



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**Técnicas de otimização utilizando o ANSYS
Workbench**

Por,

Lucas Cintra Fernandes

Brasília, 4 de dezembro de 2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**Técnicas de otimização utilizando o ANSYS
Workbench**

Por,
Lucas Cintra Fernandes

Projeto submetido como requisito para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico

Banca Examinadora

Prof. Alberto Carlos G. C. Diniz, UnB/ENM (Orientador) _____

Prof. Marcus Vinicius Girão de Moraes, UnB/ENM _____

Prof. Éder Lima de Albuquerque, UnB/ENM _____

Brasília 4 de dezembro de 2019

Resumo

Uma das principais variáveis para a viabilização de um projeto de engenharia é o preço e, para isso, diversas técnicas são utilizadas a fim de minimizar essa variável. Dentro dos processos de fabricação, a otimização se mostrou um dos mais importantes métodos para se atingir uma faixa ótima de custo.

Neste contexto o Projeto de Graduação, propõe a aplicação de técnicas de otimização no estudo de estruturas e componentes mecânicos usando o pacote comercial ANSYS. Esse produto sofreu grande evolução nos últimos anos e exige um aprimoramento nos conhecimentos do engenheiro para sua correta e eficiente utilização nas aplicações industriais.

Palavras-chaves: Otimização, Método de Elementos Finitos, Topológica, Paramétrica, de Forma, LHS.

Abstract

One of the main variables for the viability of an engineering project is its price and, for that, several techniques are used to minimize this variable. Within manufacturing processes, optimization has proven to be one of the most important methods for achieving an optimal cost range.

In this context the Graduation Project proposes the application of optimization techniques in the study of structures and mechanical components using the ANSYS commercial package. This product has undergone major developments in recent years and requires an improvement in the knowledge of the engineer for its correct and efficient use in industrial applications.

Key-words: Optimization, Finite Elements Method, Topological, Parametric, Shape, LHS.

Sumário

Sumário	i
Lista de figuras	iv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Justificativa	1
1.4 Metodologia	2
1.5 Organização do Trabalho	2
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
2.1 Método de Elementos Finitos	3
2.2 ANSYS	7
2.2.1 ANÁLISES ESTRUTURAIIS	8
2.2.2 MÓDULOS PRINCIPAIS	8
2.2.3 ANSYS WORKBENCH	11
2.2.3.1 Análise Estática	12
2.3 Otimização	13
2.3.1 Otimização Paramétrica	15
2.3.2 Otimização de Forma	16
2.3.3 Otimização Topológica	18
2.3.4 Exemplo	19
2.4 Projeto de Experimentos e Modelagem de Superfície de Resposta	22
2.4.1 LHS - Latin Hypercube Sampling	24
3 CONDIÇÕES INICIAIS DE PROJETO E ANÁLISE ESTÁTICA	27
3.1 Análise Estática	28

3.1.1	MALHA	30
4	OTIMIZAÇÃO	35
4.1	Otimização Paramétrica	35
4.2	Otimização de Forma	41
4.3	Otimização Topológica	42
5	RESULTADOS	49
5.1	Análise Estrutural	49
5.2	Análise de Tensões e Fator de Segurança	49
5.3	Análise de Deslocamentos e Deformações	53
6	CONCLUSÃO	56
6.1	Comparação Entre Otimizações	56
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

Lista de Figuras

1	Corpo sólido subdividido em regiões	5
2	Elemento Finito Singular	5
3	Project Schematics	9
4	Design de uma peça no SpaceClaim	10
5	Esforços impostos sobre uma peça no Ansys Mechanical	11
6	Project Scheme com resultados gerando novos parâmetros	13
7	Resultados de otimização em prótese de quadril - Fonte: Fraldi et al. 2009	15
8	Problema Inicial - Fonte: Vieira, 2016	16
9	Resultado Final - Fonte: Vieira, 2016	16
10	Problema Inicial - Fonte: Vieira, 2016	17
11	Resultado Final - Fonte: Vieira, 2016	17
12	Problema Inicial - Fonte: Vieira, 2016	18
13	Resultado Final - Fonte: Vieira, 2016	19
14	As três categorias de otimização. a) Otimização Paramétrica de uma estrutura treliçada b) Otimização de forma c) Otimização Topológica .	19
15	Modelo de estrutura treliçada utilizada no exemplo do blog Altair . . .	20
16	Resultado da otimização de forma apresentada no exemplo do blog Altair	21
17	Resultado da otimização topológica apresentada no exemplo do blog Altair	21
18	Resultado da otimização paramétrica apresentada no exemplo do blog Altair	22
19	Distribuição Normal	25
20	Distribuição Uniforme	25
21	Pontos selecionados - Fonte: Fonseca, 2015	26
22	Distribuição da Combinação de pontos	26
23	Representação esquemática de um Trem Epicicloidal - Fonte: http://tinyurl.com/y27gog97	28
24	Configurações do <i>Engineering Data</i>	29

25	Interface SpaceClaim para confecção de geometrias	29
26	Exemplo de árvore de trabalho com todos os itens verificados	30
27	Configuração de malha de elementos finitos com <i>Relevance</i> - 100	32
28	Configuração de malha de elementos finitos com <i>Relevance</i> 100	32
29	Configuração de malha de elementos finitos com <i>Relevance Center Fine</i>	33
30	Configuração de malha de elementos finitos com <i>Smoothing Low</i>	33
31	Configuração de malha de elementos finitos com <i>Smoothing High</i>	34
32	Inclusão de um parâmetro no <i>SpaceClaim</i>	36
33	Malha gerada para a otimização paramétrica	36
34	Configuração das funções objetivos da otimização paramétrica	37
35	Formato de diferentes CCD - Fonte: ANSYS, 2013	38
36	Gráfico de correlação dos parâmetros de entrada e saída	39
37	Relação entre dimensões de espessura selecionadas e fator de segurança resultante	39
38	Configuração da geração de novos dados pela otimização paramétrica	40
39	Configuração do Projeto de Experimentos (DOE)	40
40	Resultado das funções objetivos após seleção de parâmetro iniciais	41
41	Representação de diferentes ccd	42
42	Resultado da última iteração da otimização de forma	42
43	Representação do <i>Project Scheme</i> com uma otimização topológica	43
44	Árvore de projeto com análises estáticas e projeto de otimização	43
45	Configuração do <i>Analysis Settings</i>	44
46	Configuração das regiões de otimização	45
47	Resultado da 1ª iteração da otimização topológica	46
48	Resultado da 5ª iteração da otimização topológica	46
49	Resultado da última (15ª) iteração da otimização topológica	47
50	<i>Project Scheme</i> com a extensão do <i>Design Validation System</i>	47
51	Nova configuração do braço	48
52	Análise do fator de segurança do novo braço	48
53	Malha de tensões - Otimização topológica	50
54	Malha de tensões - Otimização paramétrica	50
55	Malha de tensões - Otimização de forma	51

56	Malha de fatores de segurança - Otimização topológica	52
57	Malha de fatores de segurança - Otimização paramétrica	52
58	Malha de fatores de segurança - Otimização de forma	53
59	Malha de deformações - Otimização topológica	54
60	Malha de deformações - Otimização paramétrica	54
61	Malha de deformações - Otimização de forma	55

Lista de Tabelas

1	Características do Braço	28
2	Características do Aço AISI 1045	29
3	Resultado das Otimizações	56

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O uso de softwares de modelagem por elementos finitos é cada vez mais comum na indústria brasileira. O domínio dos conceitos fundamentais do método de elementos finitos e o uso consciente dos pacotes comerciais é uma exigência para o engenheiro mecânico.

O Projeto de Graduação propõe a aplicação de técnicas de otimização no estudo da dinâmica de estruturas de componentes mecânicos usando o pacote comercial ANSYS Workbench. Esse produto sofreu grande evolução nos últimos anos e exige um aprimoramento nos conhecimentos do engenheiro para sua correta e eficiente utilização nas aplicações industriais.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia de desenvolvimento dos 3 processos de otimização: topológica, paramétrica e de forma, a fim de gerar resultados, discutir as diferenças dos métodos, avaliar limitações, restrições, possíveis interações entre os métodos e uma comparação de todos os resultados oriundos dessa análises.

Com esses métodos validados, pretende-se montar um material em formato passo a passo sobre como realizar as 3 formas de otimização apresentadas e disponibilizá-los para os alunos de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília

1.3 Justificativa

O ANSYS é uma ferramenta que vem se desenvolvendo muito ao longo dos últimos 10 anos e, cada vez mais, ela se torna uma ferramenta que é indispensável para o trabalho de um engenheiro, seja ele trabalhando com projeto de máquinas, sistemas de ar-condicionado, produção de equipamentos e pesquisas acadêmicas. Porém, ainda há muitos engenheiros recém-formados que saem da universidade sem dominar ferramentas

básicas presentes neste software. Portanto, com uma intenção pedagógica/educativa este projeto é um passo inicial ao desenvolvimento de diversos manuais explicativos de softwares e funções que são indispensáveis para o trabalho de um engenheiro.

1.4 Metodologia

A primeira ação realizada foi decidir de que maneira a geometria será gerada, assim como o software utilizado (SolidWorks e SpaceClaim). Em seguida, foi feito um estudo de qual o melhor configuração a ser usado na análise de elementos finitos. A partir daí, foi possível realizar a análise, definir os parâmetros e otimizar dentro da plataforma do Ansys Workbench.

No pacote de otimização *Design Exploration* do Ansys Workbench foi feita uma análise para definir os experimentos de projetos, a superfície de reposta e o método de amostragem. Este recorre ao método de *Latin Hypercube Sampling*, um método que otimiza o tempo de resposta e o custo computacional de uma análise de otimização iterativa.

Por último, foi realizada uma análise dos resultados obtidos das diferentes otimizações e uma comparação entre elas.

1.5 Organização do Trabalho

No capítulo 2, é feita uma apresentação teórica sobre o método de elementos finitos, os procedimentos para a resolução de um problema de elementos finitos, o software ANSYS e os componentes utilizados neste projeto de graduação, uma introdução sobre problemas de otimização e três diferentes métodos de otimização. No capítulo 3, é feita uma abordagem geral sobre todos os parâmetros utilizados nas análises que precedem à otimização, através de uma análise estática e com um foco nos dados de entrada necessário para, de fato, começar os processos de otimização. No capítulo 4, são demonstrados, em uma metodologia passo-a-passo os procedimentos para a otimização, assim como uma breve apresentação dos resultados obtidos, antecipando os resultados apresentados e discutidos no capítulo 5. No capítulo 5, são apresentadas as comparações de resultados e comentários sobre estes, a fim de entender a origem dessas "divergências". Por último, o capítulo 6 explana uma comparação geral sobre os processos de otimização seus principais pontos forte e fracos e sugestões para próximos trabalhos.

CAPITULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo apresentam-se os conceitos fundamentais para a realização deste projeto de graduação. Inicialmente apresenta-se, de forma resumida, o Método de Elementos Finitos como forma de modelagem de problemas a partir de soluções numéricas para problemas de simulação estrutural. Em seguida, apresenta-se o software ANSYS, que é o software utilizado para realizar todos os procedimentos deste projeto, comentando sobre seus principais módulos, o *ANSYS Workbench* que é o programa de simulação do *software*. Por fim, apresenta-se o que é o problema de otimização, o que ele visa solucionar e as diferentes métodos de otimização a serem estudados neste projeto de graduação. Também apresenta alguns exemplos da utilização desses métodos e uma breve introdução a um método de análise de dados para modelos sólidos, o Projeto de Experimentos.

2.1 Método de Elementos Finitos

Grande parte dos problemas de engenharia podem ser modelados por equações diferenciais ordinárias (EDOs) e equações diferenciais parciais (EDPs). Porém, nem sempre essas equações apresentam uma solução analítica conhecida. Nestes casos, soluções numéricas, que se aproximam da solução analítica, são necessárias. O Método de Elementos Finitos (MEF) consiste de vários métodos numéricos para a solução de problemas descritos por EDOs e EDPs e limitados por condições de contorno. É responsabilidade do engenheiro avaliar as soluções encontradas através deste método e verificar as simplificações utilizadas e os erros associados a este tipo de solução.

Inicialmente o MEF foi desenvolvido para simulação de estruturas aeroespaciais e se desenvolveu para diversas áreas da análise estática, mas também para problemas que não possuíam um corpo sólido, como mecânica dos fluidos. Ao longo de seu desenvolvimento, o MEF foi utilizado como uma técnica para solução de problemas mais complexos em diferentes campos da engenharia: civil, mecânica, nuclear, biomédica, hidrodinâmica, entre outras. Atualmente, existem vários programas comerciais que resolvem problemas físicos utilizando o MEF, como o COSMOS, NASTRAN, ASKA, SAP, TITUS, MARC, ABAQUS, ANSYS, ADINA, entre outros (Canut, 2014)

A ideia básica do Método dos Elementos Finitos (MEF) consiste em utilizar como parâmetros as variáveis nodais de um número finito de pontos previamente escolhidos,

denominados nós onde o conjunto de nós delimita elementos de áreas e volumes conhecidos. Esses elementos serão delimitados pelo número de nós em cada figura, seja ela uni, bi ou tridimensional, podendo ser dividido em sub-regiões de geometrias mais simples, como curvas, triângulos, quadriláteros, tetraedros e cubos.

No MEF o domínio de integração é subdividido em uma série de regiões, ou elementos finitos, interconectadas entre si através de um número discreto de pontos nodais (vértices). Para cada região (ou elemento) se estabelece um comportamento local aproximado, de tal forma que as incógnitas do problema em qualquer ponto do elemento podem ser definidas em função das mesmas incógnitas nos pontos nodais do elemento. Em seguida, minimizando o funcional do problema, obtido das somas das contribuições de cada elemento, se chega a um sistema total de equações, cuja solução permite conhecer os valores das incógnitas nos pontos nodais (Soares, 2010). Finalmente a partir desses valores pode-se calcular outros resultados intermediários.

Utilizando-se o princípio dos deslocamentos virtuais, tem-se que o trabalho (ou energia de deformação) virtual total interno ($\delta_1 U$) é igual ao trabalho virtual total externo ($\delta_1 W$):

$$\delta_1 U = \delta_1 W \quad (1)$$

onde a primeira variação da energia de deformação é:

$$\delta_1 U = \int_v \delta \epsilon^t \sigma dv \quad (2)$$

sendo:

- $\delta \epsilon^t$ = vetor das deformações virtuais;
- σ = vetor das tensões reais

Assim, a primeira variação do trabalho virtual externo é:

$$\delta_1 W = \int_v \delta u^t b dv + \int_v u^t m \ddot{u} dv \quad (3)$$

sendo,

- δu = vetor dos deslocamentos virtuais
- b = vetor da força de volume real
- m = matriz de densidade de massa
- \ddot{u} = vetor de acelerações

A título de ilustração considera-se o domínio de um corpo sólido subdividido em regiões, como na Figura 1:



Figura 1: Corpo sólido subdividido em regiões

E disto toma-se um elemento genérico e de volume V_e como na Figura 2

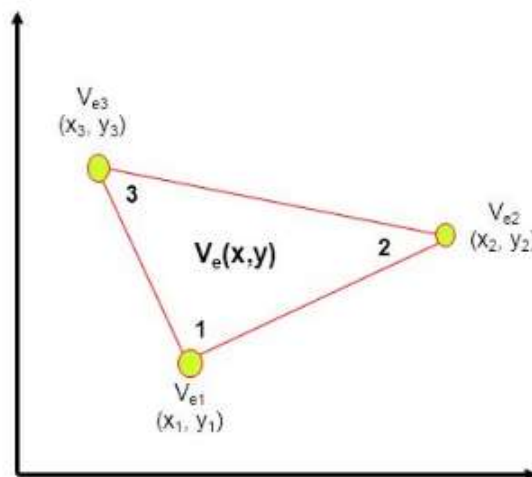


Figura 2: Elemento Finito Singular

Assim, a formulação de elementos finitos no modelo de deslocamentos apresentará as relações para cada elemento:

$$F = M\ddot{u} \quad (4)$$

$$F = \sum_{n=1}^{n_e} F_e \quad (5)$$

$$M = \sum_{n=1}^{n_e} M_e \quad (6)$$

A descrição do comportamento é feita, geralmente, através de equações diferenciais parciais para o problema - forma forte - e da respectiva forma fraca. Para obter o

sistema de equações do sistema global é preciso combinar as equações que governam os elementos individuais, sendo que tais equações são expressas em forma matricial (Piazzese, 2014).

Para solução da equação utiliza-se aproximações por uma série de funções polinomiais simples em cada elemento para todo o domínio do problema. Assim quando forem utilizados mais elementos mais a solução aproximada convergirá para a solução exata. (Kim, 2011).

Diversos tipos de elementos podem ser usados dependendo do domínio que necessita ser discretizado e do grau dos polinômios usados para aproximar a solução. Sánchez (2001) divide e define as três principais etapas da solução de um problema de elementos finitos:

- Pré-processamento: é a etapa onde se prepara o problema que será solucionado. Modela-se o fenômeno, introduzem-se condições iniciais e de contorno, carregamentos, escolhe-se os elementos, propriedades dos materiais e são feitas simplificações que venham a facilitar a análise sem influir negativamente nos resultados. Esta etapa subdivide-se em:
 - Discretização do modelo: O modelo contínuo é subdividido em um número equivalente de elementos finitos, os quais podem ser triângulos ou quadriláteros para problemas em duas dimensões ou tetraedros e hexaedros para três dimensões. Os elementos possuem nós, os quais podem ser internos ou externos, isto é, pertencem ao interior do elemento ou estão localizados nas arestas ou faces do mesmo. Assume-se que estes elementos são interligados entre si por nós localizados no contorno dos mesmos (os deslocamentos destes nós são as incógnitas básicas do problema). O processo de discretização do contínuo depende primordialmente do julgamento e do conhecimento do engenheiro
 - Seleção das funções de interpolação: De acordo com o tipo de elemento escolhido na primeira etapa, existem funções de interpolação ou deslocamento associadas classicamente aceitas. Portanto, não é preciso determiná-las para cada problema. As funções assumidas representam aproximadamente a distribuição exata ou real dos deslocamentos. Geralmente, a forma adotada para as funções de interpolação é a polinomial, pela simplicidade de manipulação matemática. Existem três fatores inter-relacionados que influenciam a seleção da função de interpolação: escolha do tipo e do grau da função (como normalmente o tipo adotado é o polinomial, apenas o grau deve ser escolhido), o tipo das variáveis de campo que descrevem o modelo (normalmente, os deslocamentos nos nós ou suas derivadas) e finalmente, o modelo deve satisfazer certos requisitos que garantam que o resultado numérico se aproxime da solução correta
- Solução: usa-se um algoritmo numérico que objetiva solucionar eficientemente uma equação diferencial com todas as restrições (condições) impostas ao modelo na primeira etapa. Esta etapa subdivide-se em:
 - Obtenção das matrizes elementares (massa, rigidez e amortecimento): A matriz geométrica é constituída pelos coeficientes das equações de equilíbrio derivadas das propriedades geométricas e do material de um elemento e pode

ser obtida pelo uso do princípio da mínima energia potencial. A rigidez relaciona os deslocamentos nodais às forças aplicadas nos nós. A relação de equilíbrio entre a matriz de rigidez k , o vetor força nodal F e o vetor deslocamento nodal u é expressa como um conjunto de equações algébricas lineares simultâneas, $F = k u$. A matriz de rigidez para um elemento depende da função de interpolação, da geometria do elemento e das propriedades locais do material selecionadas na etapa anterior.

- Montagem das equações algébricas para todo o domínio: Inclui a montagem da matriz de rigidez global para todo o modelo a partir das matrizes de rigidez elementares e do vetor força global a partir dos vetores força elementares. A base para um método de montagem é a exigência das interconexões nodais. Os deslocamentos em um nó devem ser os mesmos para todos os elementos adjacentes.
- Soluções para os deslocamentos desconhecidos: As equações algébricas montadas no passo anterior são resolvidas para os deslocamentos desconhecidos. Em problemas lineares, esta é uma aplicação relativamente direta das técnicas de álgebra matricial. Entretanto, para problemas não-lineares, as soluções desejadas são obtidas por uma seqüência de passos, cada qual envolvendo a modificação da matriz de rigidez e/ou do vetor força.
- Cálculo das deformações e tensões elementares a partir dos deslocamentos nodais: Em certos casos (deformação de corpos elásticos), os deslocamentos nodais são as variáveis em estudo para a solução. Muitas vezes, entretanto, outras quantidades derivadas das variáveis desconhecidas, tais como tensões e deformações, devem ser calculadas. Em geral, tensão e deformação são proporcionais às derivadas dos deslocamentos.

Feita a análise da estrutura, inicia-se a terceira etapa, o pós-processamento, em que é feita a apresentação dos resultados da análise da etapa anterior. Só após as análises estáticas e/ou dinâmicas é que se pode utilizar o módulo de otimização e seus métodos e ferramentas.

2.2 ANSYS

O ANSYS é um software de elementos finitos que pode ser utilizado nas mais diversas classes de problemas de engenharia. A capacidade do ANSYS inclui habilidades para resolver sete tipos de análises estruturais disponíveis. Os primeiros parâmetros desconhecidos (graus de liberdade nodais) calculados em uma análise de estruturas são deslocamentos e rotações. Outras quantidades, como deformações, tensões e força de reação, são derivadas então dos deslocamentos nodais. Análises estruturais estão disponíveis apenas nos programas ANSYS Multiphysics, ANSYS Mechanical, ANSYS Structural, e ANSYS Professional (Marinho, 2002).

O ANSYS foi primeiramente concebido por John Swanson enquanto trabalhava no Westinghouse Astronuclear Laboratory na década de 1960. Na época, os engenheiros realizavam a análise de elementos finitos à mão. Após a rejeição da ideia de Swanson de automatizar o MEF desenvolvendo software de engenharia próprio pela Westinghouse, ele deixou a empresa em 1969 para desenvolver o software por conta própria. Assim fundou a Ansys Inc. sob o nome de Swanson Analysis Systems Inc. (SASI).

