no granito nas posições adequadas para fixação de ambas as guias;
- **Interface Guia Y com Guia Z** – A necessidade de posição relativa entre as duas guias exigiu que fosse projetado e construído um módulo auxiliar de suporte entre as guias, como mostra a figura 5.10. A definição das dimensões desse módulo de suporte foi definida durante o modelamento de todo o sistema;

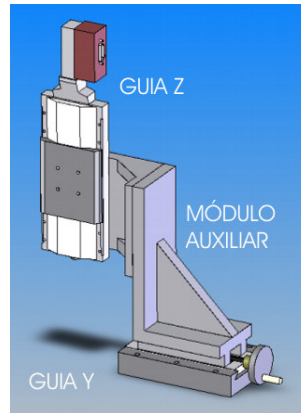


Figura 5.10 – Módulo auxiliar de suporte entre a guia Z e a guia Y.

- **Interface entre a Guia Z e os sensores de força** – O posicionamento relativo entre esses componentes foi definido na montagem virtual do sistema, como mostra a figura 5.11. Alguns módulos auxiliares de suporte necessitaram ser projetados e fabricados para permitir o encadeamento da montagem entre os componentes. Os requisitos dimensionais para a fixação entre os componentes foram obtidos nos catálogos dos sensores e na descrição da Guia Z junto à biblioteca de módulos.

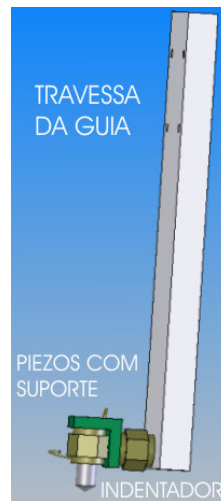


Figura 5.11 – Montagem entre a Guia Z, os sensores de força e o indentador.

- **Interface entre o sensor de força axial e o indentador** – A montagem do indentador foi feita diretamente no sensor piezelétrico que realiza a medição de força axial, como mostra a figura 5.11. A interface do indentador foi alterada de uma ranhura para um eixo roscado conforme a medida de rosca interna do sensor;

5.1.6– ETAPA 6 – Montagem da concepção

A montagem virtual (atividade 6.1) do esclerômetro pode ser observada na figura 5.12.

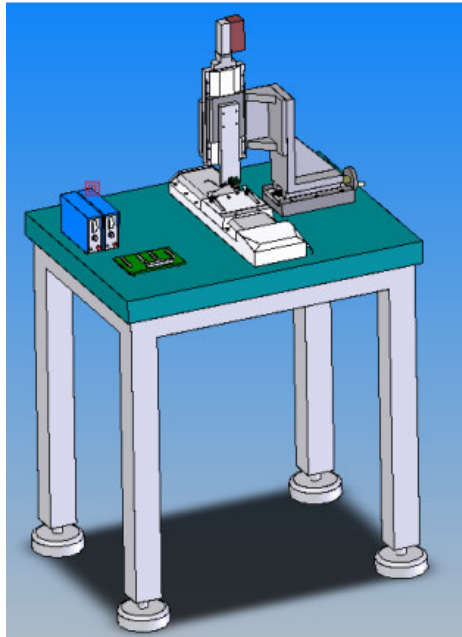


Figura 5.12 – Montagem virtual do esclerômetro.

Nessa montagem virtual, foram avaliados os aspectos de compatibilidade física do equipamento, bem como foi possível simular todos os movimentos previstos no esclerômetro para confirmação da sua eficiência cinemática. Todas as interfaces também foram verificadas.

Com o sucesso na montagem virtual, partiu-se para a montagem real do esclerômetro (atividade 6.2), como mostram as figuras 5.13 e 5.14.



Figura 5.13 – Vista frontal do esclerômetro.

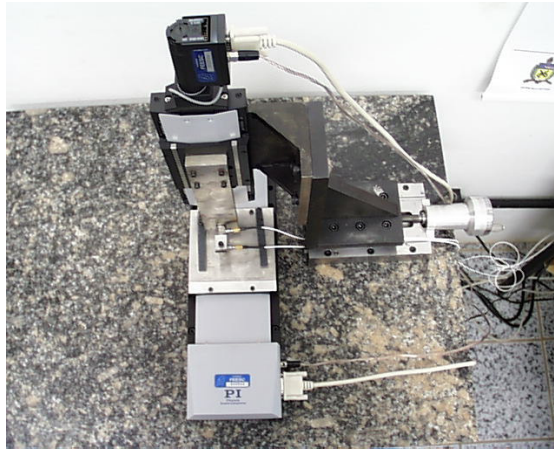


Figura 5.14 – Vista superior do esclerômetro.

Os ensaios (atividade 6.3) para qualificação do sistema e do *software* de controle desenvolvido envolveram:

- Ensaios de controle das guias e adequação dos seus cursos;
- Ensaios de resposta dos sinais dos sensores de força;
- Ensaios de resposta dos sinais do sensor de emissão acústica;
- Ensaios de adequação do controle de força axial no riscamento através da guia Z a partir da resposta de força fornecida pelo sensor;
- Calibração dos sensores de força montados no esclerômetro, através de massas padrão;
- Adequação da interface com o usuário do sistema;

Na figura 5.15 é apresentada a tela principal do programa de controle do esclerômetro.

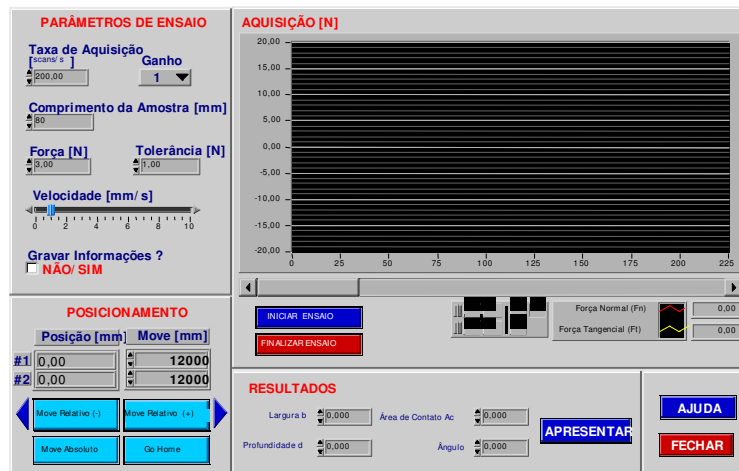


Figura 5.15 – Tela principal do controle do esclerômetro.

Todos os relatórios gerados (atividades 6.4 e 6.5; **ER D12** e **ER D13**) foram arquivados junto à documentação do equipamento.

5.1.7– ETAPA 7 – Execução da tarefa

As atividades da etapa 7 consistem na realização de ensaios do esclerômetro em condições reais de aplicação. Um esquema da realização desses ensaios pode ser visto na figura 5.16, onde aparece o corpo de prova sendo riscado, o sistema de observação do risco produzido e os gráficos de resposta dos esforços gerados no ensaio.

Na figura 5.17, é apresentada a topografia de um risco gerado e a mudança dúctil / frágil no riscamento. O esclerômetro está pronto para operação contínua.

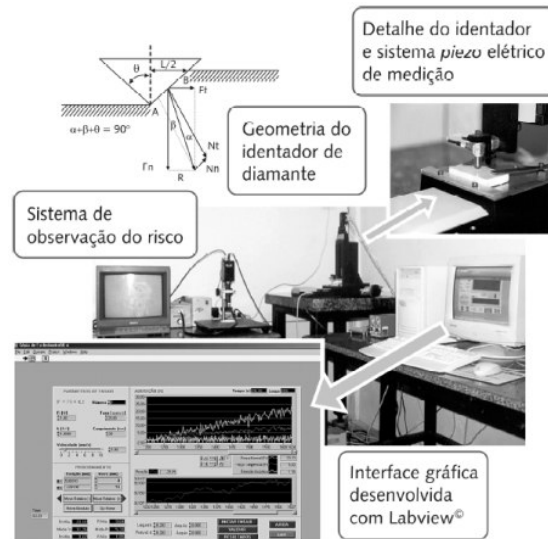


Figura 5.16 – Ensaio esclerométrico num corpo de prova cerâmico.

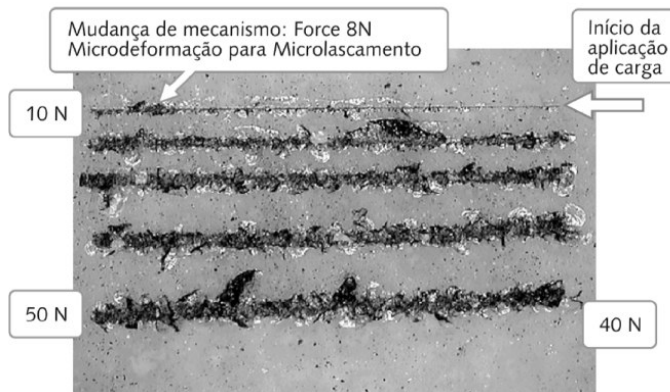


Figura 5.17 – Topografia do risco gerado.

Os componentes do esclerômetro foram dispostos de maneira que fosse possível sua fácil substituição. Como este projeto tem por objetivo realizar testes em diferentes tipos e qualidades de componentes, as guias X e Y, os sensores e o sistema de aquisição de sinais podem ser substituídas por modelos mais simples e mais baratos para avaliar a influência dos seus erros nos resultados obtidos.

Essas reconfigurações do sistema dependem somente de uma correta caracterização dos componentes e de testes preliminares com o modelo virtual.

Por outro lado, se algum outro sistema de precisão necessitar utilizar algum dos componentes empregados no esclerômetro, sua montagem e desmontagem é rápida e fácil.

5.2 – Desenvolvimento de um torno de ultraprecisão para usinagem de espelhos cônicos

Uma das linhas de pesquisa do Laboratório de Metrologia da UFSC é o desenvolvimento de sistemas de medição de tensões residuais utilizando holografia eletrônica. Esta técnica exige o emprego de espelhos cônicos na estrutura dos equipamentos desenvolvidos.

Por se tratar de uma geometria não convencional, não existem espelhos disponíveis com esta forma comercialmente. Além disso, o desenvolvimento dos equipamentos progride a ponto de serem necessárias novas geometrias a cada novo protótipo desenvolvido.

Essa dinâmica na pesquisa inviabiliza a aquisição de novos espelhos sob encomenda a cada necessidade identificada. O prazo de entrega para a fabricação desses espelhos pode tornar a pesquisa muito lenta e dependente desse único componente.

A linha de pesquisa também não possui recursos suficientes para a aquisição de uma máquina dedicada à fabricação dos espelhos.

Devido a essas limitações, decidiu-se por desenvolver um equipamento capaz de produzir diferentes geometrias de espelhos cônicos, mas também com capacidade de produção de outras formas de componentes de ultraprecisão. Esta flexibilização da máquina é garantida se o seu projeto for realizado sob o ponto de vista de uma máquina reconfigurável.

Sendo assim, a metodologia desenvolvida nesta tese será aplicada para o desenvolvimento do torno de ultraprecisão para usinagem de espelhos cônicos.

5.2.1– ETAPA 1 – Definição da tarefa a ser cumprida pelo sistema

A função global do torno de ultraprecisão reconfigurável (**TUR D1**), como solicitado pela atividade 1.1 da metodologia, é **usinar espelhos cônicos com diferentes tamanhos e geometrias, cuja qualidade de sua superfície espelhada permita o seu emprego em sistemas ópticos de medição**. A qualidade da superfície engloba tanto a rugosidade quanto os erros de forma obtidos na usinagem.

A princípio, as pesquisas estão direcionadas para a aplicação de espelhos cônicos internos, mas também é interessante ter a possibilidade de usinar os espelhos cônicos externos para futuras aplicações na holografia.

Das duas formas, a mais difícil de trabalhar é a usinagem interna dos espelhos, além de exigir uma geometria especial na forma das ferramentas de corte.

Os espelhos internos devem ser produzidos desde um diâmetro mínimo de 20 mm até 100 mm de diâmetro máximo. As peças que se tornarão espelhos deverão receber uma pré-usinagem em máquinas-ferramentas convencionais.

Como os espelhos deverão operar no sistema permanecendo praticamente fixos durante as medições, desde que seja garantida sua qualidade de reflexão do laser, alguns erros de forma do tronco de cone espelhado na ordem de até 3 micrometros com relação a um cone ideal, serão admissíveis.

Com relação à qualidade da superfície usinada necessária para se obter um acabamento espelhado que seja satisfatório para aplicação em óptica laser, é necessário um nível de rugosidade R_a melhor do que 1/20 do comprimento de onda da luz refletida pelo espelho.

A tabela 5.5 apresenta as especificações (atividade 1.2, **TUR D2**) para os espelhos a serem produzidos pela máquina.

Tabela 5.5 – Especificações dos espelhos.

ESPECIFICAÇÕES PARA OS ESPELHOS CÔNICOS	
Diâmetro	20 a 100 mm
Espessura	0,5 a 50 mm
Ângulo de conicidade	0 a 45° com erro máximo de 1'
Erro de forma máximo	3 μ m
Rugosidade R_a	Abaixo de 30 nm
Material	Alumínio filtrado
Quantidade	2 a 10 espelhos por lote

5.2.2– ETAPA 2 – Avaliação cinemática

A atividade 2.1 consiste em definir os graus de liberdade necessários para o cumprimento da tarefa.

Para descrever geometricamente um cone é necessária uma geratriz formada por uma linha reta e um eixo de rotação. Por ser um elemento de revolução, conclui-se que o processo de fabricação mais apropriado para gerá-lo é o torneamento (**TUR D3**).

Utilizando o processo de torneamento, há duas maneiras de gerar um cone. A figura 5.18 representa essas duas soluções cinemáticas (**TUR D4**).

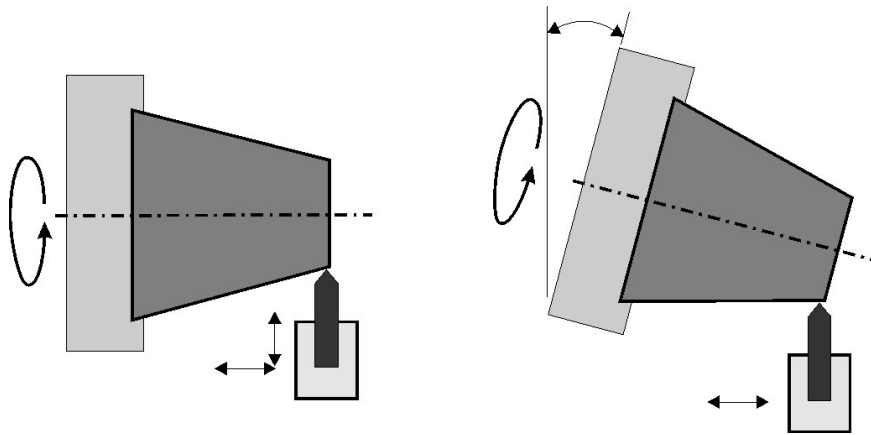


Figura 5.18 - Soluções cinemáticas para a geração de um cone no torneamento.

Na primeira delas, o eixo de rotação da árvore principal da máquina é paralelo a um dos eixos de movimento da ferramenta. Esta configuração é a mais utilizada nas máquinas-ferramentas para torneamento. Desta forma, a geratriz do cone é obtida com uma interpolação de dois eixos de movimento da ferramenta.

A outra maneira de se obter o cone é com um deslocamento do eixo de rotação da máquina num ângulo equivalente à conicidade desejada para o componente usinado. Assim, uma vez posicionado o cabeçote, um único eixo de translação da ferramenta é suficiente para a usinagem do cone. Também é possível fixar o cabeçote e inclinar a guia.

Essas regras de geração se aplicam tanto para cones internos quanto para cones externos, como o da figura.

O próximo passo (atividade 2.3) é relacionar quantos e quais módulos de deslocamento relativo, de suporte e de funções complementares são necessários para compor cada concepção do torno de ultraprecisão. As tabelas 5.6 e 5.7 relacionam estes módulos (**ER D5**).

Tabela 5.6 – Módulos básicos necessários para compor o torno de ultraprecisão com mesa XY.

Tipo de módulo	Descrição	Função no sistema
Movimento relativo	Guia X	Deslocamento longitudinal da ferramenta
Movimento relativo	Guia Y	Deslocamento transversal da ferramenta
Movimento relativo	Cabeçote	Rotação da peça a ser usinada
Suporte	Base	Suporte de todo o sistema
Suporte	Porta-ferramenta	Fixação rígida da ferramenta de corte
Suporte	Porta-peça	Fixação da peça a ser usinada
Função complementar	Controle máquina	Controle de movimentos e outras funções
Função complementar	Controle ambiente	Controle de temperatura e umidade
Função complementar	Fluido de corte	Refrigeração na usinagem
Função complementar	Retirada cavacos	Aspiração dos cavacos produzidos

Tabela 5.7 – Módulos básicos necessários para compor o torno de ultraprecisão com cabeçote com posicionamento angular.

