UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

A IMPORTÂNCIA DA SIMULAÇÃO TRIDIMENSIONAL PARA OS PROJETOS INDUSTRIAIS MECÂNICOS

VALDEMIR BARROS GUSMÃO

São Luís

2015

VALDEMIR BARROS GUSMÃO

A IMPORTÂNCIA DA SIMULAÇÃO TRIDIMENSIONAL PARA OS PROJETOS INDUSTRIAIS MECÂNICOS

Trabalho de Conclusão de Curso como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Msc. Flávio Nunes Pereira - Catedrático do curso de Engenharia Mecânica-UEMA.

São Luís

2015

GUSMÃO, Valdemir Barros
A Importância da Simulação Tridimensional para os Projetos Industriais Mecânicos / Valdemir Barros Gusmão – São Luís, 2015.
131 p.

Universidade Estadual do Maranhão, Campus São Luís.
Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – Orientador: Prof° Msc. Flávio Nunes Pereira.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

A IMPORTÂNCIA DA SIMULAÇÃO TRIDIMENSIONAL PARA OS PROJETOS INDUSTRIAIS MECÂNICOS

VALDEMIR BARROS GUSMÃO

Qualificação obtida em 14 de Julho de 2015

_____

Prof° Msc. Flávio Nunes Pereira

Orientador

_____

Prof° Dr. Fernando Lima de Oliveira

Primeiro Examinador

_____

Prof° Dr. Lourival Matos de Sousa Filho

Segundo Examinador

AGRADECIMENTOS

A Deus, que em sua infinita misericórdia, têm me propiciado forças e inúmeras vitórias.

Aos meus pais que tem me acompanhado nesta jornada sempre me apoiando com muito amor e de forma incondicional em todos os momento da minha vida, por isso sempre serão o motivo e o alicerce, fundamentais, da minha vida.

Ao meu amigo e orientador o professor Flávio Nunes que através do seu amplo conhecimento e grandiosa sabedoria sempre me orientou com maestria.

Aos membros da minha banca examinadora, que foram escolhidos não tão somente por causa da sua competência científica e acadêmica, mas também por representarem um exemplo de luta acadêmica em benefício dos alunos, da instituição, da ciência e do saber, sendo estes os principais expoentes da engenharia da nossa universidade.

Aos meus amigos e amigas de turma, que juntos enfrentamos uma grande e muitas vezes exaustiva jornada acadêmica, porém sobrevivemos e a cada novo semestre letivo fomos nos tornando mais fortes e unidos em busca dos incríveis conhecimentos proporcionados na engenharia. Por isso cada graduação nunca representa a vitória de um só, mas sim de todos os alunos, professores e funcionários que fazem parte do curso de Engenharia Mecânica da UEMA.

“Os computadores são incrivelmente rápidos, precisos e *burros*. Os homens são incrivelmente lentos, imprecisos e brilhantes. Juntos, seus poderes ultrapassam os limites da imaginação”.

Albert Einstein **- 1948**

"As formas primitivas da *inteligência artificial* que já temos demonstraram ser muito úteis. Mas acredito que o completo desenvolvimento da *inteligência artificial* pode significar o fim da raça humana".

Stephen Hawking **– 2014**

RESUMO

O trabalho apresenta os aspectos que tornaram essenciais a simulação computacional para os projetos industriais, fazendo análises de conceitos, características e experiências de sucesso, que serão neste estudo elucidadas e as suas características testadas, através de modelagens computacionais simuladas de uma turbina hidráulica, uma turbina aeronáutica turbofan e um bloco de um motor quatro tempos.

Palavras-chave: elementos finitos, modelagem virtual, simulação computacional, turbofan, Francis, motores.

ABSTRACT

The paper presents the aspects that become essential to computer simulation for industrial projects, making analysis of concepts, features and successful experiences, which will be elucidated in this study and their characteristics tested through simulated computer modeling of a hydraulic turbine, a turbine turbofan aircraft and a block of a four-stroke engine.

Keywords: finite element, virtual modeling, computer simulation, turbofan, Francis, engines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: estado de tensões.....25

Figura 02: teste de fluidos no computador.....29

Figura 03: nós em uma viga.....34

Figura 04: simulação de Elementos Finitos no Solidworks.....42

Figura 05: tipos de máquinas de fluido.....43

Figura 06: cinemática de um rotor.....44

Figura 07: momentos angulares de um rotor.....46

Figura 08: cinemática de um rotor.....46

Figura 09: triângulos de velocidades.....48

Figura 10: motor alternativo diesel.....51

Figura 11: motor axial de uma turbina a gás.....52

Figura 12: arquivo 3D CAD/CAE.....54

Figura 13: CAVE 3D para análises de turbinas..... 56

Figura 14: realidade aumentada de um coração virtual para estudos..... 56

Figura 15: um protótipo de prótese craniana real e virtual.....57

Figura 16: sistemas computacionais de um simulador de túnel de vento.....58

Figura 17: protótipo de impressora 3D que constrói casas inteiras..... .60

Figura 18: simuladores virtuais de voo da Embraer.....67

Figura 19: simulador de realidade virtual da Ford.....68

Figura 20: CRV da Petrobras.....70

Figura 21: rotor Francis.....71

Figura 22: turbina Francis.....72

Figura 23: partes de uma turbina Francis.....73

Figura 24: modelagem 3D de uma turbina Francis.....74

Figura 25: velocidade magnitude da turbina Francis.....76

Figura 26: velocidade do fluido na direção –X 76

Figura 27: velocidade do rotor da turbina Francis na direção –Y..... 77

Figura 28: tensões de cisalhamento na turbina Francis.....77

Figura 29: cavitação gerada na turbina Francis.....78

Figura 30: deslocamentos gerados por tensões na turbina Francis.....79

Figura 31: terceira deformação no eixo principal da turbina Francis..... 80

Figura 32: tensão de Von Mises para a turbina Francis..... 81

Figura 33: fator de segurança da turbina Francis..... 82

Figura 34: turbofan Rolls Royce Trent.....84

Figura 35: partes de uma turbofan.....84

Figura 36: modelagem 3D de uma Turbina Turbofan.....86

Figura 37: sentido das rotações de uma tubofan.....88

Figura 38: análise de tensões modais no rotor fan.....89

Figura 39: análise de tensão do rotor.....90

Figura 40: análise de tensão do rotor do compressor..... 91

Figura 41: análise de tensão do rotor da turbina.....92

Figura 42: análise por Von Mises e o fator de segurança dos veios.....93

Figura 43: velocidades desenvolvidas por uma turbofan no teste CFD.....94

Figura 44: número de Mach da turbofan no CFD.....95

Figura 45: tensões de cisalhamento da turbofan no CFD.....95

Figura 46: modelagem motor tradicional.....101

Figura 47: modelagem motor de plástico.....102

Figura 48: deslocamentos com F01 do virabrequim.....109

Figura 49: deslocamentos com F02 do virabrequim.....110

Figura 50: deslocamentos em F03 do virabrequim.....111

Figura 51: deslocamentos críticos em F04 e F05 do virabrequim.....112

Figura 52: deslocamentos em F08 do virabrequim.....113

Figura 53: deslocamentos com F01 e F03 do eixo de válvulas.....114

Figura 54: deslocamentos com F08 do comando de válvulas.....115

Figura 55: faces selecionadas das válvulas.....116

Figura 56: tensão de Von Mises das válvulas.....116

Figura 57: primeira e terceira tensões das válvulas.....117

Figura 58: deslocamento Z por tensões nas válvulas.....118

Figura 59: faces selecionadas das bielas e pistões.....118

Figura 60: tensão de Von Mises nas bielas e pistões.....119

Figura 61: primeira tensão principal da biela e pistão.....119

Figura 62: terceira tensão principal da biela e pistão.....120

Figura 63: deslocamentos por tensões nas bielas e pistões.....120

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01: comparativo entre engenharia digital e tradicional.....64