2.2.1 ANÁLISES ESTRUTURAIS

Os sete tipos de análises de estruturas que podem ser executadas são os seguintes:

Análise Estática: Usada para determinar deslocamentos, tensões, etc. sob condição de carga estática. Tem-se dois tipos de análises estáticas, linear e não linear, sendo que as não-linearidades podem incluir plasticidade, tensão, rigidez, grandes deformações, grandes tensões, hiperelasticidade, superfície de contato, e fissuração.

Análise Modal: Usada para calcular as frequências naturais e modos de vibração de uma estrutura. Há diferentes métodos disponíveis de extração de modos.

Análise Harmônica: Usada para determinar a resposta de uma estrutura a cargas harmônicas variáveis no tempo.

Análise Dinâmica Transiente: Usada para determinar a resposta de uma estrutura às cargas arbitrariamente variáveis no tempo. São permitidas todas as não-linearidades mencionadas na análise estática.

Análise Espectral: Uma extensão da análise modal, usada para calcular tensões e deformações devidas a um espectro de resposta ou uma contribuição de PSD (vibrações aleatórias).

Análise de Flambagem: Usada para calcular as cargas de flambagem e determinar a forma do modo de flambagem. Ambas as análises, flambagem linear e flambagem não linear, são possíveis.

Análise Dinâmica Explícita: O ANSYS provê uma interface ao LS-DYNA, programa de elementos finitos usado para calcular soluções rápidas para cargas dinâmicas, grandes deformações e complexos problemas de contato.

Além dos tipos de análise citados, várias características especiais estão disponíveis, como: mecânica da fratura, compósitos, fadiga, p-método, etc. Neste projeto de graduação foram utilizados, além do módulo de otimização, a análise estática.

2.2.2 MÓDULOS PRINCIPAIS

O ANSYS também trabalha com módulos essenciais em seus módulos, sendo esses o Project Scheme ou Schematics, o SpaceClaim e ANSYS Mechanical.

Project Schematics

O Project Schematics é a interface principal que se utiliza no gerenciamento de todos os módulos de análise do ANSYS Workbench. Ele é apresentado de uma forma que permite realizar diversas interações entre os módulos de análise sem a necessidade de programação, apenas arrastando os módulos da lista e associando às análises já realizadas. Na Figura 3 é possível ver essa interface.

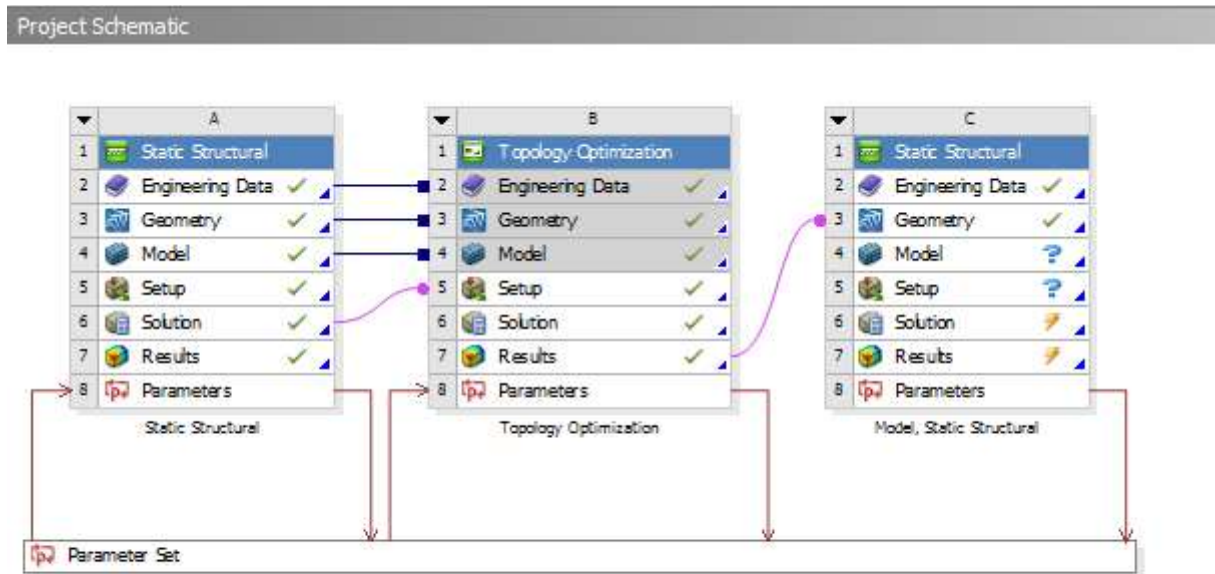


Figura 3: Project Schematics

SpaceClaim

O SpaceClaim é um software de modelagem 3D, CAD (*Computer Aided Design*) 3D, próprio do ANSYS que foi incorporado ao programa em 2014. Ele permite que se crie, altere e edite diferentes tipos de geometria, recebendo a maioria dos formatos existente em CAD, facilitando sua integração com outros softwares de CAD 3D (SolidWorks e Catia, por exemplo) onde os modelos se originam.

É um software otimizado para o ANSYS, apresentando ferramentas que integram parâmetros selecionados ao longo da modelagem do sólido, importando essas informações para todas as análises subsequentes. As principais ferramentas do SpaceClaim, como puxar, preencher, combinar e mover, auxiliam na alteração de elementos de uma peça analisada, adicionando ou removendo material. Também é possível realizar o caminho "inverso", utilizando o resultado de uma análise como parâmetro de entrada para o SpaceClaim, onde a peça original é sobreposta pelo resultado da análise. Na Figura 4 é possível ver uma peça dentro do SpaceClaim.

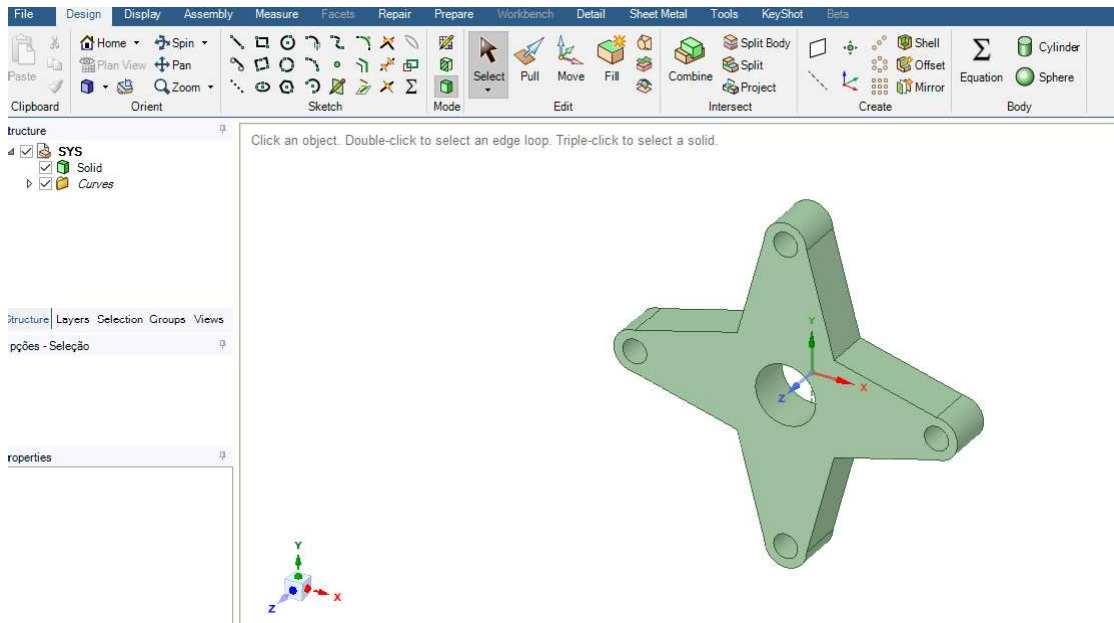


Figura 4: Design de uma peça no SpaceClaim

ANSYS Mechanical

O ANSYS Mechanical é o principal módulo que utiliza a análise de elementos finitos (FEM) para análise estrutural. Ele abrange uma enorme variedade de aplicativos realizando desde a preparação da geometria, análises estruturais e otimizações. É possível modelar materiais avançados, distribuições de cargas complexas e materiais compósitos.

Dentro do ANSYS Mechanical é possível criar condições de materiais criando elementos de volume com base em geometrias de treliça, fibra, trama ou criada pelo usuário para facilitar a modelagem multiescalar de estruturas de materiais complexos.

Na Figura 5 é possível ver um sólido com diversos esforços e suportes, pronto para uma análise de tensões.

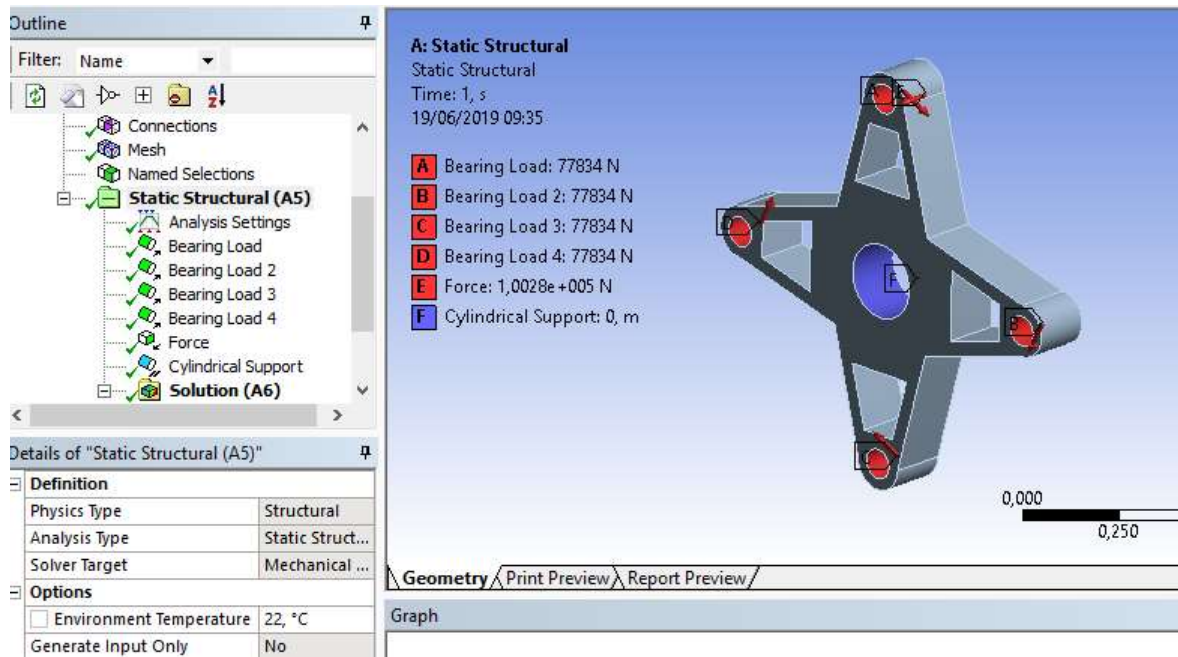


Figura 5: Esforços impostos sobre uma peça no Ansys Mechanical

2.2.3 ANSYS WORKBENCH

O Ansys Workbench 18.1 é um programa de simulação integrado. Nele é possível realizar diversas simulações no mesmo projeto de forma que a solução de cada análise seja compartilhada com uma outra. Por exemplo, é possível realizar uma análise térmica, modal e estática no mesmo projeto, de forma que a solução da análise térmica passa a ser a condição inicial para a análise estática e para os resultados da análise modal, ou seja, as simulações dependem dos resultados das simulações anteriores, seguindo a ordem de prioridade estabelecida pelo projetista e assim é possível avaliar os resultados em conjunto.

O programa para a geração de uma malha de elementos finitos utilizado foi o *ANSYS Workbench Academic Student 2019 R1* que é similar ao programa convencional, porém com limitação ao número de elementos analisados através da árvore de soluções do ANSYS Mechanical. Como mencionado previamente, utilizou-se o módulo de análise estática estrutural. Uma boa característica deste programa é a facilidade de se importar geometrias de programas de modelagem em CAD 3D, com a detecção automática de contatos e parâmetros, cabendo ao analista a configuração e verificação dos itens não identificados pelo programa de conversão de arquivos.

O design inicial da peça foi realizado em um software de CAD 3D fora da plataforma do ANSYS Workbench. Porém, todas as subsequentes alterações oriundas dos resultados das iterações da otimização foram realizados no software de CAD 3D próprio do ANSYS, o *SpaceClaim*[®] assim como para acrescentar os parâmetros a serem utilizados nas otimizações. Com a utilização deste programa, o processo de gerar a geometria e modificá-la quando necessário se torna bastante rápido, pois é possível associar o sólido resultado da otimização em uma nova análise estática através do *Project Schematic*, como pode ser visto na Figura 3.

2.2.3.1 Análise Estática

A análise estática de estruturas tem por objetivo principal quantificar a magnitude dos esforços internos e dos deslocamentos que se manifestam em qualquer sistema estrutural, quando o mesmo é submetido a um carregamento arbitrário, desprezando-se o efeito das forças de amortecimento e das forças de inércia. Tal procedimento no ANSYS fornece uma ampla gama de resultados numéricos, compatíveis com o carregamento aplicado, cuja avaliação de forma qualitativa viabilizará a sua utilização na elaboração do projeto da estrutura do sistema analisado.

Com uma formulação seguindo as condições de:

$$\dot{u} = 0 \tag{7}$$

e

$$\ddot{u} = 0 \tag{8}$$

O procedimento para a realização de uma análise estática consiste de três principais etapas:

1. Construção do modelo – pode ser feito de duas maneiras: pela definição da geometria do modelo ou importação de um sólido na ferramenta SpaceClaim, a fim de utilizar uma interface de CAD 3D, editável e intuitiva, definindo os parâmetros constituintes do modelo sólido, propriedades dos materiais pré-definida ou personalizado (peso específico, limite de escoamento, etc.), e disposição dos elementos estruturais (coordenadas nodais), assim como demais condições de contorno.
2. Condições de uso e avaliação de esforços – pode-se aplicar forças externas e pressões, forças de engrenamento e rolamentos, deslocamentos, temperaturas, etc. O carregamento pode ser atribuído a um modelo sólido como faces e furos e no modelo de elementos finitos por meio dos elementos gerados pelo método de elementos finitos.
3. Resultados - após a solução desenvolvida pelo programa, o modelo apresentará todos os resultados previamente solicitados como deformações, distribuição de tensões, deslocamentos, fator de segurança.
4. Uso dos dados - após a obtenção dos resultados, os subsequentes passos se derivarão dos objetivos a serem alcançados através da análise como otimizações, análises de resistência, etc.

Na Figura 6 é possível ver um Project Schematics com várias análises utilizando os parâmetros de saída das anteriores como seus próprios parâmetros de entrada.

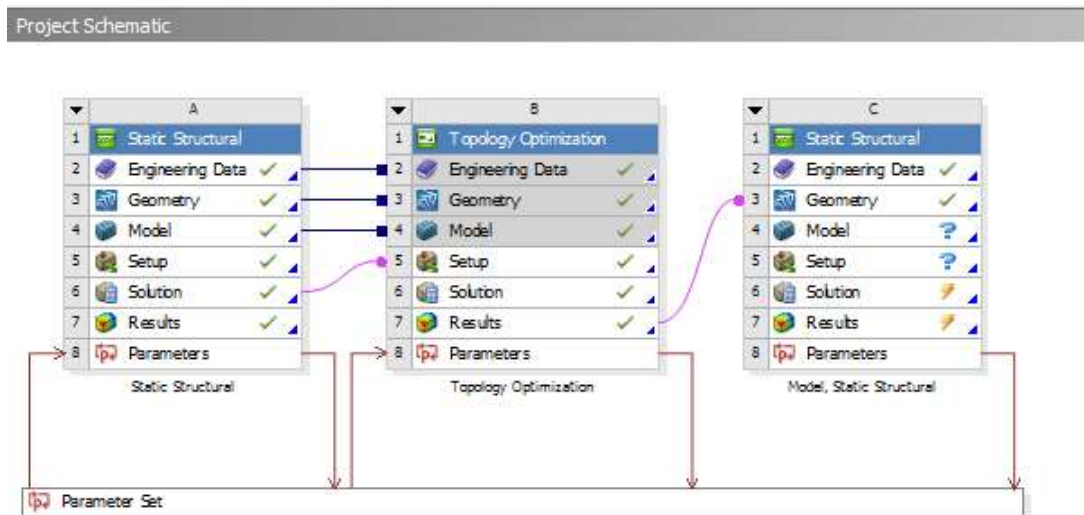


Figura 6: Project Scheme com resultados gerando novos parâmetros

2.3 Otimização

A otimização, em seu sentido mais amplo, pode ser aplicada para resolver qualquer problema de engenharia, utilizando ferramentas disponíveis para encontrar a solução ótima do problema. Tendo atingido um grau de maturidade nos últimos anos, as técnicas de otimização estão sendo usadas em uma ampla variedade de indústrias, incluindo a indústria aeroespacial, indústria automotiva, química, elétrica e manufatura. Associado ao desenvolvimento da tecnologia informática, a complexidade dos problemas resolvidos pelos métodos de otimização não são mais um problema. Métodos de otimização associados a modernas ferramentas de design assistido por computador também estão sendo usadas para melhorar o processo criativo de projeto conceitual e detalhado de sistemas de engenharia.

Porém, não há hoje um método ou técnica única para resolver todos os problemas de otimização eficientemente. Assim, vários métodos de otimização foram desenvolvidos para resolver diferentes tipos de problemas de otimização. Portanto, é decisão do engenheiro a escolha de um método que seja computacionalmente eficiente, preciso e apropriado para seu problema.

Dentro da engenharia mecânica a otimização pode ser utilizada para maximizar a eficiência de um corpo/peça para, por exemplo, minimizar o custo de fabricação de um equipamento. Uma das formas de se alcançar esses objetivos é alterando as variáveis de projeto. Essas variáveis de projeto podem ser densidade da peça, quantidade de material, peso, volume, condições de formato, entre outros.

Existem duas abordagens para se chegar a uma solução ótima de um problema de otimização. A primeira abordagem é chamada abordagem analítica, que consiste essencialmente em se analisar os projetos que resultam de diferentes combinações dos parâmetros descritos acima. Mediante o resultado das análises são construídos gráficos de desempenho em função dos valores de cada parâmetro.

O problema de otimização pode ser representado da seguinte forma (Levy, 2005):

$$f : A \rightarrow R \tag{9}$$

onde, A representa um conjunto de números reais.

Pode-se classificar o problema em dois tipos:

- Minimização: Busca-se um elemento x_0 pertencente à A tal que $f(x_0) \leq f(x)$ para todo x em A
- Maximização: Busca-se um elemento x_0 pertencente à A tal que $f(x_0) \geq f(x)$ para todo x em A

Usualmente, $A \in R^n$, e existe um conjunto de restrições, igualdades ou desigualdades, que os elementos de A devem satisfazer. O domínio A de f é chamado de espaço de busca ou conjunto de escolha, enquanto que os elementos de A são chamados de soluções candidatas ou soluções viáveis.

A função f é comumente chamada de função objetivo. Uma solução viável que minimiza ou maximiza a função objetivo é chamada de solução ótima. Vale mencionar que maximizar uma função positiva é a mesma coisa que minimizar uma função negativa. Por convenção, os problemas de otimização são tratados como problemas de minimização. Por exemplo, ao minimizar a maleabilidade, que é o oposto à dureza, de uma estrutura, maximiza-se a sua dureza.

A segunda abordagem para a solução do problema é denominada abordagem de síntese ou otimização. Nessa abordagem são utilizados métodos computacionais de otimização que realizam uma busca da solução ótima, de forma iterativa, ou seja, o projetista irá buscar a(s) solução(ões) ótima(s) para os parâmetros e condições iniciais delimitados (Carbono, 2005). Também é possível que um algoritmo procure dentro de uma combinação de soluções definidos pelos parâmetros de entrada, a combinação que fornece o melhor desempenho do equipamento. A utilização de um algoritmo de otimização torna sistemática e automática a busca pelo ponto ótimo, ou seja, independente da experiência do projetista. Assim, o tempo de soluções de problemas de otimização são reduzidos para algumas horas. Dessa forma o termo de otimização é corretamente utilizado quando é utilizado um método matemático de busca sistemática de solução ótima e não simplesmente quando se executa uma análise de diferentes configurações de projetos propostas baseadas na tentativa e erro (Carbono, 2005).

A função objetivo está relacionada com o parâmetro que queremos maximizar ou minimizar. No caso de uma peça mecânica a função objetivo pode ser, por exemplo, a massa, o volume e até o fator de segurança. As restrições são limites impostos à solução da otimização, podendo ser representada pela massa ou volume máximo que a peça pode apresentar e até o deslocamento máximo ou o valor de tensão mecânica máxima que pode ocorrer num certo ponto da peça. Ou seja, as restrições em geral impõem uma solução de compromisso no direcionamento da função objetivo e seu resultado (Carbono, 2005).

As variáveis de projeto são os parâmetros que podem ser alterados na otimização, a fim de obter uma função objetivo ótima. Essas variáveis podem ser as dimensões da peça, os parâmetros matemáticos de uma curva ou superfície que representam a forma da peça, ou distribuição de material em seu domínio.

Uma grande aplicação de métodos de otimização na criação de componentes mecânicos é na criação de próteses e órteses para pessoas portadoras de necessidades especiais, exemplificada pela prótese de quadril, objeto de estudo do paper *Topological optimization in hip prosthesis design* (Fraldi et al. 2009). Os autores demonstram no artigo que é possível reduzir a massa da prótese em até 85% sem alterar condições significativas de segurança e ergonomia, diminuindo o impacto causado no paciente que vier a utilizar essa prótese. Os resultados da otimização são apresentados na Figura 7.

