

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CLEBERSON JEAN DE SOUSA

**METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURA DE PRODUTOS DA
LINHA BRANCA VIA SIMULAÇÃO NUMÉRICA ALIADA AO
PROJETO DE EXPERIMENTOS**

**CURITIBA
2012**

CLEBERSON JEAN DE SOUSA

**METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURA DE PRODUTOS DA
LINHA BRANCA VIA SIMULAÇÃO NUMÉRICA ALIADA AO
PROJETO DE EXPERIMENTOS**

Dissertação apresentada como requisito para obter o título de Mestre em Engenharia Mecânica do curso de mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração Manufatura

Orientador: Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes

**CURITIBA
2012**

TERMO DE APROVAÇÃO

CLEBERSON JEAN DE SOUSA

METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DE ESTRUTURA DE PRODUTOS DA LINHA
BRANCA VIA SIMULAÇÃO NUMÉRICA ALIADA AO
PROJETO DE EXPERIMENTOS

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre em Engenharia Mecânica, área de concentração Manufatura, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Cziulik
UTFPR

Prof. Dr. Adriano Scheid
UFPR

Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes
UFPR/PG-MEC
Presidente

Curitiba, 31 de agosto de 2012.

AGRADECIMENTOS

- À Deus, que me possibilitou realizar este trabalho;
- À minha esposa que esteve sempre presente nos momentos difíceis;
- À minha família, pelo apoio e incentivo;
- Ao Professor Paulo Victor Prestes Marcondes pela orientação e auxílios prestados durante todo o curso de Mestrado;
- Aos colegas Dionei Concer pelo incentivo e Alisson Meier pelo companheirismo;
- A todos os companheiros do PG-Mec da UFPR, em especial ao amigo Sergio Fernando Lajarin.

EPÍGRAFE

*Se não pudermos expressar o que sabemos em números, não conhecemos muito bem o assunto.
Se não conhecemos muito bem o assunto, não podemos controlá-lo.
Se não pudermos controlá-lo, estamos à disposição da sorte.*

RESUMO

O principal material usado pela indústria é o aço, onde as propriedades mecânicas são determinantes no processo de conformação de peças. Um dos objetivos da indústria é otimizar custos e processos e ter confiabilidade em seus produtos. Para um produto constituído por componentes produzidos com chapa de aço, um componente desempenha um papel importante no processo de uma forma geral, por isso é necessário conhecer todos os parâmetros do aço que compõem sua respectiva fabricação, bem como as propriedades do material e mais precisamente o seu processo de fabricação, para reduzir-se a espessura de tais componentes. O estudo será feito em uma estrutura de peças conformadas da linha branca. O objetivo geral é o de estudar o comportamento dos componentes com redução de espessura da chapa afim de que suportem os mesmos esforços estruturais originais. O trabalho apresenta a revisão bibliográfica com a finalidade de entender os fenômenos de falhas que podem ocorrer com a redução da espessura de chapa. Um modelo matemático bidimensional em *software* de CAD para uma simulação numérica de redução de espessuras em *software* de CAE é examinado. Finalmente, desenvolve-se uma metodologia de otimização baseado em estudo matemático e estatístico para calcular algebricamente a estimativa possível de redução de espessura da chapa em relação a sua estrutura original. Chegou-se a conclusão através dos estudos acima que é possível diminuir a espessura de componentes montados numa estrutura mecânica para se otimizar custos e processos e garantir a segurança do produto dentro das normas estabelecidas.

Palavras-chave: Chapa metálica. Redução de espessura. Simulação numérica.

ABSTRACT

In general the metal parts play an extremely important role in the mechanical process. The main material used by industry is steel, where mechanical properties are crucial for forming parts. The main goal of the industry is to optimize costs and processes and have confidence in their products. This requires the knowledge of all the parameters of the steel and the respective fabrication and material properties and more precisely its manufacturing process. The energy absorption capacity of a component depends on three factors: the geometrical shape of the work piece, the thickness of sheet steel and its strength. The study will be carried out in a structure of formed parts. Therefore, the general objective of this work is the study of the behavior of components with reduction in thickness in order that they support the same original structural loads. We will present a literature review in order to understand the phenomena of failures that can occur with the thickness reduction of sheets and also to try a contribution to the literature review. In order to do this, it will be developed a mathematical model in two-dimensional CAD software for a posterior prediction by numerical simulation, in CAE software, of the obtained reduction in thickness. Finally, was developed a methodology optimization based on mathematical and statistical study to calculate algebraically the estimate of possible reduction in thickness of the sheet from its original structure. He came up through the completion of the above studies that it is possible to reduce the thickness of components builded on a mechanical structure to optimize costs and processes and ensure the safety of the product within the established norms.

Keywords: Sheet metal. Sheet thickness reduction. Numerical simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Diagrama do conteúdo da Dissertação ¹	17
Figura 2 - Diagrama do Sequenciamento do Procedimento Experimental ¹	32
Figura 3 - Disposição para o teste de carga diagonal	34
Figura 4 - Medição da Deflexão Frontal e Traseira após o teste de carga diagonal .	34
Figura 5 - Componentes (partes) 1, 2 e 3 da estrutura	35
Figura 6 - Componentes (partes) 4, 5, 6, 7 e 8 da estrutura	35
Figura 7 - Sequência básica de etapas para aplicação do método dos elementos finitos.	37
Figura 8 - Modelamento por Elementos Finitos – Sequência 01	39
Figura 9 - Modelamento por Elementos Finitos – Sequência 02	39
Figura 10 - Leitura da Deflexão do Produto	40
Figura 11 - Diagrama de Relacionamento dos Fatores	43
Figura 12 - Fatores com 15 graus de liberdade.....	45
Figura 13 - Estimativas no Gráfico de Pareto - Região Traseira	48
Figura 14 - Gráfico de Probabilidade Normal - Região Traseira.....	49
Figura 15 - Estimativas do Gráfico de Pareto - Região Frontal	50
Figura 16 - Gráfico de Probabilidade Normal - Região Frontal	51
Figura 17 - Estimativa do Gráfico de Pareto – Média (Frontal+Traseiro)	52
Figura 18 - Gráfico de Probabilidade Normal - Média (Frontal+Traseiro).....	53
Figura 19 - Matriz de Confundimento	53
Figura 20 - Gráfico de Perfil de Previsão	54
Figura 21 - Simulação 01 – (<i>RUN ORDER 01</i>)	60
Figura 22 - Simulação 02 – (<i>RUN ORDER 02</i>)	61
Figura 23 - Simulação 03 – (<i>RUN ORDER 03</i>)	62
Figura 24 - Simulação 04 – (<i>RUN ORDER 04</i>)	63
Figura 25 - Simulação 05 – (<i>RUN ORDER 05</i>)	64
Figura 26 - Simulação 06 – (<i>RUN ORDER 06</i>)	65
Figura 27 - Simulação 07 – (<i>RUN ORDER 07</i>)	66
Figura 28 - Simulação 08 – (<i>RUN ORDER 08</i>)	67
Figura 29 - Simulação 09 – (<i>RUN ORDER 09</i>)	68

Figura 30 - Simulação 10 – (<i>RUN ORDER</i> 10)	69
Figura 31 - Simulação 11 – (<i>RUN ORDER</i> 11)	70
Figura 32 - Simulação 12 – (<i>RUN ORDER</i> 12)	71
Figura 33 - Simulação 13 – (<i>RUN ORDER</i> 13)	72
Figura 34 - Simulação 14 – (<i>RUN ORDER</i> 14)	73
Figura 35 - Simulação 15 – (<i>RUN ORDER</i> 15)	74
Figura 36 - Simulação 16 – (<i>RUN ORDER</i> 16)	75

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 - Valores das espessuras utilizadas nas peças.....	36
Tabela 2 - Valores para Fatorial Completo.....	41
Tabela 3 - Valores para Fatores com Resolução	42
Tabela 4 - Valores de Máximo e Mínimo	43
Tabela 5 - Valores de Máximo e Mínimo para as Dezesesseis Simulações (<i>Runs</i>)	44
Tabela 6 - Valores de Deflexão	46
Tabela 7 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 01	60
Tabela 8 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 02.....	61
Tabela 9 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 03.....	62
Tabela 10 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 04.....	63
Tabela 11 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 05.....	64
Tabela 12 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 06.....	65
Tabela 13 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 07	66
Tabela 14 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 08.....	67
Tabela 15 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 09.....	68
Tabela 16 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 10.....	69
Tabela 17 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 11.....	70
Tabela 18 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 12.....	71
Tabela 19 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 13.....	72
Tabela 20 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 14.....	73
Tabela 21 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 15.....	74
Tabela 22 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 16.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Desenho Auxiliado por Computador (<i>Computer Aided Design</i>)
CAE	Engenharia Auxiliada por Computador (<i>Computer Aided Engineering</i>)
CAM	Manufatura Auxiliada por Computador (<i>Computer Aided Manufacturing</i>)
ZC	Zincado Comercial
QCV	Qualidade Vitrea Comercial
DOE	Projetos de Experimentos (<i>Design of Experiments</i>)
FEM	Método dos Elementos Finitos
GSA	Programa de Análise e desenvolvimento (<i>Software development and Analytics</i>)
APDL	Linguagem de Projeto Paramétrico Ansys (<i>Ansys Parametric Design Language</i>)
C	Linguagem de Programação C
STEP	Padrão para a Mudança de Dados do Modelo (<i>Standard for the Exchange of Product Model Data</i>)
IGES	Especificação de Mudanças Gráficas (<i>Initial Graphics Exchange Specification</i>)
ANSI	Instituto de Normas Nacionais Americanas (<i>American National Standard Institute</i>)
FRD	Diagrama de Relacionamento de Fatores (<i>Factor Relationship Diagram</i>)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	14
1.2 JUSTIFICATIVA.....	15
1.3 OBJETIVO GERAL.....	16
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 CONFORMAÇÃO EM CHAPAS: CONTEXTO E CARACTERÍSTICAS	18
2.2 NOVAS TECNOLOGIAS EM ÁREAS AFINS	20
2.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA – MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS ..	21
2.4 PROJETOS DE EXPERIMENTOS	23
2.5 CARACTERIZAÇÃO DA OPORTUNIDADE	31
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	32
3.1 COMPONENTES DA ESTRUTURA.....	35
3.2 SEQUÊNCIA PARA APLICAÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS	36
3.3 DETALHES DA ANÁLISE.....	38
3.4 MODELAMENTO POR ELEMENTOS FINITOS.....	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES	56
5.1 CONCLUSÃO	56
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
REFERÊNCIAS	57
APÊNDICE A	60
5.3 DOE – 01	60
5.4 DOE – 02.....	61
5.5 DOE – 03.....	62
5.6 DOE – 04.....	63
5.7 DOE – 05.....	64
5.8 DOE – 06.....	65
5.9 DOE – 07.....	66
5.10 DOE – 08.....	67

5.11 DOE – 09.....	68
5.12 DOE – 10.....	69
5.13 DOE – 11.....	70
5.14 DOE – 12.....	71
5.15 DOE – 13.....	72
5.16 DOE – 14.....	73
5.17 DOE – 15.....	74
5.18 DOE – 16.....	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A necessidade das empresas de reduzir custos e aumentar a qualidade da produção de peças, fez com que a busca para se reduzir a espessura da chapa do componente fosse uma alternativa para alcançar tal objetivo. Para tanto, se faz necessário pesquisar, estudar e conhecer chapas, *softwares* de simulação e elementos finitos de modo que a qualidade e segurança agregadas ao produto sejam garantidas. Uma avaliação econômica de um produto de um portfólio da linha automobilística indica a economia na alteração da espessura da chapa do componente, o que leva-se a vislumbrar um grande potencial da aplicação desse estudo para a indústria da linha branca.

Este estudo analisou a confiabilidade de um produto com redução de espessura dos componentes através de uma análise pelo método de elementos finitos e *softwares* estatísticos, avaliando a possibilidade da fabricação de peças atuais com espessuras menores, permitindo assim, uma redução de custo das matérias primas adquiridas. Para o desenvolvimento prático do tema proposto foi necessário desenvolver modelos matemáticos 2D no *software Pro-Engineer*, sendo esses modelos importados para o *software* de simulação.

Na simulação numérica foram aplicadas as condições de contorno desejadas para garantir a funcionalidade e segurança do componente, bem como as propriedades de material e as variações de espessuras. A partir dos resultados obtidos, visou-se mostrar que é possível reduzir a espessura dos produtos estudados e propor uma metodologia que simule o comportamento do componente em função da espessura.

O produto estudado foi uma estrutura de um produto linha branca disponível no mercado. A idéia foi trabalhar na redução de peso, e para tal, reduzir as espessuras das peças que formam esse conjunto. Esse estudo foi feito no *software Ansys* através de elementos finitos.

Os aços utilizados para este trabalho foram os mesmos utilizados atualmente para a fabricação do produto. Dentre eles:

- a. Chapa de aço zincada classe ZC conforme NBR7008;
- b. Chapa de aço grau QCV.

Na parte do estudo estatístico, utilizou-se o Projeto de Experimentos (*Design of Experiments*, DOE), o qual é uma técnica utilizada para se planejar experimentos, ou seja, para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletadas durante um determinado experimento, buscando, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a precisão estatística possível na resposta e o menor custo. Atualmente, essa técnica vem sendo utilizada em grande escala pelos pesquisadores que podem determinar as variáveis que exercem maior influência no desempenho de um determinado processo, tendo como resultados: redução da variação do processo e melhor concordância entre os valores nominais obtidos e os valores pretendidos; redução do tempo do processo; redução do custo operacional e melhoria no rendimento do processo. A utilização do planejamento de experimentos contribui com o desenvolvimento pela otimização das grandezas de interesse, pela determinação dos fatores influentes sobre essas grandezas e, eventualmente, pelas suas interações e minimização dos efeitos da variabilidade sobre o desempenho de um processo ou produto. Este trabalho apresenta os resultados da aplicação da técnica de planejamento e análise de experimentos em uma estrutura de um produto linha branca, com o objetivo de reduzir espessuras de seus componentes a fim de diminuir massa e, conseqüentemente, os custos.

1.2 JUSTIFICATIVA

Este trabalho se justifica por:

- a. Expectativa de reduzir um percentual significativo da massa do produto.
- b. Acelerar o tempo de análise para verificar a viabilidade do projeto.

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal é propor uma metodologia para otimização que auxilie na análise da viabilidade de redução da espessura pré-definidas de componentes de chapas de uma estrutura da linha branca.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Entender e aplicar as propriedades dos materiais num software de elementos finitos;
- b. Conhecer os tipos, diferenças e aplicabilidade de formas geométricas que diferenciam um elemento;
- c. Definir condições de carregamento em uma análise de redução de espessura;
- d. Estimar algebricamente a redução de espessura de uma estrutura;
- e. Conhecer as propriedades dos materiais em estudo;
- f. Gerar conhecimento técnico através do uso de uma metodologia de experimentação (DOE – *Design of Experiments*);
- g. Produzir base de dados que proporcione apoio a outros projetos;

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

A **seção 2** apresenta uma revisão bibliográfica com os temas relacionados a esta pesquisa, busca fundamentos e citações científicas que façam uso de assuntos relacionados.

A **seção 3** apresenta o procedimento experimental, faz a apresentação da estrutura que faz parte da pesquisa, do software utilizado para as simulações e como proceder para utilizá-lo, e faz-se uso dos Métodos dos Elementos Finitos.

A **seção 4** expõe os resultados alcançados e as discussões pertinentes ao tema proposto.

A **seção 5** apresenta as conclusões alcançadas com o trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

A **seção 6** mostra as referências bibliográficas utilizadas para a realização deste trabalho.

A **seção 7** apresenta os apêndices das simulações realizadas para a obtenção dos valores das deflexões.

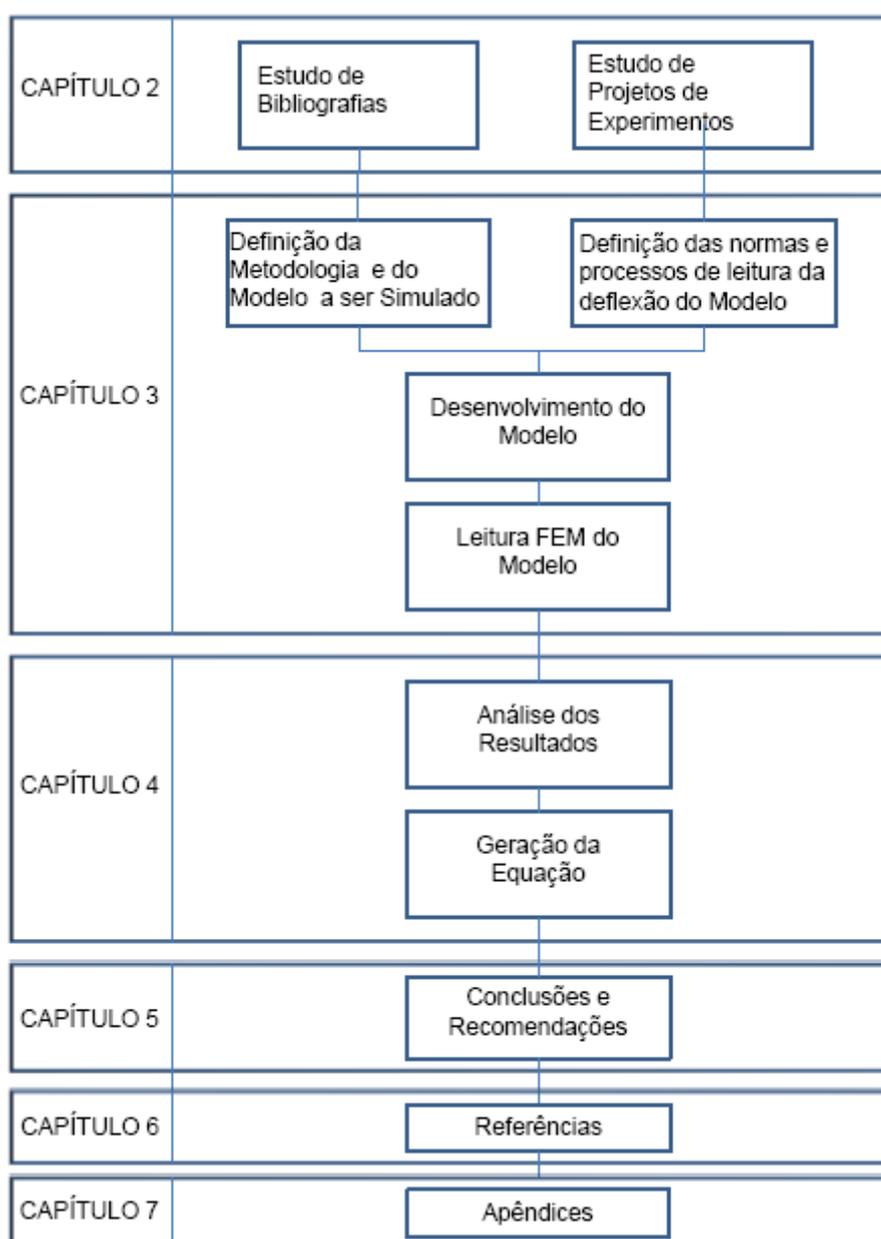


Figura 1– Diagrama do conteúdo da Dissertação¹

¹ Compiladas pelo Mestrando

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONFORMAÇÃO EM CHAPAS: CONTEXTO E CARACTERÍSTICAS

Neste capítulo será feita uma revisão bibliográfica sobre: redução de espessura, *design of experiment* (DOE) e método dos elementos finitos.

Maeder (1999) apresentou o problema que as indústrias automobilísticas estavam vivendo na década de noventa. Isto é, a necessidade de redução de níveis de poluentes. Para que isso pudesse ocorrer era necessário reduzir a massa total do veículo. O autor apresenta vários gráficos onde é mostrado aumento crescente da massa de um veículo, sendo que a razão de aumento da massa dos veículos de 1979 a 1999 foi de 100 kg a mais em cada nova geração de carro lançada. Também salienta o perigo para este aumento constante da massa, o que acarreta na necessidade de um maior consumo de combustível e, com isso, uma maior quantidade de poluentes liberados na atmosfera.

Shaw e Zuidema (2001) apresentam o objetivo de se buscar um material mais resistente. Redução de massa total do veículo utilizando aços de alta resistência sendo a principal alternativa para se reduzir massa, custo e aumentar o desempenho de um veículo.