Gráfico 02: percentual de pedidos de alteração no produto.....65

Gráfico 03: evolução dos momentos gerados na turbofan..... 87

Gráfico 04: Resultado CFD da turbofan com temperatura de 450°C.....97

Gráfico 05: Resultado CFD da turbofan com temperatura de 1700°C..... 97

Gráfico 06 : momentos na revolução 01 do eixo tradicional 104

Gráfico 07: momentos na revolução 01 do eixo de plástico.....105

Gráfico 08: forças geradas na revolução 01 dos eixos dos motores.....106

Gráfico 09: momentos na revolução 29 dos eixos dos motores.....107

Gráfico 10: forças geradas na revolução 29 dos eixos dos motores.....108

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: tipos de turbinas Francis.....73

Tabela 02: níveis térmicos de uma turbofan.....85

Tabela 03: frequências modais do virabrequim.....109

Tabela 04: frequências modais do eixo da árvore de cames.....113

LISTA DE SIGLAS

ABS - Acrilonitrila Butadieno Estireno

CAVE – Ambiente de Caverna Virtual Automática

CFD – Fluidos Dinâmicos Computacionais

CFRP- Plástico Reforçado com Fibra de Carbono

CNC - Comando Numérico Computadorizado

PRFV- Plástico Reforçado com Fibra de Vidro

SAGE – Sistema de Álgebra e Geometria Experimental

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

2D - duas dimensões

3D - três dimensões

Al - alumínio

B - boro

C° - graus Celsius

C – carbono

Cr – cromo

Co - cobalto

Cu - cobre

F – força (N)

Fe - ferro

G – peso

g – gravidade (10 m/s² e 10 mm/s²)

H - hidrogênio

J - Joule

K – rigidez

Kt - Kelvin

kgfm – quilograma força metro

m – metro

mm/s^2 – milímetros por segundos ao quadrado

Mn – manganês

mPa – mega Pascal

mW – mega Watts

Mo – molibdênio

N – Newton

N.m – Newton metros

N. mm – Newton milímetros

Pt – potência (W)

P- pressão (Pa)

P – fósforo

Pa - Pascal

Pb - chumbo

Nb – nióbio

Nf - eficiência

Ni – níquel

r - raio

rpm – rotações por minuto

rps – rotações por segundo

s - segundos

S – Enxofre

Se - Selênio

Si – Silício

t – Temperatura (C°)

T- Torque (kgfm, N.m e N.mm)

Ta – Tântalo

Ti - Titânio

V – velocidade (m/s e mm/s)

ϑ – velocidade cinemática (m/s)

W – tungstênio

W - Watts

α - alfa

∇ - gradiente

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....09

LISTA DE GRÁFICOS.....12

LISTA DE TABELAS.....13

LISTA DE SIGLAS.....13

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....14

1. INTRODUÇÃO 19

1.1. OBJETIVOS GERAIS 20

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... 20

2. METODOLOGIA..... 21

3. REVISÃO LITERÁRIA..... 23

3.1. A RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS..... 23

3.1.1. TENSÃO.....23

3.1.2. TORÇÃO..... 24

3.1.3. DEFORMAÇÃO..... 24

3.1.4. CRITÉRIOS DE ESCOAMENTO.....25

3.2. DINÂMICA DOS FLUÍDOS..... 27

3.2.1. Peso, Massa e Vazão Específicos..... 27

3.2.2. Pressão.....28

3.2.3. Lei de Newton.....28

3.2.4. Número de Reynolds.....29

3.2.5. *As Equações de Navier-Stokes*.....30

3.3. ELEMENTOS FINITOS..... 32

3.4. MÁQUINAS DE FLUXO..... 42

3.4.1. *Análise do Fluxo de Fluidos nas Turbomáquinas*..... 44

3.5. MOTORES À COMBUSTÃO..... 50

4. A EVOLUÇÃO DOS SIMULADORES COMPUTACIONAIS..... 53

4.1. AMBIENTES VIRTUAIS CAD, CAM E CAE.....53

4.2. OS PROCESSOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....54

4.3. ASPECTOS DA PROTOTIPAGEM SIMULADA..... 57

***4.3.1. Protótipos Virtuais*.....57**

***4.3.2. Protótipos Físicos*.....59**

4.4. A IMPORTÂNCIA DOS PROJETOS 3D SIMULADOS.....60

4.5. A APLICAÇÃO DE SIMULADORES 3D EM PROJETOS..... 66

4.6. A CAVERNA DIGITAL DA PETROBRAS 69

5. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UMA TURBINA FRANCIS..... 71

5.1. ASPECTOS GERAIS 71

5.2. CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS.....73

5.3. MODELAGEM TRIDIMENSIONAL.....74

5.4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL..... .75

5.5. ANÁLISE DE RESULTADOS..... 75

***5.5.1. Simulação CFD*..... 75**

***5.5.2. Simulação Dinâmica*.....78**

***5.5.3. Análise de Tensão por Critério de Von Mises*.....79**

6. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UMA TURBINA TURBOFAN.....83

6.1. ASPECTOS GERAIS.....83

6.2. CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS.....84

6.3. MODELAGEM TRIDIMENSIONAL.....85

6.4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....86

6.5. ANÁLISE DE RESULTADOS.....87

***6.5.1. Simulação Dinâmica*..... 87**

***6.5.2. Análise de Tensões Modais*.....88**

***6.5.3. Análise de Tensão por Critério de Von Mises*.....93**

6.5.4. Simulação CFD.....94

7. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DOS EIXOS DE UM MOTOR 98

7.1. ASPECTOS GERAIS.....98

7.2. CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS.....99

7.3. MODELAGEM TRIDIMENSIONAL.....103

7.4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....103

7.5. ANÁLISE DE RESULTADOS.....104

7.5.1. Simulação Dinâmica 104

7.5.2. Análise de Tensões Modais.....109

7.5.3. Análise de Tensão por Critério de Von Mises.....116

8. CONCLUSÕES.....122

REFERÊNCIAS.....123

1. INTRODUÇÃO

A simulação é uma ferramenta de análise que possibilita testar e avaliar projetos industriais durante o seu desenvolvimento, por isso neste estudo os principais conceitos e formas de utilização de simuladores foram caracterizados, possibilitando assim verificar que a prototipagem virtual tornou-se fundamental para otimizar o desenvolvimento de novos produtos. Estes benefícios pertinentes ficam evidentes através de diversas análises comparativas entre a prototipagem física e a virtual.

