

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
JOSÉ ORLANDO BALASTRERO JUNIOR

**MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DE COMPONENTES
MECÂNICOS EM SISTEMAS CAD 3D COM O EMPREGO DE
GEOMETRIAS PARAMÉTRICAS**

Taubaté – SP
2010

JOSE ORLANDO BALASTRERO JUNIOR

**MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DE COMPONENTES
MECÂNICOS EM SISTEMAS CAD 3D COM O EMPREGO DE
GEOMETRIAS PARAMÉTRICAS**

Dissertação apresentada para a
obtenção do Título de Mestre pelo Curso de
Pós-Graduação do Departamento de
Engenharia Mecânica da Universidade de
Taubaté.

Área de Concentração: Automação
Orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Nicolini do
Patrocínio Nunes

**Taubaté - SP
2010**

Balistrero Junior, José Orlando

Modelagem e Otimização de Componentes Mecânicos em Sistemas CAD 3D com o Emprego de Geometrias Paramétricas / José Orlando Balistrero Jr. - 2010.

96f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.

Orientação: Prof. Dr. Luiz Eduardo Nicolini do Patrocínio Nunes, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Geometrias paramétricas. 2. Otimização. 3. Projeto Mecânico.
I.Título.

JOSE ORLANDO BALASTRERO JUNIOR

**MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DE COMPONENTES MECÂNICOS EM
SISTEMAS CAD 3D COM O EMPREGO DE GEOMETRIAS PARAMÉTRICAS**

Dissertação apresentada para a
obtenção do Título de Mestre pelo Curso de
Pós-Graduação do Departamento de
Engenharia Mecânica da Universidade de
Taubaté
Área de Concentração: Automação

Data: ___/___/_____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Eduardo Nicolini do Patrocínio Nunes - Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dra. Valesca Alves Corrêa - Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dr. Victor Orlando Gamarra Rosado - Universidade Estadual Paulista

Assinatura _____

À Memória de meu pai, exemplo de dedicação, competência e ética, que sempre me apoiou, em todos os momentos de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder a oportunidade de desenvolver este trabalho, me agraciando com saúde, dedicação e perseverança para superar os obstáculos que se apresentaram.

A minha Família, em especial a minha esposa Vera e minha filha Laura que compreenderam a importância desta etapa em minha vida profissional e a minha dedicação a mesma, que me privou de alguns momentos de convivência familiar.

Ao meu orientador Prof.º Dr. Luis Eduardo Nicolini do Patrocínio Nunes, pela sua paciência, conhecimento e orientações, que foram de extrema valia, não só para a elaboração deste trabalho, mas também, para a minha vida profissional, como Docente.

A Secretaria da Pós Graduação da UNITAU - Universidade de Taubaté, pelo constante apoio às atividades desenvolvidas durante o curso e pela atenção e pronto atendimento às nossas solicitações.

Aos Docentes da Pós Graduação da UNITAU, em especial aqueles que conduzem as Disciplinas do Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica, pela dedicação à arte de ensinar.

A Coordenação do Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica, da UNITAU, pela atenção dedicada a mim e aos demais alunos do curso.

A Direção, Administração e demais Docentes do IFSP - Instituto Federal de Ciência e Tecnologia São Paulo, Campus Bragança Paulista, pelo constante apoio e incentivo.

RESUMO

A utilização de ferramentas computacionais para modelagem de componentes (sistemas CAD) faz parte da realidade da maioria dos setores de desenvolvimento de produtos das empresas. Os sistemas CAD 3D auxiliam na visualização, simulação e análise do comportamento do protótipo digital sob condições reais, antes mesmo da construção do produto ou da peça, permitindo que os fabricantes lancem produtos com maior rapidez e menor quantidade de protótipos físicos. Uma das vantagens na utilização de sistemas CAD 3D é a parametrização dimensional, o que possibilita ganho de tempo durante as modificações do projeto e a validação de novos produtos. Este trabalho apresenta as formas de aplicação de geometrias paramétricas na otimização estrutural e como meio de redução do tempo de desenvolvimento de um projeto. A validação do projeto foi feita através da Análise por Elementos Finitos (AEF), na qual foi possível estabelecer um coeficiente de segurança aceitável para o mesmo com uma redução do seu peso final, de acordo com as necessidades estabelecidas nas diretrizes do projeto.

Palavras-chave: CAD 3D. Geometrias Paramétricas. Projeto Mecânico.

ABSTRACT

The use of computational tools for modeling of components (systems CAD) is part of the reality of the majority of the sectors of development of products of the companies. Systems CAD 3D before assist in the visualization, simulation and analysis of the behavior of the digital prototype under real conditions, exactly of the construction of the product or the part, allowing that the manufacturers launch products with bigger rapidity and minor amount of physical archetypes. One of the advantages in the use of systems CAD 3D is the dimensional parameterization, what it makes possible time profit during the modifications of the project and the validation of new products. This work presents the forms of application of parametric geometries in the structural optimization and as half of reduction of the time of development of a project. The validation of the project was made through Finite Elements Analysis (FEA), in which it was possible to establish a coefficient of acceptable security for the same with a reduction of its final weight, in accordance with the established necessities as lines of direction of the project.

Word-key: CAD 3D. Parametric Geometries. Mechanical Project.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo tradicional de projeto (SHIGLEY, MISCHKE, 2005).....	9
Figura 2 – Gráfico produção <i>versus</i> custo	19
Figura 3 - Sólidos obtidos com operações Booleanas	25
Figura 4 - Aplicação de características geométricas	27
Figura 5 - Em (a) modelo sólido (b) malha dos elementos	30
Figura 6 - Elementos e nós.....	31
Figura 7 - Mapeamento das Tensões	32
Figura 8 - Seleção do melhor perfil.....	39
Figura 9 - Planos de Trabalho	40
Figura 10 - Uso de geometrias simples no esboço.....	42
Figura 11 - Propriedades do material empregado	45
Figura 12 - Parametrização das dimensões do esboço.....	47
Figura 13 - Modelos sólidos obtidos	47
Figura 14 - Aplicação de esforço	49
Figura 15 - Face de engastamento.....	50
Figura 16 - Caixa de diálogo Análise de Tensões	51
Figura 17 - Processo para análise de deformações	53
Figura 18 - Elemento plano com quatro nós.....	54
Figura 19 - Distribuição das Tensões Máximas	55
Figura 20 - Distribuição das Tensões Equivalentes.....	56
Figura 21 - Mapeamento das deformações	57
Figura 22 - Desenho de Engenharia da peça	58
Figura 23 - Peça similar	60
Figura 24 - Desenho de Engenharia do componente	63
Figura 25 - Esboço do perfil básico	64
Figura 26 - Extrusão do perfil e geração do sólido	64
Figura 27 - Seleção de superfície de referência	65
Figura 28 - Geometria sólida complementar.....	66
Figura 29 - Caixa para edição dos furos.....	66
Figura 30 - Posicionamento das geometrias dos furos.....	67
Figura 31 - Esboço para criação do canal	68

Figura 32 - Modelo sólido completo.....	68
Figura 33 - Tensões Equivalentes (a), em (b) coeficiente de segurança	70
Figura 34 - Posicionamento da geometria	71
Figura 35 - Dimensões parametrizadas.....	72
Figura 36 - Modelo na configuração inicial	73
Figura 37 - Procedimento empregado	74
Figura 38 - Geometrias para a redução da massa	75
Figura 39 - Porcentual de redução de massa	76
Figura 40 - Parametrização das geometrias	78
Figura 41 - Geometria básica com 25,00 mm.....	79
Figura 42 - Modelo com a massa desejada	79
Figura 43 - Porcentual de redução de massa	80
Figura 44 - Área de aplicação de esforço	81
Figura 45- Vínculos de engastamento	82
Figura 46 - Deformações resultantes.....	82
Figura 47 - Tensões Equivalentes (<i>Von Mises</i>)	83
Figura 48 - Coeficiente de segurança k_s	84
Figura 49 - Documento de Engenharia do componente	86
Figura 50 - Tensões Equivalentes <i>versus</i> redução de massa	87
Figura 51 - Deformação <i>versus</i> redução de massa	88
Figura 52 - Coeficiente de segurança k_s	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de deformação máxima	51
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do alumínio ASTM 6061 T6.....	69
Tabela 3 – Variáveis dimensionais das geometrias paramétricas	72
Tabela 4 - Variáveis dimensionais das geometrias paramétricas	77
Tabela 5 - Parâmetros e resultados estruturais	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ASTM – American Society for Testing and Materials (*Sociedade Americana para Testes e Padronização de Materiais*).

CAD - Computer Aided Design (*Projeto Auxiliado por Computador*)

CAE - Computer Aided Engineering (*Engenharia Auxiliada por Computador*)

CAI - Computer Aided Inspection (*Inspeção Auxiliada por Computador*)

CAM - Computer Aided Manufacturing (*Manufatura Auxiliada por Computador*)

CNC - Computer Numerical Control (*Controle Numérico por Computador*)

GPa - Giga Pascal.

Kgf - Quilograma Força.

KN - Quilo Newton.

K_s - Coeficiente de segurança.

MPa - Mega Pascal.

E - Módulo de Elasticidade.

η - Fator de Segurança.

σ - Tensão de Tração.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativa para o tema	2
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura do trabalho	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Processo tradicional de projeto.....	6
2.1.1 Ciclo de projeto.....	6
2.1.2 Considerações e características de um projeto.....	10
2.1.3 Padrões e codificações empregados.....	11
2.1.4 Incertezas envolvidas	12
2.1.5 Conceitos de tensão e resistência	13
2.1.6 Fator de projeto.....	14
2.1.7 Aspectos econômicos.....	15
2.1.8 Tolerâncias	16
2.1.9 Ponto de equivalência.....	17
2.1.10 Confiabilidade	19
2.1.11 Fontes de informações técnicas	20
2.1.12 O emprego de ferramentas computacionais	21
2.2 Modelagem sólida de objetos	23
2.2.1 Principais tipos de modelagem sólida.....	24
2.2.1.1 Construção baseada em geometrias sólidas (CGS).....	24
2.2.1.2 Modelagem baseada em características geométricas	26
2.3 Sistemas CAE.....	27
2.3.1 Definições	27
2.3.2 Método dos Elementos Finitos (MEF).....	28

2.3.3	Análise por Elementos Finitos (AEF)	30
2.3.4	Principais aplicações	32
2.3.5	Vantagens estratégicas no uso dos sistemas CAE.....	34
2.3.6	Desvantagens apresentadas:	34
3.	PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA PARA MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO .	36
3.1	Considerações iniciais	36
3.2	Metodologia proposta	37
3.2.1	Descrição das etapas	37
3.2.1.1	Definir uma estratégia de modelagem	37
3.2.1.2	Adotar referências para os modelos 3D nos planos principais	39
3.2.1.3	Empregar sólidos básicos como geometrias principais	41
3.2.1.4	Utilizar geometrias 2D simples com esboços dos objetos 3D.....	41
3.2.1.5	Aplicar restrições às geometrias 2D	42
3.2.1.6	Evitar relações de parentesco desnecessárias entre as geometrias ..	43
3.2.1.7	Empregar geometrias disponíveis nas bibliotecas.....	44
3.2.1.8	Atribuição do tipo de material e as suas propriedades físicas	44
3.2.1.9	Estabelecer dimensões paramétricas para as geometrias	46
3.2.1.10	Gerar sólido e verificar o valor de massa.....	47
3.2.1.11	Comparar os resultados obtidos com o objetivo	48
3.2.1.12	Análise por Elementos Finitos.....	48
3.2.1.12.1	Vínculos de engastamento	49
3.2.1.12.2	Densidade de malha de elementos	50
3.2.1.13	Interpretação dos resultados.....	53
3.2.1.13.1	Máxima Tensão Principal	54
3.2.1.13.2	Tensões Equivalentes	55
3.2.1.13.3	Deformações resultantes.....	56
3.2.1.14	Geração da documentação de Engenharia	57

4. IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA	60
4.1 Necessidade motivadora	60
4.2 Considerações iniciais	62
4.2.1 Estratégia de modelagem 3D	62
4.2.2 Atribuição do material	68
4.2.3 Regiões fracamente tensionadas.....	69
4.2.4 Geometrias para redução de massa.....	70
4.2.4.1 Processo de parametrização das geometrias	71
4.2.4.2 Modelagem sólida automática e verificação de massa.....	73
4.2.4.3 Valores de massa	75
4.2.4.4 Nova configuração das geometrias.....	76
4.2.4.5 Modelagem sólida automática	78
4.3 Análise de tensões e deformações	80
4.3.1 Aplicação e magnitude dos esforços	81
4.3.2 Vínculos de engastamento.	81
4.3.3 Deformações	82
4.3.4 Tensões Equivalentes.....	83
4.3.5 Coeficiente de Segurança.....	84
4.3.6 Documentação de Engenharia	85
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	87
5.1 Tensões equivalentes (<i>Von Mises</i>).....	87
5.2 Deformações	88
5.3 Coeficiente de segurança	88
5.4 Parâmetros e resultados estruturais	89
5.5 Discussão dos resultados	90
6. CONCLUSÃO	92
REFERÊNCIAS	95

1. INTRODUÇÃO

A evolução das tecnologias ligadas às diversas áreas do conhecimento, aliadas à necessidade crescente da demanda de produtos nos mais variados mercados consumidores, estão fomentando a ocorrência de profundas mudanças nos meios produtivos industriais.

Estas alterações estão presentes em toda a cadeia produtiva, desde a percepção da necessidade implícita, abrangendo as etapas de projeto, desenvolvimento, fabricação, distribuição, até a fase final do ciclo de vida do produto.

A reciclagem e a reutilização dos materiais empregados na sua construção deverão ser previstas e executadas de uma forma racional, no que se refere a um baixo consumo de energia, pelos processos empregados com esta finalidade, bem como a preservação ambiental como quesito básico. (PAHL e BEITZ, 2005)

Algumas etapas do projeto, desenvolvimento e produção de documentação técnica, podem ser executadas de forma automática, nos sistemas CAD atuais, com a finalidade de propiciar maior eficiência no emprego destes recursos. Outro fator importante na manufatura atual, é a flexibilização da produção, processo que engloba a automação de processos, redução do tempo destinado a ajustes nas linhas produtivas para se fabricar produtos diferenciados, objetivando a redução do lote mínimo de produção.

As atividades de desenvolvimento e de projeto podem ser descritas como um ciclo iterativo, cujas etapas estão sendo gradualmente otimizadas e automatizadas, à medida que novas tecnologias se tornam aplicáveis. (PAHL e BEITZ, 2005)

Nas fases iniciais do desenvolvimento de um projeto, que dependem diretamente da capacidade de raciocínio humano, já estão sendo empregadas ferramentas computacionais baseadas em *Inteligência Artificial (IA)* que auxiliam na análise de variáveis envolvidas, a fim de determinar a melhor solução para uma ou para um conjunto de necessidades.

No cenário atual, o emprego das ferramentas computacionais no projeto, desenvolvimento e aprimoramento de produtos, tornou-se um fator crucial para o sucesso comercial e sobrevivência econômica das empresas.

A atual realidade mercadológica possui a forma globalizada, a qual anseia cada vez mais, por produtos que apresentem um elevado índice de qualidade, associada a um custo competitivo para o consumidor final.

1.1 JUSTIFICATIVA PARA O TEMA

Segundo Siqueira (2008), estudos realizados recentemente pelas principais empresas desenvolvedoras de soluções para CAD/CAM/CAE, revelaram que sete entre dez engenheiros e profissionais de projetos, usuários de sistemas CAD 3D, acreditam que a análise de projeto e a previsão de seu comportamento, com base no Método dos Elementos Finitos (MEF) ou na Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC), é cara e de difícil uso. Acreditam, também, que os sistemas dedicados a esta atividade exigem de seus usuários, elevado nível de qualificação na área e que somente empresas de grande porte é que realmente necessitam do emprego dos mesmos. O resultado é que, muitos projetos são conduzidos pelos seus desenvolvedores até ao protótipo final ou a produção, sem que nenhum tipo de teste ou simulação comportamental tenha sido realizado, comprometendo a qualidade do produto.

O aumento do desempenho de componentes mecânicos, obtidos com o uso de técnicas voltadas para a otimização de massa, são significativos, ao ponto de que, seu emprego se constituiu em um fator decisivo na competitividade das empresas da área metal-mecânica. O impacto do emprego destas técnicas, não se limita apenas à otimização do projeto mecânico do componente em si, mas se estende para toda cadeia produtiva, pois um componente com menor peso ou volume, economiza material, energia empregada na sua manufatura e a conseqüente redução na emissão de poluentes. Possibilitando desta forma um

ganho na produtividade de todo sistema produtivo, refletindo diretamente no custo total do produto (SILVA, 2007)

As diretrizes para a elaboração deste trabalho foram: o conjunto de fatores expostos, somados à necessidade de proporcionar um melhor aproveitamento da modelagem sólida e sua integração com os recursos paramétricos dos sistemas CAD 3D e da plataforma CAE integrada, na forma de módulos otimizados.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem os seus objetivos focados na utilização de uma forma sistemática, dos sistemas CAD 3D comerciais de médio porte no desenvolvimento, projeto e aprimoramento de produtos, sendo expostos a seguir:

- Promover uma revisão bibliográfica sobre o ciclo de projeto, o desenvolvimento de produtos e das ferramentas computacionais destinadas a apoiar estas atividades.
- Propor uma metodologia para a modelagem sólida em sistemas CAD 3D, a ser empregada como ferramenta eficiente de otimização das atividades de projeto, desenvolvimento e aprimoramento de produtos.
- Explorar os recursos oferecidos por estes sistemas, tais como a parametrização dimensional e a modelagem por geometrias paramétricas.
- Abordar a integração com a plataforma CAE (Engenharia Assistida por Computador), com a finalidade de analisar e validar os protótipos digitais de produtos, empregados como instrumento eficaz de apoio à tomada de decisões, redução da ocorrência de erros e diminuição do número de protótipos físicos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é segmentado em cinco capítulos. Apresenta de forma seqüencial, os temas necessários para o seu desenvolvimento, a metodologia de trabalho adotada, os recursos disponíveis e ferramentas computacionais empregadas.

O capítulo 1 apresenta uma introdução à proposta do trabalho, a justificativa do tema e uma descrição do cenário atual do emprego das ferramentas computacionais no auxílio do desenvolvimento e manufatura de produtos, tratando a relevância do conjunto das mesmas perante os fatores que definem a competitividade das empresas.

No capítulo 2 são revistas as bases das metodologias empregadas no ciclo de desenvolvimento de projetos, propostas pelos principais autores ligados a esta área. Também são apresentadas, as características de modelagem sólida dos sistemas CAD 3D e dos sistemas CAE.

No capítulo 3 é apresentada a proposta de um método para modelagem sólida e otimização topológica de massa de componentes mecânicos, com o emprego de geometrias paramétricas e utilização de recursos de Análise por Elementos Finitos, para a previsão do comportamento do componente sob esforço.

O capítulo 4, é dedicado a implementação do método proposto na modelagem sólida de um suporte estrutural (protótipo digital) e a sua otimização de massa. A geração associativa automática de desenhos em 2D para a documentação de Engenharia e fonte de dados, para a fabricação da peça também é abordada,

O capítulo 5 descreve e discute os resultados obtidos, através de gráficos gerados a partir dos dados obtidos. Com base nos mesmos, é possível verificar o padrão de variação das tensões e previsão do comportamento do protótipo digital quanto às deformações geradas, pela aplicação de esforços.

No capítulo 6 é apresentada a conclusão, também é abordada a sugestão para futuros trabalhos, focando no emprego dos recursos que os sistemas CAD oferecem, em conjunto com outras ferramentas computacionais disponíveis visando

um apoio maior na tomada de decisões e automação de determinadas atividades dos profissionais envolvidos no projeto e desenvolvimento de produtos .

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é dedicado a uma revisão geral do ciclo tradicional de projeto e desenvolvimento de produtos, envolvendo os conceitos e aplicação dos sistemas CAD/CAE no auxílio destas atividades.

2.1 PROCESSO TRADICIONAL DE PROJETO

2.1.1 Ciclo de projeto

A contínua necessidade de inovar, em conjunto com as imposições de redução de custo de fabricação e aprimoramento da qualidade dos produtos já existentes, nos leva a constantemente rever os ciclos que envolvem as etapas do projeto, construção e meios empregados na manufatura de produtos.

A fase de planejamento de um projeto, também engloba outras funções como avaliação das oportunidades tecnológicas, avaliação do mercado e preço final do produto que será desenvolvido. Todos estes aspectos devem ser equiparados aos ofertados pelo concorrente (FERNANDES e ALEXANDRE, 2008).

Em paralelo, se observa a evolução dos sistemas computacionais, principalmente das plataformas CAD, que nas últimas quatro décadas partiu dos sistemas nos quais somente era possível o desenho e a edição de entidades com geometrias básicas (*retas e círculos*), até a nossa atualidade onde podemos modelar objetos em três dimensões, agregar propriedades físicas, simular o seu comportamento sob condições reais de trabalho, gerar automaticamente desenhos de fabricação e criar protótipos digitais dos produtos que estão sendo desenvolvidos.

Um projeto pode ser definido como um conjunto de atividades que transformam um conjunto de dados e situações, em algo que satisfaz uma necessidade (SHIGLEY e MISCHKE, 2005).

Esta necessidade poderá ser um novo produto, uma melhoria em um já existente, uma prevenção de falha em um sistema ou ainda o desenvolvimento de uma nova tecnologia.

Estes fatores levaram à integração dos sistemas CAD dedicados ao projeto, com os sistemas destinados a assistir a manufatura (sistemas CAM) e mais recentemente aos sistemas CAE, que apóiam a Engenharia envolvida na análise do comportamento físico e no correto dimensionamento estrutural e dinâmico dos componentes que integram um produto.

A aplicação destas ferramentas computacionais teve como principal consequência a redução do tempo e do custo de um projeto, bem como a diminuição do ciclo que abrange desde a descoberta da necessidade até o lançamento do produto no mercado (FOGGIATO e BOUTORIN, 2007).

O ciclo do processo tradicional de projeto pode ser dividido em seis etapas distintas e descritas a seguir (SHIGLEY e MISCHKE, 2005):

1. Reconhecimento ou descoberta da necessidade.
2. Definição do problema.
3. Síntese.
4. Análise e otimização.
5. Avaliação.
6. Apresentação.

O reconhecimento ou a descoberta da necessidade pode ser uma não conformidade originada em uma falha de um sistema ou de um determinado componente mecânico, concepção de novo produto ou ainda o desenvolvimento e aprimoramento de um processo de manufatura ou de produção.

A definição do problema deverá incluir todas as especificações para se obter a solução que atenda à necessidade proposta, estas especificações deverão contemplar as características funcionais, físicas, ambientais e quantitativas.

Toda restrição imposta ao projetista se converte em uma especificação, como, por exemplo, a disponibilidade de recursos e matérias primas para a fabricação do produto ou de seus componentes.

A síntese deverá evoluir em paralelo a fase de análise e otimização do produto.

O projeto experimental (protótipo) deverá ser construído a partir do projeto teórico, e a sua função será fornecer dados experimentais para a verificação das características físicas atribuídas e o seu comportamento sob condições de trabalho (SHIGLEY e MISCHKE, 2005).

Com base na análise dos dados obtidos, as alterações deverão ser processadas objetivando a otimização do projeto.

Na fase de avaliação, procede-se uma verificação se o projeto satisfaz as expectativas, tais como: funcionabilidade, confiabilidade, aparência, custo, etc., enfim, o conjunto de necessidades que resultaram no desenvolvimento do produto.

A apresentação, consiste na geração e apresentação dos desenhos de Engenharia aos setores competentes para se dar início ao processo de fabricação.

O ciclo tradicional proposto é exposto na forma de um fluxograma mostrado na Figura 1, no qual as etapas são representadas por retângulos e o fluxo de informações através de linhas e setas que indicam o sentido das mesmas (SHIGLEY e MISCHKE, 2005).