Atualmente, a indústria recorre em larga medida a aços baixo carbono com limites elásticos de cerca de 200 N/mm². Ao optar pelos aços de maior resistência com limites elásticos de 1150 N/mm², há um grande potencial para reduzir custos, melhorar a performance e a segurança. Devido às suas elevadas resistências, a chapa de aço de maior resistência pode ter uma espessura menor e suportar maior capacidade de carga. Uma peça em aço convencional, com 2mm de espessura, poderá ser reduzida para 1mm ao ser substituída por aços de maior resistência, laminados a frio. Como resultado, poderá produzir-se o dobro das peças a partir de uma tonelada de aço. Assim, apesar dos aços de maior resistência terem um custo por tonelada um pouco superior, o custo por peça poderá manter-se ou sofrer uma redução. Os aços de maior resistência podem reduzir o peso de uma peça, sem comprometer a capacidade de absorção de energia e a segurança.

Ainda segundo Melo (2007) a necessidade de redução do consumo de combustíveis e da emissão de poluentes por parte dos automóveis, tem forçado os

fabricantes a adotar diferentes soluções para o projeto e a construção dos seus novos

modelos de veículos. Uma das medidas mais efetivas, nesse sentido, é a ampla utilização de aços de alta resistência, que permite uma redução da espessura das chapas empregadas, sem prejuízo da segurança dos passageiros na eventualidade de uma colisão. Dentre esses aços, os mais avançados possuem microestruturas complexas, contendo quantidades bem determinadas de diversos microconstituintes, razão pela qual são conhecidos genericamente como aços multifásicos. Além do controle do tipo, quantidade e distribuição de microconstituintes, os aços multifásicos podem usar outros mecanismos para aumento adicional da resistência, tais como o refino de grãos.

A capacidade de absorção de energia de um componente manufaturado em chapa depende de três fatores: da forma geométrica da peça, da espessura da chapa de aço e da sua resistência. Em princípio, significa que se utilizar um aço com maior resistência, a espessura pode ser reduzida sem prejudicar a capacidade de absorção de energia.

Como resultado, os aços de maior resistência poderão ser utilizados de diversas formas:

- a. Para reduzir o peso, sem alterar a capacidade de absorção de energia;
- b. Para aumentar a capacidade de absorção de energia acima do seu valor anterior, sem alterar o peso;
- c. Para combinar as duas alternativas acima referidas, utilizando parte do potencial para reduzir o peso e parte para aumentar a capacidade de absorção de energia.

Projetar um componente para cumprir todos estes requisitos de desempenho e ao mesmo tempo, realizar uma otimização para a redução de massa, devem ser obedecidos critérios de projeto da geometria das peças, seguindo às limitações quanto ao espaço pré-estabelecido para que os mesmos possam ocupar e, conseguir ao mesmo tempo, aumentar a eficiência do material, pois a combinação mudança de material e de geometria faz com que o conjunto estrutural preencha todos os requisitos de desempenho estrutural que são atribuídos à estrutura.

Porém, ao reduzir a espessura da chapa, devem-se tomar especiais cuidados para evitar empenamento ou fadiga global ou local. Ao mesmo tempo, alguns aspectos de sua produção podem ter que ser ajustados. Uma característica que vem assumindo crescente importância em chapas espessas é a chamada razão elástica, ou seja, a razão entre seu limite de escoamento e de resistência. Quanto mais baixo for esse valor, menor será a tendência ao aparecimento do chamado efeito mola (“*spring-back*”) durante a conformação da peça.

2.2 NOVAS TECNOLOGIAS EM ÁREAS AFINS

Segundo Hoyle e Setlak (1996), uma das mais importantes aplicações da liga de alumínio no setor de embalagens, foi a lata para bebidas. A forte competição no mercado de embalagens tem exigido dos produtores e consumidores desta liga, respectivamente, novas alternativas para melhorar as propriedades mecânicas da chapa e a redução do custo de produção das latas. O aumento da resistência mecânica da liga, sem a perda de outras propriedades como, por exemplo, a capacidade de deformação plástica e a resistência à corrosão, tem sido uma das alternativas em estudo, visando reduzir a espessura do corpo da lata e, desta forma, conseguir uma diminuição do peso das contentores de alumínio, para mantê-las em condições competitivas com outros materiais existentes no mercado de embalagens. De uma maneira geral, o desenvolvimento de novas ligas não tratáveis termicamente ou a modificação de ligas já existentes tem sido uma preocupação constante dos fabricantes de chapas para atender a crescente necessidade do aumento da resistência mecânica e alta produtividade dos processos de fabricação das indústrias transformadoras, além de outras características às vezes igualmente importantes como, por exemplo, a aparência do produto final. Conhecendo-se as propriedades mecânicas, faz-se uma análise das variáveis de processo e produto. As propriedades são então melhoradas pelo ajuste dos parâmetros de processo e produto, dando origem a um novo produto. Melhores propriedades de estampabilidade são cada vez mais exigidas para utilização de chapas de aço e redução de estágios de conformação.

2.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA – MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Salvagni e Kaminski (2003) apresenta teoria sobre o cálculo estrutural através do método dos elementos finitos, onde encontra-se informações sobre elementos adequados para a geração de uma malha.

Siriam e Lanzi (2004) relatam a eficiência das simulações para a determinação de combinações adequadas de material e espessura para se evitar que um painel externo apresente problemas de indentação. Também, neste artigo é apresentada uma metodologia de modelagem e análise dos resultados de CAE para a simulação de indentação dos painéis externos. A simulação por elementos finitos de elementos estruturais é procedimento padrão utilizado pela indústria durante as fases de validação e desenvolvimento de um novo produto. As vantagens do uso de elementos finitos são a possibilidade de realizar combinações entre variações de espessuras, e obter em um curto espaço de tempo um resultado confiável a um baixo custo. As avaliações a partir de simulações matemáticas foram realizadas sempre utilizando as seguintes propriedades para o aço: módulo de elasticidade – coeficiente de Poisson – densidade.

Segundo Reis et al. (2004), a importância da simulação de estampagem de chapas é a redução do tempo de *try-out* e dos custos associados ao desenvolvimento das ferramentas. A simulação permite avaliar as regiões da peça que poderão sofrer trincas, enrugamento, redução de espessura e retorno elástico, propondo medidas corretivas das ferramentas antes de sua fabricação e sugerir ajustes de processos, tais como a utilização de lubrificantes e pressão de trabalho no prensa chapas.

Ao contrário dos métodos analíticos clássicos, que permitem o cálculo da resposta exata dos deslocamentos, deformações e tensões da estrutura sendo analisado, o Método dos Elementos Finitos fornece apenas soluções aproximadas. Todavia, as soluções analíticas são limitadas para resolução de problemas de conformação mecânica devido à natureza fortemente não linear deste problema (Mamalis et al., 1994). Por outro lado, o Método dos Elementos Finitos constitui um conjunto de procedimentos que podem ser aplicados em caráter geral, independente da forma da estrutura e da condição de carregamento, podendo representar as aplicações práticas encontradas no dia-a-dia.

Através do Método dos Elementos Finitos, os sistemas contínuos são subdivididos em um número finito de partes chamadas de elementos, conectados entre si por intermédio de pontos discretos chamados de nós dos elementos.

As estruturas compostas por treliças podem ser representadas por elementos que permitem o estabelecimento direto entre as forças nodais aplicadas e os correspondentes deslocamentos nodais a partir das leis da Resistência dos Materiais Elementar. Já os problemas de conformação de chapas precisam de uma representação mais complexa (elementos bi e tridimensionais), pois os efeitos dos contornos dos elementos devem ser considerados. Para isso, é necessário o uso de funções de interpolação, que são curvas suaves construídas a partir de valores conhecidos, que nesse caso são os graus de liberdade dos nós dos elementos.

Segundo Silva (2002) as reduções de peso e aumento de desempenho das peças mecânicas obtidas com o uso de técnicas de otimização são significativas ao ponto de atualmente o seu uso ser decisivo para definir a competitividade das indústrias da área metal-mecânica (autopeças, aeronáutica, naval, entre outras.), sendo a sua importância inegável na redução de custos. É importante salientar que o impacto do uso dessas técnicas não se limita apenas à otimização do projeto mecânico da peça em si, mas se estende para toda a cadeia produtiva da empresa, pois uma peça com menor peso ou volume, economiza material usado, possibilita aumentar a produção, facilita o transporte (maior número de peças), e, portanto permite reduzir o custo total final da peça.

Segundo Bihanta et al.(2012), a aplicação do método dos elementos finitos para a otimização de sistemas mecânicos é bastante utilizada no ambiente industrial e acadêmico, e na maioria das vezes, os estudos numéricos são limitados apenas com a mudança manual de alguns parâmetros para investigar os efeitos sobre a saída problema. No entanto, este tipo de aplicação do Método de Elementos Finitos demonstra ser demorado e necessita sempre interferência do usuário para a preparação de novos modelos com os novos parâmetros.

Segundo Raghavan e Garrison Jr (2010), reduzindo-se a espessura da chapa por laminação a frio, reduz-se a tensão de alongamento e o limite de tensão para as tensões de deformações planas. Quando a espessura da chapa é reduzida sem alterar a força de tração o limite de deformação não diminui com a redução da espessura.

Govik et al. (2012), afirmam que com a metodologia dos Elementos Finitos de simulação, as propriedades de uma montagem envolvendo chapas seriam previstas por se conhecer as contribuições de cada passo da cadeia do processo de fabricação para as propriedades de uma montagem final. O resultado de cada passo é transferido para o passo subsequente. Assim, a evolução das deformações e tensões residuais em toda a cadeia do processo de fabricação pode ser prevista. Para fins de validação uma montagem foi manufaturada, tanto física como virtualmente usando o procedimento de simulação. As comparações entre o previsto e os resultados dos testes físicos mostram que é possível alcançar resultados precisos. Assim, o procedimento de simulação proposto pode ser uma ferramenta útil para avaliar tanto os processos de fabricação como os da montagem final. No entanto, mais estudos são necessários para analisar os efeitos da compressão e dos pontos sequencias de solda para otimizar os parâmetros do processo de fabricação. Além disso, a variação é uma parte inevitável do processo de produção. Variações de materiais e processos podem alterar drasticamente os resultados. Consequentemente, são necessários mais estudos a fim de prever o efeito das variações nos processos envolvidos. Isto seria de grande valor na escolha dos parâmetros de processos e definições corretas de tolerâncias do processo de fabricação do produto e seus subcomponentes constituintes.

2.4 PROJETOS DE EXPERIMENTOS

Constituem-se objetivos de um experimento estatisticamente planejado:

- a. Determinar as causas que mais influenciam o efeito de interesse do processo;
- b. Identificar as faixas de valores para os itens de verificação, associados aos fatores controláveis, de modo a obter cada item de controle centrado no valor nominal almejado com uma pequena variabilidade em torno do valor alvo;
- c. Obter as faixas de valores para os itens de verificação associados aos fatores controláveis as quais minimizam as ações dos fatores não controláveis sobre os itens de controle do processo.

Existem dois aspectos ligados a qualquer estudo experimental: o planejamento do experimento e a análise estatística dos resultados. Eles estão intimamente relacionados, já que a técnica de análise depende diretamente do planejamento utilizado (Costa, 1997).

Segundo Villas Boas (1992), a utilização de um modelo estatístico para planejar e avaliar os resultados de uma investigação é uma importante ferramenta, pois proporciona ao pesquisador uma precisa interpretação do fenômeno investigado. Um experimento planejado seguindo este critério, permite que se obtenham resultados não só sobre a influência individual de cada variável estudada, mas também, toda a gama de interações entre o total de variáveis consideradas. Os resultados obtidos com estas experiências possuem duas aplicações imediatas:

- a. Em investigações preliminares sobre certos fenômenos, onde tanto as influências individuais devidas às variáveis envolvidas, como também aquelas influências originadas da combinação de diversas variáveis precisam ser rapidamente detectadas;
- b. E nos programas experimentais.

Onde se procure obter modelos empíricos e semi-empíricos, em função de um conjunto de condições de operação das variáveis do processo. De acordo com essa orientação, para se realizar um experimento de forma eficiente, deve-se utilizar uma abordagem científica para o seu planejamento. Esta abordagem é denominada "Planejamento de Experimentos" ou "*Design of Experiments*" (DOE) e refere-se ao procedimento de planejar um experimento de forma que os dados apropriados sejam coletados em tempo e a custos mínimos.

Segundo Werkema e Aguiar (1996), para melhor entender o sentido de cada termo utilizado em planejamento de experimentos, deve-se considerar a seguinte terminologia:

- a. unidade experimental é considerada a unidade básica para a qual será executada a medida da variável resposta;
- b. fatores são as variáveis cuja influência sobre a variável resposta está sendo estudada no experimento;

- c. níveis de um fator são os diferentes modos de presença de um fator no estudo considerado;
- d. tratamentos são as combinações específicas dos níveis de diferentes fatores;
- e. ensaio é cada realização do experimento em uma determinada condição de interesse, isto é, um ensaio corresponde à aplicação de um tratamento a uma unidade experimental;
- f. variável resposta é o resultado de interesse registrado após a realização de um ensaio.

É importante ressaltar que o uso de uma abordagem estatística no planejamento de experimentos e sua análise pressupõe que as pessoas envolvidas na experimentação possuam antecipadamente uma ideia definida do que está em estudo e conheçam a forma pela qual os dados são coletados. É desejável, também, que se tenha uma ideia qualitativa do modo pelo qual os dados serão analisados.

Design of Experiment (DOE) tem sido mostrado como uma ferramenta adequada na modelação e análise dos problemas singulares, como a previsão da espessura das camadas em um rígido processo de galvanização. Esta abordagem proporcionou uma oportunidade para compreender a influência dos parâmetros de processo na espessura através da realização de experiências. Foi compreendido como as interações entre os vários fatores influenciam a espessura da camada obtida. O DOE reproduz com bastante precisão o mecanismo da previsão da espessura da camada em um processo de cromagem. Neste sentido, o passo chave na análise de engenharia é a escolha adequada dos modelos matemáticos. Estes modelos serão selecionados dependendo quais fenômenos serão previstos. (Lasheras et al., 2010)

Segundo Franceschini e Macchietto (2008) modelos baseados em técnicas de *design of experiments* aumenta a precisão dos parâmetros. Estas aplicações são usadas em uma ampla gama de campos, afim de destacar a crescente importância e utilização dos modelos baseados em técnicas de planejamento experimental em processos de engenharia. As vantagens que se podem obter a partir de um trabalho fundamentado nestes métodos estão bem consolidadas, estes experimentos permitem retirar uma informação de qualidade a partir dos dados experimentais com menos tempo e menos consumo de recursos. Isto é muito importante em campos tradicionais, como em modelagens cinéticas e biológicas, onde a complexidade dos

sistemas é elevada e carrega um alto custo. Inúmeros estudos tem sido feitos visando melhorar as técnicas de projeto experimental, a definição de novas funções de objetivo (novas técnicas para medir o conteúdo de informação dos experimentos) novas formulações que levem em conta questões que não o conteúdo de informação das medições como por exemplo, a correlação de parâmetros, curvatura da região de confiança, observações em falta, entre outros. O número de parâmetros envolvidos no modelo matemático pode representar uma limitação para a aplicação do modelo baseado em técnicas de *design of experiment*. Mas as recentes melhorias no cálculo de GSA (outra técnica que pode envolver uma carga pesada computacional) tem feito o uso deste método em uma espécie de pré-seleção de modo a concentrar o envolvimento apenas dos parâmetros principais.

Ainda segundo Franceschini e Macchietto (2008), desde os primeiros estudos teóricos sobre o modelo baseado em *design of experience*, o método sofreu um desenvolvimento significativo, em particular, nos últimos dez anos quando os avanços da computação tem feito o uso destas técnicas possíveis para aplicações mais complexas com tempos de solução razoável. Estes métodos estão agora se tornando disponíveis softwares comerciais e um contínuo interesse e esforço da comunidade científica para melhorar e fazer todas as técnicas mais acessíveis, eficazes e eficientes continuam sendo desejáveis para o modelo baseado em projeto de experimento tornar-se uma ferramenta padrão para cientistas e aplicações industriais.

Shuaeib et al. (2007) utilizaram um método estatístico em DOE para investigar os efeitos dos parâmetros de um projeto de capacete, incluindo os efeitos de interação entre estes parâmetros, que por meio de resultados de simulações de elementos finitos utilizados nos projetos de experimentos, pode ser analisada e determinada a superfície ideal do capacete. Este projeto de experimento é uma coleção de ferramentas estatísticas e técnicas utilizadas para a construção de uma relação funcional aproximada entre a resposta (calculada e/ou fenômenos mensurados) e variáveis do projeto (um número de fatores independentes ou variáveis que afetam a resposta). As aproximações do projeto de experimento foram desenvolvidas originalmente para ajuste dos dados de experimentos físicos. No entanto, as experiências físicas foram substituídas com os resultados das simulações. Estas abordagens são cada vez mais populares, o que representa um marco na história em análise de projeto mecânico e otimização.

Ainda segundo Shuaeib et al. (2007), o projeto de experimento tem o propósito de filtrar o ruído e fornecer um modelo simples para descrever a resposta. A relação entre a resposta (y) e as variáveis independentes (x) pode ser expressa utilizando um modelo matemático da forma geral : $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \epsilon$; onde ϵ é o erro total (isto é a diferença entre os valores reais e os valores previstos) e n , é o número de variáveis no modelo. Além disso, afirmam que este método pode ser efetivamente utilizado em uma investigação mais aprofundada de estudos de projetos de capacete.

Kyratsis et al. (2011) pesquisaram a utilização combinada de simulação e projeto de experimento a fim de calcular com precisão a força axial de perfuração de uma ferramenta de perfuração. A análise fatorial completa exigiria 256 experimentos. Então, o projeto de experimentos (DOE) foi adotado, a fim de reduzir a quantidade de experimentos. Todo o trabalho experimental foi baseado em DRILL3D, uma aplicação de simulação de perfuração, que foi validada em trabalhos de pesquisas publicados anteriormente. A combinação da simulação de perfuração com base em CAD e projetos de experimentos foi utilizada a fim de alcançar um maior nível de verificação, enquanto que ao mesmo reduziu radicalmente os custos. Os modelos matemáticos produzidos no DOE, provaram serem muito precisos e extremamente fácil de usar, uma vez que eles proporcionam uma função, que pode ser usada diretamente em uma variedade de outras aplicações.

Koc et al. (2000) mostraram que uma combinação de técnicas de FEA e DOE pode gerar informação útil sobre muitas incógnitas em um processo de conformação de metais, em particular para novas tecnologias para o qual apenas conhecimentos limitados estão disponíveis. Através da utilização de DOE, informações precisas, sobre os principais efeitos de parâmetros geométricos das peças conformadas foram obtidas com êxito empregando um número reduzido de análise de elementos finitos, esforço e custo. Também, se demonstrou no projeto de experimento que as interações são claramente reveladas com poucas simulações do que seria necessário por métodos padrão. Métodos similares e aproximações são também propostos para gerar diretrizes adicionais de projetos para outras partes e características em comum. Efeitos de material, espessura e parâmetros de processos tais como a pressão na máquina podem ser também reveladas após análise semelhante para uma variedade de geometrias de peças. Essas diretrizes de

projetos ajudariam engenheiros no início da fase de desenvolvimento para novos produtos com a sua análise detalhada.

Acht et al. (2007) combinaram um projeto de experimentos com o método de elementos finitos. Essa pesquisa foi utilizada para conhecer fatores significativos que influenciam nos resultados da simulação. Foram analisados em um disco possíveis fatores de influência na geometria da peça. As respostas para o projeto foram as relativas mudanças nas dimensões do disco. A fim de detectar os principais fatores e também as interações entre os principais fatores, um fatorial completo foi rodado. O projeto foi analisado de duas maneiras diferentes:

- a. Usando um gráfico de probabilidades e;
- b. Utilizando o método de análise de variância.

Ambas as formas levam a mesma detecção de factores significativos. Os dois fatores de interação que foram detectados como significantes com o método de análise de variância, não foram detectados pelo gráfico de probabilidades. Isto leva à conclusão de que os níveis mais baixos de significância não podem ser detectados com o gráfico de probabilidade. Uma vez que a análise de variância demanda de mais tempo do que o gráfico de probabilidades, essa análise tem de se comprometer com o tempo gasto e a exatidão dos resultados.