Foram utilizados também três experimentos (turbina Francis, turbofan e bloco de um motor quatro tempos) modelados inteiramente no computador e posteriormente foram testados em simuladores virtuais, para podermos determinar as principais características destas máquinas.

As simulações computacionais, deste estudo, demonstraram que o aumento progressivo da velocidade diminui a vida útil das turbinas Francis, também verificamos que o rotor fan das turbofans contribui para o desenvolvimento de maiores potências e no comparativo entre um motor feito com materiais tradicionais (ferro fundido, aço e alumínio) e outro com plásticos (Nylon 6.6 e CFRP), demonstrou-se que apesar do bom desempenho dos materiais polímeros de engenharia, estes ainda não oferecem segurança suficiente para serem utilizados em todas as partes de um motor.

1.1. OBJETIVOS GERAIS

Contribuir com todos os estudos na área de modelagem computacional, turbinas hidráulicas e aeronáuticas; e ampliar os conhecimentos à respeito de novos materiais para indústria automobilística, deixando também elucidados os principais méritos trazidos pelo ambiente virtual simulado no desenvolvimento de novos produtos e como uma ferramenta auxiliar eficaz para as empresas.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

-Determinar os fatores que comprovam o aumento da eficiência nas industrias, quando estas utilizam simuladores computacionais;

-Realizar um comparativo entre protótipos virtuais e os protótipos físicos, mostrando suas principais características;

- Testar as principais funcionalidades da simulação tridimensional, utilizando três protótipos virtuais (turbina Francis, uma turbofan e um motor quatro tempos) que foram modelados para este estudo;

- Analisar os resultados numéricos das simulações virtuais (mecânicas e fluido dinâmicas) feitas nos protótipos tridimensionais.

2. METODOLOGIA

Serão utilizados livros, artigos e documentos disponíveis, também em páginas da internet, que contenham pesquisas, conceitos, gráficos e figuras com dados que possibilitem o embasamento descritivo das vantagens e desvantagens que norteiam os processos simulados, tendo como principal foco àquelas que pertencem ao ambiente 3D, para que se possa gerar comparativos entre a prototipagem física e a virtual.

Todas estas análises visam definir os diversos benefícios que tornam a simulação tridimensional de extrema importância para a criação e aperfeiçoamento de produtos industriais, que em uma economia globalizada onde a concorrência é acirrada, precisam ser inovadores e devem ser desenvolvidos em menor tempo, com menor custo de produção, tecnologia avançada e segurança.

As análises iniciam-se com uma revisão literária abrangente que mostrou alguns conceitos e equações exemplificadas, que demonstram conceitos relativos a resistência dos materiais, dinâmica dos fluidos, motores, máquinas de fluxo que em conjunto com as técnicas de aproximação numérica, que norteiam os elementos finitos, são utilizados para gerar modelos matemáticos diferenciais, que na indústria de programas para computador são desenvolvidos na sua forma algébrica matricial, gerando polinômios que posteriormente são traduzidos para uma linguagem algorítmica, pois assim geram parâmetros para o desenvolvimento da arquitetura lógica dos simuladores.

Todos os conceitos relativos a CAD, CAE e CAM também são descritos para demonstrar o seu significado, evolução e utilização industrial, atuando estes como preponderantes nas análises feitas através de pesquisas bibliográficas, que visam fazer um comparativo entre o desenvolvimento de produtos usando vários protótipos físicos e virtuais.

As vantagens e desvantagens quanto ao uso de simuladores foram descritas e exemplificadas através da análise da aplicação de simuladores virtuais em indústrias.

Neste trabalho foram modelados, em ambiente totalmente computacional, três protótipos utilizando o programa Inventor 2013 e 2014 da empresa Autodesk. Sendo

que o primeiro protótipo foi uma turbina Francis, que foi modelada utilizando as medidas e dados como peso e potência fornecidos pelo site da empresa Voith, que é fabricante de turbinas Francis, assim como para a sua simulação nos programas Mechanical 2014 (Simulador Mecânico) e CFD 2013 (Simulador de Fluidos Dinâmicos Computacionais) da Autodesk, foram utilizados dados da vazão da água de uma das comportas da usina hidrelétrica de Itaipu, para que se pudesse calcular a velocidade inicial do fluido de trabalho e o torque da turbina.

As simulações, no primeiro protótipo, geraram diversos gráficos e tabelas, que de acordo com conceitos físicos, puderam ser interpretados esclarecendo todos os malefícios causados por um regime de velocidades acima do que é recomendado pelo fabricante de turbinas Francis.

O segundo protótipo foi uma turbina aeronáutica turbofan, que foi modelado e também simulado nos programas da Autodesk, onde foram utilizados dados do fabricante Rolls Royce trent, que fabrica turbinas para aeronaves comerciais e disponibiliza em sua página na internet as medidas das pás, cargas suportadas, peso e as rotações máximas das suas turbofans. Estes dados foram utilizados em conjunto com os dados sobre temperatura da turbina e características do fluido ar fornecidos pelo site da Airbus.

Todos estes dados sobre a turbofan ajudaram na modelagem 3D desta e foram utilizados também para calcular a força do vento, a potência mecânica e o torque necessários para que as simulações fossem realizadas. Sendo que posteriormente ao analisar os gráficos e tabelas fornecidas nas simulações computacionais mecânicas e fluido dinâmicas, podemos verificar como as turbofans conseguem atingir um torque elevado.

O terceiro experimento modelado inteiramente em ambiente 3D utilizou dados reais, para podermos também aproximá-lo do seu projeto real. Portanto nesta modelagem utilizou-se dados de um veículo sedan, para podermos modelar e simular os principais componentes de um bloco de um motor quatro tempos, utilizando na sua configuração materiais tradicionais como ferro fundido, aço e alumínio e posteriormente as suas configurações foram alteradas para materiais polímeros (Nylon 6.6 e CFRP), cujo os testes comparativos demonstraram os motivos que tornam o motor plástico promissor, mas ainda inviável.

3. REVISÃO LITERÁRIA

3.1. A RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

Resistência dos Materiais é um ramo da mecânica que estuda a relação entre cargas externas aplicadas a um corpo deformável e a intensidade das forças internas que agem no interior do corpo. Este assunto também envolve o cálculo das deformações do corpo e proporciona o estudo da sua estabilidade quando sujeito a forças externas (HIBBELER, 2010).