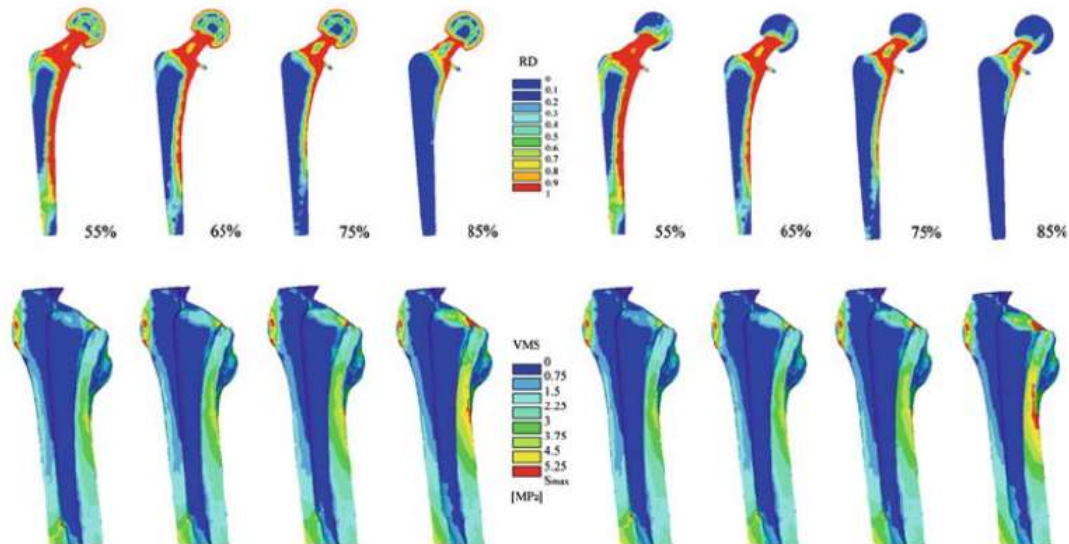


Figura 7: Resultados de otimização em prótese de quadril - Fonte: Fraldi et al. 2009

A otimização estrutural contempla essencialmente três tipos de abordagens: paramétrica, de forma e topológica.

A forma como a otimização estrutural é abordada em cada um dos métodos é diferente. Na otimização paramétrica trabalha-se com a variação de parâmetros da estrutura como espessura, comprimentos, módulo de elasticidade do material, por exemplo para minimizar a flexibilidade, neste caso o domínio de projeto é conhecido e fixado durante o processo de otimização. Já o objetivo da abordagem de forma é encontrar a melhor geometria para o domínio pré determinado, portanto o domínio passa a ser a variável do projeto. Por fim, o método de otimização topológica, de um modo geral, determina qual é a melhor distribuição de massa para otimizar a estrutura, ou seja, para maximizar uma determinada medida de desempenho.

2.3.1 Otimização Paramétrica

Nesse tipo de otimização as variáveis de projeto são definidas por parâmetros. Assim, esse tipo de otimização não altera a topologia na região de domínio, onde é definida a equação de estado do problema.

O valor ótimo é alcançado através do algoritmo computacional, que encontra as diversas combinações possíveis entre os parâmetros estabelecidos na função objetivo para uma condição de restrição imposta ao projeto. Nas Figuras 8 e 9 é possível observar a otimização das variáveis de projeto, onde a forma é mantida, mas o seu

aspecto é alterado. O processo de otimização permite a redução das dimensões de apoio "D1", mantendo os outros parâmetros (Vieira, 2016).

Este método foi o primeiro a ser desenvolvido pela indústria aeroespacial para minimizar o peso da estrutura, e para exemplificar, pode-se citar a otimização paramétrica de placas formadas por materiais compostos laminados, onde as variáveis de projeto são a espessura do laminado e a orientação das fibras.

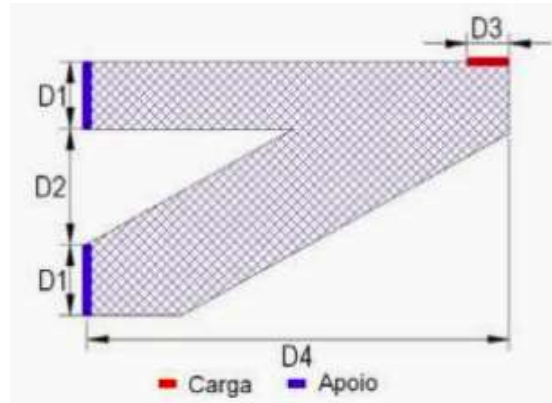


Figura 8: Problema Inicial - Fonte: Vieira, 2016

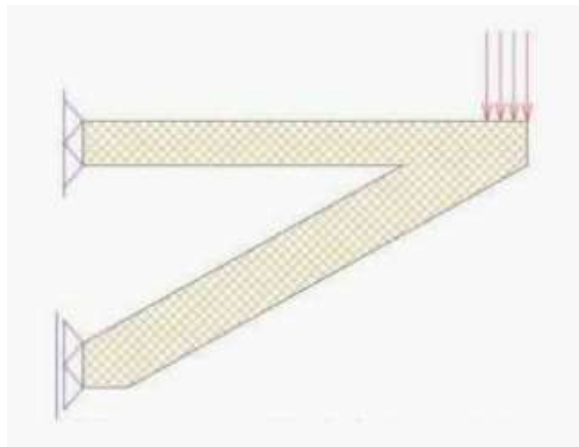


Figura 9: Resultado Final - Fonte: Vieira, 2016

2.3.2 Otimização de Forma

As variáveis de projeto podem ser parâmetro definidores de uma curva (spline, por exemplo) que definem as coordenadas dos pontos de contorno de um componente. Neste caso, os parâmetros da curva constituem as variáveis de projeto. Utilizando um software de otimização determinam-se os parâmetros ótimos das curvas splines, e, portanto, a forma ótima para o projeto.

Devido às formas complexas que podem ser obtidas é utilizado em geral o método de elementos finitos (MEF) para a análise das estruturas durante a otimização. A principal desvantagem da otimização de forma nesse caso é que com a alteração da forma da estrutura a malha de MEF é distorcida exigindo um remalhamento do domínio durante a otimização (Vieira, 2016).

2.3. OTIMIZAÇÃO

Em um procedimento típico de otimização de forma tem-se o projeto inicial com um carregamento correspondente e a região de domínio, como na Figura 10. Então são especificadas as direções e regiões em que se deseja alterar a forma. Mediante essa informação o software realiza uma análise de sensibilidade em cada uma dessas direções, ou seja, ele avalia o quanto a mudança da forma em cada direção influencia na melhora da função objetivo. Terminada a análise de sensibilidade o software decide o quanto alterar (ou não) a forma em cada direção especificada. Trata-se de um processo iterativo que após algumas iterações fornece o resultado final (Figura 11).

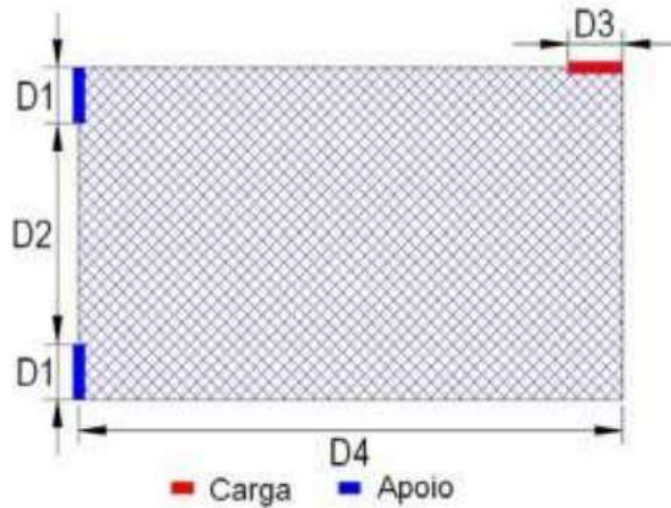


Figura 10: Problema Inicial - Fonte: Vieira, 2016

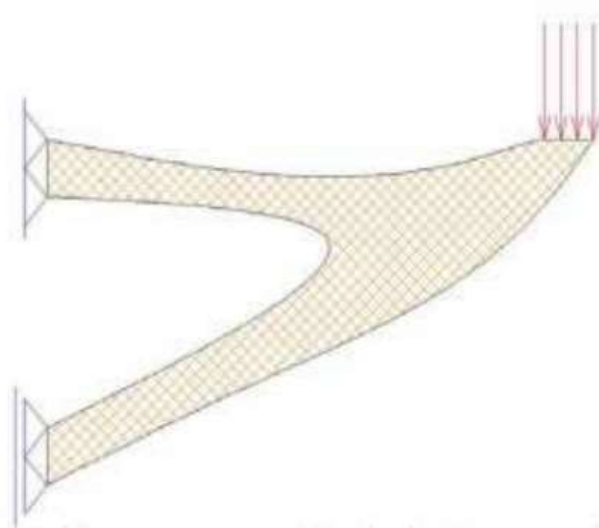


Figura 11: Resultado Final - Fonte: Vieira, 2016

2.3.3 Otimização Topológica

Consiste em um método computacional que permite projetar a topologia ótima de estruturas segundo certos critérios. Basicamente, o método de otimização topológica distribui o material no interior de um domínio fixo de forma a maximizar ou minimizar uma função custo especificada.

A otimização topológica pode ainda ser definida como um método numérico para encontrar a distribuição ótima de material dentro de um domínio de projeto pré-definido de modo a atender as condições de projeto. O material em cada ponto do domínio pode variar de “vazio” (não há presença de material) até “sólido” (total presença de material) podendo assumir densidades intermediárias entre ar e sólido de acordo com um modelo de material definido (Vieira, 2016). Nas Figuras 12 e 13 tem-se um exemplo típico de otimização topológica.

Em um procedimento típico usando a otimização topológica, primeiramente se define o domínio no qual o projeto pode existir. Esse domínio é limitado pelas condições de contorno da estrutura e pelos pontos de aplicação de carga. Outras limitações podem estar relacionadas com a restrição do espaço ocupado.

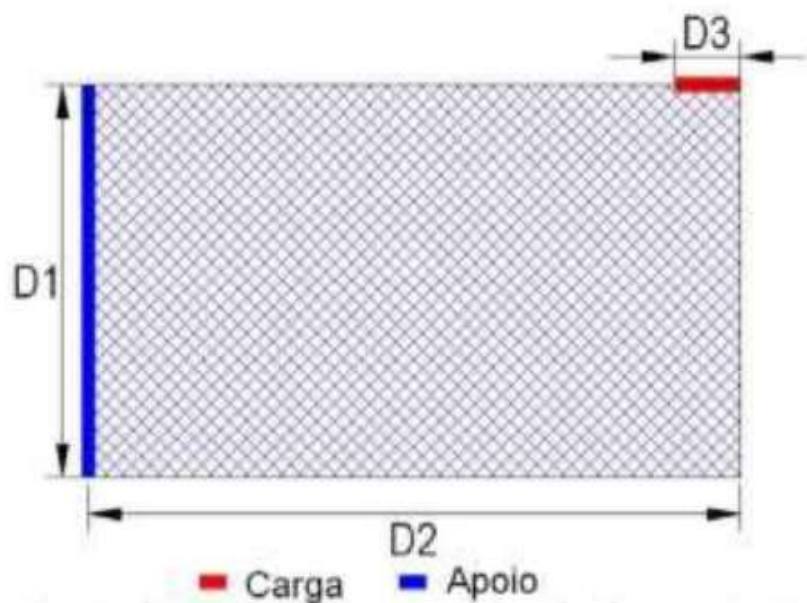


Figura 12: Problema Inicial - Fonte: Vieira, 2016

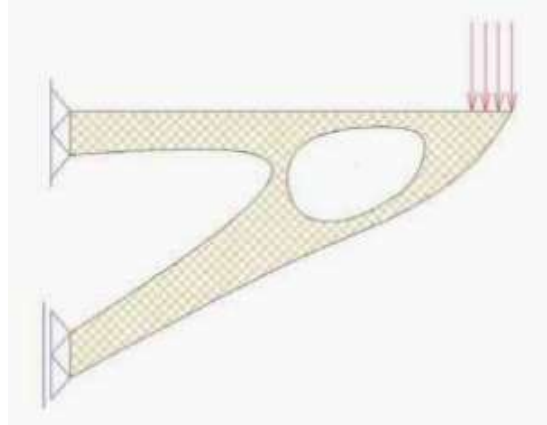


Figura 13: Resultado Final - Fonte: Vieira, 2016

A título de comparação, na Figura 14 o problema inicial de uma viga com carregamento no centro é mostrado ao lado esquerdo e a solução de cada otimização à direita.

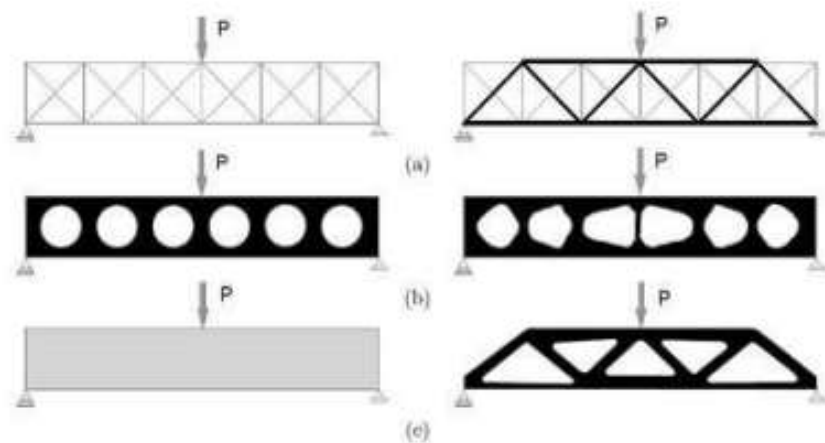


Figura 14: As três categorias de otimização. a) Otimização Paramétrica de uma estrutura treliçada b) Otimização de forma c) Otimização Topológica

2.3.4 Exemplo

Um exemplo clássico para problemas de otimização e suas diferentes metodologias é o problema da treliça. Neste problema, deseja-se reduzir o peso do elemento da treliça através de diferentes formas de otimização, baseando-se na função objetivo, representada na equação (10):

$$f = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot L_i \cdot A_i \quad (10)$$

Sendo f a função objetivo do problema, neste caso a massa, n o número total de barras na treliça, ρ_i a massa específica do material das barras, L_i o comprimento de cada barra e A_i a área da seção transversal de cada barra. O web site Altair Blog,

no texto "5 Ways to Optimize Your Design" possui uma breve introdução à diferentes tipos de otimização para o problema da treliça. Na Figura 15 ele mostra a estrutura original, composta por tubos quadrados e que devem suportar um determinado peso, posicionado no círculo vermelho. Para cada método introduzido ao longo do texto, inclusive passando pelos métodos supracitados (de forma, paramétrica e topológica), o autor apresenta o resultado da estrutura após a utilização do método.

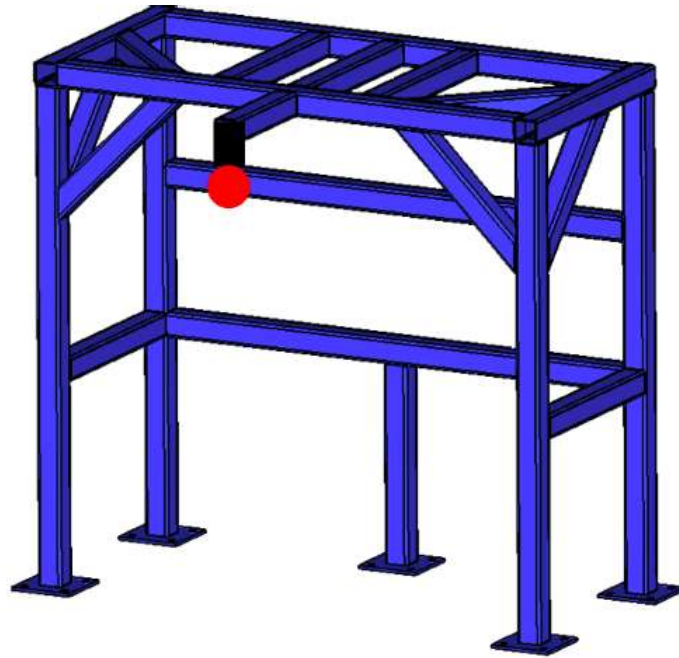


Figura 15: Modelo de estrutura treliçada utilizada no exemplo do blog Altair

De Forma

A otimização de forma permite que os usuários modifiquem alguns parâmetros da geometria para alcançar um design mais otimizado. Dentro da estrutura tubular, a seção transversal de cada tubo pode ser modificada em tamanho, ajustando as dimensões e a forma geral, alterando o tubo para quadrado, retangular, horizontal ou vertical.

A figura 16 mostra quanto as seções cresceram em qualquer direção para determinar a estrutura mais leve que atende aos requisitos.

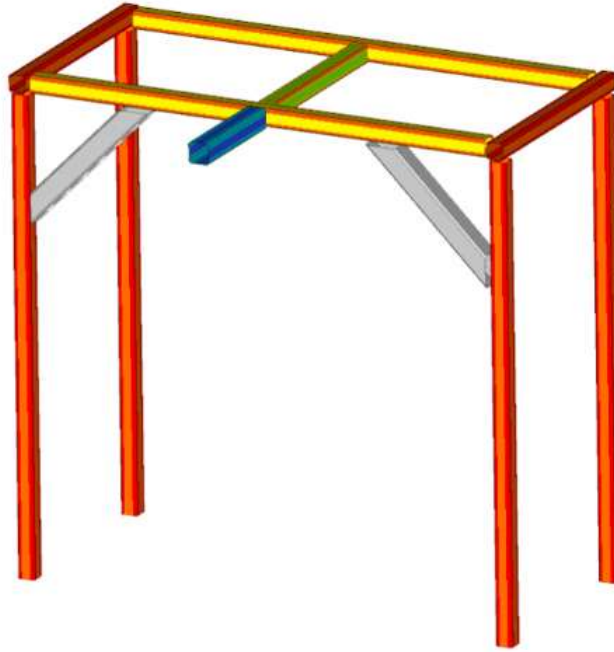


Figura 16: Resultado da otimização de forma apresentada no exemplo do blog Altair

Topológica

A otimização da topologia 3D identificará os caminhos de carga ideais a partir do espaço de design disponível, com base nos cenários de carregamento definidos e nas restrições definidas.

Para a estrutura considerada, o espaço do design é mostrado em azul. O interior da estrutura foi deixado aberto, assim como o design original. O tubo pendente foi excluído da otimização da topologia 3D, pois não afeta os caminhos de carga.

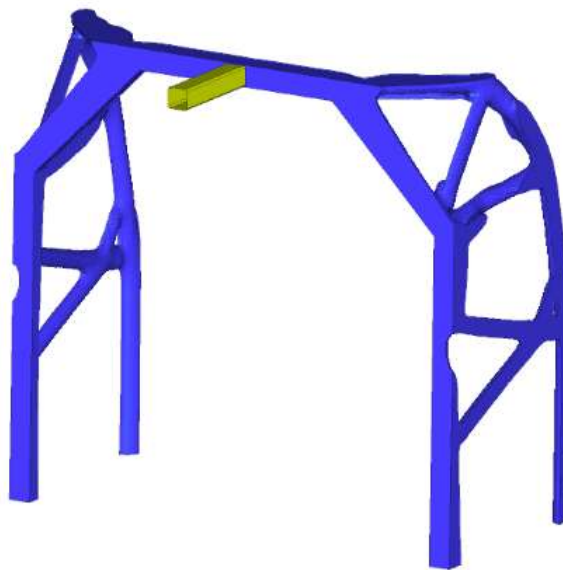


Figura 17: Resultado da otimização topológica apresentada no exemplo do blog Altair

Durante a análise, a otimização da topologia 3D esculpe o material desnecessário,

2.4. PROJETO DE EXPERIMENTOS E MODELAGEM DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

mostrando apenas os principais caminhos de carga da estrutura.

Paramétrica

Em uma otimização paramétrica, é possível definir parâmetros para forçar a estrutura a usar seções transversais de tamanho padrão e variar os medidores também pode ser adicionado à análise para obter uma solução mais acessível. Esta figura mostra a mudança de forma à esquerda e o valor da espessura à direita para uma solução final para a otimização abrangente de tamanho e forma.

A figura 18 mostra quanto as seções cresceram em qualquer direção para determinar a estrutura mais leve que atende aos requisitos.

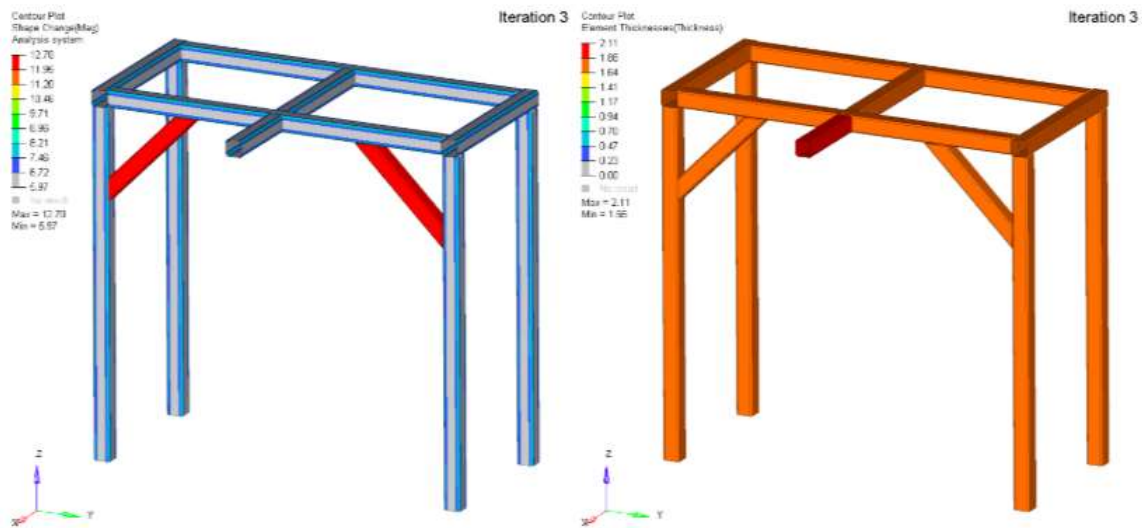


Figura 18: Resultado da otimização paramétrica apresentada no exemplo do blog Altair

2.4 Projeto de Experimentos e Modelagem de Superfície de Resposta

Os métodos de otimização conhecidos como técnicas de programação matemática são geralmente estudado como parte da Pesquisa Operacional. Este é um ramo da matemática que emprega métodos e técnicas científicas para resolver problemas de decisão com o objetivo de estabelecendo soluções ótimas. O Projeto de Experimentos ou Design of Experiments (DOE) é um desses área bem definida de pesquisa operacional que permite analisar o dados experimentais e construir modelos empíricos para obter a representação mais precisa da situação física.

