

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

MÉTODOS PARA PROJETO DE PROTÓTIPOS:
UM ESTUDO DE CASO

FREDERICO ALLEVATO RAMALHO FILHO

Belo Horizonte, 2 de março de 2007

Frederico Allevato Ramalho Filho

**MÉTODOS PARA PROJETO DE PROTÓTIPOS:
UM ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada para a conclusão do
mestrado em Engenharia Mecânica pela
Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2007



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

**Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica**

Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha – Cep 31270-901

Belo Horizonte – MG

Tel.: +55 31 3499 5140 – Fax.: +55 31 3443-3783

www.demec.ufmg.br

**ESTUDO DE MÉTODOS PARA PROJETO DE
PROTÓTIPOS:
UM ESTUDO DE CASO**

FREDERICO ALLEVATO RAMALHO FILHO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como um dos pré-requisitos para a obtenção do título de “**Mestre em Engenharia Mecânica**” na área de concentração de “**Projeto Mecânico**”.

Aprovada em 2 de março de 2007

Por:

Alexandre Queiroz Bracarense

Orientador – Ph.D – Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG

Eduardo Romeiro Filho

Avaliador – Dr.- Departamento de Engenharia de Produção, UFMG

Eduardo José Lima II

Avaliador – Dr. – Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG

AGRADECIMENTOS

Ao grupo BajaSAE - UFMG

Ao Professor Alexandre Bracarense

Ao Professor Eduardo Romeiro

Ao Professor Eduardo Lima II

A LRSS

A Rotech

A minha família, de quem tenho apoio incondicional.

Meus sinceros agradecimentos.

“La perfection est atteinte, non pas lorsqu’il a plus rien à jouter, mais lorsqu’il n’y a plus rien à retirer.”

“A perfeição é alcançada, não quando nada mais há a adicionar, mas quando não há nada mais a retirar.”

Antoine de Saint-Exupéry [48]

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	11
RESUMO	12
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVO E JUSTIFICATIVA	16
2.1 Objetivo	16
2.2 Justificativa	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Seleção do material	18
3.1.1 Resistência mecânica	19
3.1.2 Tenacidade	20
3.1.3 Rigidez	21
3.1.4 Resistência à fadiga	22
3.1.5 Creep e resistência à temperatura	23
3.1.6 Resistência à corrosão	24
3.1.7 Resistência ao desgaste superficial	24
3.2 Métodos de produção	25
3.2.1 Processos de fluxo	27
3.2.1.1 Fundição de metais	27
3.2.1.2 Conformação mecânica dos metais e ligas	29
3.2.1.3 Processamento dos polímeros	32
3.2.1.4 Metalurgia do pó	33
3.2.2 Processos de usinagem	35
3.2.3 Processos de fabricação por união	36
3.2.3.1 Junções mecânicas reversíveis	37
3.2.3.2 Junções mecânicas irreversíveis e interferência	38
3.2.3.3 Junções químicas	39
3.2.3.4 Soldagem	40
3.2.3.5 Brazagem e solda fraca	42

3.2.3.6 União por difusão	43
3.2.4 Processamento rápido	44
3.2.4.1 Stereolitografia	45
3.2.4.2 Sinterização seletiva a LASER	46
3.2.4.3 Modelamento por deposição de fundido	46
3.2.4.4 Manufatura de objetos em lâminas	47
3.2.4.5 Impressão tridimensional	48
3.3 Ferramentas de projeto	49
3.3.1 Ferramentas metodológicas	50
3.3.1.1 Design para a montagem	50
3.3.1.2 Design para a manufatura	53
3.3.2 Projeto assistido por computador	54
3.3.3 Metodologia para produtos de inovação	55
3.3.4 Convergência de soluções	56
3.4 Protótipos	57
4 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO	64
4.1 Estudo de caso A - Sistema de soldagem orbital	64
4.2 Estudo de caso B – Scanner Ultra-sônico	66
5 RESULTADOS	69
5.1 Resultados do estudo de caso A – Soldagem Orbital	69
5.1.1 Seleção de material	70
5.1.2 Seleção do processo	71
5.1.3 Design para a montagem	72
5.1.4 Design para a manufatura	74
5.1.5 Prototipagem	76
5.1.6 Análise dos resultados do estudo de caso A	77
5.2 – Resultados do estudo de caso B – Inspeção Orbital	79
5.2.1 Prototipagem	80
5.2.2 Testes preliminares	81
5.2.3 Análise dos resultados do estudo de caso B	82
6 CONCLUSÕES	87
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
APÊNDICE A	90

APÊNDICE B	91
APÊNDICE C	93
APÊNDICE D	95
APÊNDICE E	97
APÊNDICE F	98
APÊNDICE G	99
APÊNDICE H	100

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1: Triângulo do desenvolvimento do produto	17
FIGURA 3.2: Teste de resistência estática e corpo de prova.	19
FIGURA 3.3: Teste Charpy e Izod (direita) e gráfico típico da transição dútil-frágil (esquerda).	21
FIGURA 3.4: Variação da inércia para uma mesma área (esquerda); Gráfico tensão-deformação para materiais diferentes (centro); Instabilidade elástica de uma viga submetida a compressão (direita).	22
FIGURA 3.5: Fadiga por torção cíclica (esq.); Fadiga flexão cíclica (centro); fadiga térmica (dir.).	23
FIGURA 3.6: Corrosão em Alumínio em ambiente salino (Esquerda); Corrosão em peça estampada de cobre com tensões residuais (direita).	24
FIGURA 3.7: Esfoliação (esq.), lascamento (centro) e trincas induzidas por desgaste (direita).	25
FIGURA 3.8: Fundição de um sino de cobre.	28
FIGURA 3.9: Laminação (a), forjamento (b), extrusão (c) e trefilamento (d).	30
FIGURA 3.10: Dobramento (a), estampagem (b) e cisalhamento (c).	30
FIGURA 3.11: Uso de múltiplas peças estampada e soldadas para a formação de uma estrutura.	31
FIGURA 3.12: Plástico reforçado com flocos de sílica (esquerda) e com fibras de carbono (direita).	32
FIGURA 3.13: Viabilidade dos processos de compósitos para prototipagem [2].	32
FIGURA 3.14: Construção de barco em molde aberto(esq.) e “filament winding” de bocal (dir.).	33
FIGURA 3.15: Micro-peça sinterizada (dir.), e o pó antes (centro) e depois da sinterização (esq.).	34
FIGURA 3.16: Fresamento de um bloco de motor (direita)e torneamento de um eixo (esquerda).	35
FIGURA 3.17: Corte térmico por oxi-chama (esq.), plasma (centro) e LASER (dir.).	36
FIGURA 3.18: Corte com jato de água (esquerda) e por eletro-erosão a fio	36

(direita).	38
FIGURA 3.19: Da esquerda para a direita; Parafuso, anel trava, trava elástica e parafuso rebite.	
FIGURA 3.20: Veiculo-protótipo rebitado (esquerda) e montagem com interferência (direita).	38
FIGURA 3.21: Colagem de painéis metálicos da asa.	39
FIGURA 3.22: Soldagem GMAW.	41
FIGURA 3.23: Soldagem GTAW.	41
FIGURA 3.24: Brazagem de uma junta (esquerda) e Solda fraca de componentes eletrônicos (direita).	42
FIGURA 3.25: Juntas para brazagem (esquerda) e juntas para solda fraca (direita).	43
FIGURA 3.26: Testes de torção e dobramento de espécimes unidos por difusão.	43
FIGURA 3.27: Estereolitografia com resina fotossensível e LASER.	45
FIGURA 3.28: Sinterização seletiva a LASER.	46
FIGURA 3.29: Modelamento por deposição de material fundido.	47
FIGURA 3.30: Manufatura de peças em laminas de papel.	48
FIGURA 3.31: Impressão tridimensional com resina (esq.) e com adição de pó (dir.).	48
FIGURA 3.32: Montagem do motor antes da aplicação do DFMA.	51
FIGURA 3.33: Montagem do motor depois da aplicação do DFMA.	52
FIGURA 3.34: Design para a manufatura.	54
FIGURA 3.35: Tipos de protótipos.	58
FIGURA 3.36: Tipos de protótipos.	58
FIGURA 3.37: Equipamento para teste do protótipo físico – local.	59
FIGURA 3.38: Posicionamento da robótica no mercado.	60
FIGURA 3.39: Cadeia do desenvolvimento do produto.	61
FIGURA 4.1: Graus de liberdade da soldagem.	64
FIGURA 4.2: Soldagem manual de dutos.	65
FIGURA 4.3: Inspeção manual e automática de dutos já existentes no mercado.	66
FIGURA 4.4: Graus de liberdade da inspeção ultra-sônica	67
FIGURA 5.1: Projeto piloto.	69
FIGURA 5.2: Módulo manipulador da tocha.	73
FIGURA 5.3: Estrutura antiga (direita) e a estrutura nova (esquerda).	73

FIGURA 5.4: Engrenamento para o movimento angular antigo (esquerda) e o novo (direita).	74
FIGURA 5.5: Sistemas de acoplamento da tocha de solda	75
FIGURA 5.6: Sistemas de fixação da tocha.	76
FIGURA 5.7: Robô de solda em sua segunda versão.	76
FIGURA 5.8: Peças cortadas a LASER e versão mais recente do protótipo.	77
FIGURA 5.9: Teste em campo do sistema orbital de soldagem.	77
FIGURA 5.10: Árvore hierárquica do projeto piloto.	78
FIGURA 5.11: Árvore hierárquica da segunda versão.	78
FIGURA 5.12: Sistema de movimentação de quatro eixos e sistema completo.	80
FIGURA 5.13: Prototipagem da plataforma orbital de ultra-som.	80
FIGURA 5.14: Testes preliminares da plataforma orbital de ultra-som.	81
FIGURA 5.14: Primeira versão.	82
FIGURA 5.15: Segunda versão.	82
FIGURA 5.16: Terceira versão.	83
FIGURA 5.17: Quarta versão.	83
FIGURA 5.18: Quinta versão.	83
FIGURA 5.19: Sexta versão.	84
FIGURA 5.20: Sétima versão.	85
FIGURA 5.21: Oitava versão.	86
FIGURA 5.22: Nona versão.	78
FIGURA 5.23: Versão final.	79
FIGURA A1: Resistência versus tenacidade	90
FIGURA A2: Resistência versus densidade	90
FIGURA A3: Resistência versus deformação.	90
FIGURA A4: Resistência versus custo.	90
FIGURA A5: Resistência versus temperatura.	90
FIGURA A6: Rigidez versus densidade.	90
FIGURA H1: “Nesting” da chapa de 3mm.	101
FIGURA H2: “Nesting” da chapa de 5mm.	102

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

3DP	Tridimensional Printing	Impressão tridimensional
BMC	Bulk Moulding Compound	Modelamento de compósito maciço
BOM	Bill of Materials	Lista de Materiais
CAD	Computer Aided Drawing	Desenho assistido por computador
CAM	Computer Aided Manufacturing	Manufatura assistida por computador
CAE	Computer Aided Engineering	Engenharia assistida por computador
DFA	Design for Assembly	Projeto para a Montagem
DFM	Design for Manufacturing	Projeto para a Manufatura
DFX	Design for X	Projeto para X
FDM	Fused Deposition Modelling	Modelamento por deposição de fundido
GMAW	Gas Metal Arc Welding	Soldagem a arco elétrico com gás ativo ou inerte
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding	Soldagem a arco elétrico com eletrodo de tungstênio
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation	Luz Amplificada pela Emissão Estimulada de Radiação
LOM	Laminated Object Manufacturing	Modelamento do objeto em lâminas
RM	Rapid Manufacturing	Manufatura Rápida
RP	Rapid Prototyping	Prototipagem Rápida
RT	Rapid Tooling	Ferramental Rápido
RTM	Resin Transfer Moulding	Modelamento por transferência de resina
SLA	Stereolithography	Estereolitografia
SLS	Selective LASER Sintering	Sinterização seletiva a LASER
SMC	Sheet Moulding Compound	Modelamento de compósito em lâminas
SMAW	Shielded Metal Arc Welding	Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido

RESUMO

Esse trabalho demonstra como um conjunto de métodos pode influenciar o resultado do projeto. O uso dessas ferramentas em protótipos ainda é pequeno, assim como a sua aplicação no campo da robótica, sendo ambos explorados neste trabalho. Neste estudo de caso, o uso de ferramentas de otimização da montagem e da fabricação (DFMA), assim como o modelamento de objetos em lâminas (LOM) em um contexto de manufatura rápida (RM), resultou em melhorias significativas na qualidade, no dimensionamento, no empacotamento e no custo do protótipo.

Palavras Chaves: DFX, DFMA, RM, LOM, LASER, protótipo, robótica.

ABSTRACT

This monograph demonstrates how a set of methodologies can modify the design. Using these tools on prototypes and robotics has not been totally explored, and the research of the impact of both fields on the design is the subject of this study. In these case studies, the use of manufacturing and assembly optimization tools (DFMA), along with laminate object modeling (LOM) in the rapid manufacturing (RM) context, resulted in better quality, packaging, lower price and faster manufacturing.

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a busca por maior eficiência e confiabilidade nos resultados leva à busca constante de novos meios que garantam isso. Porém, depois de diversos sistemas de organização e otimização da produção, da administração, da relação interpessoal e da logística, é necessário aperfeiçoar o processo projetual.

Porém, o processo projetual, que é determinado pela criatividade e talento de seus projetistas fica completamente a cargo dos mesmos, isolando-se de outros departamentos e formando uma “ilha”, uma “caixa preta” de onde se conhece apenas o que entra e sai.

A tentativa de se compreender o processo projetual sempre encontra dificuldades na fase criativa. A geração de alternativas é sempre considerada uma das fases mais “misteriosas”, e as várias técnicas demonstradas para a criação de soluções sempre demonstram ser muito simplistas comparadas às técnicas elaboradas para outras fases de projeto. [1]

Foi desenvolvido por diversos grupos simultaneamente a partir de 1970, técnicas que permitiriam uma maior racionalização do processo projetual, e que incorporavam as necessidades básicas da variável produtiva que se desejava aprimorar, em especial a manufatura e a montagem.

Essas técnicas trouxeram um grande salto de qualidade à produção, pois integravam de forma simples e intuitiva o departamento de projeto aos outros, mesmo que de maneira pontual e limitada aos departamentos a serem melhorados, e a produtos pré-existentes, não trazendo ganhos para a indústria de inovação.

Esse problema em parte se deve ao fato dessas metodologias serem baseadas na análise do problema, e a criação é um processo focado na solução. Porém, existem características comuns a todos os processos de desenvolvimento, e essas semelhanças podem ser exploradas para criar uma metodologia que seja ampla o suficiente para se

adaptar a qualquer trabalho, e que mesmo assim seja útil ao projeto. Ainda assim, a qualidade do projeto e a velocidade com que ele será realizado ainda dependerá do talento dos projetistas, mas irá existir bases para avaliar o desempenho.

Apesar das metodologias existentes não serem completamente compatíveis com o processo de criação, a análise projetual pela mesma ótica pode trazer ganhos significativos, sem que isso acarrete em maior tempo gasto em estudos, e isso pode ser alcançado através da utilização de métodos menos formais.

Todos os projetos estão presos ao triângulo geometria – material – processamento. Não é possível mudar um sem afetar aos outros, e como o processo de geração de soluções ocorre cada vez mais rápido com o auxílio das ferramentas computacionais, é necessário que exista um método para auxiliar no processo de decisão. Esse trabalho dá ênfase ao inter-relacionamento entre as diferentes áreas do processo, e tenta mostrar de maneira global a influência de cada uma dessas variáveis nos estudos de caso apresentados, e como o método influencia no mecanismo de tomada de decisão.

No capítulo 2 serão apresentados os objetivos e a justificativa desse trabalho.

No capítulo 3 é feita uma revisão bibliográfica com os principais conceitos de seleção de material, processos de manufatura, prototipagem e ferramentas metodológicas para o projeto do produto.

No capítulo 4 são mostrados os estudos de caso.

No capítulo 5 são apresentados os resultados.

No capítulo 6 se encontra a conclusão do efeito dessas ferramentas de projeto nos estudos de caso.

Nos anexos estão detalhes adicionais para a bibliografia e para os resultados.

2 OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

2.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é mostrar que o uso de metodologias de projeto do produto levam a melhorias significativas no desenvolvimento de produtos para automação. Entre os benefícios se destacam a simplificação do projeto, a manufatura rápida e a redução de custos.

Este trabalho também visa exemplificar o processo de criação, fazendo uma revisão da cadeia lógica de desenvolvimento do produto.

2.2 Justificativa

No campo do desenvolvimento, o custo da prototipagem é considerado muito alto, desestimulando a inovação. A robótica é um campo em meio a grande desenvolvimento, onde a inovação é a essência desse campo. As reduções de custos no projeto e na prototipagem desempenham um papel chave para o desenvolvimento da indústria robótica, pois facilita a experimentação e acelera o desenvolvimento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O projeto de um novo produto percorre diversas fases durante a criação. Estas fases, muitas vezes tratadas de maneiras distintas, estão fortemente interligadas e uma mudança afeta diretamente toda a cadeia lógica.

Uma forma simplificada de exemplificar isto pode ser visto na FIG 3.1, no triângulo do desenvolvimento do produto, que mostra como a geometria de um projeto é fruto da escolha do material e do processo. Isso significa que para cada combinação de processo e material existe uma geometria ótima, e não se pode alterar um desses sem que também se altere qual será a geometria ideal.

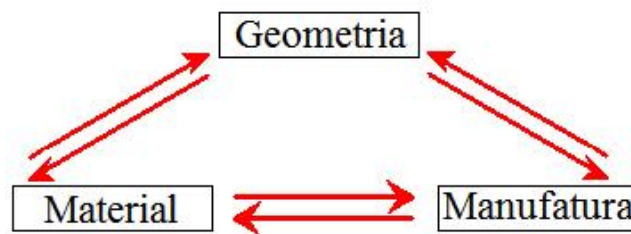


FIGURA 3.1: Triângulo do desenvolvimento do produto.

Na análise preliminar do projeto são determinadas as características mais desejadas, e através das ferramentas de seleção do material, determinam-se quais os materiais mais adequados para o projeto. A seleção de material é feita para que se possam eliminar os processos de manufatura incompatíveis com as características desejadas da peça.

A escolha do processo de manufatura depende principalmente de três fatores: material, geometria e escala. A geometria pode e deve ser otimizada para o processo de manufatura escolhido, de forma a extrair o máximo de valor do beneficiamento. Por isso, um estudo das boas práticas de engenharia relacionada a diversas formas de manufatura é essencial para viabilidade do projeto.

A escala é um problema importante, principalmente para protótipos, impedindo o uso de qualquer processo de manufatura de alto custo fixo, e restringindo a escolha do material às ligas comerciais. Sendo assim, a prototipagem necessita de uma abordagem diferenciada para que os custos se mantenham viáveis.

A utilização de uma seleção de material, de boas práticas de engenharia em manufatura e uma abordagem diferenciada não é o bastante, pois age localmente, componente a componente. Para isso, é necessário o uso de ferramentas metodológicas para gerar e selecionar as melhores soluções de forma ordenada, eficaz e global, de forma que se obtenha o que é melhor para o conjunto, e não para o componente.

Todas essas ferramentas juntas, revisadas neste capítulo, são essenciais para que se alcancem os objetivos previstos: menor custo, menor tempo de projeto, maior simplicidade e menos erros.

3.1 Seleção do material

As características normalmente consideradas na seleção de um material para uma dada aplicação podem ser resumidas nas categorias de comportamento mecânico, propriedades químicas, propriedades físicas e a capacidade de processamento do material [2].

As considerações em termos de comportamento mecânico incluem a tensão de escoamento, a tensão última, porcentagem de alongamento, estrição percentual, dureza, ductilidade, rigidez e resistência à fadiga e a abrasão. Estabilidade mecânica inclui ainda fluência, perda de ductilidade na temperatura de transição dútil-frágil e estabilidade dimensional [2].

As propriedades químicas incluem a corrosão, oxidação e resistência a produtos químicos. A propriedade física mais importante é a densidade, porém características elétricas, magnéticas, térmicas e óticas devem ser levadas em consideração quando aplicáveis. A capacidade de processamento vai ser sempre mensurada em relação ao processo, como a soldabilidade, conformabilidade, fundibilidade e usinabilidade. A capacidade do material

de atingir uma qualidade superficial e resistência ao risco também são incluídas nessa categoria [2].

Para o projeto, é necessário se cruzar as características especiais necessárias, por exemplo, resistência à corrosão ou índice ótico, com as propriedades mecânicas necessárias. Para isso, existem softwares de seleção de material como o “Cambridge Material Selector” [3].

3.1.1 Resistência mecânica

A resistência estática pode ser definida como a capacidade de resistir a uma carga estática de curto prazo em temperaturas moderadas [4]. Essa resistência normalmente é medida em termos de tensão de escoamento e tensão última, com corpos de prova tracionados por máquinas como a mostrada na FIG 3.2, além de resistência à compressão e dureza.

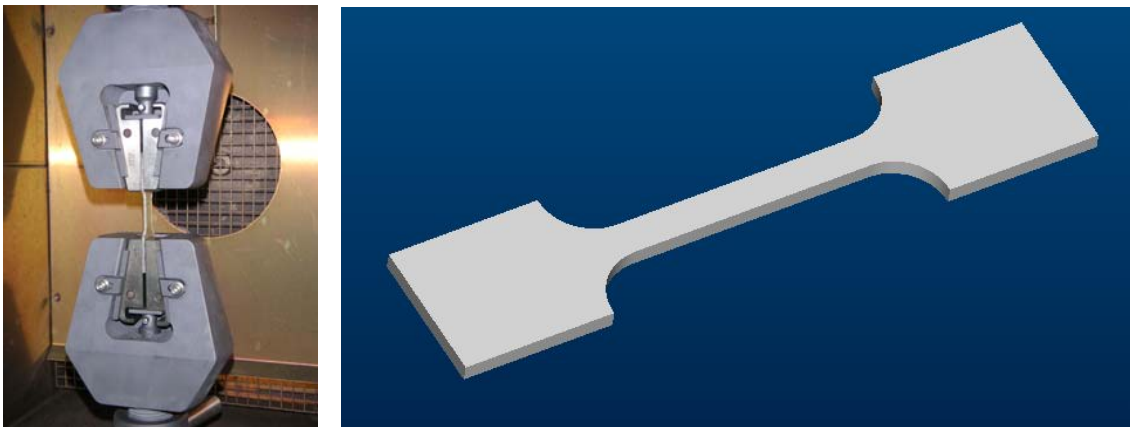


FIGURA 3.2: Teste de resistência estática e corpo de prova [5].

Apesar da maioria dos materiais serem quase isotrópicos, alguns são anisotrópicos, sendo necessário fornecer sua resistência em relação à direção do carregamento, a natureza do material e seu processamento. A anisotropia pode ser decorrente do processamento do material, como a deformação repetida na mesma direção dos metais, como na laminação de chapas, ou intrínseca do material, como os fibrosos [2]. A anisotropia influencia diretamente a geometria do material e a posição do material bruto durante o processamento.

A capacidade de carga de um componente é dada em função da resistência do material e da geometria da peça, o que significa que um material de menor resistência pode ser usado para construir uma peça desde que sua geometria seja adaptada para isso [2].

Porém, nem sempre o projetista tem total liberdade para escolher a resistência do material a ser utilizado, pois outros fatores como tamanho, peso e custo restringem as escolhas. Limitações de espaço podem ser resolvidas através do uso de materiais mais resistentes e com a conseqüente diminuição da seção, desde que isso não leve a falha por instabilidade estrutural, que pode levar a necessidade de um material de maior rigidez. A limitação de peso pode ser resolvida levando em conta a resistência da seção e o peso linear resultante da mesma. Gráficos comparando resistência versus tenacidade, rigidez, densidade e custo podem ser encontrados no Anexo A.

3.1.2 Tenacidade

A tenacidade pode ser definida como a habilidade do material em absorver energia e deformar plasticamente antes de fraturar [2]. A quantidade de energia absorvida durante a deformação e a fratura é a medida da tenacidade do material. Assim como a quantidade de deformação que precede a fratura é a medida da ductilidade. Tenacidade é medida usando duas técnicas principais: tenacidade ao entalhe é a resistência da amostra Charpy ou Izod a uma carga de impacto, mostrada na FIG 3.3 à esquerda, ou a tenacidade à trinca é definida como a resistência do material à propagação de uma trinca pré-existente.

Existe uma relação próxima entre tenacidade e outras propriedades mecânicas, sendo inversamente proporcional à resistência do material. O método de fabricação por união também tem um efeito forte na tenacidade, onde regiões soldadas e sua ZTA sofrem fratura frágil, ou devido a concentradores de tensão nos furos para a união. A taxa de aplicação de carga também influencia a tenacidade, pois materiais tenazes podem se tornar frágeis quando sujeito à choques ou impactos.

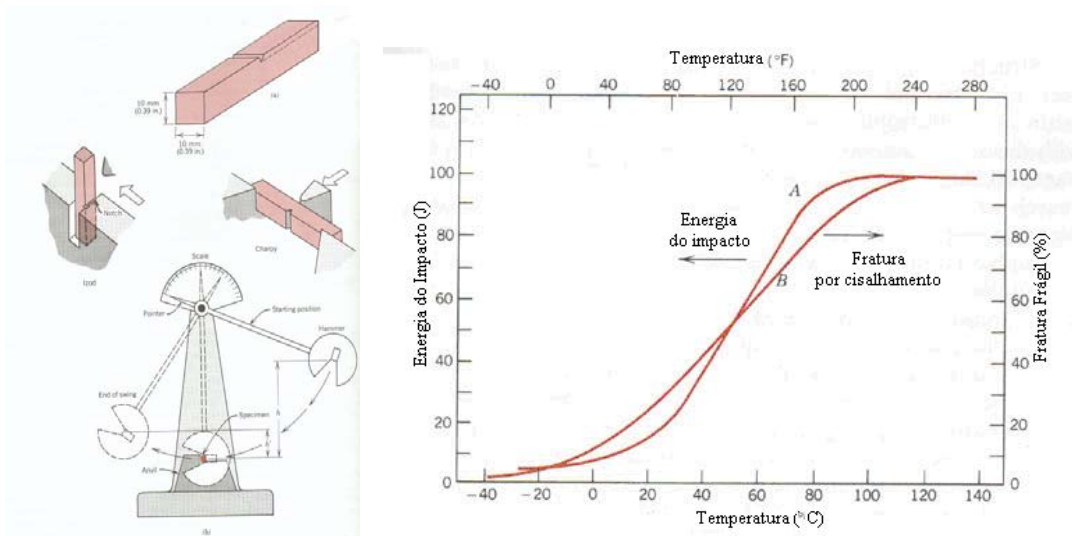


FIGURA 3.3: Teste Charpy e Izod (direita) e gráfico típico da transição dútil-frágil (esquerda) [6].

O fator que mais influencia a tenacidade é a temperatura, pois alguns dos principais materiais possuem uma faixa de temperatura onde deixam de ser dúteis e passam a ser frágeis, como pode ser visto na FIG 3.3 à direita. Por isso, em projetos submetidos a baixas temperaturas não podem ser utilizados materiais com temperatura de transição dútil - frágil inadequada.

3.1.3 Rigidez

Existem apenas três razões para a rigidez ser levada em conta em um projeto mecânico: quando existe uma tolerância à deflexão limitada, quando é necessário absorver energia de um impacto ou risco de flambagem (FIG 3.4d).

A deflexão de uma viga carregada pode ser calculada em termos de sua rigidez, que por sua vez é função de sua inércia rotacional (I) e seu módulo de Elasticidade (E), podendo a rigidez ser resumida como a resistência a uma deflexão elástica que é função da geometria da peça, visto na FIG 3.4 à esquerda, e do módulo de elasticidade de seu material [2]. Uma característica importante dos materiais metálicos é que seu módulo de elasticidade não muda de maneira significativa com a composição da liga ou com tratamentos térmicos, apenas de um metal para o outro, como demonstrado na FIG 3.4 ao centro para diferentes metais. Os materiais compósitos, por outro lado, podem alcançar uma variedade muito

grande de módulos de elasticidade apenas variando a fração de reforço / matriz e coordenando a direção do reforço, ficando a geometria final e as propriedades dependentes da manufatura.