3.1.1. Tensão

Uma força exercida sobre uma determinada área de um corpo gera momentos distributivos de carga, como mostra figura 01, que podem gerar cisalhamento ou pressão forçante de compressão, tração ou flexão na estrutura molecular do material que compõe o corpo, ocasionando-lhe deformações, por isso caracterizamos tensão (σ) como força (F) exercida sobre determinada área (A) de um corpo:

$$\sigma = \frac{F}{A} \qquad (01)$$

As tensões são diretamente proporcionais ao momento fletor (M) da peça, aumentando linearmente com o aumento de y, pois a distribuição linear de tensões de flexão (σf) assume seu valor máximo na superfície mais distante da linha neutra (y), podendo chegar até a superfície da peça. Quanto maior for o momento de inércia (I) da seção transversal de uma peça, maior será sua resistência.

$$\sigma f = - \frac{M\,y}{I} \qquad (02)$$

3.1.2. Torção

Quando peças são submetidas a rotações em seu eixo longitudinal ou influenciadas por momentos torsores, caracterizam o momento que será contraposto pelas forças internas cisalhantes do corpo cilíndrico, gerando deformações no seu eixo que podem ser definidas como Torção (ϕ) de tensão cisalhante no eixo, sendo determinado pelo torque (T) e o raio (r) da peça multiplicados e depois divididos pelo momento polar de inércia (J), que é sempre definido de acordo com o tipo de geometria cilíndrica da peça. Gerando assim a equação:

$$\phi = \frac{T\,r}{J} \qquad (03)$$

3.1.3. Deformação

O grau das deformações (ϵ) dependem da configuração molecular que caracteriza a resistência do material em conformidade com possíveis processos de usinagem e fabricação, que possam ter alterado estas características, portanto sempre haverá deformação, porém alguns materiais têm a capacidade de suportarem por maior tempo cargas cíclicas e outros não suportam nem mesmo cargas pontuais. Estas deformações (ϵ) são calculadas levando-se em consideração o comprimento inicial (lo) e o comprimento final (lf) da peça:

$$\epsilon = \frac{lf - lo}{lo}\, x\, 100\% \qquad (04)$$

Os estudos de Robert Hooke (1635-1703), comprovaram que a tensão exercida sobre um corpo sempre será proporcional à sua deformação. Sendo que o cientista Thomas Young (1773-1829), determinou que o módulo de elasticidade longitudinal (E) pode ser determinado pela seguinte equação:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \qquad (05)$$

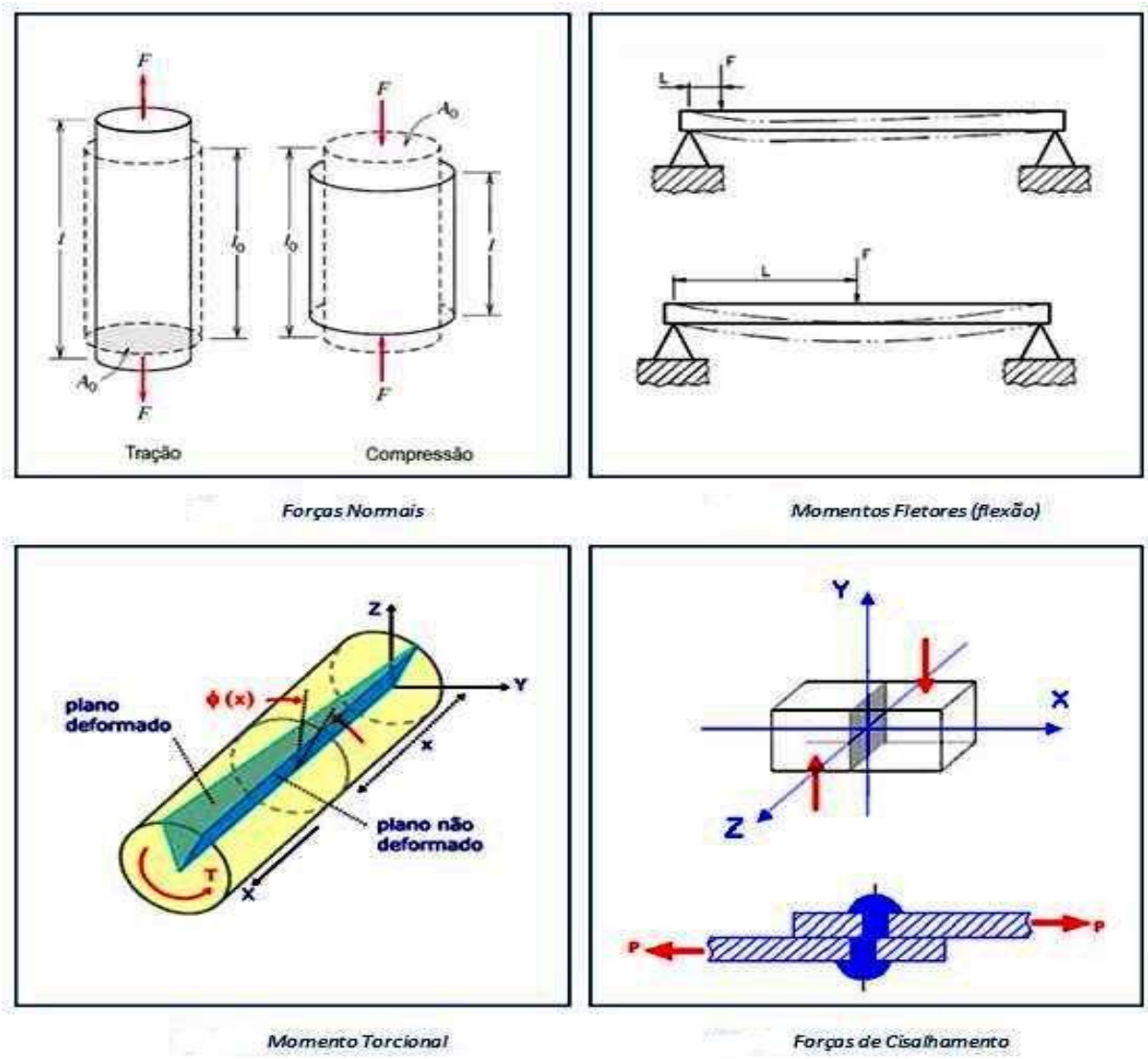


Figura 01: estado de tensões.

Fonte: blog Carroceria.blogspot (2013).

3.1.4. Critérios de Escoamento

Os critérios de escoamento foram elaborados a fim de definir o estado limite de tensão que define o escoamento plástico dos materiais metálicos. Ou seja, a partir de qual valor de tensão aplicada, dar-se-á o início do processo de deformação plástica.

O primeiro critério foi desenvolvido por Tresca (1865) e definia que o escoamento tem início quando a tensão de cisalhamento máxima (τ_{max}) atinge um valor crítico, característico e constante para um dado material (condições definidas

de microestrutura, velocidade e temperatura de trabalho) independentemente do estado de tensão aplicado. Pela análise do círculo de Mohr, verifica-se que:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = A \qquad (06)$$

Ou seja, $\tau_{max} = A$ (*a* constante para um dado material sob condições específicas de microestrutura e propriedades).

Assim, no ensaio de tração: $\tau_{max} = A = \sigma_1/2 = \sigma_0/2$ (07)

Onde σ_0 é definida como tensão limite de escoamento sob tração, facilmente medida nos ensaios de tração convencionais. Já no ensaio de torção, o valor da tensão limite de escoamento sob cisalhamento puro (*k*) não é facilmente obtido. Utilizando-se o critério de Tresca, tem-se:

$$\tau_{max} = \sigma_1 = -\sigma_2 = k = A = \sigma_0/2 \qquad (08)$$

ou

$$k = \sigma_0/2 \qquad (09)$$

O critério de Tresca apresenta como erro o fato de não considerar a tensão intermediária, a qual apresenta influência significativa no comportamento plástico dos materiais.