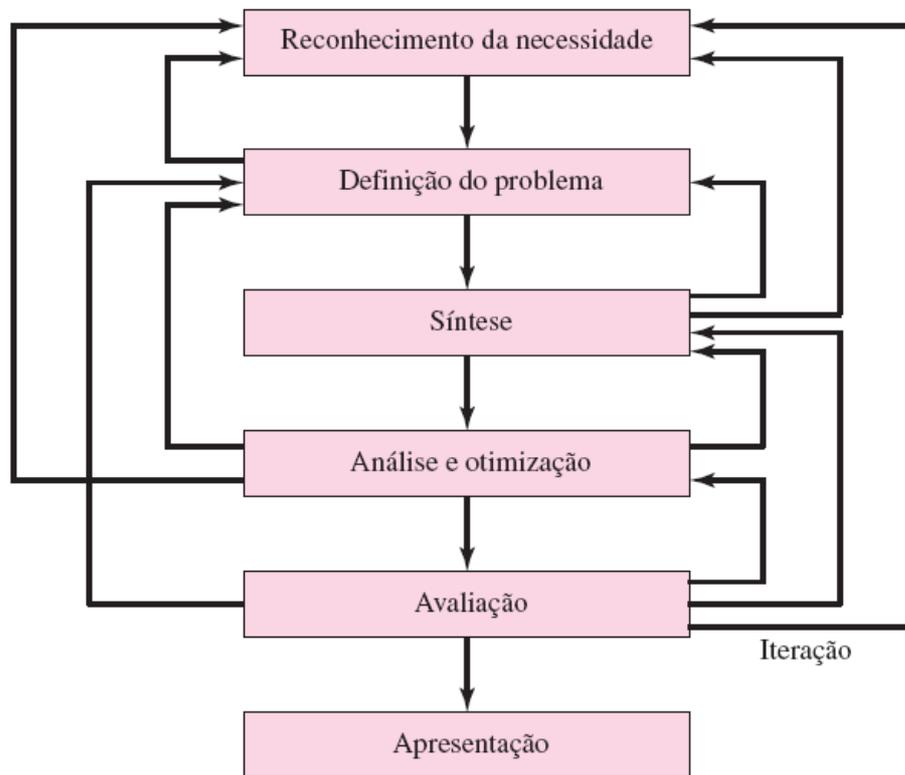


Figura 1 - Ciclo tradicional de projeto (SHIGLEY e MISCHKE, 2005)

O resultado produzido por este ciclo deverá ser funcional, seguro, confiável, competitivo, utilizável, manufaturável e mercável. Estes termos podem ser definidos da seguinte maneira:

- *Funcional*: Apresentar desempenho que atenda as necessidades e expectativas do consumidor.
- *Seguro*: O produto não deveria oferecer perigo ao usuário ou ao seu entorno, se condições perigosas não podem ser evitadas no projeto, proteções e demais dispositivos de segurança, bem como informações e avisos deverão ser previstos.
- *Confiável*: Podemos definir confiabilidade como uma probabilidade condicional à um determinado nível de confiança, que determina que um produto possa desempenhar as suas funções propostas, de forma satisfatória, ou sem apresentar falha por um determinado período de funcionamento.
- *Competitivo*: Apresentar a capacidade de competir no mercado consumidor, ao qual está direcionado.

- *Utilizável:* O produto deverá apresentar uma interação amigável ao usuário, agregando especificações como tamanho, controle, postura, ergonomia, força e demais requisitos que tornem o emprego uma tarefa simples e agradável ao usuário.
- *Manufaturável:* Possuir o mínimo de componentes, adequados à produção em escala, mantendo sob controle: *massa, distorções e resistência*, em acordo com as especificações do projeto.
- *Mercável:* Apresentar preço compatível à realidade do mercado que se destina e dispor de serviços de assistência técnica pós venda e de apoio ao consumidor.

2.1.2 Considerações e características de um projeto.

Determinadas considerações deverão ser observadas, durante a fase inicial de um projeto e as características envolvidas analisadas atentamente, pois as mesmas poderão influenciar diretamente o elemento que está sendo desenvolvido ou o conjunto todo (FERNANDES e ALEXANDRE, 2008).

Como exemplo, pode-se citar a resistência requerida de um determinado componente, sendo a mesma um fator importante na determinação da geometria e dimensões do mesmo. Nesta situação pode-se afirmar que a mesma é uma consideração importante do projeto (PAHL e BEITZ, 2005).

Quando empregamos a expressão *consideração de projeto*, estamos nos referindo a determinadas características, que o produto desenvolvido deverá possuir (SHIGLEY e MISCHKE, 2005).

Algumas destas características afetam diretamente as dimensões, a aparência e o material empregado.

Deve-se sempre considerar uma quantidade razoável de características e mencionar as principais, que devem ser observadas em um projeto:

- Funcionabilidade
- Resistência às tensões
- Distorção e rigidez
- Facilidade de montagem
- Resistência ao desgaste
- Resistência à corrosão
- Peso / massa
- Vida Útil
- Propriedades térmicas
- Lubrificação
- Manutenibilidade
- Tamanho

Esta relação não segue a ordem de importância das características, mas simplesmente as menciona como algumas que deverão ser observadas.

2.1.3 Padrões e codificações empregados

Um padrão é definido como um conjunto de especificações para peças, processos e materiais destinados a atingir a uniformidade, eficiência e uma qualidade determinada (PAHL e BEITZ, 2005).

Um dos principais objetivos de um padrão é limitar o número de itens contidos em uma especificação, de modo a proporcionar uma variedade de tamanhos, formas, materiais e ferramentas que variam em intervalos determinados, proporcionando a otimização do inventário dos mesmos.

Um código ou norma se constitui em um conjunto de especificações, destinadas à análise, projeto, manufatura e construção de algo. Seu propósito final é proporcionar um grau específico de segurança, eficiência, desempenho e qualidade almejada para um determinado objeto ou propósito (FERNANDES e ALEXANDRE, 2008).

2.1.4 Incertezas envolvidas

Propriedades dos materiais empregados, as cargas não previstas, a fidelidade de fabricação e a validade de modelos matemáticos, estão entre as principais incertezas presentes no processo de desenvolvimento de um produto.

Para se estabelecer condições de contorno para estas variáveis são aplicados métodos matemáticos, dentre eles o de maior emprego é o determinístico.

Este método estabelece um fator (n_d) denominado de “*fator de segurança*”, baseado em incertezas absolutas, de um parâmetro de perda de função e de um parâmetro máximo admissível (*que poderá ser a carga máxima permissível*), a definição para *fator de segurança* pode ser expressa pela equação (2-1) (SHIGLEY e MISCHKE, 2005):

$$n_d = \frac{\text{Parâmetro de Perda de Função}}{\text{Parâmetro Admissível Máximo}} \quad (2 - 1)$$

Algumas das principais incertezas envolvidas no desenvolvimento de produtos, relacionados às propriedades de resistência e a tensão suportada, e que influenciam diretamente na confiabilidade dos mesmos são listados a seguir (SHIGLEY e MISCHKE, 2005):

- Variação de suas propriedades decorrentes da composição química.
- Variação das propriedades ponto a ponto, por exemplo, em uma barra de aço.
- Ajustes e tensões geradas por interferências não previstas.
- Efeitos de temperatura ambiental não prevista nas condições iniciais do projeto.
- Intensidade das concentrações de tensões.
- Validade dos modelos matemáticos usados para representar a realidade.
- Efeitos da corrosão.
- Efeitos do desgaste prematuro.

- Exposição a temperaturas elevadas em condições de montagem, por exemplo, calor gerado por operação de soldagem.
- Tensões decorrentes de deformação a frio.
- Tratamentos térmicos inadequados ou mal controlados.
- Variáveis inerentes ao processo produtivo, tais como variações não previstas na temperatura ambiente.

2.1.5 Conceitos de tensão e resistência

A vida útil de muitos produtos e a sua durabilidade estão diretamente ligadas à forma como o projetista ajusta as tensões máximas atuantes em partes integrantes dos mesmos (COLLINS, 2006).

A máxima tensão desenvolvida deverá ser suficientemente inferior à máxima resistência do componente solicitado, para garantir um desempenho satisfatório e a possibilidade de ocorrência da falha ou perda de função, seja a mais próxima de zero possível, suplantando todas as incertezas possíveis presentes (PAHL e BEITZ, 2005).

Resistências são determinadas tensões nas quais algo interessante ocorre, como por exemplo: escoamento de 0,2%, uma deformação permanente, fratura, limite de proporcionalidade, etc. (OLIVEIRA, 2006).

Em determinadas situações estes eventos ocorrem em um nível de tensão, onde o componente apresenta perda de função, ou seja, sofre uma fratura ou deformação que o impossibilita de executar a ação da maneira para a qual foi projetado.

Resistência é uma propriedade específica de um material, ou de um componente, sendo que a mesma depende da escolha e especificações dos métodos de fabricação, da forma geométrica adotada, e do beneficiamento empregado como recurso a fim de proporcionar elevação dos níveis das propriedades físicas e químicas do material usado (SHIGLEY e MISCHKE, 2005).

Tensão é uma propriedade de estado de um corpo, sendo função direta da carga aplicada sobre o componente, da geometria do mesmo e do processo de manufatura empregado (BEER e RUSSEL, 1996).

Na atividade de projetar, um dos principais problemas enfrentados se constitui em como relacionar a Resistência e a Tensão, para se obter um produto seguro, eficiente e que atenda as expectativas, a um custo compatível com a realidade do mercado a que se destina.

2.1.6 Fator de projeto

Ao se abordar as situações presentes nas atividades de projetar, desenvolver e aprimorar, sempre estarão presentes as seguintes situações, que constituem pontos críticos de tomadas de decisões (SHIGLEY e MISCHKE, 2005).

- O produto será fabricado em grandes quantidades, apresenta perigo ou envolve danos pessoais, ambientais e materiais, em caso de falha ou perda de função, justificando desta forma a execução de um programa de ensaios mais elaborado, envolvendo materiais e componentes, com a confecção de protótipos físicos e testes de campo.
- O volume a ser produzido justifica um programa modesto de ensaios, limitado somente aos materiais (tração e compressão) e não há riscos envolvidos que possam causar danos pessoais, materiais ou ambientais.
- O produto será manufaturado em quantidade pequena e não há a presença de riscos, o que não justifica a elaboração de um programa de ensaios.

As duas últimas situações são as mais desafiadoras, e o enfoque no “*fator de projeto*” é o método mais empregado para as soluções dos problemas, sendo também denominado de *método clássico de projeto* (FERNANDES e ALEXANDRE, 2008).

O fator de projeto estabelece uma relação entre a carga admissível e a carga onde ocorre a perda de função, na qual a tensão gerada supera a resistência do componente, conforme já mencionado, onde a carga admissível é obtida pela divisão da carga de perda de função pelo fator de segurança (n_d), equação (2-2) (SHIGLEY e MISCHKE, 2005).

$$\text{Carga Admissível} = \frac{\text{Carga de Perda de Função}}{n_d} \quad (2-2)$$

2.1.7 Aspectos econômicos

O custo é um fator de tamanha importância no processo de decisão de um projeto que facilmente demanda um tempo maior ou superior, no seu estudo, quanto aquele dedicado ao assunto integral e principal foco do projeto (SILVA, 2007).

Não se pode afirmar nada, em um sentido absoluto, no que concerne a custos, envolvidos no desenvolvimento, projeto e na implementação de soluções e de novos produtos, em atendimento à demanda e às necessidades propostas

Com o crescente emprego de máquinas automáticas e de robôs nas cadeias produtivas, pode-se observar, uma tendência de queda nos custos de processamento de materiais e na manufatura de produtos (FERNANDES e ALEXANDRE, 2008).

Este fato vem em contrapartida a uma tendência de elevação anual dos custos de mão de obra, matérias primas e de insumos, contribuindo para que uma grande parte da população possa ter acesso a produtos de qualidade a um preço compatível com o poder aquisitivo destes consumidores. Pode-se citar como exemplo, os produtos eletroeletrônicos que apresentam uma significativa redução de custo na última década, porém mantendo-se o padrão de qualidade exigido pelo mercado consumidor.

O fator decisivo para a ocorrência deste fato foi à introdução da automação em grande parte de sua cadeia produtiva, desde o ciclo de projeto, com o uso de ferramentas computacionais para projeto (sistemas CAD), simulação de comportamento sob condições de serviço, deformações, dinâmica de esforços (sistemas CAE), manufatura com auxílio de sistemas para programação e otimização (sistemas CAM) e mais recentemente, a inspeção e controle dimensional (sistemas CAI). O emprego em conjunto destas ferramentas computacionais, proporcionou uma significativa redução nos custos de fabricação, em consequência da minimização de erros, adequação estrutural do produto e aumento da eficiência global, aliada a uma maior flexibilização das linhas produtivas (PAHL e BEITZ, 2005).

O emprego de tamanhos padronizados e comerciais é uma das mais eficientes maneiras de se obter redução de custos. Este fato baseia-se na evidência de que, matérias primas, componentes e insumos, quando fabricados em larga escala, apresentam um custo menor devido à continuidade e à otimização de seus processos produtivos.

O projetista ou desenvolvedor sempre deverá centrar suas especificações e seleção, em itens normalizados, como um meio de viabilização do projeto.

2.1.8 Tolerâncias

As especificações de tolerâncias afetam diretamente o custo de um produto, influenciando significativamente a sua mercabilidade (PAHL e BEITZ, 2005). Tolerâncias dimensionais de um projeto também afetam a produtividade das mais variadas formas, pois aquelas mais restritas exigem operações adicionais no processo de manufatura, a ponto de tornar a produção de um produto ou componente inviável economicamente.

A definição mais objetiva de tolerância é expressa como: “*a máxima variação de uma especificação dentro de um intervalo tolerado, sem que a ocorrência deste fato possa influir no comportamento de um componente*” (PAHL e BEITZ, 2005).

As especificações de tolerâncias normalmente abrangem: *as variações dimensionais, a rugosidade superficial, propriedades físicas e químicas, propriedades mecânicas, tratamentos, etc.* enfim, todos os fatores que poderão afetar o desempenho de um produto. Deverão sempre seguir padrões determinados e previstos nas normas estabelecidas.

Os componentes de um produto que possuem intervalos de tolerâncias mais extensos poderão ser fabricados em máquinas e equipamento com taxas de produção maiores, devido a uma maior aceitabilidade das variações dimensionais decorrentes dos efeitos das variáveis inerentes aos processos produtivos, tais como: *temperatura ambiente, vibrações, dilatação, desgaste de ferramentas, qualificação da mão de obra, desgaste das máquinas, cansaço do operador.* Em consequência destes fatos, os custos diretos de mão de obra serão menores, devido à razão do custo da mão de obra pelo número de peças produzidas, contribuindo para a redução do custo total do produto.

Também a taxa de produtos rejeitados será menor, o que influencia diretamente os custos de produção e viabilidade do projeto, uma vez que o número de peças conformes será maior, ou seja, atendendo o intervalo de variação dimensional tolerado nas especificações de projeto.

2.1.9 Ponto de equivalência

A determinação e escolha de um processo produtivo ou seleção do tipo de máquina que deverá ser empregada na fabricação de um produto, depende de um conjunto de situações, como: *custos, quantidades envolvidas, velocidades de produção, tratamentos aplicados, etc.*

Uma análise criteriosa dos processos disponíveis e os tipos de equipamentos envolvidos levarão à determinação de um ponto de equivalência de custos dos mesmos (SHIGLEY e MISCHKE, 2005).

Este ponto de equivalência determina até que ponto, um processo poderá ser mais viável economicamente que os demais, levando-se em consideração uma série de fatores como: *quantidade, tempo de preparação e ajustes, quantidade de peças produzidas por um intervalo de tempo, custos de mão de obra, consumo de energia, etc.*

Para ilustrar de melhor forma, pode-se citar como exemplo, a fabricação de um eixo, na qual temos a opção de escolha entre uma máquina automática e uma manual. A produção na manual é de 10 unidades por hora e na automática 25, o custo da mão de obra para a operação das mesmas é igual e possui o valor de R\$20,00 por hora trabalhada, já incluídos os encargos. O tempo de ajuste e preparação da automática é de 03 horas, envolvendo trocas de dispositivos, ajustes de ferramentas, programação, etc. Já na máquina manual, este tempo inexistente devido à interação e influência direta do operador no processo (SHIGLEY e MISCHKE, 2005).

Através da elaboração de um gráfico comparativo, entre produção *versus* custo, conforme ilustrado na Figura 2, pode-se claramente observar que o processo manual apresenta um custo menor se, a quantidade a ser produzida for inferior ou igual a 50 unidades, acima deste valor a produção empregando a máquina automática será mais viável.

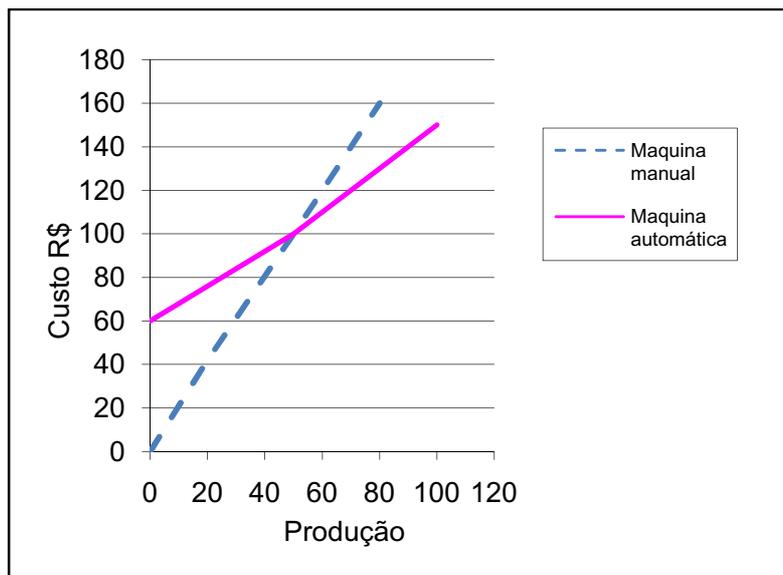


Figura 2 – Gráfico produção versus custo

Na Figura 2 pode-se verificar que o ponto de equivalência está situado no cruzamento das duas retas correspondentes aos processos manual e automático. Após este ponto, os custos do processo manual são maiores que o automático para um lote de peças de igual tamanho, desta forma a quantidade a ser produzida será o fator determinante para a escolha de qual método será empregado na fabricação do componente.

2.1.10 Confiabilidade

No ciclo tradicional de projeto, o método da confiabilidade relaciona as tensões e resistências de modo que esta relação possibilite ao produto atingir uma taxa de sucesso aceitável. A medida estatística da probabilidade de que um determinado componente possa apresentar uma falha, durante o seu uso, recebe a denominação de: confiabilidade deste (SHIGLEY e MISCHKE, 2005).

A confiabilidade (R) pode ser expressa por um número localizado em um intervalo maior ou igual a zero e menor que um ($0 \leq R < 1$). A fim de se ilustrar melhor este raciocínio podemos citar como exemplo, um determinado componente,

que apresenta uma falha em cinco unidades de um lote de mil fabricadas, o que poderá ser aceitável dependendo da classe e requisitos de qualidade determinados para o mesmo. A confiabilidade esta representada na equação (2-3):

$$R = 1 - \frac{5}{1000} = 0,995 \quad (2-3)$$

Ou seja, a confiabilidade será de 99,5% para este componente. Uma avaliação cuidadosa deste índice deverá considerar as incertezas, ou suas estimativas, de acordo com os parâmetros referenciais adotados.

No método da confiabilidade, deve-se fazer uma rigorosa seleção dos materiais empregados, da geometria da peça desenvolvida (*evitar concentrações de tensões*) e dos processos de fabricação adotados, visando atingir a meta estipulada nas diretrizes iniciais de projeto, que deverão ser rigorosamente respeitadas. As principais variáveis envolvidas, como tensões, resistências, cargas, etc. são descritas quanto as suas medias, desvios padrões e distribuições (OLIVEIRA, 2006).

2.1.11 Fontes de informações técnicas

Na atualidade as informações são geradas e distribuídas em um fluxo altamente veloz, graças aos meios de comunicação, em especial a informática que possibilitou o tráfego de uma enorme quantidade de dados através de arquivos, programas e pela rede mundial de computadores (*internet*), possibilitando o acesso a uma extensa base de dados, espalhada por todos os continentes. Ainda dentro desta realidade, as principais fontes de informações disponíveis são:

- *Bibliotecas* com acervos técnicos, dissertações, teses e demais meios de vincular as informações técnicas pela forma escrita ou digital.

- *Organismos governamentais* como Institutos de pesquisas, Universidades e departamentos de registro de patentes e de propriedade industrial.
- *Sociedades e Órgãos Normativos* que estabelecem padrões e normas de fabricação, qualidade e demais características conferidas a produtos e serviços, como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE), etc.
- *Catálogos técnicos de fabricantes* que fornecem dados específicos, relatórios de ensaios, custos e desempenho esperado.
- *Internet* que fornece acesso a sites de Universidades, fabricantes, laboratórios de testes, institutos de pesquisas, bibliotecas virtuais, etc.

2.1.12 O emprego de ferramentas computacionais

A diminuição contínua dos custos dos microcomputadores com o aumento de sua capacidade de processamento de informações associada à oferta de programas e pacotes de soluções robustos a preços acessíveis, a maioria das empresas, aliada a uma agressiva campanha de ganho de mercado, por parte dos desenvolvedores destes sistemas, constituem um conjunto de ferramentas que oferecem uma imensa capacidade de auxiliar o projeto, a simulação e a análise de comportamento de produtos, contribuindo significativamente para a redução do ciclo de projeto e possibilitando aos fabricantes lançarem uma maior quantidade de produtos no mercado em um intervalo menor de tempo (SPECH, 2005).

Os programas atuais destinados ao projeto e desenho assistido por computador (CAD) permitem a modelagem e o desenvolvimento de objetos na forma tridimensional (3D) a partir dos quais é possível se obter projeções ortográficas e o dimensionamento associativo, de forma automática.

As etapas do processo de manufatura podem ser desenvolvidas diretamente da base de dados do modelo 3D, possibilitando o reconhecimento automático das características geométricas (canais, chanfros, raios, furos, etc.) empregadas na

construção do modelo, por parte dos programas CAM, que são sistemas computacionais dedicados ao auxílio da manufatura e que, em determinados casos, já estão integrados aos sistemas CAD comerciais.

Outra vantagem do uso da base de dados tridimensional é a obtenção de dados precisos do modelo, como massa, centro de gravidade, momento de inércia, etc. (SIQUEIRA, 2008).

Estes dados são obtidos após a atribuição das propriedades do material selecionado, em muitos casos o sistema CAD já os possui, bastando selecionar o material em uma lista do banco de dados do mesmo, sendo também, possível editá-los ou ainda inserir novos materiais e suas respectivas propriedades (PAHL e BEITZ, 2005).

Alguns programas realizam uma análise específica de Engenharia, e simulações que auxiliam o projetista a obter a excelência no produto desenvolvido pela otimização de suas propriedades e características construtivas, são os denominados sistemas CAE. Estes sistemas não são considerados ferramentas de criação de projeto, como os sistemas CAD, são fundamentados nos conceitos de Engenharia, em determinados casos, podem estar inseridos nos sistemas CAD no formato de módulos otimizados, dedicados às aplicações específicas, apresentando uma interface amigável e simples ao usuário. Nesta classe estão incluídos os programas baseados na Análise por Elementos Finitos (AEF), voltados para a análise de tensões, deformações, transferência de calor, etc., tais como ALGOR®, ANSYS®, COSMOS®, e outros. Programas destinados à análise computacional da dinâmica dos Fluidos (CFD) e programas orientados para simulação de funcionamento de mecanismos e forças dinâmicas atuantes, tais como ADAMS® e WORKING MODEL®, também são exemplos de sistemas CAE. Entre os programas não fundamentados nos conceitos de Engenharia, mas amplamente empregados no auxílio ao projeto pode-se incluir os voltados para elaboração de planilhas eletrônicas, por exemplo, EXCEL®, LOTUS® e também, os programas matemáticos, MAPLE®, MATLAB®, MATHCAD®, dentre outros.