Tipo de módulo	Descrição	Função no sistema
Movimento relativo	Guia X	Deslocamento linear da ferramenta
Movimento relativo	Mesa rotativa	Posicionamento angular do cabeçote
Movimento relativo	Cabeçote	Rotação da peça a ser usinada
Suporte	Base	Suporte de todo o sistema
Suporte	Porta-ferramenta	Fixação rígida da ferramenta de corte
Suporte	Porta-peça	Fixação da peça a ser usinada
Função complementar	Controle máquina	Controle de movimentos e outras funções
Função complementar	Controle ambiente	Controle de temperatura e umidade
Função complementar	Fluido de corte	Refrigeração na usinagem
Função complementar	Retirada cavacos	Aspiração dos cavacos produzidos

5.2.3– ETAPA 3 – Identificação das necessidades de cada módulo

As atividades 3.1, 3.2 e 3.3 consistem em identificar, a partir de todos os requisitos globais do sistema que foram relacionados, as especificações para cada módulo que irá compor o torno de ultraprecisão.

As tabelas 5.8 e 5.9 apresentam os requisitos (**ER D6**) para cada um dos módulos listados nas concepções apresentadas.

Tabela 5.8 – Requisitos dos módulos para a máquina com mesa XY.

MÓDULO	REQUISITOS
Guia X	Curso mínimo de 100 mm Erro de retilineidade máximo de 1,5 μm Acionamento integrado com baixa geração de vibrações e calor Capacidade de carga mínima de 200 N Peso compatível com a base disponível Velocidade de deslocamento de 0 a 500 mm/min
Guia Y	Curso mínimo de 100 mm Erro de retilineidade máximo de 1,5 μm Acionamento integrado com baixa geração de vibrações e calor Capacidade de carga mínima de 100 N Peso compatível com a capacidade de carga da Mesa 1 Velocidade de deslocamento de 0 a 500 mm/min Montagem com erro de perpendicularismo máximo de 3 $\mu\text{m/m}$
Cabeçote	Cabeçote aerostático Capacidade de carga axial e radial mínima de 100 N Batimento axial e radial máximo de 0,5 μm Rotações de 1000 a 3000 rpm Acionamento integrado com baixa geração de vibrações e calor
Base	Isolamento passivo de vibrações externas e internas.
Porta-ferramenta	Ajuste de altura com exatidão de 0,1 mm Rigidez de 40 N/ μm Robusto, mas leve, de acordo com a capacidade de carga das guias Assento para ferramentas de diamante com haste padrão
Porta-peça	Concentricidade de fixação da peça na ordem de 0,05 mm Capacidade de fixação de peças com diâmetro de 20 a 100 mm Facilidade de balanceamento em classe de precisão Fixação de baixa inércia Sujeição mecânica da peça sem indução de tensões residuais
Controle da máquina	CNC para interpolação de dois eixos com geração de movimentos suaves e contínuos com erro de interpolação abaixo de 0,05 μm nas velocidades de 0 a 500 mm/min Controle da velocidade de rotação do cabeçote
Controle do ambiente	Controle de temperatura na ordem de $20 \pm 1^\circ \text{C}$ Ausência de fontes geradoras de calor e vibrações nas imediações da máquina Filtragem de partículas em suspensão classe 1000
Fluido de corte	Aspersão de fluido de corte na região de corte com valores de vazão de até 100 ml/min e pressão de até 3 bar Não induzir perturbações ao processo de usinagem Facilidade e flexibilidade de posicionamento do bico injetor
Retirada de cavacos	Aspiração de cavacos com pressão de sucção convencional Não induzir perturbações ao processo de usinagem

Tabela 5.9 – Requisitos dos módulos para a máquina com cabeçote com posicionamento angular.

MÓDULO	REQUISITOS
Guia X	Curso mínimo de 100 mm Erro de retineidade máximo de 1,5 µm Acionamento integrado com baixa geração de vibrações e calor Capacidade de carga mínima de 200 N Peso compatível com a base disponível Velocidade de deslocamento de 0 a 500 mm/min
Mesa rotativa	Mesa rotativa com capacidade para suportar o cabeçote ou a guia linear Posicionamento angular com incerteza de 10” Rigidez suficiente para compor o circuito estrutural da máquina
Cabeçote	Cabeçote aerostático Capacidade de carga axial e radial mínima de 100 N Batimento axial e radial máximo de 0,5 µm Rotações de 1000 a 3000 rpm Acionamento integrado com baixa geração de vibrações e calor
Base	Isolamento passivo de vibrações externas e internas.
Porta-ferramenta	Ajuste de altura com exatidão de 0,1 mm Rigidez de 40 N/µm Robusto, mas leve, de acordo com a capacidade de carga das guias Assento para ferramentas de diamante com haste padrão
Porta-peça	Concentricidade de fixação da peça na ordem de 0,05 mm Capacidade de fixação de peças com diâmetro de 20 a 100 mm Facilidade de balanceamento em classe de precisão Fixação de baixa inércia Sujeição mecânica da peça sem indução de tensões residuais
Controle da máquina	Geração de movimentos suaves e contínuos da guia linear nas velocidades de 0 a 500 mm/min Controle da velocidade de rotação do cabeçote
Controle do ambiente	Controle de temperatura na ordem de $20 \pm 1^\circ \text{C}$ Ausência de fontes geradoras de calor e vibrações nas imediações da máquina Filtragem de partículas em suspensão classe 1000
Fluido de corte	Aspersão de fluido de corte na região de corte com valores de vazão de até 100 ml/min e pressão de até 3 bar Não induzir perturbações ao processo de usinagem Facilidade e flexibilidade de posicionamento do bico injetor
Retirada de cavacos	Aspiração de cavacos com pressão de sucção convencional Não induzir perturbações ao processo de usinagem

5.2.4– ETAPA 4 – Seleção dos módulos

Uma avaliação na biblioteca de módulos (atividade 4.1) resultou na identificação de diversos sistemas que se enquadram com as características exigidas para os módulos que irão compor o torno de ultraprecisão. Os módulos selecionados a partir da biblioteca foram:

1) BASE DA MÁQUINA

As bases existentes na biblioteca são: base com guias cruzadas Moore (módulo número 001), base de granito natural (módulo número 003) e a base de concreto com mesa de montagem (módulo número 004). Para selecionar a base que será empregada para configurar o torno de ultraprecisão, foram consideradas algumas características fundamentais das bases disponíveis e foi feita uma comparação entre elas, como mostra a tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Comparação entre as bases disponíveis.

Requisito	Base Moore	Granito	Concreto
Isolamento passivo	ótimo	ótimo	ótimo
Montabilidade	ótima	fraca	ótima
Ambiente	adequado	razoável	razoável
Disponibilidade	alta	alta	baixa

Todas as três bases disponíveis atendem aos requisitos básicos para poderem compor o torno para usinagem de espelhos cônicos. Os dados listados nas fichas de acompanhamento de cada base junto à biblioteca de módulos foram confrontados com os requisitos necessários a um módulo para compor o torno de ultraprecisão.

A montabilidade é a facilidade que a base apresenta de ser montada aos demais componentes da máquina. Avaliando este requisito, já se exclui a base de granito, visto que esta necessita ser ainda furada para posicionar as buchas de montagem, o que demanda tempo e custo adicional. A base Moore já está integrada em um par de guias cruzadas e o plano de referência para a montagem do cabeçote é adequado. A base de concreto, por se tratar de uma mesa de montagem, também atende facilmente esse requisito.

A base Moore encontra-se numa sala feita para usinagem de ultraprecisão, enquanto que as demais bases estão localizadas numa sala com ambiente adequado, mas que possui diversos outros equipamentos e experimentos em andamento. Como a base de concreto possui uma baixa disponibilidade, conclui-se que a melhor opção passa a ser a base Moore.

2) GUIAS X e Y

As guias que atendem aos requisitos listados para o torno de ultraprecisão e que estão disponíveis na biblioteca de módulos são as guias cruzadas Moore, que estão acopladas à base (módulo número 001) e a guia cilíndrica aerostática (módulo número 002).

Segundo a ETAPA 2 da metodologia, existem duas soluções cinemáticas para a composição do torno para usinagem de espelhos cônicos. Os requisitos necessários aos componentes para ambas soluções são detalhados nas tabelas 5.8 e 5.9.

Na primeira solução há a exigência de duas guias controladas numericamente. As guias Moore não possuem um controle adequado, sendo que somente um dos eixos está acionando.

Uma composição da guia cilíndrica aerostática com o eixo acionado Moore exige um trabalho de desenvolvimento de um controle numérico próprio que demanda tempo e custos na aquisição de *hardware* apropriado. Pela disponibilidade dos sistemas, fica descartada a composição de um torno com cinemática XY, como detalha a tabela 5.8.

Ambas as guias atendem aos requisitos exigidos para a composição da solução cinemática detalhada na tabela 5.9, que diz respeito à composição cinemática com uma guia linear acompanhada de uma mesa rotativa para geração de cones no torneamento. Esta solução requer somente um controle de velocidade na guia linear, o que já é característica das guias disponíveis.

A tabela 5.11 faz uma comparação entre as guias disponíveis para a aplicação na solução apresentada na tabela 5.9.

Tabela 5.11– Comparação entre as guias disponíveis.

Requisito	Guia Moore	Guia cilíndrica
Curso mínimo de 100 mm	adequado	adequado
Erro de retilineidade	adequado	adequado
Capacidade de carga	adequado	adequado
Acionamento	adequado	adequado
Montabilidade	ótima	baixa
Disponibilidade	alta	baixa

Através dos dados apresentados na tabela, é possível identificar a Guia Moore como sendo a melhor solução a ser empregada. Com a escolha anterior da base Moore, elimina-se a necessidade de avaliação da interface base / guia, visto que já se encontram integradas.

3) MESA ROTATIVA

A mesa rotativa para posicionamento que atende aos requisitos de composição da cinemática guia + mesa rotativa é a mesa divisora *Zeiss* (módulo número 008). Todas as suas características são adequadas à aplicação proposta.

A mesa aerostática de posicionamento angular (módulo número 010) possui limitações de rigidez, capacidade de carga e dimensões para suporte de um cabeçote, sendo descartada para uso no torno de ultraprecisão.

4) CABEÇOTE

Os cabeçotes disponíveis na biblioteca de módulos são o cabeçote *Excell-o* (módulo número 009), o cabeçote *Professional Instruments* (módulo número 011) e o cabeçote aerostático LMP 01 (módulo número 012). Uma comparação das características desses cabeçotes pode ser vista na tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Comparação entre os cabeçotes disponíveis.

Requisito	Excell-o	Professional	LMP
Capacidade de carga	adequada	adequada	adequada
batimento	adequado	adequado	adequado
rpm	não adequado	adequado	adequado
Controle	não adequado	não adequado	não adequado
Inércia	altíssima	média	média
Montabilidade	adequada	adequada	não adequada
Disponibilidade	alta	média	alta

Avaliando a comparação entre os cabeçotes disponíveis, conclui-se que nenhum possui características que se enquadrem perfeitamente nas necessidades para a composição do torno de ultraprecisão. Uma avaliação do reprojeto (atividade 4.3) de algum dos cabeçotes resultou na inviabilidade de se alcançar às características desejadas. Restou a necessidade de compra (atividade 4.4) de um novo cabeçote para compor o torno de ultraprecisão.

Uma análise do mercado resultou na seleção do cabeçote Kugler, cujas características estão detalhadas na sua ficha de acompanhamento existente na biblioteca de módulos (módulo número 007).

Pela sua característica de possuir tanto o mancal rotativo quanto o eixo de translação também aerostático, este cabeçote se enquadra na necessidade da máquina-ferramenta de estar sendo preparada para ser reconfigurável e compor diversas soluções cinemáticas para atender às exigências de qualidade de fabricação de diversos grupos diferentes de componentes. Quanto maior for a flexibilidade que o novo cabeçote dá à máquina, maior o campo de atuação desta máquina ou de outras concepções que forem geradas.

5) PORTA-FERRAMENTA

O sistema de porta-ferramenta disponível é o porta-ferramentas *Moore* (módulo número 015), e foi desenvolvido para equipar a versão original do torno *Moore*.

Para se adequar à nova configuração da máquina, foi necessário o reprojeto (atividade 4.3) de um sistema de fixação da ferramenta de corte que garanta a rigidez na fixação das ferramentas e o posicionamento da altura da ferramenta com exatidão de 0,1 mm.

A rigidez do sistema é obtida com o superdimensionamento do sistema porta-ferramenta. A avaliação da geometria do sistema para evitar colisões é obtida com o auxílio do modelamento sólido em CAD.

Para atender a necessidade de posicionamento na ordem de 0,1 mm na altura da ferramenta com relação ao eixo de rotação do cabeçote da máquina, utiliza-se a montagem da ferramenta de corte apoiada sobre blocos padrão, utilizados como espaçadores. Uma medição da altura relativa entre o gume da ferramenta de corte e o centro de rotação do cabeçote dá o valor da altura a ser preenchida pelo bloco padrão ou pelo conjunto de blocos padrão, como mostra a figura 5.19. Blocos padrão não são componentes adequados para serem usados como espaçadores. Neste caso, trata-se de um conjunto de blocos padrão refugado, fora do seu uso como sistema de medição.

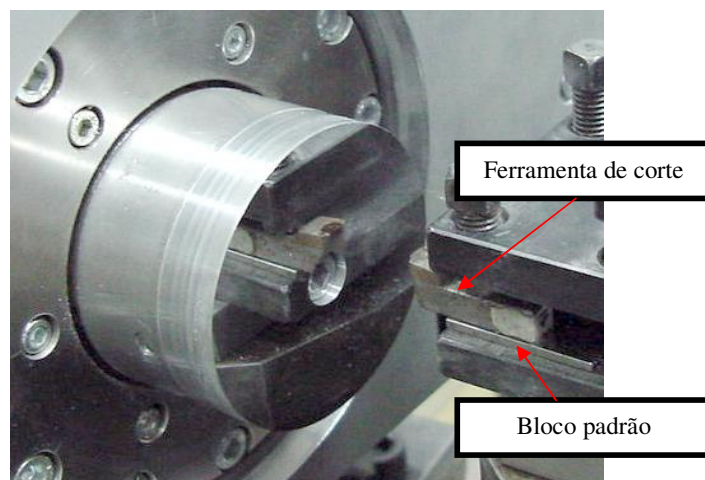


Figura 5.19 – Detalhe da fixação da ferramenta sobre o bloco padrão.

6) PORTA-PEÇA

Cada cabeçote deve possuir seu sistema porta-peça projetado de acordo (atividade 4.5).

Para cada tipo de componente usinado, principalmente em ultraprecisão, é necessário que o sistema de fixação da peça a ser usinada seja o mais adequado. Isto evita a ocorrência de erros nas dimensões e formas finais da peça produzida.

A figura 5.20 mostra o sistema porta-peça para um dos tipos de espelho produzidos.

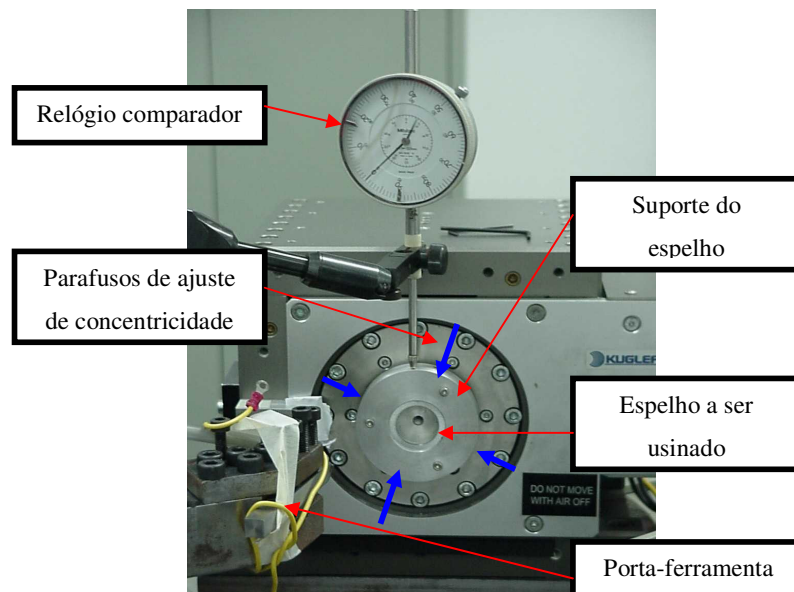


Figura 5.20 – Sistema porta-peça.

No sistema porta-peça do exemplo, montado na face do cabeçote *Kugler*, o espelho é montado de forma concêntrica com relação ao seu suporte. Esta concentricidade é garantida durante o torneamento deste suporte.