Segundo Bradley e John (2011) o *Jump* é um ambiente de *software* estatístico que permite aos analistas fazerem descobertas por meio da exploração de dados. Um poderoso método para iniciar o processo de descoberta nos experimentos estatisticamente projetados que garantem que os dados resultantes tenham conteúdo de informação de grande relevância. Este método com *design* personalizado tem uma abordagem inovadora para o delineamento de experimentos. Além disso, fornece um conjunto abrangente de ferramentas estatísticas, como planejamento de experimentos e controle estatístico da qualidade em um único pacote. Ele pode trabalhar com uma variedade de formatos de dados como arquivos Excel e de texto e permite a programação personalizada e desenvolvimento de *scripts*. O *Jump* usa uma interface gráfica para exibir e analisar dados. É um software para gráficos estatísticos interativos que inclui uma janela de tabela de dados para a edição, inserção e manipulação dos dados. Uma ampla gama de métodos gráficos e estatísticas para análise de dados, um extenso módulo de

projetos de experimentos, opções para realçar e exibir subconjuntos de dados, um editor de fórmulas para cada coluna da tabela para calcular valores conforme necessidade. Também há, facilidade para agrupamento de dados e resumo estatísticos, gráficos especiais e técnicas de melhoria da qualidade. Ferramentas para a impressão e resultados de análises entre as aplicações e uma linguagem de script para salvar e criar rotinas usadas com frequência. As estatísticas são organizados em áreas lógicas com gráficos e tabelas apropriadas, que ajudam a encontrar padrões nos dados, identificar os pontos mais distantes, ou modelos de ajustes.

O *Ansys* consiste de várias ferramentas para análise de projetos baseada no método de elementos finitos a fim de resolver problemas de análise das diversas áreas de engenharia. Os usuários do software são as indústrias, empresas de engenharia, órgãos governamentais e universidades. Este *software* possui uma interface gráfica amigável e bem organizada, facilitando ao usuário acesso às funções, comandos, documentações e materiais de referência além de oferecer uma ajuda “*on line*” com toda a documentação do software e um sistema de ajuda, baseada em hipertexto. A interface gráfica permite customizar as funções, comandos e rotinas através da barra de ferramentas além de sintetizar em botões as funções mais utilizadas pelo usuário. O usuário tem quatro métodos de operações: menus, caixas de diálogos, barras de ferramentas e entrada direta de comandos.

A interatividade gráfica do *software* é total, ou seja, tanto a nível de processamento como a nível de pós-processamento e poderá ser visualizado através de gráficos, pois o software suporta alta resolução e mais de 256 cores.

O *Ansys* possui um pré-processador, um processador de soluções e dois pós-processadores, um geral e outro de resultados no tempo. O primeiro pós-processador exibe gráficos de qualquer tipo de análise independente do tempo (e.g. temperatura, tensões ou fluxo de fluídos ao redor do modelo). O segundo permite analisar dados no tempo, como frequências, transientes ou deslocamentos em função do tempo.

A linguagem do pacote é parametrizada – APDL (*Ansys Parametric Design Language*) permitindo a automatização do processo através de um analisador inteligente. Ou seja, através de um sofisticado sistema de entrada de dados, permitindo ao usuário o controle total de qualquer parâmetro do projeto como: dimensões, materiais, cargas, restrições e otimizações. A APDL permite também a

definição de macros e a utilização de sub-rotinas criadas pelo próprio usuário como a linguagem Fortran e C, que podem ser acessadas com o código do *Ansys* podendo melhorar as capacidades criando comandos, elementos, equações, materiais com comportamentos específicos ou critérios de falhas diferentes.

O software permite a utilização de alguns modelos 3D de CAD, através de transferências ou importação de arquivos com a extensão: STEP, IGES, *Computervision/CADDS*, *Pro/Engineer* e *Unigraphics*. Além disso, os arquivos criados no formato *Ansys* podem ser utilizados por qualquer produto da família *Ansys* e em qualquer plataforma, ou seja, sua portabilidade é total.

Qualquer tipo de problema das diferentes áreas de engenharia existentes podem ser simulados virtualmente no *Ansys*.

Todos os tipos de carregamentos podem ser definidos, para uma análise de tensões, deslocamentos e deformações e ainda definir o tipo de propriedade do material. O programa pode definir também as acelerações necessárias para contrabalançar as cargas aplicadas.

O pacote é capaz também de resolver problemas que envolvam não-linearidades, seja ela geométrica, material ou dos elementos.

Com elementos não lineares é possível resolver problemas como: superfície de contato, interfaces, sólidos reforçados (e.g. concreto, rochas...), molas e amortecedores não lineares, membros que trabalham apenas com tensão ou compressão, conchas ou carapaças com opções de dobramento, elementos de controle e outras singularidades.

A análise dinâmica linear e não linear pode ser resolvida pelo software envolvendo: cargas alternadas (máquinas rotativas), cargas súbitas (impactos ou explosões), forças aleatórias (terremotos) e qualquer tipo de carga transitória (cargas móveis sobre um ponto). Os modelos de análise são: transiente, modal, harmônica, espectral e vibrações aleatórias.

A análise em mecânica dos fluídos utiliza-se das técnicas computacionais de dinâmica de fluídos. Assim pode-se realizar a análise da vazão, pressão ou a distribuição de temperatura do escoamento líquido ou gasoso em tubos ou em sistemas diferentes acoplados.

O escoamento pode ser analisado tanto no regime permanente quanto nos transitórios, além do equacionamento que pode ser linear ou não linear dependendo do problema. Estão disponíveis vários tipos de análise para as técnicas

computacionais de dinâmica dos fluídos, incluindo: escoamento laminar, escoamento turbulento, térmico-fluído, fluído estrutural, escoamento compressível e escoamento em tubos.

O usuário também pode realizar modelagem de sólidos no software, pois este possui estruturas geométricas primitivas como esferas ou prismas e através de definições de pontos, linhas, áreas e volumes. Poderá também ser feita a conversão de arquivos IGES de definição de geometrias, no caso de modelos de formas mais complexas.

A especificação de arquivos IGES estabelece informações da estrutura para serem utilizadas em representações digitais e comunicação de dados entre outros produtos CAD/CAM.

O formato de arquivo definido por esta especificação trata a definição do produto como um arquivo de entidades. Cada entidade é representada em um formato de aplicação independente, para o qual a representação de um sistema CAD/CAM específico pode ser traçada. As representações de entidade providas nesta especificação incluem formas atualmente comuns aos sistemas de CAD/CAM e formas que apoiam as tecnologias de sistemas que emergem atualmente.

2.5 CARACTERIZAÇÃO DA OPORTUNIDADE

Com o estudo de trabalhos com assuntos pertinentes a esta dissertação tem-se a oportunidade de fazer a confiabilidade de um produto para a redução de espessura dos componentes através de uma análise pelo método de elementos finitos e *softwares* estatísticos para planejamento de experimentos, avalia-se a possibilidade da fabricação das peças atuais com espessuras menores, permitindo assim, uma redução de custo das matérias primas adquiridas e conseqüente redução de peso. O Projeto de Experimentos (*Design of Experiments*, DOE) tem fundamental importância para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletadas durante o experimento, buscando, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: o menor custo e uma metodologia que reproduza uma equação que auxilie na otimização de estruturas para a linha branca.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

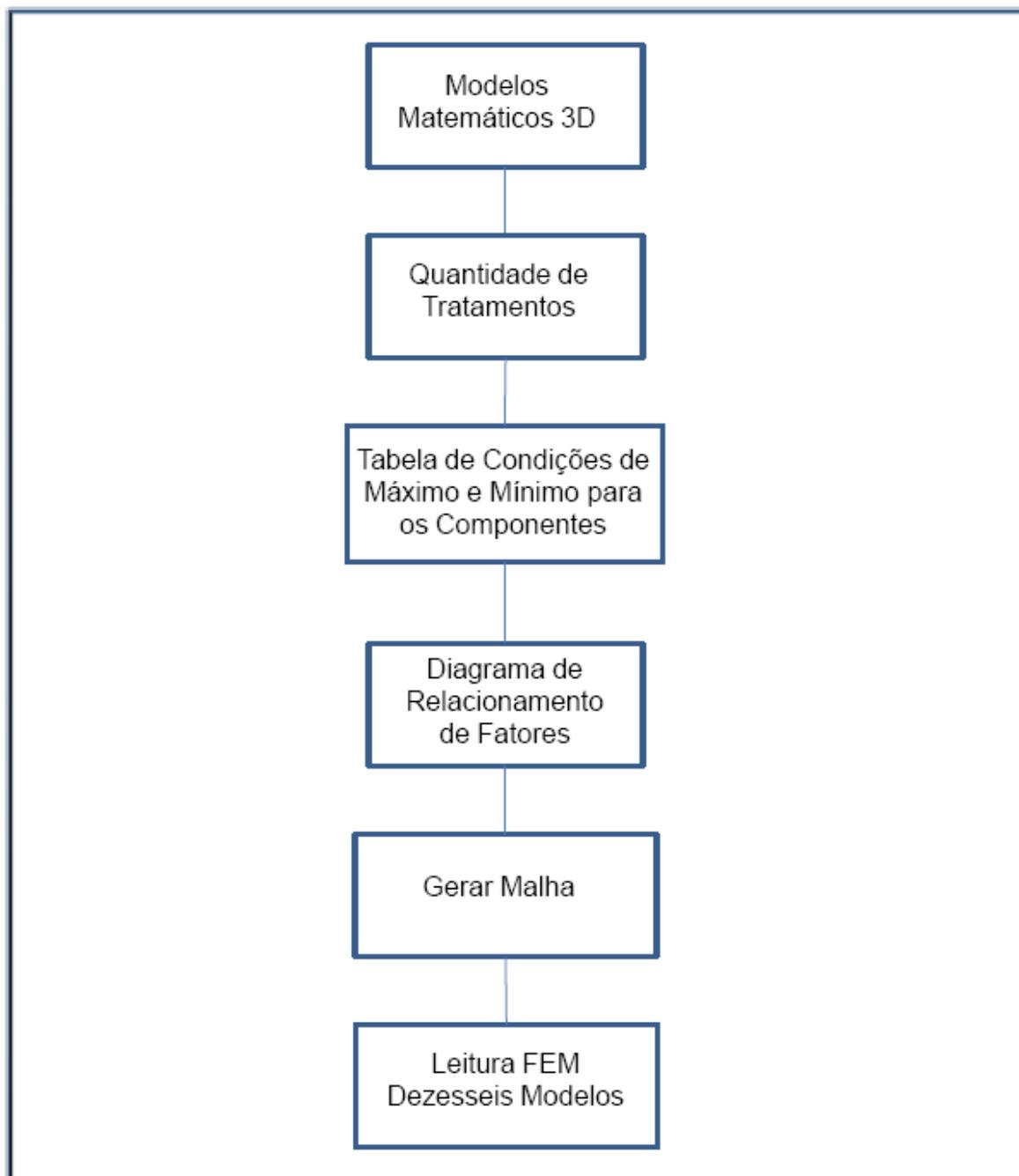


Figura 2 - Diagrama do Sequenciamento do Procedimento Experimental ¹

¹ Compiladas pelo Mestrando

Para o desenvolvimento prático do tema em questão foi necessário desenvolver modelos matemáticos 3D no *software Pro-Engineer*, sendo esses modelos importados para o *software* de simulação.

Na simulação foram aplicadas as condições de contorno desejadas, bem como as propriedades de material e as variações de espessuras desejadas.

A partir dos resultados obtidos, deseja-se mostrar que é possível reduzir a espessura dos produtos estudados e gerar uma equação através de uma metodologia que demonstre algebricamente a redução de espessura para uma estrutura.

O produto estudado foi um produto linha branca disponível no mercado. A ideia foi trabalhar numa redução de peso, e para tal, reduzir as espessuras das peças que formam esse conjunto. Esse estudo foi feito no *software Ansys* através de elementos finitos.

Os aços utilizados para este trabalho foram os utilizados atualmente para a fabricação do produto. Dentre eles tem-se:

- a. Chapa de aço zincada classe ZC conforme NBR7008;
- b. Chapa de aço grau QCV.

De acordo com a norma ANSI, um produto linha branca para um certo mercado deve suportar uma força diagonal de 275lb (1.22 kN) aplicados de lado para lado, sendo que a estrutura não poderá exceder uma deflexão de 0.1 in (2.5mm) na direção plana do componente horizontal da força diagonal.



Figura 3 - Disposição para o teste de carga diagonal

A aplicação da força diagonal deve ocorrer na porção mais elevada e na parte mais inferior da estrutura do eletrodoméstico formando uma diagonal conforme mostrado na Figura 3.

Em uma aplicação prática da norma utilizam-se relógios comparadores para se obter a leitura dimensional das deflexões conforme mostrado na Figura 4. No caso do estudo deste trabalho foi realizada essa avaliação por simulação numérica.

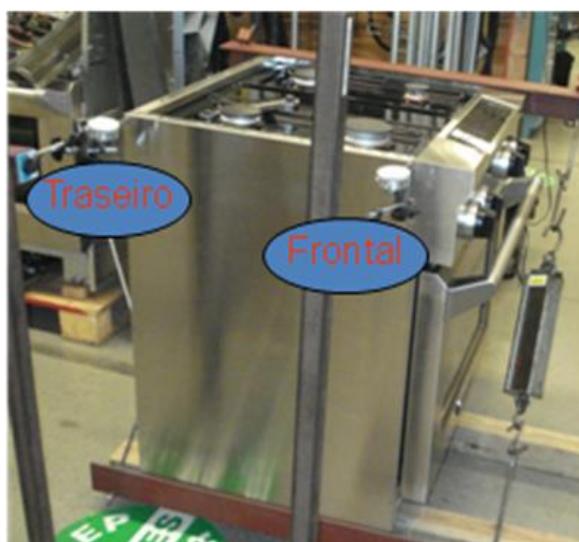


Figura 4 - Medição da Deflexão Frontal e Traseira após o teste de carga diagonal

¹ Todas as figuras e Tabelas sem Indicação Explícita da Fonte foram Produzidas pelo Autor da Dissertação.

3.1 COMPONENTES DA ESTRUTURA

As Figuras 5 e 6 ilustram os componentes da estrutura estudada.

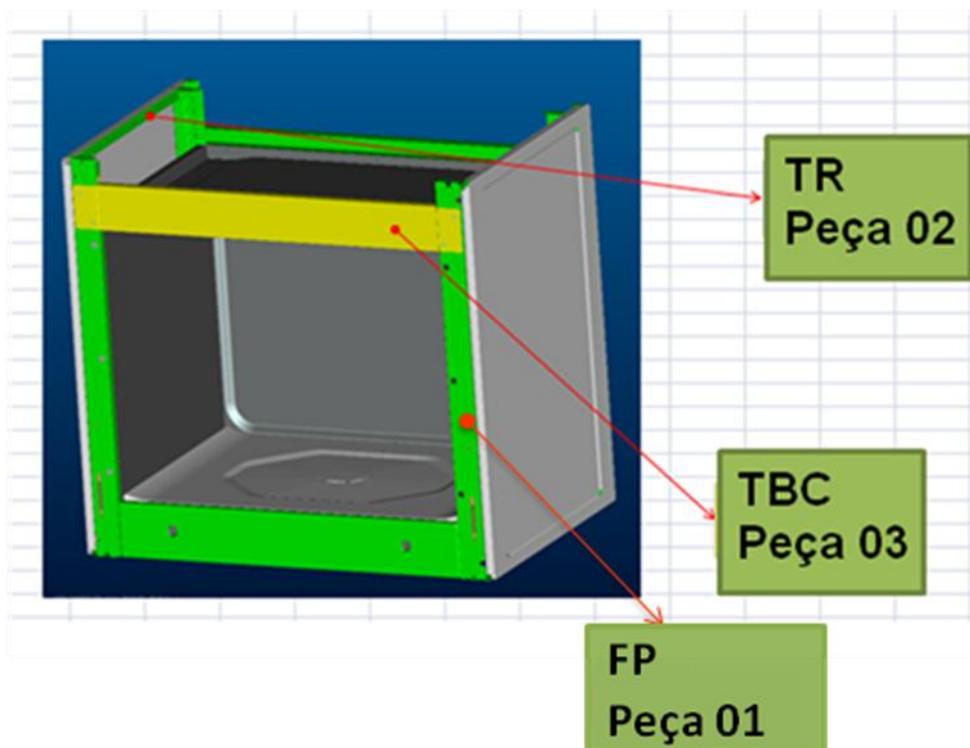


Figura 5 - Componentes (partes) 1, 2 e 3 da estrutura

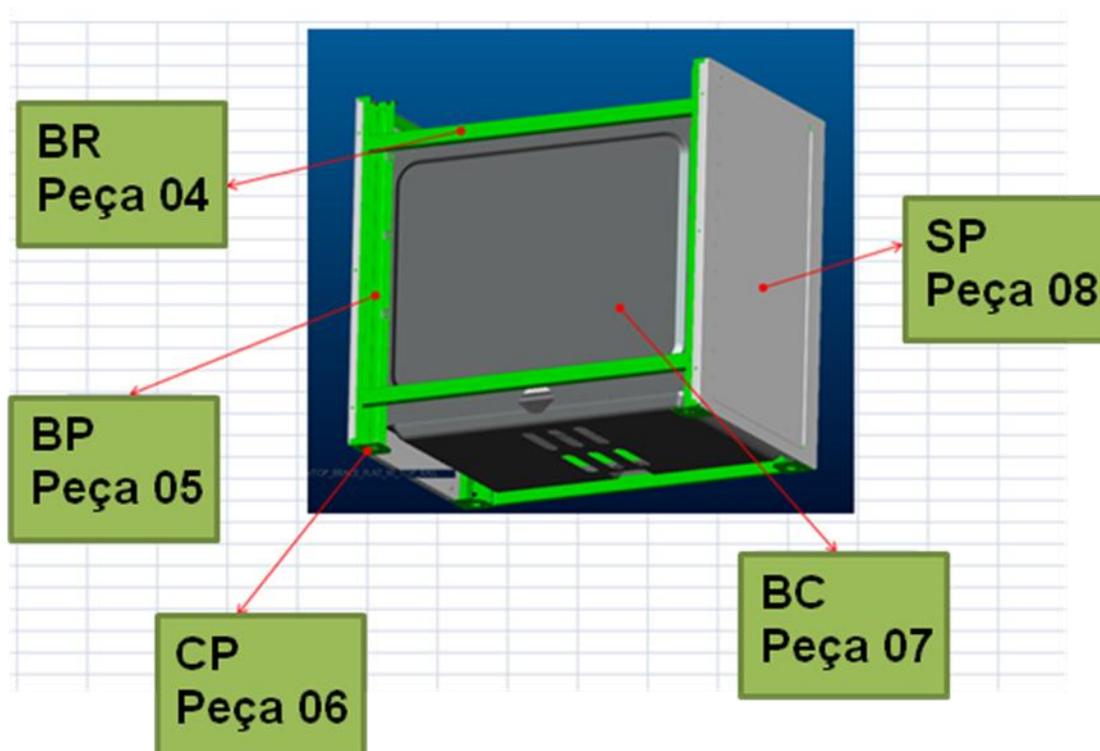


Figura 6 - Componentes (partes) 4, 5, 6, 7 e 8 da estrutura

A estrutura do produto é formada por oito peças, sendo que seis peças foram analisadas conforme a constituição de espessuras de chapa mínima e máxima conforme disponibilidade no mercado de aço/chaparia mostrada na Tabela 1. As outras duas peças foram analisadas conforme a utilização na estrutura.

Tabela 1 - Valores das espessuras utilizadas nas peças

	MÁXIMO	MÍNIMO
	+	-
BC	0.61	0.45
CP	1.14	0.75
FP	1.21	0.75
SP	0.61	0.45
TBC	COM	SEM
BP	1.14	0.75
BR	0.584	0.45
TR	COM	SEM

3.2 SEQUÊNCIA PARA APLICAÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS

Com base nos conceitos teóricos do Método dos Elementos Finitos e na Análise de Engenharia do problema prático que se quer resolver, poder-se iniciar o planejamento do trabalho. Lembrando que os recursos computacionais disponíveis no CAE só poderão auxiliá-lo a partir da definição clara do problema a resolver. Assim, deve-se estabelecer uma sequencia básica de etapas para aplicação do método dos elementos finitos, como indica o esquema, Figura 7:

- a. Pré-Processamento: em que antes de qualquer cálculo a ser efetuado pelo computador, deve-se montar o modelo discretizado da estrutura e, neste, aplicar as condições de contorno e o carregamento;

- b. Processamento: em que são efetuados os cálculos matriciais, para determinação de deslocamentos, reações de apoio e forças internas nos elementos;
- c. Pós-processamento: em que são interpretados os resultados numéricos dos cálculos efetuados e a sua coerência com o problema físico estudado.