Todos estes sistemas proporcionaram uma revolução no processo de projetar, facilitando e otimizando inúmeras tarefas. Porém determinados resultados apresentados poderão estar muito distantes da realidade. Isto se deve ao fato de que, se registros e dados não forem confiáveis ou estarem incorretos, os resultados

apresentados não serão válidos, ou ainda ocorrer uma interpretação equivocada dos mesmos. Em consequência, uma série de falhas e situações de funcionamento inadequado poderão vir a ocorrer, comprometendo a segurança dos usuários e a confiabilidade do produto. Os responsáveis pelo projeto e usuários destas ferramentas computacionais, deverão se assegurar quanto à validade dos dados inseridos nos sistemas e os resultados obtidos, verificando e confrontando os mesmos com padrões e procedimentos adotados. Se resultados discrepantes forem apresentados ou em caso de dúvida, em relação aos dados inseridos, testes e ensaios de campo mais elaborados deverão ser realizados a fim de validar o produto ou corrigir as divergências dos dados empregados

2.2 MODELAGEM SÓLIDA DE OBJETOS

As geometrias tridimensionais construídas nos sistemas CAD 3D são entidades sólidas, que apresentam propriedades físicas como: massa, volume, centro de gravidade, módulos de elasticidade e de deformação, entre outras, tendo os seus valores baseados nas características do material atribuído ao objeto modelado. Estes materiais, na sua grande maioria, constam nas bibliotecas dos sistemas CAD 3D. Caso um material selecionado não conste na biblioteca, é possível criá-lo, fornecendo os valores de suas características (SOUZA e ULBRICH, 2009).

Segundo Spech (2005), a modelagem de objetos na forma sólida permite a redução do ciclo de desenvolvimento dos produtos, desde a sua concepção em atendimento a uma necessidade, até a sua colocação no mercado.

Também, aliada a um sistema flexível de manufatura, possibilita a fabricação de produtos, em pequenos lotes e a confecção de protótipos físicos de novos produtos, sem penalizar excessivamente os custos de produção, graças à transferência de dados de forma direta, entre os sistemas computacionais destinados ao projeto e ao apoio à manufatura (sistemas CAD/CAM). Entre as principais vantagens do emprego desta forma de modelagem, pode-se destacar:

- Redução do tempo de ciclo de desenvolvimento.
- Criação de protótipos digitais de produtos.
- Melhor integração dos profissionais envolvidos.
- Visualização realística na forma tridimensional.
- Montagem tridimensional de componentes.
- Previsão e correção de erros de projeto na fase inicial do desenvolvimento.
- Melhora na comunicação entre clientes e fornecedores.
- Alterações necessárias efetuadas de forma rápida.
- Simulações de comportamento sob solicitações estáticas e dinâmicas.
- Automação da manufatura, com planejamento de processos através do compartilhamento de uma única base de dados.
- Geração automática de desenhos em 2D para a documentação de Engenharia.

Devido a estas características, a modelagem sólida é aquela mais usada no projeto e desenvolvimento de produtos, principalmente naqueles, onde suas características físicas são fatores determinantes como: elementos de máquinas, componentes estruturais, autopeças e itens destinados a indústria aeronáutica e aeroespacial (SOUZA e ULBRICH, 2009).

2.2.1 Principais tipos de modelagem sólida

2.2.1.1 Construção baseada em geometrias sólidas (CGS)

Os objetos sólidos construídos através deste método são o resultado da combinação de sólidos simples primitivos, como cubos, cilindros, esferas, etc., utilizando operações booleanas (*George Boole*, 1815-1864, desenvolveu a Álgebra de *Boole*) que promovem a adição, subtração e interseção de objetos sólidos

primitivos. O processo de construção e a sequência de operações são armazenados pelo sistema CAD, na forma de uma *árvore de criação topológica*, na qual, estão incluídos todos os sólidos primitivos empregados e suas respectivas dimensões, posições, etc. além de todas as operações booleanas realizadas para a construção do objeto final (SOUZA e ULBRICH, 2009). A Figura 3 exemplifica a aplicação deste conceito na modelagem sólida, onde pode-se verificar a adição, intersecção e subtração de sólidos primitivos, tendo como resultado final o objeto sólido com as características desejadas.

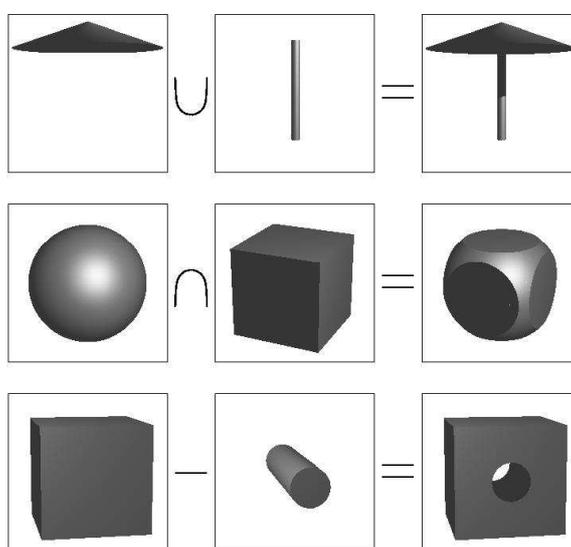


Figura 3 - Sólidos obtidos com operações Booleanas

O processo de construção de objetos com este tipo de modelagem é bastante simples e apresenta entre as suas principais vantagens a robustez, como um menor número de erros numéricos ou computacionais. Também, não exige grandes recursos para o armazenamento de informações geométricas, devido à simples definição dos objetos modelados. As principais desvantagens são: a limitação na construção de objetos que apresentam geometrias complexas e dificuldade em efetuar alterações futuras, devido a poucos recursos de edição oferecidos.

2.2.1.2 *Modelagem baseada em características geométricas*

A modelagem de objetos executados nos sistemas CAD 3D atuais, que empregam este método, exclui as operações de intersecção, pois as entidades necessárias são criadas automaticamente, sob determinação do usuário. Desta forma não existe a necessidade de criação e posicionamento de geometrias auxiliares, utilizadas nas operações de intersecção, o que confere ao método uma melhor eficiência e produtividade na operação de modelamento sólido. Deste modo as operações booleanas não são necessárias, dando uma maior flexibilidade e acelerando o desenvolvimento. O histórico de operações executadas e das características geométricas empregadas, é armazenado em uma *árvore de construção topológica* do modelo, e qualquer alteração necessária, envolvendo dimensões ou alterações na forma da geometria empregada, poderá ser feita facilmente pela seleção da mesma nesta árvore (SOUZA e ULBRICH, 2009). São exemplos de características geométricas: *furos, chanfros, rebaixos, rasgos, canais, etc.*

Também as operações e regras, de validação de sólidos, são executadas internamente de forma automática, impedindo desta forma que sólidos inválidos sejam criados, sendo que todos os sistemas CAD 3D comerciais possuem esta característica de assegurar a validade dos objetos sólidos modelados. O conjunto de propriedades e especificações, como: *tolerâncias dimensionais, acabamento superficial e demais informações do processo* de fabricação, podem ser agregadas à geometria empregada. Com exemplo podemos citar o modelamento de um alojamento de um parafuso, ao qual podem ser agregados, dados referentes do processo produtivo, tais como: *estratégias de furação, diâmetro de brocas, parâmetros de corte, chanfro de escareamento, acabamentos, etc.*

Estas características associativas apresentadas por este tipo de modelagem propiciam o planejamento do processo de fabricação, a integração efetiva com os sistemas de apoio à manufatura, (sistemas CAM), e a geração de forma automática dos programas CNC (Comando Numérico Computadorizado) pelo reconhecimento automático das características geométricas empregadas. A Figura 4 apresenta uma modelagem de um sólido, por este método, onde são vistos, em (a) um sólido inicial

de forma cúbica, ao qual é acrescentado uma geometria de furo rosqueado (b) e posteriormente à dos raios de arredondamento das arestas (c), ambas construídas diretamente pelo uso dos comandos específicos de criação, do sistema CAD 3D empregado.

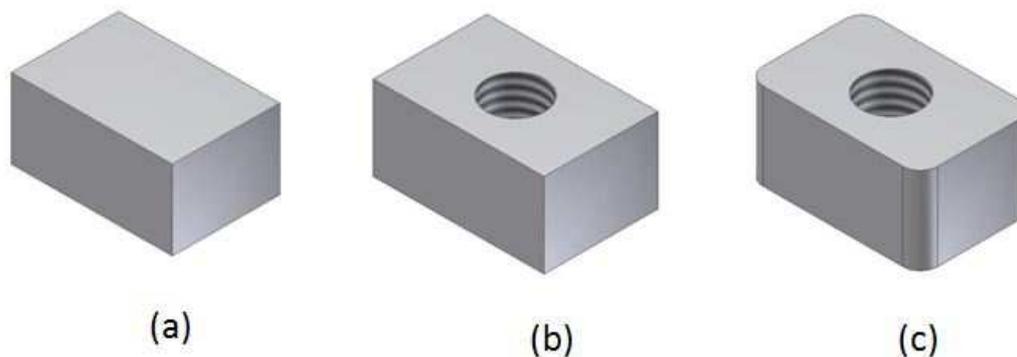


Figura 4 - Aplicação de características geométricas

Os recursos de criação de conjunto de arquivos (bibliotecas), destas geometrias, disponíveis nos sistema CAD 3D, conferem uma grande flexibilidade e produtividade ao trabalho de modelagem, sendo a forma mais empregada atualmente, na maioria das empresas (SOUZA e ULBRICH, 2009).

2.3 SISTEMAS CAE

2.3.1 Definições

Engenharia Auxiliada por Computador ou *Computer Aided Engineering* (CAE) é uma ferramenta de trabalho que utiliza o computador como suporte à Engenharia auxiliando-a no desenvolvimento de projetos, por meio de análises pré-definidas, tais

como: análises estáticas, dinâmicas, térmicas, magnéticas de fluidos, acústicas, de impacto e simulações de funcionamento (RENG, 1994). Estes recursos fazem do CAE uma ferramenta eficiente para o aumento de produtividade e fator determinante para redução de custos de um projeto, implicando, também na diminuição da ocorrência de erros e do tempo de lançamento do produto final (FIALHO, 2008).

O CAE está sustentado em ferramentas de CAD avançadas, as quais não só podem definir as dimensões do produto concebido, como, também, outras características, como: materiais, acabamentos, processos de fabricação, de montagem e até interações com elementos externos, como forças aplicadas, temperatura, etc. Graças a estes fatos, pode-se criar protótipos virtuais dos produtos, simulando sobre eles as condições de uso e, assim, efetuar estudos prévios sobre aspectos, tais como: estabilidade, resistência, processo de fabricação de melhor desempenho, dentre outros comportamentos. Para estes estudos, empregam-se amplas bases de dados e técnicas de análise, programadas em módulos, que se integram nos sistemas CAD/CAE (FIALHO, 2008).

Os principais sistemas CAE comerciais são baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF), mas também existem outros métodos como, por exemplo, Simulação Mecânica do Evento (SME), Dinâmica Fluida Computacional Térmica (DCT) e Fluida da Análise de Fluxo (DAF).

2.3.2 Método dos Elementos Finitos (MEF)

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem por princípio, a divisão de um modelo contínuo em “*elementos geométricos*”, que são representados matematicamente e/ou graficamente. Desta forma, os cálculos são feitos pontualmente e, por meio de análises e interações matemáticas, é gerado um resultado na forma de uma malha tridimensional, que cobre e permeia o modelo contínuo. Resolvem-se, assim, as equações diferenciais que governam os fenômenos físicos inerentes ao problema em questão. O MEF permite simular respostas dos projetos e usar estes resultados,

para melhorar seu desempenho, reduzindo a quantidade de protótipos físicos (AZEVEDO, 2003).

Em linhas gerais, pode-se definir o MEF como um método matemático, no qual, um meio contínuo é discretizado, ou seja, subdividido em elementos que mantêm as propriedades do objeto original. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos para que sejam obtidos os resultados desejados (FIALHO, 2008).

Em 1943 o conceito de elementos finitos foi apresentado, ainda sem esta denominação, por Richard Courant e, em 1960, os pesquisadores Turner, Clough, Martins e Topp utilizaram pela primeira vez o nome “Método de Elementos Finitos”, descrevendo-o e detalhando os fundamentos de seu potencial. A partir de então, o desenvolvimento do MEF foi em uma escala exponencial, aplicando-se à simulação e à solução de problemas em diversos campos da Engenharia, Medicina, Odontologia, Termodinâmica, Eletromagnetismo e áreas afins (OLIVEIRA, 2000).

Sabe-se, no entanto, que o uso de softwares CAE baseados no MEF apresenta muitos pontos positivos, porém, as desvantagens existem, dentre elas o fato de não haver uma solução perfeitamente compatível, capaz de prever qualquer situação. Sabe-se também da importância de uma ferramenta de auxílio, bastando estudo, compreensão de suas funcionalidades e, principalmente, o bom senso de quem opera com ela. Sabe-se, ainda, que os programas de elementos finitos não são ferramentas que independem do julgamento do analista, pois constituem apenas um auxílio a ele, que deve conhecer os conceitos fundamentais do MEF (OLIVEIRA, 2006).

2.3.3 Análise por Elementos Finitos (AEF)

Como mostrado, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma metodologia numérica de análise de projetos de Engenharia que, atualmente, é tido como o método padrão da análise computacional devido a sua generalidade.

O princípio do MEF é a divisão do modelo, em diversas partes pequenas de formas simples chamadas de elementos, que substituem de forma eficaz, um problema complexo por muitos problemas simples que necessitam ser resolvidos simultaneamente. A soma de todos os elementos finitos que compõe o modelo é chamamos de malha (*mesh*), conforme ilustrado na Figura 5, onde se observa o modelo sólido e a sua divisão em diversos elementos, que neste caso possuem a forma tetraédrica (SOLIDWORKS CORPORATION, 2010).

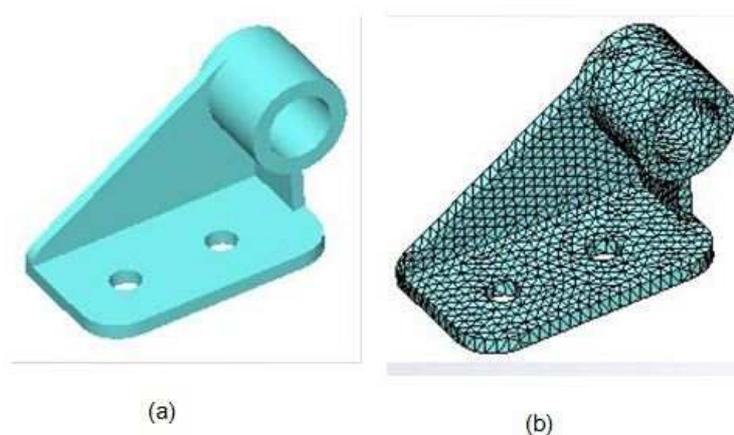


Figura 5 - Em (a) modelo sólido (b) malha dos elementos

O modelo gerado em um sistema CAD 3D, na forma sólida, é subdividido em múltiplos elementos. As arestas que limitam os elementos podem ser curvas ou retas e se unem em pontos comuns chamados *nós*, conforme ilustra a Figura 6 (SOLIDWORKS CORPORATION, 2010).

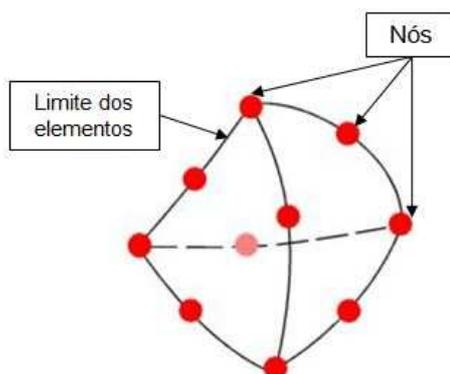


Figura 6 - Elementos e nós

O comportamento de cada elemento é, então, conhecido sob todos os cenários possíveis. A resposta de qualquer alteração, nas variáveis de um elemento é interpolado na resposta dos nós dos elementos adjacentes. Cada nó é descrito inteiramente por uma gama de parâmetros dependendo do tipo da análise e do elemento usado. Por exemplo, a temperatura de um nó descreve inteiramente sua resposta na análise térmica. Para análises estruturais, a resposta de um nó é descrita, no geral, por três variáveis (x, y, z) e por três rotações (x, y, z). Estes são chamados graus de liberdade (*degrees of freedom* ou *DOFs*) (SOLIDWORKS CORPORATION, 2010).

Assim, o software formula as equações que governam o comportamento de cada elemento, que se faz necessário, de acordo com as características de ensaio a se examinar, fazendo considerações e relações de sua ligação a outros elementos. Estas equações relacionam a resposta às propriedades, às restrições, e às cargas já conhecidas e alimentadas no sistema. Em seguida, o programa organiza as equações em um grande lote de equações algébricas simultâneas e resolve-as. Na análise de tensões, o programa encontra os deslocamentos em cada nó e, então, calcula as tensões, apresentando o resultado, por exemplo, na forma de um gráfico tridimensional onde a intensidade das tensões é mapeada através de cores, como ilustra a Figura 7 (OLIVEIRA, 2006).

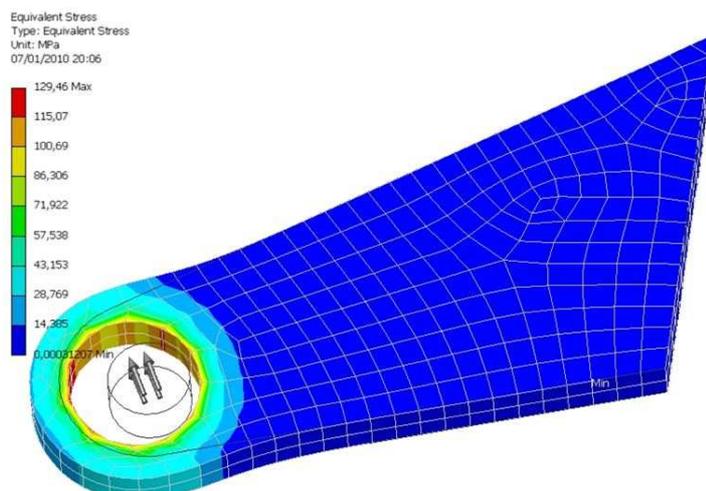


Figura 7 - Mapeamento das Tensões

2.3.4 Principais aplicações

Como uma ferramenta computacional, o sistema CAE analisa e processa o cálculo de forma a minimizar esforços manuais do profissional de projetos que, desta forma, se preocupa menos com a parte operacional, focando as suas atenções na questão estratégica. Segundo Reng (1994), CAE pode ser definido como: análise e avaliação do projeto da Engenharia usando técnicas computacionais para calcular a operacionalização e funcionalidade do produto e parâmetros da manufatura, muito complexos para os métodos clássicos.

No processo de desenvolvimento e projeto de produtos as principais questões enfrentadas pelo profissional ou pela equipe de projeto são:

1. A peça poderá quebrar?
2. Como será sua deformação?
3. Pode-se usar menos material sem afetar o desempenho?

Na ausência de ferramentas de análise de tensões e deformações, estas questões só podem ser respondidas com a execução de onerosos e demorados ciclos de desenvolvimento do produto. Segundo Fialho (2008) um ciclo de

desenvolvimento de produtos, sem o apoio de um sistema CAE para análise comportamental do produto, consiste tipicamente nas seguintes etapas:

1. Construção do modelo no sistema CAD 3D.
2. Criação de um protótipo do projeto.
3. Teste do protótipo em campo.
4. Avaliação dos resultados dos testes de campo.
5. Modificação do projeto com base nos resultados dos testes de campo.

Esse processo continua até que, uma solução satisfatória seja encontrada, demandando recursos materiais e humanos, além de maior tempo dedicado ao ciclo do desenvolvimento, tendo como consequência o atraso da entrada do produto no mercado consumidor, resultando em uma possível perda considerável de receita.

A análise com um sistema CAE ajuda na realização das seguintes tarefas (SOLIDWORKS CORPORATION, 2010):

1. Redução do custo, testando o modelo no computador em vez de em dispendiosos testes de campo.
2. Redução do tempo necessário para o produto entrar no mercado, diminuindo a quantidade de ciclos de desenvolvimento.
3. Otimizando os projetos, simulando rapidamente vários conceitos e cenários antes da decisão final, desta forma obtendo mais tempo para considerar novos desenvolvimentos.

O CAE pode ser também, utilizado na verificação do produto referente à sua funcionalidade, encaixes, interferências, etc., podendo reavaliá-las. Outro ponto é a checagem se as necessidades são compatíveis com a capacidade de produção, reduzindo drasticamente o tempo gasto com cálculos operacionais.

Os sistemas CAE, conseguem se adaptar as mais diferentes áreas devido a sua grande flexibilidade, podendo ser utilizado em áreas que variam da construção civil à indústria automobilística, aeronáutica, aeroespacial e bioengenharia (desenvolvimento e otimização de próteses), etc.

2.3.5 Vantagens estratégicas no uso dos sistemas CAE

O tempo e custo despendidos no projeto são reduzidos, pois o refinamento e possíveis correções podem ser realizados de forma mais rápida e segura com a utilização de sistemas computacionais. A utilização de um sistema CAE melhora a eficiência do projeto onde os erros podem ser corrigidos e alterações testadas mais rapidamente de forma virtual, desta forma tem-se a eliminação ou uma significativa redução da quantidade de protótipos de testes a serem construídos, pois muitos destes testes podem ser feitos virtualmente com o uso destes sistemas (FIALHO, 2008).

A economia nos processos de fabricação é um dos grandes motivos para utilização de CAE. Simular sistemas antecipadamente é mais barato do que a realização de testes experimentais com os mesmos objetivos. A realização de cálculos complexos na fase da Engenharia do desenvolvimento, através do emprego de ferramentas computacionais, aumentam a produtividade global, com significativa redução do tempo de ciclo desta fase (RENG, 1994).

Outro ponto importante é o fato de que, as alterações no modelo em CAD 3D do produto, com base nos resultados apresentados pelas simulações executadas nos sistemas CAE, podem ser feitas rapidamente. Desta forma, efetua-se a execução de uma nova série de análises, até se atingir os objetivos de comportamento do produto, estabelecidos nas diretrizes iniciais do seu projeto.

2.3.6 Desvantagens apresentadas:

As principais desvantagens dos sistemas CAE comerciais atuais, são:

- O custo dos sistemas CAE costuma ser elevado, dependendo de sua finalidade, o investimento não será viável economicamente.

- Necessita de computadores de alto desempenho, para realizar cálculos complexos, principalmente quando os sistemas são voltados para a dinâmica de fluidos e análises térmicas.
- Os sistemas de CAE não mostram qual o problema, apenas processam e exibem um resultado, que ainda precisam passar por uma mão de obra especializada, para interpretá-lo e determinar qual a melhor alternativa.
- Não é possível realizar todas as simulações necessárias, com a finalidade de assegurar a qualidade do produto final, através do programa, portanto, nem sempre a utilização de protótipos físicos pode ser descartada totalmente.

3. PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA PARA MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Embora o método de modelagem sólida esteja se estabelecendo como padrão na maioria das empresas, existe uma carência de informações sobre a maneira correta de se gerar os modelos. Isto tem levado muitos profissionais da área a produzir modelos tridimensionais sem nenhum critério, o que resulta em perda de tempo na edição e reutilização dos mesmos, por outros projetistas (FOGGIATO e BOUTORIN, 2007).

O uso do método em conjunto com o recurso da parametrização dimensional, das geometrias empregadas, garante a redução no tempo de modelagem e a possibilidade de geração de sólidos automaticamente pela simples alteração de uma dimensão básica, a qual, as demais possuem vínculos baseados em relações e equações matemáticas.

Com base na experiência do autor, como profissional de Engenharia Mecânica, atuante na área de desenvolvimento e projetos de produtos e equipamentos e como Docente no ensino profissional e tecnológico, em disciplinas relacionadas às tecnologias CAD/CAM/CAE, este trabalho propõe estratégias e recomendações, tendo como principal objetivo, otimizar a modelagem de objetos sólidos, em sistemas CAD 3D. E a sua adequação topológica de massa, pelo emprego dos recursos de análise estrutural, pertencentes a plataforma CAE, destes sistemas, na forma de módulos otimizados.

3.2 METODOLOGIA PROPOSTA

Para que sólidos tridimensionais possam ser modelados, de maneira eficaz e produtiva em sistemas CAD 3D, possibilitando a sua futura reutilização através da edição das geometrias que o constitui, se propõe uma metodologia, apresentada em etapas e expostas a seguir. A mesma também contempla, a otimização topológica de massa, através do emprego de geometrias paramétricas, com a função de adequar a quantidade de material empregado. Através da Análise por Elementos Finitos, é possível verificar a previsão comportamental do modelo, sob condições de esforço em serviço, adequando suas dimensões e formas, às necessidades propostas.

3.2.1 Descrição das etapas

3.2.1.1 *Definir uma estratégia de modelagem*

O planejamento da modelagem é fundamental para garantir a versatilidade do modelo. A escolha da geometria básica inicial, a sequência das demais geometrias, a criação de planos, curvas e/ou pontos de referência e o seu posicionamento adequado devem ser realizados segundo determinados critérios (FOGGIATO e BOUTORIN, 2007).