Este suporte é fixado na parte frontal do cabeçote rotativo, mas possui, propositadamente, uma folga radial. Através de quatro parafusos posicionados nos quatro quadrantes do suporte, é possível centrá-lo com relação ao eixo de rotação do mancal rotativo usando um relógio comparador. Como o sistema é todo simétrico, esse ajuste de concentricidade auxilia na garantia de qualidade de balanceamento do conjunto. Para outras gerações de espelhos cônicos, novos sistemas mais adequados foram desenvolvidos.

7) CONTROLE DA MÁQUINA

O controle da máquina deve ser responsável pelo acionamento da guia linear e do cabeçote, além de garantir o monitoramento da pressão de alimentação de ar para os mancais aerostáticos, que é controlada por um pressostato regulado para 7 bar de pressão mínima.

O acionamento e controle da guia linear são executados através de um módulo próprio, necessitando somente sua integração com um microcomputador através de uma porta serial para controle via *software* específico. O acionamento do mancal rotativo possui um módulo independente que permite a regulagem da velocidade de rotação até 8000 rpm. A figura 5.21 mostra os módulos de controle.

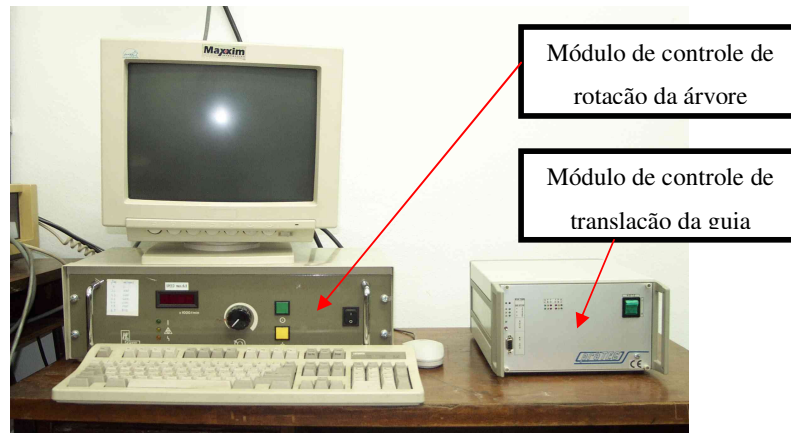


Figura 5.21 – Módulos de controle do torno de ultraprecisão.

8) CONTROLE DO AMBIENTE

O sistema de controle de ambiente disponível é o módulo número 018 da biblioteca de módulos. Este sistema encontra-se numa sala montada especificamente para usinagem de ultraprecisão. O sistema mantém os níveis de temperatura, umidade e partículas em suspensão dentro de valores aceitáveis.

Ensaio realizados com um termo-higrômetro mostram a estabilidade do sistema no controle de temperatura e umidade, conforme mostra a figura 5.22.

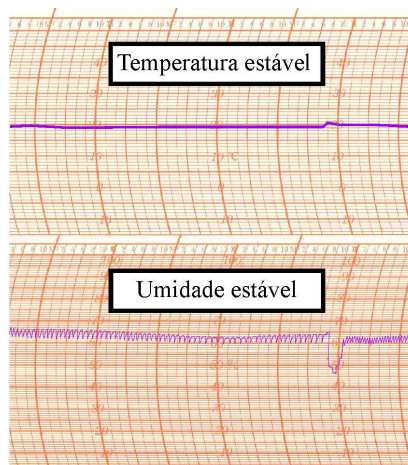


Figura 5.22 – Controle de temperatura e umidade no ambiente de usinagem.

9) FLUIDO DE CORTE

O sistema de aspersão de fluido de corte disponível é o módulo 016 da biblioteca de módulos. Como descrito na ficha de acompanhamento do módulo, trata-se de uma tubeira que funciona pelo princípio de Bernoulli, aspergindo o fluido de corte na região de contato da ferramenta de corte com a peça usinada.

O bico injetor pode ser visualizado com detalhe na figura 5.23, montado sobre a ferramenta de corte e acompanhado do sistema de sucção para retirada dos cavacos produzidos na usinagem.

O bico injetor deve ser posicionado de forma a auxiliar na retirada dos cavacos da superfície usinada para que não a danifique.

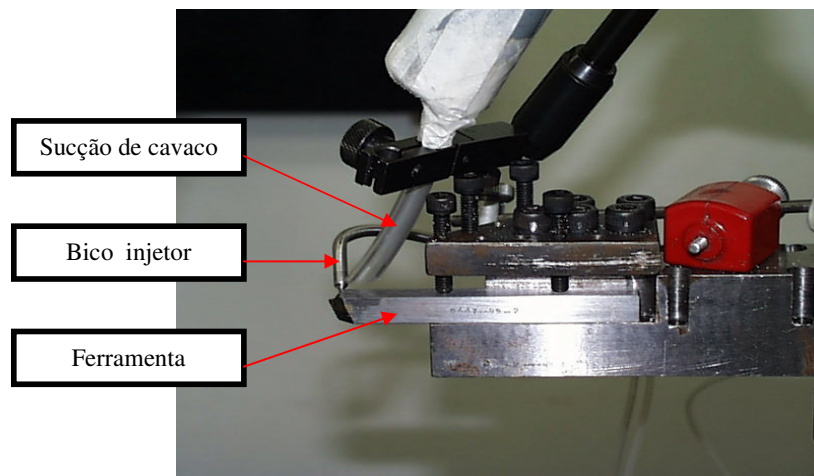


Figura 5.23 – Bico injetor junto à ferramenta de corte.

10) RETIRADA DE CAVACOS

O sistema de retirada de cavacos disponível é o módulo número 017 da biblioteca de módulos. Basicamente, trata-se de um aspirador de pó doméstico acoplado a um tubo de menor diâmetro que é posicionado sobre a ferramenta de corte, como mostra a figura 5.23.

A lista de módulos selecionados (**TUP D9**) para o torno de ultraprecisão é mostrada na tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Lista de módulos selecionados para o torno de ultraprecisão.

Tipo de módulo	Descrição	Módulo selecionado
Movimento relativo	Guia X	Módulo 001 da biblioteca
Movimento relativo	Mesa rotativa	Módulo 008 da biblioteca
Movimento relativo	Cabeçote	Módulo 007 da biblioteca
Suporte	Base	Módulo 001 da biblioteca
Suporte	Porta-ferramenta	Módulo 015 da biblioteca
Suporte	Porta-peça	Projetado para cada novo componente
Função complementar	Controle máquina	Hardware Kugler e pressostato
Função complementar	Controle ambiente	Módulo 018 da biblioteca
Função complementar	Fluido de corte	Módulo 016 da biblioteca
Função complementar	Retirada cavacos	Módulo 017 da biblioteca

5.2.5– ETAPA 5 – Avaliação das interfaces

Os requisitos (**TUP D10**) para as interfaces dos módulos do torno de ultraprecisão são listados na tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Requisitos das interfaces para o torno de ultraprecisão.

Módulo	Requisitos das interfaces
Guia X	- Fixação rígida com o porta-ferramentas
Mesa rotativa	- Fixação rígida com a base e com o cabeçote
Cabeçote	- Fixação rígida com a mesa rotativa e com o porta-peça
Base	- Fixação rígida com a mesa rotativa
Porta-ferramenta	- Fixação rígida com a guia X
Porta-peça	- Fixação rígida com o cabeçote
Controle máquina	- Gerenciamento dos módulos de controle de movimento
Controle ambiente	- Posicionamento adequado do ar condicionado na sala de usinagem
Fluido de corte	- Não causar perturbações na usinagem
Retirada cavacos	- Não causar perturbações na usinagem

As exigências com relação às interfaces são basicamente relacionadas à formação de um circuito estrutural rígido. Como não há efeitos incidentais significativos por parte dos módulos que compõem o circuito estrutural, suas interfaces não necessitam de qualquer isolamento especial.

Todas essas conclusões foram tiradas com base na análise das características de cada módulo, listadas na sua ficha de acompanhamento junto à biblioteca de módulos. Além disso, a base teórica para a tomada de decisões está nos princípios de engenharia de precisão para o projeto de sistemas mecânicos de precisão, no anexo 1 deste trabalho.

Muito cuidado deve ser tomado com relação ao posicionamento dos sistemas de retirada de cavacos e de aspensão de fluido de corte. Se forem mal posicionados ou mal regulados, podem causar perturbações que inviabilizam a obtenção da qualidade requerida nas peças usinadas.

Para avaliar a adequabilidade entre as interfaces (atividade 5.1) e a existência de efeitos incidentais entre os módulos (atividade 5.2), foi elaborada uma matriz de avaliação das interfaces no torno de ultraprecisão, como mostra a figura 5.24 (TUP D11).

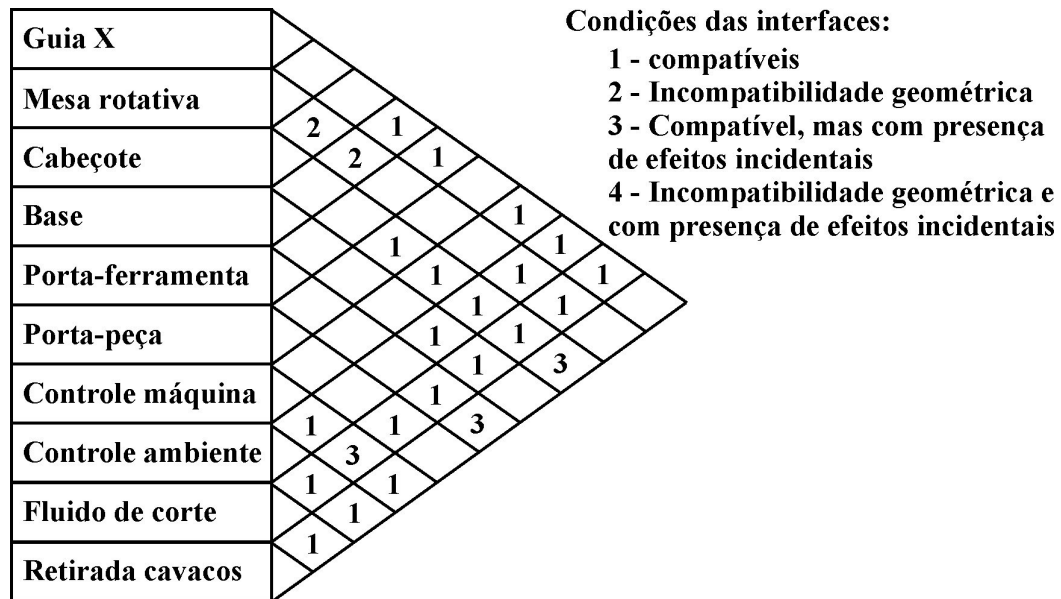


Figura 5.24 – Matriz de avaliação das interfaces no torno de ultraprecisão.

Pela figura 5.24, é possível concluir que existe uma incompatibilidade geométrica entre a mesa rotativa e o cabeçote e a base. Além disso, o sistema de injeção de fluido de corte pode causar perturbações no controle da máquina e o sistema de retirada de cavacos pode causar perturbações no cabeçote e no porta-ferramenta.

Para solucionar o problema com a mesa divisora, foi projetado um módulo auxiliar de montagem entre a mesa e o cabeçote, e foram utilizados dispositivos especiais de fixação entre a base e a mesa divisora, como mostra a figura 5.25.

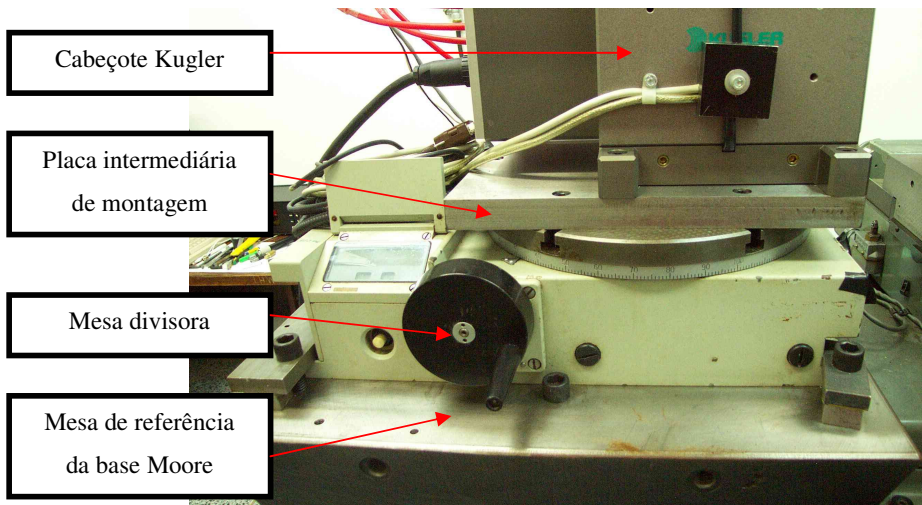


Figura 5.25 – Mesa divisora entre a base Moore e o cabeçote Kugler.

Para evitar a ação do fluido de corte sobre os componentes eletrônicos do sistema de controle, foi feito um anteparo de proteção desses componentes.

O sistema de retira de cavacos necessita de uma regulagem adequada, bem como um posicionamento adequado para que não transfira vibrações acústicas e mecânicas para o cabeçote e para o sistema porta-ferramenta.

5.2.6– ETAPA 6 – Montagem da concepção

A montagem virtual (atividade 6.1) do torno de ultraprecisão pode ser observada na figura 5.26.

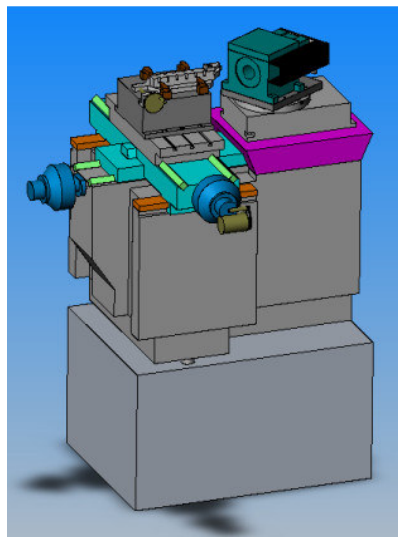


Figura 5.26 – Montagem virtual do torno de ultraprecisão.

Na montagem virtual foram avaliados todos os aspectos de interface e de cinemática para o cumprimento da tarefa final do torno. Com o sucesso da montagem virtual, passou-se para a montagem real do torno de ultraprecisão (atividade 6.2), conforme mostra a figura 5.27.



Figura 5.27 – Configuração final do torno de ultraprecisão.

A qualificação da máquina (atividade 6.3) envolveu a realização de ensaios geométricos, dinâmicos e de usinagem. Como as características geométricas da trajetória linear da guia e da rotação do mancal do cabeçote já são conhecidas, restou uma avaliação da posição relativa entre o eixo de rotação da árvore e a trajetória linear da guia.

Com o emprego de um relógio comparador, foi encontrada a posição zero da mesa divisora com relação à guia. A partir dessa posição, é possível realizar os incrementos angulares na mesa divisora para obter-se o ângulo de conicidade desejado.

Como descrito detalhadamente por Guimarães (2004), diversos ensaios de monitoramento de vibrações foram realizados para avaliar as vibrações geradas pelo acionamento da guia linear em várias faixas de velocidade, bem como as vibrações geradas pelos diversos módulos, como a injeção de fluido de corte, a aspiração de cavaco, a influência do ambiente externo sobre a máquina e a influência do balanceamento dinâmico da árvore.

O acerto de todos esses parâmetros dentro de uma faixa aceitável de vibrações induzidas no processo foi feito através de ensaios de usinagem de espelhos planos (atividade 6.5). A otimização de todos os parâmetros que influenciam na qualidade final da peça levou ao resultado apresentado na figura 5.28.

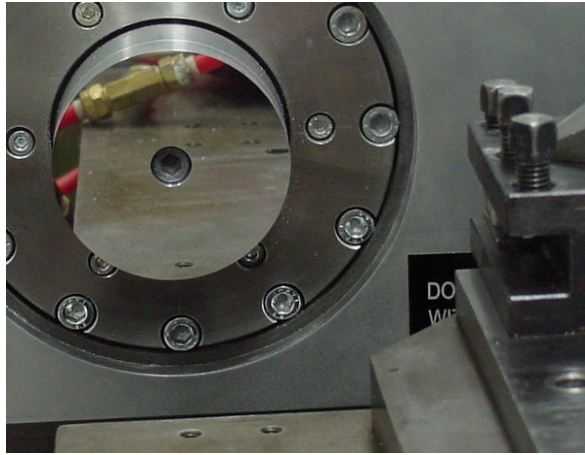


Figura 5.28 – Espelho plano gerado nos ensaios preliminares de usinagem.

Todos os relatórios gerados (atividades 6.4 e 6.5; **TUP D12** e **TUP D13**) foram arquivados junto à documentação do equipamento.

5.2.7– ETAPA 7 – Execução da tarefa

As atividades da etapa 7 consistem na realização de ensaios (atividade 7.1) do torno de ultraprecisão em condições reais de aplicação, como mostra a figura 5.29.