As análises estruturais de engenharia são geralmente realizadas usando o Método de Elementos Finitos. Esse método é um procedimento numérico para análise de estruturas através da divisão da peça em pequenos elementos. Para isso, o uso de modelos aproximados objetiva substituir modelos reais por modelos com aproximações e considerações que diminuem o custo computacional da análise. Para isso, alguns modelos são utilizados, dentre eles modelos de aproximação e modelos funcionais (Fonseca, 2015).

Os modelos de aproximação podem ser classificados em dois tipos: modelos físicos, que são soluções numéricas das equações governantes dos sistemas físicos; e modelos

funcionais, que são aproximações funcionais das soluções das equações construídas sem recorrer ao conhecimento do sistema físico, ou seja, usando somente os valores da função.

Dentro dos modelos funcionais, se distinguem dois tipos de modelos: modelos interpolantes e modelos não interpolantes. Os modelos interpolantes passam pelos dados fornecidos enquanto os modelos não interpolantes não cumprem com isto, mas incorporam certo grau de flexibilidade (se incorporar mais dados) na aproximação (Fonseca, 2015).

Exemplos de modelos do tipo funcional são interpolações polinomiais, splines, redes neurais, e outros tipos de ajustes de curvas, particularmente os modelos de superfícies de resposta, e modelos de mínimos quadrados.

O modelo aproximado requer informações da função f a ser aproximada. O processo comum consiste em obter pontos (amostras) onde se avalia f para depois obter o modelo aproximado seja por interpolação ou por ajuste. O processo que seleciona os pontos é conhecido como amostragem. Nesta é preciso selecionar cuidadosamente os pontos para cumprir os critérios requeridos pelo modelo, por exemplo, quantidade de pontos requeridos e regularidade na distribuição (conjunto bem posto). As estratégias de amostragem geralmente visam a distribuição uniforme dos pontos com a finalidade de que eles obtenham a melhor caracterização da função na região de aproximação (Fonseca, 2015).

A seleção de pontos no espaço de projeto onde a resposta tem que ser avaliada é frequentemente chamada projeto de experimentos. Assim, um projeto de experimentos representa a sequência de experimentos (análises) a ser realizada, expressa em termos de fatores (variáveis de projeto) fixos em níveis especificados (valores predefinidos). Um projeto experimental é comumente representado pela matriz onde as linhas denotam execuções de experimentos, e as colunas denotam as configurações de um dado fator. Assim, X pode ser representada pela Matriz (11):

$$\begin{bmatrix} x_1^{(1)} & x_2^{(1)} & \cdots & x_n^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^{(n)} & x_2^{(n)} & \cdots & x_n^{(n)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

"Na maioria das aplicações onde assume-se que não é conhecido o comportamento da função, e os dados são colecionados a partir de simulações computacionais determinísticas, o principal interesse é minimizar o erro de desvio (bias error) já que o erro aleatório é pequeno. Para ter um ponto de vista estatístico de comparação dos diferentes projetos de experimentos explica-se a seguir o significado dos termos desvio e variância.

desvio (bias): quantifica a magnitude em que a saída do modelo aproximado (resposta), ou seja $f'(x)$ difere do valor real $f(x)$. O desvio se calcula como a média de todos os conjuntos de dados possíveis D .

variância (var): mede quão sensível é o modelo aproximado $f'(x)$ ao conjunto particular de dados D . Cada conjunto de dados D corresponde a uma amostra aleatória da função real.

Para uma formulação de erro médio as expressões para desvio e variância se mostram nas equações (12) e (13) respectivamente. Nas duas expressões E_{TCD} denota o

valor esperado considerando todos os conjuntos de dados possíveis" (Fonseca, 2015).

$$E_{bias}(x) = E_{TCD} \cdot f'(x) - f(x)^2 \quad (12)$$

$$E_{var}(x) = E_{TCD} \cdot f'(x) - E_{TCD} \cdot f(x)^2 \quad (13)$$

Existe uma relação entre o desvio e a variância. Um modelo aproximado que ajusta estreitamente um conjunto particular de dados (pouco desvio) tenderá a prover uma grande variância. Podemos diminuir a variância ao suavizar o modelo aproximado, mas ao simplificar demais o modelo o erro de desvio fica significativamente grande. Em princípio, podemos reduzir tanto o desvio (pode-se escolher modelos mais complexos) como a variância (cada modelo mais fortemente restringido pelos dados) ao aumentar o número de pontos de maneira que o aumento na restrição feita pelos dados seja maior que o aumento na complexidade do modelo.

Na prática, o número de pontos no conjunto de dados é fortemente limitado devido ao custo computacional, por isto durante a construção do modelo aproximado frequentemente procura-se um equilíbrio entre os erros originados por desvio e os causados por variância. Este equilíbrio pode ser atingido reduzindo o erro de desvio enquanto se impõem penalidades na complexidade do modelo. No trabalho, o tipo de projeto de experimento utilizado foi a Amostragem por Hiper cubo Latino (LHS, Latin Hypercube Sampling).

2.4.1 LHS - Latin Hypercube Sampling

Nos projetos de experimentos procura-se uma metodologia que maximize ou minimize a função objetivo, dentro de parâmetros preestabelecidos no projeto. Para isso, deve-se utilizar um método de amostragem que abranja um espectro de variáveis, selecionando de forma estratificada. Um método de realizar essa estratificação é a Amostragem por Hiper cubo Latino (LHS, Latin Hypercube sampling).

Uma amostragem estratificada garante que todas as porções de uma dada região sejam amostradas. LHS é uma estratégia de amostragem estratificada onde o domínio de cada variável aleatória $x_k (k = 1, \dots, M)$ é dividido em N intervalos, $x_i^k (i = 1, 2, \dots, N)$ de igual probabilidade $1/N$. nas Figuras 19 e 20 são apresentadas duas variáveis aleatórias, uma tendo distribuição normal e outra, distribuição uniforme. O domínio de cada variável foi dividido em quatro intervalos, cada intervalo representando 25% do valores do eixo x .

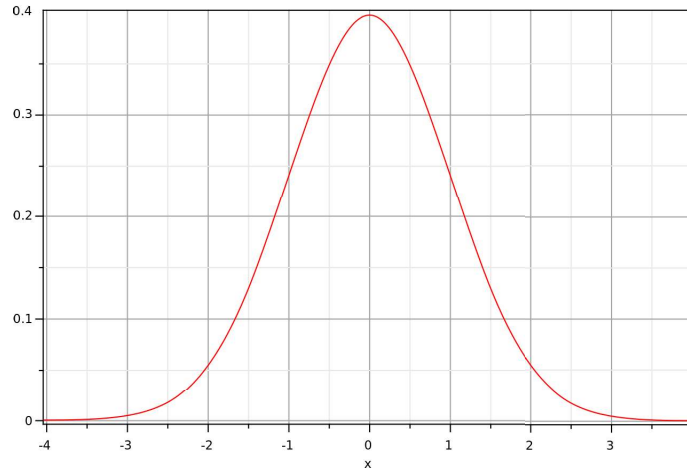


Figura 19: Distribuição Normal

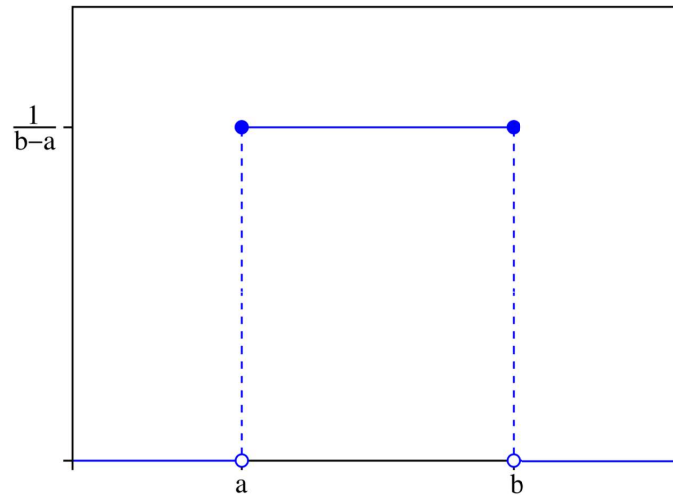


Figura 20: Distribuição Uniforme

O número de intervalos N na Amostragem por Hipercubo Latino deve ser igual ao da amostra desejada, ou seja, igual ao número total de simulações. Para cada intervalo é mostrado apenas um valor (x_i^k), isto é, este valor será usado apenas em uma simulação.

Os valores mostrados x_i^k , para um valor i qualquer, são obtidos pela resolução da equação (14):

$$F_k(x_i^k) = \frac{i - 1 + R_i}{N} \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (14)$$

onde R_i representa uma distribuição aleatória uniforme no intervalo $[0, 1]$.

A amostragem é realizada utilizando a transformada inversa da função de distribuição de probabilidade em questão, como na equação (15).

$$x_i^k = F_k\left(\frac{i - 1 + R_i}{N}\right) \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (15)$$

2.4. PROJETO DE EXPERIMENTOS E MODELAGEM DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Como exemplo da amostragem por hipercubo latino, há duas variáveis, uma com distribuição normal e a outra com distribuição uniforme. Na Figura 21 são apresentados quatro valores selecionados aleatoriamente para cada variável, marcando-os em seus respectivos eixos.

"Com os N valores para cada variável x_k , esses devem ser emparelhados de forma aleatória com os valores das demais variáveis. Dessa forma, são formados N vetores de dimensão M . A seleção aleatória do n -ésimo valor de cada variável é realizada mediante a permutação aleatória dos inteiros $1, 2, \dots, N$. Na Figura 22 é apresentada uma possível amostra de quatro pontos gerados utilizando a amostragem por hipercubo latino do exemplo discutido" (Fonseca, 2015).

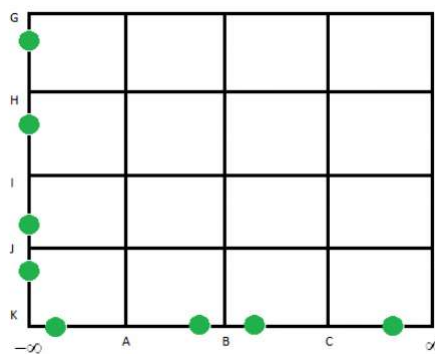


Figura 21: Pontos selecionados - Fonte: Fonseca, 2015

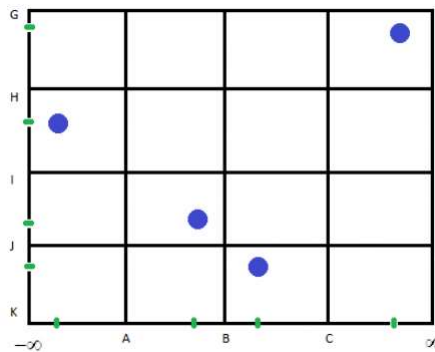


Figura 22: Distribuição da Combinação de pontos

CAPITULO 3

CONDIÇÕES INICIAIS DE PROJETO E ANÁLISE ESTÁTICA

A otimização, no final das contas, é um processo iterativo objetivando a redução de algum parâmetro crítico do projeto, seja esse formato, peso, densidade, entre outros. Para isso, um ciclo de análise estrutural e otimização muitas vezes não é o suficiente necessitando assim, etapas subsequentes para aprimorar os resultados de forma contínua, chegando em um ponto de convergência aceitável para as condições e restrições do projeto.

Com um processo iterativo é possível realizar as diversas e repetidas etapas de otimização seguindo um script, a fim de padronizar os processos e agilizar a resolução, sendo esse script automatizado ou "manual".

Porém, passos anteriores à otimização são necessários para se dar início ao processo. Os primeiros passos serão os de definição do corpo de prova e a classe da análise a ser feita, dentro das 7 análises citadas no capítulo 2 seção 2.1 *ANSYS*.

Um dos tipos de análises de estruturas mais utilizados, comumente utilizado ao longo da graduação, é a análise estática que é usada para calcular deslocamentos, deformações, tensões, etc. em um corpo sob condições de cargas estáticas, portanto essa será o módulo do ANSYS a ser utilizado.

Para o corpo, de prova foi escolhido a análise de um componente de um Trem Epicicloidal ou Trem de Engrenagens Planetárias (TEP), um sistema de transmissão e multiplicação/redução de rotações presentes em diversos mecanismos como motores e aerogeradores. Este é um sistema familiar aos estudantes de engenharia mecânica, sendo estudado em diversas matérias sua formulação, desenvolvimento e produção. Na Figura 23 é possível enxergar uma representação esquemática dos componentes de um trem epicicloidal, onde a engrenagem central é chamada de solar, as engrenagens que giram em torno dela são chamadas de planetárias e a engrenagem de dentes internos, onde as planetárias também se engrenam, é chamada de engrenagem anelar. O elemento que suporta o eixo móvel dos planetas e que pivota em torno do eixo principal do TEP, é chamado de braço.

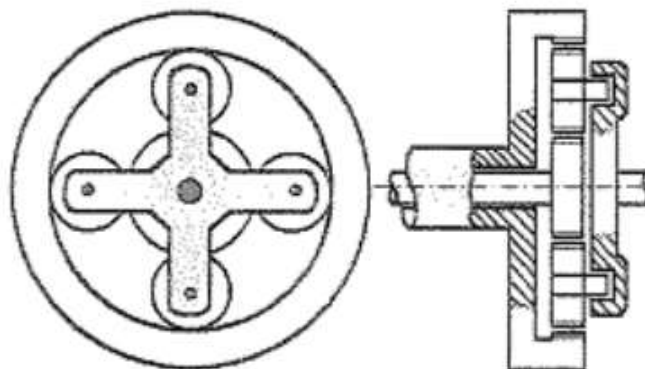


Figura 23: Representação esquemática de um Trem Epicicloidal - Fonte: <http://tinyurl.com/y27gog97>

Um componente importante para o bom funcionamento do TEP e que possui um grande potencial em ser otimizado por ser um corpo inicialmente sólido, com dimensões dependentes das definições gerais do projeto, como distância dos centros das engrenagens planetárias, número de dentes das engrenagens, é o braço. Na Tabela 1 é possível ver as características iniciais do braço e algumas condições mínimas de projeto, estipuladas para serem usadas como base nos processos de otimização

Tabela 1: Características do Braço

Característica	Valor
Peso	466,25 kg
Comprimento Centro - Extremidade	500 mm
Diâmetro do Furo Central	200 mm
Espessura	150 mm
Densidade	7,86 g/cm ³
Fator de Segurança Mínimo	1,5

3.1 Análise Estática

Como mencionado no início do capítulo, usar-se-á uma análise estática dos esforços implicados à esse braço, com o intuito de obter deslocamentos, tensões e a distribuição de fatores de segurança sob uma condição de carga estática. Tal procedimento no ANSYS fornece uma ampla gama de resultados numéricos, compatíveis com o carregamento aplicado, cuja avaliação dos resultados gerados viabilizará a sua utilização na elaboração do projeto da estrutura do sistema analisado. Com isso dito, na janela principal do ANSYS seleciona-se o item *Static Structural*.

As primeiras definições serão selecionadas pelos dois primeiros campos da caixa de análise estrutural no ANSYS *Engineering Data* e *Geometry*, apresentadas nas Figuras 24 e 25. O aço selecionado foi aço AISI 1045, apresentadas na Tabela 2:

3.1. ANÁLISE ESTÁTICA

Tabela 2: Características do Aço AISI 1045

Aço AISI 1045 Temperado e Revenido

Dureza Brinell	390 HB
Limite de Resistência à Tração	1343 MPa
Limite de Resistência ao Escoamento	842 MPa
Módulo de Elasticidade	200 GPa
Massa Específica	7,86 g/cm ³

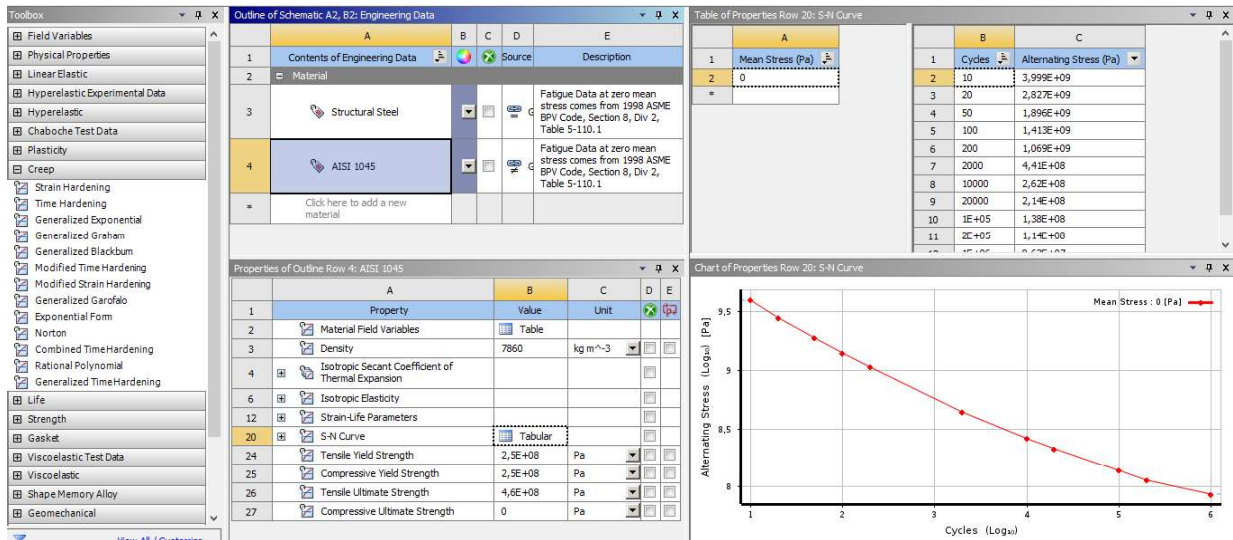


Figura 24: Configurações do *Engineering Data*

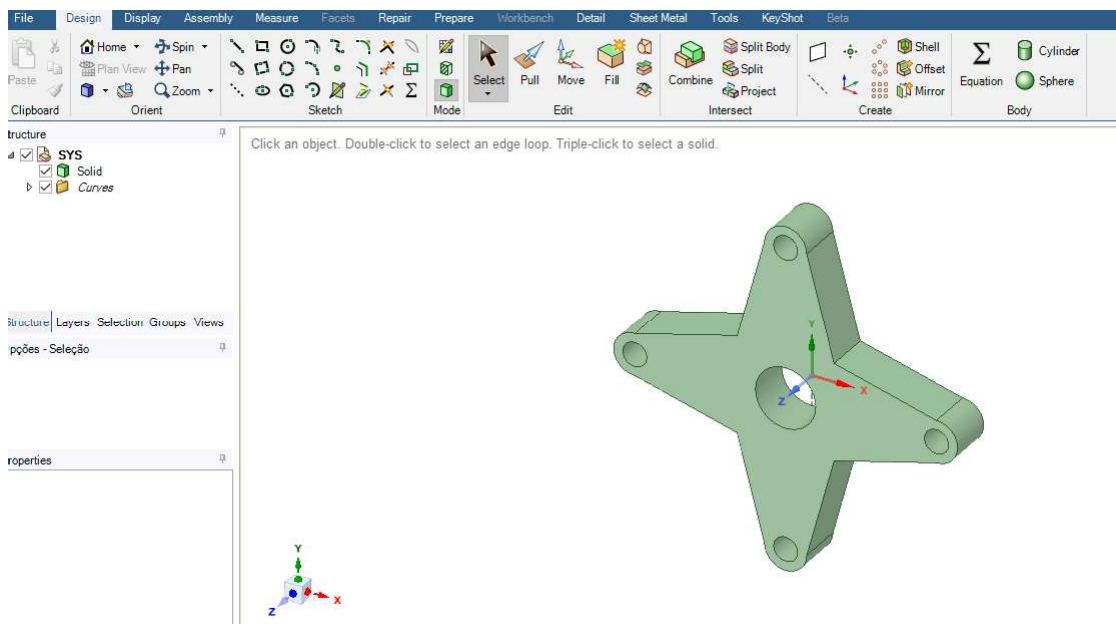


Figura 25: Interface SpaceClaim para confecção de geometrias

Os campos de *Model*, *Setup*, *Solution* e *Results* serão todos configurados e apresentados na extensão *ANSYS Mechanical*. Nesta seção do programa é detalhado o

funcionamento, bem como as configurações utilizadas para a realização das análises e o progresso das resoluções encontradas através de gráficos de convergências que posteriormente serão apresentados.