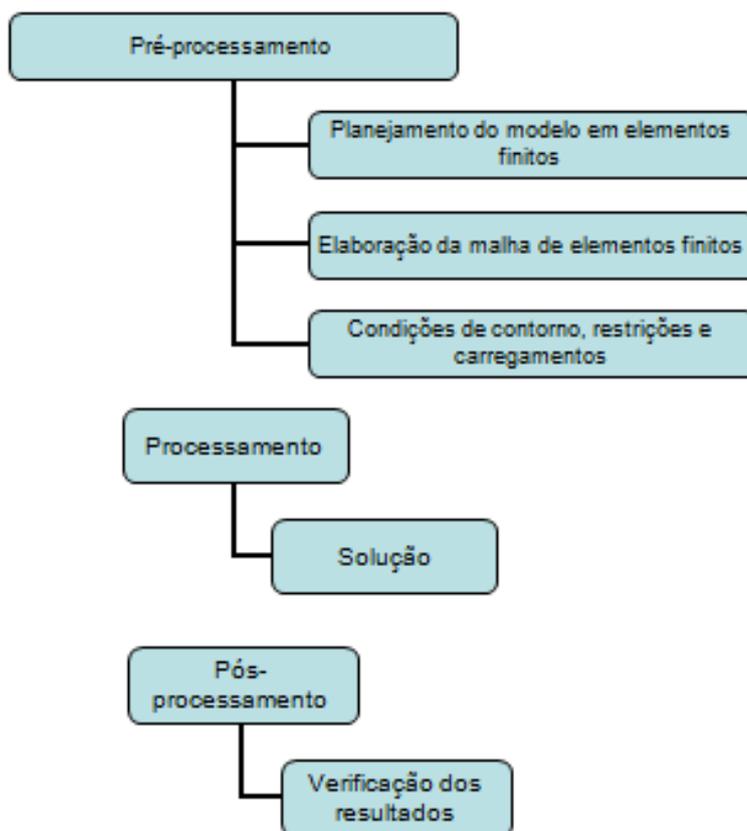


Figura 7 - Sequência básica de etapas para aplicação do método dos elementos finitos.

Em relação às tarefas anteriormente mencionadas, é interessante destacar a evolução do uso das ferramentas gráficas que acompanham os recursos de cálculo disponíveis, isto é, a importância destas no sentido de facilitar o trabalho de execução da malha em elementos finitos (ALVES, 2006).

Antes da existência das chamadas “interfaces gráficas”, a geração da malha em elementos finitos era um processo bastante trabalhoso. O engenheiro preparava no papel o desenho do modelo estrutural. Após todos os nós e elementos serem desenhados e numerados manualmente, as forças aplicadas serem definidas com as respectivas regiões de aplicação, e os pontos de vinculação representados no

modelo, preparava-se em “deck” de Cartões de Computador que constituía a entrada de dados no Programa. Os nós eram definidos por intermédio da entrada direta das suas coordenadas x, y, z. A entrada dos elementos também era manual, e assim por diante. Para geometrias complicadas era um processo extremamente exaustivo (ALVES, 2006).

Entretanto, conceitualmente, os requisitos para preparar a malha de elementos finitos não mudaram. Deve-se entender o problema físico que se pretende simular. Em seguida, de posse da biblioteca de elementos do programa em elementos finitos, deve-se escolher trecho a trecho do modelo, os melhores elementos que traduzem o comportamento real naquela região. Assim, será estabelecida a correspondência entre o fato real e o modelo de análise, região por região (ALVES, 2006).

Hoje as ferramentas de análise vêm acompanhadas de poderosas ferramentas gráficas que permitem diminuir muito os trabalhos de geração do modelo. Aproveitando a geometria preparada anteriormente, ela é usada como referência para a construção da malha em elementos finitos.

Assim, nós, elementos, condições de contorno podem ser gerados “automaticamente”. Porém, pode-se dizer que esse processo automático depende sempre do engenheiro de análise.

Hipóteses mal formuladas pelo analista ao gerar uma malha “automaticamente” gerarão um erro muito mais rápido que o erro manual. Portanto, o recurso gráfico disponível reduziu enormemente o trabalho de “transpiração” do engenheiro, mas não a “inspiração”, que depende do embasamento conceitual no qual devem se apoiar os trabalhos com a ferramenta de simulação (ALVES, 2006).

3.3 DETALHES DA ANÁLISE

Os detalhes da análise são mostrados nas Figuras 8 e 9 e as propriedades mecânicas do aço utilizado foram: Modulo de Elasticidade de 210 (GPa) e Coeficiente de Poison de 0,3:

- a. A porta da estrutura não foi considerada para a análise;
- b. A junção entre as peças definida como: conexões rígidas e travessas;

c. As espessuras das peças foram consideradas conforme Tabela 1.

3.4 MODELAMENTO POR ELEMENTOS FINITOS

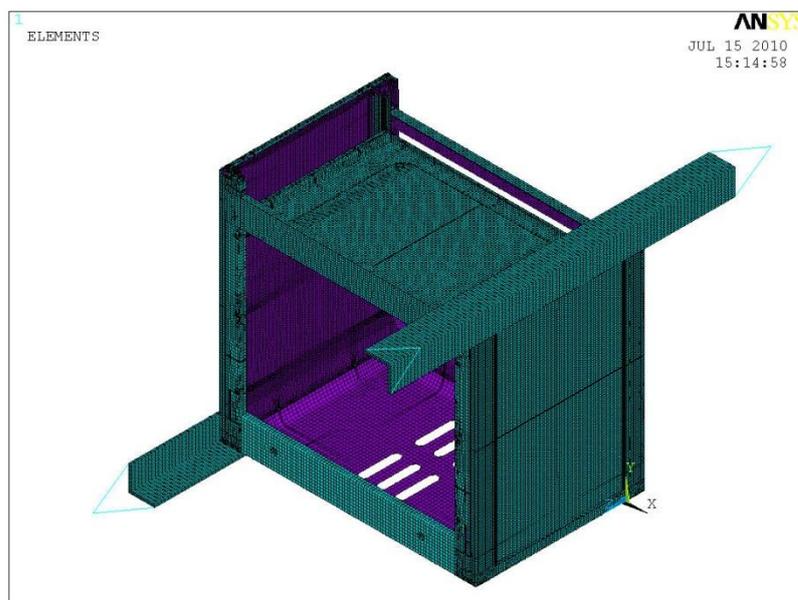


Figura 8 - Modelamento por Elementos Finitos – Sequência 01

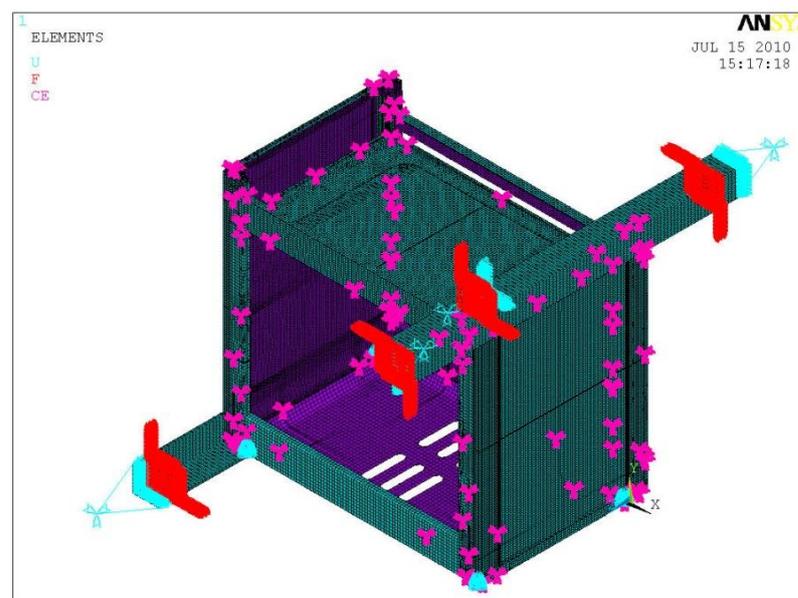


Figura 9 - Modelamento por Elementos Finitos – Sequência 02

Os valores para serem analisados foram obtidos da simulação numérica conforme Figura 10, ou seja, os valores de deflexão devem ser analisados no ponto mais alto do produto e nas extremidades do mesmo.

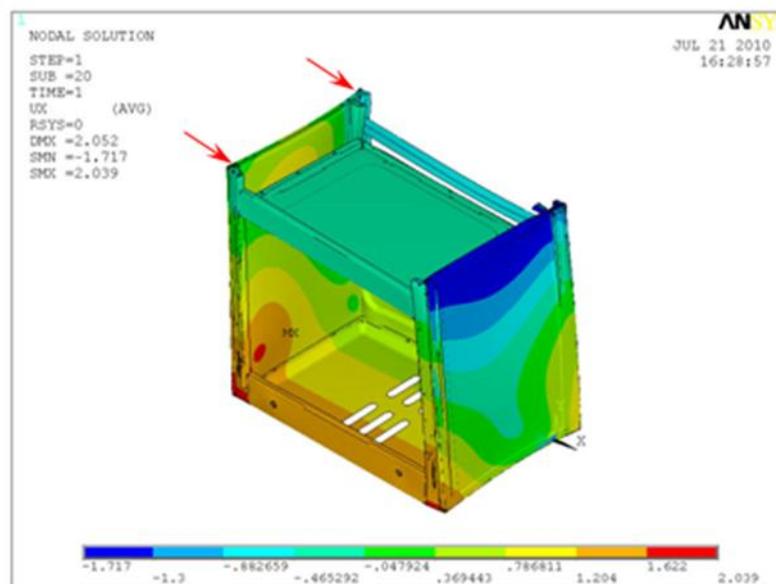


Figura 10 - Leitura da Deflexão do Produto

Foram produzidas 16 simulações com configurações diferentes, sendo cada configuração construída conforme o diagrama de relacionamento dos fatores (Figura 11), o FRD, sigla do inglês *Factor Relationship Diagram*.

Para realizar as simulações foram empregadas diferentes configurações de estruturas no modelo. Foram variadas as espessuras dos componentes que compõem a estrutura e dois componentes variaram a presença na estrutura conforme Tabela 1.

Foram analisados oito fatores (peças) em dois níveis (+ e -). Dessa forma, serão realizados experimentos de ordem padrão 2^n , ou seja, $2^8_{FULL} = 256$ tratamentos, Tabela 2.

As limitações de um experimento fatorial completo não estão na teoria, mas na prática. Os recursos como tempo e custo necessários para executar experimentos fatoriais completos podem ser significativos. Fatoriais completos podem ser usados quando se investiga um número pequeno de fatores (2-4), mas não são recomendados quando se investiga um grande número de fatores (5 ou mais). O número de rodadas necessárias aumenta exponencialmente com o número de fatores. Portanto, o tempo e os custos envolvidos para se executar um

experimento o tornam proibitivo. Isto não significa que os fatoriais completos não sejam úteis, mas que eles devem ser usados no tempo certo.

Tabela 2 - Valores para Fatorial Completo

Fatorial completo			
Fatores	Níveis	Símbolo	Nº Runs
2	2	2^2	4
3	2	2^3	8
5	2	2^5	32
7	2	2^7	128
15	2	2^{15}	32768
2	3	3^2	9
3	3	3^3	27
7	3	3^7	2187

O fatorial fracionado analisa somente uma fração de todas as combinações possíveis contidas em um fatorial completo. Útil para determinar em qual direção seguir e priorização de fatores. O fatorial fracionado foi o que aumentou significativamente o uso dos experimentos no mundo. Os recursos necessários para completar um fatorial fracionado são administráveis e abre-se mão de pouca informação, sendo o sucesso da aplicação de experimentos fatoriais fracionados já documentados inúmeras vezes. Aplicando-se este fator fracionado no experimento com resolução IV tem-se: $2^{8-4}_{IV} = 16$ tratamentos.

Resolução é a capacidade de um experimento aprender sobre interações entre fatores. Pode-se citar algumas resoluções com suas interações:

- a. Resolução III: (Interação de fatores de 2º ordem confundidos com o efeito principal, $2a = 1a$);
- b. Resolução IV: (Interação de fatores de 3º ordem confundidos com o efeito principal, $3a = 1a$ e interações de 2º ordem confundidos com 2º ordem, $2a = 2a$).

Tabela 3 - Valores para Fatores com Resolução

		TABELA DE FATORES DISPONÍVEIS COM RESOLUÇÃO													
		Factors													
Runs	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
4	Full	II													
8		Full	IV	II	II	II									
16			Full	V	IV	IV	IV	II							
32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	
64					Full	VII	V	IV							
128						Full	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV	

A Tabela 3 mostra na linha horizontal os números de fatores disponíveis, na linha vertical o número de tratamentos disponíveis e quando cruza-se as informações das linhas obtêm-se a resolução do experimento.

Definida a quantidade de tratamentos (*runs*) que deve-se medir, monta-se o FRD. O FRD, Figura 11, é uma ferramenta gráfica esquemática que retrata as relações entre as potenciais fontes de variação em um DOE, os quais serão mostrados na Tabela 4.

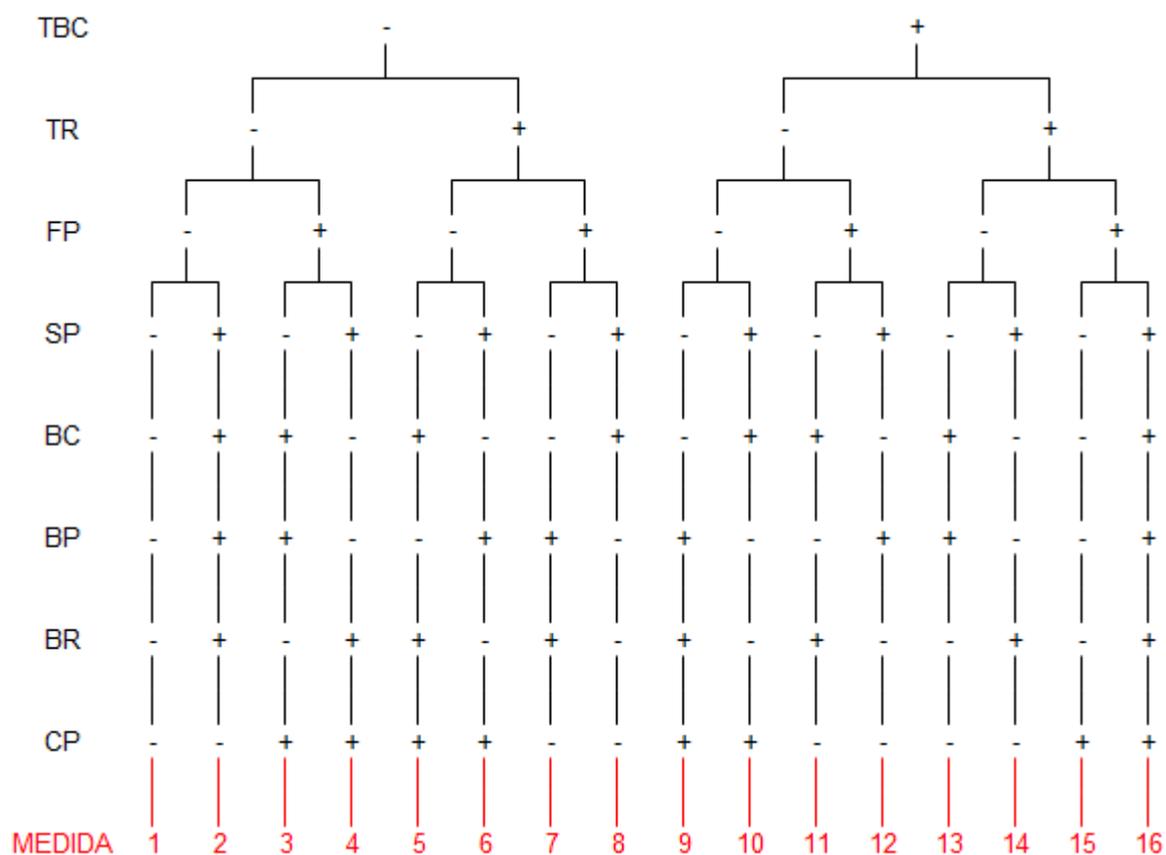


Figura 11 - Diagrama de Relacionamento dos Fatores

Com a interação dos fatores através da árvore de amostragem no FRD da Figura 11 monta-se a tabela com os valores de máximo e mínimo para gerar a simulação.

Tabela 4 - Valores de Máximo e Mínimo

	MÁXIMO	MÍNIMO
	+	-
BC	0.61	0.45
CP	1.14	0.75
FP	1.21	0.75
SP	0.61	0.45
TBC	COM	SEM
BP	1.14	0.75
BR	0.584	0.45
TR	COM	SEM

O código usado para este experimento foi “-“ = nível baixo de um fator e “+” = nível alto de um fator. Usar a designação + / - será útil no entendimento de como os experimentos são gerados.

Tabela 5 - Valores de Máximo e Mínimo para as Dezesesseis Simulações (*Runs*)

Side to Side Compression			Fatores Geometricos		Fatores Espessura					
FRD	Simulação	Sequência	TBC	TR	FP	SP	BC	BP	BR	CP
-----	1	16	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
----++++-	2	15	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1
---+---++	3	14	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1
--++--++	4	13	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
-+---+---++	5	12	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1
-++-+-+--	6	11	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
-+++--++-	7	10	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
-++++----	8	9	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1
+-----+++	9	8	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
+---++---+	10	7	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
+--+-+---	11	6	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
+---+-+---	12	5	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
++--++---	13	4	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
++-+---+-	14	3	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1
+++-----+	15	2	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1
+++++++	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Com as 16 configurações definidas no FRD, foram rodadas as simulações com a disposição dos fatores em condições de máximo(+1) ou mínimo(-1) conforme Tabela 5.

Sabe-se o valor das deflexões em cada configuração. O próximo passo é descobrir quais são os fatores que realmente são relevantes para esse experimento. Através do *software Jump* foi produzida uma matriz de confundimento para saber o que realmente está causando efeito sobre o experimento.

Confundimento (ou *Aliases*) é a combinação dos efeitos de dois ou mais fatores em um resultado, de forma que a magnitude dos efeitos sobre os fatores individuais não podem ser separados. A Figura 12 mostra os fatores e graus de liberdade. Como os experimentos têm quinze graus de liberdade (Graus de liberdade = tratamentos ou rodadas (16) – 1).

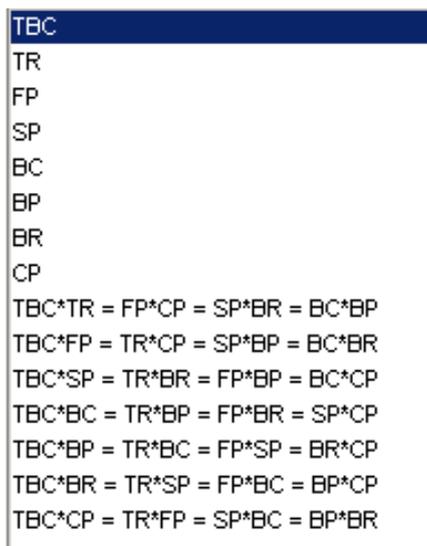


Figura 12 - Fatores com 15 graus de liberdade

Esses quinze graus (ordem sequencial de quinze fatores) são mostrados na figura citada acima, onde percebe-se quais são os mais significantes, na ordem de cima para baixo, para os resultados de otimização da estrutura e que os fatores puros são ainda mais relevantes do que os que apresentam confundimentos. Sendo assim através da figura pode-se concluir que os fatores com confundimento tem participação irrelevante comparado aos de resultados de natureza pura, ou seja, componentes sem interação.

Após esta análise, pode-se seguir adiante de modo a esclarecer os resultados na próxima seção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após as 16 rodadas de simulações têm-se os valores para as deflexões frontal, traseira e média conforme Tabela 6. O Apêndice A, ilustra os detalhes das 16 simulações numéricas e respectivas deflexões da estrutura.