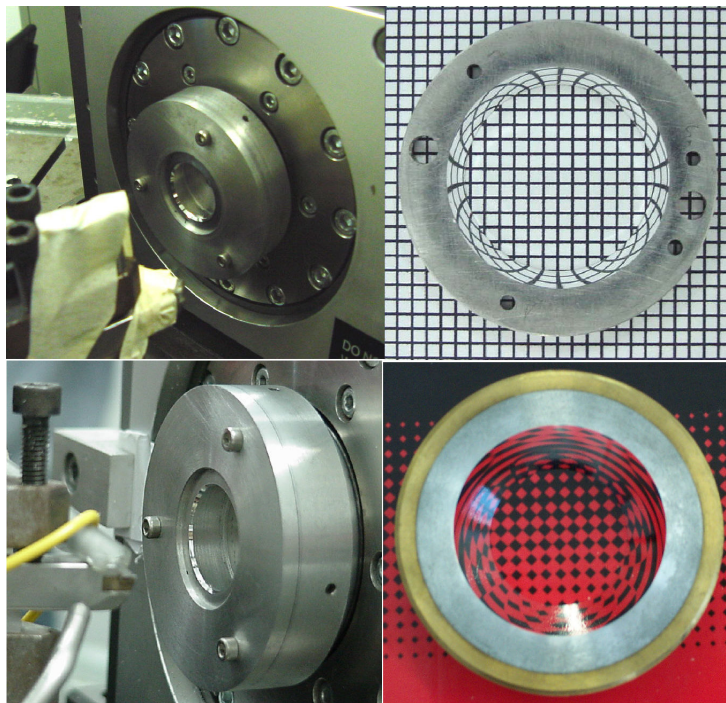


Figura 5.29 – Espelhos cônicos produzidos pelo torno de ultraprecisão.

A avaliação da qualidade final dos espelhos produzidos (atividade 7.2) só pode ser feita através da verificação do cumprimento da função do espelho junto ao sistema de medição ao qual está montado. Os sistemas de medição de tensões residuais operam normalmente, confirmando o sucesso na qualidade dos espelhos produzidos.

A documentação dos ensaios e testes realizados (atividade 7.3) está arquivada junto aos demais documentos do equipamento, que se encontra disponível para usinar novos espelhos cônicos (atividade 7.4).

5.2.8– Outras aplicações do torno de ultraprecisão

Com a disponibilidade do torno de ultraprecisão, outros componentes foram produzidos. Estes componentes exploraram as características da configuração atual do torno, sem necessidade de substituição de componentes do circuito estrutural.

A reconfiguração foi feita com reposicionamento do cabeçote e com o emprego da guia linear aerostática integrada ao cabeçote *Kugler*.

A figura 5.30 apresenta alguns exemplos de componentes produzidos.

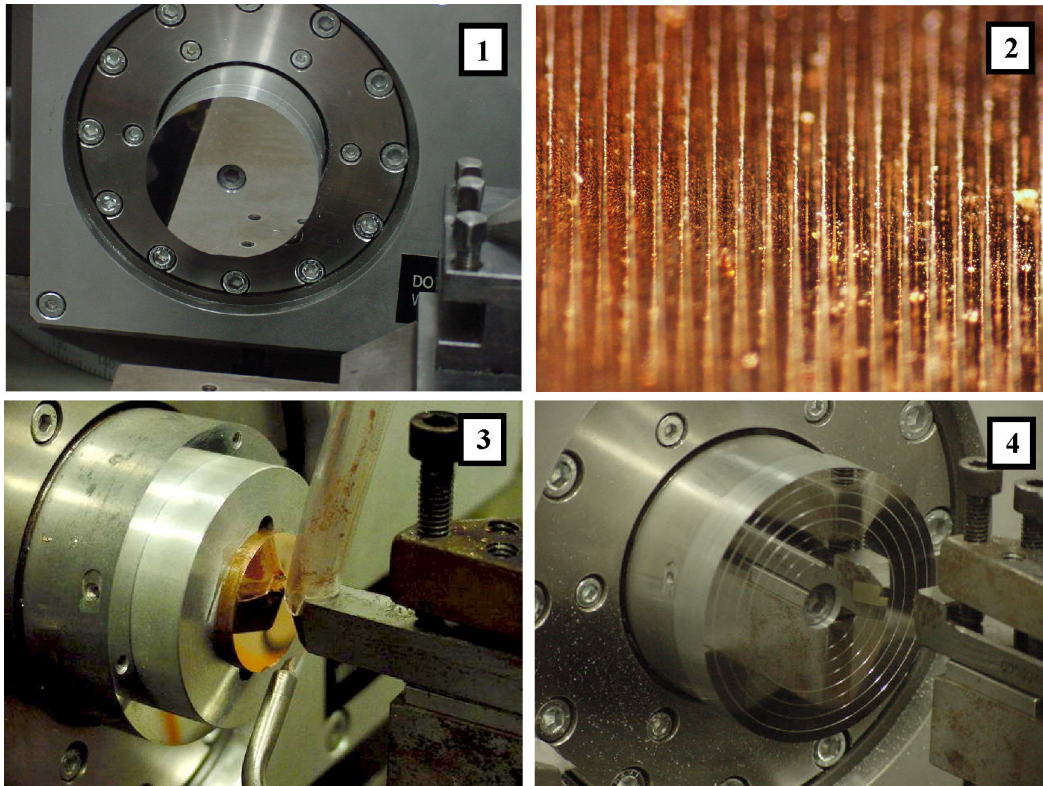


Figura 5.30 – Outros componentes produzidos no torno de ultraprecisão.

O componente número 1 da figura 5.30 é um espelho plano em alumínio. No componente número 2, foram produzidas micro-ranuras em cobre para a formação de *microheatpipes* para emprego em tecnologia de satélites. O componente 3 é um espelho de cobre para aplicações de laser e o componente 4 é um padrão de profundidade de ranuras em “V” para ensaios de capacidade de reprodução de detalhes por parte de polímeros adesivos de uso odontológico.

5.3 – Considerações finais

Este capítulo apresentou a aplicação da metodologia de projeto de sistemas de precisão reconfiguráveis em dois casos, um esclerômetro e um torno de ultraprecisão.

Apesar do esclerômetro e do torno de ultraprecisão serem sistemas totalmente diferentes, a metodologia permitiu que se conduzisse o desenvolvimento de ambos de forma sistemática e prática. A chave para o sucesso da aplicação da metodologia está na correta caracterização e documentação dos módulos na biblioteca de módulos.

Nos dois casos, é prevista a continuidade da pesquisa com a aquisição de novos componentes para formar novos módulos e dar maior flexibilidade de reconfiguração aos sistemas.

Apesar de não ter sido explicitado a todo o momento, as tomadas de decisão sempre levaram em consideração os preceitos apresentados nos princípios de engenharia para o projeto de sistemas mecânicos de precisão (anexo 1). Um conhecimento sólido desses princípios é fundamental para se alcançar o sucesso em projetos desta natureza.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho consistiu no desenvolvimento de uma metodologia que permitisse a sistematização do processo de seleção de concepções para o desenvolvimento de sistemas mecânicos de precisão e ultraprecisão reconfiguráveis.

A motivação maior para esse desenvolvimento surgiu da falta de recursos para se realizar investimentos na compra de equipamentos especializados para cumprirem tarefas de precisão, associada à necessidade de explorar melhor alguns sistemas mecânicos de precisão já existentes.

Para tanto, havia a necessidade de se propor um procedimento de forma metodológica, explorando a possibilidade de controlar o andamento do processo de projeto a cada etapa vencida. Como apresentado no capítulo 1, a busca por esta metodologia se enquadra perfeitamente na relação de tecnologias da engenharia de manufatura a serem desenvolvidas em nível mundial no futuro próximo, conforme o Committee on Visionary Manufacturing Challenges, 1998.

Para se chegar a um procedimento metodológico adequado, iniciou-se a pesquisa com a busca de informações a respeito de metodologias de projeto genéricas, convergindo para as metodologias direcionadas para produtos e sistemas modulares, que possuem uma certa similaridade com a proposta metodológica explorada. Estas informações, contidas no capítulo 2 desta pesquisa, trouxeram um entendimento adequado sobre a formulação de uma metodologia, suas fases e as principais ferramentas para auxílio ao processo de projeto. As metodologias desenvolvidas com enfoque em produtos modulares não se enquadraram na necessidade de desenvolvimento de sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis por serem muito genéricas, sem um controle adequado das particularidades encontradas nos sistemas mecânicos de precisão e ultraprecisão.

A seguir, no capítulo 3, foi definido o escopo dos “sistemas mecânicos de precisão”, com um destaque no amplo levantamento bibliográfico relacionado aos princípios de engenharia de precisão para o projeto de sistemas mecânicos de precisão e ultraprecisão. Esse levantamento bibliográfico é um importante subproduto desta tese, servindo de referência para projetistas que queiram desenvolver seus projetos nesse campo de pesquisa.

Para facilitar essa consulta por parte de projetistas e estudantes da área, o material gerado foi disponibilizado em forma de arquivo de visualização pela Internet, através do endereço:

http://www.lmp.ufsc.br/publicacoes/arquivo/tese_milton/

A partir desse material básico, outros aspectos do projeto de sistemas mecânicos de precisão podem ser estudados e adicionados ao material existente, ampliando seu conteúdo. Os princípios de engenharia de precisão são o ponto de partida para qualquer desenvolvimento de projeto na área.

Dentro da abordagem de sistemas reconfiguráveis, foram apresentados os estudos nos campos de sistemas de manufatura reconfiguráveis e máquinas-ferramentas reconfiguráveis. Essas pesquisas possuem uma relação com a metodologia desenvolvida neste trabalho no que diz respeito à forma de entendimento sobre sistemas reconfiguráveis, diferenciando muito na maneira como são tratadas as informações para se chegar à concepção final do sistema.

A maior diferença está no fato da nova metodologia desenvolvida ser aplicável também para o emprego de sistemas já existentes, não projetados inicialmente para fazerem parte de sistemas modulares, ao contrário do que foi apresentado nos sistemas de manufatura reconfiguráveis e máquinas-ferramentas reconfiguráveis, onde cada módulo é especialmente projetado para cumprir aquele conjunto específico de tarefas e suas interfaces são perfeitamente definidas para permitir uma fácil integração com os demais módulos.

Além disso, a metodologia apresentada preocupa-se com o desenvolvimento de sistemas mecânicos de precisão, que possuem particularidades e preocupações que passam despercebidas quando se trata do desenvolvimento de sistemas convencionais. Por isso, possui uma preocupação fundamental com a correta caracterização de cada módulo disponível, com a necessidade de levantamento de todas as suas características estáticas, dinâmicas, cinemáticas, geométricas, térmicas e de controle.

Somente com essas informações, é possível inferir sobre a composição dos erros no sistema final montado, conforme o conceito apresentado no determinismo, que é um dos princípios de engenharia de precisão estudados.

Essa preocupação da metodologia com as particularidades encontradas em sistemas mecânicos de precisão a torna bastante abrangente. A metodologia apresentada sistematiza o projeto de sistemas mecânicos de maneira simples, sendo uma ferramenta muito interessante para uso por parte de projetistas acostumados com desenvolvimentos baseados em tentativa e

erro, que é uma sistemática demorada e mais cara, por não focar o projeto numa solução ideal para o problema proposto.

A aplicação da metodologia mostrou-se eficiente e abrangente nos dois casos apresentados, o do esclerômetro e o do torno de ultraprecisão para a usinagem de espelhos cônicos. O acompanhamento da aplicação da metodologia, apresentado no capítulo 5, mostrou-se simples e coerente. As etapas foram sendo cumpridas com bastante clareza e os documentos gerados a cada etapa encerrada cumpriram um papel importante de fornecer as informações necessárias às próximas etapas e também de organizar todas as informações relativas à concepção em desenvolvimento.

A metodologia possui um potencial grande para aplicação em sistemas mais complexos ou mesmo muito mais simples do que os apresentados. A seqüência de etapas da metodologia fornece uma visão ampla do pré-projeto de qualquer sistema mecânico a ser desenvolvido.

Ambos os sistemas desenvolvidos apresentam-se em operação e fornecendo os resultados esperados. O esclerômetro cumpre seu objetivo de fornecer resultados confiáveis em ensaios de resistência ao risco, mas sua reconfigurabilidade ainda não foi testada. A substituição de componentes ou módulos para a composição de sistemas mais simples ainda não foi iniciada. Este é o próximo passo na pesquisa deste sistema. Como foi mostrado no item 5.2.8, o torno de ultraprecisão foi aplicado à produção de outros componentes, diferentes dos espelhos cônicos, e com ótimos resultados alcançados. O torno encontra-se operacional e está permitindo que novos trabalhos sejam desenvolvidos com base na sua concepção, como o trabalho desenvolvido por Guimarães (2004).

A biblioteca de módulos, anexo 2, apresenta um conjunto de módulos capazes de compor uma gama bastante ampla de sistemas mecânicos de precisão, mas pode sofrer uma análise para identificarem-se quais faixas de operação de determinados módulos podem ser adicionadas por novos módulos à biblioteca.

De uma forma geral, a metodologia de projeto de sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis possui seu sucesso vinculado à correta documentação de cada etapa e ao correto levantamento das características de cada módulo disponível. Sua maior dificuldade está na dificuldade de obtenção de todas as características dos módulos.

Uma grande vantagem da metodologia é o reaproveitamento de sistemas mecânicos de alta qualidade, mas que estejam inutilizados por fazerem parte de equipamentos fora de uso. Uma vez dentro da biblioteca de módulos, esses sistemas poderão se tornar a solução de

menor custo no desenvolvimento de um novo equipamento, sem prejuízo na sua eficiência mecânica.

Esse reaproveitamento de sistemas, garantido pela característica de reconfigurabilidade da metodologia, é de valiosa importância para projetistas com poucos recursos para aplicar na compra de novos equipamentos para tarefas de precisão.

A difusão dos princípios de projeto compilados nesse trabalho e da metodologia desenvolvida fornece subsídios muito importantes para projetistas de sistemas mecânicos.

Para dar continuidade à pesquisa, são propostos os seguintes trabalhos futuros:

- Ampliação da biblioteca de módulos, com a identificação de outros sistemas disponíveis no laboratório e que possam servir de módulos para composição de novas soluções para sistemas mecânicos de precisão;
- Desenvolvimento de melhorias em alguns dos módulos disponíveis para que possam atender a requisitos de qualidade mais exigentes;
- Estudo dos módulos disponíveis para identificação de faixas de aplicação não abrangidas por estes módulos, para serem cobertas por novos módulos a serem adicionados à biblioteca;
- Criação de uma biblioteca paralela de módulos comerciais a serem empregados quando houver necessidade e disponibilidade de recursos;
- Parametrização dos módulos para emprego em *softwares* de seleção de concepções;
- Modelamento dos módulos para permitir a análise por elementos finitos;
- Criação de um *software* para o desenvolvimento da metodologia, abrangendo todas as etapas e a criação dos documentos previstos;
- Criação de um *software* para simulação geométrica do sistema modular;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBÉ, E. **Journal of Instrumental Information**, Vol. X, pp 446-8, 1890
- ASHBY, M. F. **Materials Selection in Mechanical Design**. Pergamon Press, Oxford, UK, 1992.
- ATKINS, W. S.; **Strategic Study on the EU Machine Tool Sector**. Management Consultants, 1990.
- BACK, N. **Metodologia de Projeto de Produtos Industriais**. Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, RJ, 1983, 389 p.
- BACK, N. **Projeto Conceitual**. EMC/UFSC, 1996. Apostila do curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
- BERKMANS, W. J. **Prediction of Tolerances in Precision Cutting for Mass Production**. N. D.
- BISPINK, T. **Neue Wege zur Beurteilung Hochgenauer Vorschubantriebe für Ultrapräzisionsmaschinen**. RWTH. Aachen: Verlag Shaker Aachen, out. 1992. Tese.
- BLANDING, D. L. **Principles of Exact Constraint Mechanical Design**. Eastman Kodak Company, Rochester, New York, 1992.
- BREHM, R.; DUN, K.; TEUNISSEN, J. C. G.; HAISMA, J. **Transparent Single Point Turning of Optical Glass**. Precision Engineering, 1979.
- BRYAN, J. B. **Design and Construction of an Ultraprecision 84 inch Diamond Turning Machine**. Precision Engineering, Vol. 1. No. 1, pp. 13-17, 1979
- BRYAN, J. B. **The Abbé Principle Revisited – An Updated Interpretation**. Precision Engineering, Vol. 1. No. 3, pp. 129-132, 1979

- BRYAN, J. B. **The Power of Deterministic Thinking in Machine Tool Accuracy**. First International Machine Tool Engineers Conference, Tokyo, Japan, November 1984
- CHETWYND, D. G. **Selection of Structural Materials for Precision Devices**. Precision Engineering, Vol 9, pp. 3-6, 1987.
- COMMITTEE on Visionary Manufacturing Challenges. **Visionary Manufacturing Challenges for 2020**. Board on Manufacturing and Engineering Design, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council, NATIONAL ACADEMY PRESS. Washington, D.C. 1998.
- DAVIDSON, A. **Handbook of Precision Engineering - vol. 5**. McGraw Hill, 1972.
- DONALDSON, R. R. **A Simple Method for Separating Spindle Error from Test Ball Roundness Error**. Annals of the CIRP. Vol. 21, pp. 125-126, January 1972
- DONALDSON, R. R. **Large Optics Diamond Turning Machine**. Lawrence Livermore National Laboratory report UCRL-52812, Vol. 1, September, 1979.
- DONALDSON, R. R. **The Deterministic Approach to Machining Accuracy**. Society of Manufacturing Engineers Fabrication Technology Symposium, Golden, Colorado, November 1972.
- DONALDSON, R. R., MADDUX, A. R. **Design of a High-Performance Slide and Drive System for a Small Precision Machining Research Lathe**. CIRP Assembly, Madison, WN. August 1984.
- DONALDSON, R. R.; PATTERSON, S. R.; THOMPSON, D. C.; **“Diamond Machining and Mechanical Inspection of Optical Components”**, Lawrence Livermore National Laboratory, novembro, 1981.
- ERIXON, G.; **Modular Function Deployment (MFD), Support for Good Product Structure Creation**. Center for Industrial Engineering at Darlana University and KTH, Stockholm, 2004.