Na árvore de projeto, há as etapas anteriores do projeto de análise estática, como a geometria e o material. Faz-se necessário verificar o status destes elementos já configurados pelo símbolo presente ao lado de seu ícone. Havendo símbolos de "check" verde está indicado que o item foi importado com sucesso, como mostrado na Figura 26. Ao clicar no botão com um sinal de adição, o menu se expande, mostrando as geometrias carregadas. No caso de uma montagem haverão vários itens, de forma que pode-se configurar cada um deles independentemente, esta opção é útil por exemplo no caso de se desejar utilizar materiais diferentes.

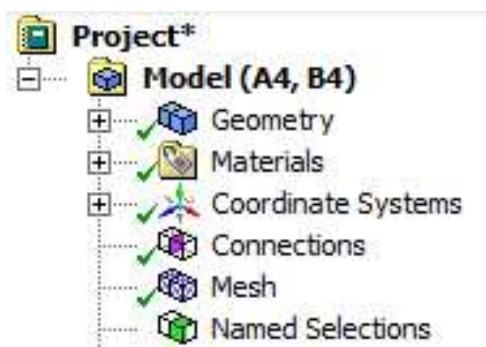


Figura 26: Exemplo de árvore de trabalho com todos os itens verificados

3.1.1 MALHA

Com esses pontos iniciais verificados, o primeiro passo para a análise estática no Ansys Mechanical é a definição da malha de elementos finitos a ser aplicada ao corpo. As configurações de malha pertinentes neste trabalho são apresentadas no estudo mostrado entre as Figuras 27 a 29, cada uma alterando as seguintes configurações:

- *Default:*
 - *Physics Preference:* permite que você estabeleça como o Workbench executará a malha com base no tipo de análise que você especificar. Seu valor define o padrão para vários controles de malha;
 - *Preference:* permite controlar o refinamento da malha para todo o modelo.
- *Sizing:*
 - *Curvature Size:* examina a curvatura nas arestas e faces e calcula o tamanho dos elementos nessas entidades de modo que o tamanho não viole o tamanho máximo ou o ângulo normal da curvatura, o que são calculados automaticamente pelo gerador de malha ou definidos pelo usuário;
 - *Growth Rate:* representa o aumento no comprimento da aresta do elemento com cada camada subsequente de elementos. Por exemplo, uma taxa de crescimento de 1,2 resulta em um aumento de 20 % no comprimento da aresta do elemento a cada camada subsequente.

- *Relevance Center*: determina ajustes referentes à geometria dos elementos, como fronteiras, furos e filetes;
- *Smoothing*: permite melhorar a qualidade do elemento, movendo as localizações dos nós em relação aos nós e elementos circundantes. A opção *Low*, *Medium* ou *High* controla o número de iterações de suavização ao longo da métrica de limite em que a malha começará a suavizar;
- *Transition*: afeta a taxa na qual os elementos adjacentes crescerão. *Slow* produz transições suaves enquanto *Fast* produz transições mais abruptas.

Novamente, vale mencionar que é possível realizar inúmeras configurações de malha, contudo o foco será somente nessas 7 configurações, pois são suficientes para atingir os resultados desejados. As figuras contêm para cada configuração uma imagem para representar visualmente o efeito sob a malha gerada, bem como o número de elementos gerados, a fim de que se possa avaliar a melhor escolha em termos de qualidade de malha e desempenho computacional. Por se tratar da versão estudantil do ANSYS, as opções de *Curvature Size*, *Transition* e *Growth Rate* se mantiveram constantes durante todas as iterações.

Estabeleceu-se um padrão das configurações em:

- *Physics Preference: Mechanical*;
- *Relevance: 0*;
- *Curvature Size: Normal Angle*;
- *Transition: Fast*;
- *Growth Rate: 1,2*;
- *Relevance Center: course*;
- *Smoothing: medium*.

Nas Figuras 27 e 28 escolhe-se alterar o parâmetro *Relevance* mantendo os outros parâmetros fixos na configuração padrão. Esta opção é um ajuste global do tamanho da malha, pode assumir valores entre -100" e "100". De forma que -100" temos uma malha mais grosseira e em "100" temos uma malha mais refinada.

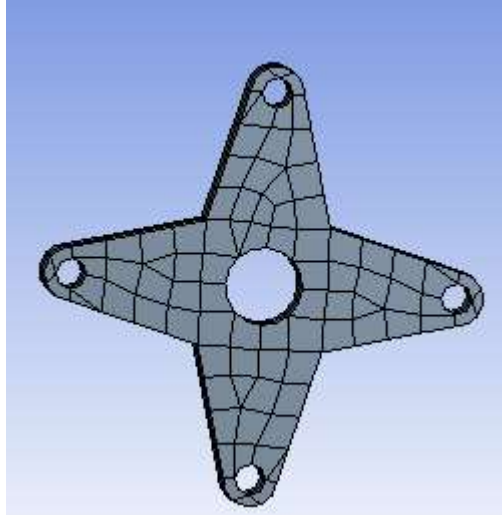


Figura 27: Configuração de malha de elementos finitos com *Relevance* - 100

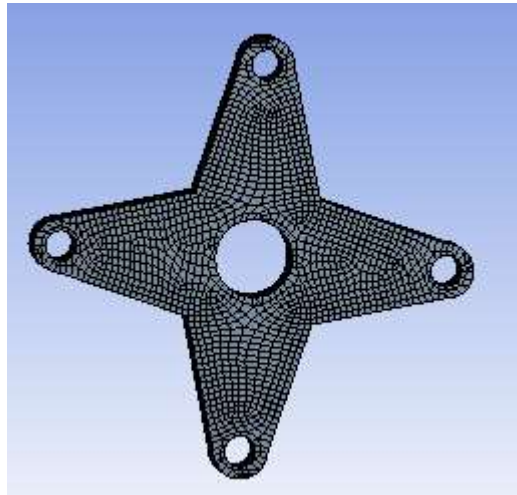


Figura 28: Configuração de malha de elementos finitos com *Relevance* 100

A quantidade de nós para uma *Relevance* "100" foi de 1803, já para "100" foi de 67138, lembrando que há uma limitação a geração de nós pela versão estudantil do software.

Na Figura 29 escolhe-se alterar o parâmetro *Relevance Center* mantendo os outros parâmetros fixos na configuração padrão. Esta opção determina ajustes referentes à geometria dos elementos, podendo escolher entre Coarse que é um ajuste grosseiro, Medium e Fine que é o mais fino.

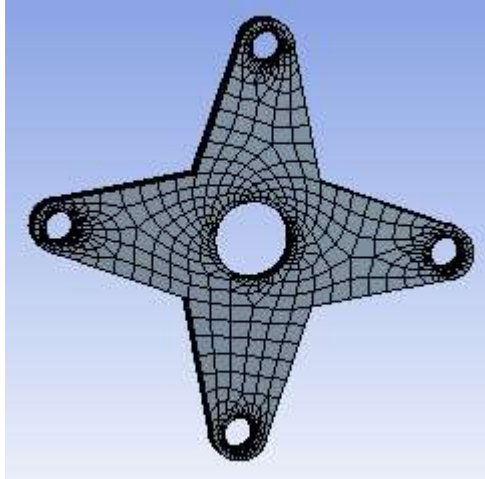


Figura 29: Configuração de malha de elementos finitos com *Relevance Center Fine*

A quantidade de nós para uma *Relevance Center Course* (grosseiro) foi de 3070, já para *Fine* foi de 45804.

Já nas Figuras 30 e 31 escolhe-se alterar o parâmetro *Smoothing* mantendo os outros parâmetros fixos na configuração padrão. Esta opção determina como os elementos da malha serão organizados e como será a transição entre eles e dependendo da geometria em questão, uma opção apresenta uma melhor configuração que outra. Por exemplo, se temos uma peça onde a região de interesse são furos, pode-se utilizar a opção *High*. Neste trabalho tem-se algumas superfícies curvas, portanto esta opção seria uma possível escolha. Deve-se então avaliar as outras opções e verificar se a malha resultante descreve bem as regiões de interesse.

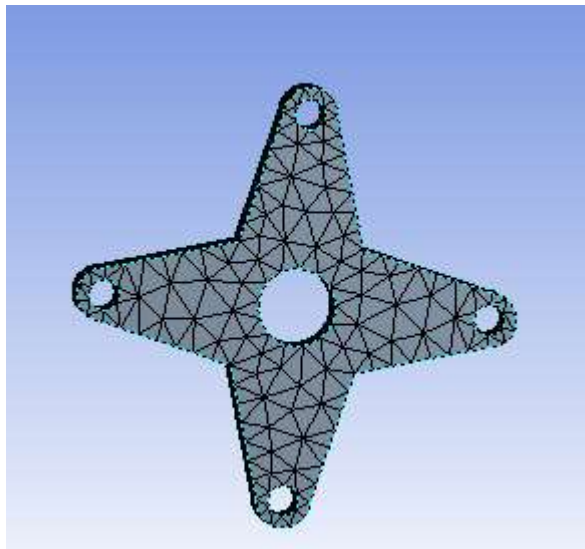


Figura 30: Configuração de malha de elementos finitos com *Smoothing Low*

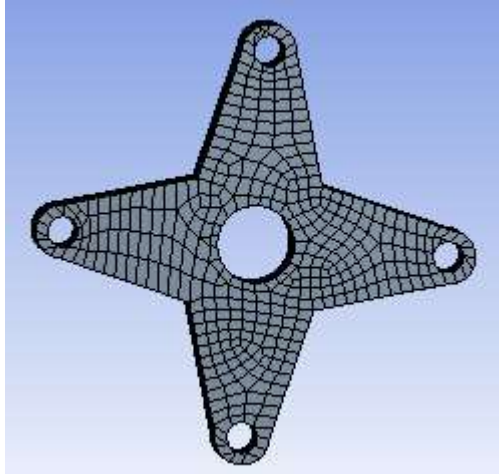


Figura 31: Configuração de malha de elementos finitos com *Smoothing High*

A quantidade de nós para uma *Smoothing Low* foi de 3078, já para *High* foi de 12191.

Com esses pontos apresentados, a configuração da malha escolhida foi:

- *Physics preference: Mechanical;*
- *Relevance: 20;*
- *Smoothing: High;*
- *Relevance Center: Medium;*
- *Curvature Size: Normal Angle;*
- *Transition: Fast;*
- *Growth Rate: 1,2.*

Essa configuração de malha selecionada gera uma quantidade de nós igual 30.522. Essa não é a malha que gera resultados mais precisos, pois a versão do ANSYS utilizada nesse projeto é a versão estudantil e ela limita o número máximo de nós avaliados em uma análise estática em 32.000 nós. Porém, respeitando o limite imposto pela versão, essa malha combina os 7 aspectos para uma malha que suporta as necessidades da otimização

CAPITULO 4

OTIMIZAÇÃO

Este capítulo trata dos três métodos de otimização a serem estudados neste projeto de graduação, a otimização paramétrica, a otimização de forma e a otimização topológica, nesta ordem. Primeiramente, para cada método, são explicadas as condições iniciais e todos os preparativos a serem feitos antes do processo de otimização ser iniciado, como inserção de parâmetros da peça, apresentação da malha gerada, características gerais da otimização, configurações, entre outros. Por fim, apresentam-se resultados preliminares das otimizações e todas as alterações realizadas na peça após o processo de otimização (mudanças de espessura e material retirado da peça, por exemplo).

4.1 Otimização Paramétrica

Para a otimização paramétrica, precisamos antes estabelecer parâmetros a serem avaliados ao longo do processo de otimização. Para isso, é preciso selecionar o parâmetro dentro da plataforma do *SpaceClaim* e clicar no símbolo *P* azul ao lado da cota, exemplificado na Figura 32. Após a seleção, todos os parâmetros estarão agrupados na aba *Groups* dentro da árvore de trabalho do *SpaceClaim*.

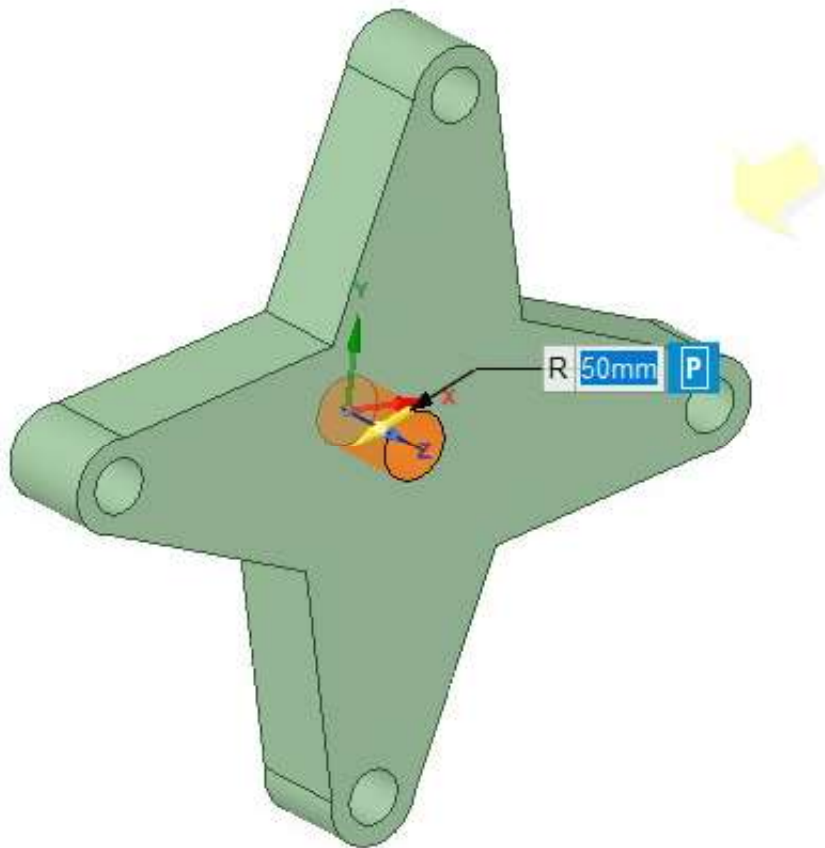


Figura 32: Inclusão de um parâmetro no *SpaceClaim*

Depois de importar a geometria, o próximo passo é o refinamento da malha gerada anteriormente. O Ansys gera uma malha automaticamente assim que o módulo Mechanical é utilizado e os parâmetros de controle da malha foram alterados pelo autor para conseguir uma malha mais refinada com um custo computacional aceitável. A Figura 33 apresenta a malha gerada.

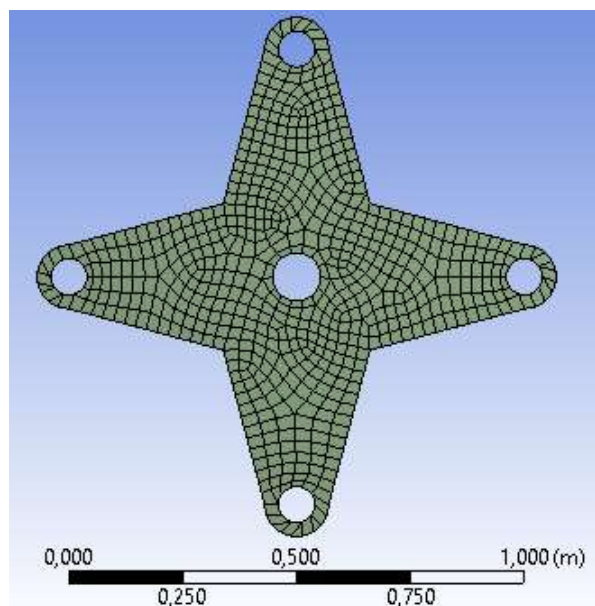


Figura 33: Malha gerada para a otimização paramétrica

4.1. OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA

O tipo de elemento utilizado foi o da malha padrão gerada pelo ANSYS, sendo este o tetraédrico de segunda ordem que contém nós nos vértices e no centro das arestas dos elementos. Em seguida, refinou-se mais a malha e realizou-se uma análise de convergência para verificar se a malha não seria uma fonte de erro.

Depois do refinamento da malha a ser utilizada inseriu-se as condições de contorno. Nessa etapa, além dos esforços e fixações descritos na seção 4.1 deste capítulo, é necessário estabelecer os pontos do corpo onde a otimização deverá ser impedida de ser feita. Todas as características da peça a serem minimizados dentro da otimização paramétrica deverão ser selecionados como parâmetros de saída (*Output Parameters*),. Para esta análise, as características da peça a sere otimizadas são:

- Massa
- Deformação total
- Fator de Segurança

ID	Parameter Name	Value	Unit
1			
2	Input Parameters		
3	Static Structural (A1)		
4	P5	Espessura	150 mm
5	P6	Raio Central	100 mm
*	New input parameter	New name	New expression
7	Output Parameters		
8	Static Structural (A1)		
9	P3	Equivalent Stress Maximum	0 Pa
10	P4	Safety Factor Minimum	0
11	P7	SYS\Solid Mass	349,66 kg
*	New output parameter		New expression
13	Charts		

Figura 34: Configuração das funções objetivos da otimização paramétrica

Um método usual de Projeto de Experimentos (*Design of Experiments* - DOE) é o método de *screening*. Esse método consiste em, para cada variável (parâmetro) presente presente no problema, variam-se valores inferiores e superiores aos valores de entrada, analisando então as alterações nos parâmetros de saída. Esse método apresenta e analisa somente um efeito linear entre quais alterações os parâmetros de entrada realizam nos parâmetros de saída, sem considerar possíveis relações entre os parâmetros de entrada.

Com essa questão apresentada, Reuber (2008) apresenta em seu trabalho uma maneira de incluir outro método de amostragem, a fim de acrescentar às análises lineares realizadas nos passos anteriores. Para isso, "inclui-se um ponto central em cada variável de entrada dos experimentos Esse ponto permite a identificação de um efeito quadrático entre as variáveis de entrada e saída, sendo que esse aperfeiçoamento é usualmente conhecido como *Response Surface Design* (RSD) para fornecer um modelo quadrático de respostas." A *Latin Hypercube Sampling* permite uma amostragem estratificada,

com cada variável sendo gerada de forma decorrelacionada com as demais, permitindo uma distribuição de combinações com um custo computacional baixo (Reuber, 2018).

Apesar de apresentar em seu trabalho que a LHS possui um custo computacional baixo, isso não se reflete, uma vez que para cada variável apresentada, uma análise completa de malhas, esforços e distribuições de fatores de segurança e de tensões deverá ser refeita, tornando-o lento. Para diminuir esse custo computacional, usa-se uma metodologia estatística para alterar cada parâmetro de entrada, mas sem realizar todas as combinações possíveis entre cada. Esses métodos são conhecidos como planejamento fatorial parcial, sendo que os dois mais populares são os *Central Composite Designs* (CCDs), representados na Figura 35, tornando os processos iterativos mais ágeis, promovendo uma diminuição das combinações, porém mantendo a quantidade de parâmetros a serem amostrados.

Nos CCDs os valores codificados em 5 níveis de cada fator são representados por $[-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha]$, onde $[-1, +1]$ corresponde ao limite físico inferior e superior do espaço do fator explorado e $[-\alpha, +\alpha]$ estabelece novos limites físicos inferiores e superiores para todos os fatores. No CCD circunscrito, o valor de α é maior que 1, já no inscrito, os valores $[-1, +1]$ são os limites físico inferior e superior verdadeiro para os experimentos, e no de face centrada, o valor de α é igual a 1 (Reuber, 2018).

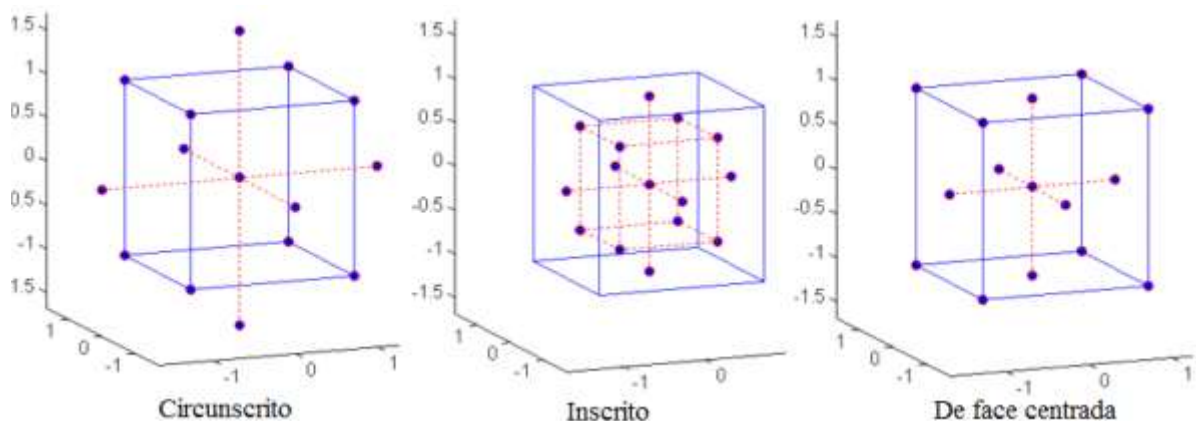


Figura 35: Formato de diferentes CCD - Fonte: ANSYS, 2013

Para realizar a otimização, primeiramente, seleciona-se a opção *Parameter Correlation*, a fim de identificar a relação entre todos os parâmetros selecionados para compor a análise de otimização, sejam eles de entrada (*inputs*) ou de saída (*outputs*). Com isso, é possível chegar na matriz de correlação representada na Figura 36, onde mostra as correlações entre os parâmetros em um espaço $[-1, +1]$, lembrando que uma correlação de -1 é uma forte correlação, porém direcionado a caminhos inversos. A escala de cores da imagem está disposta na seguinte ordem: vermelho seria correlação -1 , branco seria uma correlação 0 e azul seria uma correlação 1 .