Desta forma, Von Mises propôs em 1913, o critério denominado de *critério de escoamento por energia de distorção*, que define que o escoamento tem início quando a energia de distorção atinge um valor crítico *B*, constante para um dado material sob condições definidas e independente do estado de tensões (HIBBELER, 2010).

Sendo assim: $$\frac{1}{6}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2\right] = B \qquad (10)$$

No ensaio de tração teremos: $\sigma_1 = \sigma_0$ e $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$:

$$\frac{1}{6}\left[(\sigma_0-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_0-\sigma_3)^2\right]=\frac{1}{3}\sigma_0^2 \qquad (11)$$

Onde: $B=\frac{1}{3}\sigma_0^2$ (12)

Já no ensaio de torção, como: $\sigma_1 = +k$, $\sigma_2 = 0$ e $\sigma_3 = -k$

têm-se: $$\frac{1}{6}\left[(k-0)^2+\left(0-(-k)^2\right)^2+\left(+k-\left(-k^2\right)\right)^2\right]=k^2 \qquad (13)$$

com $B = k^2$; como B foi obtido do ensaio de tração, tem-se que a tensão limite de escoamento sob cisalhamento puro, pelo critério de Von Mises é dada por:

$$k=\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \qquad (14)$$

O critério de Von Mises apresenta resultados mais confiáveis visto que considera a tensão intermediária, porém, deve-se destacar que em *estados cilíndricos de tensão*, a aplicação de um ou outro critério fornece o mesmo resultado.

3.2. DINÂMICA DOS FLUIDOS

Um fluido é uma substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento (tangencial), não importa quão pequena ela possa ser. Assim os fluidos compreendem as fases líquida e gasosa (ou de vapor) das formas físicas onde a matéria existe (FOX ; MCDONALD, 2001).

3.2.1. Peso, Massa e Vazão Específicos

Ao dividirmos o peso (G) ou a massa (m) pelo valor do volume (V_L) do fluido determinamos os referidos valores:

$$\text{Massa Específica } (\rho) = \frac{m}{V_L} \qquad (15)$$

$$\text{Peso Específico } (\gamma) = \frac{G}{V_L} \qquad (16)$$

Sendo que a vazão (Q) pode ser definida com a multiplicação da velocidade (V) com a área (A).

$$Q = V \; x \; A \qquad (17)$$

3.2.2. Pressão

A pressão do fluido (P), estática, é definida levando em consideração a altura do fluido (h) e o seu peso específico (γ).

$$P = \gamma \; x \; h \qquad (18)$$

3.2.3. Lei de Newton

Segundo Isaac Newton (1687), a tensão de cisalhamento (τ) é proporcional ao gradiente da velocidade($\frac{dv}{dy}$). Portanto o aumento do coeficiente de viscosidade dinâmica (μ) representa o aumento das forças viscosas.

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dy} \qquad (19)$$

A figura 02 mostra um teste simulado utilizando fluidos computacionais:

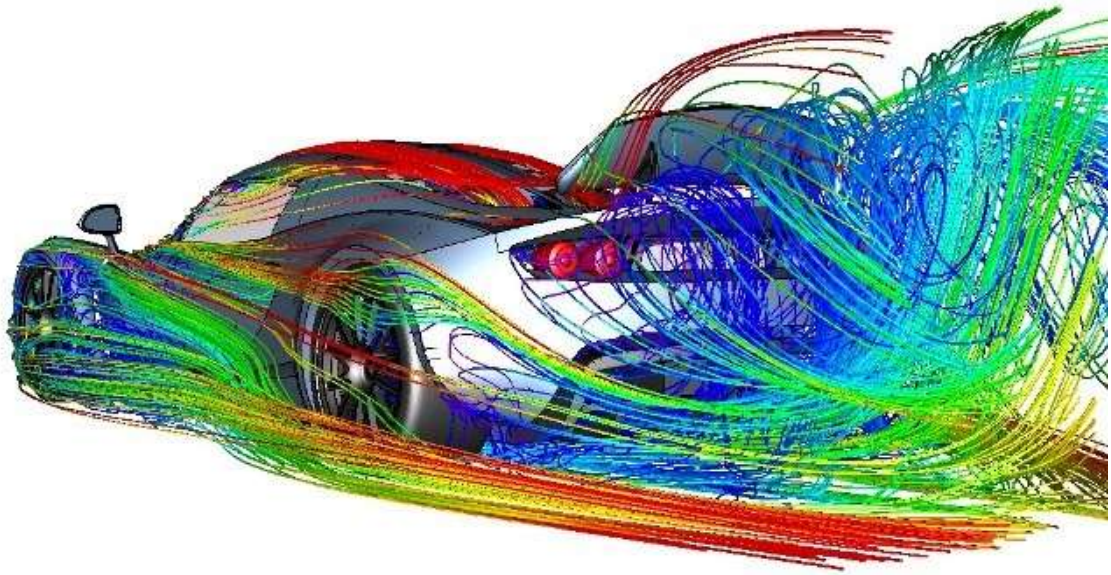


Figura 02: teste fluidos no computador.

Fonte: Autoblog-renderings (2013).

3.2.4. Número de Reynolds

É uma grandeza adimensional (coeficiente) que foi desenvolvida por Osborne Reynolds (1883), para um dado líquido levando em consideração o raio de geometria da peça (ex.: tubo), onde se o fluido, em condições reais, escoar de forma estável com suas camadas deslizando umas sobre as outras, teremos um regime Laminar com número de Reynolds (Re) menor que 2000. Entretanto se o Regime for Turbulento ocorrerá quando o número de Reynolds (Re) for maior que 4000, possuindo o fluido um fluxo irregular em altas velocidades ou com simetrias geométricas na peça que causam grandes variações de velocidade. Existindo ainda uma fase de Transição: 2000< Re <4000, porém em um tubo fechado adotamos o número de Reynolds como Laminar , quando menor que 2000, e Turbulento quando maior que 2400 (MALCEVIC ; GHATTAS, 2002).

A sua fórmula é :

$$Re = \frac{\rho\, v\, D}{\mu} \qquad (20)$$

Onde: (ρ) é massa especifica do fluido; (v) é velocidade cinemática; (D) diâmetro da peça; e (μ) o valor da viscosidade dinâmica do fluido.

3.2.5 . As Equações de Navier-Stokes

As equações de transporte de Navier-Stokes são obtidas a partir da substituição da equação constitutiva para fluido Newtoniano. Desta forma, pode-se dizer que suas derivações foram baseadas na hipótese de que as tensões normais e cisalhantes são funções lineares da taxa de deformação, em conformidade com a mais antiga lei da viscosidade de Newton. (MENTER, 2009).