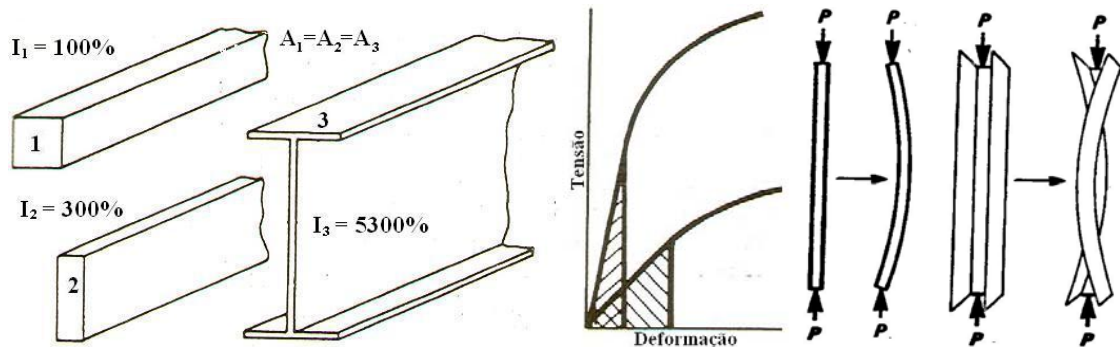


FIGURA 3.4: Variação da inércia para uma mesma área (esquerda); Gráfico tensão-deformação para materiais diferentes (centro); Instabilidade elástica de uma viga submetida a compressão (direita) [2].

Um exemplo onde a deflexão é importante é em montagens complexas onde diferenças de rigidez podem levar a incompatibilidades e desalinhamento entre os vários componentes, com possibilidade de danos e desmontagem acidental. O uso de materiais de alta resistência, particularmente metais, na tentativa de reduzir peso diminui a seção transversal do componente, prejudicando a rigidez e aumentando o risco de flambagem, FIG 3.4d, o que acaba limitando muito o uso de materiais mais avançados.

3.1.4 Resistência à fadiga

Em várias aplicações de engenharia, o desempenho do componente em serviço é influenciado por vários outros fatores além das propriedades do material usado na sua manufatura. Isto é particularmente válido em casos onde o componente ou a estrutura está sujeito à cargas dinâmicas. A resistência à fadiga pode ser influenciada pelo ambiente de trabalho, condição superficial, método de fabricação e detalhes da geometria, e falhas por fadigas devido a diferentes fatores podem ser vistos na FIG 3.5.

As duas características mais marcantes da fadiga são: o fato de que ela pode causar a falha da peça em serviço com cargas muito menores do que aquelas em condições estáticas, e que quase até o ponto de ruptura final pode não haver nenhum sinal evidente de trinca ou falha.



FIGURA 3.5: Fadiga por torção cíclica (esq.); Fadiga flexão cíclica (centro); fadiga térmica (dir.) [7].

Muitas vezes, a importância do material na obtenção de uma boa vida a fadiga é secundário em relação aos outros parâmetros, desde que o material seja íntegro e livres de grandes defeitos internos. A resistência à fadiga dos metais geralmente aumenta proporcionalmente com a tensão de ruptura do material, porém quanto maior a resistência, maior a sensibilidade ao entalho. A sensibilidade ao entalho também é proporcional ao tamanho da peça, fazendo com que concentradores de tensão sejam ainda mais perigosos em grandes componentes. O importante é ressaltar que nenhum material é imune à fadiga, nem mesmo tecidos vivos, e não levar esse fator em conta no projeto de um componente submetido a esforços dinâmicos pode ser potencialmente catastrófico.

3.1.5 Creep e resistência à temperatura

Creep é um dos maiores fatores que limitam a vida útil de peças ou estruturas que trabalham em temperaturas elevadas. A maioria dos métodos usados para melhorar a resistência dos materiais à temperatura ambiente se mostra ineficaz quando a temperatura ultrapassa 50% da temperatura de fusão do material. Por isso, quando se está projetando para se suportar grandes temperaturas, é necessária uma abordagem completamente diferente. Uma tabela da resistência máxima de diversos materiais no limite de sua temperatura operacional pode ser encontrada no Anexo A.

3.1.6 Resistência à corrosão

A resistência à corrosão, quando necessária, se torna a variável principal, mas é difícil conseguir dados da propriedade para uma aplicação específica [4]. Isso se deve ao fato de que o comportamento do material em um ambiente corrosivo muda dramaticamente com pequenas mudanças no meio ou no material [2]. Os principais fatores podem ser divididos nos parâmetros de um meio corrosivo, de projeto e do material, sendo os principais: Composição química, presença de oxigênio e íons (FIG 3.6e), bactérias e tensão residual (FIG 3.6d).

Nem sempre é ideal, em termos mecânicos ou de custo, usar um material naturalmente resistente à corrosão, e por isso é muito comum o uso de proteções, como tintas, resinas e filmes óxidos, além das camadas passivadoras, que são elementos químicos depositados no metal base para reagir preferencialmente com a atmosfera.



FIGURA 3.6: Corrosão em Alumínio em ambiente salino (esquerda); Corrosão em peça estampada de cobre com tensões residuais (direita) [7].

3.1.7 Resistência ao desgaste superficial

Desgaste é um fenômeno superficial que envolve uma perda de material progressiva resultante do contato com outras partes, como no caso de contato de escorregamento ou rolamento, ou como resultado de uma ação do ambiente, como um fluido contendo partículas abrasivas [2]. Na prática, a falha por desgaste pode ser causada pelo efeito combinado de diferentes tipos de desgastes, como mostrado na FIG 3.7. Os principais

fatores que influenciam o comportamento do material ao desgaste podem ser agrupados em dois grupos:

- Variáveis metalúrgicas, incluindo dureza, tenacidade, composição química e microestrutura;
- Variáveis de serviço, incluindo par de materiais em contato, pressão de contato, velocidade de escorregamento, temperatura de operação, acabamento superficial, lubrificação e corrosão [4];

Uma vez que o desgaste é um fenômeno superficial, tratamentos superficiais e recobrimentos têm um papel importante para melhorar essa propriedade, o que evita que toda a peça tenha que ser feita de material resistente ao desgaste, além de poder não atender outros requisitos de mecânicos ou ter um custo maior. Tratamentos superficiais incluem a adição de elementos à superfície, como o carburetamento, e tratamento térmico superficial. Porém, nem todos os materiais podem sofrer tratamento superficial, e recobrimentos podem falhar por fragmentação. Em ambos os casos a geometria da peça deve ser apropriada para receber o tratamento, e se deve levar em conta que isto pode afetar a resistência à fadiga do componente.

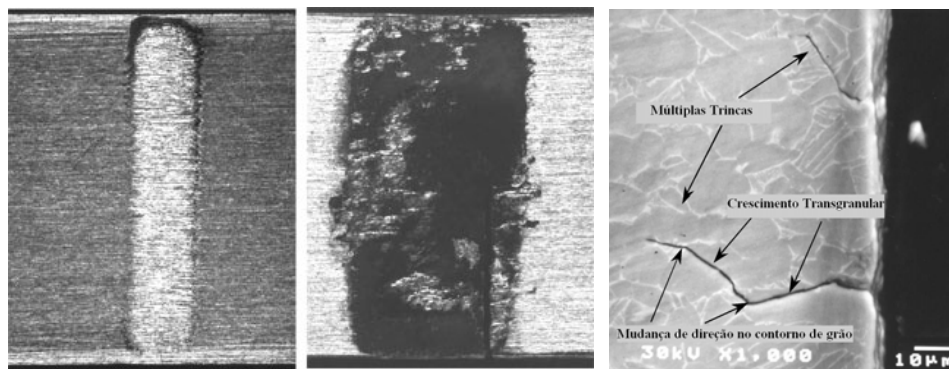


FIGURA 3.7: Esfoliação (esq.), lascamento (centro) e trincas induzidas por desgaste (direita) [8].

3.2 Métodos de produção

Não há sentido nenhum em se selecionar um material ideal para o projeto se ele não pode ser modelado de maneira economicamente viável à forma desejada. O custo de

processamento normalmente é várias vezes o custo da matéria prima trabalhada, e como existe uma diversidade de formas de se processar, a melhor solução dependerá de uma combinação ideal do material, do projeto e do processo [2].

O projeto, a escolha de material e a manufatura são intimamente ligados e não podem ser executados separadamente. Bons projetos não alcançam o mercado se não forem capazes de serem fabricados economicamente no nível de desempenho desejado. É comum que um projeto tenha que ser radicalmente modificado para que isso seja possível, ou para que o projeto se encaixe nas capacidades e características das estruturas existentes.

É importante ressaltar que o processamento não cria apenas a geometria da peça, mas também influencia diretamente as propriedades do material escolhido, como a resistência, anisotropia e estrutura cristalina, entre outros exemplos. Porém na maioria das vezes os critérios econômicos superam os critérios técnicos, sejam estes motivos de custos, flexibilidade da produção, controle de qualidade ou até mesmo logística entre produção doméstica ou terceirizada [2].

Em resumo, na escolha de um processo de manufatura é necessário levar em conta [2]:

- Quantas peças são necessárias;
- Criar ou alterar as propriedades do material;
- Tamanho e peso de cada peça;
- A complexidade geométrica;
- As tolerâncias dimensionais requeridas;
- O acabamento superficial desejado.

O efeito da quantidade de peças a serem fabricadas é provavelmente o fator decisivo para a escolha de um processo, com a provável exceção de peças de qualidade “Premium”, da indústria de competição ou aeroespacial. As quantidades muitas vezes variam de uma a milhões, e o efeito da diluição do custo do ferramental entre múltiplas peças é crucial, permitindo o uso de maquinário mais caro e métodos de manufatura mais complexos [2].

Porém lidar com um maior número de peças exige técnicas de inspeção e um controle de qualidade melhor, não só no processo, mas também na matéria prima, o que pode corroer parte da economia.

A complexidade da forma não pode ser quantificada por um único parâmetro, porém os fatores que influenciam fortemente para a complexidade são: a espessura mínima da seção transversal, recortes e a presença de vazios internos [4].

As formas de processamento são divididas em três categorias, e cada uma será discutida de acordo com os objetivos acima.

3.2.1 Processos de fluxo

Os métodos reológicos podem ser utilizados para modelar materiais líquidos ou sólidos, e desses podemos citar como os principais a injeção de plásticos, a compactação da metalurgia do pó, a prensagem de cerâmicos e a fundição, extrusão, estampagem e forja de metais. Apesar de todos esses processos pertencerem à mesma família, eles são discutidos e estudados de maneira completamente independente, pois pertencem a campos distintos da engenharia. [2]

3.2.1.1 Fundição de metais

Como método de modelamento, a fundição tem duas grandes vantagens: pode produzir basicamente qualquer forma, e está disponível em dezenas de técnicas diferentes, cada um com um custo de implementação diferente. Porém o custo sempre irá aumentar com o aumento da complexidade.[2]

A fundição pode ser feita em pequenos lotes de maneira viável e com um custo bem pequeno, porém raramente essa escala pode ser aumentada sem que haja um grande investimento em mecanização, tornando a produção inflexível. A FIG 3.8 mostra uma aplicação da fundição em peça de tiragem única, no caso, um sino de cobre.



FIGURA 3.8: Fundição de um sino de cobre [9].

Em geral, a fundição produz propriedades mecânicas inferiores, devido principalmente a defeitos internos, alto nível de impurezas, microestrutura grosseira e stress residual. Porém é sugerido por Wild [10] que o projetista deve usar a fundição quando:

- A resistência do metal fundido é adequada;
- O projeto é baseado em fatores como rigidez, tamanho ou economia de peso em detrimento à resistência;
- O uso da fundição vai diminuir o tempo de projeto;
- A geometria complexa faz com que os outros métodos não sejam economicamente viáveis, particularmente peças ocas;
- As peças complexas serão produzidas em larga escala;
- A fundição trará uma economia de custos substancial comparado a outros métodos
- A peça for composta de vários materiais simultaneamente;
- Usar metais preciosos, uma vez que o desperdício é pequeno;
- Existir a necessidade de componentes isotrópicos

A fundição não deve ser usada nos seguintes casos [10]:

- A fundição não é competitiva se a peça pode ser produzida por estampagem, cisalhamento ou corte de uma chapa;

- No caso de metais não ferrosos de baixo ponto de fusão, a extrusão pode ser mais competitiva;
- A fundição normalmente não é uma solução viável para metais com problemas de fusão, como metais refratários, ou facilmente oxidáveis.

O projeto de uma peça fundida deve levar em consideração as características de solidificação, posição do fundido no molde e a tolerância exigida do projeto para cada material. Se as regras adequadas não forem incorporadas ao projeto, a produção só poderá se tornar tecnicamente viável a um alto custo ou com alta taxa de rejeição.

Outra propriedade importante é a fundibilidade, que se refere à mínima seção capaz de ser reproduzida com esse material, lembrando que a técnica aplicada e a geometria afeta essa propriedade. A taxa de resfriamento esta diretamente relacionada com a espessura da seção e com a estrutura granular resultante do material, fazendo com que partes com espessuras diferentes tenham características diferentes, geralmente melhores para seções mais finas [2].

3.2.1.2 Conformação mecânica dos metais e ligas

Os processos mais comuns de conformação mecânica, como visto nas FIG 3.9 e FIG 3.10, são: laminação, forjamento, extrusão, trefilamento, estampagem e cisalhamento.

As razões de se utilizar a conformação mecânica são: confiabilidade, ótimas propriedades mecânicas e uniformidade. Esses processos podem ser utilizados para se criar a peça ou apenas beneficiar o material para subsequente manufatura. O estudo do beneficiamento por conformação do material bruto é indispensável para entender o comportamento do material após um segundo beneficiamento, como o corte e dobra de uma chapa ou a usinagem de um forjado.

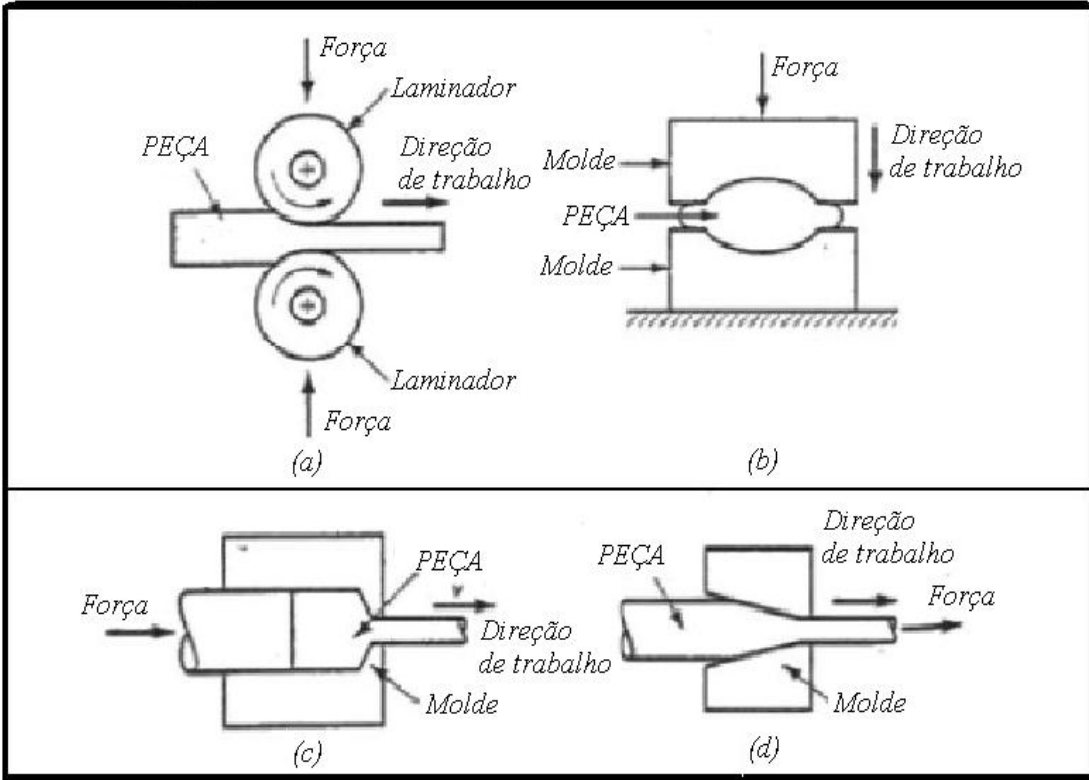


FIGURA 3.9: Laminação (a), forjamento (b), extrusão (c) e trefilamento (d) [11].

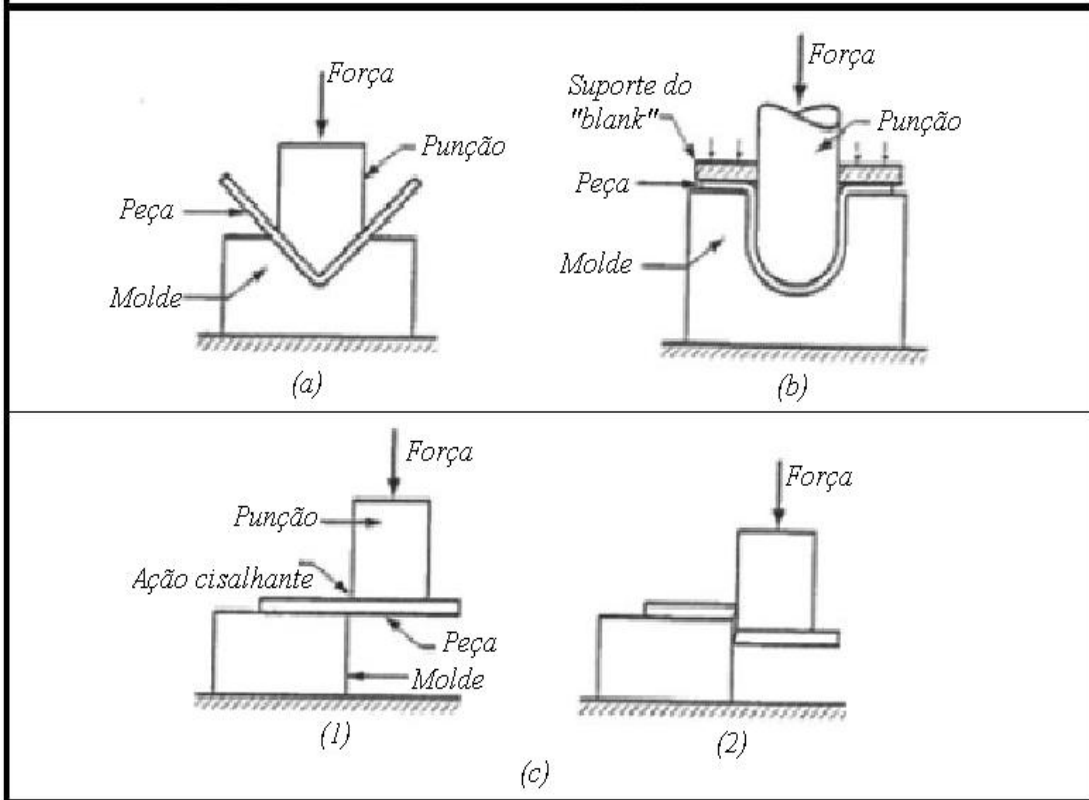


FIGURA 3.10: Dobramento (a), estampagem (b) e cisalhamento (c) [11].

A conformação se dá através da aplicação de grandes deformações em lingotes fundidos, e as propriedades mecânicas dependerão de como essas deformações são aplicadas. Características indesejadas dos lingotes como anisotropia, porosidade, microestrutura grosseira e segregação química podem ser melhoradas ou até mesmo eliminadas [2].

O forjamento não é utilizado para a construção de protótipos, pois seu custo é inviável e as peças construídas por esse processo também podem ser facilmente usinadas com qualidades iguais ou superiores [4]. A laminação, a extrusão e o trefilamento em geral são processos básicos para o beneficiamento do material, e não para a fabricação de componentes.

A estampagem é utilizada em protótipos em dois casos: quando é esperado que o protótipo seja substituído pela produção em série logo em seguida ou quando a geometria não pode ser alcançada por nenhum outro método, como curvas complexas e estruturas de casca [5]. Ambos os casos são extremamente comuns, principalmente na indústria automotiva onde se tornou o principal processo de fabricação, vide FIG 3.11. A expansão da estampagem nos automóveis se deve ao fato de que este processo é o melhor para a fabricação de carenagens, e aos poucos foi expandido para a carroceria e outros componentes estruturais. Para pequenos lotes e protótipos, porém, é frequentemente substituído por laminados de plástico reforçado.

Para que se projete uma peça técnica e economicamente viável, é necessário que se obedeça a uma série de regras, boas práticas consideradas essenciais e que estão descritas em detalhes no Anexo B.



FIGURA 3.11: Uso de múltiplas peças estampada e soldadas para a formação de uma estrutura [12].

3.2.1.3 Processamento dos polímeros

Os métodos utilizados nos polímeros são aproximadamente análogos aos utilizados nos metais, podendo comparar a “injeção dos plásticos com a fundição, a termoformagem com a estampagem e injeção a sopro com a conformação superplástica”, porém todos os processos com plástico são realizados com adição de calor [2]. Da mesma forma, as propriedades e a qualidade do polímero irá depender diretamente do processo, ao mesmo tempo em que a escolha do polímero limita os processos que podem ser utilizados.

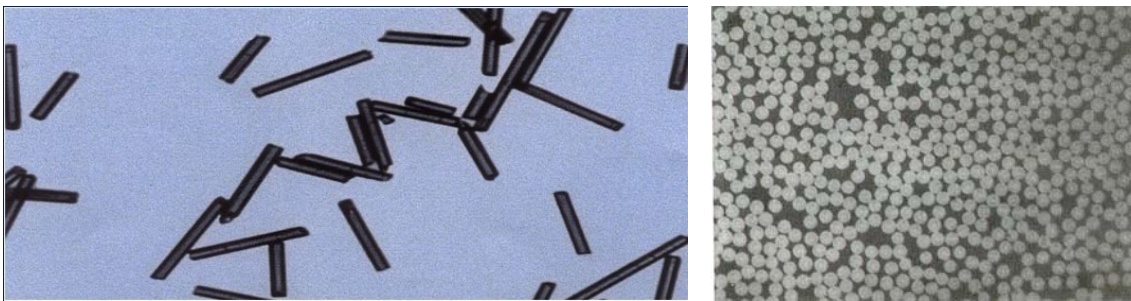


FIGURA 3.12: Plástico reforçado com flocos de sílica (esquerda) e com fibras de carbono (direita) [13].

Para o processamento de plásticos é necessário sempre um bom controle da temperatura e da viscosidade do material, uma vez que determina a resistência e a produtividade de maneira inversa. Isso pode ser contornado com a adição de reforços mecânicos como fibras, flocos e micro esferas, formando os materiais compostos, como os da FIG 3.12.

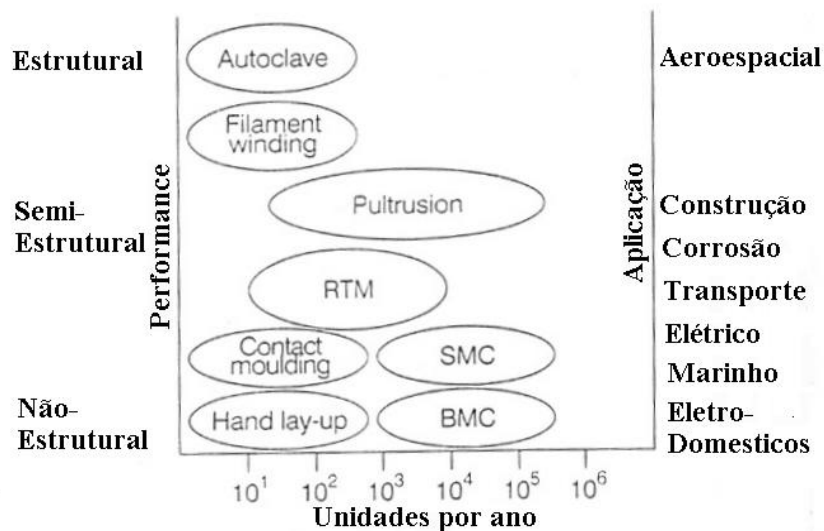


FIGURA 3.13: Viabilidade dos processos de compósitos para prototipagem [2].

Os tipos de técnicas de processamento dos compósitos e a aplicação de cada uma de acordo com o número de peças a ser fabricado podem ser visto na FIG 3.13, e podem ser divididos em três grandes grupos: em molde aberto, como o “hand lay-up” e o “filament winding” mostrados na FIG 3.14, em molde fechado, como o BMC, SMC e o RTM, e a pultrusão que é um método contínuo. O baixo peso específico, a resistência e a rigidez desses materiais fazem dos compósitos a tecnologia que mais expande no mercado de peças. A maioria dos materiais, porém são processados por métodos de baixa produtividade, e são ideais em protótipos ou produtos com baixa escala de produção [5].

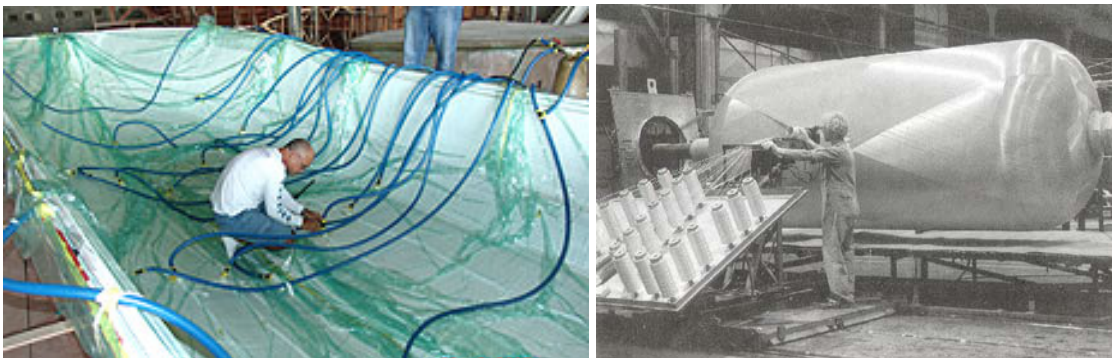


FIGURA 3.14: Construção de barco em molde aberto(esq.) [14] e “filament winding” de bocal (dir.) [13].

3.2.1.4 Metalurgia do Pó

A metalurgia do pó é um sistema onde os materiais, em forma de pó, são consolidados a uma temperatura abaixo do ponto de fusão para formar uma massa sólida coesa. Podem ser constituídos de metais puros, ligas, compostos intermetálicos, óxidos, nitretos, boretos, carbetos ou carbono, de forma a produzir compostos complexos de uma maneira mais simples do que a fundição. Normalmente a metalurgia do pó é adotada por duas razões: pela dificuldade ou incapacidade técnica de se conseguir o composto desejado, ou na produção em grandes escalas onde é possível se obter vantagens econômicas através do uso da metalurgia do pó, como no micro-componente da FIG 3.15. [2].

Os campos de aplicação da tecnologia do pó atualmente podem ser divididos em cinco grupos [2]:

- Ligas com metais não-miscíveis no estado líquido, ex: mancais.

- Materiais refratários que não podem ser fundidos, ex: W, Va, Ta;
- Peças porosas, como em filtros ou buchas que absorvem óleo.
- Ligas que precisam de uma composição exata, ex: bi-metálicos e materiais magnéticos. Esse processo é o único capaz de dar a geometria desejada e controlar as propriedades magnéticas de uma peça.
- Manufatura de peças com tolerâncias apertadas sem a necessidade de usinagem posterior e de maneira competitiva com o forjamento em molde fechado e a fundição em molde metálico.

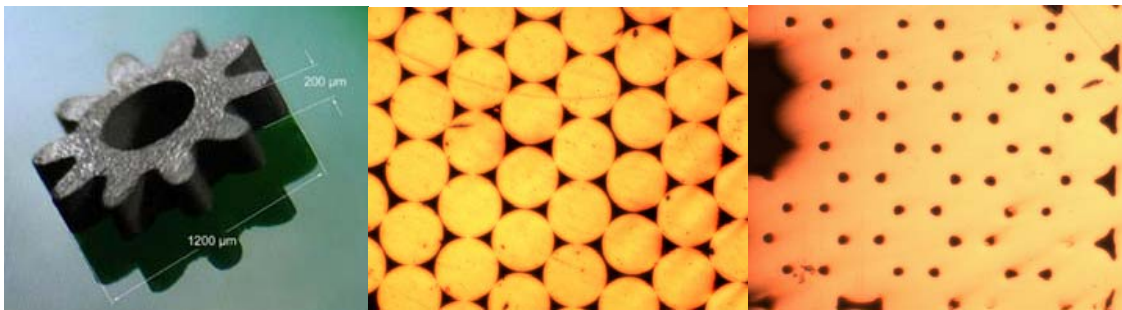


FIGURA 3.15: Micro-peça sinterizada (dir.), e o pó antes (centro) e depois da sinterização (esq.) [15].