No estabelecimento de critérios para a modelagem é importante prever as aplicações futuras do modelo, como, na manufatura, montagem e simulações do comportamento mecânico, entre outras.

No desenvolvimento visando à manufatura, o projetista considera o processo de fabricação da peça durante a construção do modelo 3D. Desta forma, pode-se

antecipar, possíveis problemas na fabricação e corrigir a geometria da peça para solucioná-los. Por exemplo, no caso de peças fabricadas pelo processo de fundição é importante que seja previsto um ângulo de saída do molde.

Quando se visa à montagem virtual, deve-se prever referências que possibilitem a montagem e os movimentos relativos dos componentes, depois que a montagem é realizada, sendo possível ter, uma visão de todo o conjunto, com possibilidade de simular o movimento relativo entre as peças e verificar possíveis interferências. Se for necessário simular o comportamento mecânico da peça é importante que características geométricas como, arredondamentos e chanfros possam ser suprimidas, sem afetar o restante da geometria. Isto permite a geração de modelos de análise mais simples e, conseqüentemente, uma economia no tempo de processamento (FIALHO, 2008).

A escolha do perfil mais adequado, que irá facilitar o trabalho de geração do sólido também é um fator de redução de tempo. A Figura 8 ilustra a forma mais adequada de seleção de um perfil que venha a favorecer a modelagem e geração da peça sólida pelo recurso da extrusão.

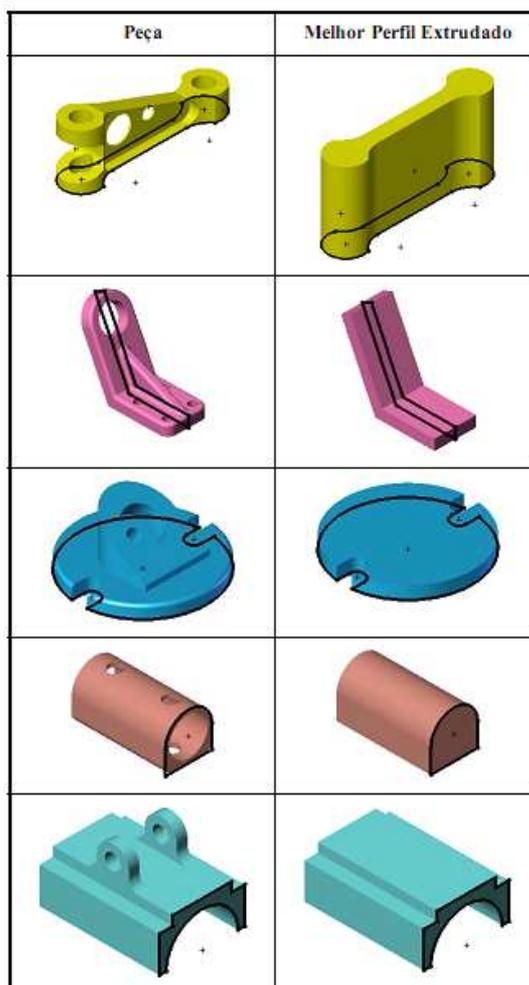


Figura 8 - Seleção do melhor perfil

3.2.1.2 Adotar referências para os modelos 3D nos planos principais

Os programas de modelagem normalmente iniciam o arquivo de uma nova peça apresentando três planos principais: XY, YZ e XZ. Ao longo da modelagem, as geometrias devem ser criadas com referências nestes planos, mesmo quando houver a possibilidade de referência em outras geometrias existentes. Desta forma, a flexibilidade para as modificações será maior, permitindo a supressão ou deleção de detalhes da geometria sem interferir nas demais (FOGGIATO e BOUTORIN, 2007).

Se a peça apresentar simetria, recomenda-se posicionar os seus planos ou eixos de simetria nos planos principais, caso contrário, devem ser escolhidos planos representativos da peça coincidentes com os planos principais. Uma alternativa, para quando os planos principais não puderem ser utilizados para referenciar alguma geometria, é criar planos auxiliares paralelos, perpendiculares ou inclinados aos principais, como exemplo, a inserção de geometrias em objetos cilíndricos, que demanda a criação de planos paralelos aos pontos de inserção, para possibilitar que a geometria selecionada seja empregada. Na Figura 9 são vistos os planos de trabalho (referenciais) dos sistemas CAD 3D.

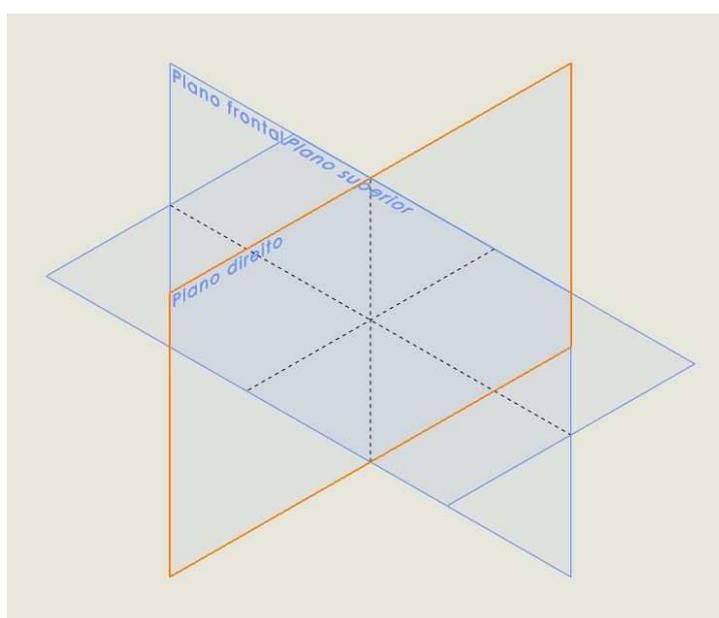


Figura 9 - Planos de Trabalho

A escolha do plano de início de modelagem, com a inserção da geometria base, deverá contemplar uma melhor visualização da peça modelada, facilitando desta forma futuras modificações ou adição de geometrias complementares.

3.2.1.3 ***Empregar sólidos básicos como geometrias principais***

A primeira geometria, também denominada de geometria base, deve ser escolhida como a mais simples possível. Na maioria das vezes, quando não é possível referenciar as geometrias seguintes nos planos principais ou auxiliares, é recomendável que estas sejam referenciadas na primeira geometria.

Desta forma, são criadas relações de parentesco desta primeira geometria denominada *pai*, com as demais, chamadas de *filhos*, dificultando uma eventual necessidade de modificação, exclusão ou supressão, sem comprometer o restante da modelagem (FOGGIATO e BOUTORIN, 2007).

Escolhendo-se sólidos básicos, como cilindros, cubos, ou paralelepípedos, para iniciar uma nova peça, é possível minimizar o efeito destas relações, visto que as modificações nestas geometrias são mais simples.

3.2.1.4 ***Utilizar geometrias 2D simples com esboços dos objetos 3D***

Os sólidos são normalmente gerados a partir de geometrias 2D, denominadas de esboços, sendo comum, para os usuários iniciantes, construir esboços com o maior nível de detalhamento possível. Este procedimento dificulta as futuras modificações que se tornarem necessárias, sendo mais produtivo trabalhar com geometrias geradas a partir de formas geométricas simples, como, *círculos*, *retângulos*, *cubos*, *cilindros*, do que com geometrias bidimensionais complexas. Este procedimento é justificado, pelo fato da maioria dos programas, terem regras bastante rígidas para os esboços, não permitindo a conclusão desta fase, enquanto existirem inconsistências construtivas nestas geometrias. Na Figura 10 pode-se observar a aplicação de geometrias simples na construção de um esboço.

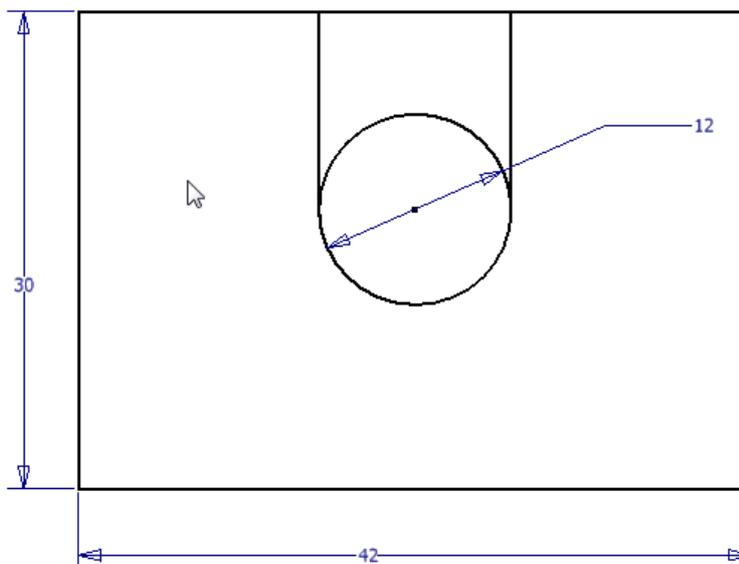


Figura 10 - Uso de geometrias simples no esboço

Detalhes como arredondamentos, chanfros e furos, devem ser modelados separadamente como características geométricas e, preferencialmente, na fase final da modelagem.

3.2.1.5 *Aplicar restrições às geometrias 2D*

Segundo Anderl e Mendgen (1995), existem duas maneiras de aplicar as restrições geométricas ao esboço: diretamente pelo projetista ou, detectadas automaticamente pelo próprio programa CAD.

Recomenda-se o uso de restrições geométricas (relações) para evitar que a geometria se altere quando forem feitas modificações dimensionais. Assim sendo, restrições, como: *paralelismo*, *perpendicularidade*, *igualdade*, entre outras, são geralmente utilizadas antes da cotação visando garantir uma estabilidade geométrica do esboço. A cotação também é considerada uma restrição dimensional.

Como a imposição de todas as restrições, pelo projetista pode consumir muito tempo, a maioria dos programas CAD 3D atuais, tem a opção de captar a intenção do usuário, impondo-as automaticamente (FOGGIATO e BOUTORIN, 2007). Porém, às vezes pode haver duplicidade ou uma interpretação errada do programa, forçando o usuário a fazer as correções e impor manualmente as restrições corretas.

3.2.1.6 *Evitar relações de parentesco desnecessárias entre as geometrias*

No dimensionamento dos esboços, deve-se evitar a cotagem em relação às geometrias já existentes. Recomenda-se utilizar os planos principais ou a geometria base para impedir relações de parentesco indesejáveis. Alguns sistemas possuem comandos que possibilitam a seleção de entidades, que estão sobrepostas às outras, permitindo a escolha adequada das referências.

As relações de parentesco surgem toda vez que, uma geometria é criada utilizando-se elementos, tais como arestas, faces, centros, perfis, etc., de uma das geometrias anteriores, como referência (ANDERL e MENDGEN, 1995).

Como visto anteriormente, recomenda-se que as referências sejam os planos principais e auxiliares ou a geometria base. Quando isto não for possível, deve-se ter o cuidado de estabelecer estas relações prevendo que, no caso de necessidade de suprimir ou excluir esta geometria, que serviu de referência (pai), o mesmo acontecerá com as demais que utilizaram as referências (filhos) (FOGGIATO e BOUTORIN, 2007).

3.2.1.7 ***Empregar geometrias disponíveis nas bibliotecas***

Antes de iniciar uma modelagem, deve - se fazer uma consulta à biblioteca de peças e geometrias padronizadas, que cada programa contém, ou aos diretórios de outros projetos para ver se esta peça já não está modelada. Mesmo não encontrando a geometria exata, muitas vezes é possível aproveitar uma peça existente e adaptá-la à necessidade, com algumas modificações.

Outra ação que pode economizar tempo durante a modelagem é a consulta de bibliotecas de geometrias tridimensionais editáveis, presente na maioria dos sistemas CAD 3D de médio porte. Por exemplo, as geometrias editáveis, para alojamento de chavetas, furos oblongos, punções para chapas, canais para anéis elásticos, rebaixos para alojamento de parafusos, alívios para retifica, etc. que racionalizam o trabalho e aceleram o processo de desenvolvimento.

Este recurso elimina a necessidade de criação de planos auxiliares de trabalho, da elaboração do esboço e operações de extrusão e subtração da geometria gerada. Este procedimento, gera expressiva redução de tempo no desenvolvimento da peça. O usuário deve somente editar as dimensões e indicar o ponto de inserção da geometria desejada, que será automaticamente incorporada na árvore topológica de construção do modelo sólido.

3.2.1.8 ***Atribuição do tipo de material e as suas propriedades físicas***

Os sistemas CAD 3D possuem uma biblioteca de materiais, com suas principais características e propriedades físicas, como: *densidade, tensões, coeficientes de deformação, módulos de elasticidade, etc.* Com base nestas informações, se torna possível determinar a massa, o centro de gravidade e momentos de inércia, automaticamente. Estes dados são de relevada importância, pois possibilitam a otimização estrutural e dimensional da peça modelada, bem

como informações adicionais, que poderão ser empregadas, por exemplo, na determinação do custo da peça. Desta forma, recomenda-se ao profissional de projetos, sempre atribuir o material selecionado à peça que será modelada. Esta ação deverá ser feita já no início do trabalho, como forma de agilizar uma futura análise estrutural, que se tornar necessária. A Figura 11 ilustra a caixa de diálogo do sistema CAD 3D Autodesk® Inventor™ que possibilita a seleção do material a ser utilizado no modelo e exibe as informações e propriedades físicas do mesmo.

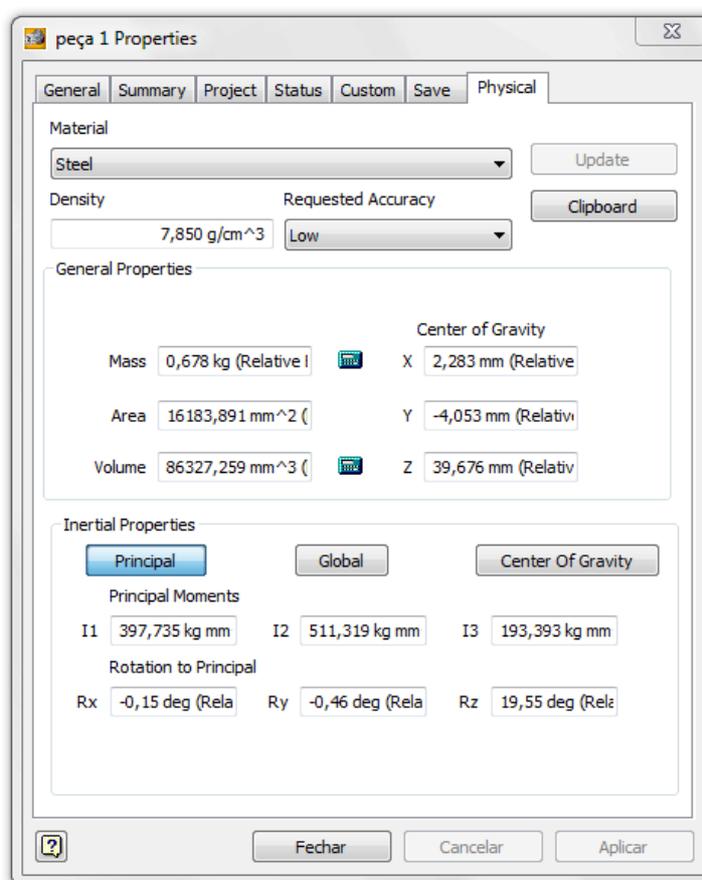


Figura 11 - Propriedades do material empregado

Além dos valores de massa, área de superfície e volume, também são informados, os momentos de inércia, eixos de rotação e coordenadas de localização do centro de gravidade, do modelo sólido.

3.2.1.9 *Estabelecer dimensões paramétricas para as geometrias*

Segundo Spech (2005), o processo de modelagem sólida paramétrica permite criar modelos de produtos com dimensões variadas. Neste método as ligações bidirecionais entre o modelo e o esquema de dimensionamento, permitem a regeneração automática dos mesmos, depois de mudanças nas dimensões e atualização automática das dimensões relacionada.

A parametrização dimensional esta fundamentada na interrelação das dimensões de um objeto, baseadas em fórmulas e equações matemáticas. A principal variável deverá ser aquela que apresenta a maior relevância na definição do objeto modelado (DOTSON, 2008).

Muitos usuários dos sistemas CAD 3D ignoram este recurso ou, o confunde com a aplicação de um fator de escala, que irá influenciar todas as dimensões do objeto.

Na Figura 12 pode-se observar a parametrização dimensional de um esboço 2D, origem de um modelo sólido. Visando-se manter as dimensões, de determinadas geometrias inalteradas, o que não ocorrerá, pela simples aplicação de um fator escala, são acrescentadas restrições dimensionais, que neste caso são:

- Dimensão do comprimento: $d0 = 40 \text{ mm}$
- Dimensão da largura: $d1 = 25,00 \text{ mm}$.
- Afastamento vertical dos furos: $fx: d5 = d1/2 \text{ ul} = 12,50 \text{ mm}$.
- Afastamento horizontal dos furos: $fx: d4 = d0/3,8 \text{ ul} = 10,52 \text{ mm}$.

A dimensão $d2$, diâmetro do furo à esquerda, é selecionada como dimensão básica, desta forma quando é alterada, a dimensão a ela relacionada, $d3$ (furo à direita), também sofrerá modificação, originando um novo esboço, porém, sem alterar as dimensões que foram fixadas como restrições.

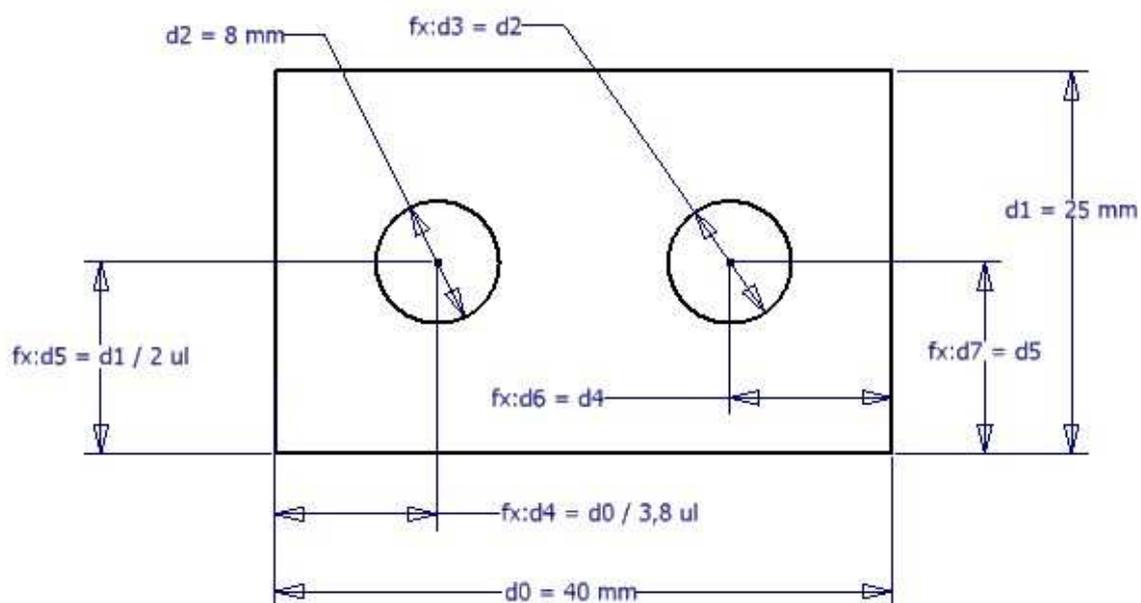


Figura 12 - Parametrização das dimensões do esboço

3.2.1.10 Gerar sólido e verificar o valor de massa.

A Figura 13 ilustra o processo onde, modelos sólidos, de diferentes configurações, são obtidos automaticamente pela variação da dimensão básica. Em (a) $d2 = 8,00$ mm, em (b) $d2 = 12,00$ mm e em (c) $d2 = 16,00$ mm, porém as dimensões estabelecidas como restrições limitadoras, permanecem inalteradas.

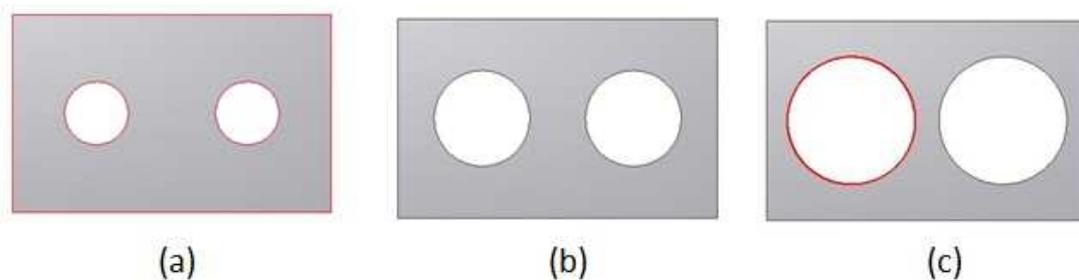


Figura 13 - Modelos sólidos obtidos

Através dos recursos do sistema CAD 3D, relacionados às propriedades físicas, baseadas nas características do material atribuído ao modelo, pode-se obter o valor da massa de cada tipo de sólido

O emprego deste recurso proporciona uma expressiva redução do tempo de desenvolvimento, pela modelagem automática, permitindo a criação de vários modelos semelhantes geometricamente, mas, com dimensões específicas diferentes (família de produtos).

3.2.1.11 Comparar os resultados obtidos com o objetivo

Comparar os valores de massa, fornecidos pelo programa, a aqueles estabelecidos como objetivo. Esta comparação irá definir se: o processo de geração de modelos sólidos com variação dimensional, das geometrias paramétricas, terá continuidade ou será encerrado, dando início à nova etapa, que será a previsão dos valores das deformações, originadas pela aplicação de esforços solicitantes, através da Análise por Elementos Finitos (AEF).

3.2.1.12 Análise por Elementos Finitos

Para que os resultados obtidos pela simulação e previsão do comportamento, de um determinado componente por meio dos recursos CAE, reflitam as condições mais próximas possíveis da realidade, os tipos de esforços e suas magnitudes deverão ser definidos criteriosamente pelo profissional de projeto.

Deverão ser também, observadas as possíveis variações de sentido e valores das cargas aplicadas. As regras estabelecidas pela resistência dos materiais para os tipos de esforços deverão ser os padrões orientativos adotados, bem como rigorosa

observação das unidades empregadas, preferencialmente às do Sistema Internacional, tendo o Newton e Pascal, como unidades padrões de força e pressão respectivamente, em seus múltiplos e submúltiplos. A Figura 14 ilustra a definição do sentido de aplicação (através de setas indicativas de direção) e a face da peça que irá receber o esforço, em cor diferenciada.

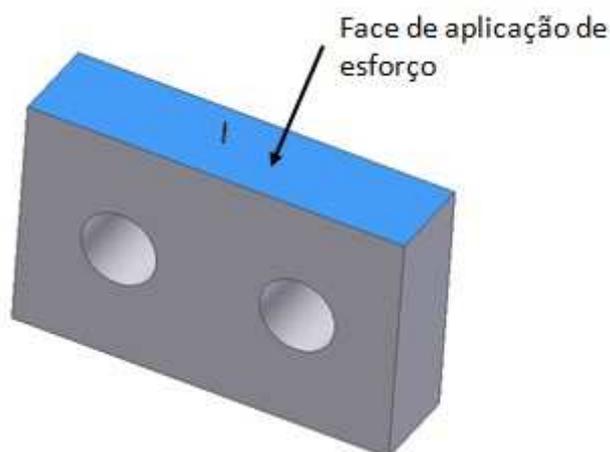


Figura 14 - Aplicação de esforço

Todas as unidades adotadas, tanto para as propriedades dos materiais da biblioteca do programa, quanto às dos esforços, deverão pertencer ao mesmo sistema de unidades adotado, evitando, desta forma, resultados discrepantes, inviabilizando a análise de tensões realizada.

3.2.1.12.1 *Vínculos de engastamento*

O usuário deverá informar, onde esta localizada o engastamento de apoio da peça, que irá apresentar resistência ao esforço aplicado (vínculos). Alguns sistemas permitem a inclusão de vários vínculos, outros estão limitados a somente dois vínculos, sendo este numero determinado em função da capacidade de processamento da plataforma CAE. Pode-se observar na Figura 15, a atribuição dos

vínculos em uma peça que será analisada, onde a face selecionada como aquela que possui engastamento, tem a sua cor alterada pelo programa.