De acordo com Bennett; Myers (1978), a equação de Navier-Stokes para coordenadas retangulares *(x, y, z)*, considerando a massa específica do fluido (ρ) e a viscosidade dinâmica (μ) constantes, teremos:

$$-\nabla P + \rho\vec{g} + \mu\nabla^2\vec{v} = \rho\frac{D\vec{v}}{Dt} \qquad (21)$$

$$(x) \qquad -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu\left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2}\right) = \rho\left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x\frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y\frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z\frac{\partial v_x}{\partial z}\right) \qquad (22)$$

$$(y) \qquad -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu\left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2}\right) = \rho\left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x\frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y\frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z\frac{\partial v_y}{\partial z}\right) \qquad (23)$$

$$(z) \qquad -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu\left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2}\right) = \rho\left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x\frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y\frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}\right) \qquad (24)$$

Onde,

$$\nabla \equiv \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \qquad (25)$$

$$\nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \qquad (26)$$

$$\frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + v_x \frac{\partial}{\partial x} + v_y \frac{\partial}{\partial y} + v_z \frac{\partial}{\partial z} \qquad (27)$$

Para coordenadas cilíndricas *(r, θ, z)*, considerando a massa específica do fluido (ρ) e a viscosidade dinâmica (μ) constantes, teremos:

(r)
$$-\frac{\partial P}{\partial r} + \rho g_r + \mu\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r v_r\right)\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2}\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2}\right] = \qquad (28)$$

$$= \rho\left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r}\frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z}\right)$$

(θ)
$$-\frac{1}{r}\frac{\partial P}{\partial \theta} + \rho g_\theta + \mu\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r v_\theta\right)\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2}\frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2}\right] = \qquad (29)$$

$$= \rho\left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r}\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z}\right)$$

(z)
$$-\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial v_z}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2}\right] = \qquad (30)$$

$$= \rho\left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r}\frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z}\right)$$

3.3. ELEMENTOS FINITOS

De acordo com Azevedo (2003), a análise dos meios contínuos era efetuada por resolução direta dos sistemas de equações de derivadas parciais que regem o fenômeno, tendo em consideração as necessárias condições de fronteira. Para facilitar a aplicação desta técnica a problemas não elementares, era comum recorrer a Séries de Fourier, porém devido a sua complexidade estes procedimentos só eram aplicáveis a meios contínuos homogêneos e de geometria simples.

Para tentar ultrapassar algumas destas limitações, era frequente a substituição de derivadas exatas por derivadas aproximadas, calculadas com base em grelhas de pontos, que antes do aparecimento dos computadores apresentava o inconveniente de requerer a resolução de grandes sistemas de equações lineares.

Segundo Malcevic e Ghattas (2002), todo elemento infinitesimal do material pode concebivelmente experimentar diferentes tensões ao mesmo tempo, portanto devemos olhar as tensões atuando sobre elementos extremamente pequenos dentro do corpo. Esses elementos infinitesimais são tipicamente modelados como cubos. Considera-se então que as componentes de tensão atuam sobre as faces destes cubos de duas maneiras diferentes: as tensões normais atuam na direção perpendicular à face do cubo e tendem a puxá-lo ou empurrá-lo; e as tensões de cisalhamento atuam na direção paralela às faces dos cubos, em pares (binários) sobre faces opostas, o que tende a distorcer o cubo em um formato romboidal.

Segundo a PCE Engenharia (2007), o método permite que a peça em estudo tenha forma geométrica, carregamento e condições de contorno quaisquer. Ocorre uma semelhança física entre o modelo de análise por elementos finitos e a situação física real, não sendo o modelo uma abstração matemática difícil de ser visualizada.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) foram aperfeiçoados, na década de 60, para a análise estrutural, porém com o avanço dos computadores os métodos matriciais para a análise estrutural tiveram um grande desenvolvimento, pois a crescente demanda por estruturas mais leves, tais como as encontradas na indústria aeronáutica, conduziu ao desenvolvimento de métodos numéricos que pudessem ser utilizados nas análises de problemas mais complexos (ASSAN, 2003).

Na década de 70 o MEF teve suas aplicações estendidas a problemas de mecânica dos fluidos e consolidou-se como um método indispensável para a solução de equações diferenciais complexas, pois estas descrevem diversos fenômenos físicos que são de interesse na engenharia, todavia é importante ressaltar que os métodos de elementos finitos não representariam tanto sem os estudos de pesquisadores, tais como: Bernoulli, Navier, Stokes, Lagrange, Cauchy, Euler, Mohr, Maxwell, Clapeyron, Castigliano, Galerkin e entre outros.

Algumas das análises que podem ser executadas por softwares de elementos finitos são:

- Estática linear de tensões e deformações (exs.: em edifícios, pontes, torres, componentes mecânicos em geral e tubulações industriais);

- Dinâmica (modos de vibração e frequências naturais);

- Não linear de tensões e deformações (conformação e grandes deformações);

- Térmica (transmissão de calor em regime permanente e transiente);

- Tensões devido ao carregamento térmico (tubulações);

- Escoamento de fluídos (aerodinâmica e hidrodinâmica);

-Campos Elétricos (condutores, isolantes, eletrodeposição e corrosão) e magnéticos.

O Método de Galerkin, cujo as funções de ponderação são as próprias funções, é o mais aplicado na resolução paramétrica por Elementos Finitos, pois geralmente a matriz do sistema de equações [K] torna-se simétrica, diminuindo o tempo de processamento de matrizes grandes e o custo computacional pelo fato de algumas operações serem iguais (BATHE, 2007).

Um exemplo de aplicação de *Elementos Finitos por Método Galerkin* seria para buscar Condições de Contorno a partir da seguinte equação diferencial:

$$\frac{d^2u(x)}{dx^2} - u = 0 \qquad (31)$$

Definida em *[0 ; 1]* e com *condições de contorno essenciais*:

$$u\,(x = 0) = 0 \quad e \quad u\,(x = 1) = 1$$

Solução:

A sentença de resíduos ponderados é:

$$\int_{\Omega} w_l \varepsilon_{\Omega} d\Omega = 0; \tag{32}$$

$$\text{Onde:} \quad \varepsilon_{\Omega} = \frac{d^2\overline{u}}{dx^2} + \overline{u} \neq 0 \tag{33}$$

A forma fraca da sentença de resíduos ponderados é:

$$-\int_0^1 \left(\frac{d\overline{u}}{dx}\frac{dw_l}{dx} + \overline{u} w_l \right) dx + \left[w_l \frac{d\overline{u}}{dx} \right]_{x=0}^{x=1} = 0 \tag{34}$$

Fazendo $E = M = 3$, o intervalo [0 ; 1] será dividido em três sub-intervalos (elementos) de mesmo comprimento, $h^1 = h^2 = h^3 = 1/3$.