As técnicas de metalurgia do pó podem ser usadas para produzir grandes quantidades de pequenas peças até o seu formato final em poucos passos, com pouca ou nenhuma usinagem e com alta produtividade.

Com base no peso, metais em pó são muito mais caros do que materiais fundidos ou semi-acabados. Porém a ausência de sobras, a eliminação da usinagem, o menor número de etapas de produção e a alta taxa de produção muitas vezes compensa o maior custo do material. Os moldes necessários às técnicas de metalurgia do pó são os itens mais caros do processo, fazendo que componentes mecanicamente comprimidos sejam inviáveis em quantidades inferiores a 10.000 peças. Quando se está fabricando peças grandes, difíceis de serem fabricadas por outro método, pode tornar-se economicamente viável em lotes de 20 ou mais peças. Porém, é necessário ressaltar que devido ao sentido vertical de compressão do pó, as geometrias possíveis estão limitadas a duas dimensões, ou um escalonamento das mesmas. Recomendações para o projeto de peças sinterizadas são discutidas no anexo C.

3.2.2 Processos de Usinagem

A utilização da usinagem comumente representa a falha de outros processos em se obter a peça com as características desejadas, pois é dispendiosa em termos de energia e mão de obra, cria grandes quantidades de sobras e requer grande quantidade de capital em máquinas. Porém é um método que ainda mantém posição de destaque entre os processos de fabricação devido a sua flexibilidade e conveniência, além de ser capaz de compensar as deficiências de outros processos [2].

Em uma linha de manufatura comum, a usinagem possui a capacidade de combinar alta qualidade com alta produtividade. Sua flexibilidade técnica é capaz de produzir praticamente qualquer forma, com notada exceção das formas ocas, a partir de um bloco sólido de material, desde que o custo possa ser pago, e é usado para a prototipagem e a fabricação de itens de tiragem única quase como regra, como na prototipagem de motores para motos, como mostrado na FIG 3.16. Apesar do alto custo, a usinagem pode ser um processo muito eficiente e rápido para a construção de protótipos se certos cuidados e boas praticas de engenharia forem adotados na fase de projeto. Esse conjunto de regras esta descrito no Anexo D.

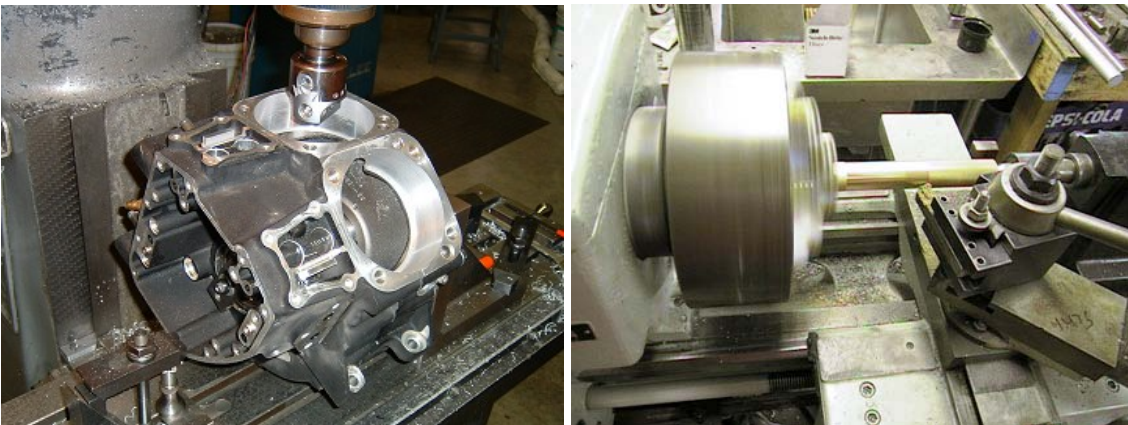


FIGURA 3.16: Fresamento de um bloco de motor (direita) e torneamento de um eixo (esquerda) [16].

Outra forma de usinagem muito importante é o corte, que pode ser feito por abrasão, como o jato de água, ou termicamente, como o oxi-corte, o plasma e o laser, mostrados nas FIG 3.17 e 3.18. Existe também o corte por eletro-erosão a fio, reservado apenas para os casos

mais especializados. É um processo fundamental para o processamento dos sub-componentes de uma peça fabricada por união.

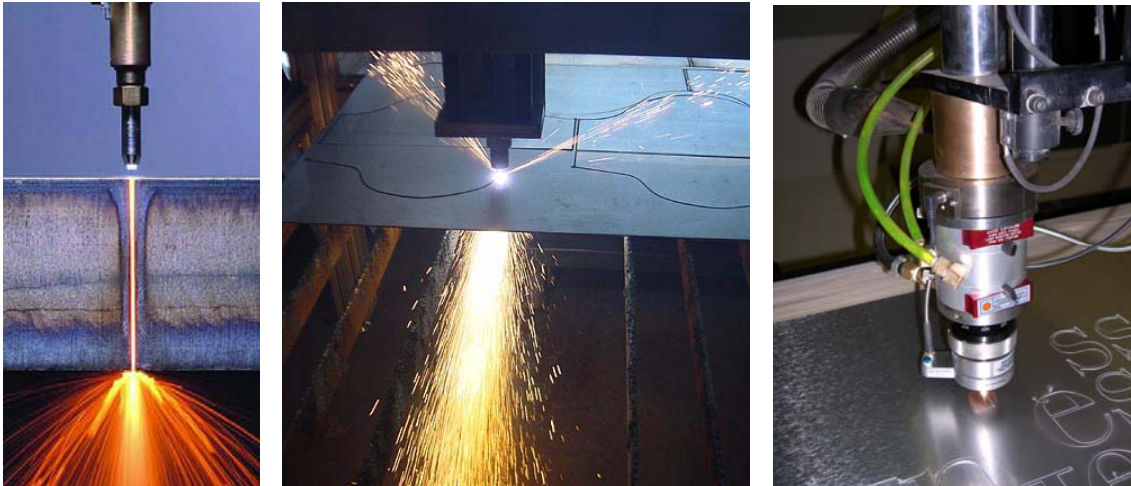


FIGURA 3.17: Corte térmico por oxí-chama (esq.) [17], plasma (centro) [18] e LASER (dir.) [19].



FIGURA 3.18: Corte com jato de água (esquerda) [20] e por eletro-erosão a fio (direita) [21].

A bibliografia, porém, não dispõe de considerações para o projeto de peças a serem cortadas de chapa, e os resultados de um estudo sobre isso se encontram no capítulo 5.

3.2.3 Processos de fabricação por união

A fabricação por união é a junção de produtos semi-acabados através do uso de meios mecânicos, químicos ou metalúrgicos. O uso da fabricação por união é necessário quando

não é economicamente viável fazer uma peça maciça, quando não existe nenhum processo de fabricação capaz de fabricar a peça desejada ou quando existe a necessidade de que o componente seja feito de materiais diferentes [2].

Os produtos semi-acabados são aqueles que através de algum beneficiamento alcançaram uma geometria intermediária entre o produto bruto e a peça final. Processos comuns para a fabricação de produtos semi-acabados são a extrusão, a laminação, o trefilamento, o corte térmico ou mecânico e em alguns casos a estampagem. Isso significa que uma peça processada por um desses meios deve ser unida a outras peças processadas pelo mesmo meio ou outro para que forme um componente único, sólido e integral em sua função [2].

A indústria tem desenvolvido cada vez mais peças fabricadas através da união de sub-componentes, notadamente a indústria automobilística que através da união de múltiplas peças estampadas conseguem fabricar a maioria das peças estruturais de um carro moderno.

Normalmente, a função principal de uma junta é transmitir esforços de uma peça para outra, fazendo necessário que a junta possua resistência suficiente para aguentar os carregamentos durante o serviço. Como as uniões representam áreas de descontinuidades na montagem, elas devem estar localizadas preferencialmente em regiões de menor esforço, especialmente em estruturas com cargas dinâmicas, pois o ponto de maior fadiga é sempre a união entre duas peças.

3.2.3.1 Junções mecânicas reversíveis

Quando é necessário que a junta seja desmontável, cada peça do conjunto é uma peça individual e funcional, e podemos chamar o conjunto de peças e parafusos de montagem. Sendo assim, para esses casos, o processo de aparafusamento de componentes não pode ser considerado como método de fabricação de uma peça, e sim da montagem de um produto.

Os métodos mecânicos desmontáveis incluem parafusos, cliques, travas plásticas, anéis elásticos e rebites desmontáveis, mostrados na FIG 3.19, e são usados principalmente em

três casos: a junção deve ser desmontável, por causa da conveniência ou simplicidade da montagem ou em alguns casos quando é impossível soldar ou colar os diferentes componentes [5].



FIGURA 3.19: Da esquerda para a direita; Parafuso [22], anel trava [23], trava elástica [24] e parafuso rebite [25].

3.2.3.2 Junções mecânicas irreversíveis e interferência.

A rebiteagem é a técnica para união de chapas finas mais popular, principalmente quando o número de peças produzidas é pequeno ou protótipos como o da FIG 3.20a. Isso se deve ao fato do ferramental ser extremamente simples e os resultados satisfatórios na maioria dos casos. No projeto de uma junta rebitada, deve se ter cuidado de colocá-la em uma região de baixo esforço e colocar os rebites com o espaçamento adequado, pois é um grande fator concentrador de tensões.

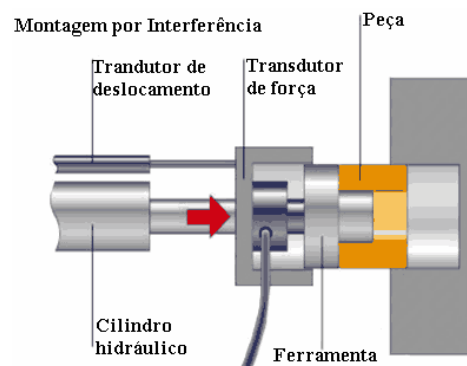


FIGURA 3.20: Veículo-protótipo rebitado (esquerda) [26] e montagem com interferência (direita) [27].

A junção por interferência é provavelmente a melhor maneira de se unir duas peças, pois tira proveito das tensões de compressão e do atrito entre as duas peças para manter-las unidas. Como um dos requerimentos desse tipo de união é a boa qualidade das superfícies a

serem unidas, a resistência à fadiga da junta é muito superior aos outros métodos, porém a tolerância dimensional, a qualidade superficial e o controle do processo, mostrado na FIG3.20b, o tornam muito caro.

3.2.3.3 Junções químicas

A adesão é um método importante de união que pode ser aplicado para todas as classes de material, com dificuldades técnicas apenas com os termoplásticos. Várias geometrias de juntas podem ser unidas por adesão, e a forma da junta é uma consideração importante em relação a concentração de tensão geométrica [2].

A preparação da superfície a ser aderida é usualmente necessária, e o adesivo é aplicado na junta e deixado para curar sobre pressão e calor quando necessário. Quando ocorrem contrações depois da cura do adesivo, podem aparecer concentrações de tensão entre o adesivo e o aderido, o que enfraquece muito a resistência final da junta. Outras restrições presentes é a porosidade do material a ser aderido e a dependência da evaporação de um solvente volátil para a cura do adesivo, o que inviabiliza o uso desse tipo de material em juntas fechadas [4].

Adesivos representam um atrativo método de união e seu uso está aumentando em muitas aplicações, como a asa de avião da FIG 3.21. Varias situações onde é extremamente vantajoso utilizar juntas coladas podem ser encontradas no Anexo E.



FIGURA 3.21: Colagem de painéis metálicos da asa[28].

A resistência de uma junta colada depende principalmente da geometria da junta, a direção do carregamento, do material adesivo, da preparação da superfície, da aplicação e das técnicas usadas na polimerização. Como a resistência da junta colada é limitada pela área colada, juntas sobrepostas e duplas são mais usadas do que juntas de topo. Se as condições geométricas não permitirem essas juntas, então bisel e duplo bisel devem ser a segunda opção.

Quando uma junta sobreposta é usada para colar seções finas, tensões de cisalhamento causam deflexão que resultam em uma concentração de tensões na borda da sobreposição. Criando um ângulo nas bordas da junta fornece uma tensão mais uniforme através da junta. Como juntas coladas são mais fracas sob forças de tração perpendicular, esse tipo esforço deve ser evitado.

3.2.3.4 Soldagem

A junção metalúrgica é a tentativa de desenvolver na interface da junta uma força intermolecular que unirá as diferentes peças. Para se fazer uma soldagem é necessária uma fonte de energia, que pode ser na forma de calor, deformação plástica, energia cinética ou até mesmo um feixe de elétrons, existindo mais de cinquenta modalidades diferentes de soldagem [4]. O objetivo é criar uma junta que é tão dútil e resistente quanto o material base. Para se obter uma boa junta é sempre necessário levar em conta composição química, heterogeneidade da composição, condições físicas e metalúrgicas do processo, dimensões, geometria, propriedades mecânicas e físicas [2].

O maior problema encontrado na soldagem por fusão de aços é o trincamento induzido por hidrogênio na zona termicamente afetada (ZTA) da solda, que acontece quando os seguintes fatores estão presentes simultaneamente:

- Hidrogênio dissolvido no aço
- Criação de uma microestrutura dura na ZTA
- Tensões na junta

- Junta a uma temperatura ambiente baixa suficiente [4].

O carbono e os elementos de liga são os fatores que mais influenciam na fragilização, e como regra geral para se determinar o procedimento adequado se utiliza o carbono equivalente do metal, ou seja, o quanto a soldabilidade de um aço liga se equivale a de um aço carbono. Teores de até 0,4% são considerados de fácil soldagem [4].

A soldagem substituiu a rebiteagem em várias aplicações, incluindo estruturas metálicas, caldeiras, tanques e chassis de automóveis, principalmente com os processos de soldagem GMAW (FIG 3.22), GTAW (FIG 3.23) e soldagem a ponto. Isso aconteceu pelo fato de que a rebiteagem é menos versátil e sempre requer juntas sobrepostas. Também é necessário considerar que os furos e os rebites diminuem a resistência, e uma estrutura rebitada tem até 85% da resistência do metal base, enquanto a solda pode ser igualmente resistente [4].

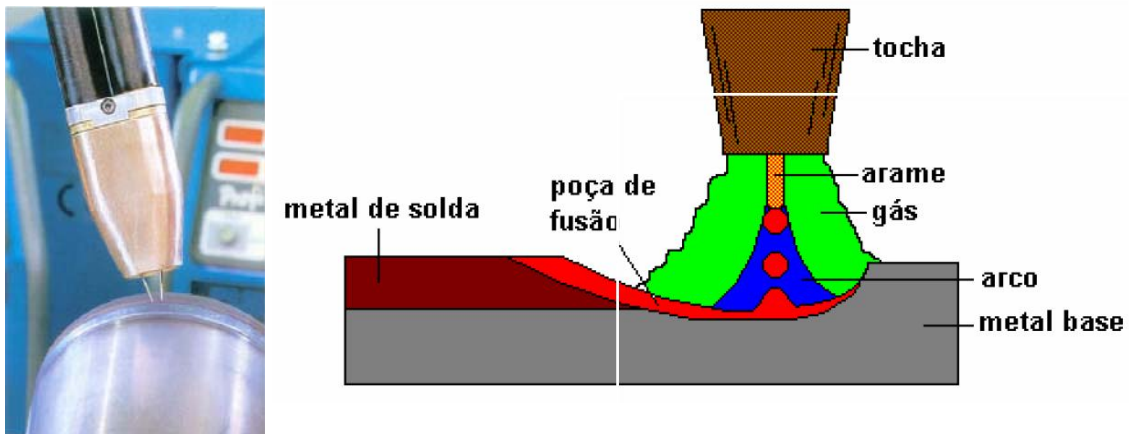


FIGURA 3.22: Soldagem GMAW [30]

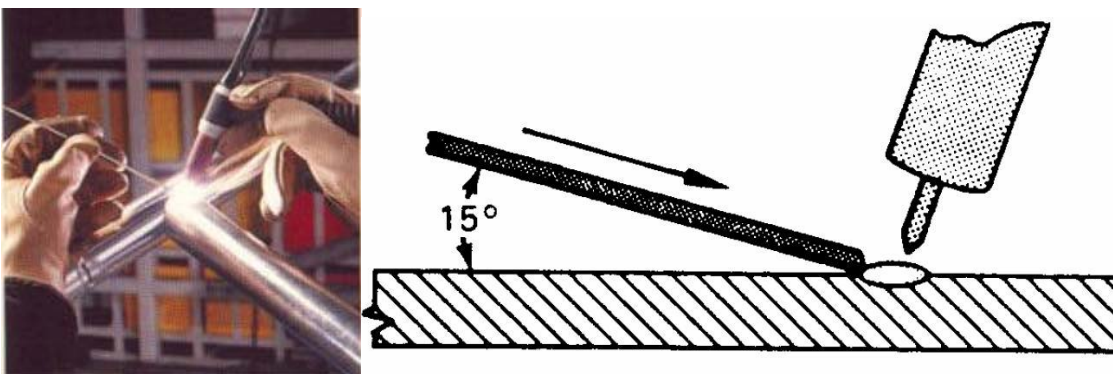


FIGURA 3.23: Soldagem GTAW [30]

Juntas soldadas são mais simples de se inspecionar e podem ser feitas estanques para líquido ou gás sem a necessidade de calefação. Algumas regras a serem seguidas quando se projeta peças soldadas se encontram no anexo E.

3.2.3.5 Brazagem e solda fraca

Na brazagem e na solda fraca não existe relação direta entre a resistência do material de adição e a resistência da junta. Quando o material de adição une materiais mais resistentes, ele fica engastado à base por uma interface adesiva forte, que muitas vezes, possui uma resistência ao escoamento e ao rompimento maior que o material de adição [4]. O engastamento desenvolvido é uma função da espessura da junta e seu comprimento, como ilustrado na FIG 3.24.

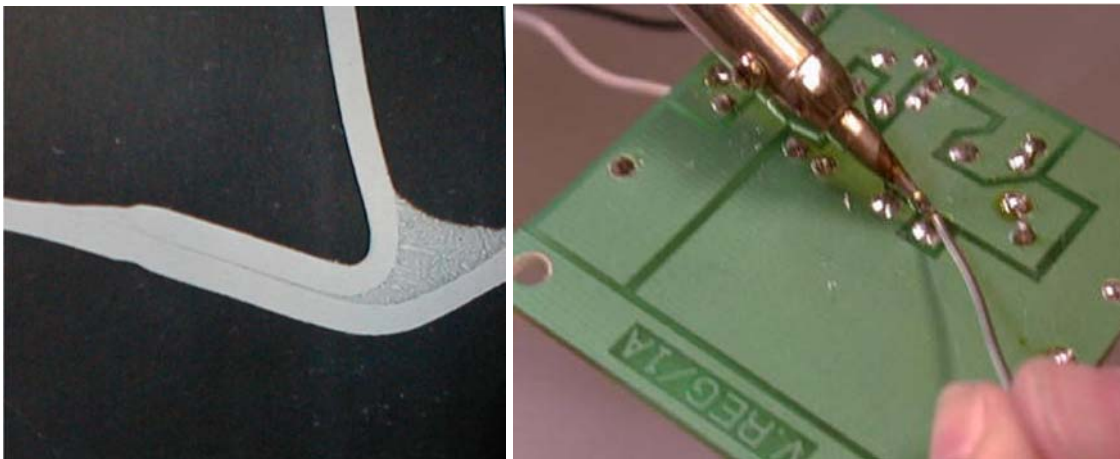


FIGURA 3.24: Brazagem de uma junta (esquerda) e Solda fraca de componentes eletrônicos (direita) [30]

Todos os métodos de brazagem e solda fraca dependem das características do fluxo capilar do material, fazendo da geometria da junta um aspecto crítico. É possível fazer juntas topo e filete com a brazagem, mas apenas juntas do tipo sobreposta ou embutidas são possíveis com solda fraca, como mostrada na FIG 3.25. Outras recomendações para o projeto de juntas brazadas pode ser encontrado no Anexo G.

A escolha entre brazagem e solda fraca e a liga a ser utilizada depende muito do material base, uma vez que o calor aplicado, a não aderência e a formação de compostos intermetálicos frágeis podem inviabilizar o processo [4].

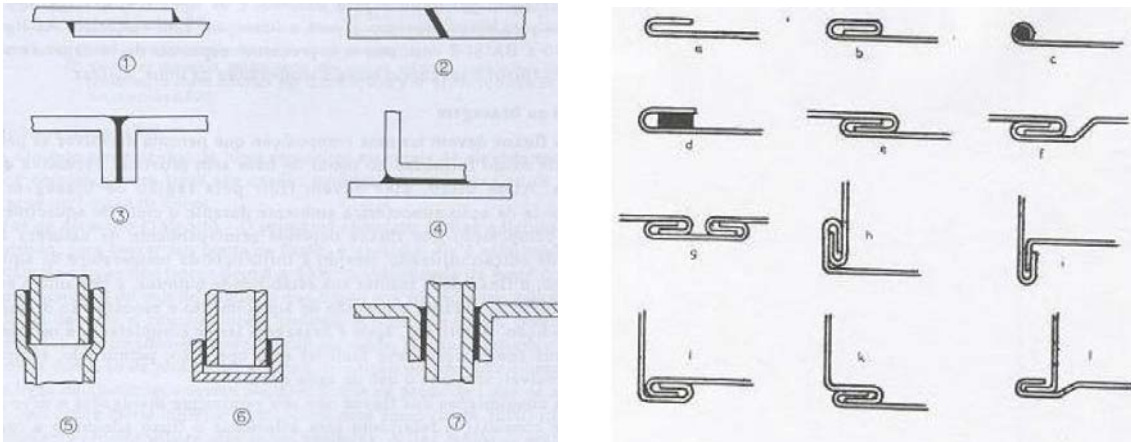


FIGURA 3.25: Juntas para brazagem (esquerda) e juntas para solda fraca (direita) [30].

3.2.3.6 União por difusão

É uma forma de união sob pressão onde a junção é obtida pela difusão atômica através da interface sem a necessidade de fluxo de material ou deformações plásticas significativas. O processo só ocorre com tempo, altas temperaturas e atmosfera controlada ou vácuo. Apesar da união em estado sólido ser possível, o processo é fortemente acelerado pela liquefação que ocorre na interface, e isso pode ser feito com a adição de uma fina lâmina de metal entre as partes a serem unidas, formando ligação eutética com a base.

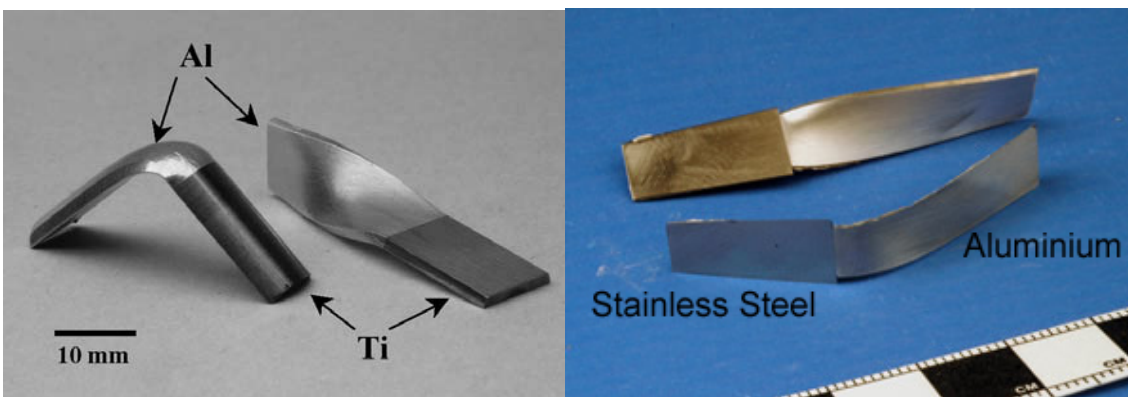


FIGURA 3.26: Testes de torção e dobramento de espécimes unidos por difusão.

O aço, o titânio e o cobre podem ser facilmente colados por difusão, uma vez que seu óxido difunde facilmente no metal base nas temperaturas necessárias ao processo, como demonstrado na FIG 3.26. Alumínio e magnésio são mais difíceis de serem processados.

Cerâmicos também podem ser unidos por esse processo, mas requerem camadas metálicas [4].

3.2.4 Processamento Rápido

A tecnologia do processamento rápido é um grupo de processos de manufatura que permitem a realização física direta do modelo tridimensional digital. Essa tecnologia está se desenvolvendo rapidamente e é mais competitiva que as técnicas tradicionais de prototipagem por serem mais rápidas e capazes de fornecer um grau de detalhamento maior.

A tecnologia de prototipagem rápida, a “solid freeform fabrication” (SFF) e o modelamento de objetos em lâminas são os grupos de processos que apareceram na década de 80 [32]. Ao contrário dos processos convencionais de produção que trabalham de maneira subtrativa, o processamento rápido trabalha com a construção do modelo adicionando camada por camada.

Algumas vantagens de se possuir o modelo físico tridimensional já nas primeiras etapas do projeto são descritas por Burghilde [33]:

- Melhorar a comunicação da equipes que trabalham em funções diferentes do sistema;
- Utilização para verificação da precisão do modelo e das previsões computacionais;
- Permite a comparação entre diferentes alternativas de soluções já nas fases iniciais de desenvolvimento, minimizando o risco de maiores problemas em fases posteriores;
- Valida o funcionamento de sistemas mecânicos complexos com múltiplas interações;
- Servem de elemento de divulgação para setores não ligados ao projeto e o público em geral.

A tecnologia de processamento rápida se divide em 3 setores diferentes, a prototipagem rápida (rapid prototyping - RP), o ferramental rápido (rapid tooling - RT) e a manufatura rápida (rapid manufacturing - RM).

3.2.4.1 – Estereolitografia (SLA)

A estereolitografia é hoje o processo mais difundido de prototipagem rápida. Um líquido fotossensível, uma resina que cura quando exposta a uma luz intensa, por exemplo, é colocado em uma bacia. Um LASER que emite luz ultravioleta é posicionado acima da bacia e emite um feixe de luz que é direcionado para a resina através de um espelho móvel que é controlado por um computador, que gera a trajetória a partir do modelo CAD depositado em sua memória. A plataforma de construção desce uma distância referente a uma espessura sempre que uma camada é finalizada. Uma vez que toda a peça esta completa, ela é removida da bacia e a resina não solidificada é drenada. Essa peça é chamada de “peça verde”, pois ainda necessita de uma pós-cura em um forno de luz ultravioleta para alcançar a resistência final. Esse processo necessita de suporte para as estruturas em balanço durante a construção, e elas só podem ser removidas após o fim da construção através de meios mecânicos ou químicos. O processo esta esquematizado na FIG 3.27.

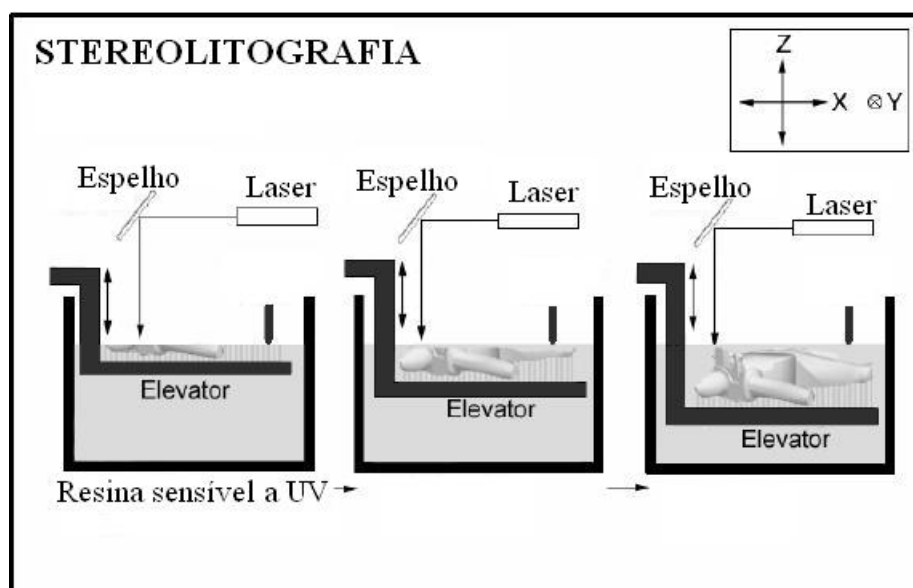


FIGURA 3.27: Stereolitografia com resina fotossensível e LASER [33]

3.2.4.2 - Sinterização seletiva a LASER (SLS)

A Sinterização a LASER ou Sinterização Seletiva a LASER usa uma grande variedade de materiais na forma de um pó fino a ser tratado em uma atmosfera de nitrogênio. O pó é aquecido até uma temperatura levemente abaixo do ponto de fusão do material, e em seguida o pó é espalhado pelo rolo sobre a plataforma de construção da peça. O LASER irá fundir de maneira seletiva o material, unindo os grãos, e uma vez que o material já está quente, o LASER precisa fornecer apenas um pouco de energia para fundir o material. O gradiente de temperatura é baixo durante todo o processo. Ao fim da camada, a plataforma se desloca para baixo a distancia de uma espessura, novo pó é adicionado e a nova camada se inicia, como visto na FIG 3.28. Nesse processo não é necessário suporte para os trechos em balanço, uma vez que o pó não sinterizado serve de suporte.