Para que a análise seja representativa, a atribuição dos vínculos deverá ser o mais próximo possível, daqueles que a peça irá possuir em serviço, garantindo, desta forma a confiabilidade dos resultados obtidos.

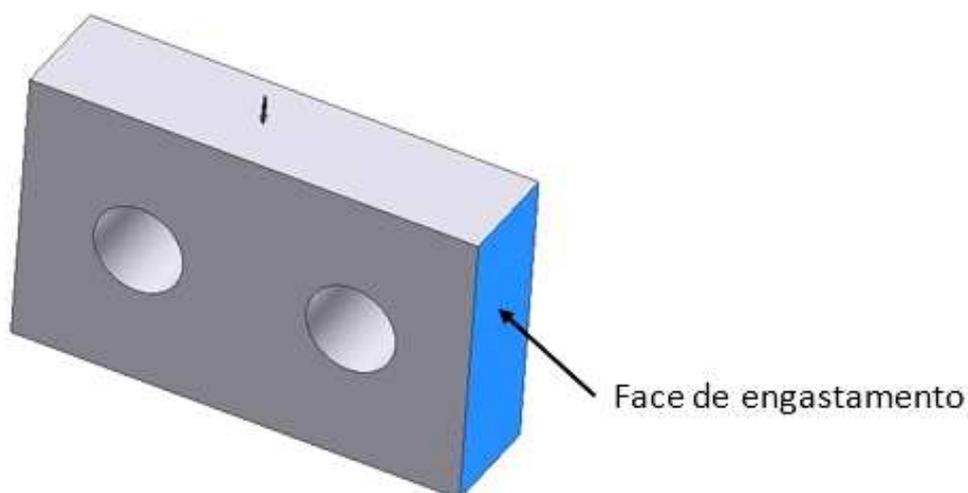


Figura 15 - Face de engastamento

A forma de indicar as áreas selecionadas como vínculos, pode variar, de acordo com cada sistema CAD, porém sempre ocorrerá a alteração de cor informando, ao usuário a seleção da face.

3.2.1.12.2 *Densidade de malha de elementos*

O usuário deverá definir, os parâmetros iniciais para que seja possível a realização da análise. A Figura 16 contém a caixa de diálogo de ajustes do módulo de análise de tensões do Autodesk® Inventor.™

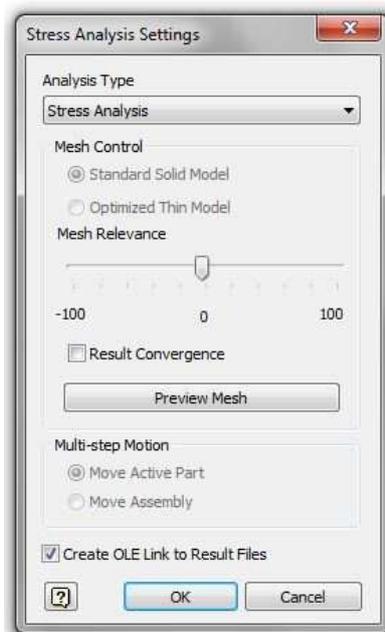


Figura 16 - Caixa de diálogo Análise de Tensões

O ajuste da densidade da malha, afeta diretamente o número de elementos, no qual o modelo sólido será discretizado.

O valor médio de densidade (ajuste padrão) apresenta resultados satisfatórios. Uma densidade elevada implica em um maior número de elementos na malha. O programa levará um maior tempo para solucionar o modelo matemático para a determinação das deformações. Este fato não significa necessariamente, a obtenção de resultados mais significativos. A Tabela 1 exemplifica a aplicação de valores de densidade de malhas, na discretização de três modelos sólidos diferentes e os valores obtidos de deformação máxima, quando os mesmos são solicitados através da aplicação de cargas de esforços idênticos e em condições semelhantes.

Tabela 1 - Valores de deformação máxima

DENSIDADE DE MALHA	MÍNIMA	MÉDIA	MÁXIMA
Modelo 1 - Def. Máx. (mm)	0,0217	0,0223	0,0225
Modelo 2 - Def. Máx. (mm)	0,0125	0,0138	0,0140
Modelo 3 - Def. Máx. (mm)	0,0358	0,0364	0,0367

Pode-se observar que, a variação dos valores entre as densidades, média e máxima é muito pequena, podendo-se considerá-la desprezível. Desta maneira, o emprego da densidade média, que é o valor padrão do programa (*default*), pode ser utilizado, na previsão dos valores de deformação. Desta forma, o tempo dedicado a esta atividade, pode ser otimizado, uma vez que o mesmo é, em valores médios, 38% menor que aquele gasto, quando se emprega a densidade máxima.

Os tipos de elementos utilizados na malha são do formato tetraédrico parabólico e hexaédrico parabólico, sendo definidos, automaticamente pelo algoritmo de otimização do módulo CAE, integrante dos sistemas CAD 3D (AZEVEDO, 2003).

Este algoritmo faz também a aquisição dos dados complementares necessários, diretamente do modelo sólido. Desta forma, não sendo necessária a intervenção do usuário para o fornecimento destas informações (FIALHO, 2008).

O processo para a análise e previsão das deformações resultantes pode ser descrito pelo fluxograma ilustrado na Figura 17.

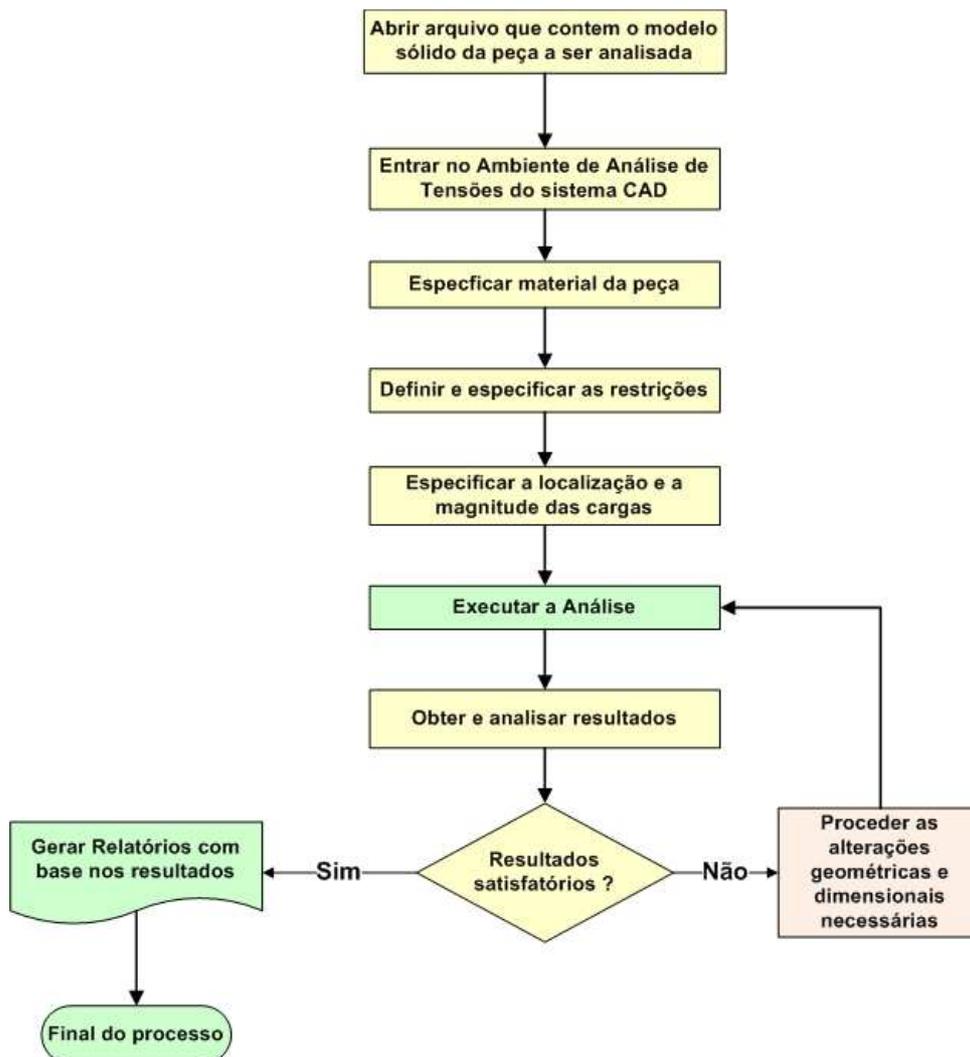


Figura 17 - Processo para análise de deformações

3.2.1.13 *Interpretação dos resultados*

Cabe ao profissional, usuário do sistema, analisar e verificar a coerência dos resultados obtidos e, se algo não estiver condizente, realizar uma análise criteriosa dos parâmetros e valores atribuídos às variáveis, efetuando as alterações necessárias para que a previsão de comportamento do modelo reflita, de forma coerente, a situação real de tensões e deformações (FIALHO, 2008).

A grande barreira para que a tecnologia CAE seja aplicada em larga escala, pelos profissionais de projeto, no desenvolvimento e aprimoramento de produtos, se

constitui na perfeita compreensão e interpretação de resultados apresentados pela análise de tensões e deformações baseadas no Método dos Elementos Finitos (SIQUEIRA, 2008).

Porém, a correta interpretação dos resultados é um fator preponderante, podendo comprometer todo o processo de desenvolvimento, desta forma, neste método proposto, serão abordados os principais conjuntos de dados fornecidos e interpretar o seu significado.

3.2.1.13.1 *Máxima Tensão Principal*

Para conceituar o princípio de Máxima Tensão Principal (*maximum principal stress*) pode-se considerar um elemento plano retangular de quatro nós, identificados pelos números 1, 2, 3, 4, visto na Figura 18.

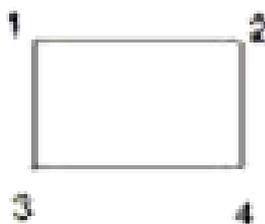


Figura 18 - Elemento plano com quatro nós

O programa irá calcular as deformações, em cada nó, aplicando o Método dos Elementos Finitos (MEF), tendo como base a lei de deformações elásticas, também conhecida por Lei de *Hooke*, onde a força de deformação (F) é igual ao produto da razão de proporcionalidade (k) do material pelo seu deslocamento total (d) (CRUZ, 2008). Desta forma tem-se a equação:

$$F = k \cdot d \quad (3-1)$$

Com o valor do módulo de elasticidade do material, determina-se a tensão em cada nó, desta forma a tensão máxima é definida como aquela que apresenta o maior valor dentre todos os nós do elemento.

Na Figura 19, é possível observar o gráfico tridimensional, onde é mapeada a distribuição das Tensões Máximas, pelo modelo, os valores são indicados através de escala de cores para valores máximos e mínimos.

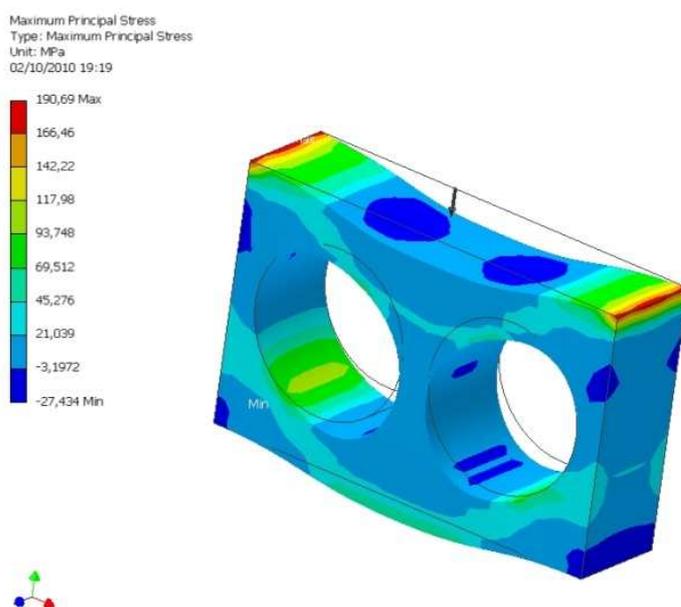


Figura 19 - Distribuição das Tensões Máximas

3.2.1.13.2 Tensões Equivalentes

Tensões Equivalentes ou Tensões de *Von Mises* é um escalar positivo que descreve um estado de tensão que, segundo Cruz (2008), é o resultado de um conjunto de vetores, e sua finalidade é visualizar áreas da peça sujeitas aos esforços de tração e compressão simultaneamente.

A sua relevância, é que, o coeficiente de segurança (k_s) é obtido em sua função, sendo, portanto, o dado mais significativo, obtido pela análise, em conjunto com a deformação total causada pelo esforço solicitante (FIALHO, 2008).

A Figura 20 contém o gráfico, com os resultados de Tensões Equivalentes e a sua distribuição pela peça, onde se observa regiões com valores máximos e mínimos.

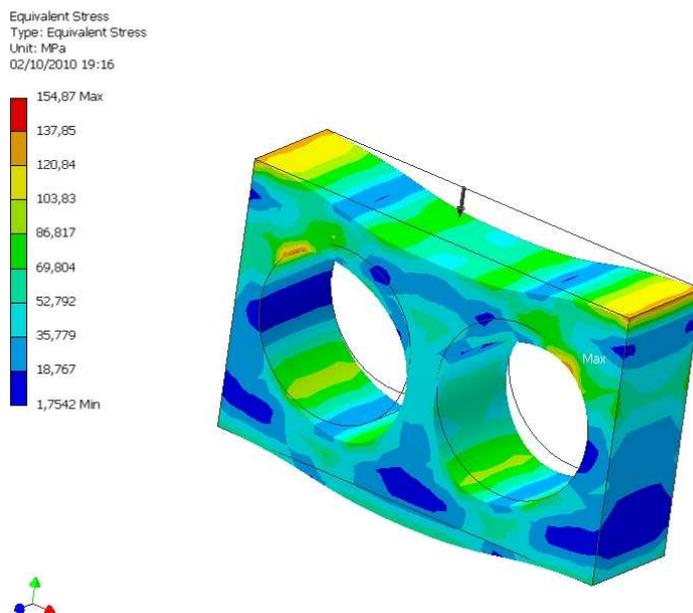


Figura 20 - Distribuição das Tensões Equivalentes

3.2.1.13.3 Deformações resultantes

As deformações, também são mapeadas conforme o gráfico, ilustrado na Figura 21, seguindo o mesmo padrão, dos gráficos anteriores. Um fator importante é a verificação das unidades empregadas, normalmente às do Sistema Internacional (SI) são mais usuais (*metro e seus sub múltiplos*).

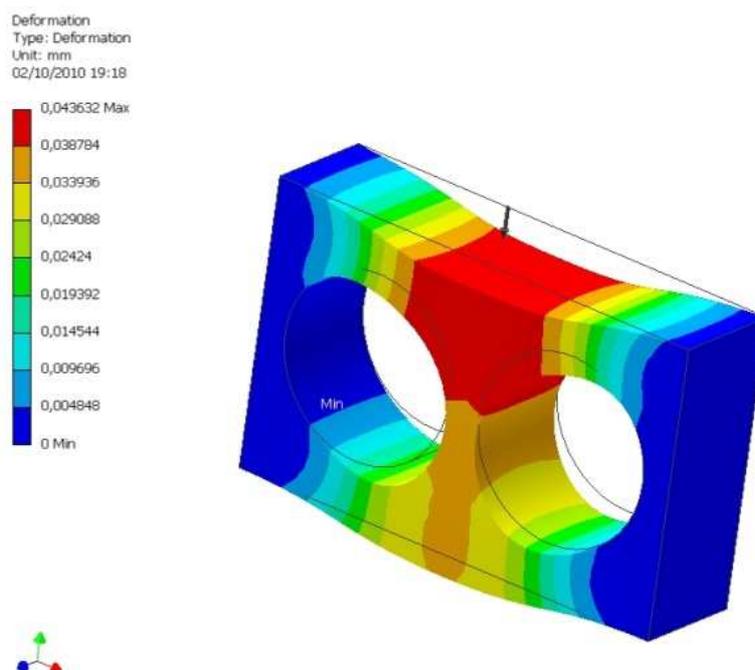


Figura 21 - Mapeamento das deformações

Se os valores obtidos, satisfazem às exigências determinadas pelas diretrizes do projeto, o processo está encerrado e a documentação de Engenharia e o relatório final da análise, com a previsão comportamental, poderão ser elaborados, para viabilizar a construção da peça ou protótipo físico.

3.2.1.14 **Geração da documentação de Engenharia**

Os desenhos em 2D contendo as dimensões e vistas padronizadas de uma peça constituem o item básico de toda documentação produzida, com finalidade de viabilizar e definir os parâmetros para os processos produtivos, a serem empregados na fabricação da mesma.

Os sistemas CAD 3D permitem que estes desenhos sejam gerados automaticamente, com base no modelo tridimensional e que as atualizações sejam processadas de forma associativa, a cada alteração efetuada no mesmo. Como

conseqüência direta desta propriedade, o tempo destinado a esta atividade sofre uma drástica redução.

A observação das normas, que definem os planos de rebatimento para as vistas, determinados em função do diedro adotado como referência e a forma de posicionamento das dimensões de acordo com os padrões estabelecidos para o Desenho Técnico, deverão ser rigidamente seguidos. O dimensionamento (cotagem) também deverá contemplar uma forma de facilitar o desenvolvimento do processo de fabricação a ser adotado, com exemplo, o dimensionamento por linha básica de referência, que estabelece uma única origem para todas as dimensões, facilitando, desta forma, a elaboração de um programa para uma máquina controlada por comando numérico computadorizado (CNC) a ser empregada na fabricação da peça, conforme ilustrado na Figura 22.

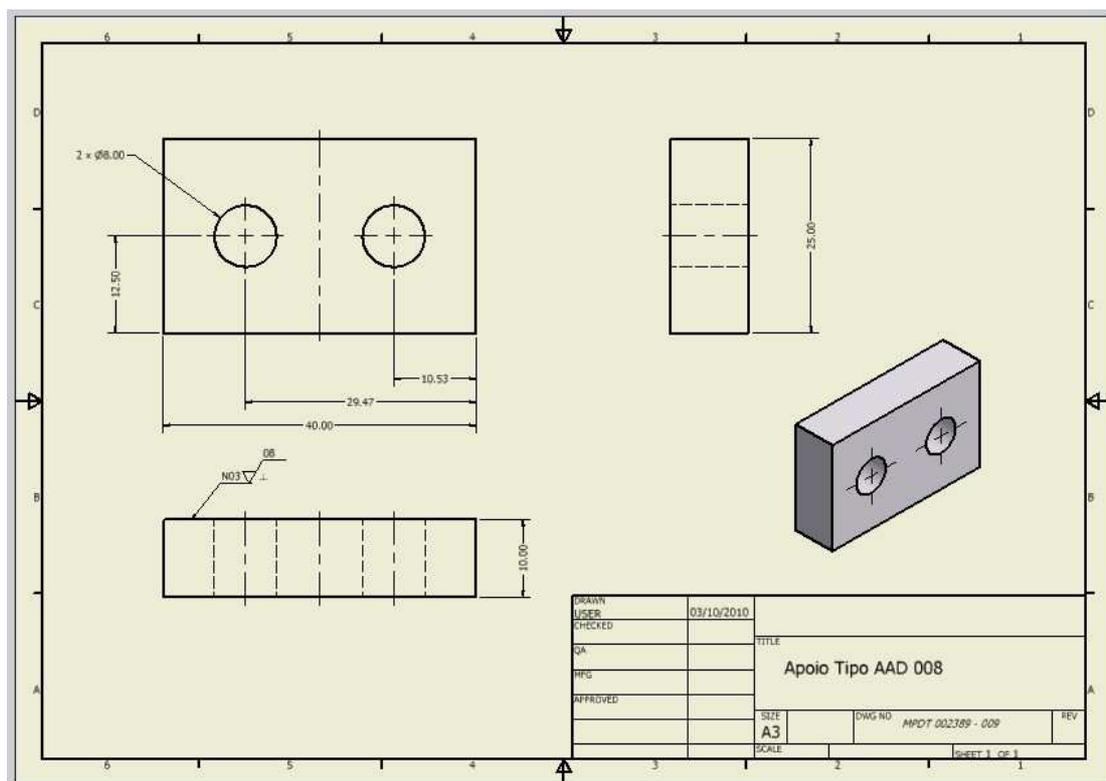


Figura 22 - Desenho de Engenharia da peça

O conjunto de desenhos 2D, também é empregado, no planejamento e execução da inspeção dimensional e para a elaboração dos procedimentos do sistema de garantia da qualidade das empresas.

As alterações efetuadas no modelo sólido, são refletidas diretamente no desenho 2D, graças a capacidade associativa dos sistemas CAD 3D. Desta forma, os desenhos são atualizados automaticamente, sempre que uma alteração geométrica ou dimensional for realizada. Isto resulta em uma considerável redução do tempo gasto com esta atividade, bem como, do tempo total do ciclo de desenvolvimento de um produto.

4. IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA

Este capítulo retrata a implementação da metodologia proposta no capítulo anterior, apresenta a modelagem sólida de um componente estrutural de uma forma sistemática e a sua otimização topológica da sua massa, associada ao emprego de geometrias paramétricas. Tendo a previsão do seu comportamento obtida através da Análise por Elementos Finitos.

4.1 NECESSIDADE MOTIVADORA

O componente, objeto de estudo deste trabalho é um suporte estrutural que tem a função de apoiar um equipamento de medição, sobre guias prismáticas, que orientam o seu deslocamento, de acordo com uma trajetória determinada. A função do mesmo é executar o controle dimensional e aquisição de dados de posicionamento dos centros de furos de fixação e de perfil geométrico (planicidade da superfície) de peças mecânicas, fabricadas em uma máquina operatriz (centro de usinagem), controlada por Comando Numérico Computadorizado (CNC). A Figura 23 ilustra uma peça similar, controlada por este dispositivo.



Figura 23 - Peça similar

Devido aos critérios de garantia de qualidade, impostos pelo cliente à empresa, que é uma prestadora de serviços de usinagem de precisão, as inspeções deverão ser realizadas em todas as peças usinadas (amostragem 100%). Este fato implica na interrupção constante do ciclo produtivo, uma vez que, durante esta operação, a máquina deverá permanecer parada. A peça usinada deverá ser inspecionada, posicionada no seu dispositivo de fixação, que é montado na mesa de trabalho da máquina operatriz. Isto devido ao fato, de que, se for necessário executar alguma operação de retrabalho, as referências iniciais de posicionamento do processo de usinagem permaneceram inalteradas.

A proposta inicial, visado melhorar o índice de produtividade é: *aumentar a velocidade de deslocamento do dispositivo de medição, diminuindo desta forma o tempo de ciclo de produção da peça.*

Porém, este fato irá provocar a elevação da inércia do conjunto, comprometendo a repetibilidade e confiabilidade das medições efetuadas, devido a uma variação nas curvas de aceleração e desaceleração do sistema. Isto irá implicar diretamente na substituição de componentes de elevado custo, como servos motores, sistema de controle de posição, fusos, etc., uma vez que se trata de um equipamento mecatrônico dedicado, desenvolvido especialmente para esta função, possuindo uma margem de ajustes muito pequena em seu sistema de controle.

A solução proposta pelo departamento de Engenharia da empresa, após um criterioso estudo das variáveis envolvidas, em conjunto com o fabricante dos sistemas de acionamento e controle de posição do equipamento, foi: *redução em aproximadamente 20% da massa dos componentes estruturais, onde isto era tolerado, sem comprometer o seu desempenho, limitando a deformação máxima, aos índices adotados nas diretrizes do projeto inicial, com valores limites de 0,020mm.*

O objetivo desta redução é compensar o aumento da velocidade de deslocamento, mantendo-se os valores de inércia próximos aos iniciais, sendo desta forma desnecessária a substituição dos componentes dos sistemas de controle de posição e acionamentos.

4.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Visando solucionar o problema apresentado, se propõem a construção de um modelo sólido do componente, com todas as suas características e propriedades físicas, em um sistema CAD 3D, que será empregado como um protótipo digital. A inserção de geometrias paramétricas, com a função de redução de massa, se configura como uma forma mais adequada para atingir o objetivo proposto, uma vez que permite a criação automática de vários modelos tridimensionais, pela simples alteração de uma dimensão básica, como já exposto.