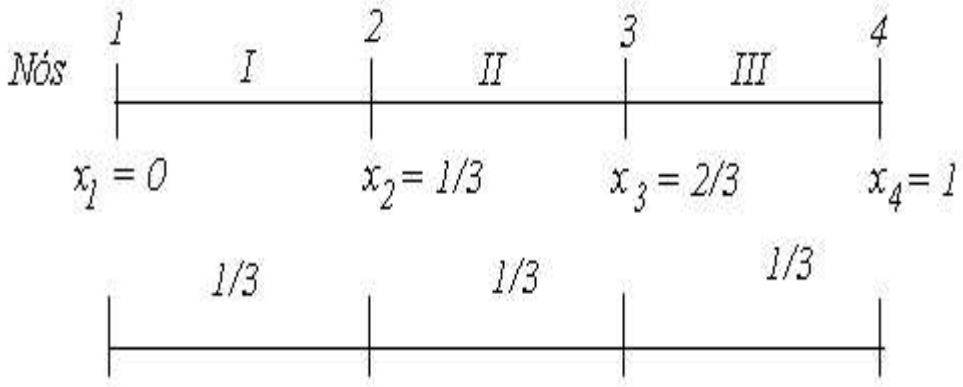


Figura 03: nós em uma viga

Fonte: Adaptado do livro de Assan (2003)

Numerando os nós de 1 a 4 e os elementos de 1 a 3, temos para o:

i) ELEMENTO I:

Onde: $N_1 = 1 - \frac{x}{h^I}$ *e* $N_2 = \frac{x}{h^I}$ (35) e (36)

$$0 \le x \le h^I \qquad \underset{\sim}{K}^I = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & 0 & 0 \\ k_{21} & k_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (37)$$

Onde:

$$K_{11} = \int_0^1 \left(\frac{dN_1}{dx}\frac{dN_1}{dx} + N_1 N_1 \right) dx \quad (1 \le l = 1, m = 1 \le M = 4) \qquad (38)$$

e

$$K_{12} = \int_0^1 \left(\frac{dN_1}{dx}\frac{dN_2}{dx} + N_1 N_2 \right) dx \quad (1 \le l = 1, m = 2 \le M = 4) \qquad (39)$$

e

$$K_{21} = \int_0^1 \left(\frac{dN_2}{dx}\frac{dN_1}{dx} + N_2 N_1 \right) dx \quad (1 \le l = 2, m = 1 \le M = 4) \qquad (40)$$

e

$$K_{22} = \int_0^1 \left(\frac{dN_2}{dx}\frac{dN_2}{dx} + N_2 N_2 \right) dx \quad (1 \le l = 2, m = 2 \le M = 4) \qquad (41)$$

Ou seja,

$$\underset{\sim}{K}^{I} = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{h} + \frac{h^I}{3}\right) & \left(-\frac{1}{h} + \frac{h^I}{6}\right) & 0 & 0 \\ \left(-\frac{1}{h} + \frac{h^I}{6}\right) & \left(\frac{1}{h} + \frac{h^I}{3}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (42)$$

A formação dos elementos do vetor $\underset{\sim}{f_I}$ é dado por:

$$f^I{}_1 = \left[N_1 \frac{d\bar{u}}{dx} \right]_{x=x_1}^{x=x_2} \quad e \quad f^I{}_2 = \left[N_2 \frac{d\bar{u}}{dx} \right]_{x=x_1}^{x=x_2} \qquad (43) \text{ e } (44)$$

Logo,

$$f_I = \begin{bmatrix} f_1^I \\ f_2^I \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad ou \quad f_I = \begin{bmatrix} \left[N_1 \frac{d\bar{u}}{dx} \right]_{x=x_1}^{x=x_2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (45) \text{ e } (46)$$

ii) ELEMENTO II:

$$h^I \le x \le h^I + h^{II}$$

Onde: $N_2 = 1 - \frac{x}{h^{II}}$ *e* $N_3 = \frac{x}{h^{II}}$ (47) e (48)

$$\underset{\sim}{K}^{II} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & k_{23} & 0 \\ 0 & k_{32} & k_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (49)$$

Onde:

$$K_{22} = \int_0^1 \left(\frac{dN_2}{dx}\frac{dN_2}{dx} + N_2 N_2 \right) dx \quad (1 \le l = 2, m = 2 \le M = 4) \qquad (50)$$

e

$$K_{23} = \int_0^1 \left(\frac{dN_2}{dx}\frac{dN_3}{dx} + N_2 N_3 \right) dx \quad (1 \le l = 2, m = 3 \le M = 4) \qquad (51)$$

e

$$K_{32} = \int_0^1 \left(\frac{dN_3}{dx}\frac{dN_2}{dx} + N_3 N_2 \right) dx \quad (1 \le l = 3, m = 2 \le M = 4) \qquad (52)$$

e

$$K_{33} = \int_0^1 \left(\frac{dN_3}{dx}\frac{dN_3}{dx} + N_3 N_3 \right) dx \quad (1 \le l = 3, m = 3 \le M = 4) \qquad (53)$$

Ou seja,

$$\underset{\sim}{K}^{II} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{h^{II}} + \frac{h^{II}}{3}\right) & \left(-\frac{1}{h^{II}} + \frac{h^{II}}{6}\right) & 0 \\ 0 & \left(-\frac{1}{h^{II}} + \frac{h^{II}}{6}\right) & \left(\frac{1}{h^{II}} + \frac{h^{II}}{3}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (54)$$

A formação dos elementos do vetor $\underset{\sim}{f}_{II}$ é dado por:

$$f^{II}{}_2 = \left[N_2 \frac{d\bar{u}}{dx} \right]_{x=x_2}^{x=x_3} \qquad e \qquad f^{II}{}_3 = \left[N_3 \frac{d\bar{u}}{dx} \right]_{x=x_2}^{x=x_3} \qquad (55) \text{ e } (56)$$

Logo, $f_{II} = \begin{bmatrix} 0 \\ f_2^{II} \\ f_3^{II} \\ 0 \end{bmatrix}$ *ou* $f_{II} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ (57) e (58)

iii) ELEMENTO III:

$$h^I + h^{II} \le x \le h^I + h^{II} + h^{III}$$

Onde:

$$N_2 = 1 - \frac{x}{h^{III}} \quad e \quad N_3 = \frac{x}{h^{III}} \qquad (59) \text{ e } (60)$$

$$\underset{\sim}{K}^{III} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{33} & k_{34} \\ 0 & 0 & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \tag{61}$$

Onde:

$$K_{33} = \int_0^1 \left(\frac{dN_3}{dx}\frac{dN_3}{dx} + N_3 N_3 \right) dx \quad (1 \le l = 3, m = 3 \le M = 4) \tag{62}$$

e

$$K_{34} = \int_0^1 \left(\frac{dN_3}{dx}\frac{dN_4}{dx} + N_3 N_4 \right) dx \quad (1 \le l = 3, m = 4 \le M = 4) \tag{63}$$

e

$$K_{43} = \int_0^1 \left(\frac{dN_4}{dx}\frac{dN_3}{dx} + N_4 N_3 \right) dx \quad (1 \le l = 4, m = 3 \le M = 4) \tag{64}$$

e

$$K_{44} = \int_0^1 \left(\frac{dN_4}{dx}\frac{dN_4}{dx} + N_4 N_4 \right) dx \quad (1 \le l = 4, m = 4 \le M = 4) \tag{65}$$

Ou seja,

$$\underset{\sim}{K}^{III} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{1}{h^{III}} + \frac{h^{III}}{3}\right) & \left(-\frac{1}{h^{III}} + \frac{h^{III}}{6}\right) \\ 0 & 0 & \left(-\frac{1}{h^{III}} + \frac{h^{III}}{6}\right) & \left(\frac{1}{h^{III}} + \frac{h^{III}}{3}\right) \end{bmatrix} \qquad (66)$$