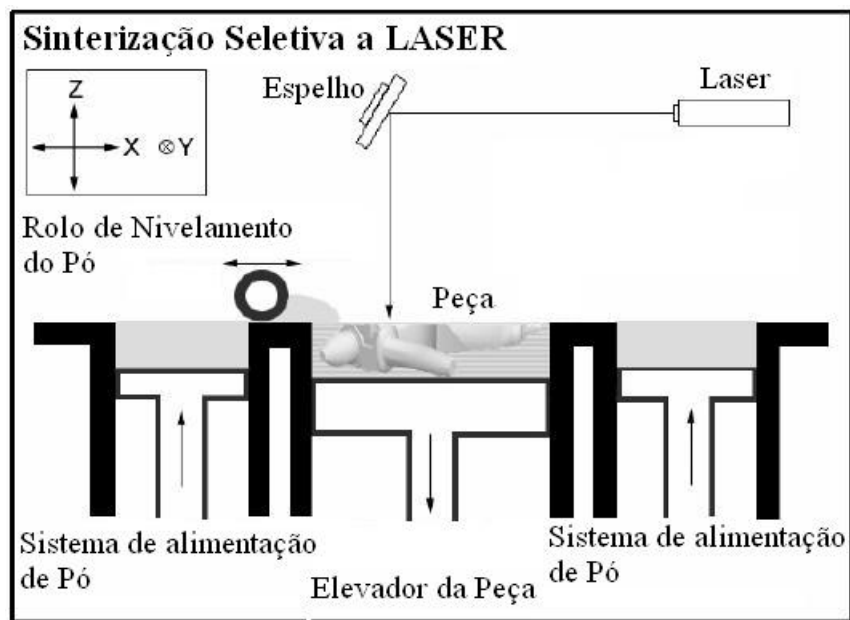


FIGURA 3.28: Sinterização seletiva a LASER [33].

3.2.4.3 - Modelamento por deposição de fundido (FDM)

Neste processo, o material (ABS, cera de fundição, elastômero) é preparado na forma de filamento e disponibilizado em rolos. Esse filamento é aquecido ao passar por um bocal que se move nos eixos X e Y de acordo com os dados do desenho CAD (FIG3.29). O material

fundido é adicionado camada por camada. Um segundo rolo de material diferente pode ser usado para a sustentação de trechos em balanço, e esse segundo material é normalmente solúvel em água para facilitar sua retirada.

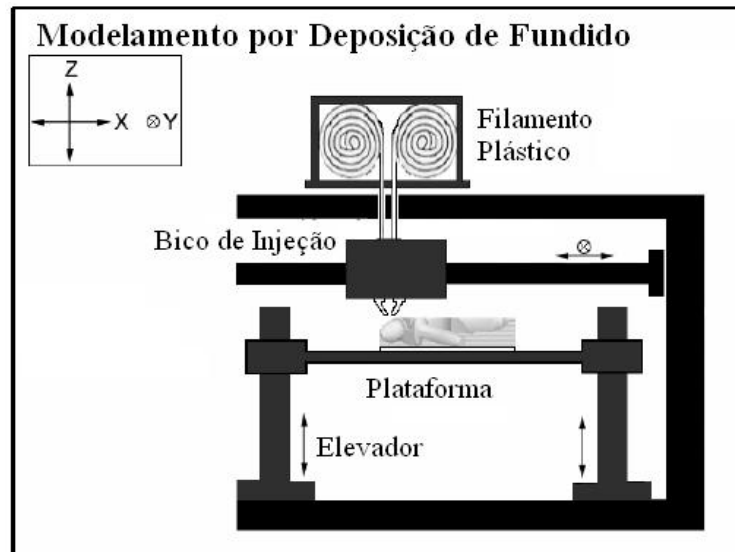


FIGURA 3.29: Modelamento por deposição de material fundido [33].

3.2.4.4 - Modelamento de objetos em lâminas (LOM)

O material base é fornecido em chapas ou em um rolo e possui adesivo em um dos lados. As camadas individuais são coladas com um rolo aquecido que ativa o adesivo. O perímetro de cada camada é cortado com um LASER que é calibrado para cortar apenas uma camada por vez. O material perdido interno é modelado em cubos para facilitar a remoção, mas permanece na plataforma de construção durante todo o processo para servir de suporte. O processo é mostrado na FIG 3.30.

De uma maneira geral, qualquer material que possa ser fornecido em lâminas pode ser usado, e o custo do material é proporcionalmente pequeno. O LOM é adequado para peças maciças e muito grandes, e possui uma velocidade de processamento até 10 vezes maior que os outros processos de prototipagem rápida.

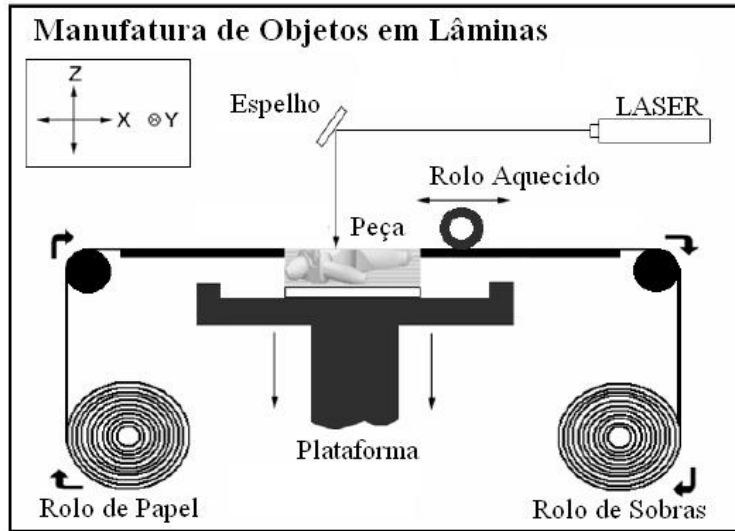


FIGURA 3.30: Manufatura de peças em lâminas de papel [33].

3.2.4.5 - Impressão tridimensional

As camadas de 20 micrômetros são impressas pelo jateamento da resina e do material de suporte na plataforma de construção por uma cabeça de impressão a jato, desenvolvida para expelir um polímero foto sensível, visto na FIG 3.31. Duas lâmpadas de ultravioleta situadas no cabeçote de impressão curam a resina imediatamente após o contato da gota com a base, permitindo uma alta velocidade de construção. Todo o processo é muito similar ao de uma impressora comum. Esse processo não necessita de pós-cura e pode ser lixado e polido imediatamente após o processamento.

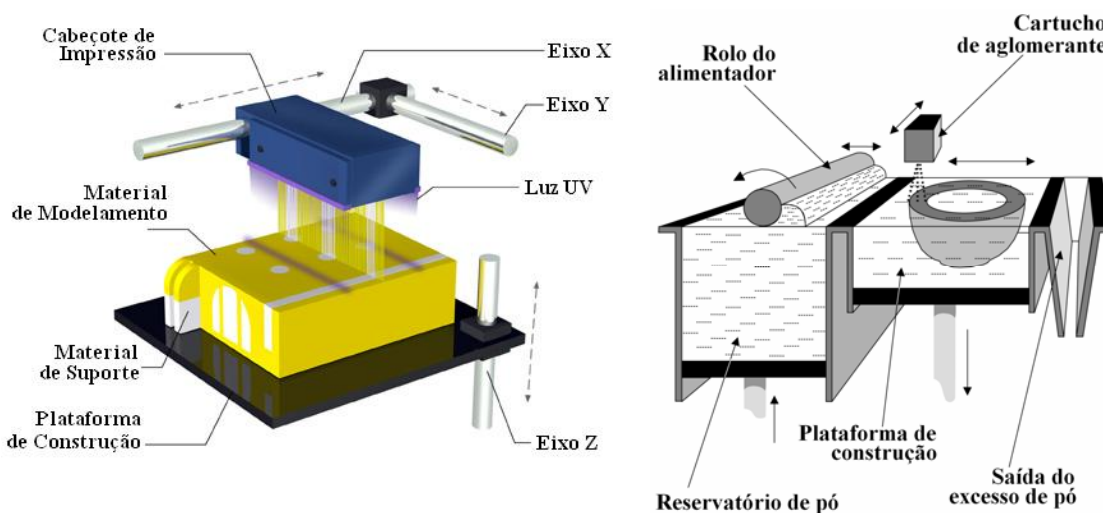


FIGURA 3.31: Impressão tridimensional com resina (esq.) [35] e com adição de pó (dir.) [37].

3.3 Ferramentas de projeto

Todas as medidas revistas até o momento têm impacto apenas na escala micro, componente a componente. Em sistemas complexos, a falha de um único componente é suficiente para inviabilizar todo o projeto, e o uso de ferramentas metodológicas para uma análise global do projeto é essencial para criar uma unidade.

De acordo com Bootroyd [37], 80% do tempo de projeto é gasto com 20% dos problemas. Sendo assim, identificar todos os problemas é crucial para se determinar quanto tempo será gasto em um projeto. Além disso, a lei de progressão de custos para sanar um problema mostra claramente que, quanto mais cedo for descoberto um problema, mais barato será consertá-lo. Sendo assim, um método para auxiliar o processo projetual é essencial.

Uma metodologia não é a chave para se encontrar a solução ótima em qualquer tipo de projeto [1]. A metodologia deve ser adaptada a cada projeto, equipe de trabalho e cultura da empresa, pois do contrário, se tornarão desconfortáveis e irritantes, e não será usada. Por isso uma boa metodologia deve ser simples para que seja aceita como óbvia. Uma metodologia deve então ter como base aquilo que é comum a todas as outras metodologias, que é a formalização dos procedimentos de projetos e a externalização do pensamento criativo [38]. Considerando resultados comuns do uso de outras metodologias, é possível se esperar as seguintes vantagens e tentar evitar as seguintes desvantagens:

Tabela 3.1: Vantagens e desvantagens do uso da metodologia.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none">• Foco• Organização• Repetibilidade• Objetivação	<ul style="list-style-type: none">• Aumento do trabalho• Burocratização• Resistência interna• Inibição da criatividade*

A inibição de criatividade ocorre quando a metodologia confina a criação de soluções a um formulário ou uma maneira burocrática. Segundo Alexander [39], metodologia

ajuda o criador a desconstruir os problemas complexos de um projeto em seus elementos constituintes para encontrar soluções concretas.

3.3.1 Ferramentas Metodológicas

O DFMA é uma ferramenta metodológica criada por Boothroyd e Dewthrust [37], com o intuito de analisar de maneira sistemática diferentes alternativas de projeto em sua capacidade de ser manufaturada e montada. Baseado na experiência acumulada por essa dupla, foram formuladas diversas regras de boas práticas que podem ser facilmente aplicadas a qualquer projeto trazendo vantagens reais.

A aplicação do DFMA foi questionada para projetos de baixa escala na época de sua introdução, pois poderia gerar uma maior quantidade de dados a serem trabalhados sem necessidade. A aplicação do DFMA nesses casos deve ser feita de maneira cuidadosa, e apenas parcial, porém com ganhos expressivos mesmo assim. O *design* para montagem, através de suas regras simples, pode simplificar muito a solução encontrada, sendo particularmente eficiente como uma ferramenta secundária de refinamento do projeto. O *design* para manufatura busca adaptar as soluções encontradas a um determinado processo escolhido. Segundo Boothroyd [37], a aplicação do DFA deve ser feita primeiro, levando a uma simplificação da estrutura do produto. Depois disso, o material e o processo mais adequado para cada peça deve ser determinado, e assim uma análise extensa de como modificar a geometria para se adequar melhor ao processo e ao material deve ser feito, o *design* para manufatura.

3.3.1.1 *Design* para montagem “DFA”

O reconhecimento das capacidades e limitações dos processos de manufatura disponíveis faz com que seja possível a especificação correta do processo de montagem de forma a aproveitar ao máximo os seus benefícios e alcançar a qualidade requerida a um custo/benefício ótimo. A facilidade de montagem reduz o custo de manufatura e a facilidade de inspecionar a conformidade melhora a qualidade e a confiabilidade do produto.

O *design* para montagem é dividido em duas partes. A primeira parte são três regras simples que podem ser aplicadas a qualquer projeto. A segunda parte são as análises de viabilidade de cada alternativa para acompanhamento do tempo de montagem e mão de obra necessária, ou decidir qual tipo de montagem é mais viável. Essa segunda parte também é acompanhada por diversas regras para otimizar cada tipo de montagem que está sendo utilizada.

A primeira regra do *design* para montagem afirma que duas peças só podem existir independentemente se:

- Existe um movimento relativo entre as duas peças;
- As peças devem ser de materiais diferentes (exemplo: uma é condutora e a outra deve ser isolante);
- Deve ser desmontável (exemplo: para fornecer acesso para manutenção ou montagem) [37].

Esse pequeno conjunto de condições é muito fácil de ser assimilado, e possui uma grande capacidade de melhorar o projeto, além de ser possível para o gerente de projeto ou um cliente verificar se essas regras estão sendo aplicadas, pois também podem assimilar e aplicar. As FIG 3.32 e 3.33 são exemplos reais onde as aplicações dessas três condições levaram a uma simplificação efetiva do sistema.

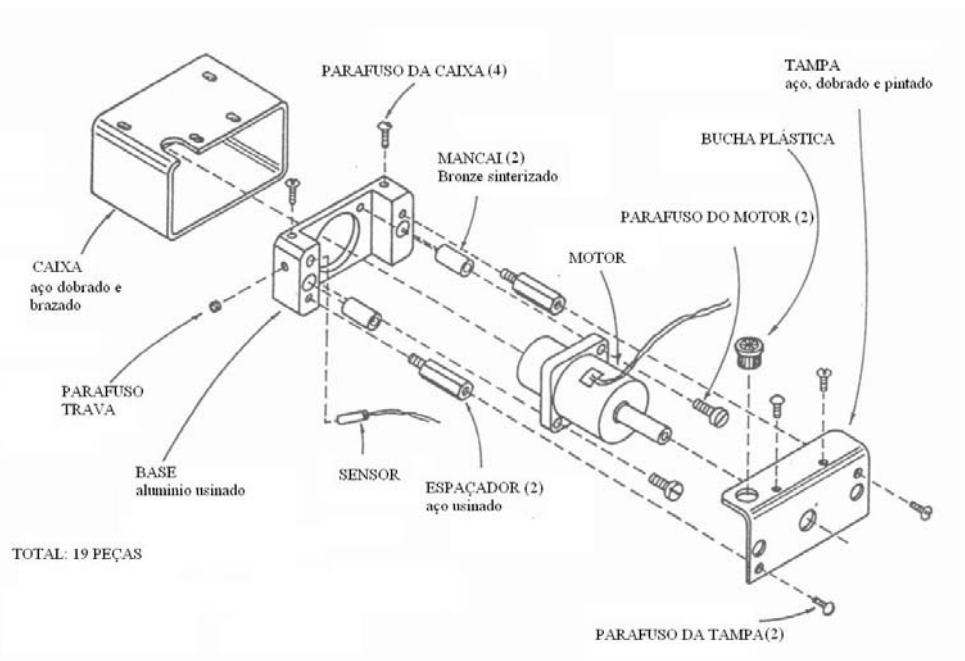


FIGURA 3.32: Montagem do motor antes da aplicação do DFMA [40]

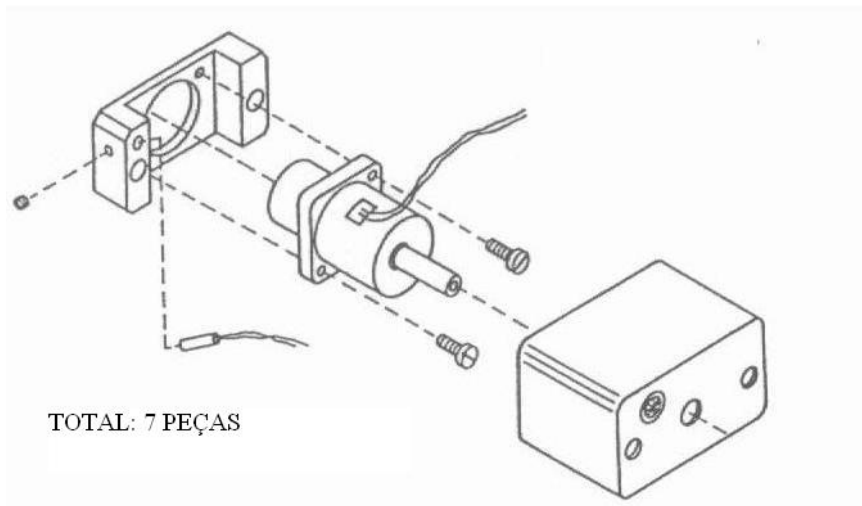


FIGURA 3.33: Montagem do motor depois da aplicação do DFMA [40]

No exemplo é fácil visualizar os benefícios, porém ainda é necessária a análise de viabilidade econômica, onde se compara o custo do novo ferramental dividido pelo tamanho do próximo lote a ser fabricado.

Outras recomendações do DFA não têm a eficiência da primeira, porém são indispensáveis para um bom projeto. Entre as diversas regras para os casos mais específicos, podemos destacar as mais genéricas e efetivas:

- Minimizar o número de peças;
- Criar módulos;
- Orientar para que a montagem seja vertical;
- Eliminar ajustes;
- Eliminar cabos
- Usar peças auto-gabaritantes;
- Eliminar a reorientação;
- Usar peças auto-travantes;
- Facilitar o manejo das peças;
- Usar peças padrão [40].

Os benefícios são claros, porém a dimensão do impacto é pouco estudada no caso dos protótipos. Boothroyd [37] descreveu os seguintes impactos na empresa aeronáutica McDonnell Douglas, e aqueles benefícios considerados universais são:

- Menos partes;
- Menos parafusos e rebites;
- Menor peso;
- Maior confiabilidade;
- Menos etapas de fabricação;
- Menos cálculos e dimensionamentos;
- Menos modelos CAD.

3.3.1.2 *Design* para a manufatura

O *design* para a manufatura é a ferramenta metodológica que irá reduzir os custos de fabricação de um produto sem comprometer sua qualidade. Para cada material escolhido, existem apenas alguns processos que podem manufaturar esse material adequadamente. Para cada processo de manufatura escolhido, existe um conjunto de regras que devem ser obedecidas para se obter bons resultados. Além desse conjunto de regras, que tem como foco apenas a fabricação de um componente, algumas atitudes devem ser pensadas de maneira global, entre elas:

- Reduzir o número de processos necessários para fabricar o conjunto;
- Reduzir a diversidade de matéria prima;
- Reduzir custo, tempo e lead time, sem prejudicar a qualidade.

Para obter resultados reais do uso do *design* para manufatura, não se pode olhar apenas do ponto de vista de cada componente, pois quando se escolhe um processo de manufatura e ele é estendido para todas as peças, mesmo que não seja o mais apropriado para essa ou aquela peça, ele traz vantagens globais, pois simplifica a logística e o processo de manufatura do produto como um todo.

A análise da geometria mais adequada vai ser definida pelo projeto, que foi devidamente simplificado pelo *design* para montagem. Com as restrições definidas, os pontos e atributos que não podem mudar, a geometria é alterada em volta dessas restrições para que se adapte da melhor maneira possível à forma de manufatura escolhida, como pode ser visto na FIG 3.34.

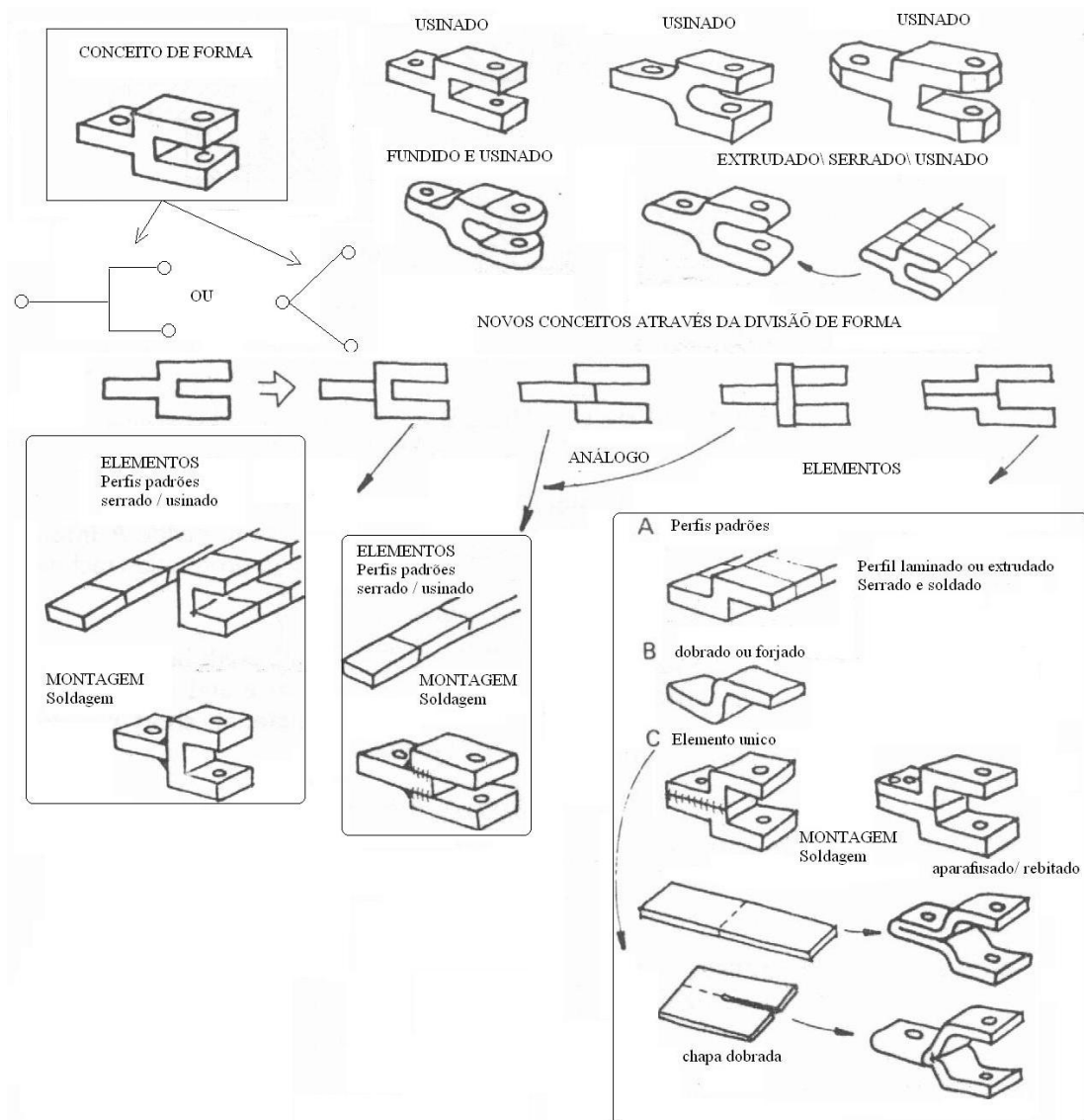


FIGURA 3.34: *Design* para a manufatura [40]

3.3.2 Projeto assistido por computador

As novas tecnologias que se popularizaram década de 1990, como o modelamento sólido, as bibliotecas virtuais, as galerias de imagens e a disponibilidade dos catálogos tridimensionais pelos fabricantes, permitiu que a atividade de geração de alternativas

projetuais se tornasse bem mais acelerada. Isso quer dizer que a geração de alternativas é mais rápida, porém a de problemas também. É um método de tentativa e erro onde a finalidade não é muito clara no começo, mas vai se definindo pouco a pouco.

A tentativa e erro se desenvolve através de três mecanismos diferentes, que são a evolução, o descarte e a desmembramento. Através do histórico, é possível se acompanhar a evolução e concluir quais os campos que necessitam de melhoramentos. Porém, no modelamento sólido, a maior vantagem de se possuir um histórico é porque boas idéias de modelos diferentes podem ser facilmente unidas e modificadas, num processo de desmembramento de módulos de desempenho satisfatório de vários modelos, pois a tecnologia permite que cada componente de um desenho seja movido e exportado como um objeto individual.

3.3.3 Metodologia para produtos de inovação

Nos produtos de inovação, é normal que a situação inicial de projeto seja mal definida e a final também, ou seja, é um problema não estruturado onde o problema nem a resposta são completamente compreendidos. A divisão taxonômica entre projetos estruturados ou não estruturados, ou de situações iniciais e finais definidas ou não, de maneira nenhuma define o grau de dificuldade de projeto [1].

Os projetos não estruturados possuem algumas características universais, e por mais que existam dados em abundância sobre o problema, considerá-lo não estruturado é uma atitude conservadora, pois se deve manter em mente sempre as seguintes características compiladas por Cross [38]:

- Não existe formulação definitiva do problema. Definições temporárias devem ser formuladas, mas devem ser descartadas sempre que existir novas informações disponíveis;
- Qualquer formulação pode incorporar inconsistências;
- A formulação do problema é dependente da solução. A forma em que a solução é concebida influencia o modo que o problema irá ser concebido;
- Propor soluções é a melhor maneira de se entender o problema;

- Não existe solução definitiva para o problema. “Diferentes soluções podem ser respostas igualmente válidas para o problema inicial. Não há uma avaliação objetiva tipo verdadeiro ou falso da solução, apenas bom ou ruim, apropriado ou não”.

Normalmente são tomadas algumas atitudes para melhorar a definição do problema, através de exploração do cliente, coletando dados, fazendo pesquisa de mercado etc. Na definição do produto, o cliente interno ou externo, nem sempre tem um papel crucial. Diferente de outros tipos de problemas, a pessoa que define o problema não conhece qual é a resposta, mas irá reconhecer a correta quando a ver [38]. Porém, qualquer desafio de criação é um sistema interativo entre problema-solução, e quando não se conhece a resposta, também não ira conhecer completamente o problema.

Além do fato de que as explicações do cliente para o projetista serem bastantes vagas, sempre haverá uma grande faixa de critérios a serem satisfeitas, e nenhuma delas deve ter prevalência sobre as outras [38]. O cliente não tem o dever de conhecer esses critérios extras, mas o projetista sim, pelo menos até o momento antes da criação da proposta final. Por isso que o projeto de criação é um processo interativo onde a formulação de respostas leva a uma compreensão melhor do problema. Esse processo de aprendizado através de propostas formuladas e descartadas é um processo mental de tentativa e erro.

3.4.3 Convergência de soluções

O prazo e o custo são atualmente as variáveis dominantes, e uma das maneiras mais rápidas de se alcançar uma resposta aceitável é investindo o máximo possível em soluções em potencial, e usar isso como um meio de entender melhor o problema. Outro problema que deve ser combatido é o uso de metodologias com diversas retro-alimentações que impedem um raciocínio linear, fazendo a extração de informação mais exaustiva sem implicar em maior clareza [41].

Normalmente os projetistas evitam a retro-alimentação através da tomada de decisões estratégicas de alto nível, avançando rapidamente para uma investigação completa de uma opção promissora. Se essa decisão estiver correta, terá economizado bastante

tempo, se não, tentar outra opção com base no conhecimento adquirido ainda é melhor que gastar grande quantidade de tempo com investigações e estudos que nem sempre geram informações pertinentes ao produto em questão [38]. Raramente uma solução aceitável vai ser alcançada na primeira proposta, e vários ciclos serão necessários até alcançar o objetivo.