- ERIXON, G.; YXKULL, A. VON; ARNSTRÖM. **Modularity – the Basis for Product and Factory Reengineering (annals of the CIRP)**, v. 45/1/1996, January, p. 1-6, 1996.
- EVANS, C. J. and KESTNER, R. N. **Test Optics Error Removal**. Applied Optics, Vol. 35, No. 7, pp. 1015-1021, March, 1996.
- EVANS, HOCKEN and ESTLER. **Self-Calibration: Reversal, Redundancy, Error Separation, and Absolute Testing**. Annals of the CIRP. Vol. 45, No. 2, pp. 617-634, 1996.
- FERREIRA, J. M. G. C.; ANTUNES, S. D.; HÖHNE, G.; NÖNNIG, R.; GOUVEA, J. L. C.; **Quality Improvement of Precision Engineering Products by means of CAA System.**, Proceedings of the ICED 97, Tampere- Finlândia, pp. 309-312, 1997;
- FORCELLINI, F. A.; **Projeto Conceitual**. Apostila de disciplina do PPGEM, Engenharia Mecânica, UFSC, 2004.
- FULLER, D. D. **Theory and Practice of Lubrication for Engineers**. John Wiley & Sons, 2ª edição, 1984.
- FUNDAÇÃO CERTI; **Tolerâncias geométricas – GD&T**. Florianópolis, fevereiro de 1994. Apostila de curso especializado.
- GOUVEA, J.L.C. **Beratungssystem für die Justierung**. Proceedings of the 44 IWK, pp.340-345, Ilmenau-DE, 1999;
- Gu, P. add SOSALE, A. **An Integrated Modular Design Methodology for Life-Cycle Engineering**. 1997.
- GUIMARÃES, M. P.; **Diagnóstico de um Torno de Ultraprecisão Utilizando Técnicas de Monitoramento e Automação**. Florianópolis, 2004. Dissertação de Mestrado – EMC – UFSC.
- GUIMENES, N. M. **Precisão e Rigidez Determinam o Fim do Barramento Convencional**. Revista Maquinas e Metais, nov. 1988.

- GURGEL FLORIANO C. A. **Administração do Produto**. Editora Atlas, São Paulo, 1995.
- HALE, L. C. **Principles and Techniques for Design Precision Machines**. Ph. D. Thesis, Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, February 1999.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Física – Vol. 4 – 4ª Edição**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1985.
- HANSEN, F. **Adjustment of Precision Mechanisms**. London Iliffe Books Ltd, 1970;
- HASHIM M., JUSTER P. and PENNINGTON A. **Generating Design Variants Based on Functional Reasoning**. In: International Conference on Engineering design. *ICED '93*. The Hague, August 17-19, 1993.
- HÖHNE, G. **Projeto Computacional de Produtos Modulares**. Publicação interna NEDIP – EMC – UFSC, 1999.
- HÖHNE, G. **Projeto de componentes da mecânica de precisão I**. EMC/UFSC, 1991. Apostila do curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
- HÖHNE, G.; NÖNNIG, R.; HEß, D; HOFFMANN, R.; **Justieruntersuchungen am Justierleitsland**. Proceedings of the 44. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, pp.333-339, Ilmenau-DE, 1999;
- HÖHNE, G.; NÖNNIG, R.; HEß, D; HOFFMANN, R.; **Justieruntersuchungen zum Ausrichten von optischen und mechanischen Aachsen**. Proceedings of the 44. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, pp.346-352, Ilmenau-DE, 1999;
- HOLMAN, J. P. **Heat Transfer**. Fourth Edition, Mc-Graw Hill, New York, N Y, 1976.
- HUTHWAITE, B., SCHNEBERGER, D. **Design for Competitiveness: the Teamwork Approach to Product Development**. USA: Institute for Competitive Design, 1992.
- IKAWA, N.; et ali. **Ultraprecision Metal Cutting - The Past, the Present and the Future**. In: CIRP. Anais. V. 40, fev. 1991.

- ISHII, K. **Modularity: A Key Concept in Product Life-Cycle Engineering**. In A. Molina and A. Kusiak eds. Handbook of Life-cycle Enterprise, Fall 1998.
- JESUS, G. A. R.; **Desenvolvimento de um posicionador de ultraprecisão utilizando técnicas de controle**. Florianópolis, 1999. Tese em andamento – EMC – UFSC.
- KAMRANI, A. K. and SALHIED, S. **Product Design for Modularity**. Kluwer Academic Publishers, Boston Hardbound, ISBN 0-7923-8554-3, October 2000, 224 pp
- KASSNER, P. E. **Handbook of Precision Engineering**. McGraw Hill, v. 3, 1972.
- KÖNIG, W.; et ali. **Diamond Machining Technology**. Aachen: maio 1991. Tutorial do 6º IPES/UME 2, IPT.
- KOREN, Y.; HEISEL, U.; JOVANE, F.; MORIWAKI, T.; PRITSCHOW, G.; ULSOY, A. G.; VAN BRUSSEL, H.; **Reconfigurable Manufacturing Systems**. Annals of the CIRP, Vol. 48/2/1999.
- KOREN, Y.; ULSOY, A. G.; **Vision, Principles and Impact of Reconfigurable Manufacturing Systems**. Powertrain International Magazine, 2002.
- KRAUSE, W. **Konstruktionselemente der Feinmechanik**, Verlag Technik Berlin, 1986;
- KRULEWICH, D. A. **Rapid Mapping of Volumetric Machine Errors Using Distance Measurements**. Proc. Of the CIRP International Seminar on Improving Machine Tool Performance, Vol. 2, pp. 487-496, July, 1998.
- LANDERS, R. G.; **A New Paradigm in Machine Tools: Reconfigurable Machine Tools**. 2000 Japan – USA Symposium on Flexible Automation, Ann Arbor, MI, July 23-26.
- LANDERS, R. G.; MINN, B. K.; **Development of a Prototype Reconfigurable Machine Tool**. CIRP – 1st International Conference on Reconfigurable Manufacturing, Ann Arbor, Michigan, May 21-22, 2001.
- LANDERS, R. G.; MINN, B. K.; KOREN, Y.; **Reconfigurable Machine Tools**. Annals of the CIRP 2001.

- LOXHAM, J. **The Commercial Value of Investigations into Repeatability**. Cranfield Unit for Precision Engineering, Bedford, England, 1970
- MACHADO NETO, V.; **Metodologia para garantia da confiabilidade no desenvolvimento de produtos mecatrônicos**. Florianópolis, maio de 2002. Tese de doutorado – EMC – UFSC.
- MARIBONDO, J. F. **Desenvolvimento de uma Metodologia de Projeto de Sistemas Modulares, Aplicada a Unidades de Processamento de Resíduos Sólidos Domiciliares**. Florianópolis, 2000. Tese – EMC – UFSC.
- McCLURE, E. Ray. **A perspective on the future of the Precision Engineering Industry**. Advancement of Intelligent Production. Elsevier Science B. V. / The Japan Society for Precision Engineering. 1994, pp. 31-37
- McKEOWN, P. A. **An Introduction to Precision Engineering**. Lecture Notes for MT1 Lecture. SME Cranfield Precision Engineering, UK. February, 1999.
- McKEOWN, P. A. **The role of Precision Engineering in Manufacture of future**. Annals of the CIRP, Vol 36/2/1987, pp 495-501
- MEHRABI, M. G.; ULSOY, A. G.; KOREN, Y.; **Reconfigurable Manufacturing Systems: Key to Future Manufacturing**. Japan – USA Symposium on Flexible Automation, 1998.
- MELLO, J. D. B; **Introdução ao Estudo do Desgaste**. Curso ministrado na UFSC, novembro de 1994.
- MOON, Y.; KOTA, S.; **A Methodology for Automated Design of Reconfigurable Machines**. The 32 CIRP – International Seminar on Manufacturing Systems, 1999.
- MOON, Y.; KOTA, S.; **Design of Reconfigurable Machine Tools**. Journal of Manufacturing Science and Engineering, ASME, May 2002.
- MOON, Y.; KOTA, S.; **Generalized Kinematic Modeling for Reconfigurable Machine Tools**. Journal of Mechanical Design, ASME, March 2002.

- MOON, Y.; KOTA, S.; **Generalized Kinematic Modeling Method for Reconfigurable Machine Tools**. Proceedings of DETC 1998, ASME 1998 Design Engineering Technical Conference. Atlanta, Georgia, September 13-16, 1998.
- MOON, Y.; KOTA, S.; **Synthesis of Reconfigurable Machine Tools with Screw Theory**. Proceedings of DETC 2000, ASME 2000 Design Engineering Technical Conference. Baltimore, Maryland, September 10-13, 2000.
- MOON, Y.; **Reconfigurable Machine Tool Design: Theory and Application**. PhD Thesis. University of Michigan, 2000.
- MOORE, W. R. **Foundations of Mechanical Accuracy**. The Moore Special Tool Company, Bridgeport, Connecticut. 1970.
- MOTION & CONTROL NSK. **NSK Rolamentos**. São Paulo, 1996.
- MULLER, L. A. **Usinagem de Ultraprecisão**. Publicação interna do Laboratório de Mecânica de Precisão, UFSC, outubro de 1993.
- MÜLLER, L. A.; **Desenvolvimento de um cabeçote de precisão**. Florianópolis, 1994. Dissertação – EMC – UFSC.
- NAKAZAWA, H.; **Principles of Precision Engineering**. Oxford University Press, 1994. ISBN 0 19 856266 7.
- NN. **AHP series Ultra Precision Lathes** - Catálogo TOYODA SEIKI n. L-5073.
- NN. **Moore Precision Turning and Grinding Machines**. Catálogo MOORE SPECIAL TOOLS.
- NN. **Motion & Control – Precision Machine Component**. Cat. n. E3151a 1995C-2, NSK, 1994.
- NN. **Super Precision Micro Machine Based on Friction – Free Servo / Rnano Ui**. Folder promocional FANUC, Ui (E)-01, 10,1998.

- OLIVEIRA, P. R.; **Projeto, fabricação e qualificação de um mancal aerostático duplo-esférico**. Florianópolis, 1994. Dissertação – EMC – UFSC.
- PAHL, G. and BEITZ, W. **Engineering Design. A Systematic Approach**. Springer-Verlag London Limited, Printed in Great Britain, 1996, 3rd Edition.
- PAREDIS, C. J. J.; BROWN, H. B.; KHOSLA, P. K.; **A Rapidly Deployable Manipulator System**. Proceedings of the 1996 IEEE. International Conference on Robotics and Automation. Minnesota, April 1996.
- PATTERSON, S. R. **Development of Precision Turning Capabilities at Lawrence Livermore National Laboratory**. Third Biennial International Machine Tool Technical Conference. Chicago, IL, September 1986.
- PEREIRA, M. **Desenvolvimento De Uma Mesa De Retificação Para A Usinagem de Sapatas Planas Circulares para Mancais Aerostáticos**. Florianópolis: UFSC, fev. 1998. Dissertação de mestrado. Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica.
- PEREIRA, M. **Projeto e Ajustagem de Mecanismos de Precisão**. Florianópolis, junho de 2000. Monografia referente à disciplina de estudo dirigido – EMC – UFSC.
- PEREIRA, M.; BACK, N. **Requisitos de Projeto: a Base para o Desenvolvimento de um Produto**. LMP/UFSC, 1996. Publicação interna.
- PEREIRA, M.; **Desenvolvimento de uma mesa de retificação para a usinagem de sapatas planas circulares para mancais aerostáticos**. Florianópolis, 1998. Dissertação – EMC – UFSC.
- PEREIRA, M.; FORCELLINI, F. WEINGAERTNER, W. L. **Ajustagem de um Torno Modular de Ultraprecisão de Pequeno Porte**. CONEM 2000.
- PIZZATO, A.; **Sistemática de Projeto para Produtos Modulares com Aplicação em Móveis**. Florianópolis, 1998. Dissertação de Mestrado – EMC – UFSC.
- PRATA, A. T. **Teoria da Lubrificação**. Disciplina do PPGEM da UFSC. 1994. (anotações de sala de aula).

- RABE, R. G. **Desenvolvimento de um Sistema de Fixação e Ajustagem de Ferramenta para Usinagem de Ultraprecisão**. Florianópolis, 2001. Dissertação – EMC – UFSC.
- RIVIN, E. **Vibration Isolation of Precision Equipment**. Precision Engineering, vol. 17, n° 1, pp. 41-56. Janeiro 1995.
- ROCHA, A. S.; **Contribuições para a fabricação de mancais aerostáticos**. Florianópolis, 1993. Tese – EMC – UFSC.
- SAITO, T. T. **Machining of Optics: An Introduction**. Applied Optics, v. 14, n. 8, p. 1773, ago. 1975.
- SAKAI, Y. **Ultraprecision Machine Tool**. Japan Society of Precision Engineering, v. 18, n. 2, jun. 1984.
- SANTOS, I.; **Aspectos a serem considerados na implantação e aplicação da tecnologia de usinagem de ultraprecisão com ferramentas de geometria definida**. Florianópolis, 1998. Publicação interna do LMP – UFSC.
- SARTORI, S. and ZHANG, G. X. **Geometric Error Measurement and Compensation of Machines**. Annals of the CIRP, Vol. 44, No. 2, pp. 1-11, 1995
- SCALICE, R. K. **Desenvolvimento de um Sistema Mecanizado Modular para o Cultivo de Mexilhões**. Florianópolis, 1999. Monografia para a disciplina EMC 6601 – EMC – UFSC.
- SCALICE, R. K.; **Desenvolvimento de uma Família de Produtos Modulares para o Cultivo e Beneficiamento de Mexilhões**. Florianópolis, março de 2003. Tese de doutorado – EMC – UFSC.
- SHELLEKENS, P. et al. **Design for Precision: Current Status and Trends**. Annals of the CIRP vol. 47/2/1998 pp 557-586.
- SCHILLING, M.; NÖNNIG, R.; **Justierung in der Feinwercktechnik**, Proceedings of the 38. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, pp.33-44,Ilmenau-DE, 1993;

- SCHROETER, R. B.; **Usinagem de ultraprecisão de elementos ópticos transmissivos no espectro infravermelho**. Florianópolis, 1997. Tese – EMC – UFSC.
- SLOCUM, A. H.; et ali. **Design of Self-Compensated Water-Hidrostatic Bearings**. Precision Engineering, v. 17, n. 3, jul. 1995.
- SLOCUM, A. H.; MARSH, E. R.; SMITH, D. H. **A New Damper Design for Machine Tool Structures: The Replication Internal Viscous Damper**. Precision Engineering, v. 16, n. 3, pp. 174-183, july 1994.
- SMITH, S. T.; CHETWYND, D. G. **Foundations of Ultraprecision Mechanism Design**. Gordon and Breach Science Publisher, 1994.
- SPUR, G.; STÖFERLE, Th. **Handbuch de Fertigungstechnik - vol. 3**. Viena: Carl Hanser Verlag, 1979.
- STEWART, D. **A Platform with Six Degrees of Freedom**. Proc. Inst Mech Engrs, pp 371-386, 1965-66.
- STOETERAU, R. L. **Comportamento Estático e Dinâmico de Mancais Aerostáticos Cilíndricos para Guias Lineares**. Florianópolis: UFSC, 1992. Dissertação.
- STOETERAU, R. L. **Desenvolvimento do protótipo de uma máquina-ferramenta comandada numericamente para a usinagem de ultraprecisão com ferramenta de geometria definida**. Florianópolis, dezembro de 1999. Tese de doutorado, Centro Tecnológico. Departamento de Engenharia Mecânica.
- STOETERAU, R. L.; BACK, N. **Especificação e Princípios Básicos de Máquinas-Ferramentas de Precisão para Usinagem com Ferramentas de Geometria Definida**. LMP/UFSC, 1996. Publicação interna.
- TANIGUSHI, N. **Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing**. CIRP. Anais. V. 32, fev. 1983.
- TANIGUSHI, N. **The State of the Art of Nanotechnology of Ultraprecision and Ultrafine Products**. Precision Engineering, v. 16, n. 1, jan. 1994.