Tabela 6 - Valores de Deflexão

Tratamento	Sequência	Y1 (Deflexão Frontal) mm	Y2 (Deflexão Traseira) mm	Média
1	16	0.4688	0.2155	0.34215
2	15	0.2444	0.05814	0.15127
3	14	0.20243	0.0088	0.105615
4	13	0.35675	0.05161	0.20418
5	12	0.37321	0.3478	0.360505
6	11	0.21787	0.19317	0.20552
7	10	0.29282	0.1156	0.20421
8	9	0.42025	0.1066	0.26344
9	8	0.14071	0.57233	0.35652
10	7	0.22104	0.86554	0.54329
11	6	0.23987	0.41516	0.327515
12	5	0.16483	0.26594	0.215385
13	4	0.1606	0.52058	0.34059
14	3	0.29047	0.83739	0.56393
15	2	0.2518	0.44271	0.347255
16	1	0.15466	0.24486	0.19976

Fazendo a análise dos fatores separados, começando com a deflexão frontal, em seguida a deflexão traseira e por último a deflexão média, é possível visualizar quais fatores são realmente relevantes para o experimento através dos gráficos de Gráfico de Probabilidade Normal (*Normal Plot*) e de Pareto extraídos do *software Jump*.

O Gráfico de Probabilidade Normal (*Normal Plot*), determina os efeitos significativos (inesperados). Espera-se que os efeitos plotados em um gráfico de Probabilidade Normal apareçam numa linha reta. Os efeitos que desviam da linha reta, são considerados inesperados. Efeitos inesperados significam que o resultado

criado pelo fator em um nível é de uma população diferente do resultado criado em outro nível.

O Gráfico de Pareto, Figura 13, determina a importância relativa das informações (fatores) para fixar as prioridades de estudo. É utilizado para priorizar ou para se escolher um ponto de partida para solução de um problema.

Esta ferramenta tem sua funcionalidade gerada através de um gráfico de barras que identifica as frequências dos registros ou ocorrências em um processo, de maior para menor, permitindo a priorização no que diz respeito sobre ações.

Podemos através do diagrama de Pareto filtrar os problemas menores dos maiores, onde é claro as falhas maiores necessitam de ações mais dinâmicas e urgentes, os problemas ou falhas menores necessitam de ações por igual, mas quando podemos visualizar o grau de importância de cada falha sempre devemos originar a ação sobre a mais crítica.

O gráfico de Pareto acima ordena os fatores por significância destes para a região traseira da estrutura, quantifica os efeitos dos fatores (principais e interações). Através destes valores do gráfico pode-se perceber que os três primeiros valores são os mais significativos para o experimento, ou seja, 88,7% da variação do experimento é devido aos fatores TBC, FP, BP. Desta forma, pode-se desconsiderar os outros fatores por serem de certa forma desprezíveis para o resultado.

Por exemplo, a leitura que a peça TBC apresenta é 0,19mm (metade, multiplica-se por 2), ou seja, 0,38mm desse componente atuam sobre o resultado final da deflexão, da mesma maneira 0,24mm atuam em FP e 0,16mm para BP. A leitura dos sinais significa lados contrários de deflexão.

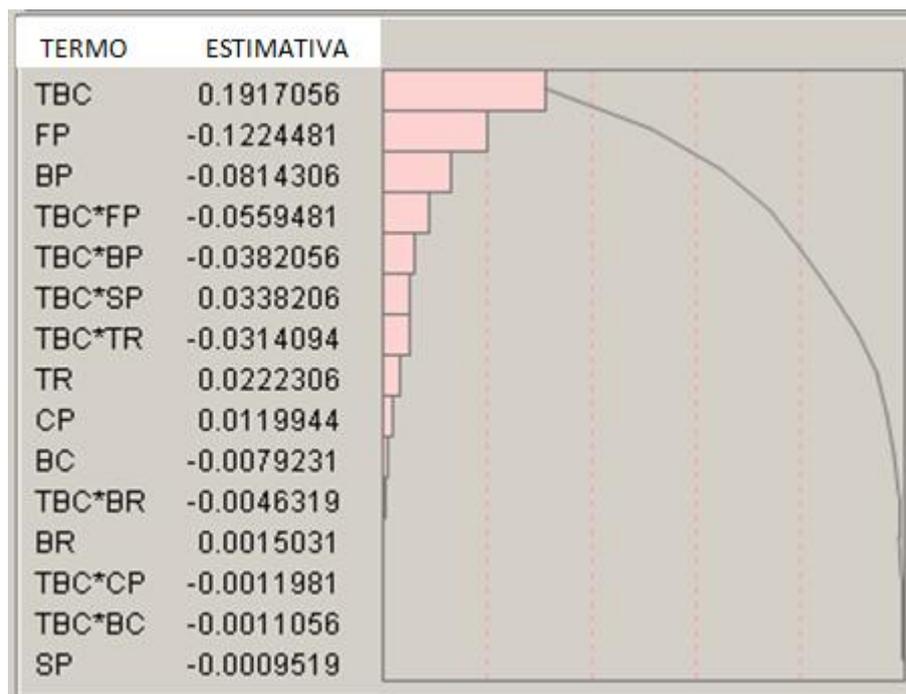


Figura 13 - Estimativas no Gráfico de Pareto - Região Traseira

A Figura 14 mostra o gráfico de Probabilidade Normal, que confirma os dados do Gráfico de Pareto, apontando quais componentes são relevantes para o experimento. Quanto mais distante da reta azul (normalização dos componentes em estudo), mais significativo ele é para a deflexão traseira da estrutura em estudo. Os pontos no gráfico representam os componentes da estrutura e, também, os graus de liberdade do estudo, (no caso, 15).

No caso do gráfico da Figura 14 pode-se perceber que os componentes TBC, BP e FP são os mais afastados da curva normalizada. Desta forma, pode-se afirmar a significância destes fatores para a deflexão da parte traseira da estrutura em estudo.

Fazendo-se a mesma análise para a região frontal, tem-se os seguintes resultados:

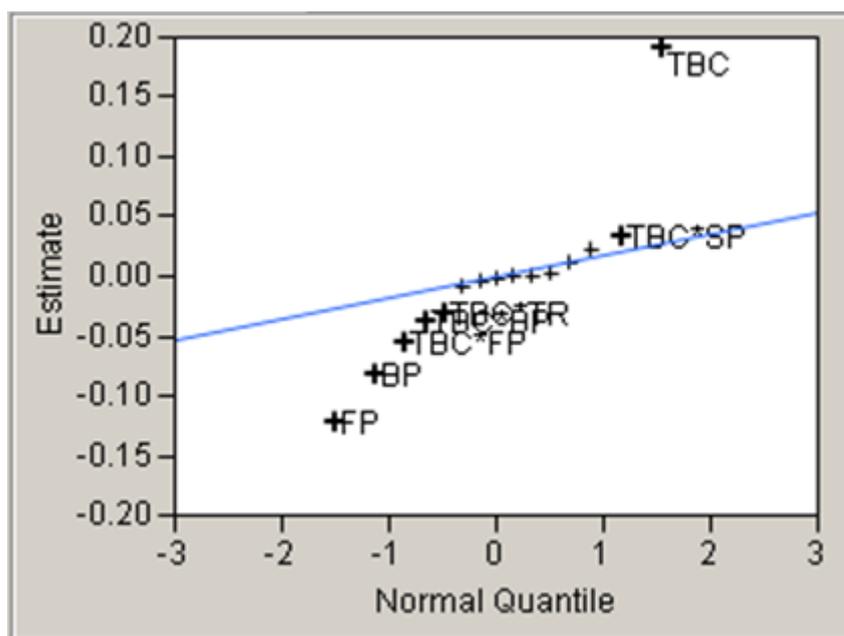


Figura 14 - Gráfico de Probabilidade Normal - Região Traseira

A Figura 15 mostra o gráfico de Pareto que ordena os fatores por significância destes para a região frontal da estrutura e quantifica os efeitos dos fatores (principais e interações). Através destes valores do gráfico pode-se perceber que os três primeiros valores são os mais significativos para o experimento, ou seja, 91,8% da variação do experimento é devido aos fatores BP, TBC e CP. Desta forma, desconsidera-se os outros fatores por serem de certa forma desprezíveis para o resultado.

Por exemplo, a leitura que a peça BP apresenta é 0,06mm (metade, multiplica-se por 2), ou seja, 0,12mm desse componente atuam sobre o resultado final da deflexão, da mesma maneira 0,1mm atuam em TBC e 0,04mm para CP. A leitura dos sinais significa lados contrários de deflexão.

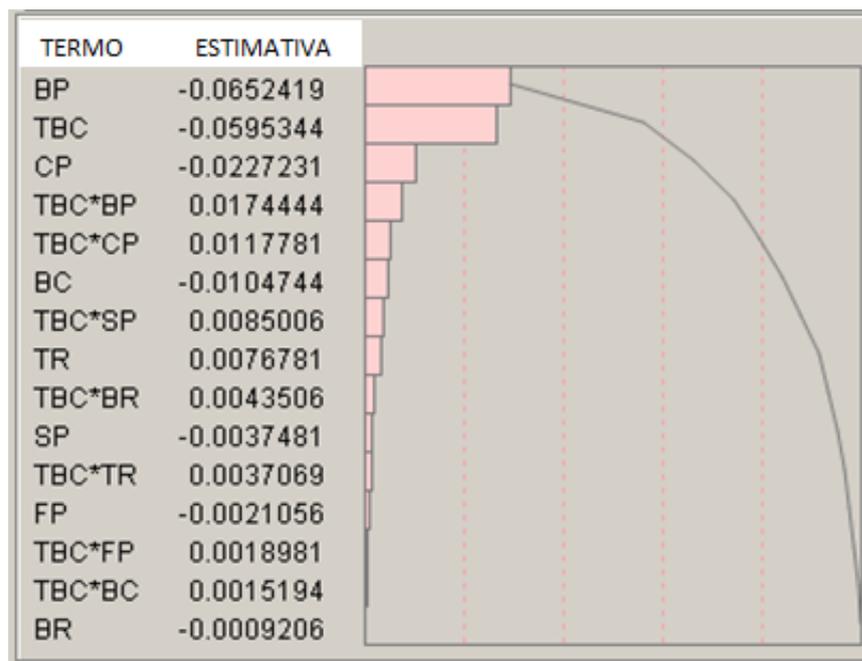


Figura 15 - Estimativas do Gráfico de Pareto - Região Frontal

A Figura 16 ilustra o gráfico de Probabilidade Normal que confirma os dados do Gráfico de Pareto apontando quais componentes são relevantes para o experimento. Quanto mais distante da reta azul (normalização dos componentes em estudo), mais significativo ele é para a deflexão frontal da estrutura em estudo. Os pontos no gráfico representam os componentes da estrutura e também os graus de liberdade do estudo, (no caso, 15).

No caso do gráfico da Figura 16 pode-se perceber que os componentes TBC, BP e CP são os mais afastados da curva normalizada. Desta forma pode-se afirmar a significância destes fatores para a deflexão da parte traseira da estrutura em estudo.

Fazendo-se a mesma análise para a média entre as deflexões frontais e traseiras, tem-se os seguintes resultados:

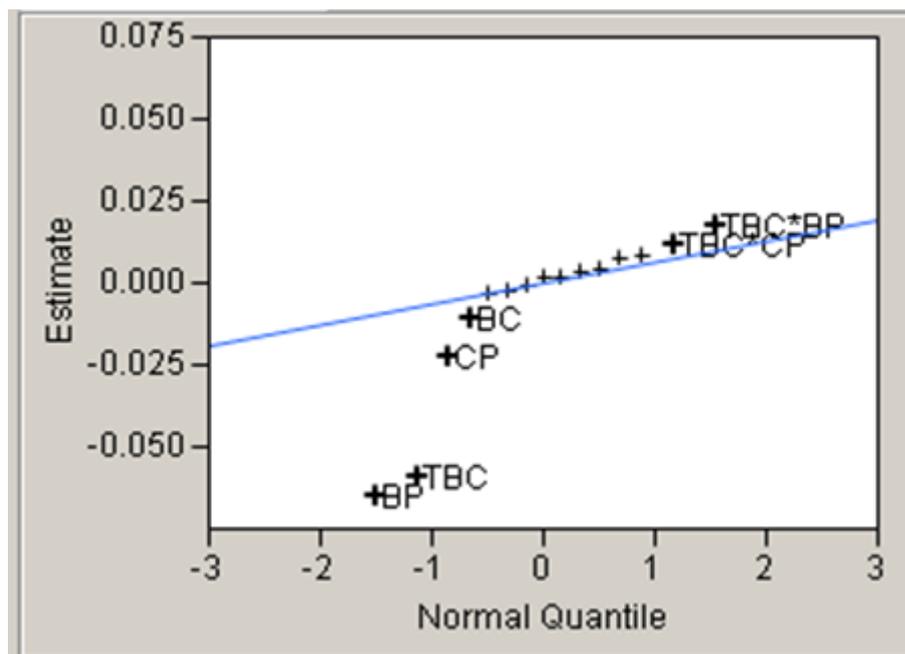


Figura 16 - Gráfico de Probabilidade Normal - Região Frontal

A Figura 17 mostra o gráfico de Pareto que ordena os fatores por significância destes para a média da região frontal e traseira da estrutura, quantifica os efeitos dos fatores (principais e interações). Através destes valores do gráfico pode-se perceber que os três primeiros valores são os mais significativos para o experimento, ou seja, 88,1% da variação do experimento é devido aos fatores BP, TBC e FP. Desta forma, pode-se desconsiderar os outros fatores por serem de certa forma desprezíveis para o resultado.

Por exemplo, a leitura que a peça BP apresenta é 0,07mm (metade, multiplica-se por 2), ou seja, 0,14mm desse componente atuam sobre o resultado final médio da deflexão, da mesma maneira 0,12mm atuam em TBC e 0,12mm para FP. A leitura dos sinais significa lados contrários de deflexão.



Figura 17 - Estimativa do Gráfico de Pareto – Média (Frontal+Traseiro)

No gráfico de Probabilidade Normal, Figura 18, os fatores que mais se afastam da linha de normalização (reta azul) são os fatores significativos, ou seja, são os valores que não acompanham uma tendência, se diferem da média. Este, confirma os dados do Gráfico de Pareto apontando quais componentes são relevantes para o experimento. Os pontos no gráfico representam os componentes da estrutura e também os graus de liberdade do estudo, (no caso, 15).

No caso do gráfico da Figura 18 pode-se perceber que os componentes TBC, BP e FP são os mais afastados da curva normalizada. Desta forma, pode-se afirmar a significância destes fatores para a deflexão média da parte traseira e frontal da estrutura em estudo.

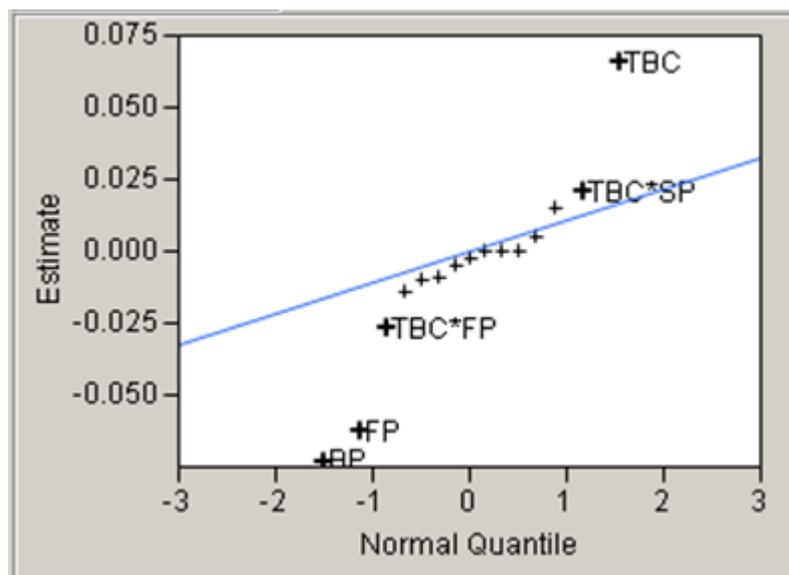


Figura 18 - Gráfico de Probabilidade Normal - Média (Frontal+Traseiro)

Alguns fatores de interação apareceram nos gráficos de Pareto e de probabilidades. Eles são analisados na matriz de confundimento, Figura 19. Porém, essas interações, fisicamente são insignificantes para o resultado do experimento, pois são componentes que não tem interação física na estrutura, ou seja, não dependem um do outro.

Aliasing of Effects	
Effects	Aliases
TBC*TR	= FP*CP = SP*BR = BC*BP
TBC*FP	= TR*CP = SP*BP = BC*BR
TBC*SP	= TR*BR = FP*BP = BC*CP
TBC*BC	= TR*BP = FP*BR = SP*CP
TBC*BP	= TR*BC = FP*SP = BR*CP
TBC*BR	= TR*SP = FP*BC = BP*CP
TBC*CP	= TR*FP = SP*BC = BP*BR

Figura 19 - Matriz de Confundimento

Após a análise de todos os gráficos e dados estudados, chega-se aos quatro fatores mais significativos para o experimento, que podem ser observados no gráfico da Figura 20, em que o *software Jump* mostra todos os oito fatores, sendo que os fatores que não se aproximam de uma linha paralela, os mais significativos para o experimento. Esse gráfico é apenas uma comprovação do que já foi mostrado nos gráficos anteriores de Probabilidade Normal e de Pareto.

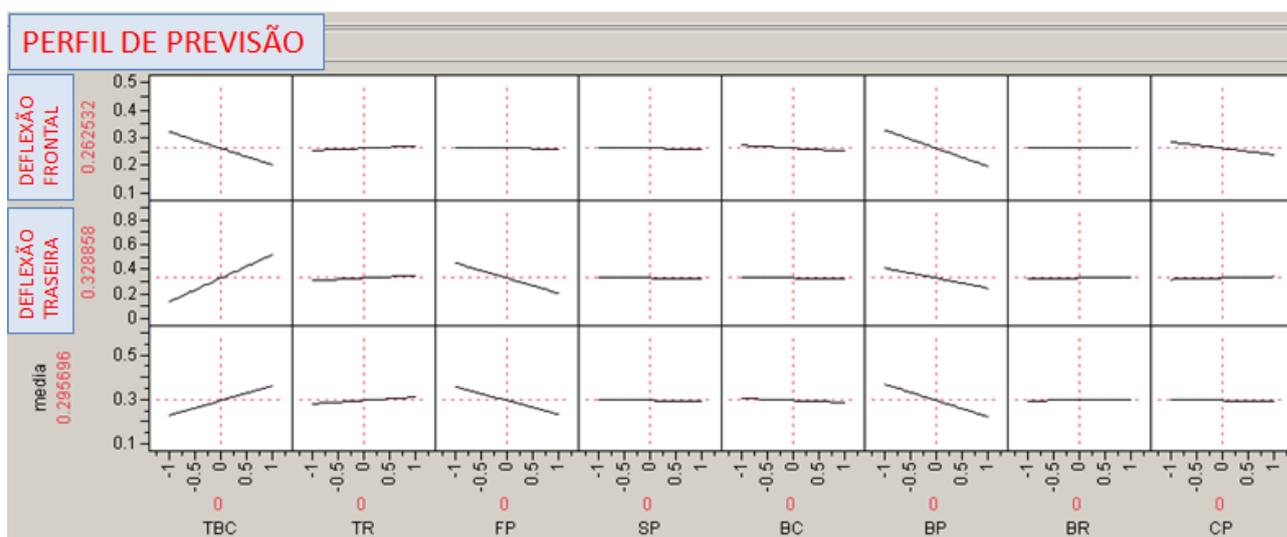


Figura 20 - Gráfico de Perfil de Previsão

Analisando-se todos os fatores no *software Jump*, pode-se convertê-los numa equação, a qual chamamos equação para redução de espessura de uma estrutura de oito componentes, baseada na deflexão de valores especificados em norma.

$$\text{Deflexão (frontal)} = 0,263 + (-0,065 \cdot BP) + (-0,059 \cdot TBC) + (-0,023 \cdot CP)$$

(1)

Onde: o valor 0,263 é a média da deflexão frontal e os valores à frente de cada componente corresponde ao valor da deflexão na região frontal no respectivo componente. Esses componentes utilizados na fórmula são os significativos exemplificados nos gráficos de Pareto e de probabilidade e que correspondem a 91,8% das variações do experimento naquela região.

$$\text{Deflexão (traseira)} = 0,328 + (0,192 \cdot \text{TBC}) + (-0,122 \cdot \text{FP}) + (-0,081 \cdot \text{BP})$$

(2)

Onde: o valor 0,328 é a média da deflexão traseira e os valores a frente de cada componente corresponde ao valor da deflexão na região traseira no respectivo componente. Esses componentes utilizados na fórmula são os significativos exemplificados nos gráficos de pareto e de probabilidade e que correspondem a 88,7% das variações do experimento naquela região.

$$\text{Deflexão (média)} = 0,297 + (-0,073 \cdot \text{BP}) + (0,066 \cdot \text{TBC}) + (-0,062 \cdot \text{FP})$$

(3)

Onde: o valor 0,297 é a média da deflexão e os valores a frente de cada componente corresponde ao valor da deflexão média no respectivo componente. Esses componentes utilizados na fórmula são os significativos exemplificados nos gráficos de pareto e de probabilidade e que correspondem a 88,1% das variações do experimento na estrutura do produto.