Em um projeto, deve se dar um bom “chute inicial”, para determinar o erro e ganhar conhecimento das condições que rodeiam o problema. Uma segunda tentativa já irá incorporar esse aprendizado, pois foi baseada na primeira tentativa e com certeza chegará mais próximo da meta. Uma mudança aleatória não garante a convergência, e por isso é sempre importante que no processo de tentativa e erro exista coerência na forma em que vai se propor à próxima solução. Por isso, em geral é regra entre os projetistas dividir um projeto em partes, pegando a mais deficiente e fazendo de tudo para melhorar, descartando e criando um novo módulo a partir do zero, evoluindo a partir do conceito existente ou mesclando com outras versões previamente concebidas. Se ao final desse ciclo ainda não foi encontrada a resposta, modifica-se a parte menos satisfatória dando continuidade ao ciclo. Dessa forma, o produto é desenvolvido sem perder o foco e sem se distanciar de boas soluções feitas para módulos do projeto.

Uma das maneiras mais eficientes de se estudar a solução proposta e aprender com os erros dela, é através da construção de um protótipo. O modelo físico também acumulará a função de facilitar a comunicação entre projetista e cliente, podendo extrair ainda mais informações sobre o que ele realmente deseja.

3.4 Protótipos

Vários tipos de projetos podem ser considerados protótipos, variando desde produtos únicos até a criação de uma pré-série, modelos idênticos aos que serão construídos aos milhares. Existem também protótipos de componentes, subconjuntos e até virtuais. Sendo assim, é necessário separar os vários tipos de protótipos de acordo com cada caso.

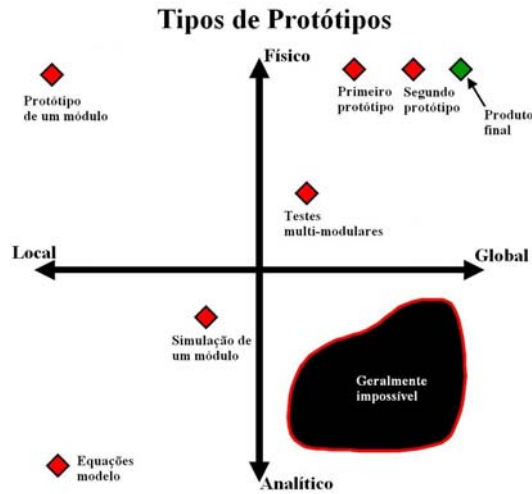


FIGURA 3.35: Tipos de protótipos [42].



FIGURA 3.36: Tipos de protótipos [42].

Uma classificação dos tipos de protótipos pode ser visualizada na FIG 3.35, onde do lado esquerdo ficam a escala micro, ou seja, protótipos para testes reais ou virtuais de componentes e sub-conjuntos do produto, e do lado direito o macro onde temos os testes de múltiplos sistemas ou do sistema completo. É importante ressaltar que com o avanço das ferramentas CAE, as simulações em computador de componentes, ou mesmo de sub-conjuntos, gera resultados excelentes, e pode dispensar a construção de um protótipo físico. Isso, porém, não se aplica para o conjunto completo, onde os modelos computacionais estão longe de prever completamente todas as variáveis envolvidas em um grande projeto, e por isso protótipos físicos globais são indispensáveis. A classificação dos protótipos físicos e globais pode ser visto na FIG 3.36.

Na indústria automobilística, onde o risco técnico é alto e o custo do protótipo também, praticamente não existem protótipos. Todo o ferramental necessário para a construção do futuro veículo é construído para o protótipo. A função da pré-série nesses casos é apenas avaliar itens do campo global analítico como conforto, vibração, dirigibilidade, estanquidade e ruído. Caso exista algum problema, medidas corretivas são tomadas, com conseqüente aumento de custo. Porém, se não comprometerem a segurança ou as vendas, esses consertos muitas vezes não são realizados.

Na indústria aeronáutica a característica mais marcante é o grande tempo do ciclo de projeto, e o alto custo de qualquer protótipo. Outro problema marcante é que, por ser um mercado internacional com diversas agências regulatórias, a certificação costuma ser demorada. Uma vez que as exigências de custo e segurança são primordiais, é difícil cortar tempo de projeto, porém para cortar tempo de certificação vários protótipos são criados, para que se acumule hora de vôo mais rapidamente. Em geral, erros detectados são corrigidos independente do custo, uma vez que o ciclo de vida de um projeto é de dezenas de anos, e irá demorar muito até uma nova versão. Outro fato interessante da indústria aeronáutica é a venda da maioria dos protótipos após a certificação, sendo guardadas apenas algumas poucas unidades para futuros testes e certificações.



FIGURA 3.37: Equipamento para teste do protótipo físico – local [43].

Na FIG 3.37 vemos uma grande estrutura criada somente para testar a longarina central da asa do protótipo do novo Boeing 787

Na indústria naval, onde cada navio é único na maioria dos casos, a construção é tão extensiva e complexa que os ganhos na produção de pequenas escalas são ínfimos comparados à personalização dos navios de acordo com cada cliente, por isso não existe protótipo.

Na pesquisa e desenvolvimento de produtos de inovação, temos características distintas das outras três indústrias citadas acima, pois em geral não existe grande “know-how” do assunto, como a indústria automotiva, ou grande tempo de projeto, como a indústria aeronáutica. Também não é um projeto de grande complexidade, alto custo e dezenas de meses de fabricação, como a indústria naval.

O maior problema da inovação da indústria robótica é porque seus protótipos estão posicionados no campo do alto risco técnico e alto custo de fabricação. O objetivo é tentar trazer para o campo do baixo custo e alto risco técnico, para que em uma segunda fase, com a possibilidade de se construir vários protótipos durante o desenvolvimento, os riscos técnicos possam ser reduzidos pela experimentação, como pode ser visto na FIG 3.38.



FIGURA 3.38: Posicionamento da robótica no mercado [42 - modificado].

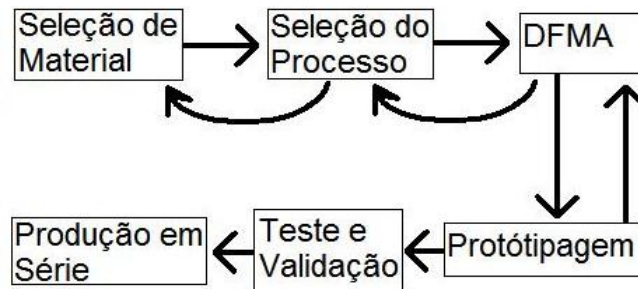


FIGURA 3.39: Cadeia do desenvolvimento do produto.

Para se obter essa redução de custos, passo indispensável para o reposicionamento da robótica no cenário atual, é necessário rever todo o processo de concepção, mostrado na FIG 3.39. Cada elo dessa corrente possui um efeito significativo na qualidade e no custo final do produto.

4 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

4.1 Estudo de caso A - Sistema de soldagem orbital

As técnicas descritas nesse trabalho foram utilizadas em um serviço para a empresa ROTECH entre 2003 e 2005, ou foram desenvolvidas a partir da experiência adquirida.

O problema era pesquisar, desenvolver, construir e operar um robô que fosse capaz de soldar tubulações de gás e óleo de maneira rápida e confiável, e adaptável para qualquer diâmetro de duto. Como se tratava de um produto nunca desenvolvido nacionalmente, com exceção de um estudo preliminar do próprio laboratório e inédito internacionalmente para pequenos diâmetros, não havia nenhuma base de como deveria ser o mecanismo para realizar a tarefa. Também nenhum outro robô desenvolvido possuía quatro graus de liberdade, para reproduzir parcialmente o movimento da tocha operada por um humano.

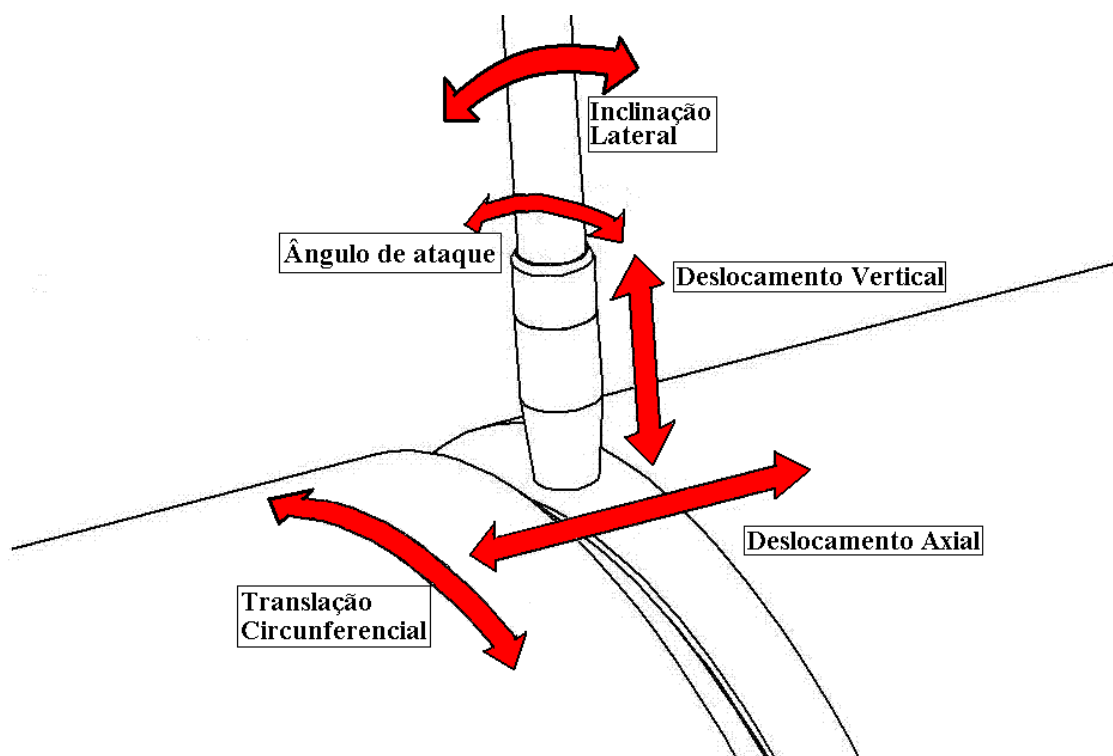


FIGURA 4.1: Graus de liberdade da soldagem.

O soldador possui 5 graus de liberdade a controlar, como visto na figura 4.1, sendo três de translação e dois de rotação. Os três graus de translação são indispensáveis para

posicionar a tocha no chanfro, o ângulo de ataque para “puxar” e “empurrar” a poça, e a inclinação lateral para compensar um desnível da peça a ser soldada. Para a criação do robô de solda, a inclinação lateral foi considerada desnecessária, e por isso o dispositivo possui 4 dos 5 graus possíveis.

A automação da construção de dutos no Brasil raramente é utilizada, sendo a soldagem normalmente realizada manualmente pelo processo SMAW, de qualidade razoável e baixa produtividade, como visto na FIG 4.2. A possibilidade de ganhos na produtividade alcança mais de 100% comparado ao processo SMAW, além do ganho expressivo em qualidade e uniformidade.



FIGURA 4.2: Soldagem manual de dutos [43].

O problema foi dividido em três grandes áreas: processo de soldagem, sistemas eletrônicos e sistemas mecânicos. Em todos os três era preciso muito tempo de pesquisa para o sucesso do conjunto, sendo necessária uma engenharia simultânea para desenvolvimento do sistema completo em tempo hábil. Por isso, desde o começo houve a necessidade de um sistema mecânico minimamente funcional disponível o mais prontamente possível para que pudesse ser possível começar testes dos componentes eletrônicos e a qualificação da solda. Para isso foi construído o projeto piloto.

O projeto piloto foi desenvolvido em três meses, prazo relativamente curto para esse tipo de projeto, para permitir a engenharia simultânea e fazer os testes preliminares. Para fabricar rapidamente e tentar reduzir os custos, várias peças foram adaptadas para serem cortadas a LASER e montadas com soldagem GMAW, porém uma parte foi usinada manualmente. Como foi dito que o robô poderia trabalhar em ambiente com

maresia, optou-se pelo uso do aço inox. O projeto teve várias modificações na parte mecânica antes da decisão de ser abandonado em favor de uma configuração que atendesse melhor as demandas. Essa nova configuração seria desenvolvida de acordo com os métodos de projeto de produto revistos, como o DFMA, LOM, RM e seleção de material, e somaria o conhecimento adquirido nos testes preliminares com o projeto piloto.

4.2 Estudo de caso B – Scanner Ultra-sônico

O scanner ultra-sônico foi um projeto encomendado pela empresa ROTTECH Tecnologia Robótica em 2006, para automatizar o ensaio não destrutivo de soldas de dutos. O equipamento ultra-sônico foi fornecido e era necessário o desenvolvimento de uma plataforma para fixação e deslocamento do cabeçote ao redor do tubo.

O ensaio por ultra-som se baseia na detecção de defeitos através da reflexão do som, que é gerado por um transdutor montado em um cabeçote. Como a transmissão do som do cabeçote para o material testado depende da qualidade da interface, a qualidade do teste se torna dependente do operador que está manipulando o equipamento, como mostrado na FIG 4.3. Os sistemas automáticos permitem uma maior uniformidade dos resultados, deixando ao operador a tarefa de interpretá-los. Seria possível também um ganho de produtividade, uma vez que a plataforma poderia carregar múltiplos cabeçotes.



FIGURA 4.3: Inspeção manual e automática de dutos já existentes no mercado [45].

O cabeçote ultrassônico deve se deslocar ao longo da solda e possui 4 graus de liberdade, mostrados na FIG.4.4. A translação circunferencial desloca o cabeçote ao longo da solda, o axial aproxima para mudar a profundidade inspecionada e o giro no próprio eixo para detalhar melhor o defeito. O cabeçote deve sempre ser firmado ao tubo com um nível mínimo para garantir a transmissão dos pulsos de som. Como a maioria dos tubos possuem defeitos de circularidade, as vezes é preciso deslocar vários milímetros para manter contato, fazendo disso mais um grau de liberdade. Optou-se por desenvolver um sistema com três graus de liberdade, uma vez que o giro é desnecessário com a tecnologia “phased array” de ultrassom.

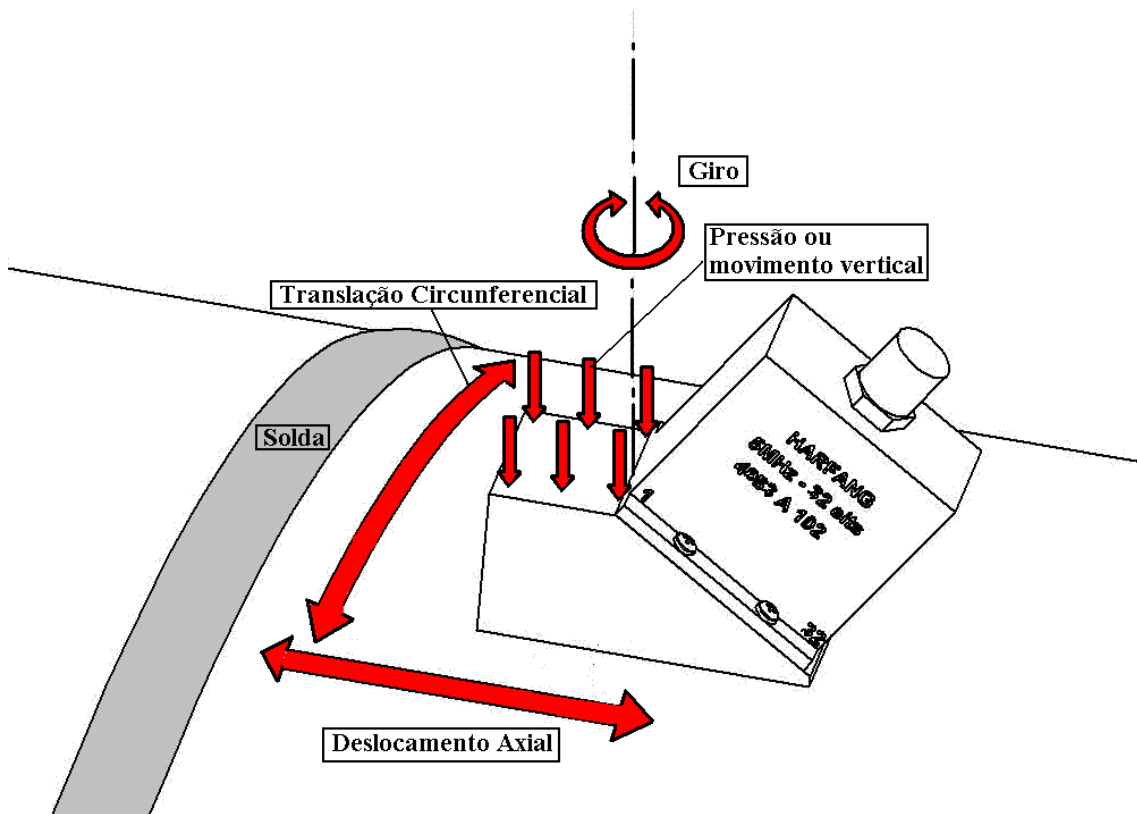


FIGURA 4.4: Graus de liberdade de um cabeçote ultrassônico.

O cliente contratou o LRSS- UFMG para o desenvolvimento dessa plataforma e a construção de um protótipo de validação do conceito, com um prazo estipulado de 6 semanas. Como a maior parte desse tempo seria gasto com a pesquisa e o desenvolvimento do projeto, optou-se pelo modelo rápido e testado descrito no estudo de caso A. A expectativa era de que o tempo extra gasto no projeto detalhado fosse compensado com uma construção e montagem simplificada. Porém, o desenvolvimento desse projeto é diferente, pois as técnicas desenvolvidas no estudo de caso A são para re-projeto de produtos, e nesse caso está sendo utilizado no projeto piloto.

Apesar deste projeto ser uma derivação do primeiro, possui características próprias, como a necessidade de ser vedado para água, ter suporte para múltiplos sensores, ter maior portabilidade e ser movido a bateria. Por isso, todas as técnicas serão aplicadas tendo em vista essas novas necessidades, entre elas, a otimização do sistema de transmissão por corrente para torná-lo mais robusto.

5 RESULTADOS

5.1 Resultados do estudo de caso A

A criação rápida de um projeto piloto garantiu o desenvolvimento paralelo do projeto mecânico, eletrônico e da qualificação da soldagem, e o resultado pode ser visto na FIG.5.1. Os testes preliminares e os acertos de parâmetros de soldagem puderam começar assim que o sistema mecânico foi disponibilizado.

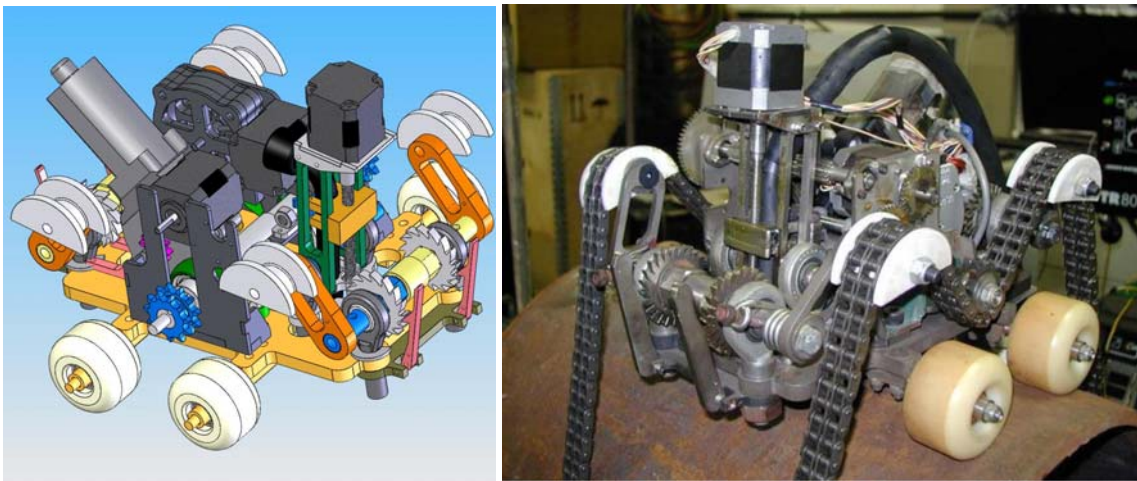


FIGURA 5.1: Projeto piloto.

Do ponto de vista mecânico, porém, os resultados foram considerados fracos, e foi notado que existia uma grande margem para melhorar custo e qualidade do projeto. Os principais defeitos encontrados foram:

- Excesso de peças;
- As peças cortadas no LASER necessitavam de extensa usinagem e limpeza;
- Alto custo das peças usinadas;
- Baixa resistência do aço inox.

Apesar do uso do corte a LASER nessa primeira tentativa ter um efeito mais negativo do que positivo, notou-se que algumas peças tinham excelente tolerância dimensional, bom acabamento e baixo custo, e que se houvesse o cuidado de aproveitar melhor a capacidade da máquina, os benefícios seriam grandes.

O custo, que não era o foco principal no projeto piloto, tornou-se um dos fatores principais. As nove adaptações feitas no projeto piloto nunca atendiam completamente, porque tinham que ser projetadas para se adaptar à base existente, que havia custado caro e não podia ser dispensada a cada modificação. E para a segunda versão, mesmo consertando todos os defeitos do projeto piloto, certamente seriam necessárias várias modificações. Sendo assim, o objetivo se tornou descobrir uma nova maneira de fabricar que pudesse ser barato e rápido, para que a cada modificação o antigo pudesse ser descartado.

O projeto piloto foi estudado de acordo com as metodologias descritas na revisão bibliográfica e foi completamente refeito para que pudesse atender todas as demandas já existentes e algumas novas demandas que por falta de espaço não podiam ser adaptadas no projeto piloto, como o sistema de fixação no tubo automático e o porta cabo.

5.1.1 Seleção de material

O material selecionado para a construção do projeto piloto foi o aço inox, pois foi considerado que a resistência à corrosão seria a variável principal a ser contemplada. Porém a falha por escoamento de algumas peças do sistema de fixação do robô ao tubo, mostrou que a resistência mecânica era um fator de peso, mas poderia ser remediado através da mudança de geometria da peça.

O fator que mais pesou contra o aço inox, no entanto, foi sua capacidade de processamento. A usinagem dos eixos finos era muito difícil e empenavam facilmente durante o processo. O corte térmico era limitado a espessuras médias, e não podia fazer a maior parte dos furos para os parafusos pequenos, que tinham que ser furados manualmente. Também deixava um óxido duro e fortemente aderido à superfície cortada que impedia a obtenção de tolerâncias adequadas. A soldagem dos componentes não chegou a ser um fator limitante, mas exigiu uma atenção especial.

Por último, se objetivo é fazer um protótipo tão barato que possa ser descartável, então o custo passa a ter um peso maior. Sendo assim, as variáveis a serem atendidas eram: custo, resistência mecânica, resistência a temperaturas moderadas, resistência a raios

ultravioleta, boa soldabilidade e boa usinabilidade (torneamento e corte térmico) e resistência à corrosão.

Levando em consideração todos os fatores acima, e limitando-se apenas aos materiais fornecidos em chapa e que podem ser cortados a LASER, foi escolhido o aço carbono 1020. O principal motivo foi o baixo custo e a melhor capacidade de processamento dentre todos os materiais. É um material facilmente usinável e o seu corte térmico fornece superfícies excelentes com tolerâncias adequadas, além de ser facilmente soldável. A resistência mecânica era adequada mesmo em temperaturas médias e a resistência à corrosão seria alcançada através da zincagem das peças.

5.1.2 Seleção do processo

Para que o processo de corte térmico a LASER pudesse fornecer peças a um custo baixo, é preciso que se aproveite todo o potencial da máquina. Para isso, era necessário conhecer os detalhes do funcionamento e a capacidade de manufatura do equipamento, e projetar as peças otimizadas para essas características.

Como não foi encontrada bibliografia descrevendo quais métodos de projeto devem ser adotados quando se trabalha com corte a LASER, essas características foram pesquisadas entre os operadores de máquinas de corte a LASER no estado de Minas Gerais e podem ser resumidas a seguir:

- Corte bidimensional (na maioria das máquinas);
- Para tolerância adequada a espessura do corte, que varia a cada máquina, deve ser compensada;
- Furos, quinas e entalhes possuem dimensões mínimas, dependentes da espessura da chapa e da potência da máquina;
- Espessura limitada de acordo com a potência da máquina e pela condutividade térmica do material;
- Anisotropia da chapa laminada. A orientação do componente na chapa deve ser levada em conta se o componente for estrutural;

- Para ser economicamente viável, o corte deve ser a única etapa de manufatura da peça;
- Materiais de alta refletividade exigem preparo prévio da superfície;
- Deve ser minimizado o número de chapas de espessura diferente quando estão se fabricando poucas unidades.

Outra característica importante é que no corte a LASER, não importa se a próxima peça a ser cortada é igual ou diferente, desde que esteja na mesma chapa, fazendo com que os benefícios de escala sejam minimizados. Porém, devido a questões de programação e lead time, quanto menos tipos diferentes de chapas forem cortados, menor será o tempo gasto alimentando e programando a máquina, apesar deste ser um ganho marginal.

Outro fator comumente negligenciado é o fato de que não é necessário gerar plantas detalhadas para a manufatura com o LASER. Em um projeto complexo e de múltiplas peças como o sistema orbital, pode-se gastar até uma semana gerando, conferindo e imprimindo todas as plantas.

Para a união dos múltiplos componentes, foram projetadas peças adequadas para serem unidas pelo processo GMAW e GTAW. Peças projetadas para o processo GMAW foram desenhadas com um filete apropriado para a deposição de material de adição, como pode ser visto na FIG 5.5 à direita. Esse filete, porém, normalmente necessitava de esmerilhamento para a retirada de qualquer excesso que fosse causar interferência. Por esse motivo, essa configuração deu lugar a juntas para a soldagem GTAW, que se aproveitavam do sistema auto-gabaritante das peças, e apenas deixando a peça positiva, o macho do encaixe, um pouco mais comprido para fornecer material de adição, era possível realizar soldas autógenas de qualidade mais que satisfatória e causando muito pouco empenamento, já que a adição de calor sempre ficava em uma região de maior massa e rigidez.

5.1.3 Design para a montagem

O estudo do DFA indicou que era necessária a modularização do manipulador da tocha de solda, pois é o componente principal do robô e era de difícil acesso, construção, montagem e não possuía um movimento amplo suficiente. O manipulador foi

redesenhado em um módulo independente, mais eficiente, e pode ser visualizado na FIG 5.2.

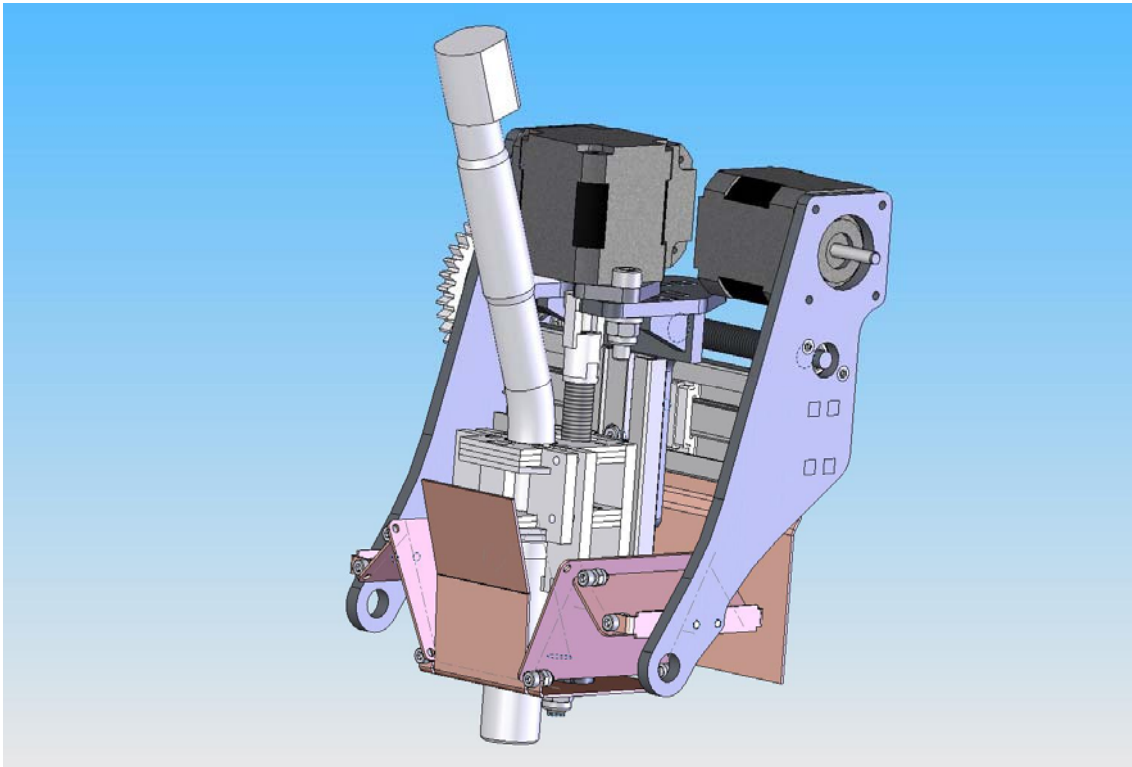


FIGURA 5.2: Módulo manipulador da tocha.