- TEAGUE, E. C.; DONMEZ, A. M. **Basic Concepts for Precision Instrument Design: Designing Instruments and Machines to Have a High Degree of Repeatability**. NIST. Tutorial for ASPE. St. Louis, Missouri, October, 1998.
- THYER, G. E. **Computer Numerical Control of Machine Tools**. Nova Iorque: Industrial Press, 2ª edição, 1991.
- TILBURY, D. M.; KOTA, S.; **Integrated Machine and Control Design of Reconfigurable Machine Tools**. IEEE/ASME Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 1999.
- TIMOSHENKO, S.; YOUNG, D.H.; WEAVER, W. **Vibrations Problems in Engineering**. John Wiley, NY. 1974
- TRYLINSKI, W. **Fine Mechanism and Precision Instruments**. Pergamon Press Oxford, 1971;
- ULLMAN, David G. **The Mechanical Design Process**. New York : McGraw-Hill, 1992.
- ULRICH, K. and TUNG, K. **Fundamentals of Product Modularity, Issues in Design Manufacture / Integration**. ASME, 1991. DE-Vol. 39, pp. 73-79.
- VÁSQUEZ, J. A. R.; **Desenvolvimento de um posicionador de ultraprecisão**. Florianópolis, 1994. Dissertação – EMC – UFSC.
- WEBER, C. J.. **Metodologia de Desenvolvimento de Produtos de Precisão com Ênfase no Uso de Sistemas de Ajustagem**. Florianópolis, 2001. Dissertação – EMC – UFSC.
- WECK, M. **Handbook of Machine Tools – Volume 2**. VDI – Verlag Gmbh, Düsseldorf, 1980. ISBN 0 471 26223 4
- WECK, M. **High Precision Spindle Technology**. 6º IPES/ UME 2. Aachen, mai. 1991. Tutoriais.
- WECK, M. **Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme, vol. 4**. VDI-Verlag, 1992.

WECK, M.; LUDERICH, J.; WIENERS, A., VOS, M. **Influence of Aerostatic, Hydrostatic and Rolling Element Spindles and Guideways on the Machining Accuracy.** Proceedings of the 2nd International Conference on Ultraprecision in Manufacturing Engineering. Aachen: maio 1994.

WECK, M.; LUDERICH, J.; WIENERS, A.; VOS, M. **Comparação das Características de Fusos e Guias Aerostáticos, Hidrostáticos e de Elementos Rolantes.** Máquinas e Metais, jul. 1998.

WEINGAERTNER, W. L.; **Desenvolvimentos na usinagem de ultraprecisão.** Florianópolis, 1992. Monografia – Centro Tecnológico, UFSC.

WHEELWRIGHT, S. C.; CLARK, K. B.; **Revolutionizing Product Development: Quantum Leaps in Speed, Efficiency and Quality.** New York: Free Press, 1992.

YIGIT, A. S., ULSOY, A. G.; **Design of Vibration Isolation Systems for Reconfigurable Precision Equipment.** Japan – USA Symposium on Flexible Automation, Ann Arbor, MI, July 23-26 2000.

ANEXO 1

PRINCÍPIOS DE ENGENHARIA DE PRECISÃO NO PROJETO DE SISTEMAS MECÂNICOS DE PRECISÃO E MÁQUINAS-FERRAMENTAS DE ULTRAPRECISÃO

No CD em anexo existe uma série de arquivos do tipo .htm contendo um vasto levantamento bibliográfico, devidamente referenciado, sobre os seguintes princípios de engenharia de precisão:

- 1) Repetitividade;
- 2) Determinismo;
- 3) Princípio de alinhamento;
- 4) Separação de erros sistemáticos;
- 5) Simetria;
- 6) Separação do circuito metrológico do estrutural;
- 7) Distribuição elástica do carregamento;
- 8) Centros de ação;
- 9) Seleção de mancais e guias;
- 10) Gerenciamento térmico;
- 11) Projeto por restrição exata;
- 12) Ajustagem de mecanismos de precisão;
- 13) Seleção de materiais;
- 14) Isolamento de vibrações;
- 15) Acionamentos;
- 16) Sistemas de controle; e
- 17) Sensores de medição.

A visualização do conteúdo é iniciada com a execução do arquivo *index.htm*, que pode ser aberto em qualquer *software* de navegação na *Internet (Browser)*.

O conteúdo também pode ser visualizado no link:

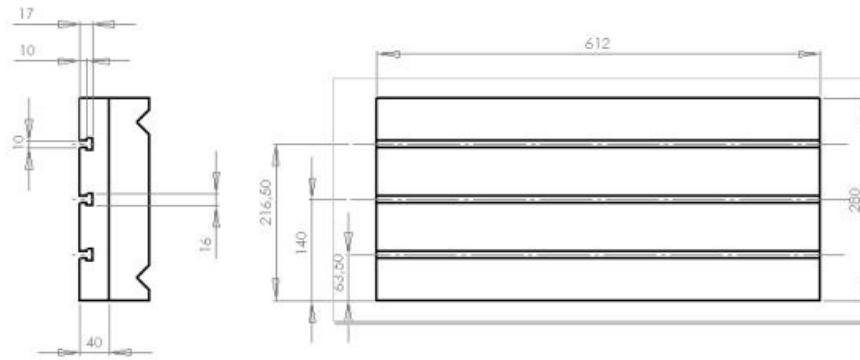
http://www.lmp.ufsc.br/publicacoes/arquivo/tese_milton/

ANEXO 2

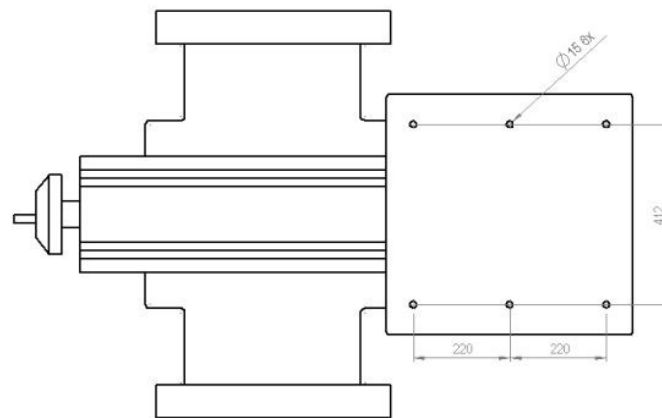
BIBLIOTECA DE MÓDULOS

A seguir serão apresentadas as fichas de acompanhamento os módulos disponíveis para a montagem de sistemas mecânicos de precisão.

BASE COM GUIAS CRUZADAS MOORE		
Nº: 001	Tipo: Módulo de suporte acoplado a um módulo de movimento relativo	
Fabricante: Moore Tools		
Localização: Laboratório de Mecânica de Precisão		
Descrição: Base de ferro fundido, integrada a uma mesa XY com guias de escorregamento. A guia longitudinal é acionada por motor de passo. A base é montada sobre um bloco de concreto de 3 m ³ , que está enterrado no solo. O sistema encontra-se numa sala própria, isolada e controlada termicamente.		
Características estáticas:		Características dinâmicas:
<ul style="list-style-type: none">- Base de Ferro fundido montada sobre um bloco com 3 m³ de concreto, enterrado no solo.- Capacidade de carga de 500 N na mesa longitudinal;- Capacidade de carga de 2000 N na superfície de montagem do cabeçote;- Sistema concebido com alta estabilidade estrutural;		<ul style="list-style-type: none">- Isolamento passivo de vibrações externas e internas pela massa do bloco de concreto;- O motor de passo que aciona o eixo longitudinal é uma fonte de vibrações e deve ser utilizado nas velocidades de avanço entre 5 e 20 mm/min, faixa onde essas vibrações são aceitáveis.
Características cinemáticas:		Características geométricas:
<ul style="list-style-type: none">- Mesa de guias de escorregamento cruzadas montadas a 90°, com curso transversal linear de 160 mm e longitudinal linear de 241,3 mm;- Acionamento transversal manual e longitudinal por motor de passo montado em um redutor de 1:25 composto por engrenagem e rosca sem fim;		<ul style="list-style-type: none">- Guias com erro de perpendicularismo de 0,0045+/- 0,0052 mm;- Erro de linearidade inferior a 1 µm / 100 mm;- Medição do deslocamento transversal por nônio e longitudinal pelo motor de passo em malha aberta;
Comportamento térmico:		Características de controle:
<ul style="list-style-type: none">- Há geração de calor no motor de passo, mas sua montagem impede a propagação deste calor a ponto de interferir no comportamento geométrico do sistema;- Sistema desenvolvido para operar em ambiente com temperatura e umidade controlada;		<ul style="list-style-type: none">- Motor de passo alimentado por hardware próprio e controlado por software próprio, exigindo o acompanhamento de um microcomputador;- Não há necessidade de condições especiais de alimentação de energia;
Interfaces:		
<ul style="list-style-type: none">- O sistema está montado numa sala apropriada, isolada e com controle de ambiente;- A mesa longitudinal possui um plano de montagem com ranhuras em "T", conforme modelo;- Existe um plano de referência para montagem no topo da base com furação apropriada, conforme modelo;		



Plano de montagem da mesa longitudinal

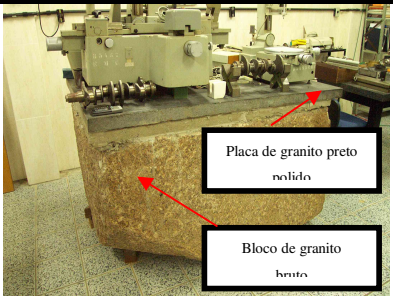



Plano de referência para montagem

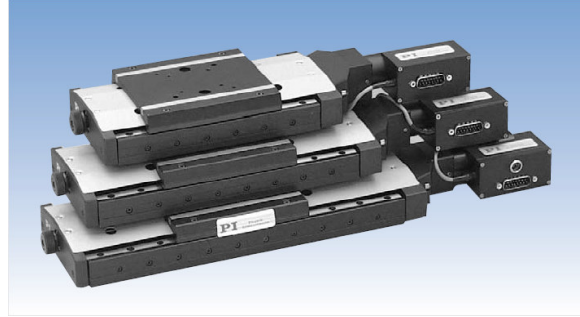
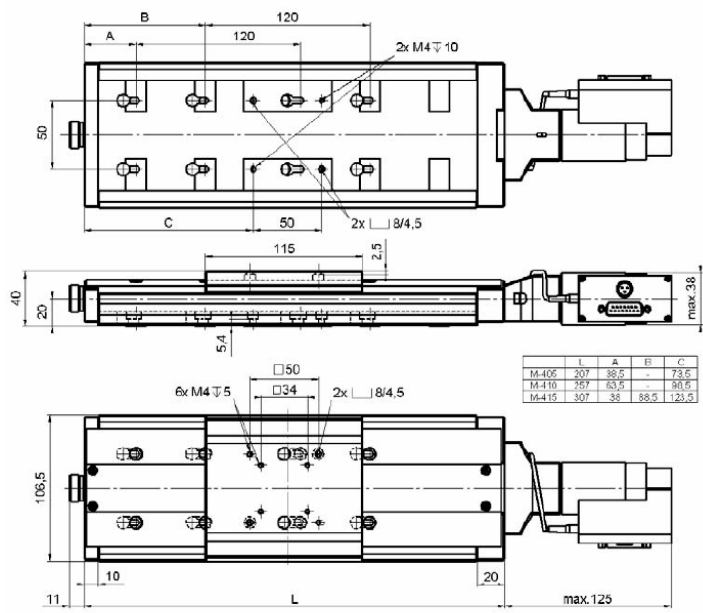
Observações:

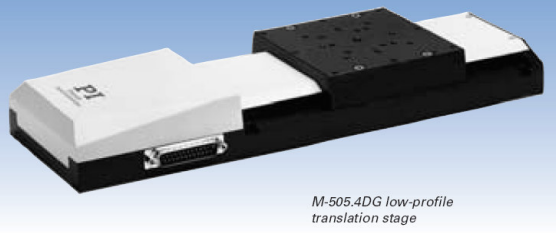
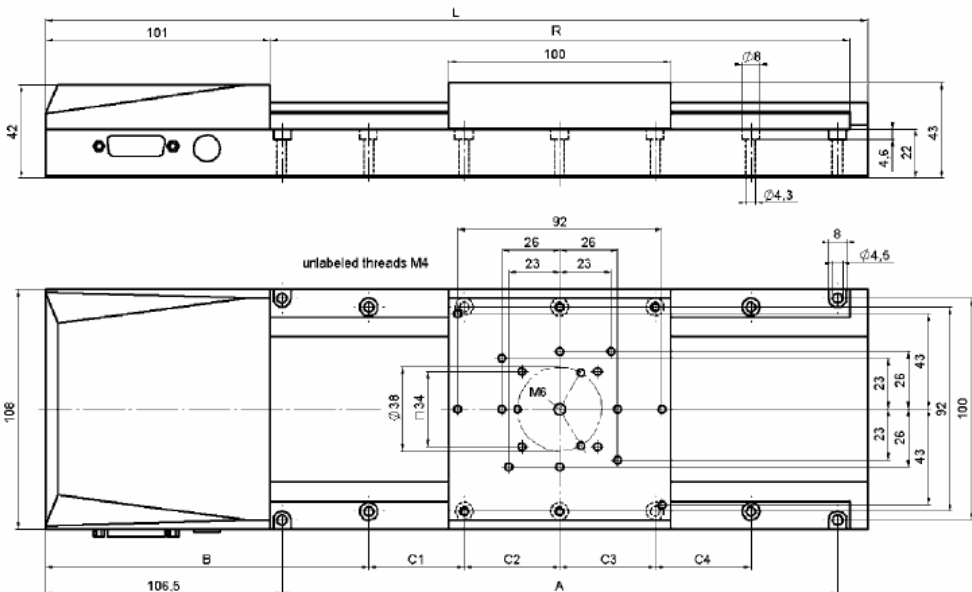
- Sistema está sofrendo um *retrofitting* no acionamento do carro longitudinal;

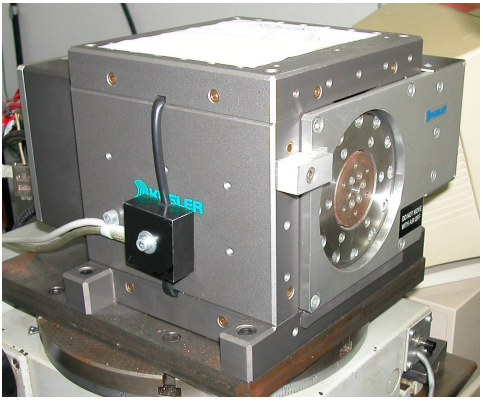
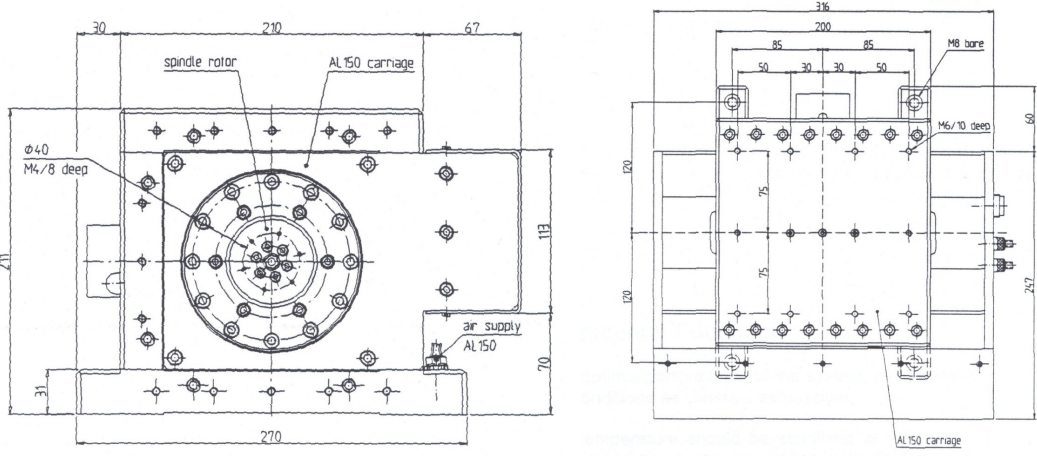
GUIAS CILÍNDRICAS AEROSTÁTICAS		
Nº: 002	Tipo: Módulo de movimento relativo	
Fabricante: LMP		
Localização: Laboratório de Mecânica de Precisão		
Descrição: Par de guias cilíndricas aerostáticas, acionadas por um servomotor CC e um fuso de esferas recirculantes.		
Características estáticas:		Características dinâmicas:
<ul style="list-style-type: none"> - Capacidade de carga de 500 N; - Sistema concebido com alta estabilidade estrutural; - Peso de 40 Kg; 		<ul style="list-style-type: none"> - Baixo amortecimento; - Motor não gera vibrações significativas;
Características cinemáticas:		Características geométricas:
<ul style="list-style-type: none"> - Curso linear total de 300 mm; - Velocidade de 0,5 a 100 mm/min; 		<ul style="list-style-type: none"> - Erro de retilidade na trajetória de 0,5 µm/m; - Erro de posicionamento de 0,01 µm;
Comportamento térmico:		Características de controle:
<ul style="list-style-type: none"> - Motor gera calor, mas em regime estável, sem influenciar o resto do sistema; 		<ul style="list-style-type: none"> - Motor CC Brushless e Frameless; - Malha fechada com Encoder e laser interferométrico; - Possui unidade de controle independente e necessita de um microcomputador para acionamento;
Interfaces:		
<ul style="list-style-type: none"> - O carro da guia possui um plano de montagem para fixação de outros sistemas e os dois blocos das extremidades possuem uma furação apropriada para sua montagem em outros módulos, conforme modelo; 		
Observações:		
<ul style="list-style-type: none"> - Guia transversal do torno de ultraprecisão desenvolvido no LMP por Stoeterau, 1999; 		