Finalmente, pode-se reescrever a equação como:

$$\text{Deflexão} = A0_{\text{média}} + (A1X1) + (A2X2) + (A3X3) \dots,$$

(4)

Onde :

$A0$ = Coeficiente de efeito (média das entradas);

Ai = Efeito/2 (coeficiente angular da reta);

X 's = Fator Significante(nível)

Tem-se uma metodologia que gerou uma equação para otimização de uma estrutura de linha branca, porém deve-se fazer uma comparação prática para se ter uma porcentagem de erro na equação para que se possa atingir o menor ruído possível no experimento.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou como o planejamento de experimento e as escolhas dos fatores a serem testados foram importantes para solução do problema.

É importante salientar que usando a estatística para combinação dos fatores, sempre irá resultar no ganho de tempo em relação ao entendimento dos fatores, podendo assim ser modificados, sempre buscando um melhor resultado. Através dos dados o trabalho apresentado comprova que a ferramenta é eficiente, aplicado com as metodologias corretas, e também evitando o máximo de ruído no experimento.

Ao final do trabalho chegou-se a uma metodologia para otimização de redução de espessuras de componentes de uma estrutura de um produto linha branca, conforme proposto nos objetivos iniciais deste trabalho.

O trabalho deixa uma proposta de procedimento para avaliar possíveis reduções de espessura em estruturas da linha branca.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos futuros apresentadas ao longo deste trabalho podem ser resumidas nas seguintes propostas:

- a. Conduzir experiências práticas com a metodologia apresentada para reduzir espessuras de componentes de uma estrutura;
- b. Fazer correlações da equação com diferentes estruturas;
- c. Detalhar mais a questão da análise dos fatores combinados;
- d. Analisar e pesquisar os tipos de ruído em um projeto de experimento, para que o ruído possa ser controlável, ou medido;
- e. Mapa de processo e produto como ferramentas auxiliares no conhecimento, para que se possa entender o que está se buscando antes de iniciar o experimento, e deixar muito bem claro que problemas serão solucionados.

REFERÊNCIAS

- ACHT, C.; Lu"bben T.; Hoffmann F.; Zoch H.-W. **Simulation of the Influence of Carbon Profile and Dimensions on Distortion Behaviour of SAE 5120 Discs by Using a Design of Experiment**. Computational Materials Science, 39, 527–532, 2007.
- ALVES F. A. **Elementos Finitos, A Base da Tecnologia CAE**, 4° ed. São Paulo: Editora Érica, 2006.
- ANSI – American National Standards Institute.
- ANSYS/CAE, - **User's Manual**, Version 10
- BIHAMTA, R.; BUI Q.H.; GUILLOT M.; D'AMOURS G.; RAHEM A., FAFARD M. - **Application of a New Procedure for the Optimization of Variable Thickness Drawing of Aluminium Tubes**. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2012.03.006>
- BRADLEY J.; JOHN S. J. M. P. **Statistical Discovery Software**. WIREs Comp Stat, 3: 188-194. doi: 10.1002/wics.162, 2011.
- COSTA, C. E. S. **O DOE como Ferramenta da Qualidade para o Desenvolvimento de Produtos a Base de Solo Estabilizado com Rejeitos Industriais**. In: 17° Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP, Gramado - RS. Anais do 17° ENEGEP, 1997.
- DUCATTI, S. R. A. **Simulação Numérica do Processo de Solidificação de Placas Finas com Redução de Espessura com Núcleo Líquido**. Tese (doutorado). Universidade Estadual de Campinas, 2003.
- FRANCESCHINI, G.; MACCHIETTO, S. **Model-based design of experiments for parameter precision: State of the art** - Chemical Engineering Science, 2008. <http://www.elsevier.com/locate/ces>
- GOVIKA, A.; NILSSONA, L.; MOSHFEGHA, R. **Finite Element Simulation of the Manufacturing Process Chain of a Sheet Metal Assembly**. Journal of Materials Processing Technology, 2012, <http://www.elsevier.com/locate/jmatprotec>
- HOYLE, W. C.; SETLAK, F. R. **Tends and Needs in Can Stock: a Packaging Company's perspective**. Journal of Metals, Werrendale, v.48, n.11, p.33-36, 1996.
- KOC, M.; ALLEN T.; JIRATHERANAT S.; ALTAN T. **The Use of FEA and Design of Experiments to Establish Design Guidelines for Simple Hydroformed Parts**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 40 2249–2266, 2000.
- KYRATSI, P.; BILALIS, N.; ANTONIADIS, A. **CAD-based simulations and design of experiments for determining thrust force in drilling operations**. Computer-Aided Design 43 1879–1890, 2011.

LASHERAS, F. S.; VILÁN, J. A.; GARCÍA, P. J. N.; COZ, J. J. D. **The Use of Design of Experiments to Improve a Neural Network Model in Order to Predict the Thickness of the Chromium Layer in a Hard Chromium Plating Process.** Mathematical and Computer Modelling, 2010, <http://www.elsevier.com/locate/mcm>

MAEDER, G. **Lightweight Vehicle Design: Contribution to Fuel Savings.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10107/>.

MAMALIS, A. G.; MANOLAKOS, D. E.; BALDOUKAS, A. K. **Simulation of Sheet Metal Forming Using Explicit Finite Element Techniques: Effect of Material and Forming Characteristics Part 2. Deep-drawing of Square Cups.** Journal of Materials Processing Technology. v. 72, p. 110–116. 1997

MELO, T. M. F. **Amaciamentos Dinâmico e Estático de um Aço Multifásico com Adições de Nb e Ti Deformado a Quente por Torção.** Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.4, n.1 p. 24-29, jul.-set. 2007

RAGHAVAN K. S.; GARRISON W. M. **An Investigation of the Relative Effects of Thickness and Strength on the Formability of Steel Sheet.** Materials Science and Engineering A, 2010, <http://www.elsevier.com/locate/msea>

REIS, L. C.; LAS CASAS, E. B.; CETLIN, P. R.; MELO, T. M. F. **Estudo dos Parâmetros de Influência na Simulação Numérica de Estampagem.** Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.1, n.2 p. 34-37, out.-dez. 2004

ROCHA, M. R. **Estudo da Conformabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos 304n e 304h e Suas Correlações Com As Microestruturas Obtidas.** 135 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

ROCHA, M. R.; SILVA, C. A.; TAVARES, S. S. **Estudo Das Correlações entre a Conformabilidade de Chapas de Aço Austeníticos e suas Microestruturas.** 8º Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica. Cusco, 23 a 25 de Outubro de 2007.

SALVAGNI, R. B.; KAMINSKI, P. C. **Análise Estrutural pelo Método dos Elementos Finitos.** 2003. (Apostila do curso de Mestrado Profissional em Engenharia Automotiva) Escola politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

SHAW, J. R.; ZUIDEMA, B. K. **New High Strength Steels Automakers Reach Future Goals for Safety, Affordability, Fuel Efficiency and Environmental responsibility.** SAE Technical Paper, 2001-01-3041, 2001.

SHUAEIB, F.M.; HAMOUDA, A.M.S.; WONG, S.V.; RADIN UMAR, R.S.; MEGAT AHMED, M.M.H. **A New Motorcycle Helmet Liner Material: The Finite Element Simulation and Design of Experiment Optimization.** Materials and Design, 28 182–195, 2007.

SILVA, E. C. N. **Técnicas de Otimização Aplicadas no Projeto de Peças Mecânicas**. Revista Máquinas e Metais, São Paulo, 16 abr. 2002.

SIRIAM, S.; LANZI III, O. **Use of Response Surface Methodology for Prediction of Dent Resistance of Automotive Closure Panels**. SAE Technical Paper, 2004-01-0163, 2004.

Universidade do Aço - **Escolha de materiais e os ganhos trazidos pela redução de massa em veículos**. Disponível em:

http://www.steeluniversity.org/content/media/flash/applications/ulsac/carDoor_2.31.swf, acessado em 09/2011.

VILLAS BOAS, R. C. **Qualidade na formulação de misturas**. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1992. (Série Qualidade e Produtividade; 1)

WERKEMA, M.C.C.; AGUIAR, S. **Planejamento e Análise de Experimentos: Como Identificar e Avaliar as Principais Variáveis Influentes em um Processo**. Belo Horizonte, MG: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1996, V.8, 294p. (b)

APÊNDICE A

5.3 DOE – 01

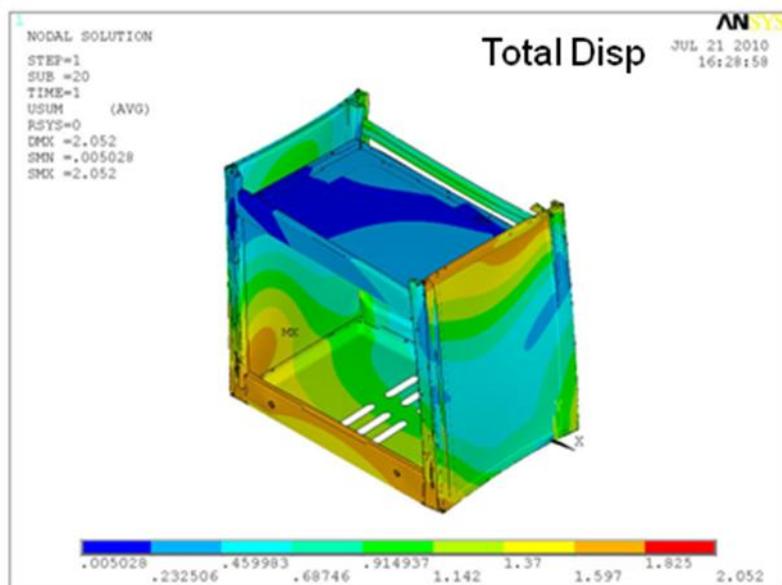
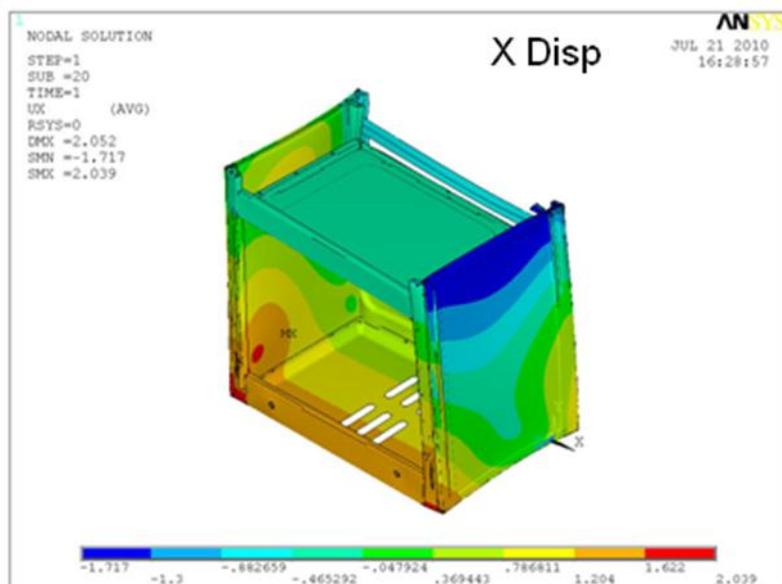


Figura 21 - Simulação 01 – (RUN ORDER 01)

Tabela 7 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 01

DEFLEXÃO FRONTAL	DEFLEXÃO TRASEIRA	DEFLEXÃO MÉDIA
-0,15466	0,24486	0,1997

5.4 DOE – 02

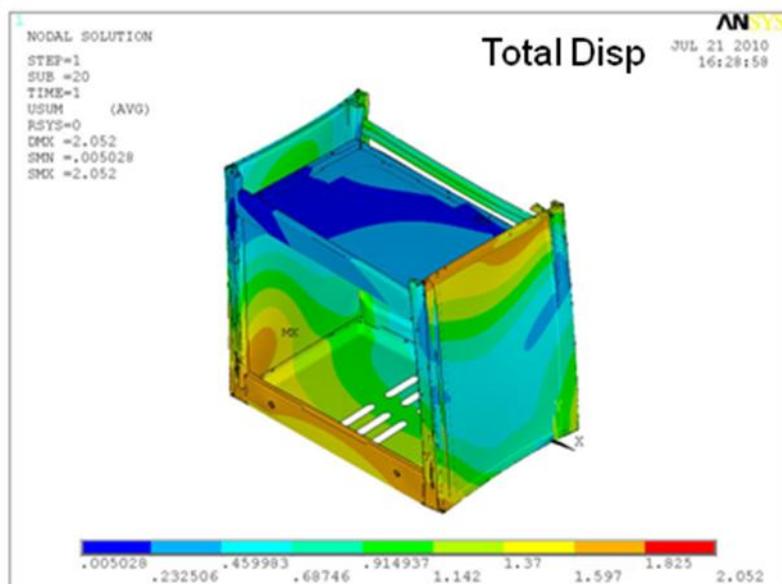
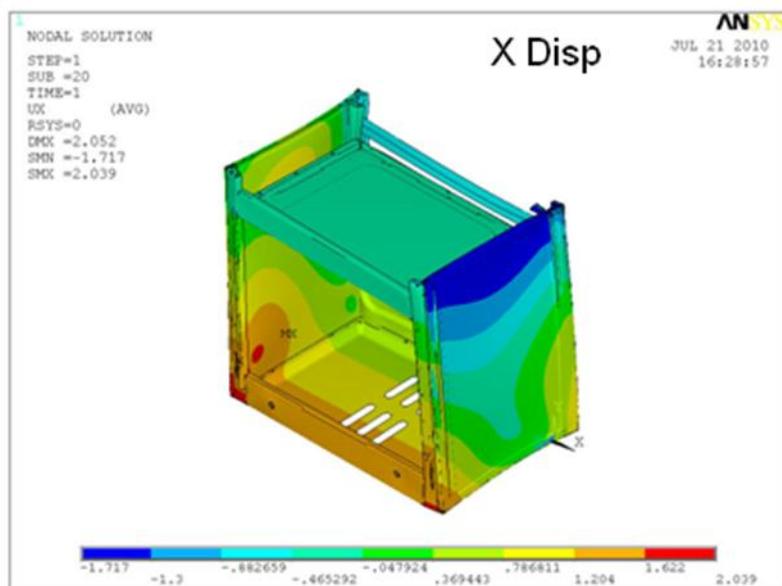


Figura 22 - Simulação 02 – (RUN ORDER 02)

Tabela 8 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 02

DEFLEXÃO FRONTAL	DEFLEXÃO TRASEIRA	DEFLEXÃO MÉDIA
-0,2518	0.44271	0,3472

5.5 DOE – 03

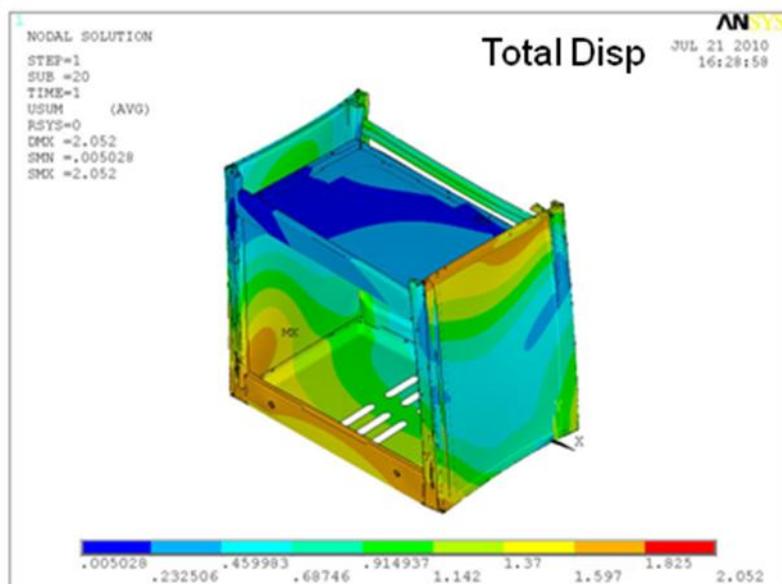
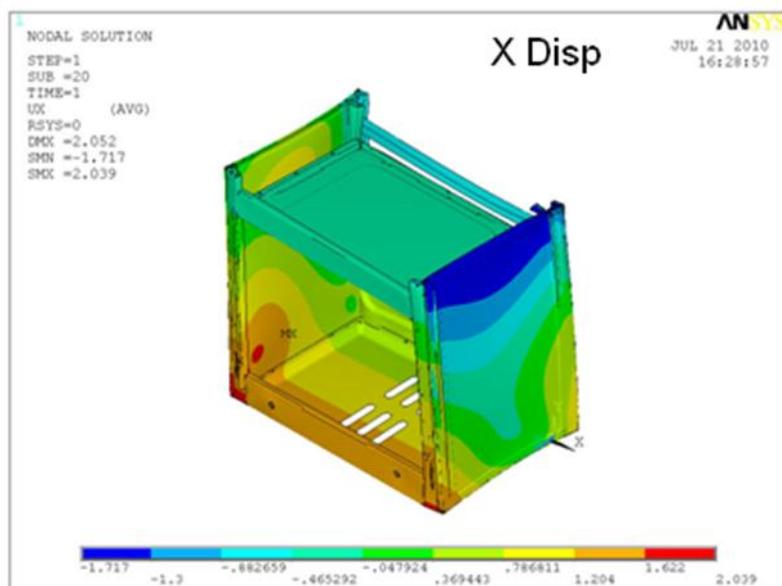


Figura 23 - Simulação 03 – (RUN ORDER 03)

Tabela 9 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 03

DEFLEXÃO FRONTAL	DEFLEXÃO TRASEIRA	DEFLEXÃO MÉDIA
-0,29047	0,83739	0,5639

5.6 DOE – 04

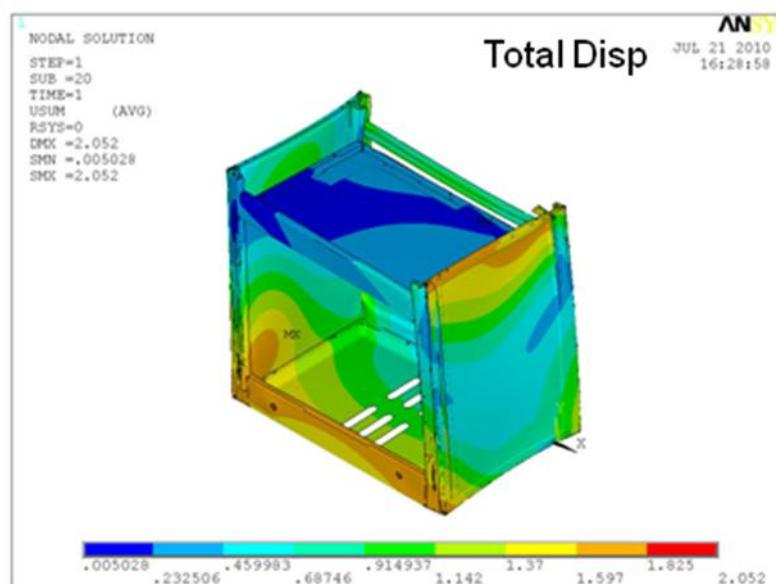
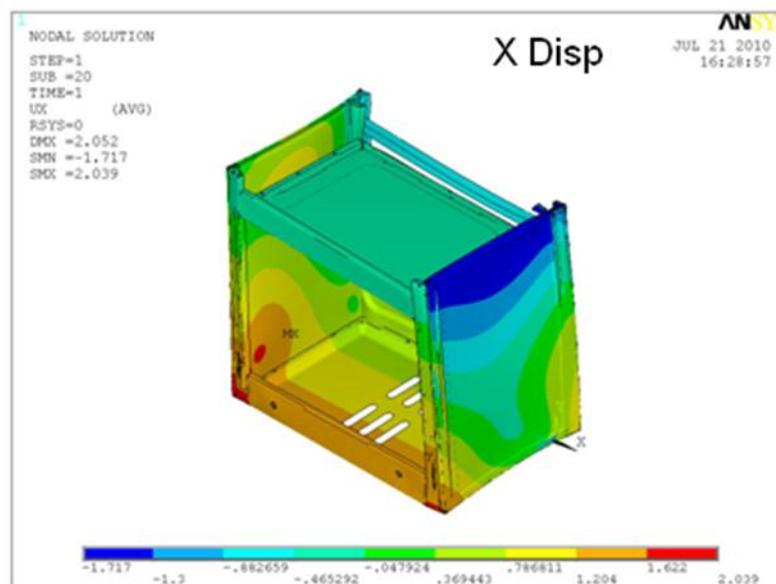