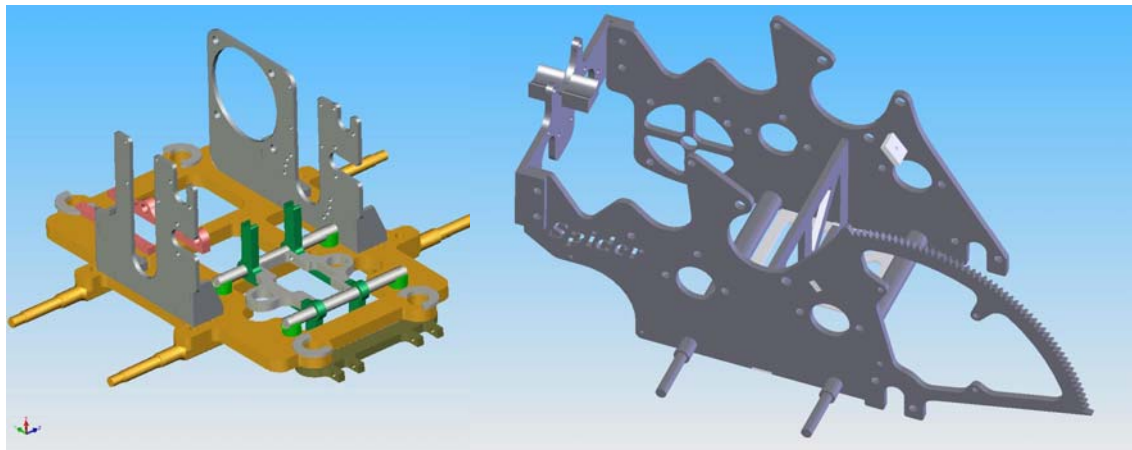


FIGURA 5.3: Estrutura antiga (esquerda) e a estrutura nova (direita).

A segunda necessidade indicada era a unificação das varias peças de fixação de componentes em uma única estrutura. No projeto piloto, a base foi colocada na horizontal, e à medida que novos componentes elétricos e mecânicos foram adicionados isso se mostrou um erro, pois a maioria desses componentes era de fixação em uma base vertical. Uma nova estrutura que contivesse todas as fixações, além de acumular o

máximo de outras funções como transmissão e mancal de sustentação, devia ser projetada. Essa nova superestrutura tinha como função primária se encaixar na primeira parte do projeto que havia sido redefinida, e pode ser visualizada na FIG 5.3.

Uma vez que a base estava devidamente modificada, simplificações tipo eliminação de reduções intermediárias e a incorporação da transmissão em outras peças deveriam ser feitas para simplificar o projeto e diminuir o número de peças usinadas, como mostrado na FIG 5.4.

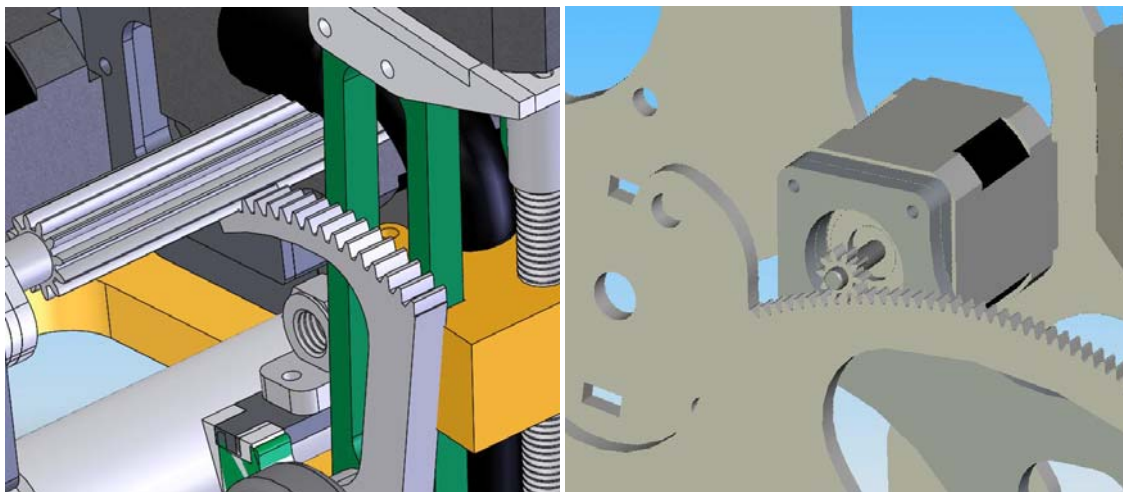


FIGURA 5.4: Engrenamento para o movimento angular antigo (esquerda) e o novo (direita).

5.1.4 Design para a manufatura

Uma vez consertados os principais problemas do sistema e reduzido o número de componentes, a atenção foi dada às pequenas peças que eram difíceis de construir, ou que poderiam ser facilmente adaptadas para a fabricação através do corte a LASER através das técnicas de DFM. A FIG 5.5 mostra um acoplador feito de três pequenos pedaços de tubos que eram serrados e soldados, porém era difícil se obter a tolerância adequada na distância entre centros dos tubos. Para conseguir reproduzir essa estrutura tridimensional através do laser, ela foi dividida em vários pedaços a serem unidos através de uma estrutura autogabaritante, montados de forma vertical e soldados no filete lateral desenvolvido para este propósito.

Outro exemplo interessante é de outra peça usada no acoplamento da tocha de solda, onde uma peça fresada foi substituída por uma peça fabricada no LASER usando os

mesmos princípios. É necessário destacar que essa troca foi feita com ganhos, pois o LASER poderia fazer as estrias para aumentar a área de contato sem nenhum custo adicional, enquanto as mesmas estrias ou equivalente usinado poderia dobrar o custo da peça. A diferença de tamanho das peças na FIG 5.6 é devido à mudança de acoplamento na guia, porém a função desempenhada é exatamente a mesma. A peça foi elaborada toda em chapas de três e cinco milímetros e é importante notar que a peça forma uma montagem rígida mesmo antes de ser unida, através de soldagem autógena das regiões de acoplamento.

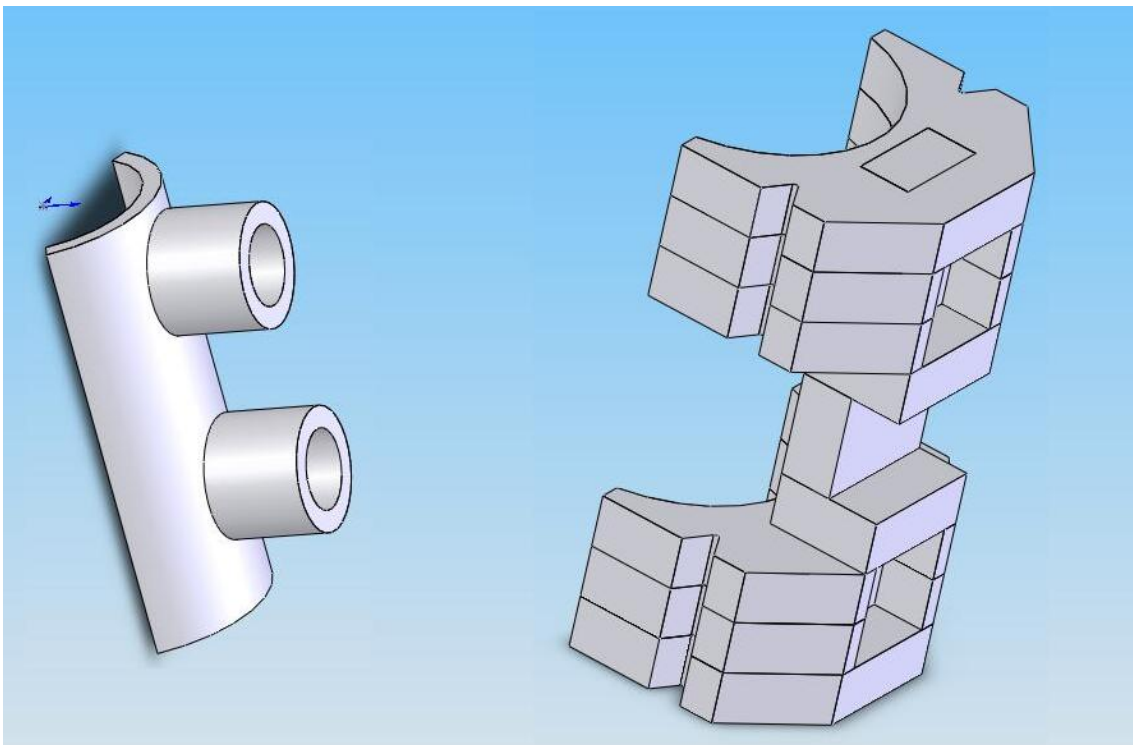


FIG 5.5: Sistemas de acoplamento da tocha de solda

O resultado final foi um robô com suas capacidades expandidas, maior espaço interno para futuras alterações, que foram necessárias, e capaz de receber novos equipamentos em seu interior. A necessidade de tolerâncias foi eliminada e a montagem não necessita de ajustes laboriosos. A quantidade de juntas aparafusadas também diminuiu, pois onde não era necessário desmontar a junta foi projetada para ser soldada. O robô em sua configuração final pode ser visto na FIG 5.7.

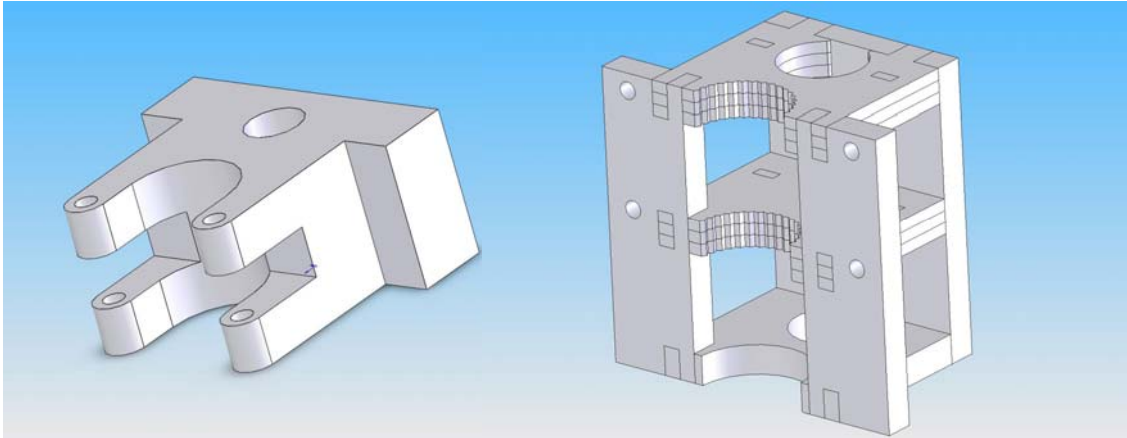


FIGURA 5.6: Sistemas de fixação da tocha.

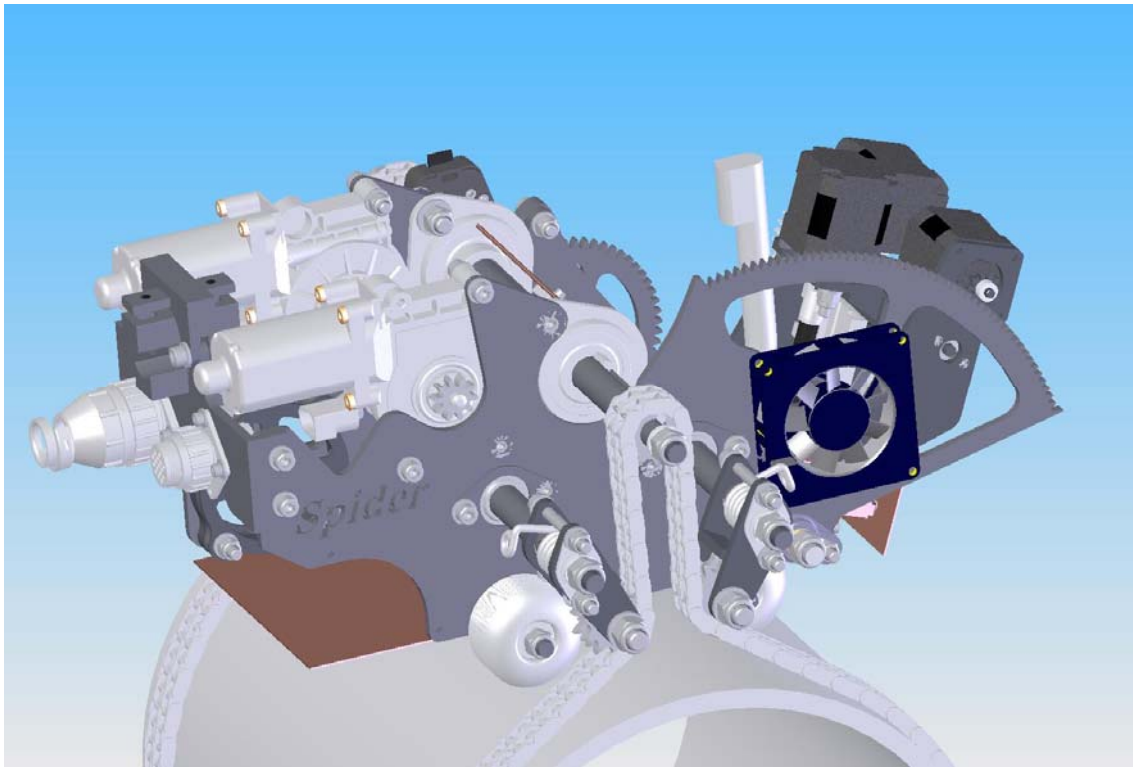


FIGURA 5.7: robô de solda em sua segunda versão.

5.1.5 Prototipagem

A construção dessa segunda versão levou quase metade do tempo gasto no projeto piloto, em parte pela maior experiência da equipe, e principalmente porque havia muito menos componentes para fabricar. Como os processos de manufatura foram limitados a apenas o torneamento e o corte a laser, houve uma melhora significativa na logística, sendo necessários menos fornecedores, uma menor variedade de matéria prima e uma menor quantidade de plantas para construção.

A mudança do material trouxe os efeitos desejados, e a zincagem trouxe proteção adequada contra a corrosão. O custo baixo permitiu que vários robôs pudessem ser construídos, sem ter que fazer uma adaptação grosseira para aproveitar a base existente. Até o presente momento, já foram produzidas nove unidades do sistema orbital, uma foto da versão mais nova pode ser vista na FIG 5.8 e seu teste em campo na FIG 5.9.

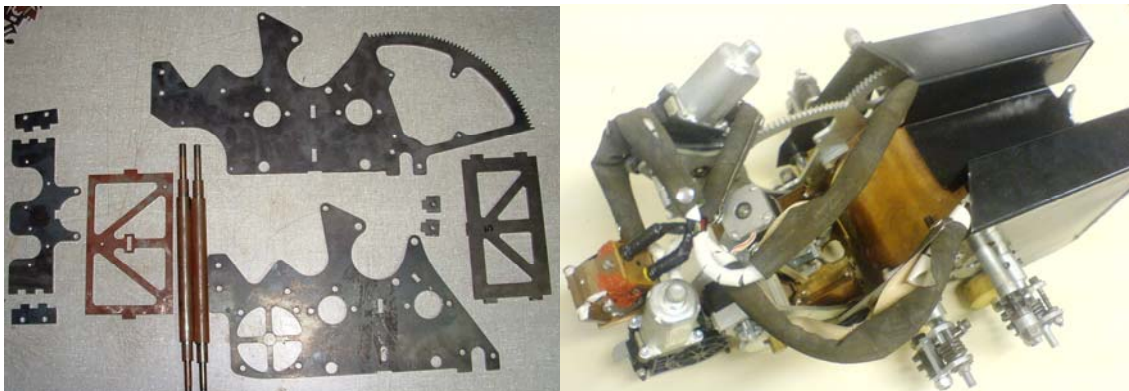


FIGURA 5.8: Peças cortadas a LASER e versão mais recente do protótipo.



FIGURA 5.9: Teste em campo do sistema orbital de soldagem.

5.1.6 Análise dos resultados do estudo de caso A

Como foi proposto por Cross [38], não existe projeto errado, e sim projetos que são adequados ou não para as demandas. Nesse projeto o objetivo era buscar a eficiência e a simplicidade, e a estrutura hierárquica é a ferramenta para mensurar esta simplicidade.

A estrutura hierárquica é uma representação desenvolvida por Gui Bonsiepe [1] para definir como o produto é constituído. Ele serve como uma maneira rápida e desfigurada de sua geometria de como o produto se organiza. Dessa maneira, fica mais fácil de se observar quais itens devem ser modularizados, agrupados ou eliminados. Para isso, porém, deve-se utilizar a linguagem dos padrões proposta por Christopher Alexander [39], para que os grupos sejam separados de acordo com suas afinidades. A simetria e os subconjuntos podem afetar fortemente o tamanho da árvore.

A estrutura, apesar de não consumir muito tempo para construir mesmo em um produto relativamente complexo, é hoje gerada automaticamente pelos programas CAD de modelamento sólido, junto com outras listas como a quantidade de material requerido (BOM – Bill of Materials) e características físicas. Sendo assim, é possível se acessar de maneira rápida e prática a composição da árvore à medida que o projeto é realizado, desde que a hierarquização dos desenhos seja feita com rigor. Nas FIG 5.10 e 5.11 é possível notar a diferença da estrutura dos dois robôs, que apesar de desempenharem a mesma função, se moverem ao redor do tubo da mesma maneira e se prenderem através de mecanismo semelhantes, possuem árvores bem diferentes.

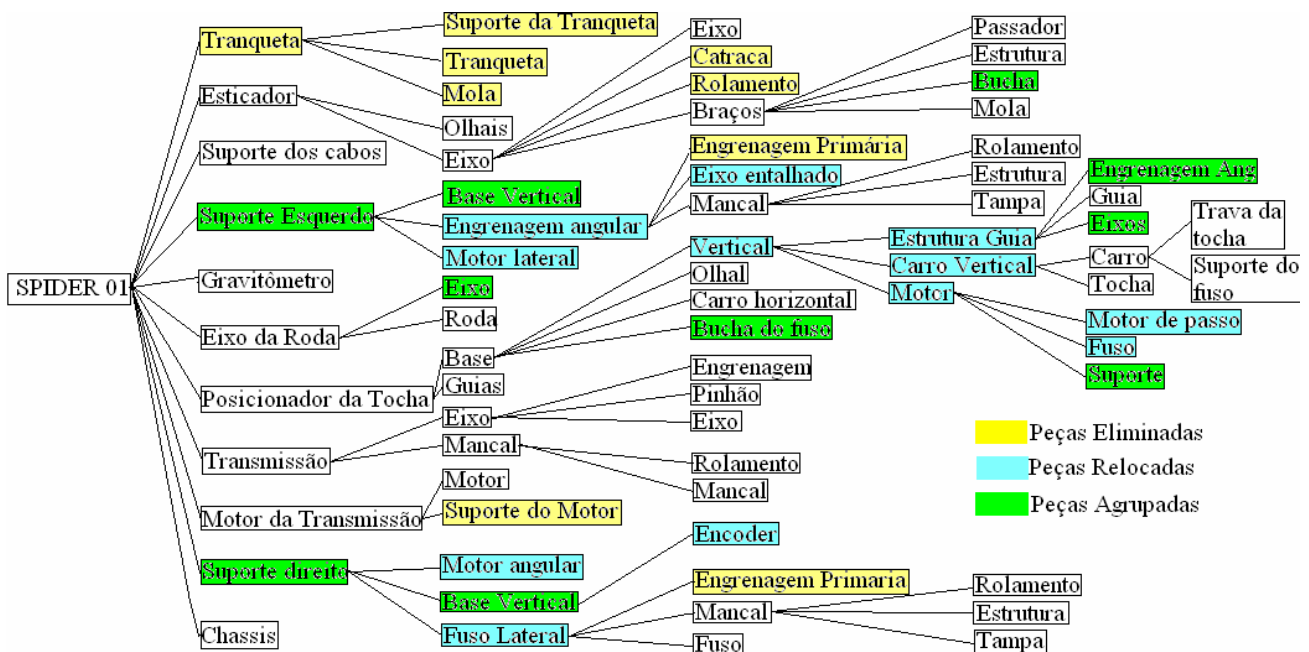


FIGURA 5.10: Árvore hierárquica do projeto piloto.

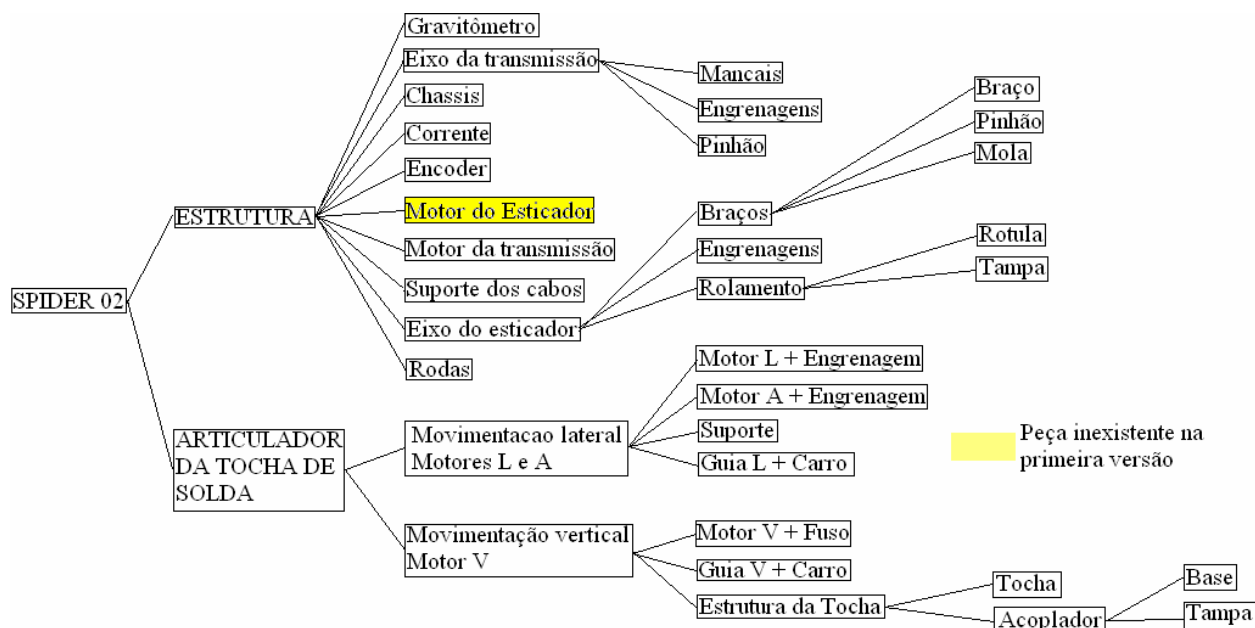


FIGURA 5.11: Árvore hierárquica da segunda versão.

O custo também foi reduzido drasticamente. Os componentes mostrados nas FIG 5.5 e 5.6, quando eram usinados custavam aproximadamente R\$25 cada, para manufatura unitária. Já o sistema montado pela união de diversas chapas, cada uma de 3mm custou R\$0,14, e R\$0,22 as de 5mm, totalizando um custo de R\$1,72 para a primeira peça e R\$1,98 a segunda (preços em 1/2004). O custo da montagem e da soldagem não foi computado, pois foi realizado dentro do laboratório, mas a diferença é muito grande e a soldagem um processo muito barato. Mais detalhes sobre o custo de componentes encontra-se no anexo H (preços em 12/2006).

5.2 - Estudo de caso B – Sistema de Ultra-Som Orbital

Uma vez que o tempo para o desenvolvimento era extremamente curto, optou-se pela utilização da mesma base de conhecimento adquirida no caso A, pois proporcionava excelente qualidade sem a necessidade de trabalho excessivo com a montagem. Porém, uma análise de projeto para a montagem (DFA) indicou uma redundância de eixos no sistema do estudo de caso A, que serviu de inspiração para este projeto. O sistema do estudo de caso A possui cinco eixos, sendo dois para as rodas, dois para os esticadores e um para a transmissão. Por isso, novas alternativas para o sistema de fixação no tubo foram criadas e apesar de um sistema de três eixos ser possível, ele seria mais complexo

que o sistema de quatro eixos, mostrado na FIG 5.12. E importante notar que as rodinhas também foram dispensadas no novo sistema.



FIGURA 5.12: Sistema de movimentação de 4 eixos e sistema completo.

Uma vez que nesse sistema não existe a necessidade de um cabeçote modular independente, foi feito um novo empacotamento visando uma redução global das dimensões e do peso do sistema. O posicionador do cabeçote ultra-sônico, porém, exigia que o sistema possuísse um vão central para acesso dos cabeçotes, e como os mesmos eram acoplados a água, era necessário que todo o sistema fosse vedado.

5.2.1 Prototipagem

Apesar do tempo extra na fase de projeto para incluir todas as particularidades indicadas pelos métodos de projeto do produto, a economia de tempo na prototipagem compensou.



FIGURA 5.13: Prototipagem da plataforma orbital de ultra-som.

Os resultados podem ser vistos na FIG 5.13 e foram acima do esperado, com a manufatura sendo realizada em apenas dois dias, e a montagem e os testes em mais dois, possibilitando o cumprimento do prazo estabelecido.

A criação de um histórico mais cuidadoso permitiu o registro das diversas versões criadas durante o desenvolvimento desta plataforma. O uso dos sistemas de projeto assistido por computador permitiu que a geração de soluções se mantivesse acelerada, mesmo com a complexidade crescente entre cada protótipo, mantendo um ritmo de uma nova proposta a cada dois dias. O formato final de cada versão pode ser visto na análise dos resultados. As configurações intermediárias entre cada versão não foram registradas, mas variaram de duas a cinco. Esses resultados foram obtidos com um projetista e um estagiário.

5.2.2 Testes preliminares

Os primeiros testes trouxeram vários resultados e aumentou o conhecimento sobre o problema. Entre os vários resultados, o mais importante foi a validação experimental do sistema de movimentação de quatro eixos e sua fixação no tubo, como visto na FIG 5.14.



FIGURA 5.14: Testes preliminares da plataforma orbital de ultra-som.

Esses fatores de experimentação global não podem ser previstos através do modelo virtual, e a certeza do funcionamento correto desses sistemas aumenta a confiança na plataforma antes mesmo de se chegar ao modelo final.

A presença de um protótipo funcional para fazer demonstrações ao cliente também facilitou a comunicação, pois muitos detalhes do projeto só foram visualizados na presença do modelo, apesar de todo o detalhamento do modelo virtual.

5.2.3 Análise dos resultados do estudo de caso B

Uma vez que não existem dois modelos realizados com e sem ferramentas de projeto para serem comparados, para esse caso utilizaremos a criação de soluções. A evolução das soluções propostas para a plataforma de inspeção ultra-sônica de dutos é mostrada em detalhes nas FIG 5.18 a 5.23.

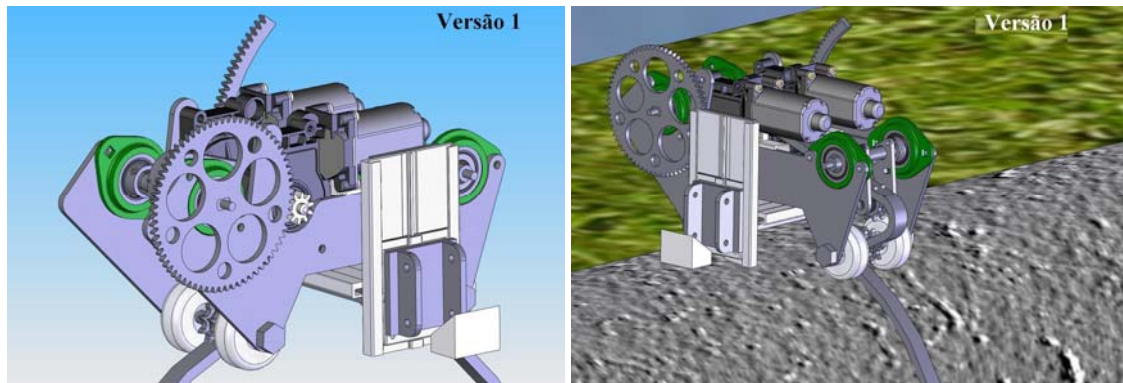


FIGURA 5.14: Primeira versão.