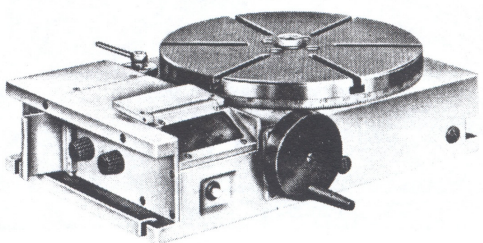
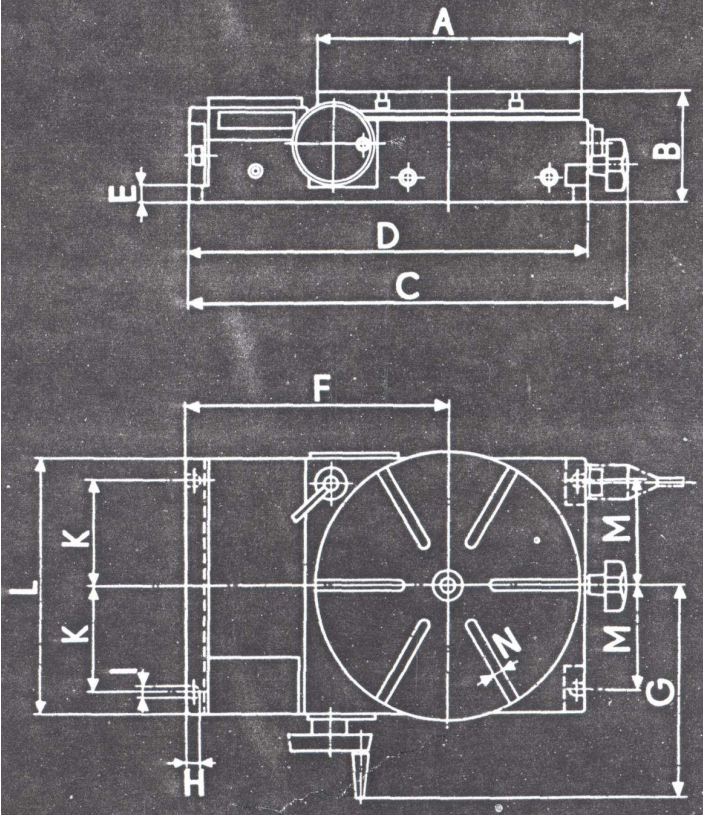
BASE DE GRANITO NATURAL		
Nº: 003	Tipo: Módulo de suporte	
Fabricante: LMP		
Localização: Laboratório de Mecânica de Precisão		
Descrição: Bloco de granito natural bruto acoplado a uma placa de granito preto polido, suspenso em três pontos de apoio;		
Características estáticas:		Características dinâmicas:
<ul style="list-style-type: none"> - Capacidade de carga ilimitada; - Alta estabilidade estrutural; - Massa aproximada de 4 ton; 		<ul style="list-style-type: none"> - Alto amortecimento de vibrações internas e externas pela massa atuando como sistema passivo; - Freqüência natural teórica de 1,3 KHz;
Características cinemáticas:		Características geométricas:
		<ul style="list-style-type: none"> - Dimensões de 1700 x 1200 mm com altura de 700 mm; - Ajuste de nivelamento por apoio em três pontos;
Comportamento térmico:		Características de controle:
<ul style="list-style-type: none"> - Alta estabilidade térmica e sem geração de calor; 		
Interfaces:		
<ul style="list-style-type: none"> - A superfície de montagem é plana e não possui dispositivos de fixação; 		
Observações:		
<ul style="list-style-type: none"> - No LMP há ferramentas de trepanação (ferramentas rotativas tipo “copo” incrustada por partículas de diamante), adequadas para realizar furos no granito para inserção de buchas expansíveis; 		


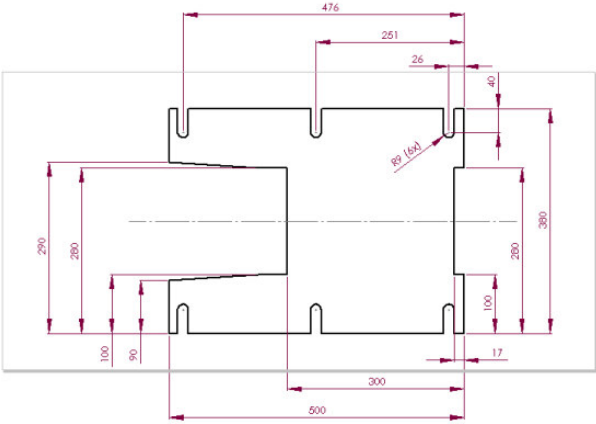
BASE DE CONCRETO COM MESA DE MONTAGEM		
Nº: 004	Tipo: Módulo de suporte	
Fabricante: LMP		
Localização: Laboratório de Mecânica de Precisão		
Descrição: Mesa de montagem em ferro fundido, retificada e com ranhuras de fixação padrão “T”, inserida numa massa de concreto; Equipamento utilizado no LMP para realização de diversos ensaios e calibrações;		
Características estáticas:		Características dinâmicas:
<ul style="list-style-type: none"> - Capacidade de carga ilimitada; - Alta estabilidade estrutural; - Massa aproximada de 3 ton; 		<ul style="list-style-type: none"> - Alto amortecimento de vibrações internas e externas pela massa atuando como sistema passivo;
Características cinemáticas:		Características geométricas:
		<ul style="list-style-type: none"> - Dimensões: 1500 x 620 mm com altura de 870 mm;
Comportamento térmico:		Características de controle:
<ul style="list-style-type: none"> - Alta estabilidade térmica e sem geração de calor; 		
Interfaces:		
<ul style="list-style-type: none"> - A superfície de montagem é plana, retificada e possui ranhuras em “T” como dispositivos de fixação; 		
Observações:		
<ul style="list-style-type: none"> - Equipamento muito utilizado no LMP para realização de ensaios e calibrações em sistemas de medição; - Disponibilidade restrita; 		

GUIA LINEAR PI M-410.DG																						
Nº: 005	Tipo: Módulo de movimento relativo																					
Fabricante: Physik Instrumente																						
Localização: Laboratório de Materiais																						
Descrição: Guia de elementos rolantes, acionada por motor de corrente contínua, montado diretamente num fuso, com alta qualidade de movimento e posicionamento, acompanhada de placa de controle de movimento e software de controle.																						
Características estáticas: - Peso de 2,4 Kg; - Capacidade de carga normal de 200 N; - Força lateral máxima aplicada de 150 N; - Força máxima de tração/compressão na direção do movimento de 50 N;		Características dinâmicas: - Movimento suave, com ausência de Stick / Slip; - Não há geração de vibrações significativas no acionamento;																				
Características cinemáticas: - Curso total de movimento de 100 mm; - Velocidade máxima de 1,5 mm/s; - Passo da rosca de 0,5 mm/ver; - Redução no acionamento de 29,6:1;		Características geométricas: - Incremento mínimo de movimento de 0,1 µm; - Repetitividade unidirecional de 0,2 µm; - Repetitividade bidirecional de 2 µm; - Repetitividade da origem de 1 µm; - Erro de linearidade inferior a 1 µm / 100 mm;																				
Comportamento térmico: - Há geração de calor no motor de acionamento, mas sua montagem impede a propagação deste calor a ponto de interferir no comportamento geométrico do sistema;		Características de controle: - Motor de corrente contínua, alimentado por placa de movimento própria e controlado por software próprio, exigindo o acompanhamento de um microcomputador; - Potência nominal do motor de 3W; - Faixa de tensão do motor de 0 +- 12 V DC;																				
Interfaces:																						
- O módulo possui interfaces definidas de montagem conforme modelo abaixo;																						
 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>L</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>M-405</td> <td>207</td> <td>88,5</td> <td>-</td> <td>73,5</td> </tr> <tr> <td>M-410</td> <td>257</td> <td>83,5</td> <td>-</td> <td>88,5</td> </tr> <tr> <td>M-415</td> <td>307</td> <td>38</td> <td>88,5</td> <td>123,5</td> </tr> </tbody> </table>				L	A	B	C	M-405	207	88,5	-	73,5	M-410	257	83,5	-	88,5	M-415	307	38	88,5	123,5
	L	A	B	C																		
M-405	207	88,5	-	73,5																		
M-410	257	83,5	-	88,5																		
M-415	307	38	88,5	123,5																		
M-405.DG, M-410.DG, M-415.DG, M-405.PD, M-410.PD and M-415.PD dimensions (in mm)																						
Observações:																						
- Módulo montado no esclerômetro, junto ao Laboratório de Materiais;																						


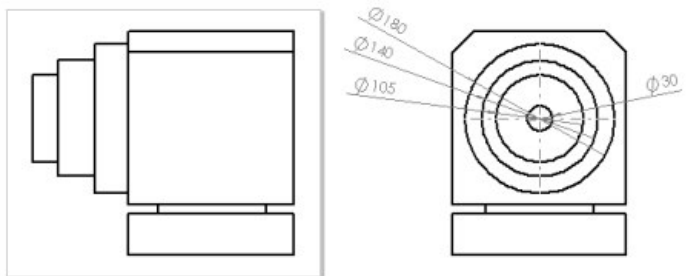
GUIA LINEAR PI M-521.DD		 <p>M-505.4DG low-profile translation stage</p>																																													
Nº: 006	Tipo: Módulo de movimento relativo																																														
Fabricante: Physik Instrumente																																															
Localização: Laboratório de Materiais																																															
Descrição: Guia de elementos rolantes, acionada por motor de corrente contínua, montado diretamente num fuso, com alta qualidade de movimento e posicionamento, acompanhada de placa de controle de movimento e software de controle.																																															
Características estáticas:		Características dinâmicas:																																													
- Peso de 6,1 Kg; - Capacidade de carga normal de 1000 N; - Força lateral máxima aplicada de 200 N; - Força máxima de tração/compressão na direção do movimento de 80 N;		- Movimento suave, com ausência de Stick / Slip; - Não há geração de vibrações significativas no acionamento;																																													
Características cinemáticas:		Características geométricas:																																													
- Curso total de movimento de 204 mm; - Velocidade máxima de 50 mm/s; - Passo do fuso de esferas de 2 mm/ver;		- Incremento mínimo de movimento de 0,1 µm; - Repetitividade unidirecional de 0,1 µm; - Repetitividade da origem de 1 µm; - Erro de linearidade inferior a 1 µm / 100 mm;																																													
Comportamento térmico:		Características de controle:																																													
- Há geração de calor no motor de acionamento, mas sua montagem impede a propagação deste calor a ponto de interferir no comportamento geométrico do sistema;		- Motor de corrente contínua, alimentado por placa de movimento própria e controlado por software próprio, exigindo o acompanhamento de um microcomputador; - Potência nominal do motor de 30W; - Faixa de tensão do motor de 24 V DC;																																													
Interfaces:																																															
- O módulo possui interfaces definidas de montagem conforme modelo abaixo;																																															
																																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>L</th> <th>R</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C1</th> <th>C2</th> <th>C3</th> <th>C4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>M-505.1xx</td> <td>245</td> <td>136</td> <td>125</td> <td>126</td> <td>96</td> <td>-----</td> <td>-----</td> <td>-----</td> </tr> <tr> <td>M-505.2xx</td> <td>270</td> <td>161</td> <td>150</td> <td>138.5</td> <td>96</td> <td>-----</td> <td>-----</td> <td>-----</td> </tr> <tr> <td>M-505.4xx</td> <td>320</td> <td>211</td> <td>200</td> <td>163.5</td> <td>43</td> <td>43</td> <td>-----</td> <td>-----</td> </tr> <tr> <td>M-505.6xx</td> <td>370</td> <td>261</td> <td>250</td> <td>145.5</td> <td>43</td> <td>43</td> <td>43</td> <td>43</td> </tr> </tbody> </table>				L	R	A	B	C1	C2	C3	C4	M-505.1xx	245	136	125	126	96	-----	-----	-----	M-505.2xx	270	161	150	138.5	96	-----	-----	-----	M-505.4xx	320	211	200	163.5	43	43	-----	-----	M-505.6xx	370	261	250	145.5	43	43	43	43
	L	R	A	B	C1	C2	C3	C4																																							
M-505.1xx	245	136	125	126	96	-----	-----	-----																																							
M-505.2xx	270	161	150	138.5	96	-----	-----	-----																																							
M-505.4xx	320	211	200	163.5	43	43	-----	-----																																							
M-505.6xx	370	261	250	145.5	43	43	43	43																																							
<i>M-505 dimensions (in mm)</i>																																															
Observações:																																															
- Módulo montado no esclerômetro, junto ao Laboratório de Materiais;																																															

CABEÇOTE KUGLER	
Nº: 007	Tipo: Módulo de movimento relativo
Fabricante: Kugler Precision	
Localização: Laboratório de Mecânica de Precisão	
Descrição: Cabeçote aerostático com guia linear aerostática, equipado com controle próprio para o mancal rotativo e a guia linear. O controle da guia exige o acompanhamento de um microcomputador .	
	