4.1. OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA

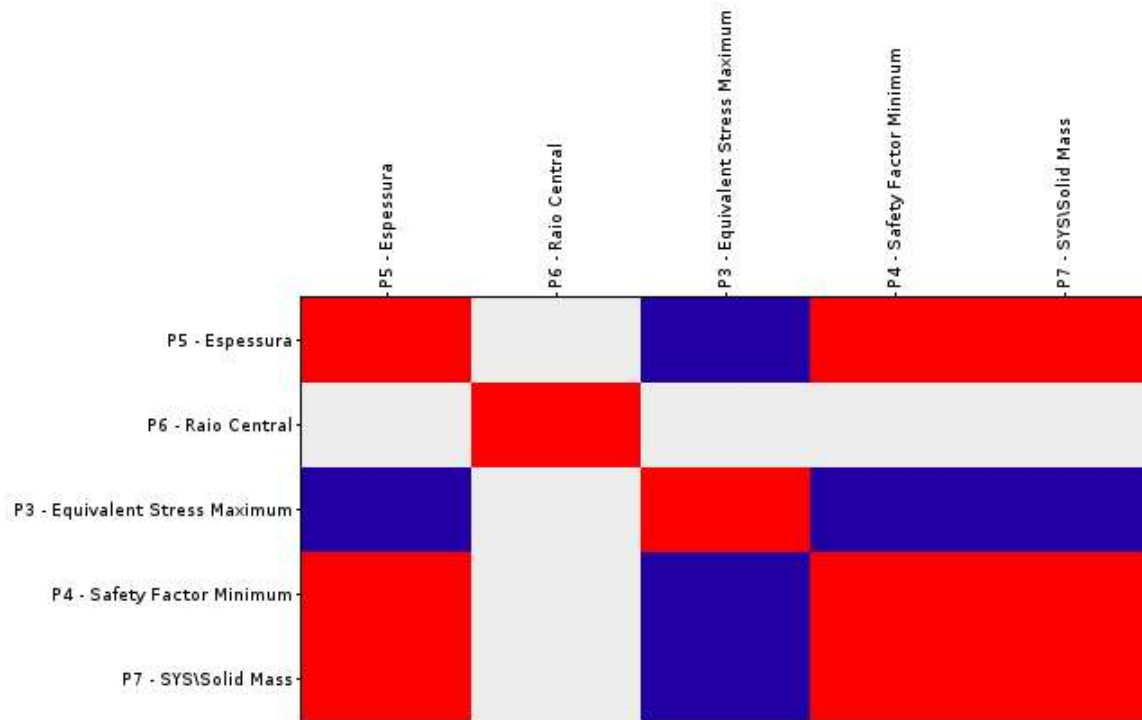


Figura 36: Gráfico de correlação dos parâmetros de entrada e saída

Após a análise de correlações, seleciona-se na *Toolbox* do ANSYS o item *Surface Parameter*, a fim de reproduzir uma superfície de resposta entre os diversos parâmetros e avaliar uma possível faixa de resultados otimizados. Para isso, faz-se necessário a configuração do Projeto de Experimentos (*Design of Experiments*), onde serão selecionados os métodos de amostragem, o número de iterações, os limites superiores e inferiores dos parâmetros e as funções objetivos da otimização, com a seleção de minimização ou maximização de um parâmetro de saída. Nas Figuras 37 e 39 estão representado o projeto de experimentos e a superfície de resposta de correlações:

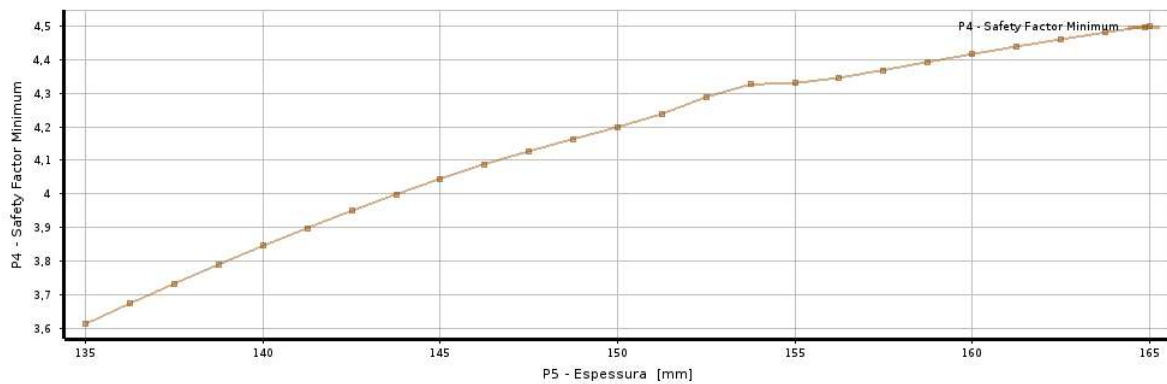


Figura 37: Relação entre dimensões de espessura selecionadas e fator de segurança resultante

4.1. OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA

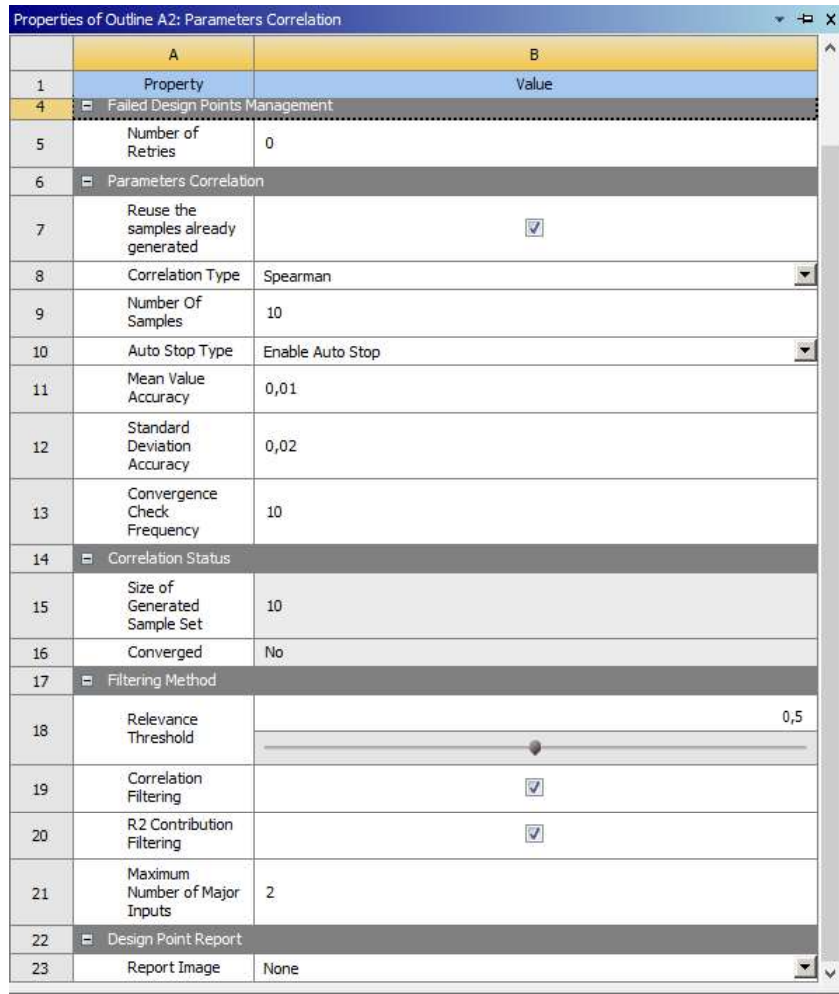


Figura 38: Configuração da geração de novos dados pela otimização paramétrica

	A	B	C	D	E	F
1	Name	P5 - Espessura (mm)	P6 - Raio Central (mm)	P3 - Equivalent Stress Maximum (Pa)	P4 - Safety Factor Minimum	P7 - SYS Solid Mass (kg)
2	1	146,67	93,333	6,0583E+07	4,1266	346,55
3	2	156,67	97,778	5,8487E+07	4,2745	366,9
4	3	136,67	91,111	6,6384E+07	3,766	324,31
5	4	153,33	100	5,7246E+07	4,3671	357,43
6	5	140	106,67	6,5699E+07	3,8052	321,6
7	6	163,33	95,556	5,5928E+07	4,47	384,25
8	7	150	108,89	5,9069E+07	4,2323	342,79
9	8	160	104,44	5,6683E+07	4,4105	369,39
10	9	143,33	102,22	6,2801E+07	3,9808	332,53

Figura 39: Configuração do Projeto de Experimentos (DOE)

Os parâmetros de saída escolhidos foram, a distribuição de tensões, o fator de segurança e a massa do sólidos, todos eles com a função objetivo de minimizá-los. A Figura 40 apresenta as funções objetivas configuradas na otimização do braço de eixo.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	Parameter	Objective		Constraint		
2			Type	Target	Type	Lower Bound	Upper Bound
3	Minimize P7	P7 - SYS\Solid Mass	Minimize		No Constraint		
4	P4 = 1	P4 - Safety Factor Minimum	No Objective		Values = Bound	1	
5	Minimize P5	P5 - Espessura	Minimize		No Constraint		
6	Minimize P6	P6 - Raio Central	Minimize		No Constraint		
*		Select a Parameter					

Figura 40: Resultado das funções objetivos após seleção de parâmetro iniciais

Observa-se que o objetivo principal foi diminuir a massa da peça, com uma restrição de fator de segurança mínimo de 1,5. Nessa etapa o Ansys utiliza o método de amostragem para determinar os variados valores dos parâmetros de entrada e todas as saídas oriundas dessas combinações. O programa foi utilizado com as configurações padrão onde são geradas 1.000 amostras para encontrar 3 combinações que convergem para os valores mínimos estipulados dos parâmetros de entrada e saída. Obtendo uma peça com os seguintes parâmetros:

- Espessura: 140 mm
- Furo Centra: 95 mm

4.2 Otimização de Forma

A otimização de forma é a com o procedimento mais simplificado no ANSYS Workbench, visando salientar porções não críticas da peça e apresentar regiões onde o material é desnecessário. A otimização sugere o formato e design desnecessário. O principal objetivo dessa otimização é, não somente diminuir o peso da peça, mas também retornar um formato com custo de produção mais baixo até que a convergência dos valores.

Utilizando os mesmos parâmetros de entrada da otimização paramétrica de peça: parâmetros variáveis, esforços e resultados a serem encontrados, podemos adiantar para a confecção da solução de forma.

Associando o componente *Shape Optimization* as resultado das análises estáticas é possível analisar todos esses dados em uma árvore de trabalho e configurar apenas as condições da otimização de forma. A primeira componente da otimização de forma, e seu principal parâmetro de saída, é o percentual de redução que a otimização deverá fazer para conseguir atingir os objetivos esperados. O percentual de 30% foi mantido a fim de comparar os resultados da redução dos outros métodos de otimização. Através de uma malha gerada, podemos identificar os componentes que foram selecionados a serem retirados do modelo sólido pela legenda apresentada na solução do software.

Através de um método de planejamento fatorial parcial, semelhante ao usado na otimização paramétrica, é possível utilizar o método do *Central Composite Designs* (CCDs), onde há 3 tipos de CDD, sendo eles, CCDs circunscritos, inscritos e de face

4.3. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

centrada, a fim de auxiliar os processos iterativos de distribuição e das combinações, aperfeiçoando esses modelos e utilizando as configurações de CCD da Figura 41:

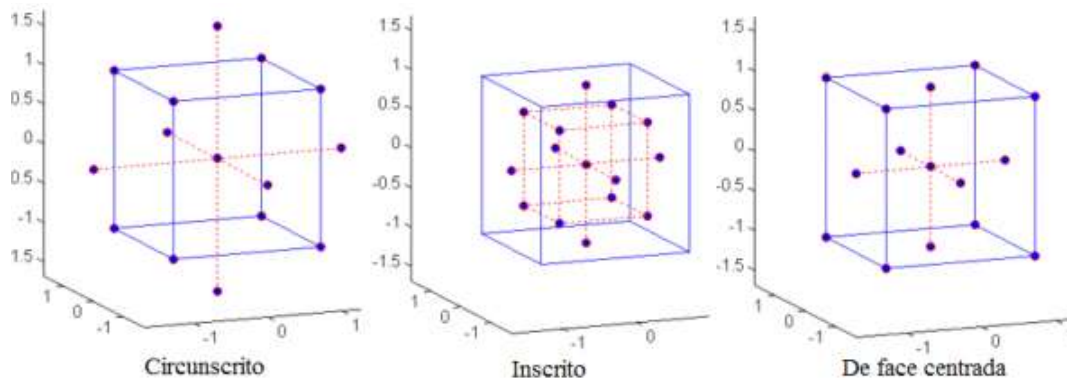


Figura 41: Representação de diferentes ccd

Atinge-se o resultado de convergência da otimização de forma. É importante avaliar que a otimização de forma retira materiais ao longo da retirada de material da superfície, como se tivessem espaços vazios, visto na Figura 42:

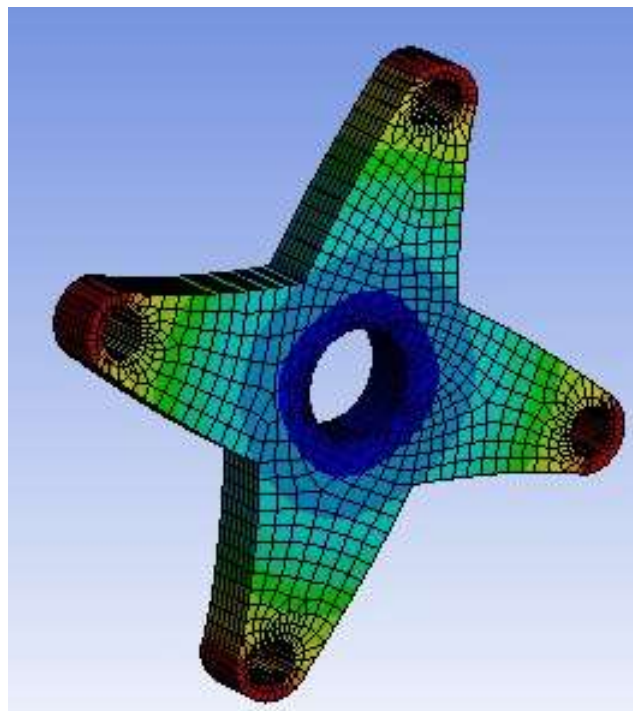


Figura 42: Resultado da última iteração da otimização de forma

4.3 Otimização Topológica

A terceira otimização a ser tratada por este projeto de graduação será a otimização topológica que, como apresentado na subseção *OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA* do capítulo 2 é um método computacional que permite projetar a topologia ótima de estruturas segundo um critério personalizado de densidade de material.

4.3. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

No painel da esquerda do Ansys Workbench tem-se o módulo de Otimização Topológica (*Topology Optimization*). Clica-se com o botão sobre ele, e arrasta-se até a análise estática, sobre a opção *Solution* e, ao soltá-lo nesta posição, o programa irá compartilhar dados de material, geometria e malha da análise estática com o módulo de otimização topológica, e a solução da análise estática irá entrar como condição inicial, conforme mostrado na Figura 43.

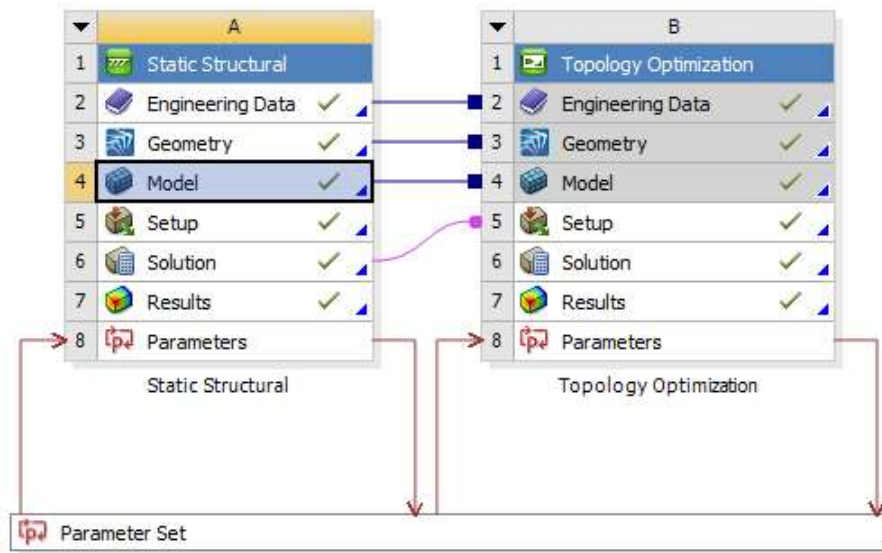


Figura 43: Representação do *Project Scheme* com uma otimização topológica

Nota-se que ao lado dos três primeiros itens há um *check* indicando que aqueles itens foram compartilhados corretamente, já o *Setup* está com as setas circulares, indicando que aquela etapa precisa ser recalculada. Isto se deve ao fato de se ter introduzido o estudo de otimização topológica no projeto. Então deve-se clicar sobre este botão e o *Mechanical* irá se abrir novamente. Na árvore de projeto no *Mechanical* pode-se notar que uma nova opção se abriu, referente ao estudo de otimização topológica, conforme mostrado na Figura 44.

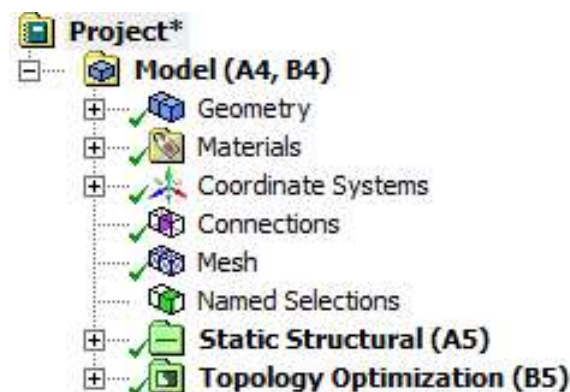
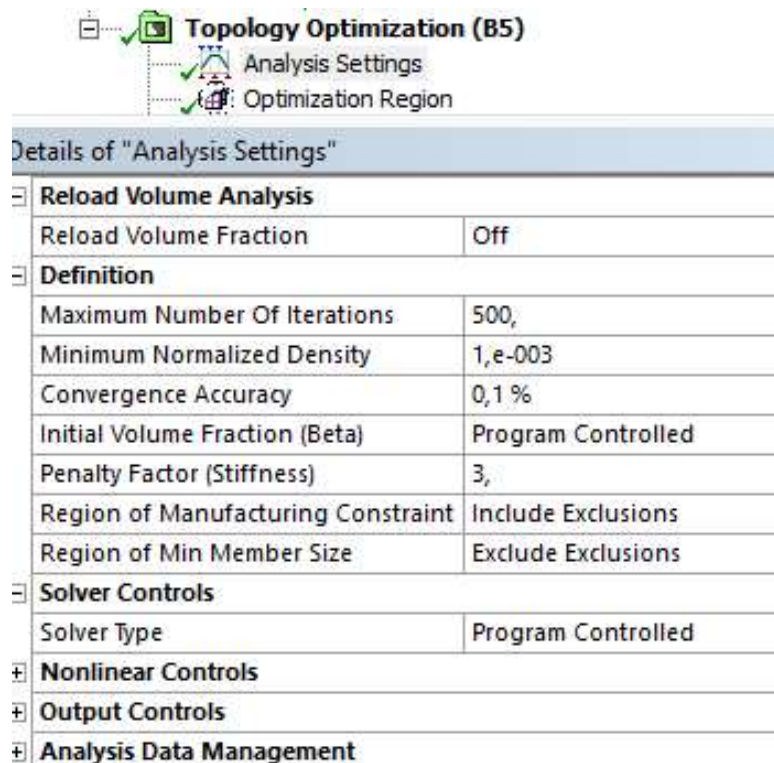


Figura 44: Árvore de projeto com análises estáticas e projeto de otimização

4.3. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Na primeira etapa de configuração, *Analysis Settings* (Figura 45), pode-se configurar o número máximo de iterações que irá ser permitida que o programa faça até que se atinja a convergência. Esta opção é interessante para casos em que o modelo tem possibilidade de divergir, e não se deseja gastar tempo com uma solução que não irá levar a nenhum resultado. Pode-se configurar também nesta etapa a menor densidade de um elemento durante a otimização, bem como o critério de convergência que por padrão é 0,1%. Opta-se por não mexer nas configurações padrões neste caso. Há também outras configurações que podem ser exploradas mas que não são relevantes para a obtenção do resultado desejado.



Details of "Analysis Settings"	
Reload Volume Analysis	
Reload Volume Fraction	Off
Definition	
Maximum Number Of Iterations	500,
Minimum Normalized Density	1,e-003
Convergence Accuracy	0,1 %
Initial Volume Fraction (Beta)	Program Controlled
Penalty Factor (Stiffness)	3,
Region of Manufacturing Constraint	Include Exclusions
Region of Min Member Size	Exclude Exclusions
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Nonlinear Controls	
Output Controls	
Analysis Data Management	

Figura 45: Configuração do *Analysis Settings*

Em seguida há a opção *Optimization Region*, que é uma das partes mais importante para se obter uma solução correta. Aqui seleciona-se o corpo que será utilizado na otimização, e as regiões de exclusão, ou seja, as regiões que não podem ser otimizadas, que devem permanecer na solução final, representado na Figura 46. Por padrão, o programa seleciona as regiões que foram utilizadas nas condições de contorno, definidas na análise estática. No entanto, nem sempre queremos utilizar as mesmas regiões, por isso temos a opção de selecionar as regiões de interesse manualmente.