Figura 24 - Simulação 04 – (RUN ORDER 04)

Tabela 10 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 04

DEFLEXÃO FRONTAL	DEFLEXÃO TRASEIRA	DEFLEXÃO MÉDIA
-0,1606	0,52058	0,3405

5.7 DOE – 05

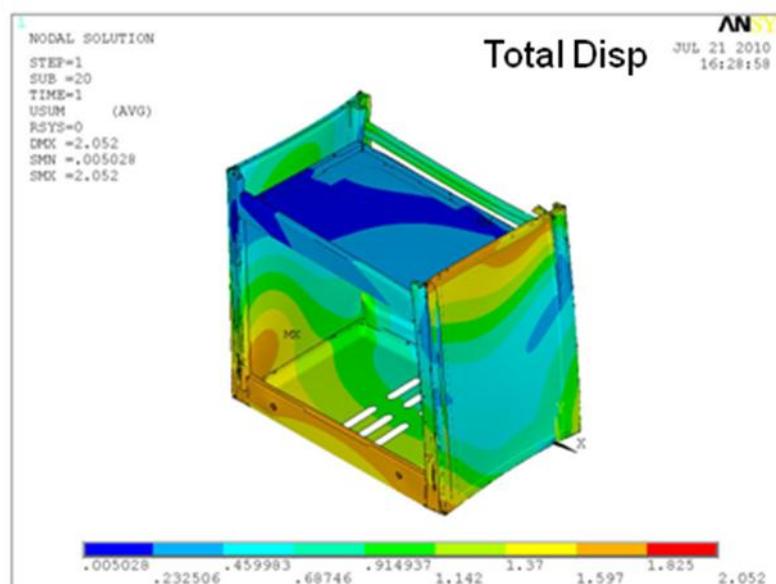
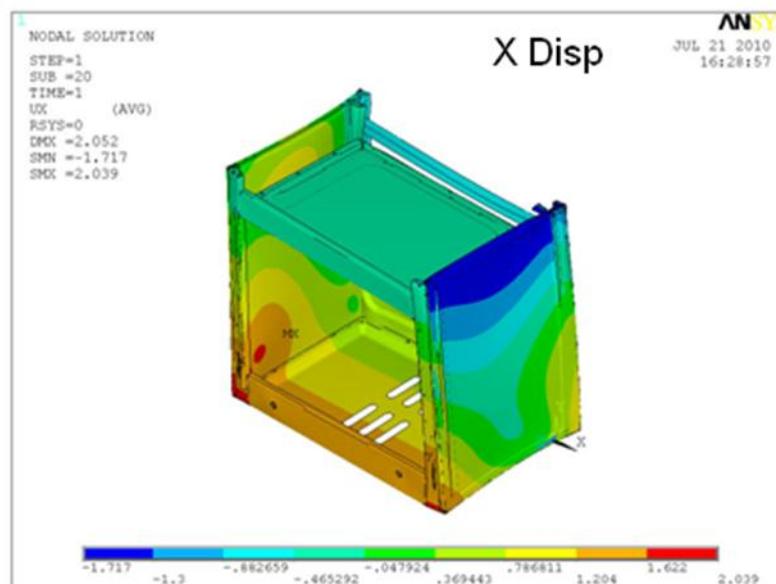


Figura 25 - Simulação 05 – (RUN ORDER 05)

Tabela 11 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 05

DEFLEXÃO FRONTAL	DEFLEXÃO TRASEIRA	DEFLEXÃO MÉDIA
-0,16483	0,26594	0,2153

5.8 DOE – 06

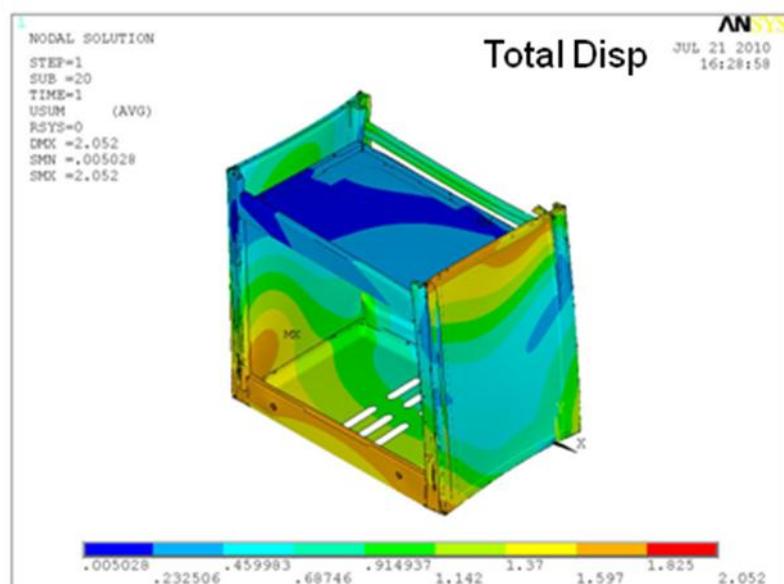
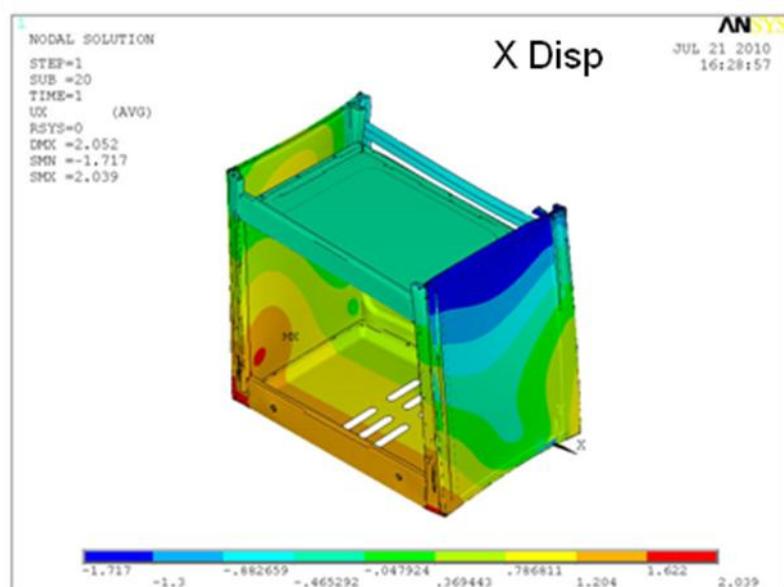


Figura 26 - Simulação 06 – (RUN ORDER 06)

Tabela 12 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 06

DEFLEXÃO FRONTAL	DEFLEXÃO TRASEIRA	DEFLEXÃO MÉDIA
-0,23987	0,41516	0,3275

5.9 DOE – 07

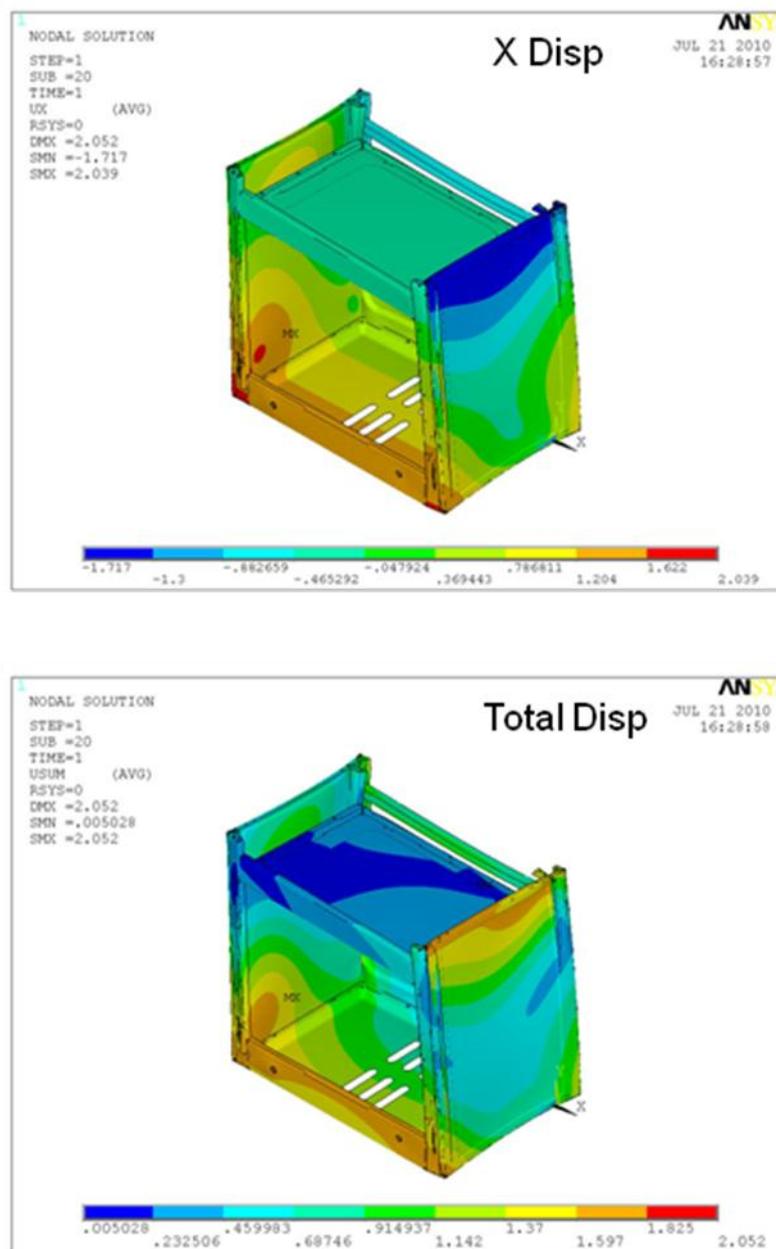


Figura 27 - Simulação 07 – (RUN ORDER 07)

Tabela 13 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 07

DEFLEXÃO FRONTAL	DEFLEXÃO TRASEIRA	DEFLEXÃO MÉDIA
-0,22104	0,86554	0,5432

5.10 DOE – 08

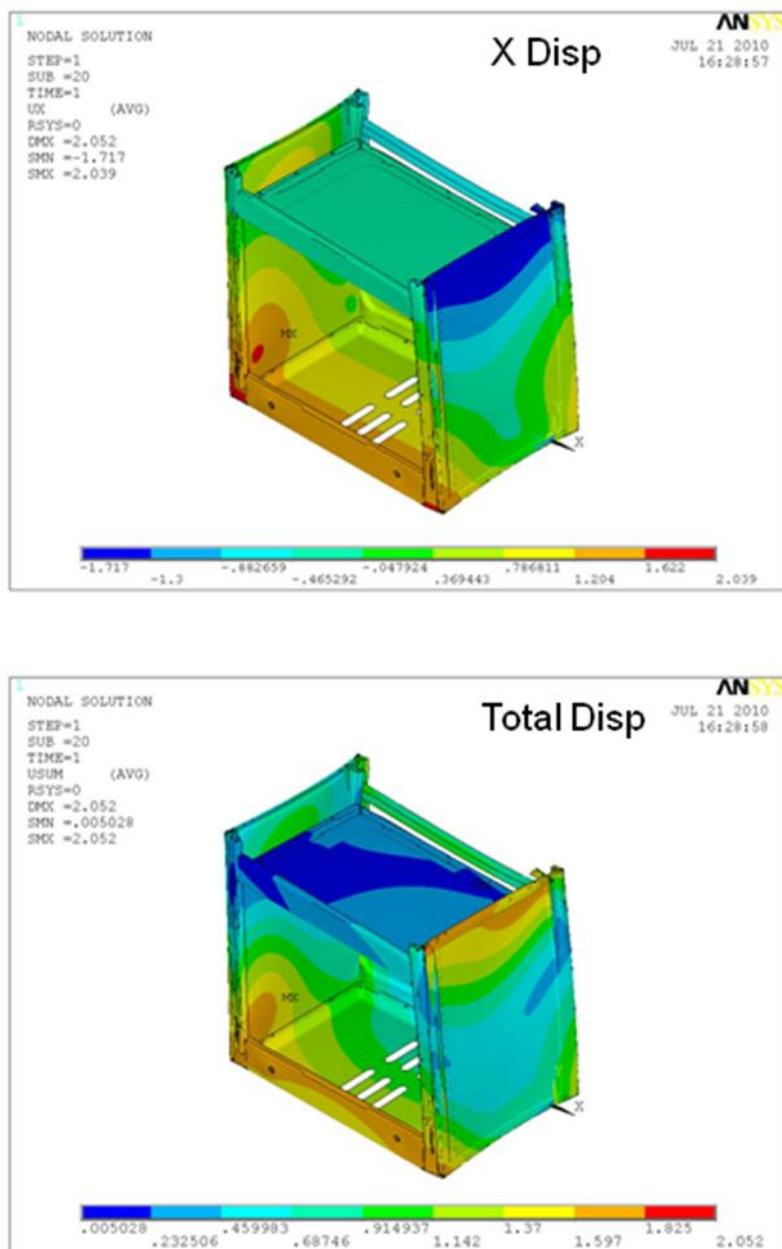


Figura 28 - Simulação 08 – (RUN ORDER 08)

Tabela 14 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 08

DEFLEXÃO FRONTAL	DEFLEXÃO TRASEIRA	DEFLEXÃO MÉDIA
-0,14071	0,57233	0,3565

5.11 DOE – 09

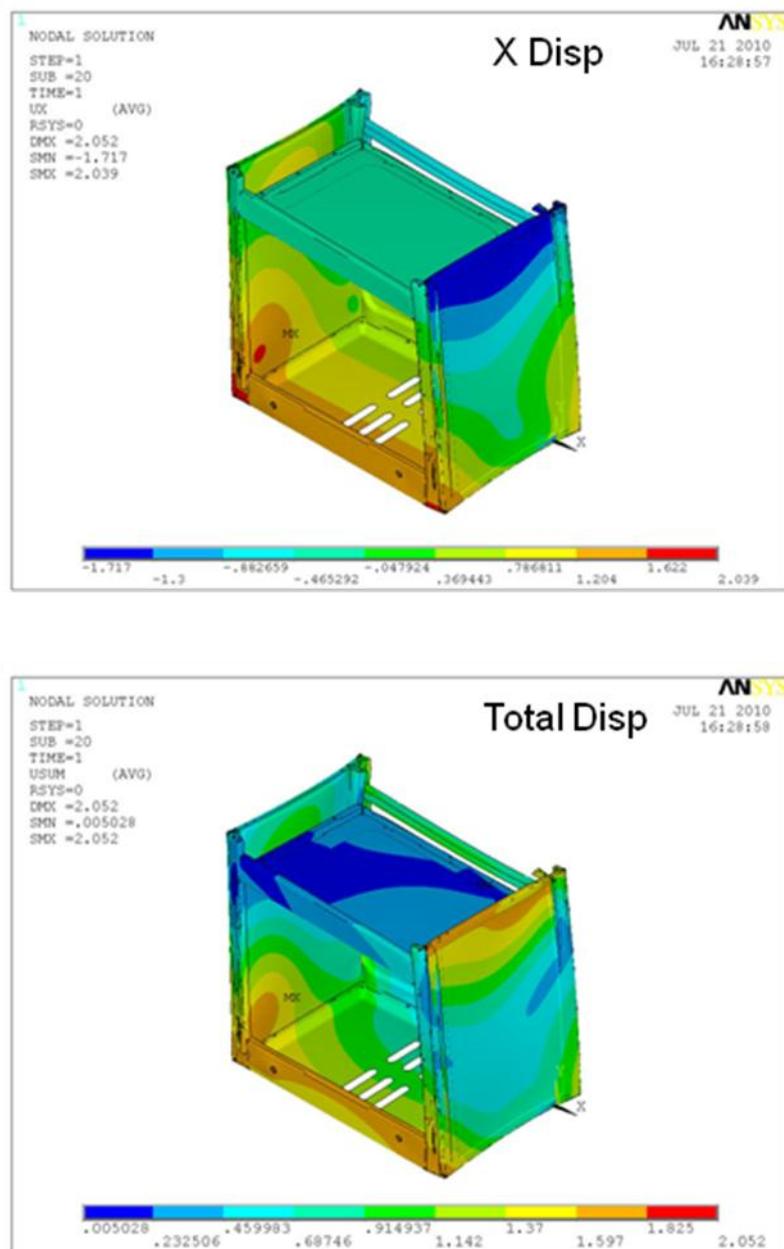


Figura 29 - Simulação 09 – (RUN ORDER 09)

Tabela 15 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 09

DEFLEXÃO FRONTAL	DEFLEXÃO TRASEIRA	DEFLEXÃO MÉDIA
-0,42025	-0,10863	0,2634

5.12 DOE – 10

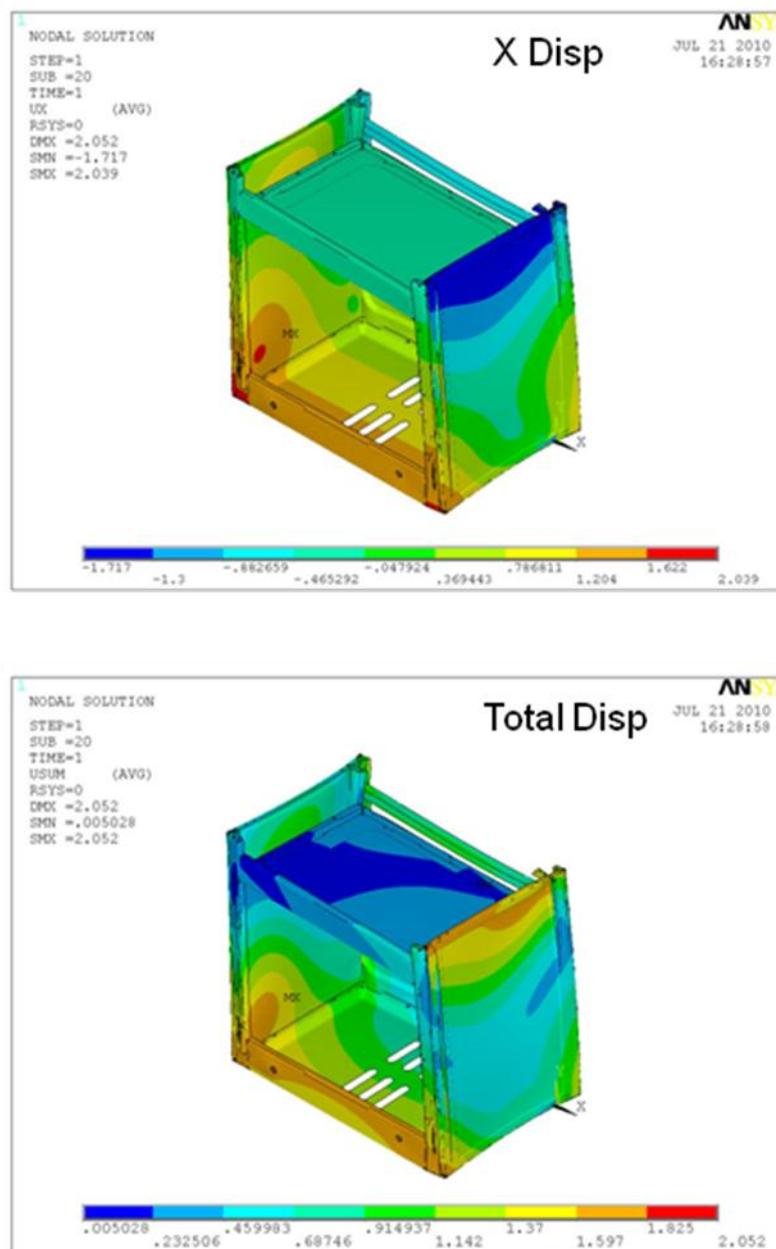


Figura 30 - Simulação 10 – (RUN ORDER 10)