O sistema CAD 3D empregado neste trabalho é o Autodesk® Inventor™. Dentre as suas principais características, podem ser citadas: a capacidade de modelagem paramétrica de geometrias construtivas, a geração automática e associativa de vistas ortográficas, do modelo sólido (desenhos 2D), e o módulo de Análise pelo Método dos Elementos Finitos (AEF) baseado no sistema CAE ANSYS®.

Pelos recursos do sistema, é possível verificar a redução de massa obtida, pela variação dimensional das geometrias paramétricas, bem como os valores de deformação gerados pela aplicação de esforços solicitantes, pela aplicação da análise por Elementos Finitos.

A aplicação do método proposto no capítulo 3, na solução deste problema, visa sistematizar o trabalho de modelagem sólida e o de otimização topológica de massa, tendo as suas etapas de implementação descritas a seguir.

4.2.1 Estratégia de modelagem 3D

Nesta primeira etapa o objetivo é a criação do modelo sólido do componente estrutural que será empregado como um protótipo digital, a partir de seu desenho de Engenharia em 2D. Como o mesmo apresenta uma geometria complexa, a escolha

do melhor perfil para a extrusão é um fator determinante na redução do tempo de trabalho, pois facilitará o trabalho de modelagem tridimensional.

Na Figura 24, pode-se observar as vistas ortográficas do componente. Após uma análise prévia, com base nos conceitos expostos, podemos definir como o melhor perfil, aquele representado pela vista frontal, uma vez que possibilita a modelagem do corpo da peça através do recurso da extrusão em uma única operação, sendo necessária, somente, a modelagem adicional do apoio e a inclusão das geometrias dos furos passantes, furos rosqueados, de rebaixos para alojamento para parafusos do tipo *Allen* (sextavado interno) e dos arredondamentos das arestas.

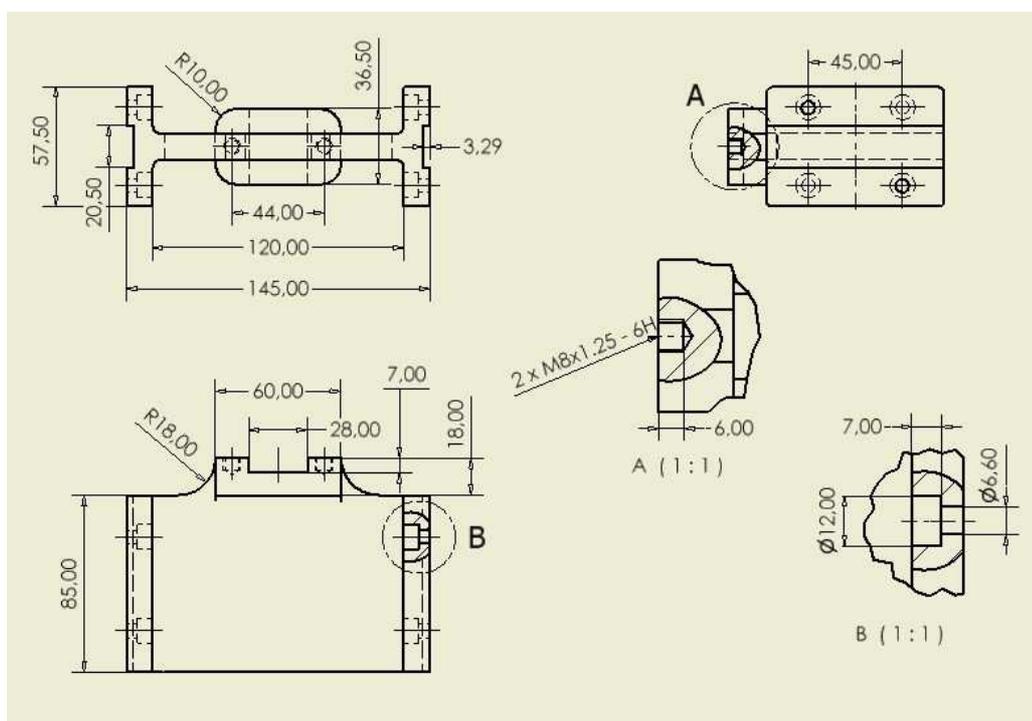


Figura 24 - Desenho de Engenharia do componente

A escolha do plano frontal como referência, irá facilitar a geração de vistas ortográficas e a inserção das geometrias necessárias, para a modelagem sólida do componente. O primeiro passo será o desenho do esboço com o emprego de geometrias básicas. Como se trata de uma peça simétrica, somente se torna necessário o desenho de um dos lados, adotando a linha de simetria central, como

eixo para promover o rebatimento das geometrias construídas, através de um comando específico (*espelhamento*), conforme ilustra a Figura 25.

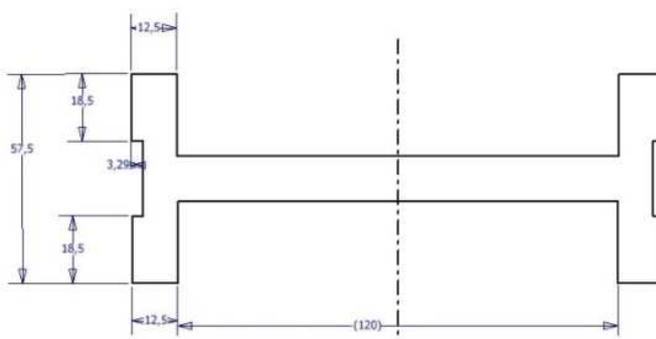


Figura 25 - Esboço do perfil básico

Com o uso do comando de extrusão, informando o valor da altura desejada (cota Z) é possível criar o sólido do corpo básico da peça, conforme ilustra a Figura 26.

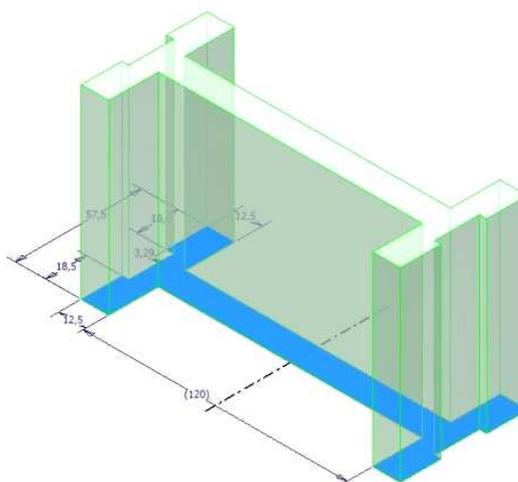


Figura 26 - Extrusão do perfil e geração do sólido

Desta forma, o sistema CAD 3D gera o modelo sólido, permitindo a seleção em uma biblioteca e a atribuição do tipo de material empregado, na sua construção e suas propriedades físicas, para a simulação e previsão comportamental quando exposto aos esforços solicitantes.

A construção de outras geometrias sólidas necessárias é possível a partir da seleção de superfícies do modelo sólido, com o uso do comando inserir um novo esboço, o que permite uma maior flexibilidade do trabalho de criação do mesmo.

Desta forma, seleciona-se a superfície superior, que se transforma em um plano de trabalho, através de operação executada automaticamente pelo sistema. Não sendo necessária nenhuma intervenção por parte do usuário, além da escolha da superfície, conforme é visto na Figura 27, sinalizada pela mudança para uma cor indicativa de seleção.

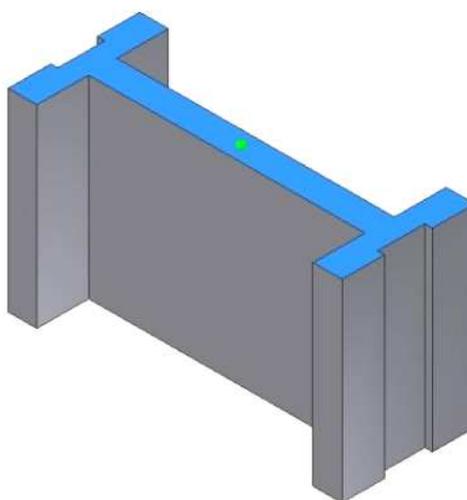


Figura 27 - Seleção de superfície de referência

Através deste recurso, é possível modelar a geometria sólida complementar destinada a fixar outro componente do equipamento, a partir do esboço desenhado no plano determinado pela superfície selecionada, conforme ilustra a Figura 28.

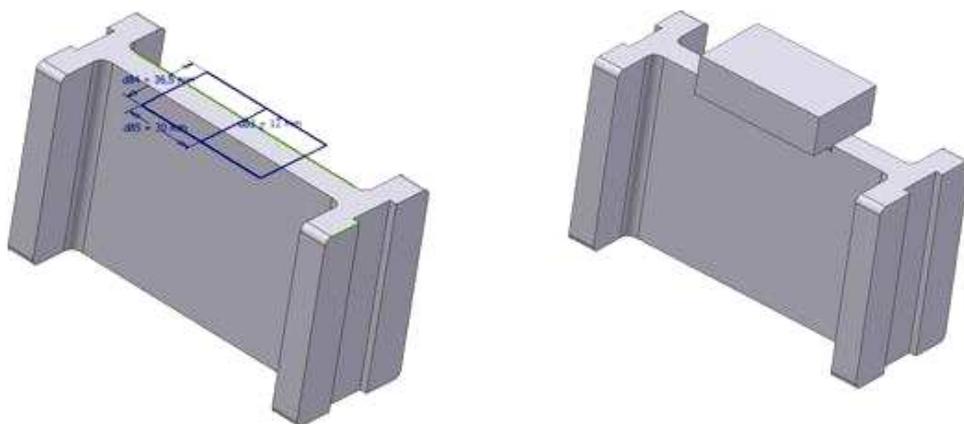


Figura 28 - Geometria sólida complementar

O mesmo conceito é aplicado nas superfícies laterais e superior e inserção das geometrias dos furos rosqueados e para os parafusos de fixação. Na Figura 29 é exibida a caixa de diálogo, que possibilita a edição de dados para a configuração das geometrias dos furos, permitindo a inserção de furos rosqueados, sem rosca e com rebaixo para alojamento de parafusos, passantes ou não, conforme ilustra a Figura 30.

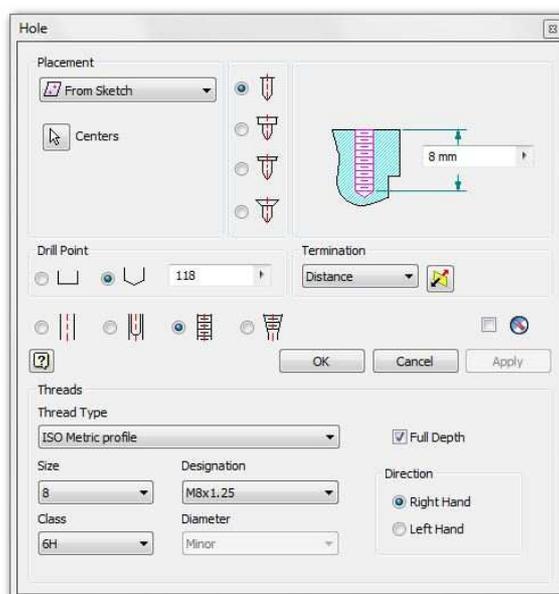


Figura 29 - Caixa para edição dos furos

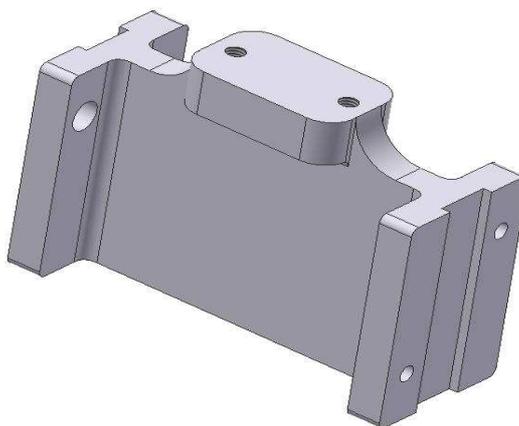


Figura 30 - Posicionamento das geometrias dos furos

Se o modelo CAD tridimensional for exportado, para um sistema CAM, estas geometrias e suas características como: *perfil de rosca selecionado, profundidade e grau de qualidade aplicado*, serão reconhecidas automaticamente por este sistema. As mesmas podem ser utilizadas, como referências, pelo programa CNC a ser gerado, para controlar a máquina operatriz empregada na sua manufatura.

As geometrias dos raios de arredondamentos de arestas, para evitar a concentração de tensões e atender a requisitos de segurança (eliminação de arestas cortantes), também foram adicionadas ao modelo, conforme ilustrado na Figura 30. O reconhecimento de arestas é executado de forma automática, bastando ao usuário selecioná-las para que o sistema efetue o seu arredondamento, com o valor de raio especificado.

A modelagem da geometria do canal também é executada, conforme observado na Figura 31, a partir da seleção da superfície lateral, que se transformou automaticamente em um plano auxiliar de trabalho, possibilitando a construção de um esboço e a posterior operação de extrusão em corte, removendo o material.

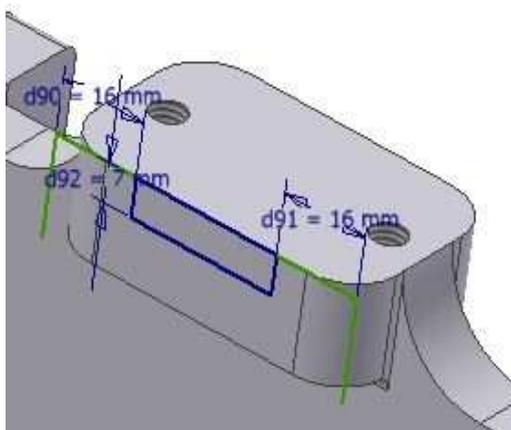


Figura 31 - Esboço para criação do canal

O modelo sólido completo é ilustrado na figura 32, apresentando todas as características geométricas do componente, tais como: *raios*, *furos*, *roscas*, *rebaixos*, *etc.*

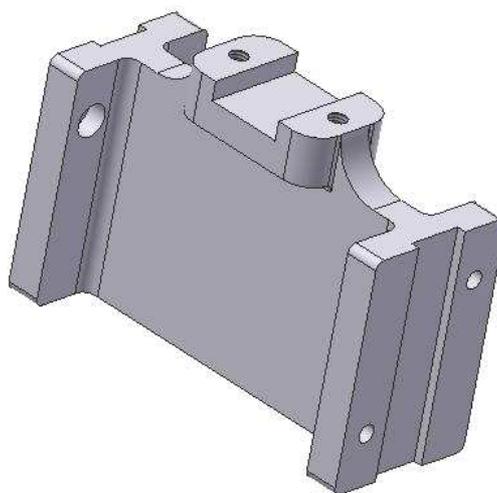


Figura 32 - Modelo sólido completo

4.2.2 Atribuição do material

O material empregado na construção do componente é o mesmo atribuído ao modelo, o Alumínio ASTM 6061 T6, constante na biblioteca do sistema CAD 3D.

Este material é amplamente usado nos meios estruturais, aeronáuticos e automobilísticos. Visando melhorar suas propriedades mecânicas, o material é tratado termicamente através da solubilização dos seus elementos e com posterior envelhecimento artificial (CHIAVERINI, 1978). As suas propriedades mecânicas estão relacionadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades Mecânicas do Alumínio ASTM 6061 T6

MODULO DE ELASTICIDADE (GPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
69	310	260	0,330

Atribuindo-se este material e suas propriedades ao modelo sólido do componente, através dos recursos do sistema CAD 3D, cria-se um protótipo digital do mesmo, que apresenta todas as características mecânicas do protótipo físico.

4.2.3 Regiões fracamente tensionadas

Inicialmente foi aplicada uma carga solicitante, de 3,00 KN (carga de serviço), selecionando os pontos de engastamento (restrições) nas suas laterais, como ocorre quando em serviço. O objetivo foi, através do modulo CAE, determinar as regiões que estão fracamente tensionadas, conforme ilustra a Figura 33.

Na mesma pode-se observar que, o corpo principal do componente apresenta em toda a região central valores de Tensões Equivalentes inferiores ao limite de resistência ao escoamento (Tabela 2).

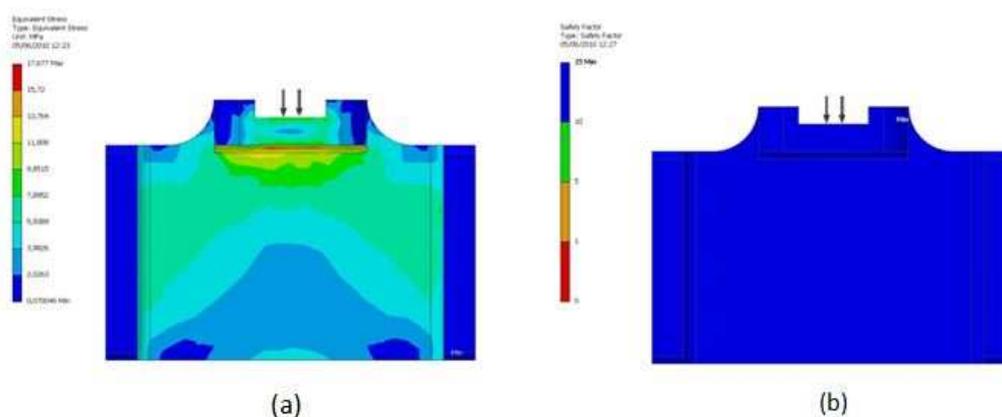


Figura 33 - Tensões Equivalentes (a), em (b) coeficiente de segurança

Este fato permitiu aplicar os conceitos para a remoção de massa de regiões sujeitas a baixas tensões (COLLINS, 2006). Nesta figura também, pode-se observar a distribuição do coeficiente de segurança, com valores máximos, indicando que o componente esta super dimensionado.

4.2.4 Geometrias para redução de massa

A escolha da forma das geometrias para a redução de massa contemplou os seguintes fatores: *o processo de usinagem a ser empregado (fresamento convencional), a forma geométrica e disponibilidade no estoque da empresa, das ferramentas de corte a serem usadas e a menor quantidade de pontos de concentração de tensões gerados.*

Como fator limitante de posicionamento, se estabeleceu em conformidade com as recomendações do departamento de Engenharia da empresa, o inicio do raio de concordância das abas laterais de fixação, com a finalidade de se evitar a concentração de tensões, que podem gerar pontos de falhas e deformações permanentes.

Como forma inicial, observando-se os fatores e as limitações mencionadas, optou-se por um oblongo, posicionado horizontalmente na região fracamente

tensionada, conforme ilustra a Figura 34, onde, também pode-se observar, a linha que indica o início do raio de concordância, da aba lateral de fixação (limite de posição estabelecido).

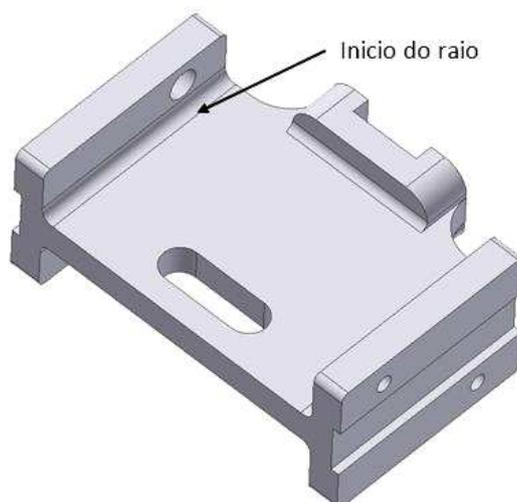


Figura 34 - Posicionamento da geometria

4.2.4.1 *Processo de parametrização das geometrias*

As posições das geometrias foram definidas após a análise inicial dos valores de tensão obtidos (Figura 33) e com base nos conceitos de resistência dos materiais propostos por Beer e Russel (1996) e Collins (2006), visando à otimização topológica de massa.

A suas dimensões, cotas de posicionamento e localização foram parametrizadas em função de uma dimensão variável básica, neste caso a dimensão **d125**. A escolha da variável básica num processo de parametrização deverá contemplar a sua relevância no conjunto com as demais variáveis, conforme já exposto (DOTSON, 2008).

O posicionamento e dimensões parametrizadas da geometria selecionada (oblongo) podem ser vistos na Figura 35, que retrata o esboço inicial em 2D do componente, que será a base para a geração do modelo tridimensional.

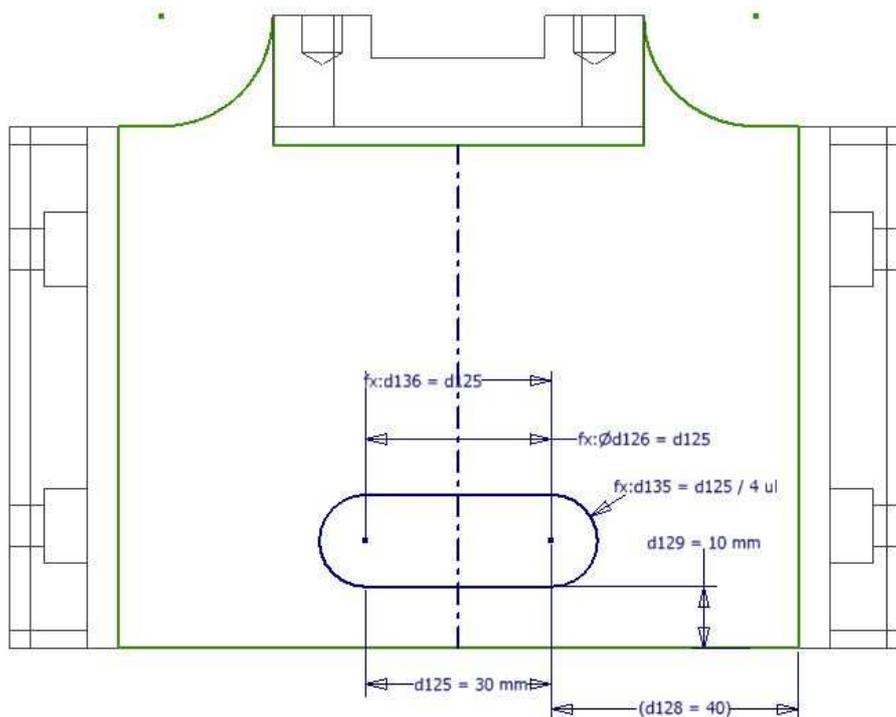


Figura 35 - Dimensões parametrizadas

A Tabela 3, contém as dimensões estabelecidas como restrições e as relações paramétricas, em função da variável dimensional **d125**.

Tabela 3 – Variáveis dimensionais das geometrias paramétricas

DIMENSÕES DA GEOMETRIA	RELAÇÃO PARAMÉTRICA	VARIÁVEL BÁSICA	DIMENSÃO
Distância entre centros dos raios		d125	
Raio	d125/4 ul		d135
Afastamento lateral do início do raio - Variável			d128
Afastamento da aresta de base - Fixo			d129 = 10 mm
Distância entre inícios dos raios	d136=d125		d136
Distância entre término dos raios	dØ 126=d125		d126

4.2.4.2 Modelagem sólida automática e verificação de massa

Definidas as relações paramétricas, a próxima etapa é a modelagem sólida automática, com a finalidade de determinar a sua massa. Na Figura 36, é ilustrado o modelo sólido, na sua configuração original utilizado para a determinação da massa inicial do componente.

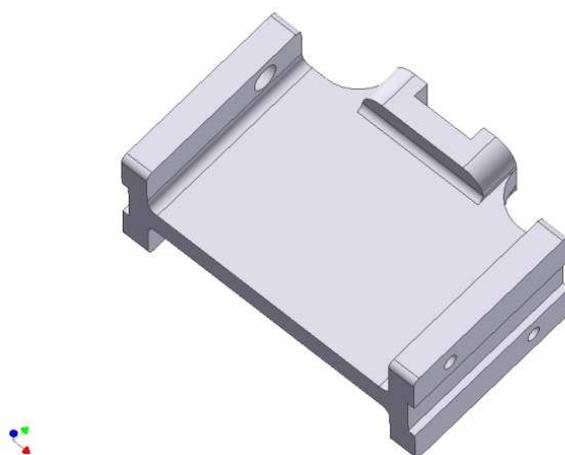


Figura 36 - Modelo na configuração inicial

O procedimento, visando à otimização da massa, conforme fluxograma contido da Figura 37 foi: atribuir valores à variável básica **d125**, em intervalos crescentes de 2,00 mm (proporcionar um maior mapeamento), em seguida gerar os sólidos automaticamente, verificar os valores de massa e compará-los aos estabelecidos como objetivos. De acordo com os resultados efetuar, a Análise por Elementos Finitos (AEF), para obter os valores de deformações.