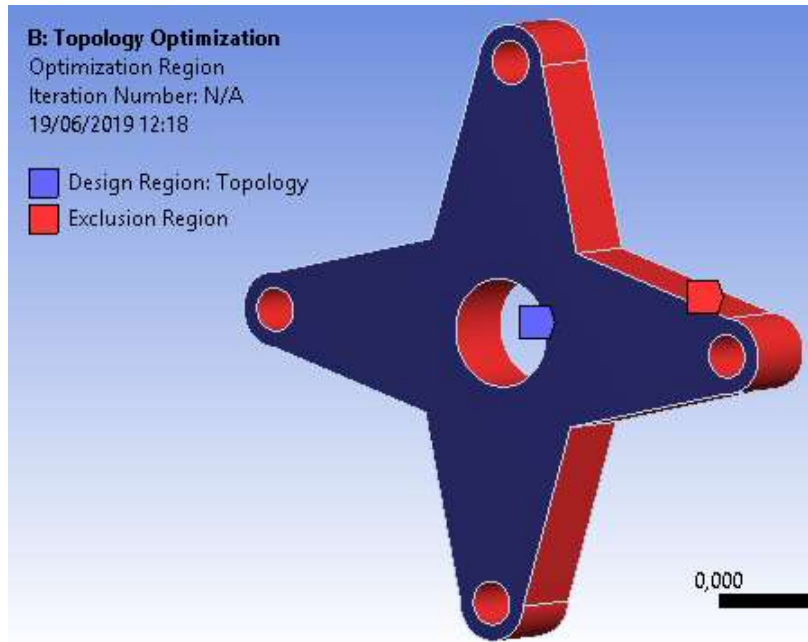


Figura 46: Configuração das regiões de otimização

Na opção *Objective* não se altera nada, utilizam-se as opções padrões. Pode-se ainda verificar aqui se a função objetivo que queremos minimizar é o peso da peça.

Finalmente, na opção *Response Constraint* deve-se escolher qual o tipo de restrição que será controlada, entre as opções têm-se: massa, volume, tensões, deformações e outras. Neste problema, optou-se por utilizar uma condição de restrição de massa. Em seguida, deve-se selecionar qual a porcentagem da massa inicial deve ser mantida, então escolhe-se 30%, significando que o programa almejará uma convergência de soluções próximas a retirada de 70% da massa original. Na opção *Solution* tem-se dentro da aba *Solution Information* a opção *Topology Density Tracker*. Ao clicar nesta opção pode-se visualizar a cada iteração a progressão da otimização topológica, o resultado final é mostrado na aba *Topology Density*. Nas Figuras 47, 48 e 49 é possível ver a evolução dessa otimização em 3 etapas diferentes, a 1ª iteração, a 5ª e a última, 15ª, gerando assim o resultado final.

4.3. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

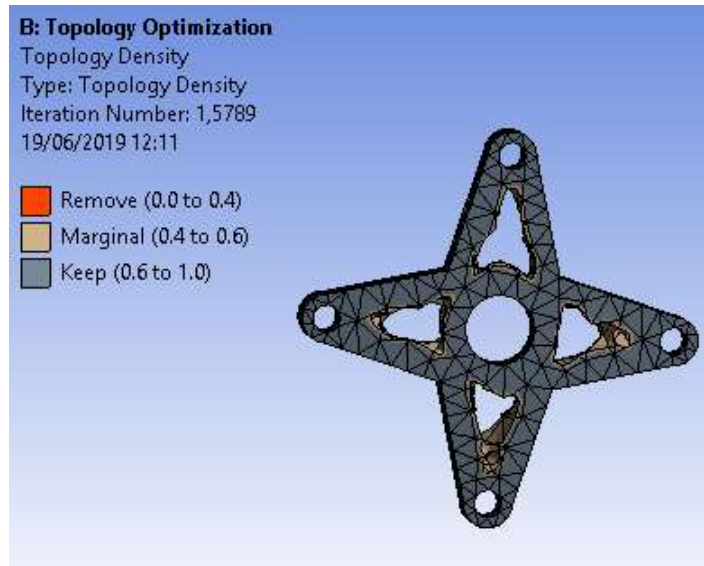


Figura 47: Resultado da 1ª iteração da otimização topológica

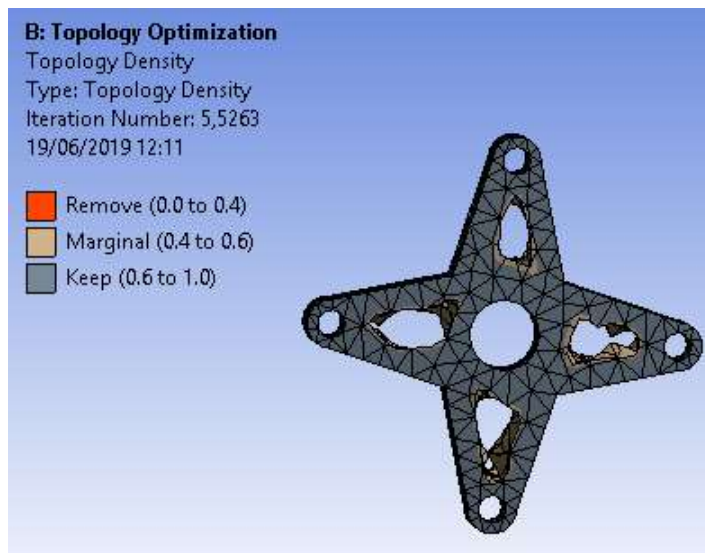


Figura 48: Resultado da 5ª iteração da otimização topológica

4.3. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

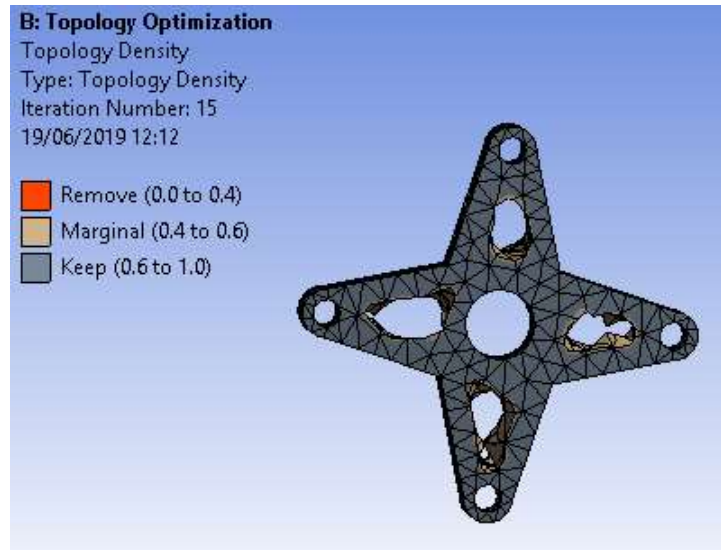


Figura 49: Resultado da última (15ª) iteração da otimização topológica

Por fim a última etapa do projeto é fazer a validação da solução encontrada. Para isso deve-se clicar na opção *Results* com o botão direito e selecionar a opção *Transfer to Design Validation System*. Com isto, o programa irá adicionar um novo módulo de análise estática, mas desta vez a geometria que será utilizada é resultado da otimização topológica e não a geometria inicial, conforme mostrado na Figura 50.

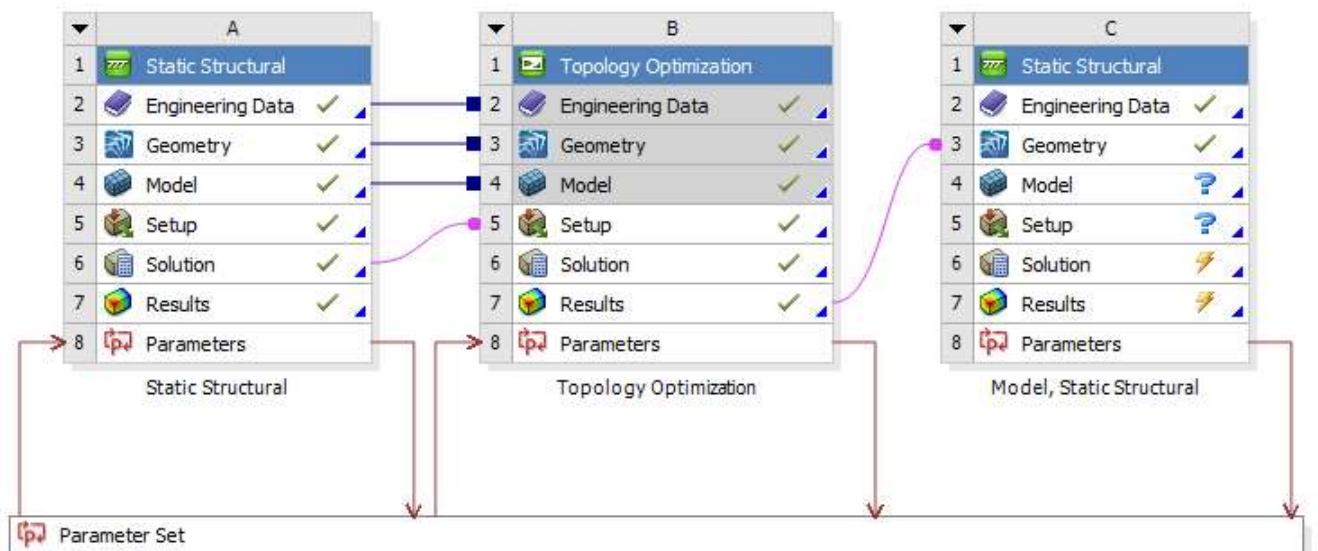


Figura 50: *Project Scheme* com a extensão do *Design Validation System*

Deve-se então atualizar a geometria e em seguida fazer uma nova análise estática, de forma similar à utilizada anteriormente, no componente otimizado e por fim verificar se os resultados obtidos atendem aos requisitos de projeto em relação às tensões admissíveis e demais restrições.

Com os resultados, faz-se necessário redesenhar o modelo sólido com dimensões

4.3. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

mais "padronizadas" a fim de gerar uma peça que compense realizar alterações no design sem aumentar muito seu custo de produção.

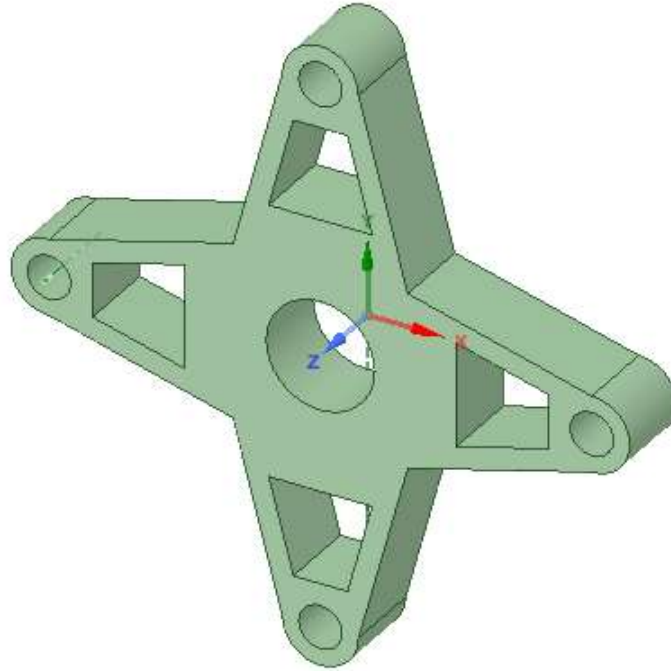


Figura 51: Nova configuração do braço

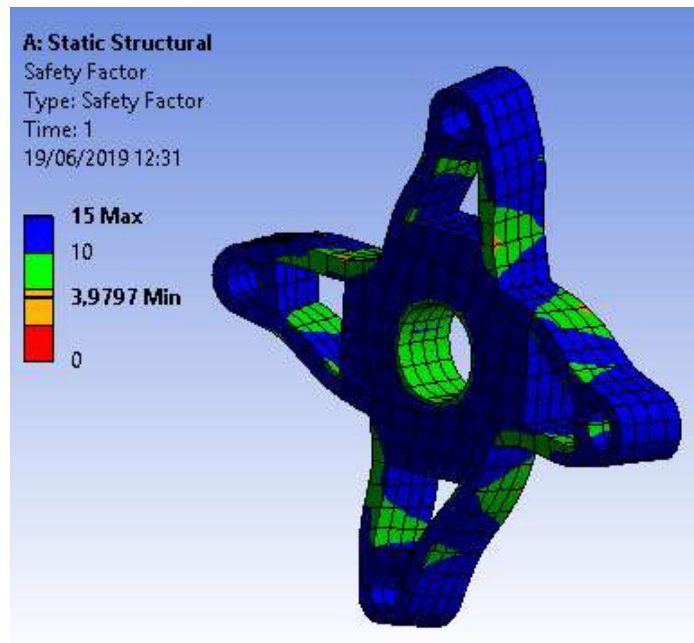


Figura 52: Análise do fator de segurança do novo braço

CAPITULO 5

RESULTADOS

Neste capítulo, analisaram-se os resultados de cada otimização e os comparou nos seguintes aspectos: distribuição de tensões, fator de segurança e deslocamentos máximos. As comparações serão feitas a partir dos resultados obtidos das análises e comparando também as geometrias diferentes encontradas em cada método de otimização, assim como uma comparação com a peça original (sem otimizações).

5.1 Análise Estrutural

Os diferentes métodos de otimização, apesar de terem metodologias e configurações diferentes, possuem um objetivo comum, a diminuição da massa como função objetivo. Com isso, é possível comparar os resultados obtidos a partir de cada método a fim de compreender como as diferenças metodológicas impactam nas peças finais e, conseqüentemente, nos resultados das análises estáticas.

O primeiro passo do projeto é a realização de uma análise estática no bloco inicial a fim de que se avalie como os carregamentos atuantes na estrutura se comportam. Nesta etapa, os resultados obtidos para os valores de tensão e deformação da estrutura serão comparados com os campos de tensões atuantes, as deformações e diferentes fatores de segurança obtidos, não só de forma quantitativa mas de uma forma qualitativa também, para que se conheça o comportamento das tensões no bloco, e verificar que o resultado final poderá nos fornecer uma simulação de resultado de retirada de material mais adequado para a situação em questão.

5.2 Análise de Tensões e Fator de Segurança

Primeiramente, a análise de tensões demonstra como as diferentes formas de otimização geram distribuições de tensões diferentes da peça original. Onde as tensões mais baixas se encontram na região azul escuro e tensões mais altas nas regiões vermelhas. Vemos que na parte superior do bloco e na lateral onde há um ponto de fixação temos valores de tensão significativos, indicando que essas regiões analisadas com perícia na solução final.

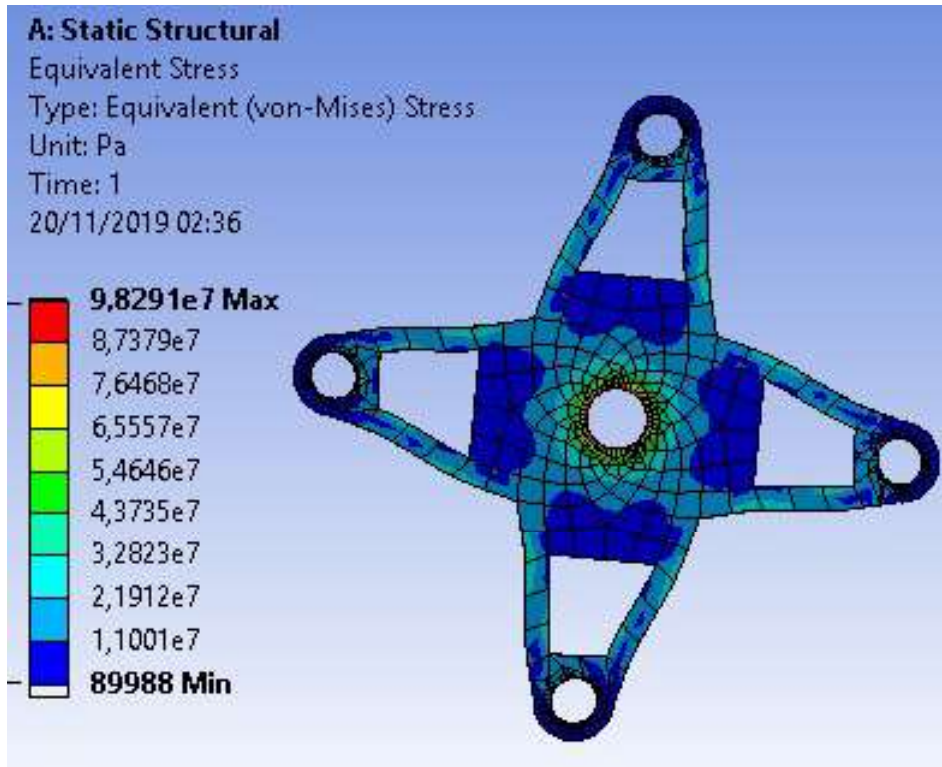


Figura 53: Malha de tensões - Otimização topológica

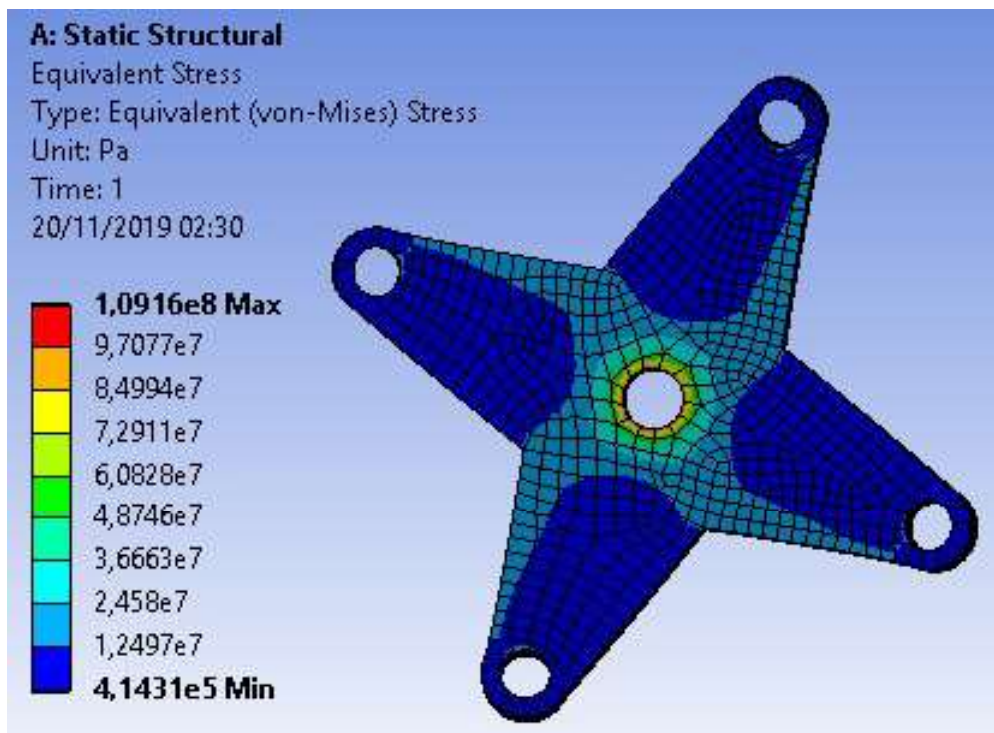


Figura 54: Malha de tensões - Otimização paramétrica

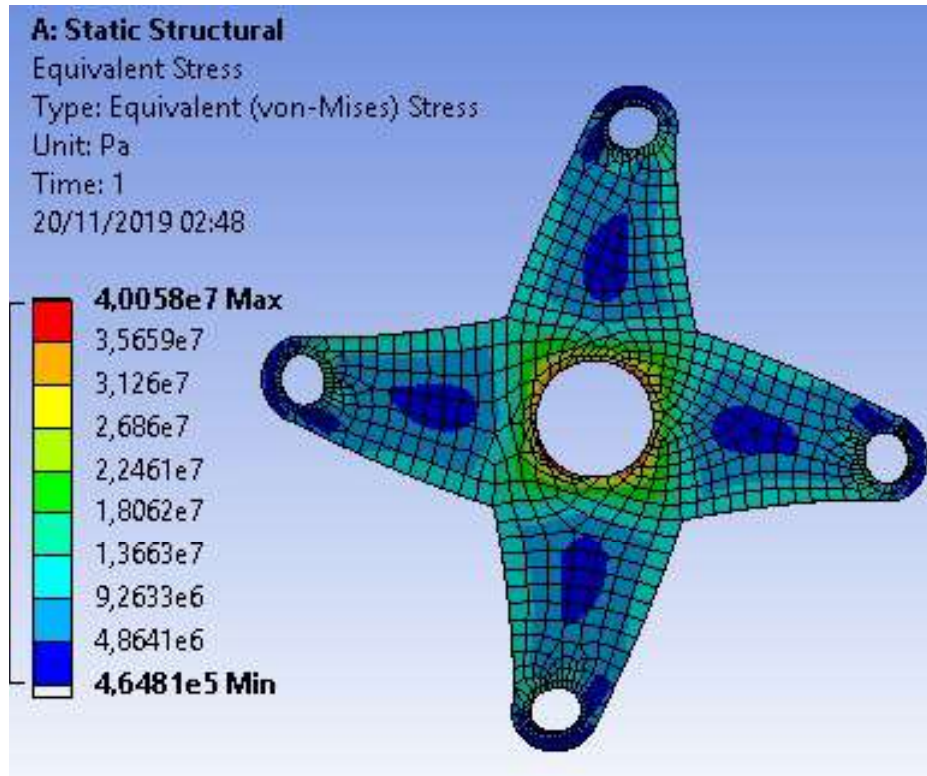


Figura 55: Malha de tensões - Otimização de forma

Tendo o campo de tensões avaliado, faz-se necessário verificar a distribuição do fator de segurança das peças ao longo da superfície, pois é um componente intrínseco do projeto e está diretamente ligado a falhas por ruptura, escoamento, entre outros. As faixas de fatores de segurança, ainda que diminuídas em relação ao projeto original, se mantiveram relativamente altas, tendo em vista que o fator de segurança mínimo delimitado em cada otimização era 1,5 e isso se dá principalmente pela dimensão das forças impostas sobre o sólido e suas dimensões físicas. Nas Figuras 56, 57 e 58 é possível ver essa distribuição:

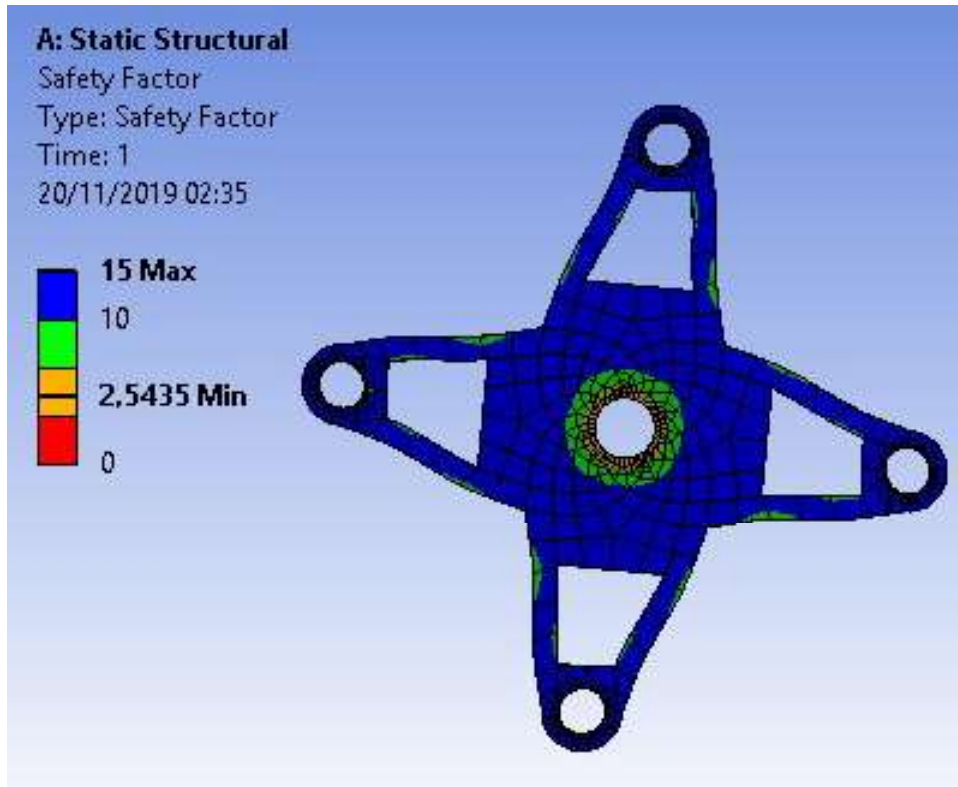


Figura 56: Malha de fatores de segurança - Otimização topológica

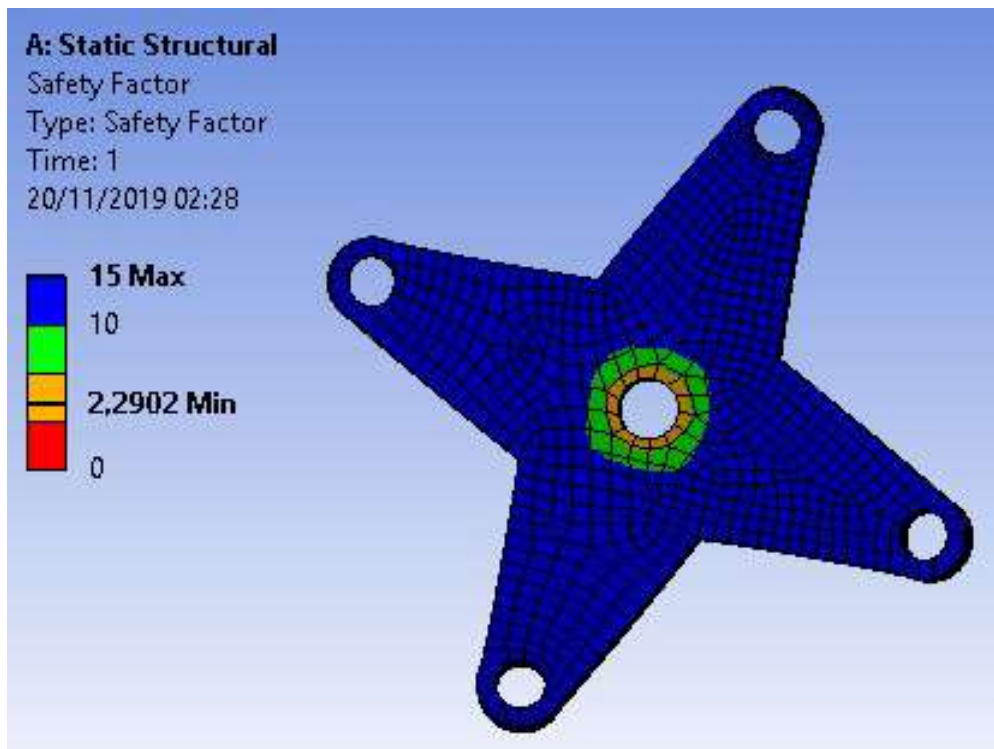


Figura 57: Malha de fatores de segurança - Otimização paramétrica

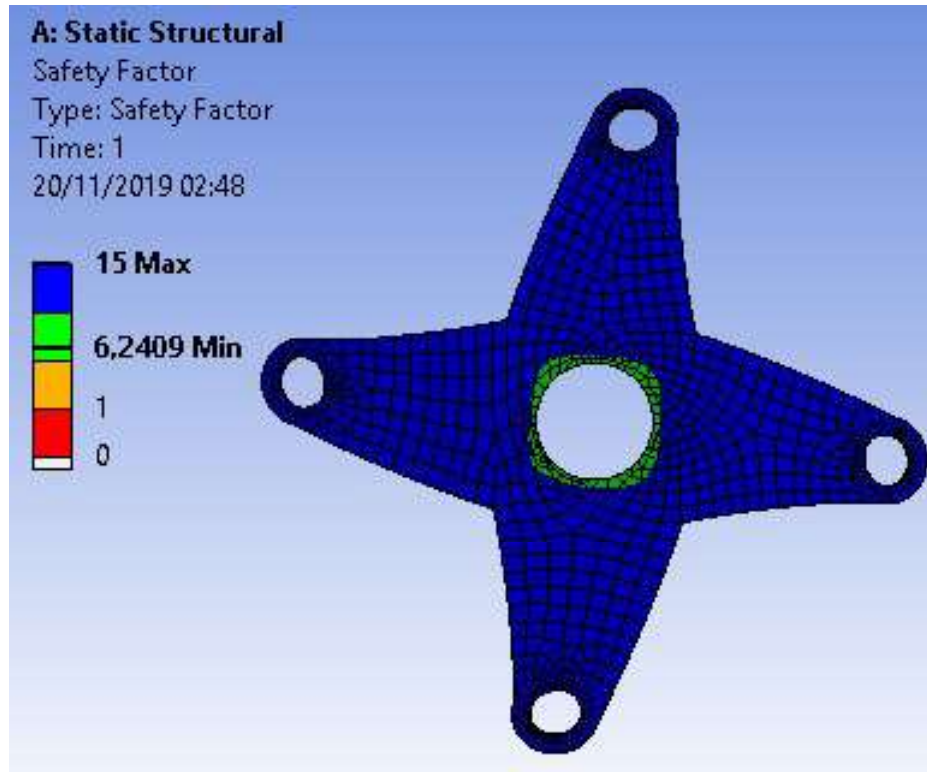


Figura 58: Malha de fatores de segurança - Otimização de forma

5.3 Análise de Deslocamentos e Deformações

Mesmo que para o caso específico de um braço de uma caixa multiplicadora de um aerogerador, o deslocamento e deformação da peça não seja muito impactante em seu funcionamento, principalmente pela dimensão desses resultados é importante analisar qual deles gera os resultados mínimos, uma vez que em outras análises, é crucial para a determinação de qual modelo seguir. É possível identificar que o método de otimização de forma apresentou as menores deformações e deslocamentos entre os 3, demonstrado pelo campo de deformação nas Figuras 59, 60 e 61:

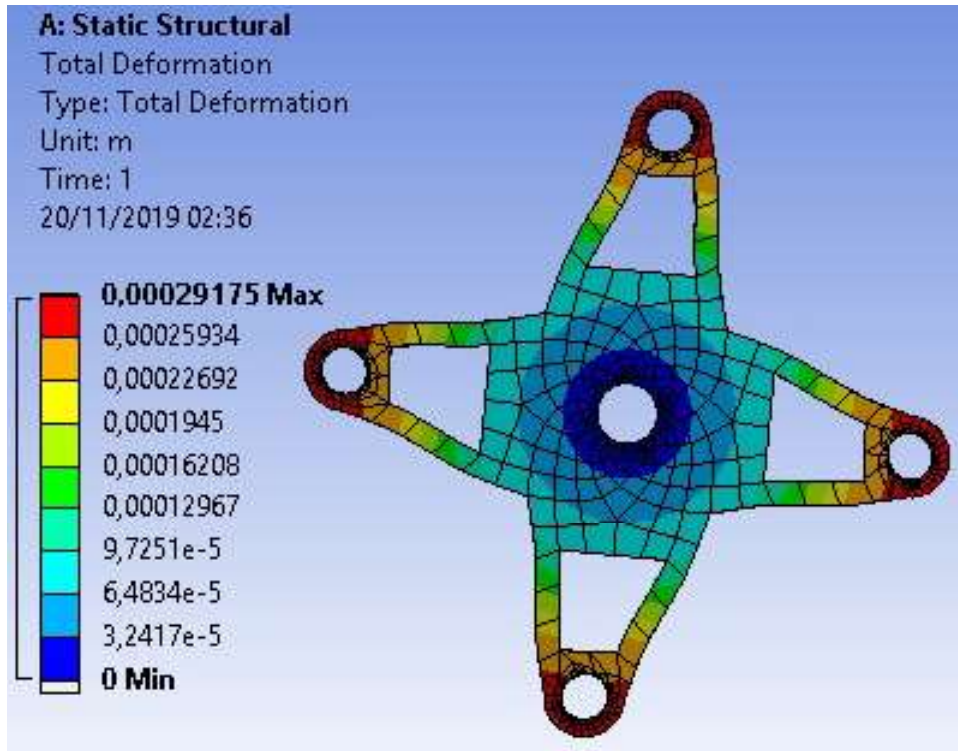


Figura 59: Malha de deformações - Otimização topológica

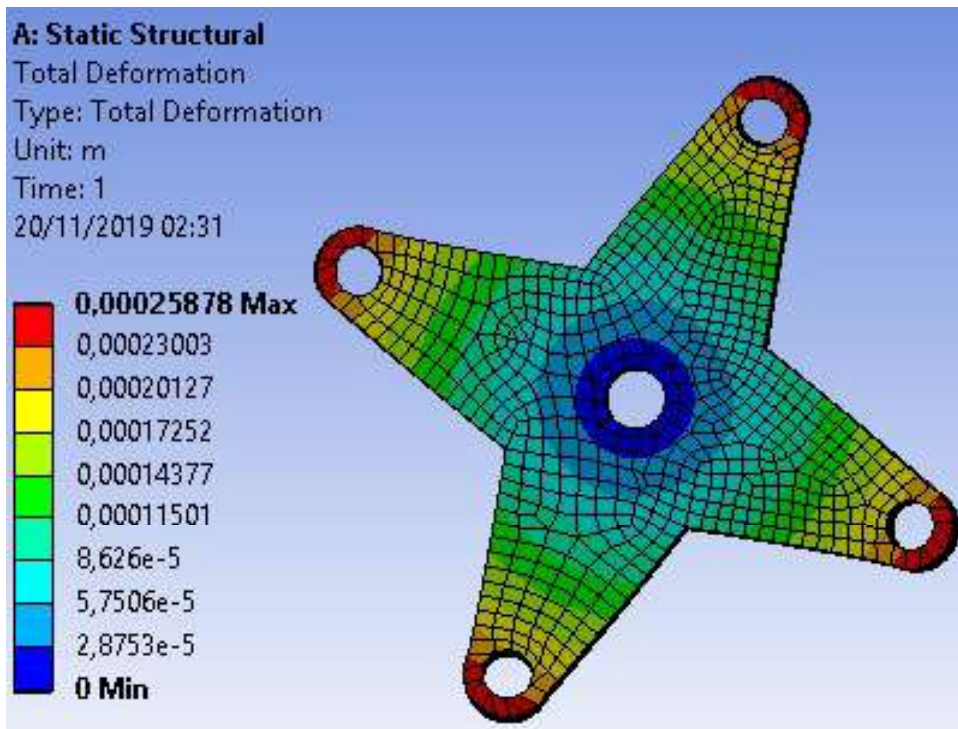


Figura 60: Malha de deformações - Otimização paramétrica

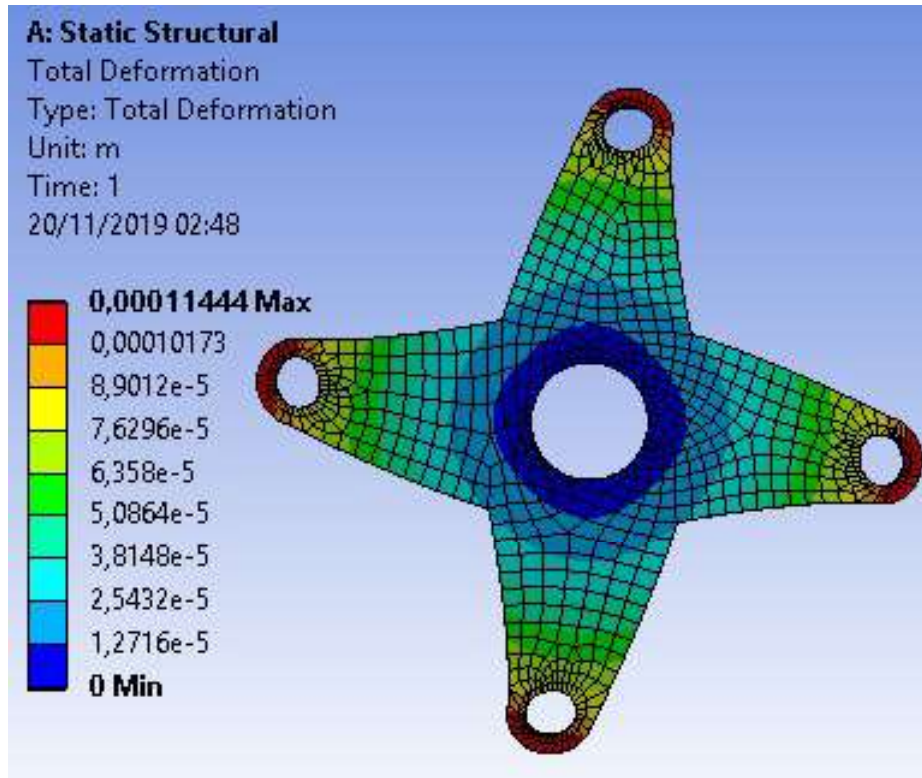


Figura 61: Malha de deformações - Otimização de forma

CAPITULO 6

CONCLUSÃO

6.1 Comparação Entre Otimizações

Analisando as diferenças de resultados apresentados no capítulo anterior, é possível perceber que os diferentes métodos de otimização, apesar de terem pontos de partida e objetivos comuns, atingem resultados diferentes, como pode ser visto na Tabela 3:

Tabela 3: Resultado das Otimizações

Característica	Valores Iniciais	Otimização Topológica	Otimização Paramétrica	Otimização de Forma
Peso	466,25 kg	349,76 kg	357,62 kg	395,15 kg
Diâmetro do Furo Central	200,0 mm	200,0 mm	95,0 mm	220,0 mm
Fator de Segurança	8,9	2,54	2,29	6,24
Espessura	150 mm	150 mm	140 mm	150 mm

Através desta tabela, pode-se verificar que a otimização que melhor reduziu a massa foi a otimização topológica. Esse é um método de otimização que tem mais liberdade para trabalhar com a peça de forma a retirar material desnecessário e as restrições de pontos de apoio eram apenas nas extremidades da peça e dos furos. Porém, ao selecionar esse método de otimização deve-se avaliar que, de acordo com os resultados do capítulo anterior, resulta em uma peça com as maiores deformações quando comparado aos outros métodos, não sendo adequado para situações mais precisas, onde não há muito espaço para se trabalhar e/ou qualquer alteração de direção de pontos da peça possa afetar o funcionamento do equipamento como um todo. Também é importante considerar que os resultados diretos da otimização topológica normalmente possuem estruturas complexas que inviabilizam a produção, sendo então necessário o uso dos resultados para modificar a peça original (pré otimização) em uma peça semelhante ao resultado otimizado, porém com dimensões e formatos que sejam mais facilmente fabricados.

Os resultados intermediários foram da otimização paramétrica. Esta técnica mantém as proporções da peça, porém realiza diferentes análises com parâmetros diferentes

em cada iteração. Ainda assim, possui restrições semelhantes à otimização topológica, uma vez que se há restrições espaciais na peça, tanto para o tamanho da peça quanto para suas deformações, porém ela é mais facilmente personalizada para cada caso, tratando especificamente dos limites de cada parâmetro de saída desejado. É um método que depende de um poder computacional maior que as outras, pois em seu funcionamento há a construção de uma nova peça, a criação da malha a inserção dos esforços e, por último, as análises estruturais dessa peça. Também tem-se uma alta amostragem com um número elevado de iterações, devido à distribuição aleatória de cada parâmetro de entrada.

Por último, o método que apresentou a menor diminuição do peso foi a otimização de forma. A otimização de forma, por ser um método que retira seções da superfície, passando por todos os pontos que constituem as curvas que definem o corpo, tem uma ação mais conservadora. Com isso, ela também consegue ser um método de otimização que seria, entre os três estudados neste projeto de graduação, o que possui menores deformações, sendo ideal para instalações mais precisas. Porém, é importante avaliar que é um método que está em fase de teste (*beta*) e desenvolvimento no ANSYS *Workbench*.

Pode-se concluir que há uma forte relação entre metodologias que possuem mais liberdade para trabalhar em aspectos mais amplos da configuração da peça, gerando assim maiores reduções de massa, com metodologias que tem uma atuação mais superficial e, portanto, mais conservador, priorizando fator de segurança e deslocamentos ao longo do corpo. Cabe então ao engenheiro que irá utilizar a otimização de entender as limitações de cada método e utilizá-lo da forma que mais lhe convém.

Para trabalhos futuros, sugere-se a implementação de uma metodologia que integre mais de um método de otimização ao longo de uma cadeia de análises, testando diferentes combinações, ordem e configurações das otimizações. Com isso, poderá ter uma visão mais ampla das capacidades das combinações de cada método, entendendo como suprir fraquezas de um com outro, avaliando também se é justificado o aumento do poder computacional necessário para utilizar mais de um método de acordo com o resultado obtido. Sugere-se também estudar as interações nos processos de otimização entre o ANSYS *Workbench* e o ANSYS *APDL*.

CAPITULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, B. S. M. **Otimização topológica aplicada a implantes craniofaciais**. 50 p. Projeto de Graduação. PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2017.

ANDRADE, A. C. C. **Otimização dos parâmetros de um modelo de bomba em sistemas de bombeio centrífugo submerso**. 91 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

ANSYS. **ANSYS Mechanical User's Guide**. Canonsburg: Sas Ip, Inc., 2013.

BERTIN, C. R. **Desenvolvimento de um Trem de Pouso Otimizado Estruturalmente para um Veículo Aéreo Não-tripulado**. 78 p. Projeto de Graduação. Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica**. 10. ed. São Paulo: Mc Graw Hill, 2016.

CANUT, F. A. **Análise Estrutural do Chassi de um Veículo Fórmula SAE pelo Método de Elementos Finitos**. 88 p. Projeto de Graduação. Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

CARBONO, A. J. J. **Otimização da Disposição de Linhas de Ancoragem Utilizando Algoritmos Genéticos**. 91 p. Dissertação de Mestrado. PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2005.

DA FONSECA, Z. G. **Otimização estrutural do suporte de uma turbomáquina usando um método de elementos finitos**. 93 p. Projeto de Graduação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

DINIZ, P. A. **Projeto de um conjunto de mangas de eixo para um veículo de fórmula SAE**. 185 p. Projeto de Graduação - Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

KIM, N., SANKAR, B. V. **Introdução à Análise e ao Projeto em Elementos Finitos**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: LTC 2011.

MARINHO, I. J. P. **Projeto ótimo de estruturas metálicas de arquibancadas reutilizáveis via ANSYS**. 198 p. Dissertação de Mestrado - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2002.

MCKAY, M., CANOVER, W., **A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output From a Computer Code**, Technometrics, p.60, 2000.

PIAZZE, M. A. M. **Análise e Verificação do Projeto de uma Barra de Carga Após Falha Utilizando Método por Elementos Finitos**. 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014.

RAUBER, F. **Análise Estrutural e Otimização Aplicada a uma Manga de Eixo de um BAJA SAE**. 63 p. Projeto de Graduação - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

SANCHEZ, C. A. A. **Estudo de Impacto Usando Elementos Finitos e Análises Não Lineares**. 129 p. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

SOARES, G. M. P. **Homogeneização de um Material Composto Formado por uma Matriz Polimérica com uma Segunda Fase Particulada**. 266 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

VENDRAMIN, R. **Otimização Estrutural de Chassi de um Veículo Guiado Automaticamente**. 76 p. Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.

VIEIRA, L. G. S. **Otimização de Forma Aplicado a Projetos de Vaso de Pressão**. 40 p. Projeto de Graduação. PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2016.

3-D 20-Node Coupled-Field Solid. Disponível em: <https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_SOLID226.html>. Acesso em: 1 mai. 2019.

5 Ways to Optimize Your Design. Disponível em: <<https://blog.altair.com/5-ways-to-optimize-your-design/>>. Acesso em: 14 ago. 2019