A primeira versão, FIG 5.14, foi feita na tentativa de se reduzir ao máximo o peso e o tamanho do sistema. Como não existia nenhuma indicação forte da necessidade de duas correntes, optou-se pela utilização de apenas uma, com o sensor montado lateralmente. O sistema já foi desenvolvido na configuração de 4 eixos, mas com rodinhas.

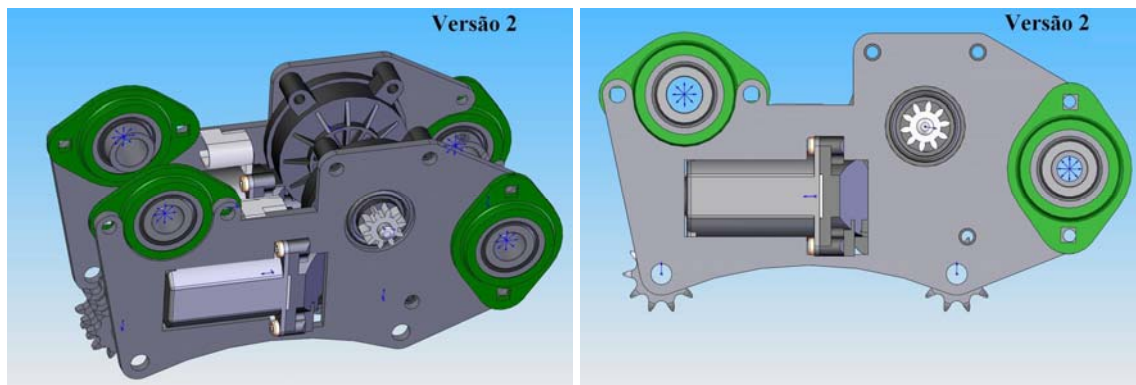


FIGURA 5.15: Segunda versão.

Na segunda versão, FIG 5.15, existe uma tentativa de um empacotamento mais eficiente, com uma corrente, agora tripla para maior estabilidade lateral, e sem rodinhas.

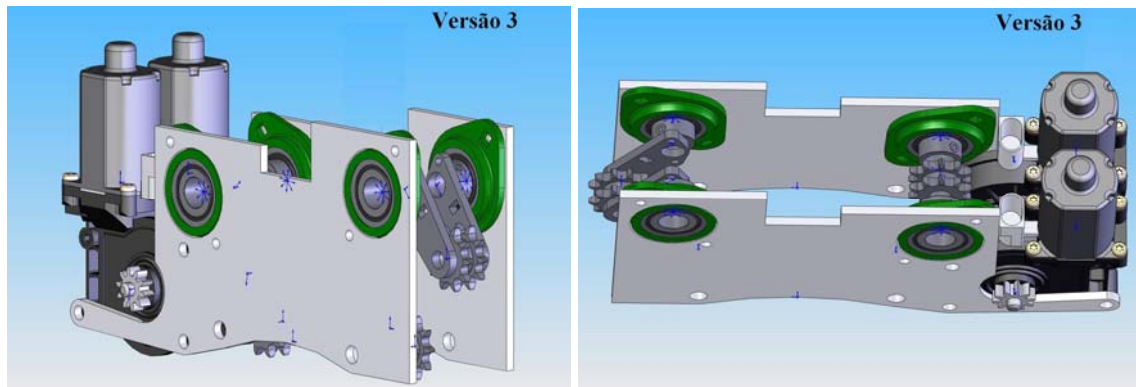


FIGURA 5.16: Terceira versão.

A terceira versão, FIG 5.16 é uma variação tentando uma posição mais eficiente do motor. Na quarta versão, FIG 5.17, é tentada uma melhora no espaçamento entre os mancais (em verde) e na quinta versão, FIG 5.18, procura-se o posicionamento ótimo dos motores. A ausência do vão central impossibilita o uso de qualquer uma dessas variações.

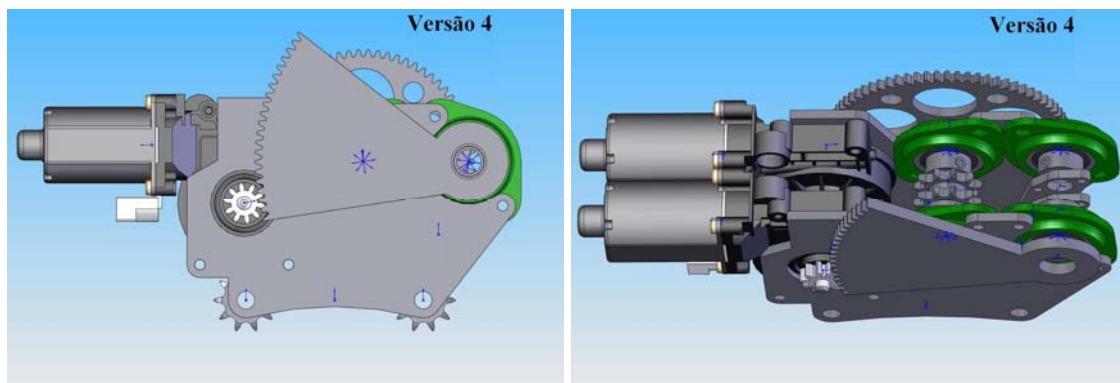


FIGURA 5.17: Quarta versão.

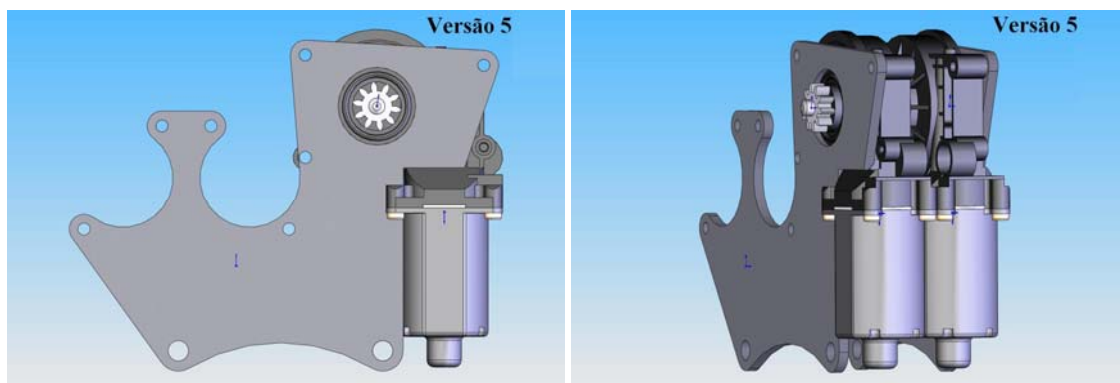


FIGURA 5.18: Quinta versão.

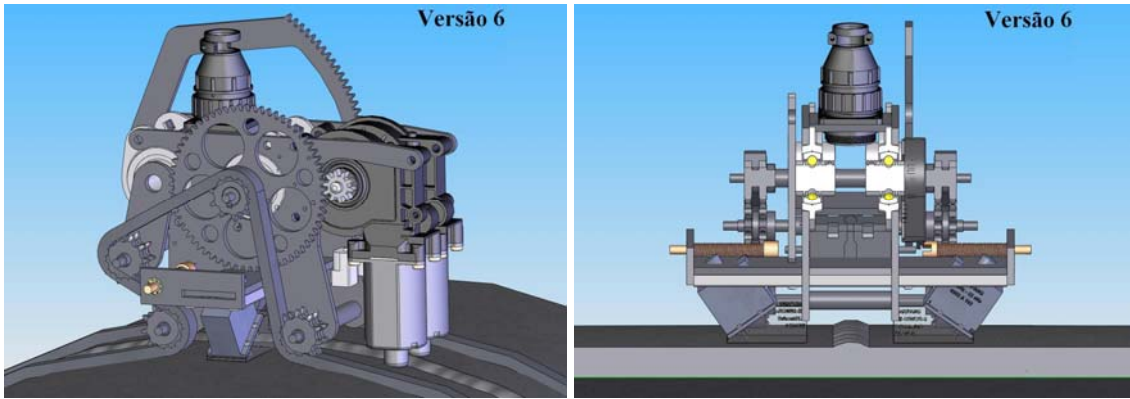


FIGURA 5.19: Sexta versão.

Uma vez definida a melhor posição para os motores e os mancais, é colocado um modelo da corrente e tentou-se posicionar os sensores ultra-sônicos e a eletrônica. Na versão seis, FIG 5.19, optou-se por dois sensores ultra-sônicos em um vão central, porém o suporte horizontal não deixaria espaço para a passagem dos cabos dos sensores. O cliente sugeriu que o uso de pelo menos dois cabeçotes era provável, impossibilitando o uso de apenas uma corrente no centro.

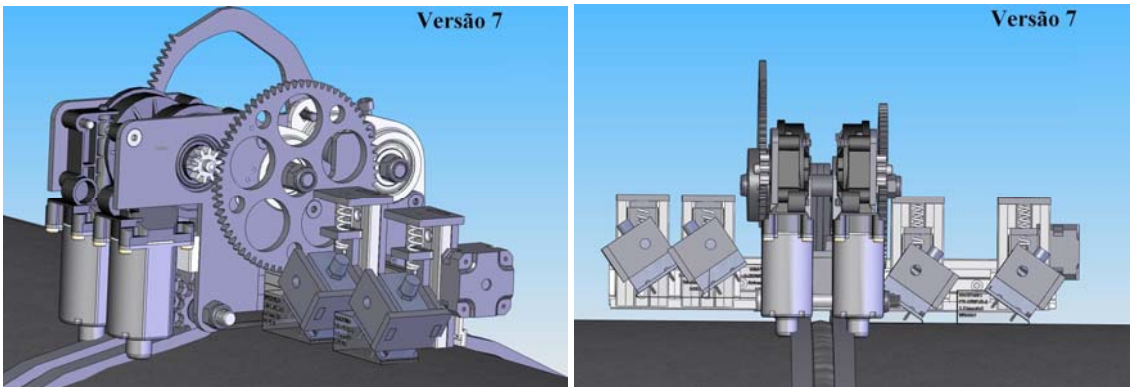


FIGURA 5.20: Sétima versão.

Na versão sete, FIG 5.20, o suporte dos sensores esta na posição vertical e foi deixada em aberto a possibilidade de posicionar múltiplos cabeçotes. Os cabeçotes necessitam de água para o a transmissão do som pela interface, e até esta versão o objetivo era criar um caminho para a passagem preferencial da água. Como o sistema orbita ao redor do tubo, a cada posição a água cai de um lado diferente em cima da plataforma, tornando seu comportamento muito difícil de ser previsto. O uso de vedação, apesar de aumentar o peso, o tamanho e o custo, foi a única solução provável. O uso de duas correntes no centro visava um melhor empacotamento e o uso de apenas um parafuso como eixo das rodas.

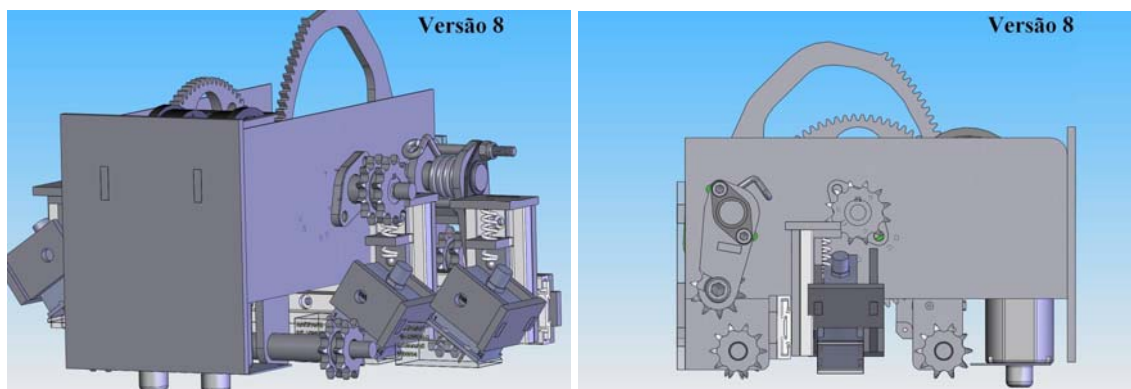


FIGURA 5.21: Oitava versão.

Na versão oito, FIG 5.21, temos a primeira tentativa de vedar o sistema. Para os eixos, mancais com gaxetas, e para o corpo seriam utilizados placas cortadas no LASER para encaixe preciso na estrutura. O sistema de suporte dos sensores, além de ser muito alto e interferir com a transmissão, impedia que os sensores chegassem perto da solda a ser inspecionada. As correntes passando pelo centro do sistema impossibilitariam uma vedação adequada, e por isso foram reposicionadas do lado de fora.

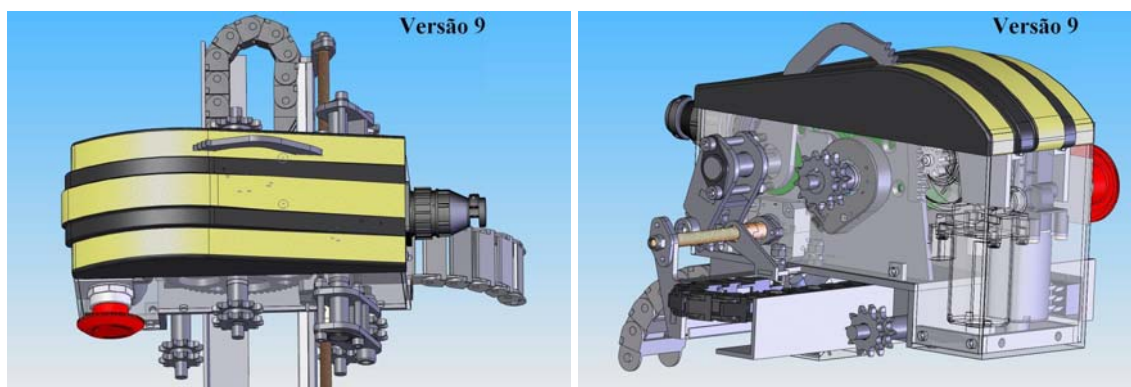


FIGURA 5.22: Nona versão.

Na versão nove, FIG 5.22, existe uma carenagem e uma tampa que se encaixam perfeitamente na estrutura, possibilitando um total isolamento do exterior. A tampa ainda é muito pequena, e a engrenagem do esticador da transmissão excede a carenagem quando em posição de operação. O carrinho dos sensores são compactos para entrar debaixo do vão central e os cabos dos sensores são protegidos por porta cabos adequados, impedindo que os mesmos entrem em contato com a corrente da transmissão quando estiverem em uma posição mais frouxa. Os cabos dos sensores, porém, ainda interferem com a carenagem quando estão na posição mais interna. O botão de emergência está localizado na lateral, sobre a carenagem, e poderia ser danificado se

fosse acionado com muita força, e por isso necessita de uma estrutura própria. Os cabos dos sensores também passaram a ser protegidos do tubo por um porta cabos.

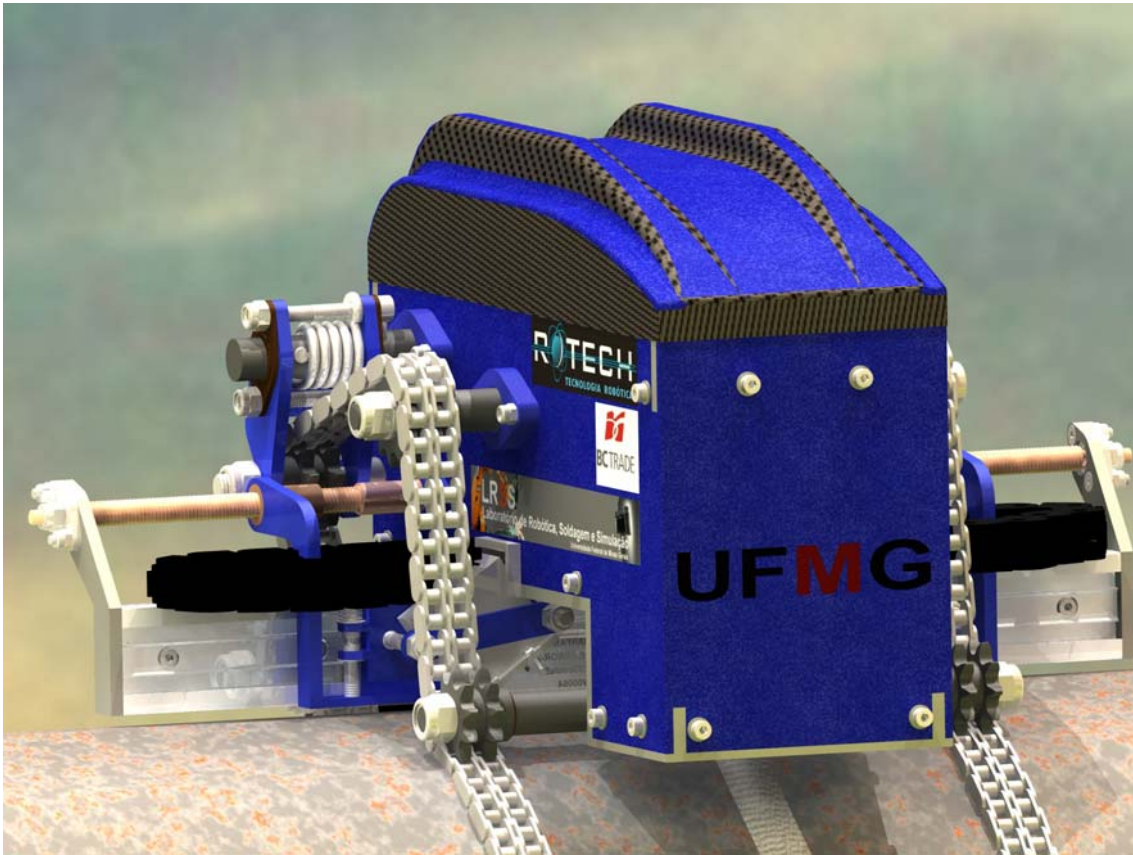


FIGURA 5.23: Versão final.

Na versão final, FIG 5.23, temos todos os erros detectados na versão anterior consertados, além da mudança do padrão de cores, que foi requerida pelo cliente ainda na fase de concepção. Outros detalhes visando uma melhor estanquidade do sistema também foram adicionados.

A fusão de múltiplas peças e as simplificações de projeto foram determinadas ainda nas primeiras versões. À medida que a complexidade aumenta, fica cada vez mais difícil manter a simplicidade, mas a prioridade de se continuar utilizando o mesmo processo de fabricação é absoluta. Mesmo assim é possível se observar algumas simplificações, como o suporte do motor de movimentação axial dos sensores, presente apenas na versão sete (na ponta da travessa de suporte dos sensores), e que foi prontamente incorporado na carenagem quando a mesma passou a ser considerada na versão oito.

6 CONCLUSÃO

O uso de ferramentas metodológicas se provou extremamente útil no re-projeto do robô de soldagem orbital, sem que seu uso levasse a um gasto significativamente maior no tempo de projeto. O uso de software CAD de última geração permitiu que a geração de alternativas fosse rápida e eficiente, proporcionando um processo acelerado de aprendizado sobre o problema.

O baixo custo para a fabricação e o teste também foi decisivo, quebrando a tendência atual de projetos sem protótipos para cortar custos. Da maneira que foi feito, um protótipo pode ser gerado e acelerou o processo de assimilação do problema, e permitiu o início dos testes de outras áreas da pesquisa, criando uma verdadeira engenharia simultânea.

O estudo de caso B prova que as ferramentas de projeto podem ser úteis no caso de sistemas novos também, não se limitando exclusivamente a re-projetos. Apesar das similaridades, cada projeto tem um uso diferente, e apesar de serem considerados da mesma família, são projetos distintos.

Por essas razões, pode-se concluir que em projetos no campo da robótica que necessitam de baixo custo e de pouco tempo para desenvolvimento, essas ferramentas podem ser utilizadas com grandes benefícios.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] BONSIEPE, Gui. Teoria e practica del diseño industrial. Barcelona: Editorial Gustavo Gili S.A. 1994.
- [2] CHARLES, J.A. et al. Selection and Use of Engineering Materials. Londres, Butterworth – Heineman. 3.a Ed, 2001
- [3] Cambridge Material Selector – www.granta.com.uk
- [4] FARAG, M.M. Selection of materials and manufacturing process for engineering design. 1.ed. London: Prentice & Hall, 1989.
- [5] www.engr.ufy.edu acessado em 24/06/06
- [6] www.sfsa.org acessado em 23/06/06
- [7] www.material.open.ac.uk acessado em 24/06/06
- [8] www.engineering.purdue.edu acessado em 23/06/06
- [9] www.ipmx.com acessado em 13/07/06
- [10] WILD, F. Metalurgical Mater, ed. Novembro 1969, Pg 423.
- [11] Apostila do MIT – “*Design and Manufacturing 2*”, 2004, Cap 13, pg 3.
- [12] www.evektor.com acessado em 21/03/06
- [13] Herakovich, C.T; Mechanics of Fibrous Composites, 1998, pg 10.
- [14] Reinforced Plastics, Edição Outubro 2004, Elsevier, Pg 14.
- [15] www.pim-international.com acessado em 02/05/06
- [16] www.hanzenginehouse.com acessado em 12/12/06
- [17] www.esab-cutting.com.de acessado em 12/12/06
- [18] www.rtgstore.com acessado em 10/12/06
- [19] www.maximumind.com acessado em 07/09/06
- [20] www.apparatenbouw.nl acessado em 07/09/06
- [21] www.mercatech.com acessado em 07/09/06
- [22] www.fasteners-supply.com acessado em 07/09/06
- [23] www.dansmc.com acessado em 08/12/06
- [24] www.fourslide.com acessado em 20/12/06
- [25] www.rivkle.com acessado em 09/03/06
- [26] www.racer.net acessado em 10/06/06
- [27] www.reliableplant.com acessado em 20/10/06

- [28] www.storkaerospace.com acessado em 25/09/06
- [29] www.nanoanalytics.com acessado em 06/07/06
- [30] BRACARENSE, A.Q. “Apresentações de Processos de Soldagem”, 2006.
- [31] www.cjt-limited.com acessado em 10/03/06
- [32] FRITZ, A.H. et al. Fertigungstechnik, Springer - Verlag, 2001
- [33] BURGHILDE, M.W. et al. Rapid Prototyping Technology – New Potentials for Offshore and Abyssal Engineering. ISOPE 2003, JSC 314.
- [34] www.hoerdler.de acessado em 23/06/06
- [35] www.2objet.com acessado em 22/06/06
- [36] www.emerald.com/0003717389 acessado em 21/06/06
- [37] BOOTHROYD, G in Huang, G.Q. Design for X: Concurrent engineering imperatives. London: Chapman & Hall, 1996.
- [38] CROSS, N. Engineering Designs Methods: Strategies for product design. 2. Ed. Chichester: John Wiley & Sons
- [39] ALEXANDER, C. in Burdek, B.E. Diseño: História, Teoria y Practica del diseño industrial. Barcelona: Editorial Gustavo Gili S.A. 1978.
- [40] ANDREASEN, M.M. et al. Design for Assembly. 2.ed. Bedford, Inglaterra. IFS Publications/ Springer-Verlag.
- [41] BURDEK, B.E. Diseño: História, Teoria y Practica del diseño industrial. Barcelona: Editorial Gustavo Gili S.A. 1978
- [42] Apostila do MIT “Design and Manufacturing 1” 2006.
- [43] Reinforced Plastics. Edição setembro 2006. Pg 6
- [44] www.embpro.com acessado em 23/06/06
- [45] www.harfangmicro.com acessado em 23/06/06
- [46] EPPINGER, S.D. Product Design and Development. 2.ed. New York: Irwin McGraw & Hill, 2000
- [47] Roozemburg, N.F.M. Product Design: Fundamentals and Methods. 1.ed, Chichester: John Wiley & Sons.
- [48] www.evene.fr/citations/auter.php acessado em 2/04/07.

ANEXO A

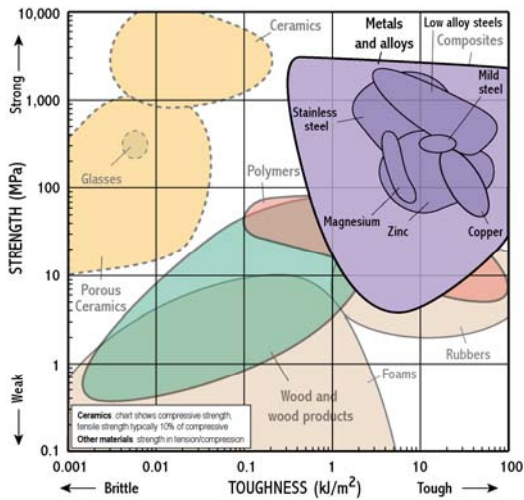


FIGURA A1: Resistência versus tenacidade.

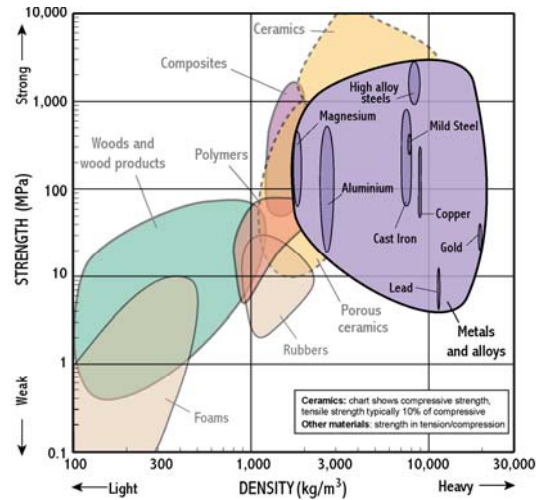


FIGURA A2: Resistência versus Densidade

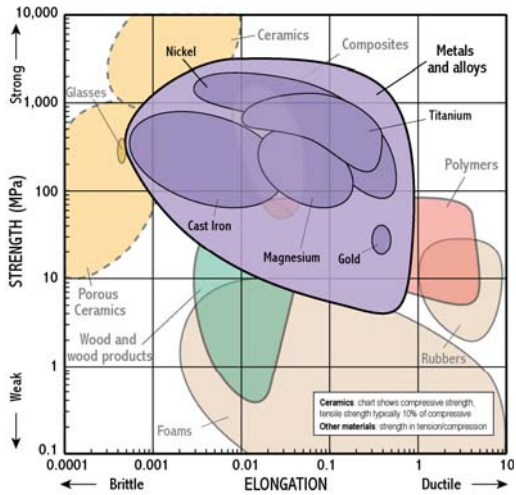


FIGURA A3: Resistência versus deformação.

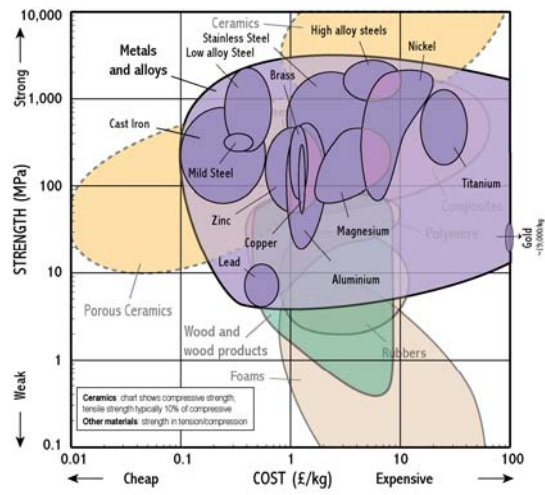


FIGURA A4: Resistência versus custo.