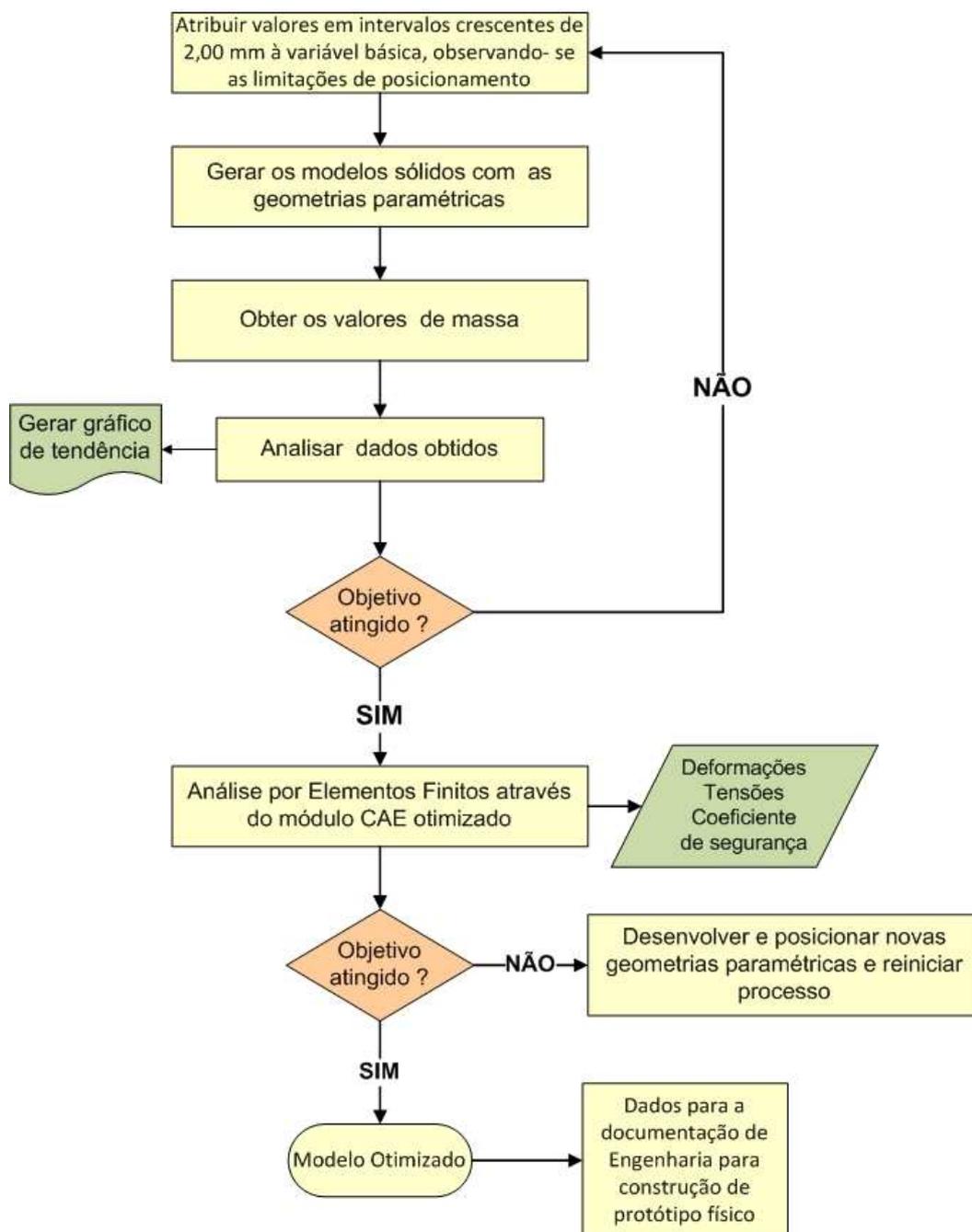


Figura 37 - Procedimento empregado

Caso, o valor da deformação máxima obtida, esteja acima do tolerado, novas geometrias deverão ser desenvolvidas e aplicadas ao modelo sólido, e o processo de otimização reiniciado.

Os sólidos obtidos, pela geração automática de modelos, podem ser observados na Figura 38, em (a) com valor de 20 mm. Para d_{125} e em (b) com 72mm, sendo este último, o máximo valor possível de ser empregado, devido as limitações de posição (início do raio de concordância).

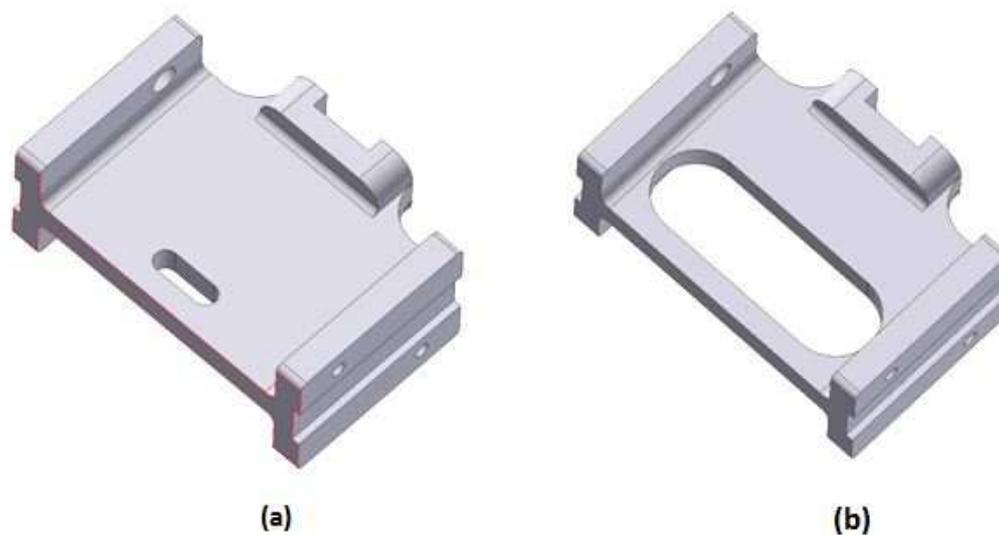


Figura 38- Geometrias para a redução da massa

4.2.4.3 Valores de massa

Através do recurso de determinação de massa, do sistema CAD 3D, pode-se verificar os valores obtidos, pelo emprego das geometrias paramétricas.

No gráfico da Figura 39, verifica-se que, com o valor de 72 mm para a dimensão básica (d_{125}), não foi possível atingir o objetivo de 20% de redução de massa. Como se trata do máximo valor, uma nova configuração geométrica deverá ser analisada, com a finalidade de se obter a redução proposta.

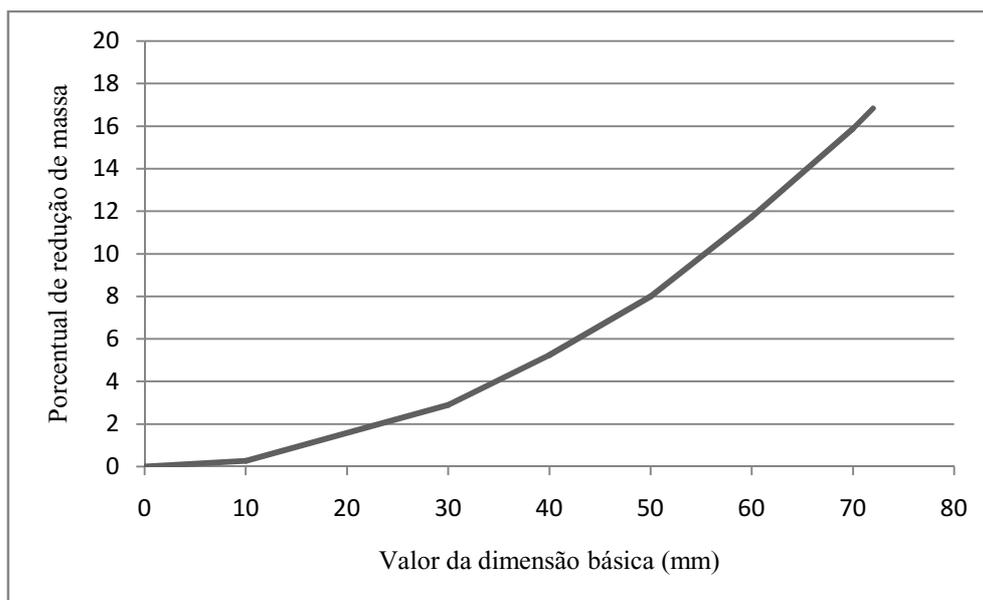


Figura 39 - Porcentual de redução de massa

4.2.4.4 *Nova configuração das geometrias*

Conforme observado, na análise anterior, os valores de redução de massa não foram obtidos. Desta forma, uma nova configuração para as geometrias paramétricas, deverá ser implementada, os critérios e limites de posicionamento, para isto, deverão ser os mesmos adotados no desenvolvimento anterior.

Como já observado o modelo possui regiões fracamente tensionadas (Fig.33), segundo os critérios propostos por Collins (2006), as geometrias inseridas no modelo, para remoção de massa, deverão ser posicionadas nestas regiões. Os fatores limitantes e critérios aplicados permanecem inalterados. A forma das geometrias empregadas, também deverá contemplar uma distribuição homogênea de tensões.

Após uma análise preliminar, a opção pela forma circular se configurou na melhor geometria, por ser facilmente usinável pelo processo empregado, disponibilidade de ferramentas de corte, além de proporcionar uma melhor distribuição de tensões geradas pelos esforços solicitantes (BEER e RUSSEL, 1996).

A quantidade de geometrias também foi alterada, para 3, divididas em dois grupos de dimensões, com a finalidade de melhor explorar todas as regiões sujeitas a baixas tensões. A parametrização das dimensões também seguiu os critérios estabelecidos anteriormente.

A Tabela 4 contém as dimensões variáveis atribuídas às geometrias, as relações estabelecidas de forma paramétrica, com a dimensão básica **d115**, sendo a base para a geração dos modelos sólidos.

Tabela 4 - Variáveis dimensionais das geometrias paramétricas

DIMENSÕES DAS GEOMETRIAS	RELAÇÃO PARAMÉTRICA	VARIÁVEL BÁSICA	DIMENSÃO VARIÁVEL
Diâmetro furo maior - central		d115	
Diâmetro furo – lateral - esquerdo	d115/1.3 ul		d118
Diâmetro furo - lateral direito	d115/1.3 ul		d119
Distância do centro do furo central até a base	d115 x 1.1ul		d114
Distância do centro do furo esquerdo até a base	d115/ 2.2 ul		d120
Distância do centro do furo direito até a base	d115/ 2.2 ul		d121
Afastamento do centro do furo lateral esquerdo	d115/2.5 ul		d116
Afastamento do centro do furo lateral direito	d115/2.5 ul		d117

A Figura 40 ilustra o posicionamento das geometrias empregadas, nas regiões que apresentam as menores tensões e as suas dimensões paramétricas.

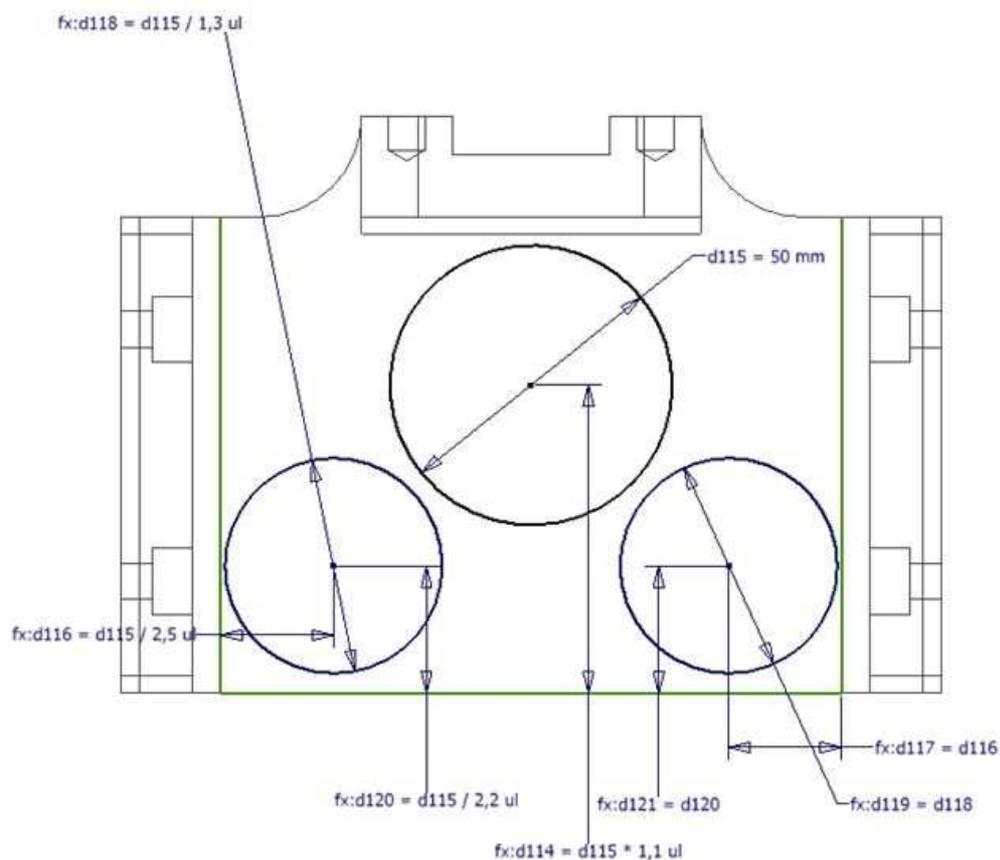


Figura 40 - Parametrização das geometrias

4.2.4.5 Modelagem sólida automática

Pode-se observar, na Figura 41, o sólido obtido com o valor de 25,00 mm, atribuído à dimensão básica **d115**. Com este valor, através dos recursos do sistema CAD 3D é possível verificar uma redução de 12% em relação ao valor inicial. Também, pode-se observar a variação das geometrias, de forma paramétrica, respeitando as restrições de posicionamento e dimensionais impostas.

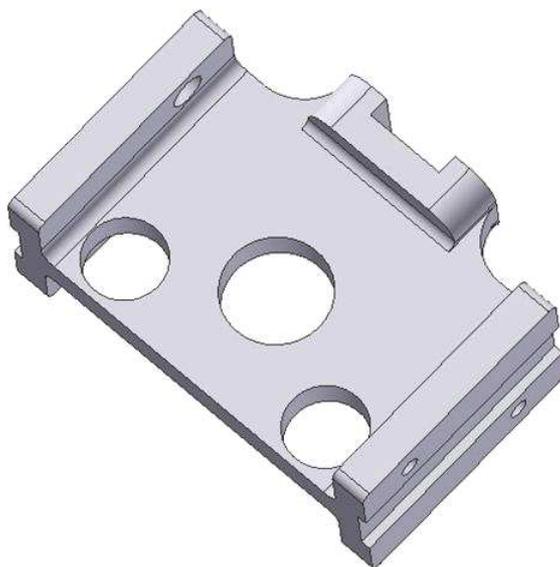


Figura 41 - Geometria básica com 25,00 mm

A Figura 42 ilustra o sólido obtido na atribuição do valor de 50,00mm à variável básica **d115**, atingindo o objetivo estipulado com redução em 20% da massa. Pode-se verificar o aumento significativo das dimensões (diâmetros) das geometrias, com variação de forma paramétrica, a interrelação com a dimensão básica e a proximidade do limite de posicionamento (início dos raios de concordância das abas laterais).

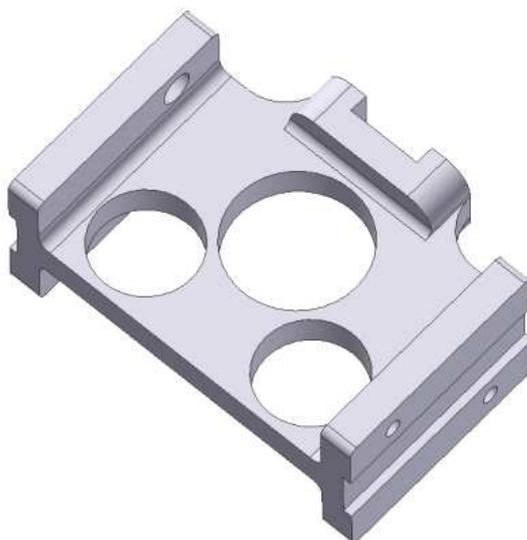


Figura 42 - Modelo com a massa desejada

A variação da redução de massa em função das dimensões das geometrias esta representada no gráfico da Figura 43.

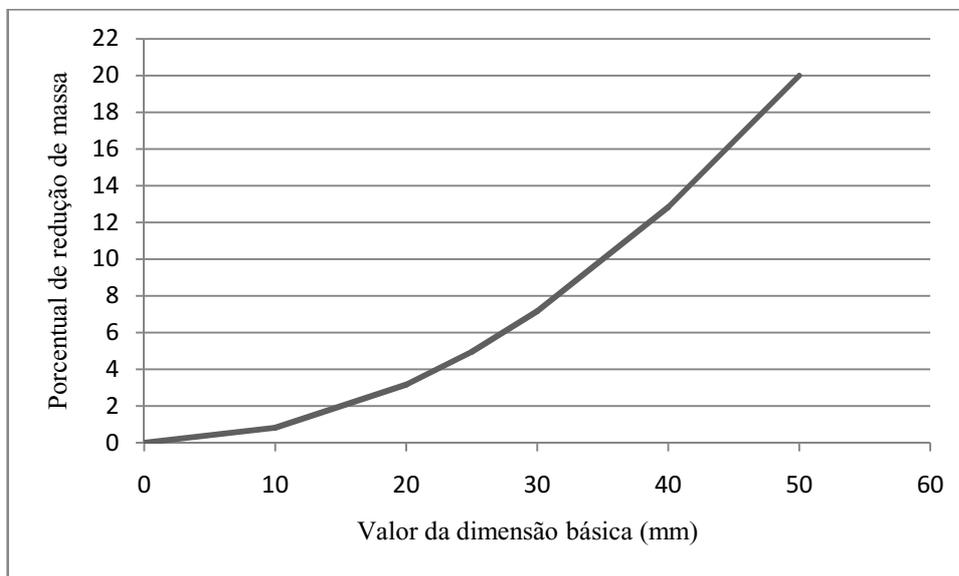


Figura 43 - Porcentual de redução de massa

Como o porcentual de redução de massa estabelecido como objetivo foi atingido, para que o componente seja considerado otimizado, a deformação prevista deveria estar dentro dos limites previamente estabelecidos. O módulo CAE, para análise de tensões e deformações deverá ser então empregado, com a finalidade de fornecer estes dados necessários.

4.3 ANÁLISE DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES

No ambiente de análise de tensões do sistema CAD 3D, é necessário informar os valores das variáveis envolvidas, como cargas, tipo de esforços, posição de aplicação, localização dos vínculos de engastamento, etc. Nesta etapa, as variáveis deverão retratar este conjunto de situações, o mais próximo da realidade possível.

4.3.1 Aplicação e magnitude dos esforços

A Figura 44 ilustra a seleção do ponto de aplicação do esforço e a sua magnitude. Deve-se ter, especial atenção as unidades empregadas pelo sistema (Newton) e a sua coerência com os valores dos esforços reais.

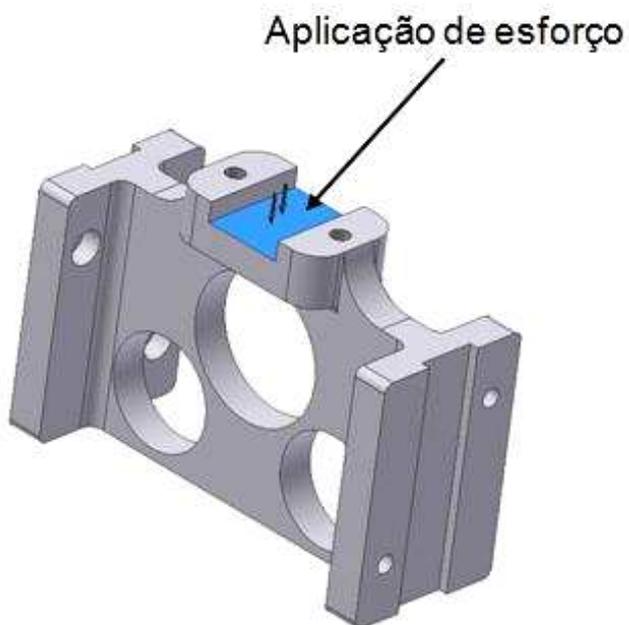


Figura 44 - Área de aplicação de esforço

A magnitude do esforço é de 3,00 KN, sendo a carga máxima que o componente suporta em serviço.

4.3.2 Vínculos de engastamento.

A seleção de faces para engastamento é ilustrada na Figura 45, estando à mesma, em acordo com as condições de fixação do componente, que é realizada através das suas duas abas laterais.

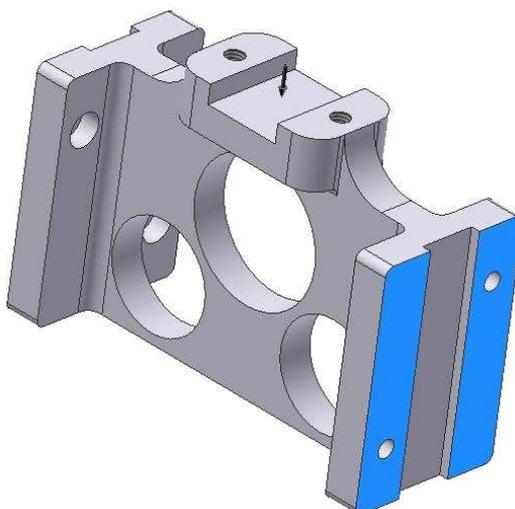


Figura 45- Vínculos de engastamento

4.3.3 Deformações

As deformações sofridas pela peça devido à aplicação do esforço podem ter o seu comportamento previsto, conforme o gráfico apresentado na Figura 46, onde o valor máximo é da ordem de 0,015mm, (vermelho) inferior, portanto, àquela estipulada como maior valor tolerado, na ordem de 0,020mm como já citado. Nas regiões identificadas pela cor azul escuro as deformações são praticamente nulas.

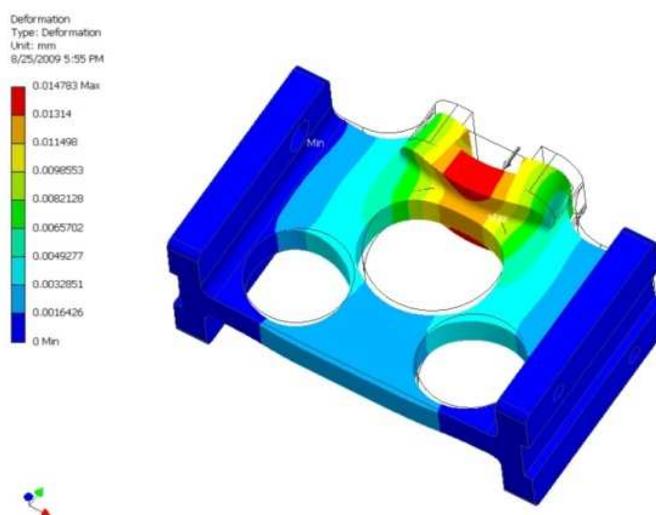


Figura 46 - Deformações resultantes

4.3.4 Tensões Equivalentes

Na Figura 47 é ilustrado o mapeamento das Tensões Equivalentes (*Von Mises*), que representa as tensões medias, as quais as regiões da peça estão sujeitas, como já exposto. Também pode-se observar a malha de definição, dos Elementos Finitos, de forma hexaédrica, determinada em função do tipo de geometria do sólido analisado (AZEVEDO, 2003).