Características estáticas:	Características dinâmicas:
<ul style="list-style-type: none"> - Peso de 20 Kg; - Capacidade de carga normal de 250 N; - Força lateral máxima aplicada de 20 N; - Força máxima de tração/compressão na direção do movimento de 40 N; 	<ul style="list-style-type: none"> - Movimento suave, com ausência de Stick / Slip; - Há geração de vibrações por martelamento pneumático acima de 4000 RPM; - Baixo amortecimento; - É necessário balanceamento para cada nova peça;
Características cinemáticas:	Características geométricas:
<ul style="list-style-type: none"> - Curso total de movimento linear de 90 mm; - Velocidade de avanço de 6 a 3500 mm/min; - Aceleração máxima de 4 m/s²; - Rotações de 3000 a 8000 RPM; 	<ul style="list-style-type: none"> - Incremento mínimo e resolução linear de 1 µm; - Batimento radial de 0,25 µm; - Batimento axial 0,15 µm; - Erro de linearidade inferior a 0,5 µm / 100 mm;
Comportamento térmico:	Características de controle:
<ul style="list-style-type: none"> - Há geração de calor no motor de acionamento,mas o cabeçote possui um sistema de refrigeração a água que inibe sua atuação; 	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentação de ar limpo (<0,1 µm) e seco; - Mancal rotativo com controlador independente; - Possui módulo de controle da guia linear com necessidade de interface com um microcomputador;
Interfaces:	
<ul style="list-style-type: none"> - O módulo possui interfaces definidas de montagem conforme modelo abaixo; 	
	
Observações:	
<ul style="list-style-type: none"> - Respeitar exigências de alimentação de ar comprimido seco e limpo; - Respeitar exigências de alimentação de água para refrigeração do mancal; - Os módulos de controle de rotação e acionamento da guia linear devem ficar ao lado da máquina montada; 	

MESA DIVISORA ZEISS													
Nº: 008	Tipo: Módulo de movimento relativo												
Fabricante: Carl Zeiss Jena													
Localização: Laboratório de Mecânica de Precisão													
Descrição: Mesa divisora com sistema de posicionamento angular ajustado janela óptica .													
Características estáticas:		Características dinâmicas:											
<ul style="list-style-type: none"> - Peso de 70 Kg; - Capacidade de carga normal de 2000 N; - Força lateral máxima aplicada de 1000 N; 		<ul style="list-style-type: none"> - O sistema pode ser travado na posição de trabalho, aumentando sua rigidez; - Elemento pode fazer parte de um circuito estrutural; 											
Características cinemáticas:		Características geométricas:											
<ul style="list-style-type: none"> - Acionamento manual para posicionamento da mesa angular com liberdade de giro completo; 		<ul style="list-style-type: none"> - Dimensões: 515 X 315 X 130 mm; - Posicionamento angular na ordem de 1° 1'1"; 											
Comportamento térmico:		Características de controle:											
<ul style="list-style-type: none"> - Para o posicionamento angular, é acionada uma lâmpada para permitir a leitura no sistema óptico. Essa lâmpada não aquece a ponto de influenciar; 		<ul style="list-style-type: none"> - O sistema de medição óptico necessita de energia para acionar uma lâmpada de 12 V DC que permite a leitura; - Acionamento manual; 											
Interfaces:													
<ul style="list-style-type: none"> - O módulo possui interfaces definidas de montagem conforme modelo abaixo; 													
													
Dimensiones (en mm)													
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M	N
Platina optodivisora de círculos 315	∅ 315	130	515	476	18	310	255	16	10	126	300	126	10
Observações:													
<ul style="list-style-type: none"> - Essa mesa é um acessório de fresadora; 													

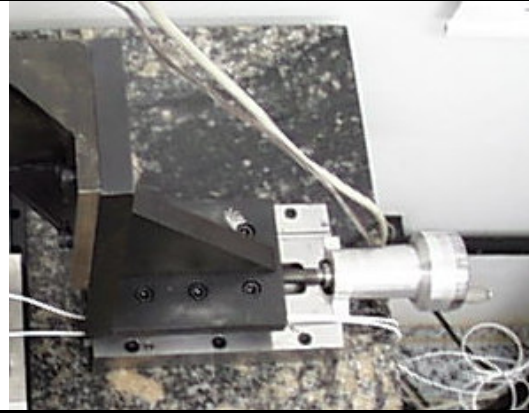
CABEÇOTE EXCELL-O	
Nº: 009	Tipo: Módulo de movimento relativo
Fabricante: Excell-o	
Localização: Laboratório de Mecânica de Precisão	
Descrição: Cabeçote aerostático original do torno Moore, com 350 mm de diâmetro, acionado por um motor de corrente contínua e correias;	
	
Características estáticas:	Características dinâmicas:
<ul style="list-style-type: none"> - Capacidade de carga estimada de 200N; - Alta estabilidade estrutural; - Massa aproximada de 300 Kg; 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto amortecimento; - Deve ser balanceado quando utilizado com peças grandes; - Alta suavidade de movimento;
Características cinemáticas:	Características geométricas:
<ul style="list-style-type: none"> - Rotações até 2000 RPM; - Mancal acionado através de correia plana; 	<ul style="list-style-type: none"> - Dimensões conforme modelo; - Precisão de giro abaixo de 1 µm;
Comportamento térmico:	Características de controle:
<ul style="list-style-type: none"> - Alta estabilidade térmica e sem geração de calor; 	<ul style="list-style-type: none"> - Motor de corrente contínua de grande porte com variador de rotação; - Sistema de freio a disco; - Pressão de alimentação de ar seco e limpo a 5 Bar;
Interfaces:	
<ul style="list-style-type: none"> - A superfície de montagem inferior é plana, com quatro pontos de fixação; - Possui uma placa de vácuo que pode ser substituída por outro sistema de fixação; - Dimensões das interfaces de acordo com o modelo em CAD; 	
	
Observações:	
<ul style="list-style-type: none"> - O sistema de freio do mancal necessita manutenção para poder ser empregado; - O mancal possui dimensões muito grandes, dificultando o seu manuseio; 	

MESA AEROSTÁTICA DE POSICIONAMENTO ANGULAR	
Nº: 010	Tipo: Módulo de movimento relativo
Fabricante: LMP	
Localização: Laboratório de Mecânica de Precisão	
Descrição: Mancal aerostático esférico-plano com acionamento por motor de torque, equipado com encoder para posicionamento angular de precisão;	
	
Características estáticas:	Características dinâmicas:
- Capacidade de carga axial de 1200N; - Rigidez axial de 180 N/μm; - Massa aproximada de 10 Kg;	- Baixo amortecimento; - Alta suavidade de movimento;
Características cinemáticas:	Características geométricas:
- Rotações até 2000 RPM; - Mancal acionado diretamente pelo motor de torque; - Possui um sistema de inclinação de precisão com parafuso diferencial;	- Erro de batimento de 0,2 μm; - Incerteza de posicionamento angular de +- 0,2" até 10 RPM;
Comportamento térmico:	Características de controle:
- Alta estabilidade térmica e sem geração de calor;	- Motor CC Brushless e Frameless; - Malha fechada com Encoder; - Possui unidade de controle independente e necessita de um microcomputador para acionamento; Alimentação requerida de ar seco e limpo a 6 Bar;
Interfaces:	
- A superfície de montagem inferior é plana, com quatro pontos de fixação; - Possui uma placa com duas ranhuras "T" cruzadas;	
Observações:	
- O mancal rotativo aerostático possui múltiplas aplicações; - O mancal foi desenvolvido com mesa de retificação aerostática (Pereira, 1998);	

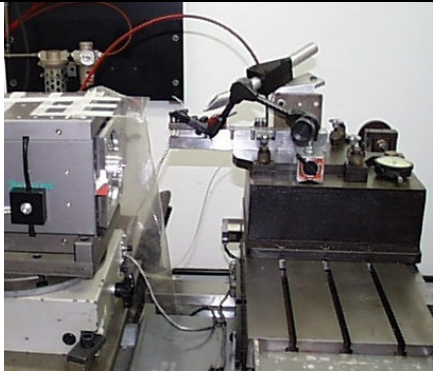
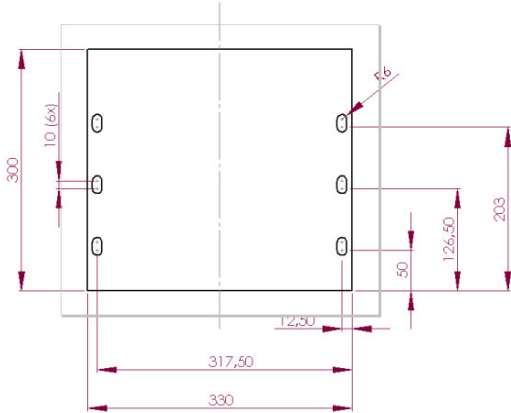
CABEÇOTE PROFESSIONAL INSTRUMENTS		
Nº: 011	Tipo: Módulo de movimento relativo	
Fabricante: Professional Instruments		
Localização: Laboratório de Mecânica de Precisão		
Descrição: Cabeçote aerostático do tipo “YATES”, fabricado pela Professional Instruments com 100 mm de diâmetro;		
Características estáticas:		Características dinâmicas:
<ul style="list-style-type: none"> - Capacidade de carga axial de 900N; - Capacidade de carga radial de 220N; - Alta estabilidade estrutural; - Massa aproximada de 8 Kg; 		<ul style="list-style-type: none"> - Deve ser balanceado quando substituir as peças de trabalho; - Alta suavidade de movimento;
Características cinemáticas:		Características geométricas:
<ul style="list-style-type: none"> - Rotações até 10000 RPM; 		<ul style="list-style-type: none"> - Dimensões conforme modelo; - Precisão de giro abaixo de 0,025 µm;
Comportamento térmico:		Características de controle:
<ul style="list-style-type: none"> - Alta estabilidade térmica e sem geração de calor; 		<ul style="list-style-type: none"> - Não é acionado, necessitando de um motor adequado; - Alimentação de ar comprimido seco e limpo a 5 Bar;
Interfaces:		
<ul style="list-style-type: none"> - Dimensões das interfaces de acordo com o modelo em CAD; 		
		
Observações:		
<ul style="list-style-type: none"> - O mancal pode ser acionado por um motor CC sem contato da empresa Pacific Scientific RH 24, existente no LMP. Este motor possui algumas limitações de controle e velocidade; 		

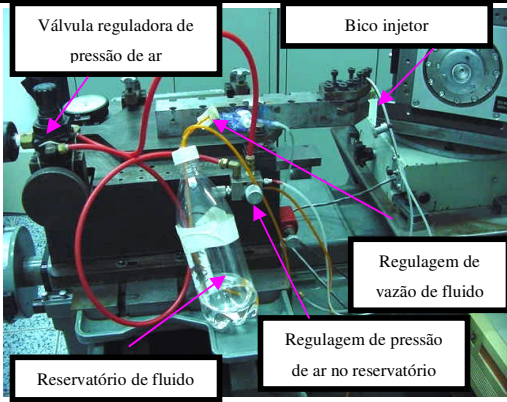
CABEÇOTE AEROSTÁTICO LMP 01	
Nº: 012	Tipo: Módulo de movimento relativo
Fabricante: LMP	
Localização: Laboratório de Mecânica de Precisão	
Descrição: Cabeçote aerostático esférico-plano fabricado no LMP, com 100 mm de diâmetro;	
	
Características estáticas:	Características dinâmicas:
- Capacidade de carga axial de 900N; - Rigidez axial de 100N/μm; - Alta estabilidade estrutural; - Massa aproximada de 10 Kg;	- Deve ser balanceado quando substituir as peças de trabalho; - Alta suavidade de movimento;
Características cinemáticas:	Características geométricas:
- Rotações até 5000 RPM;	- Dimensões conforme modelo; - Precisão de giro abaixo de 0,5 μm;
Comportamento térmico:	Características de controle:
- Alta estabilidade térmica e sem geração de calor;	- Não é acionado, necessitando de um motor adequado; - Alimentação de ar comprimido seco e limpo a 5 Bar;
Interfaces:	
- Dimensões das interfaces de acordo com o modelo em CAD;	
	
Observações:	
- O mancal pode ser acionado por um motor CC sem contato da empresa Pacific Scientific RH 24, existente no LMP. Este motor possui algumas limitações de controle e velocidade;	

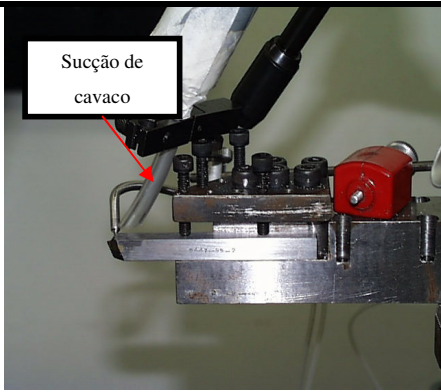
GUIA DE ESCORREGAMENTO MANUAL	
Nº: 013	Tipo: Módulo de movimento relativo
Fabricante: LMP	
Localização: Laboratório de Materiais	
Descrição: Guia de escorregamento em forma de “rabo de andorinha” com acionamento manual através de manopla.;	
Características estáticas:	Características dinâmicas:
- Capacidade de carga axial de 300N; - Alta estabilidade estrutural; - Massa aproximada de 6 Kg;	
Características cinemáticas:	Características geométricas:
- Curso de 100 mm;	- Passo de 1 mm/rotação; - Erro de retilidade de 0,01 mm/m;
Comportamento térmico:	Características de controle:
- Alta estabilidade térmica e sem geração de calor;	- Acionamento manual;
Interfaces:	
- Dimensões das interfaces de acordo com o modelo em CAD;	
	
Observações:	
- Guia manual de posicionamento grosseiro montada no esclerômetro;	

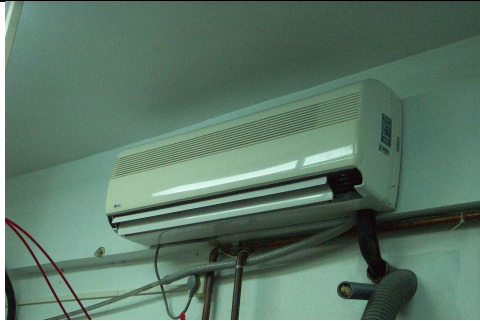


MESA DE GRANITO		
Nº: 014	Tipo: Módulo de suporte	
Fabricante: LMP		
Localização: Laboratório de Materiais		
Descrição: Mesa de granito plano lapidado montada sobre uma estrutura de aço;		
Características estáticas:		Características dinâmicas:
- Capacidade de carga axial de 2000N; - Alta estabilidade estrutural; - Massa aproximada de 80 Kg;		- Alto amortecimento de vibrações internas e externas pela massa atuando como sistema passivo; - Apoiada sobre “vibra-stop”;
Características cinemáticas:		Características geométricas:
		- Dimensões de 1000 x 500 mm com altura de 100 mm;
Comportamento térmico:		Características de controle:
- Alta estabilidade térmica e sem geração de calor;		
Interfaces:		
- A superfície de montagem é plana e não possui dispositivos de fixação;		
		
Observações:		
- Mesa de granito sobre a qual está montado o esclerômetro; - No LMP há ferramentas de trepanação (ferramentas rotativas tipo “copo” incrustada por partículas de diamante), adequadas para realizar furos no granito para inserção de buchas expansíveis;		

PORTA-FERRAMENTAS MOORE	
Nº: 015	Tipo: Módulo de suporte
Fabricante: Moore Tools	
Localização: Laboratório de Mecânica de Precisão	
Descrição: Porta-ferramentas para usinagem de ultraprecisão com ajuste de ângulo de incidência da ferramenta na peça usinada;	
	
Características estáticas:	Características dinâmicas:
- Capacidade de carga ilimitada; - Alta estabilidade estrutural; - Massa aproximada de 80 Kg;	- Alto amortecimento de vibrações internas e externas pela massa atuando como sistema passivo;
Características cinemáticas:	Características geométricas:
- Permite ajuste no ângulo de contato da ferramenta de corte na peça que está sendo faceada;	- Ajuste da altura da ferramenta de corte através do apoio sobre blocos-padrão;
Comportamento térmico:	Características de controle:
- Alta estabilidade térmica e sem geração de calor;	
Interfaces:	
- A superfície de montagem é plana e possui seis orifício para parafusos M4 como dispositivos de fixação, conforme modelo abaixo;	
	
Observações:	
- Sistema original do Torno Moore, com montagem compatível com o mesmo;	

SISTEMA DE INJEÇÃO DE FLUIDO DE CORTE	
Nº: 016	Tipo: Módulo de função complementar
Fabricante: LMP	
Localização: Laboratório de Mecânica de Precisão	
Descrição: Sistema de injeção de fluido de corte pelo princípio de Bernoulli, com reservatório de fluido e esquema pneumático integrado;	
	
Características estáticas:	Características dinâmicas:
- Bico injetor posicionado por dispositivo magnético; - capacidade de 0,6 l no reservatório;	- O posicionamento incorreto do bico injetor provoca perturbações no processo de usinagem;
Características cinemáticas:	Características geométricas:
Comportamento térmico:	Características de controle:
- sem geração de calor;	- Necessita alimentação de ar comprimido a 4 Bar; - Ajuste da vazão de ar + fluido de corte;
Interfaces:	
- Sistema é posicionado sobre a máquina, sem necessidade de fixação específica; - O bico injetor é posicionado com auxílio de uma base magnética;	
Observações:	
- Sistema utilizável em qualquer máquina;	

SISTEMA DE RETIRADA DE CAVACOS DA REGIÃO DE CORTE	
Nº: 017	Tipo: Módulo de função complementar
Fabricante: LMP	
Localização: Laboratório de Mecânica de Precisão	
Descrição: Sistema de aspiração de cavacos composto por um aspirador de pó doméstico e tubos de menor diâmetro para sucção;	
	
Características estáticas:	Características dinâmicas:
- Tubeira de sucção posicionada por dispositivo magnético; - pressão de sucção de 120 mbar de vácuo;	- O posicionamento incorreto do tubo de sucção provoca perturbações no processo de usinagem; - Aspirador de pó com alto nível de ruído sonoro;
Características cinemáticas:	Características geométricas:
Comportamento térmico:	Características de controle:
- sem geração de calor;	- Pressão de sucção constante;
Interfaces:	
- Sistema é posicionado sobre a máquina, sem necessidade de fixação específica; - O tubo de sucção é posicionado com auxílio de uma base magnética;	
Observações:	
- Sistema utilizável em qualquer máquina;	

SISTEMA DE CONTROLE DO AMBIENTE	
Nº: 018	Tipo: Módulo de função complementar
Fabricante: Gree GSW 1222L	
Localização: Laboratório de Mecânica de Precisão	
Descrição: Sistema de ar condicionado para estabilizar a temperatura e a umidade da sala;	
	
Características estáticas:	Características dinâmicas:
- Capacidade refrigeração de 12000 BTU/h;	- O funcionamento do aparelho não influencia no processo de usinagem;
Características cinemáticas:	Características geométricas:
Comportamento térmico:	Características de controle:
- Mantém a temperatura na ordem de 20° +- 1° e umidade em torno de 60% +- 5%;	- É possível ajustar a temperatura da sala;
Interfaces:	
- Sistema montado na parede da sala;	
Observações:	
- Sistema utilizável em qualquer máquina;	