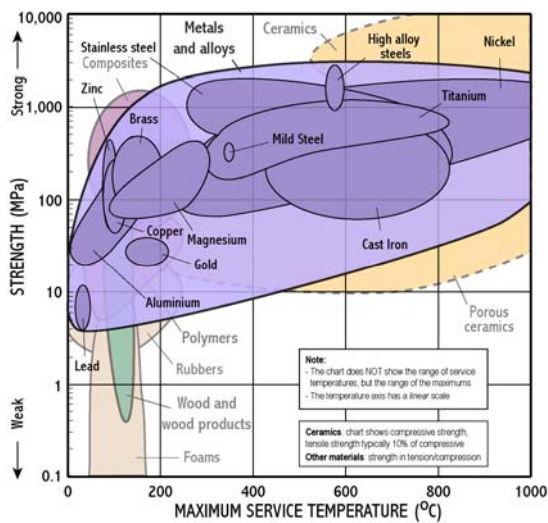


FIGURA A5: Resistência versus Temperatura.

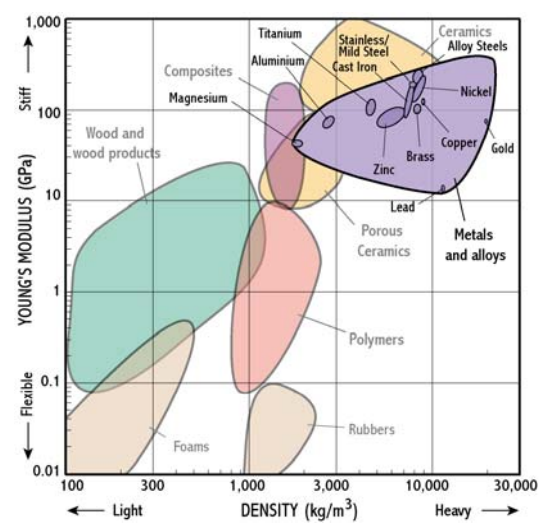


FIGURA A6: Rigidez versus densidade.

ANEXO B

Projeto de peças estampadas

As peças estampadas podem ser usadas na prototipagem quando é a única maneira de se produzir a estrutura, principalmente no caso de curvas complexas e estruturas em casca, com exemplos demonstrados nas indústrias automotiva, aeronáutica e de bens de consumo.

Peças construídas de chapas normalmente são produzidas através do cisalhamento, dobramento ou estampagem. Também é comum a união de vários componentes estampados para se obter a geometria final desejada.

Para se obter uma peça de qualidade e ao mesmo tempo minimizar o custo, as seguintes práticas de engenharia devem ser adotadas no projeto de peças estampadas:

- O diâmetro de furos cisalhados deve ser maior do que a espessura da chapa com um mínimo de 0,6mm. Furos menores resultam em frequentes quebras de punção e devem ser preferencialmente usinados;
- A distância entre furos, ou entre o furo e a borda da chapa deve ser pelo menos igual a espessura da chapa;
- A largura de uma abertura deve ser pelo menos 1,5 vezes a espessura da chapa e com um mínimo de 3mm;
- Tolerâncias de aproximadamente $\pm 0,08\text{mm}$ são usualmente obtidas com “blanking” e cisalhamento. Tolerâncias mais apertadas podem ser obtidas através de rebarbamento, porém com conseqüente aumento de custo;
- Preferencialmente as partes devem ser projetadas de forma a casar com outras partes a serem estampadas na mesma chapa para diminuir a geração de retalhos;
- Pode ser mais barato fazer um componente de diversas partes simples do que um peça feita de um “blank” muito complexo;
- “Blanks” com quinas agudas são mais caros de se produzir.

- Chapas de metais são usualmente anisotrópicas, o que significa que sua resistência e ductilidade varia quando medida em diferentes ângulos em relação ao ângulo de laminação.
- Outro fator que deve ser considerado no projeto de dobras é a recuperação elástica.
- As operações de estampagem e de alongamento produzem partes ocas de parede fina, como latas sem costura, utilidades domésticas e vários componentes do chassi de um carro. Uma das operações mais comuns é a estampagem profunda, usada para fazer corpos circulares, formas simétricas não circulares e formas complexas assimétricas

ANEXO C

Projeto de peças sinterizadas

Ao contrário das técnicas de forjamento ou fundição, a compactação mecânica dos pós é restrita a duas dimensões, pois é pouco prático aplicar pressão na lateral dos moldes. Por isso, o fluxo dos pós durante a compactação é quase totalmente axial. Porém também é necessário ejetar o compactado, e esse fator gera várias regras estabelecidas pela Associação de Peças da Metalurgia do Pó (PMPA) e a Federação das Indústrias de Pó Metálico (MPIF), que são resumidos abaixo:

- O formato da peça deve permitir a ejeção do molde;
- Peças com paredes perpendiculares são preferíveis. Nenhum ângulo é necessário para a retirada da peça em moldes lubrificados;
- As peças não podem conter furos perpendiculares ao molde e rasgos;
- Estriado pode ser feito, mas recartilhado não.
- O formato da peça deve ser projetado de forma que o pó não tenha que fluir dentro de paredes finas, curvas estreitas ou quinas. Paredes laterais devem ter mais que 0,75mm de espessura;
- O formato da peça deve permitir a construção de ferramental resistente, e o punção não deve ter quinas agudas ou frágeis;
- A peça deve ser projetada com o mínimo de mudanças possíveis no diâmetro e na espessura da seção;
- Como a pressão não é transmitida uniformemente pelas camadas de pó, a fração comprimento/diâmetro de uma peça comprimida mecanicamente não deve ser maior do que 2.5:1;
- Tire vantagem do fato de que certos materiais, como componentes porosos e cermets, podem ser fabricados apenas pela metalurgia do pó;
- Peças feitas pela metalurgia do pó podem ser coladas na condição “verde”, e depois sinterizadas para formar uma montagem colada. Outros métodos de união são possíveis para unir peças de metalurgia do pó com peças fundidas e forjadas.

ANEXO D

Projeto de peças usinadas

As operações de usinagem são as mais versáteis e mais comuns do processo de manufatura, podendo ser o único processo envolvido na fabricação de uma peça ou sendo usada apenas para alcançar a tolerância adequada de uma peça fabricada por outro meio. Em todos os casos, é importante que o projetista garanta que o componente irá ser usinado de uma maneira conveniente e econômica. Algumas considerações evitam que sejam colocados no projeto itens ou geometrias que causem dificuldades na usinagem, excesso de tempo para usinar, necessidade de tolerâncias extremamente apertadas ou habilidades que não estão disponíveis ou até mesmo que impossibilite a fabricação através dos meios comuns de corte e usinagem. Os fatores são resumidos a seguir:

- O tarugo deve possuir um plano de referência adequada para ser fixada à máquina, podendo ser uma superfície plana ou cilíndrica. Se o formato final não possuir tal superfície, um calço ou suporte deve ser adicionado ao fundido ou forjado para essa função para posteriormente ser retirado;
- Sempre que possível, o projeto deve permitir que todas as operações de usinagem sejam feitas sem ter que remover a peça de sua fixação;
- O raio entre diferentes superfícies usinadas deve ser preferencialmente o raio da ponta da ferramenta;
- Se a peça irá ser usinada pelos métodos tradicionais, a deflexão pela força de corte deve ser levada em conta. Para uma mesma força de corte, maior será a deflexão quanto mais fino for a peça ou menor o módulo de elasticidade. Nessas condições, meios de suporte são necessários para garantir a tolerância da peça usinada;
- Brocas devem entrar e sair em ângulos retos em relação à superfície. Furação em superfícies anguladas podem causar deflexões com subsequente quebra da broca;

- Superfícies em ângulo com a direção principal de usinagem devem ser evitadas uma vez que requerem fixações e ferramentas especiais;
- Furos não vazados de fundo plano devem ser evitados, pois envolvem operações adicionais e ferramentas especiais;
- As regiões a serem usinadas devem ser minimizadas. Isso é particularmente válido para peças forjadas e fundidas;
- Ferramentas de corte geralmente necessitam de área de saída, uma vez que elas não podem recuar imediatamente, principalmente no caso da retificação, onde as faces externas do rebolo desgastam mais rapidamente que o centro, sendo necessário que toda extensão do rebolo passe pela área de trabalho;
- Ferramentas de corte de roscas normalmente são chanfradas em sua ponta, e por isso os dois primeiros filetes não podem cortar completamente a rosca. Se a rosca termina em quina, a rosca cortada não irá permitir que a porca ou o parafuso enrosque completamente, até encostar no fundo. Por isso, nesses casos é necessário um rebaixo normalmente do tamanho de 3 filetes de rosca.

ANEXO E

Projeto de peças coladas

- Chapas extremamente finas e de espessuras dissimilares podem ser coladas facilmente;
- A união por adesivos é a maneira mais lógica de se unir compósitos de matriz polimérica;
- Materiais dissimilares ou incompatíveis podem ser colados;
- Adesivos são isolantes elétricos e podem prevenir pilha galvânica em união de metais dissimilares;
- Adesivos flexíveis espalham tensões de colagem por uma grande área e acomoda diferentes expansões térmicas;
- Adesivos flexíveis podem absorver impactos e vibrações, o que aumenta a resistência a fadiga;
- A preparação de juntas coladas não requer furos para parafusos, que proporciona melhor integridade estrutural e permite que materiais mais finos sejam utilizados;
- Adesivos não só colam como também proporcionam estaquiedade;
- A ausência de cabeças de parafuso, cabeça de rebites ou cordões de solda fazem das juntas coladas ideais onde a perturbação do fluxo fluido não é tolerado ou onde a aparência é importante;
- A colagem também pode ser usada em conjunto com outros meios mecânicos para melhorar a resistência da junta;
- Juntas coladas são mais fracas em carregamentos perpendiculares dos que sobre tração ou cisalhamento;
- A maior parte dos adesivos não pode ser usada em temperaturas acima de 300 graus Celsius;
- Solventes podem atacar juntas coladas;
- Alguns adesivos são atacados por luz ultravioleta, ozônio ou água;
- Deve sempre ser levado em consideração que juntas coladas sofrem fluência em temperaturas ambientes. A resistência a impacto da junta também é outro fator limitante.

Anexo F

Projeto de peças soldadas

As chapas metálicas podem ser unidas pela soldagem através de 5 tipos de juntas diferentes. Sobrepostas e quinas são soldas do tipo de filete, onde chapas grossas exigem a preparação da quina para assegurar uma penetração completa. Nesses casos, um dos lados ou ambos são chanfrados com uma geometria que minimize a quantidade de material depositado. Isso se dá pelo fato de que o custo por peso do metal depositado varia de 20 a 50 vezes o preço do metal base. Além disso, a quantidade de distorção e retração aumenta de acordo com a quantidade de metal depositado.

Juntas de topo com penetração completa normalmente são consideradas como tendo a mesma resistência do que o material base. Sendo assim, não existe a necessidade de se calcular a resistência da junta desde que o metal depositado seja o mesmo que o material base. A resistência de uma solda de filete é inerentemente menor, uma vez que a carga é paralela à linha da solda, o plano de ruptura fica a 45°, resultando em uma capacidade máxima de 30% da resistência do material de adição.

Outras considerações necessárias quando se está projetando uma peça que irá ser soldada são:

- Estruturas soldadas e juntas devem ter uma flexibilidade mínima. Estruturas que são muito rígidas e que não permitem o encolhimento do metal de solda, têm uma capacidade muito pequena de redistribuir tensões, e estão sujeitos a distorções e falhas;
- A acessibilidade da junta a ser soldada, a posição de solda e o alinhamento são questões importantes a serem consideradas no projeto;
- Seções mais finas são sempre mais simples de soldar que seções mais grossas;
- Peças soldadas devem ser preferencialmente de espessuras equivalentes para evitar distorções térmicas excessivas;
- Juntas soldadas devem ser distribuídas simetricamente ao redor de um eixo para reduzir distorções;

- Juntas soldadas devem preferencialmente estar localizadas longe de regiões que serão usinadas. Pontos temperados danificam a ferramenta de corte;
- Uma cavidade inacessível de uma solda, ou as superfícies sobrepostas devem ser devidamente isoladas para evitar corrosão;
- Quando a resistência não é o principal fator, pequenas soldas intermitentes são preferíveis a soldas longas contínuas, pois diminuem as distorções;
- Use as forças de retração a favor. Coloque as peça a serem soldadas levemente fora de posição e a força de retração irá alinhá-las;
- Gabaritos e sargentos devem ser usados para diminuir distorções;
- Quando possível, o encontro de várias soldas deve ser evitado;
- Em juntas de topo, a retração pode ser diminuída alternado os lados durante a soldagem;
- Remova as forças residuais através de tratamento térmico ou mecânico;
- Tolerâncias globais da ordem de 1,5mm são possíveis em juntas soldadas. Superfícies que necessitam de tolerâncias mais apertadas devem ser usinadas depois da solda e do tratamento térmico;
- Peças originalmente desenhadas para serem fundidas ou forjadas devem ser redesenhadas antes de serem fabricadas através da soldagem. O novo projeto deve sempre aproveitar os benefícios e evitar as limitações.

Anexo G

Projeto de peças brazadas

Os materiais mais difíceis de serem brazados são aqueles que possuem ou tem grande afinidade com o oxigênio, formando um filme de óxido e prevenindo a adesão metálica ao material de adição. Exemplos dessas dificuldades podem ser encontradas na brasagem de alumínios, ligas alumínio-bronze, aços inoxidáveis e outras ligas contendo cromo. A brazagem é um dos melhores métodos para a união de cerâmicos.

A brasagem, ao contrário da soldagem, se utiliza da ação capilar para levar o metal de adição para dentro de pequenas frestas. Como o material de adição é mais fraco que o metal base, a junta deve ser projetada de maneira diferente de uma junta soldada. Sempre que possível, uma junta sobreposta deve ser usada na brasagem, com uma sobreposição ótima de 3 a 4 vezes a espessura da seção da junta. Se a geometria não permitir a sobreposição, então juntas do tipo sobrepostas são preferíveis à junta de topo. Outras considerações importantes em juntas brasadas são:

- A junta deve ter um formato que faça com que o material de adição trabalhe compressão. Se não for possível, então que trabalhe puro cisalhamento. E se por último isto também não for possível, que trabalhe então puramente tração;
- As quinas das juntas nunca devem ser submetidas a tração e flexão combinadamente;
- A junta não deve ter elementos que sujeitem as quinas a grandes concentrações de tensões;
- Em aplicações críticas onde são esperados impactos ou cargas dinâmicas, uma conexão mecânica deve ser incorporado a junta para suportar a carga. A liga de brazagem neste caso serve apenas para garantir a rigidez da junta finalizada.

Anexo H

Custo do corte a LASER para o estudo de caso B

Na análise do custo, deve-se levar em conta que aqui consta o preço, com o material, para o corte de uma unidade de cada peça, e de várias, quando aplicável. Enquanto cada componente pequeno custaria entre 20 a 30 reais se fosse usinado, aqui os preços variam entre 1 e 5 reais. Apesar da usinagem convencional poder fornecer uma qualidade maior, ao mesmo tempo não poderia imitar a mesma complexidade de detalhes, como recortes com quinas e estriados, tendo portanto, cada um suas vantagens e desvantagens

TABELA H1: custo das peças cortadas a LASER

DESCRICAO DA PEÇA	QTDE	Preço unit. C/ M.P.	Preço unit. S/ M.P.	Total. C/ M.P.	Total. S/ M.P.
CAR-4-2-01	4	R\$ 2,30	R\$ 2,01	R\$ 9,20	R\$ 8,04
CAR-4-2-03	4	R\$ 2,18	R\$ 2,01	R\$ 8,72	R\$ 8,04
CAR-4-2-06	4	R\$ 1,03	R\$ 0,90	R\$ 4,12	R\$ 3,60
CAR-2-2-04	4	R\$ 2,39	R\$ 2,17	R\$ 9,56	R\$ 8,68
CAR-4-2-05	4	R\$ 1,69	R\$ 1,53	R\$ 6,76	R\$ 6,12
CAR-4-2-02	4	R\$ 1,78	R\$ 1,61	R\$ 7,12	R\$ 6,44
CAR-1-2-05	2	R\$ 1,01	R\$ 0,90	R\$ 2,02	R\$ 1,80
CAR-1-2-01	1	R\$ 6,79	R\$ 4,88	R\$ 6,79	R\$ 4,88
CAR-1-2-03	1	R\$ 3,58	R\$ 2,96	R\$ 3,58	R\$ 2,96
CAR-1-2-04	1	R\$ 1,34	R\$ 1,06	R\$ 1,34	R\$ 1,06
CAR-2-2-03	1	R\$ 5,48	R\$ 3,52	R\$ 5,48	R\$ 3,52
CAR-2-2-01	2	R\$ 14,87	R\$ 10,41	R\$ 29,74	R\$ 20,82
CAR-1-2-06	2	R\$ 0,89	R\$ 0,82	R\$ 1,78	R\$ 1,64
CAR-4-2-04	8	R\$ 1,68	R\$ 1,53	R\$ 13,44	R\$ 12,24
CAR-1-2-08	4	R\$ 2,20	R\$ 2,09	R\$ 8,80	R\$ 8,36
CAR-2-2-05	4	R\$ 2,20	R\$ 2,09	R\$ 8,80	R\$ 8,36
CAR-1-2-02	1	R\$ 3,40	R\$ 2,49	R\$ 3,40	R\$ 2,49
CAR-1-2-07	4	R\$ 0,91	R\$ 0,82	R\$ 3,64	R\$ 3,28
CAR-2-2-02	1	R\$ 5,63	R\$ 3,60	R\$ 5,63	R\$ 3,60
CAR-0-0-00	18	R\$ 2,17	R\$ 2,08	R\$ 39,06	R\$ 37,44
CAR-2-1-02	2	R\$ 3,33	R\$ 3,15	R\$ 6,66	R\$ 6,30
CAR-2-1-01	4	R\$ 3,69	R\$ 3,34	R\$ 14,76	R\$ 13,36
CAR-3-1-03	2	R\$ 1,88	R\$ 1,70	R\$ 3,76	R\$ 3,40
CAR-1-1-03	1	R\$ 5,80	R\$ 4,69	R\$ 5,80	R\$ 4,69
CAR-3-1-04	4	R\$ 4,85	R\$ 4,31	R\$ 19,40	R\$ 17,24
CAR-3-1-06	5	R\$ 1,48	R\$ 1,41	R\$ 7,40	R\$ 7,05
CAR-3-1-05	5	R\$ 1,58	R\$ 1,50	R\$ 7,90	R\$ 7,50
CAR-1-1-01	2	R\$ 20,91	R\$ 13,39	R\$ 41,82	R\$ 26,78
CAR-1-1-04	1	R\$ 7,35	R\$ 6,43	R\$ 7,35	R\$ 6,43
CAR-4-1-01	4	R\$ 3,32	R\$ 2,95	R\$ 13,28	R\$ 11,80
CAR-1-1-08	2	R\$ 5,14	R\$ 4,31	R\$ 10,28	R\$ 8,62
CAR-4-1-02	4	R\$ 4,29	R\$ 3,34	R\$ 17,16	R\$ 13,36
CAR-1-1-05	1	R\$ 6,47	R\$ 5,68	R\$ 6,47	R\$ 5,68
CAR-3-1-02	1	R\$ 20,82	R\$ 18,22	R\$ 20,82	R\$ 18,22
CAR-1-1-02	1	R\$ 27,95	R\$ 24,01	R\$ 27,95	R\$ 24,01
CAR-1-1-09	1	R\$ 4,62	R\$ 4,11	R\$ 4,62	R\$ 4,11
CAR-1-1-07	2	R\$ 4,00	R\$ 3,63	R\$ 8,00	R\$ 7,26
CAR-1-1-06	1	R\$ 4,03	R\$ 3,53	R\$ 4,03	R\$ 3,53
CAR-3-1-01	1	R\$ 7,27	R\$ 3,92	R\$ 7,27	R\$ 3,92
TOTAL				R\$ 413,71	R\$ 346,59

Para os componentes maiores, temos um custo variando entre 20 e 30 reais, como por exemplo a engrenagem por R\$ 27,30, enquanto usinada ela custaria R\$50,00. No entanto ela seria sólida, sem nenhum alívio de peso, que é importante, mas não imprescindível.

Na FIG H2 e H3 temos a distribuição das peças nas chapas feita automaticamente pelo programa CAM. Como o programa preferencialmente distribui o corte para utilizar apenas um recorte da chapa, para que o resto do pedaço usado possa ser retirado e manter a chapa retangular, a distribuição das peças mais longas acabam sempre no sentido perpendicular à laminação. Esse sentido de grão não é favorável à soldagem, e o posicionamento deve ser feito manualmente, ou o programa CAM deve ser reprogramado para evitar isto.

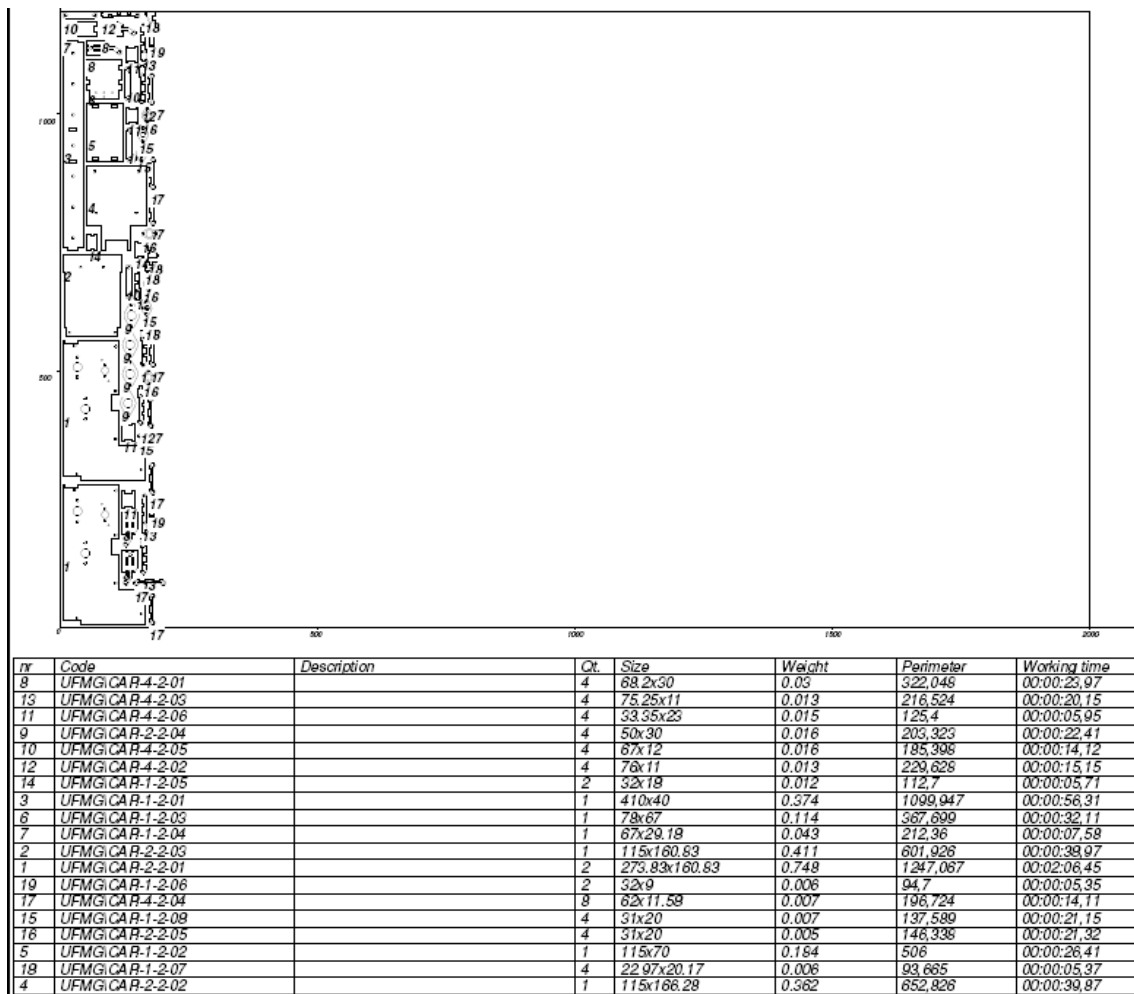
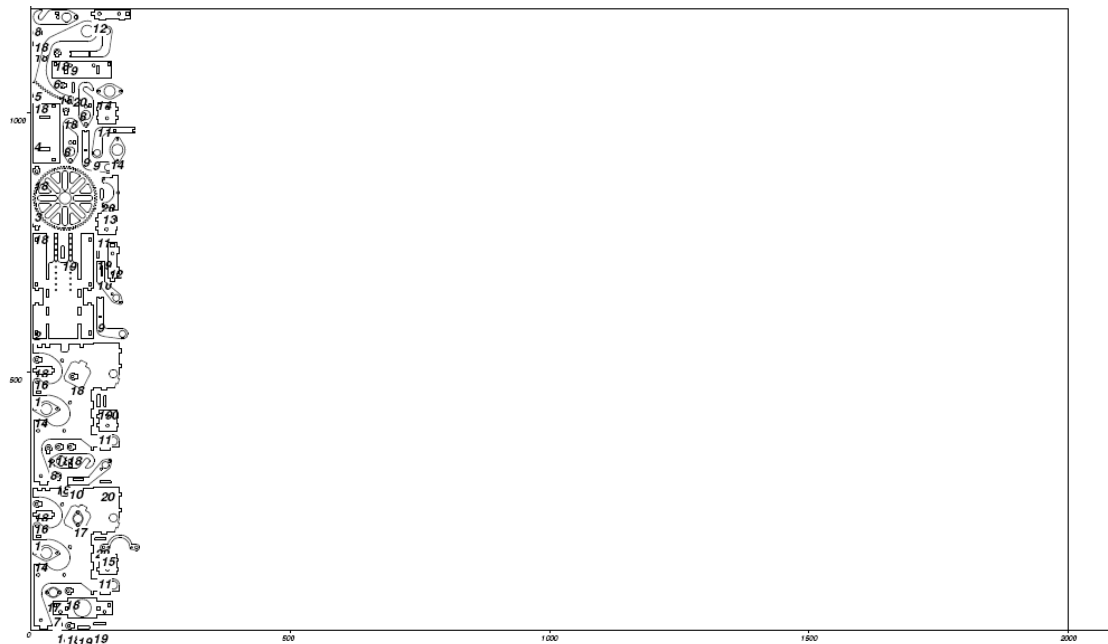


FIGURA H1: “Nesting” dos componentes em chapa de 3mm.



nr	Code	Description	Qt.	Size	Weight	Perimeter	Working time
18	UFMGCAR-0-0-00		18	12x16	0.004	69,699	00:00:12,55
17	UFMGCAR-2-1-02		2	31x20	0.006	155,762	00:00:24,32
14	UFMGCAR-2-1-01		4	50x30	0.023	214,319	00:00:26,33
16	UFMGCAR-3-1-03		2	40x15	0.02	110	00:00:08,59
4	UFMGCAR-1-1-03		1	115x50	0.215	478	00:00:40,36
8	UFMGCAR-3-1-04		4	28x86,5	0.061	354,65	00:00:36,41
20	UFMGCAR-3-1-06		5	5x21,5	0.004	48,708	00:00:06,45
19	UFMGCAR-3-1-05		5	5x24,5	0.004	56,854	00:00:06,85
1	UFMGCAR-1-1-01		2	273,82x169,45	0.777	1780,9	00:02:00,43
7	UFMGCAR-1-1-04		1	115x40	0.103	549,828	00:00:58,11
11	UFMGCAR-4-1-01		4	40x40	0.053	210,399	00:00:22,41
10	UFMGCAR-1-1-08		2	49,66x84,15	0.049	334,765	00:00:35,58
9	UFMGCAR-4-1-02		4	59,75x81,88	0.06	322,964	00:00:25,52
6	UFMGCAR-1-1-05		1	115x34	0.143	459,699	00:00:50,02
3	UFMGCAR-3-1-02		1	122,41x122,41	0.218	2045,516	00:02:30,93
2	UFMGCAR-1-1-02		1	115x203,87	0.712	1792,62	00:03:31,85
15	UFMGCAR-1-1-09		1	75,5x30,01	0.023	264,786	00:00:33,74
12	UFMGCAR-1-1-07		2	75x20,17	0.047	258,399	00:00:28,97
13	UFMGCAR-1-1-06		1	67x33,75	0.043	257,392	00:00:28,44
5	UFMGCAR-3-1-01		1	159,74x124,01	0.168	689,853	00:00:32,30

FIGURA H2: “Nesting” dos componentes em chapa de 5mm.

Todos os componentes puderam ser fabricados em aproximadamente 1 hora, e custou um total, com material e mão de obra incluso, R\$413.71, o que é extremamente barato para um protótipo. O tempo de fabricação, para a prototipagem com usinagem convencional, seria de pelo menos 2 semanas.