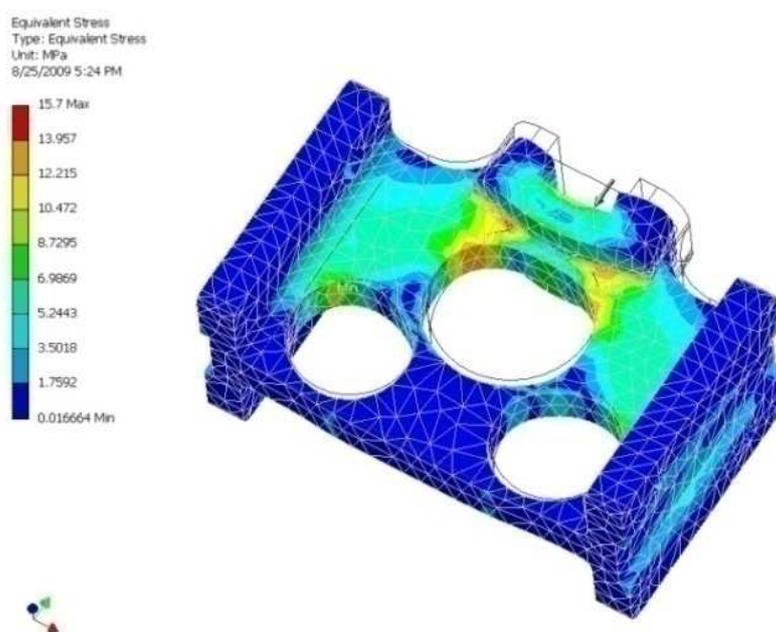


Figura 47 - Tensões Equivalentes (*Von Mises*)

A cor vermelha indica o valor máximo da tensão média desenvolvida, estando seus valores em torno de 15,70 Mpa, muito abaixo, portanto, das tensões limites de ruptura e de escoamento do material. A cor azul escuro representa as regiões onde o material está fracamente tensionado, com valores próximos à zero Mpa.

4.3.5 Coeficiente de Segurança

O Coeficiente de Segurança k_s possui o seu valor determinado nas diretrizes iniciais do projeto. O seu comportamento pode ser avaliado durante a aplicação do esforço solicitante. Os resultados da análise, representados de forma análoga às anteriores, em uma escala de cores.

Na Figura 48, observa-se o valor máximo de 15 para o mesmo, constante em todo corpo da peça. Baseado nesta previsão pode-se observar que, mesmo com a redução da massa, através das geometrias paramétricas (furos), o comportamento das tensões não apresentou pontos com valores elevados, originando possíveis falhas estruturais com deformações acima do tolerado.

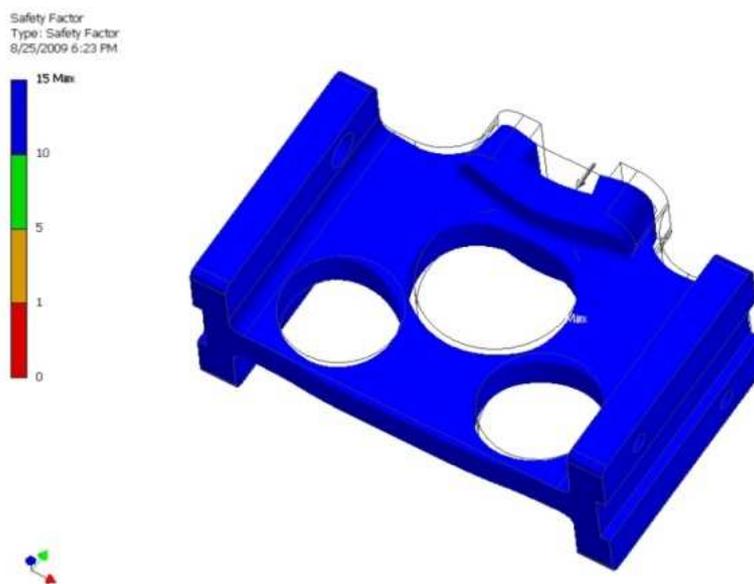


Figura 48 - Coeficiente de segurança k_s

Este fato nos indica que a determinação das posições dos furos para a redução de massa, foram estabelecidas corretamente, em acordo com os conceitos da resistência dos materiais adotados, tendo como resultado a distribuição uniforme das tensões geradas (COLLINS, 2006).

Podemos concluir que, o modelo teve a sua massa adequada aos valores estipulados como objetivo e que a sua deformação máxima prevista, está dentro do limites tolerados. Desta maneira a próxima etapa será a geração dos desenhos 2D

para a documentação de Engenharia, que será a base de dados, para a construção de um protótipo físico.

4.3.6 Documentação de Engenharia

Baseando-se no modelo tridimensional que foi otimizado, o sistema CAD 3D, em seu ambiente de trabalho denominado Desenho (*Draw*), oferece o recurso de geração automática das vistas ortográficas, cortes e perspectivas, de acordo com as configurações selecionadas pelo usuário, como:

- Diedro de projeção.
- Método de dimensionamento.
- Tamanho padrão de papel.
- Representação de tolerâncias dimensionais ou de forma e posição.

A Figura 49 contém um documento de Engenharia com o desenho em 2D que será utilizado como base de dados para a construção do protótipo físico e futura produção da peça. No mesmo, podemos observar as vistas ortográficas projetadas no primeiro diedro, (normalizado no Brasil), perspectiva isométrica e o dimensionamento de acordo com os padrões estabelecidos.

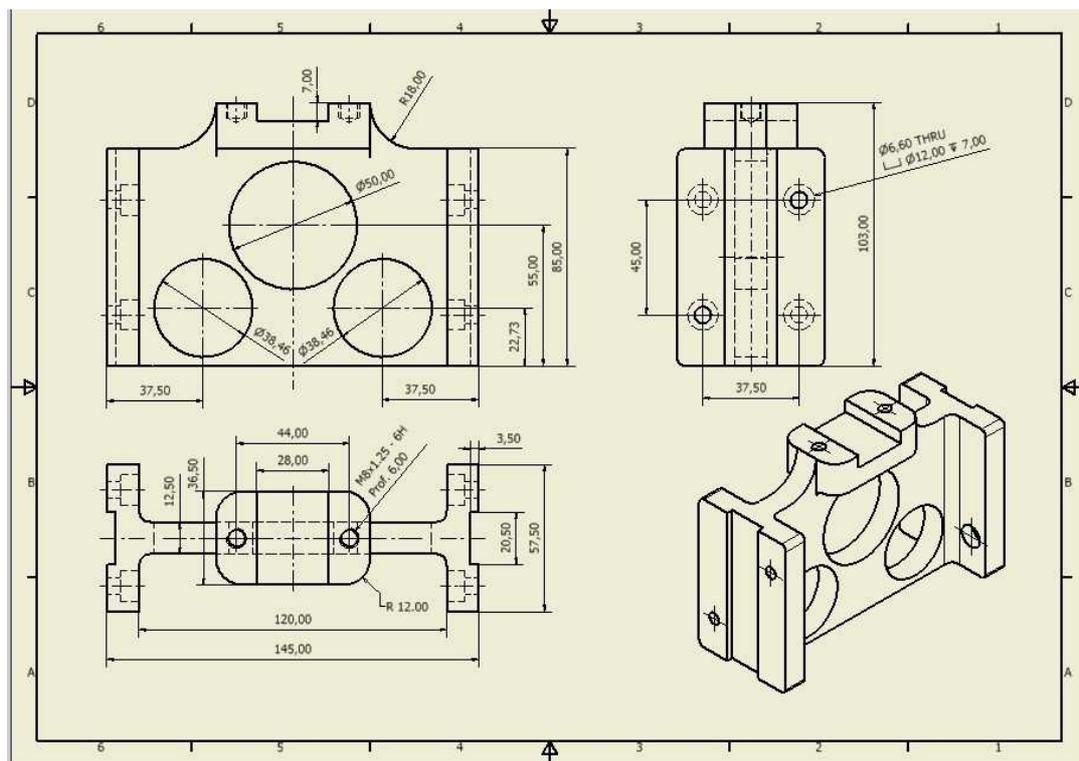


Figura 49 - Documento de Engenharia do componente

Esta base de dados, também será utilizada na inspeção dimensional do produto, documentação do sistema de qualidade, etc., constituindo propriedade intelectual, integrante do patrimônio da empresa.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A interpretação, análise dos resultados e a forma de apresentação dos dados obtidos pela aplicação da metodologia proposta serão abordados e discutidos neste capítulo.

5.1 TENSÕES EQUIVALENTES (*VON MISES*)

Como esperado, as tensões geradas na peça quando solicitada pela aplicação do esforço, apresentaram uma tendência de elevação, devido à remoção de massa necessária, em busca do objetivo determinado. O gráfico ilustrado na Figura 50 retrata a evolução das tensões em função da redução de massa.

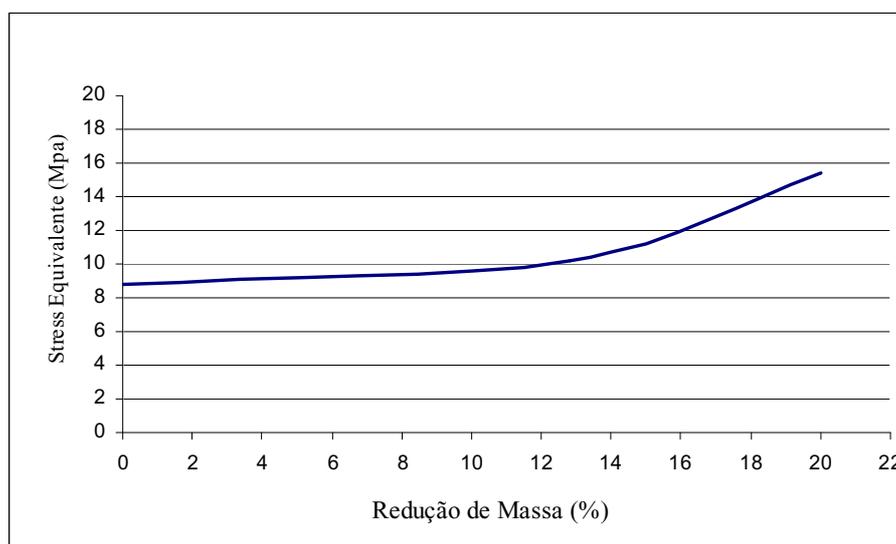


Figura 50 - Tensões Equivalentes versus redução de massa

A partir do valor de 12% há uma elevação mais significativa dos valores das Tensões Equivalentes, porém, com valores muito inferiores a tensão limite de

alongamento do material (Tab. 2). Quando o percentual objetivo é atingido, o valor previsto da tensão é de 15,73, garantindo, desta forma, a rigidez necessária para a confiabilidade das medições realizadas.

5.2 DEFORMAÇÕES

A deformação resultante, tendo o componente a massa desejada, não atinge o limite máximo tolerado (0,020 mm), o mesmo está próximo de 0,015mm, conforme o gráfico ilustrado na Figura 51.

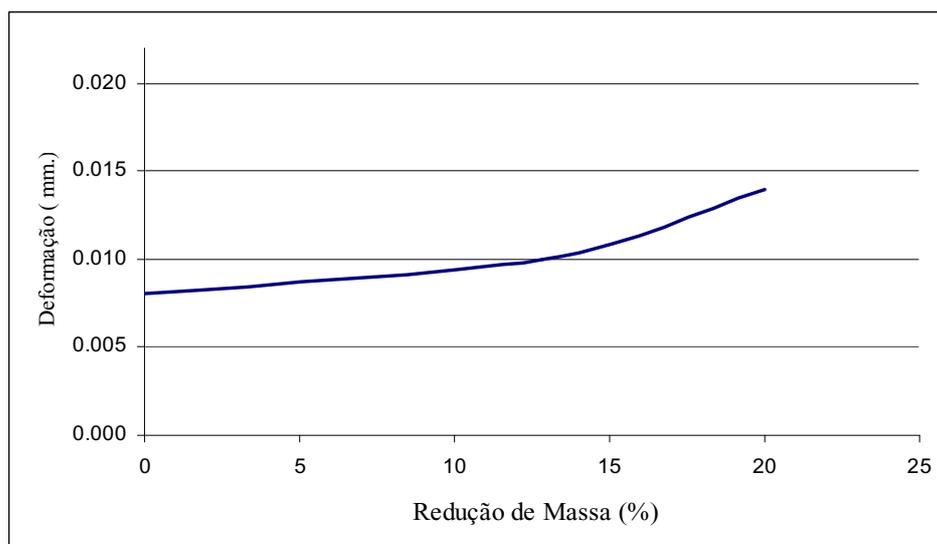


Figura 51 - Deformação *versus* redução de massa

5.3 COEFICIENTE DE SEGURANÇA

O coeficiente de segurança k_s permanece estável no valor 15, conforme o gráfico da Figura 52, estando acima do valor 12, estabelecido nas diretrizes iniciais

de projeto do componente, com o objetivo de fornecer a rigidez necessária, garantindo desta forma a confiabilidade das leituras dimensionais obtidas.

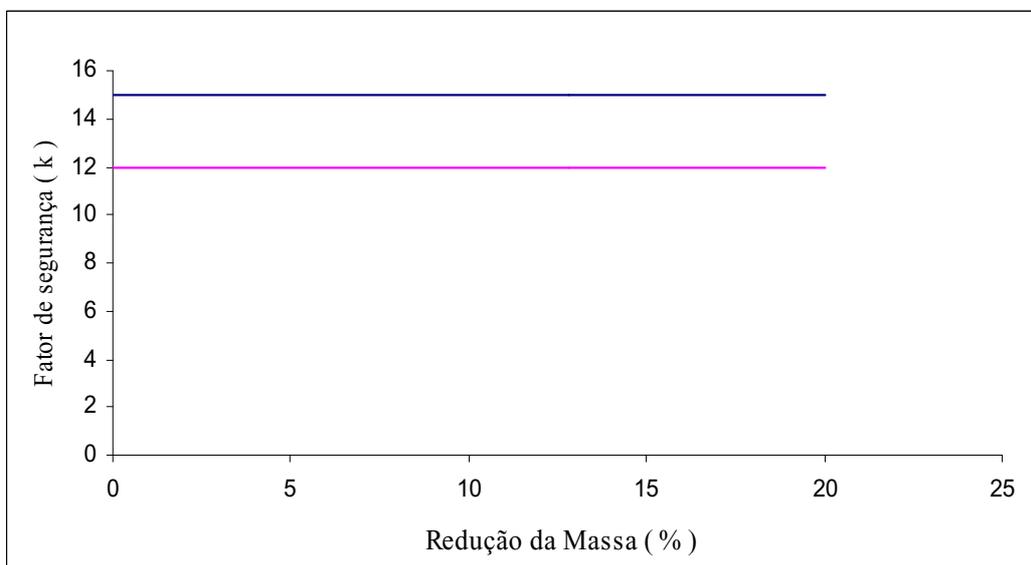


Figura 52 - Coeficiente de segurança k_s

Esta condição nos permite concluir que, mesmo com a redução de massa e a consequente elevação das tensões geradas, o componente suportará de forma satisfatória o esforço, ao qual que está sendo submetido, garantindo o desempenho confiável do equipamento.

5.4 PARÂMETROS E RESULTADOS ESTRUTURAIS

O sistema CAD 3D empregado, possui o recurso de geração de relatórios com os dados e valores resultantes das análises executadas pelo módulo CAE. Os principais dados fornecidos podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros e resultados estruturais

DENOMINAÇÃO	VALORES
Numero de nós	6386
Numero de elementos	3120
Tensão Equivalente máxima. (Mpa)	15,73
Deformação máxima (mm)	0,0145
Fator de segurança	15,00

A forma, o número de elementos e a quantidade de nós e são definidos pelo algoritmo do modulo otimizado do programa, em função da densidade selecionada para a malha (densidade média).

5.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Verificamos que, com o objetivo de redução de massa atingido, o coeficiente de segurança k_s permaneceu acima do especificado nas diretrizes do projeto, garantindo, desta forma, a rigidez necessária, para a fidelidade das medições realizadas. Este fato também foi conclusivo, quanto ao super-dimensionamento inicial do componente.

Com o emprego adequado, das ferramentas computacionais disponíveis em acordo com a metodologia proposta, foi possível realizar o processo de modelagem tridimensional e otimização topológica de massa em um curto espaço de tempo. Desta forma, os erros de modelagem foram minimizados, graças a uma sequência metodológica e produtiva de trabalho, racionalizando as etapas de construção do modelo sólido e do processo de análise de tensões.

Também foi possível verificar a forma de variação dimensional das geometrias parametrizadas, com base em uma dimensão básica que, quando alterada, modificava, também, as demais, através das relações estabelecidas com esta finalidade.

Podemos deduzir, com base nos resultados apresentados, que, os objetivos foram alcançados, pela aplicação do método proposto, explorando de forma eficiente os recursos do sistema CAD 3D empregado.

6. CONCLUSÃO

Com a recente incorporação de módulos otimizados para Análise de Tensões por Elementos Finitos (AEF), aos programas CAD 3D paramétricos de médio porte, a atividade de desenvolvimento do projeto e aprimoramento de produtos se tornou mais produtiva. Este fato reflete em uma drástica redução do tempo destinado ao ciclo de projeto e desenvolvimento, desde a concepção inicial, originada por uma necessidade, até o seu lançamento no mercado consumidor.

A facilidade de alterações dimensionais e a modelagem sólida automática, de várias configurações, com a simples alteração de uma variável parametrizada, proporciona, em conjunto com os recursos AEF disponíveis, a obtenção de produtos otimizados. Satisfazendo desta maneira o valor do coeficiente de segurança determinado nas condições iniciais de projeto, aliada à obtenção de uma significativa taxa de redução de massa e, em consequência, do peso final do componente. Esta condição é uma das determinantes no desenvolvimento de produtos, principalmente aqueles voltados para as indústrias automobilísticas e aeronáuticas, onde o consumo de combustíveis e o desempenho dos veículos são afetados diretamente pelo seu peso.

O custo final dos produtos, também é minimizado, pela diminuição do volume da matéria prima empregada, redução do volume transportado, logística de armazenagem e redução da energia empregada na sua manufatura, influenciando diretamente, desta forma, toda cadeia produtiva das empresas.

Através dos resultados obtidos analiticamente, pode-se construir protótipos físicos muito próximos dos seus estados e configurações geométricas ideais, uma vez que, é possível prever através de simulações, o seu comportamento sob determinadas condições de serviço. Este fato proporciona a redução do tempo e dos recursos empenhados, o que não ocorre no método de tentativas e erros, que demanda a confecção de vários protótipos físicos, para a realização de testes.

Os recursos oferecidos pela parametrização podem ser amplamente explorados pelos usuários dos sistemas CAD 3D, no estágio atual desta tecnologia. Neste trabalho abordamos esta aplicação como meio de facilitar a análise estrutural

de diversas configurações dimensionais, de um componente, através da modelagem sólida automática. Porém o campo de aplicação desta propriedade é extremamente vasto. Podemos tomar como exemplo, as áreas de projeto e desenvolvimento de máquinas e equipamentos, onde este conceito é amplamente aplicável, desde elementos simples, como chavetas, pinos, elementos de fixação, etc. até a montagem de conjuntos com inúmeros itens e componentes, onde é possível se estabelecer relações paramétricas para posicionamento, interferências e ajustes entre os mesmos.

O emprego da análise de tensões, baseada em métodos numéricos em conjunto com a parametrização dimensional, aliadas a outras funcionalidades dos sistemas CAD 3D atuais, se tornará em curto espaço de tempo, num dos principais recursos tecnológicos para o estabelecimento de vantagens competitivas das empresas. Este fato proporciona o embasamento necessário, para a redução dos ciclos de desenvolvimento e aprimoramento de produtos, que poderão ser desta forma, ofertados ao mercado em menor tempo possível, com um maior índice de qualidade e menores custos. Isto em virtude da otimização das etapas do projeto, diminuição da quantidade de material e insumos agregados, bem como a redução da energia empregada nos processos de fabricação e no transporte até o consumidor final.

Demonstramos, também, neste trabalho, que a aplicação da metodologia que foi proposta para a modelagem sólida de objetos em sistemas CAD 3D e a sua posterior otimização topológica de massa, com o uso de geometrias paramétricas, se mostrou eficiente. Foi possível minimizar a ocorrência de erros no processo de modelagem e racionalizar as etapas de análise de tensões.

Os conceitos apresentados estão em consonância, com a demanda crescente, dos meios produtivos, em obter de capacidade competitiva, em um mercado altamente globalizado. Com novas tecnologias e metodologias de desenvolvimento, inovadas constantemente, resultando em produtos que apresentam excelência estrutural e ótima relação custo benefício.

Como tema para futuros trabalhos, gostaríamos de propor o emprego de recursos computacionais baseados em Inteligência Artificial (IA) como, por exemplo, Algoritmos Genéticos (AG) com o intuito de mapear todo o campo de soluções possíveis, encontrando a que melhor satisfaz à necessidade proposta.

Este conceito é aplicável quando ocorrer a combinação do dimensionamento paramétrico de geometrias para a remoção de material, com variação da espessura da peça, configurando, desta forma, uma otimização topológica tridimensional, apresentando inúmeras combinações. O uso de uma ferramenta computacional baseada em Inteligência Artificial viria a proporcionar a determinação da melhor solução, convertendo-se em um meio eficiente de se obter produtos com excelência e desempenho estruturais ótimos.

Esta integração talvez seja a próxima etapa das tecnologias CAD/CAE onde o profissional de projetos e de Engenharia passará a contar com eficientes recursos de apoio a tomada de decisões. Levando a uma racionalização ainda maior, no ciclo de desenvolvimento e refinamento de produtos, abrangendo inclusive a seleção mais adequada dos processos produtivos a serem empregados.

REFERÊNCIAS

ANDERL, R.; MENDGEN, R. Parametric Design and its impact on solid modeling. **Proceedings of third ACM symposium on solid modeling and application**, Chicago, 1995.

AZEVEDO, A. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. Cidade do Porto: Editora da Universidade do Porto, 2003.

BEER, F. P.; RUSSEL, E. J. **Resistência dos Materiais**. São Paulo: Makron Books, 1996.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. São Paulo: McGraw- Hill do Brasil, 1978.

COLLINS, J. **Projeto Mecânico de Elementos de Maquinas uma Perpectiva de Prevenção a Falha**. Rio de Janeiro: LTC Livros Tecnicos e Ciêntificos Ltda., 2006.

CRUZ, M. D. **Autodesk Inventor 2008 Teoria e Pratica**. 1ª Edição. ed. São Paulo: Erica, 2008.

DOTSON, S. **Autodesk Inventor 2009 Mastering**. New York: Sybes, 2008.

FERNANDES, R. P.; ALEXANDRE, M. Proposta para Melhorar as Condições de Projeto e Produção de Moldes e Ferramentas. **V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica CONEM**, Salvador, 25 a 28 Agosto 2008.

FIALHO, B. A. **Cosmos Plataforma CAE do Solidworks**. São Paulo: Erica, 2008.

FOGGIATO, J. A.; BOUTORIN, A. Recomendações para a modelagem em sistemas CAD 3D. **4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação COBEF**, São Pedro, 15 a 18 Abril 2007.

OLIVEIRA, E. J. **Biomecânica Básica para Ortodontistas**. 1ª. ed. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2000.

OLIVEIRA, R. C. Levantamento da Aplicação do Método dos Elemento Finitos a solução de Problemas na Transformação de Metais. **IV Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**, Ouro Preto, 20 a 23 Novembro 2006.

PAHL, G.; BEITZ, W. **Projeto na Engenharia**. 6ª. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

RENG, J. A. **Computer Integrated Manufacturing**. New Jersey: Prentice Hall, 1994.

SHIGLEY, J. E.; MISCHE, C. R. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7ª. ed. São Paulo: Editora Bookman, 2005.

SILVA, E. C. N. **Técnicas de Otimização Aplicadas no Projeto de Peças Mécnicas**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2007.

SIQUEIRA, O. Engenheiros ainda acreditam que CAE é esotérico e caro. **CaDesign**, São Paulo, p. 09-11, Dezembro 2008. ISSN 1413 - 9456.

SOLIDWORKS CORPORATION. Going Mainstream Análisis: A Manufacturer's Guide 2006 Finit Elements analysis (FEA). <http://www.cosmosm.com/pages/services/support/documents/GoingMaisntream2008.pdf>, 2010. Acesso em: 12 Fevereiro 2010.

SOUZA, A. F.; ULBRICH, C. B. L. **Engenharia Integrada por Computador e Sistemas CAD/CAM/CNC**. 1ª Edição. ed. São Paulo: Ed. Artliber, 2009.

SPECH, H. J. **Proposta de Método para Facilitar a Mudança de Técnicas de Projetos: da Prancheta à Modelagem sólida (CAD) para Empresas de Pequeno e Médio Porte**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 185. 2005.