Tabela 16 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 10

DEFLEXÃO FRONTAL	DEFLEXÃO TRASEIRA	DEFLEXÃO MÉDIA
-0,29282	-0,1158	0,2042

5.13 DOE – 11

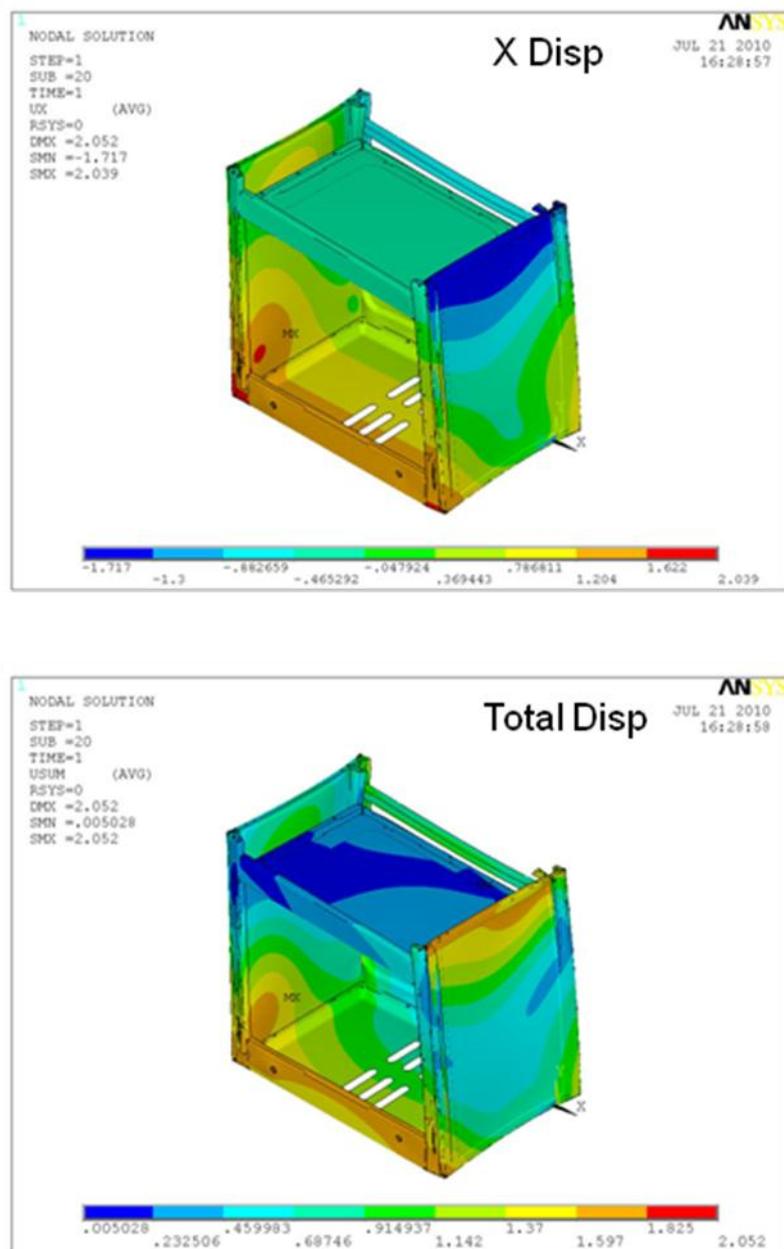


Figura 31 - Simulação 11 – (RUN ORDER 11)

Tabela 17 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 11

DEFLEXÃO FRONTAL	DEFLEXÃO TRASEIRA	DEFLEXÃO MÉDIA
-0,21787	0,13317	0,2055

5.14 DOE – 12

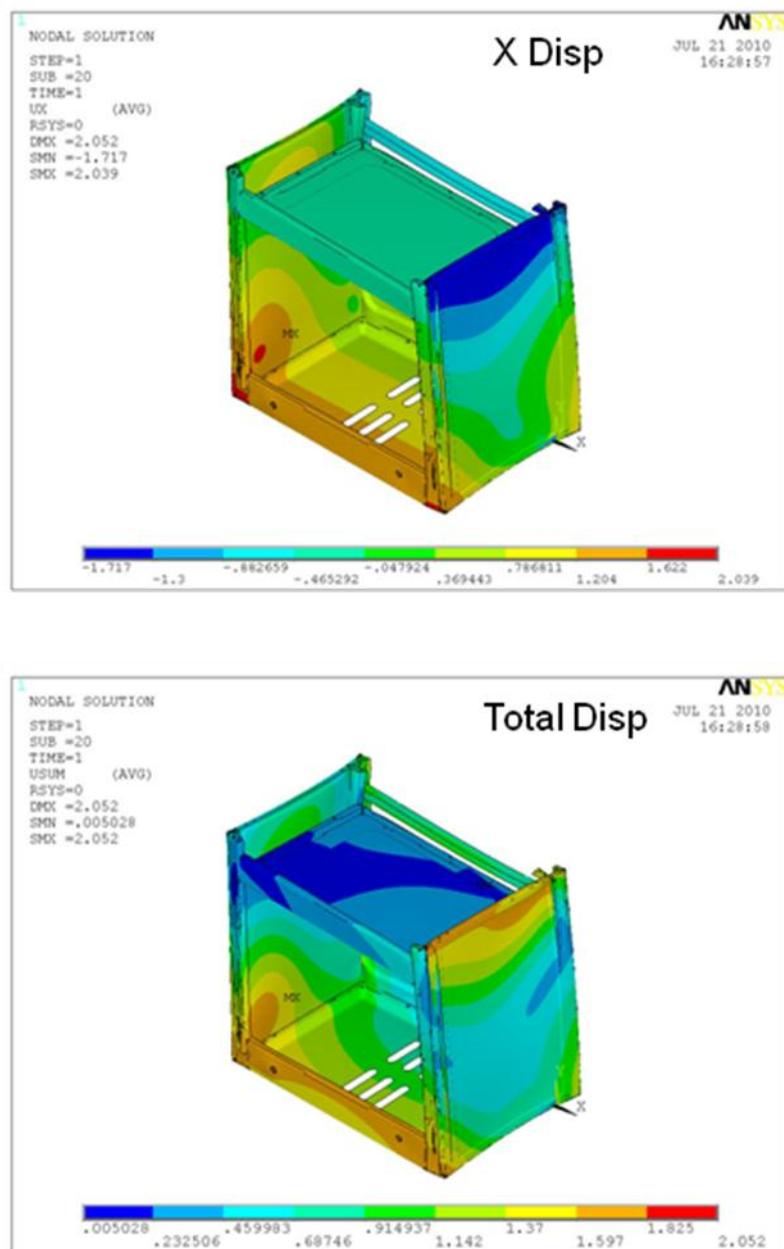


Figura 32 - Simulação 12 – (RUN ORDER 12)

Tabela 18 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 12

DEFLEXÃO FRONTAL	DEFLEXÃO TRASEIRA	DEFLEXÃO MÉDIA
-0,37321	0,3478	0,3605

5.15 DOE – 13

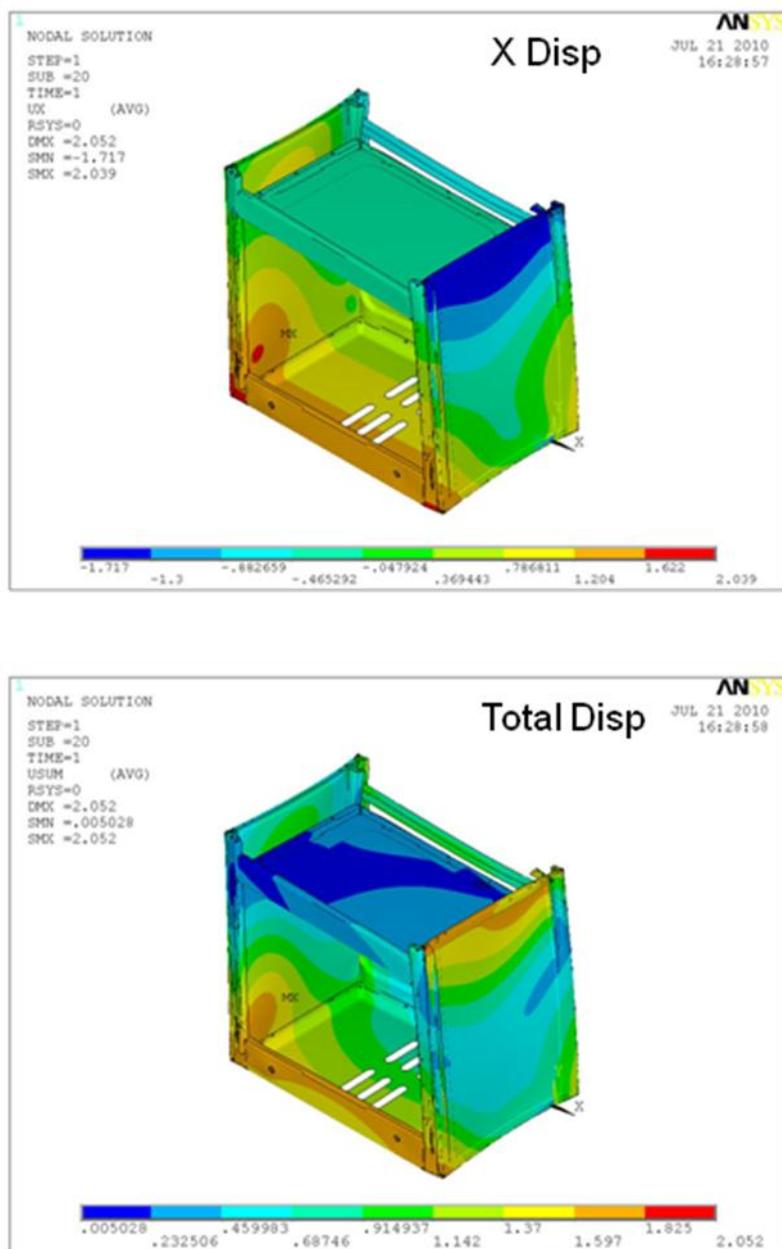


Figura 33 - Simulação 13 – (RUN ORDER 13)

Tabela 19 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 13

DEFLEXÃO FRONTAL	DEFLEXÃO TRASEIRA	DEFLEXÃO MÉDIA
-0,35675	0,05161	0,2041

5.16 DOE – 14

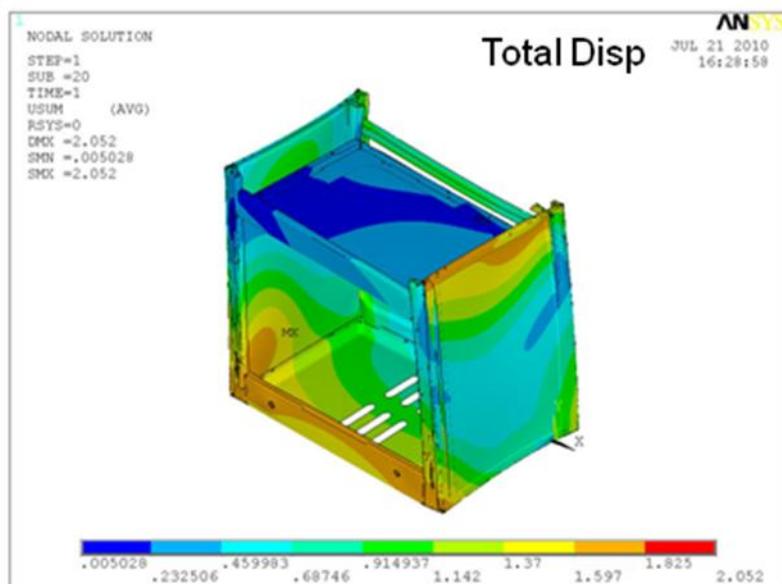
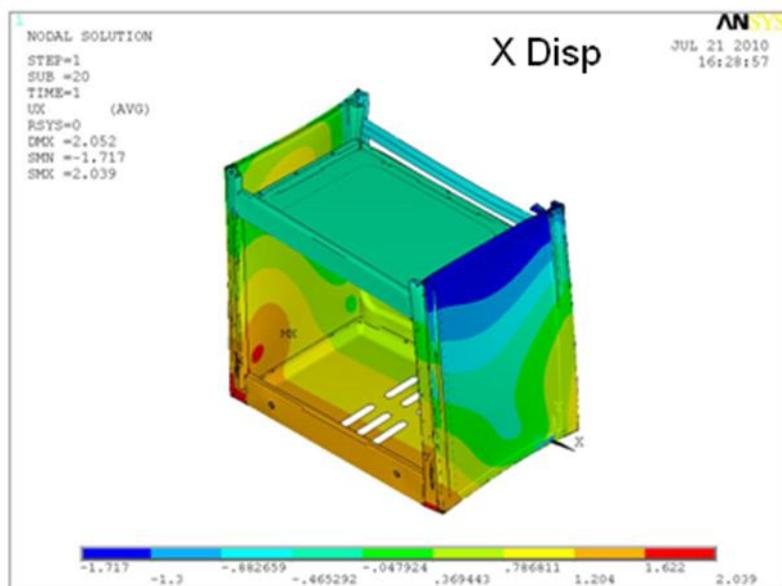


Figura 34 - Simulação 14 – (RUN ORDER 14)

Tabela 20 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 14

DEFLEXÃO FRONTAL	DEFLEXÃO TRASEIRA	DEFLEXÃO MÉDIA
-0,20243	-0,0088	0,1056

5.17 DOE – 15

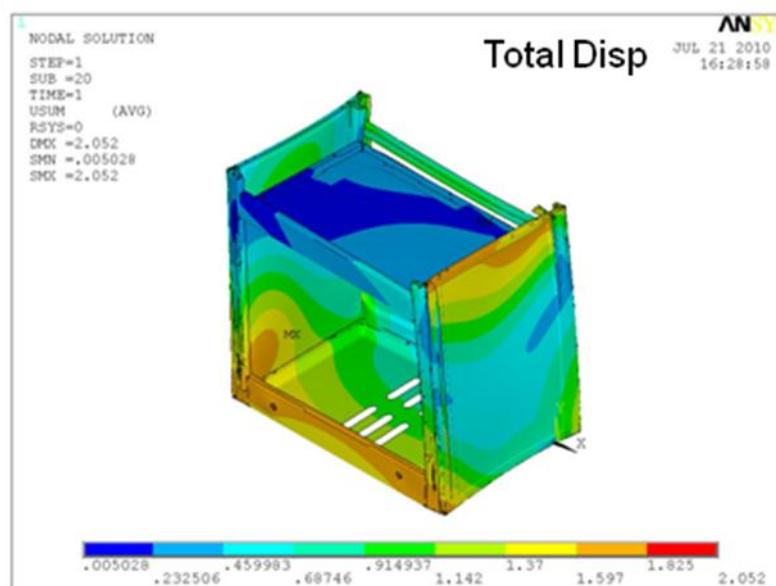
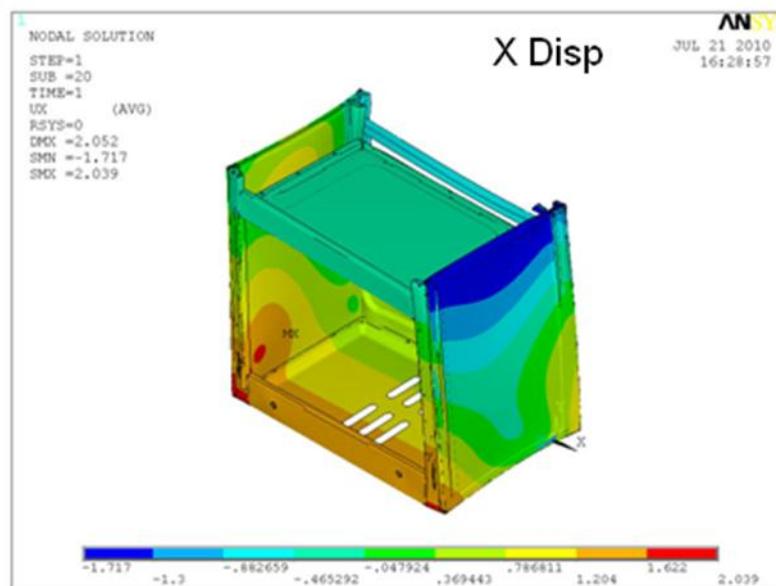


Figura 35 - Simulação 15 – (RUN ORDER 15)

Tabela 21 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 15

DEFLEXÃO FRONTAL	DEFLEXÃO TRASEIRA	DEFLEXÃO MÉDIA
-0,2444	0,05814	0,1512

5.18 DOE – 16

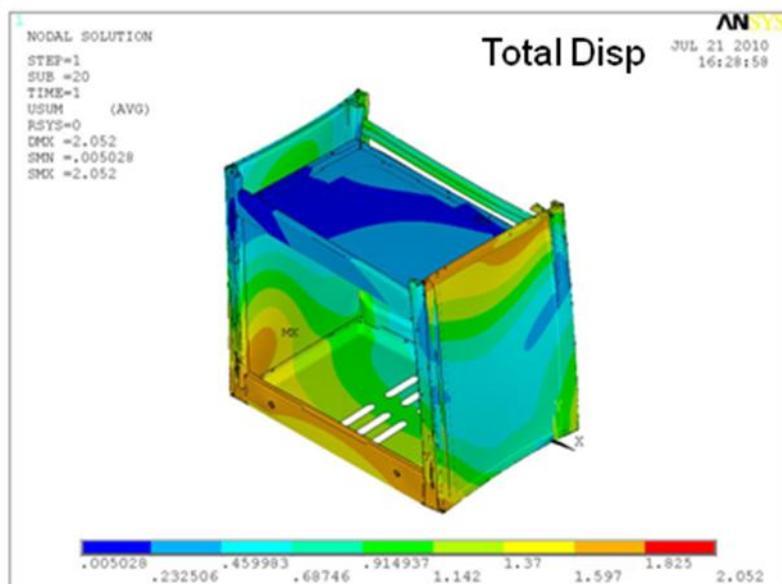
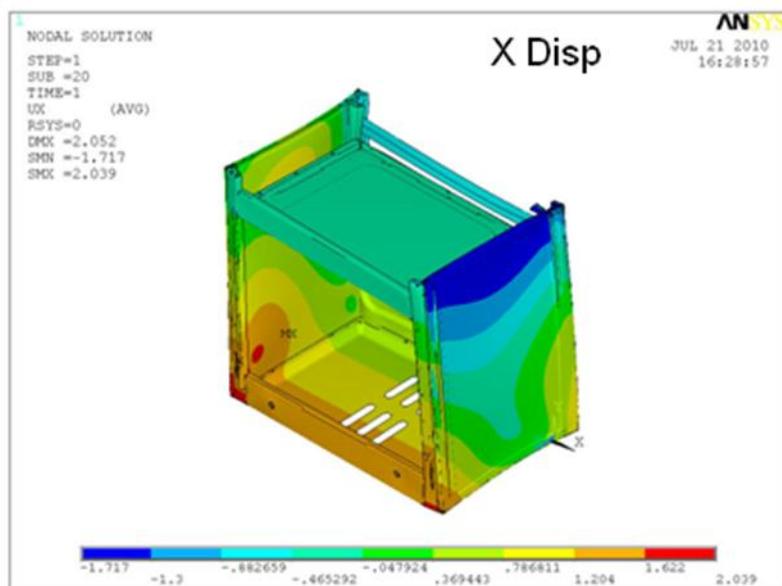


Figura 36 - Simulação 16 – (RUN ORDER 16)

Tabela 22 - Leitura da Deflexão por MEF – Simulação 16

DEFLEXÃO FRONTAL	DEFLEXÃO TRASEIRA	DEFLEXÃO MÉDIA
-0,4688	0,2155	0,3421