A formação dos elementos do vetor $\underset{\sim}{f}_{III}$ é dado por:

$$f^{III}{}_3 = \left[N_3 \frac{d\bar{u}}{dx} \right]_{x=x_3}^{x=x_4} \quad e \quad f^{III}{}_4 = \left[N_4 \frac{d\bar{u}}{dx} \right]_{x=x_3}^{x=x_4} \qquad (67) \text{ e } (68)$$

Logo,

$$f_{III} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ f_3^{III} \\ f_4^{III} \end{bmatrix} \quad ou \quad f_{III} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \left[N_3 \frac{d\bar{u}}{dx} \right]_{x=x_3}^{x=x_4} \\ \left[N_4 \frac{d\bar{u}}{dx} \right]_{x=x_3}^{x=x_4} \end{bmatrix} \qquad (69)$$

iv) MONTAGEM DA MATRIZ GLOBAL

O vetor $\underset{\sim}{f}$ global é definido como: $f = \left[N_l \, \frac{d\bar{u}}{dx} \right]_{x=0}^{x=1}$, ou seja:

$$f_l = \begin{bmatrix} f_1^I \\ f_2^I + f_2^{II} \\ f_3^{II} + f_3^{III} \\ f_4^{III} \end{bmatrix} \qquad \textit{logo} \qquad \underset{\sim}{f} = \begin{bmatrix} -d\bar{u}/dx)_{x=0} \\ 0 \\ 0 \\ -d\bar{u}/dx)_{x=1} \end{bmatrix} \qquad (70) \text{ e } (71)$$

Agrupando as matrizes $\underset{\sim}{K}^I, \underset{\sim}{K}^{II}, \underset{\sim}{K}^{III}$ dos elementos para formar a matriz global, encontra-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{1}{h}+\frac{h}{3}\right) & \left(-\frac{1}{h}+\frac{h}{6}\right) & 0 & 0 \\ \left(-\frac{1}{h}+\frac{h}{6}\right) & 2\left(\frac{1}{h}+\frac{h}{6}\right) & \left(-\frac{1}{h}+\frac{h}{6}\right) & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{h}+\frac{h}{6}\right) & 2\left(\frac{1}{h}+\frac{h}{3}\right) & \left(-\frac{1}{h}+\frac{h}{6}\right) \\ 0 & 0 & \left(-\frac{1}{h}+\frac{h}{6}\right) & \left(\frac{1}{h}+\frac{h}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{u}_2 \\ \bar{u}_3 \\ \bar{u}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left.\frac{d\bar{u}}{dx}\right|_{x=0} \\ 0 \\ 0 \\ \left.\frac{du}{dx}\right|_{x=1} \end{bmatrix} \qquad (72)$$

Na figura 04 podemos ver um exemplo de resolução computacional, por Elementos Finitos com cargas pontuais, de uma viga.

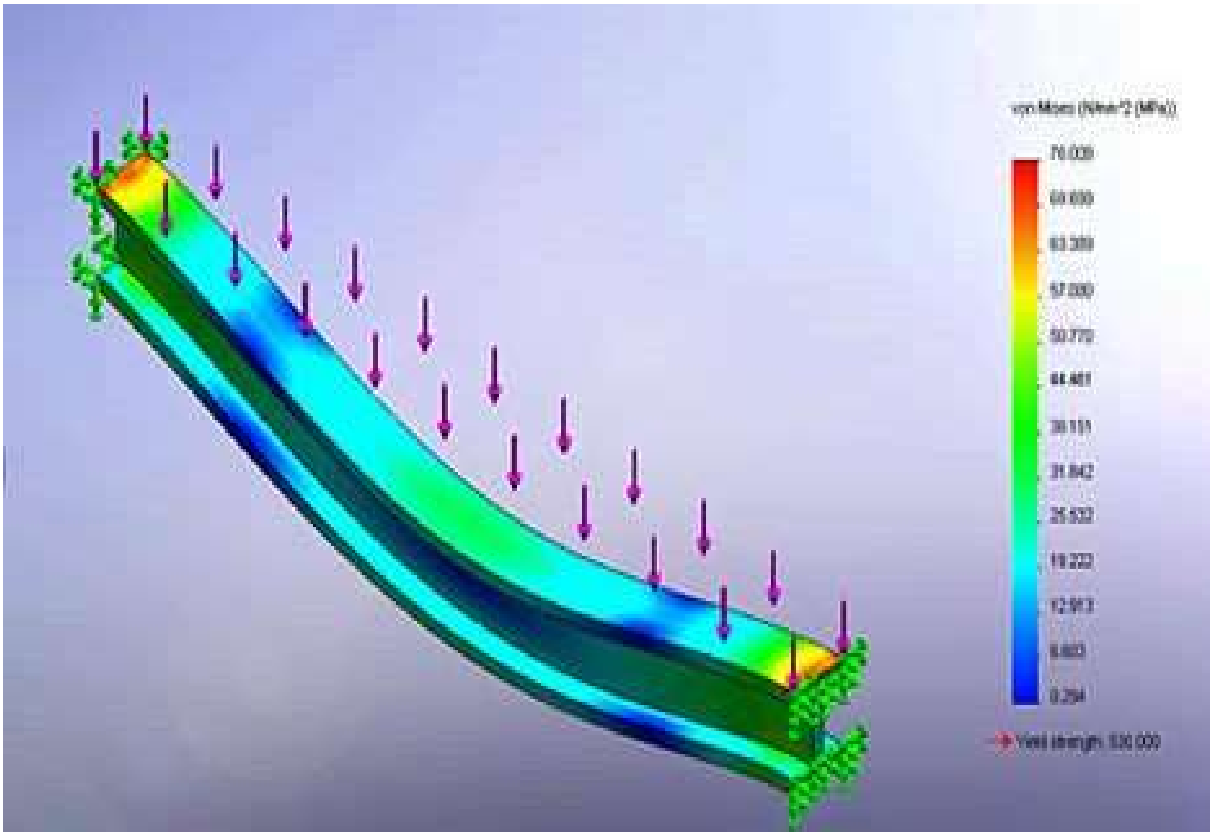


Figura 04: simulação de elementos finitos Solidworks.

Fonte: site Render (2012).

3.4. MÁQUINAS DE FLUXO

São equipamentos que promovem a troca de energia entre um sistema mecânico e um fluido, transformando energia mecânica em energia de fluido ou energia de fluido em energia mecânica quando há o aumento do nível energético de um fluido a partir do fornecimento de energia mecânica.

Segundo Bennett e Myers (1999), as máquinas de fluido são normalmente subdivididas em dois tipos principais: as máquinas de deslocamento positivo e as máquinas de fluxo .

O primeiro tipo, máquinas de deslocamento positivo, também chamado de estático, uma quantidade fixa de fluido de trabalho é confinada durante sua

passagem através da máquina e submetido a trocas de pressão em razão da variação no volume do recipiente em que se encontra contido, isto é, o fluido é obrigado a mudar o seu estado energético pelo deslocamento de uma fronteira em movimento.

No segundo tipo, máquinas de fluxo, que são também denominadas como máquinas dinâmicas, o fluido não se encontra em momento algum confinado e sim num fluxo contínuo através da máquina, submetido a trocas de energia devido a efeitos dinâmicos. Na figura 05 podemos ver diversos exemplos de máquinas de fluido:

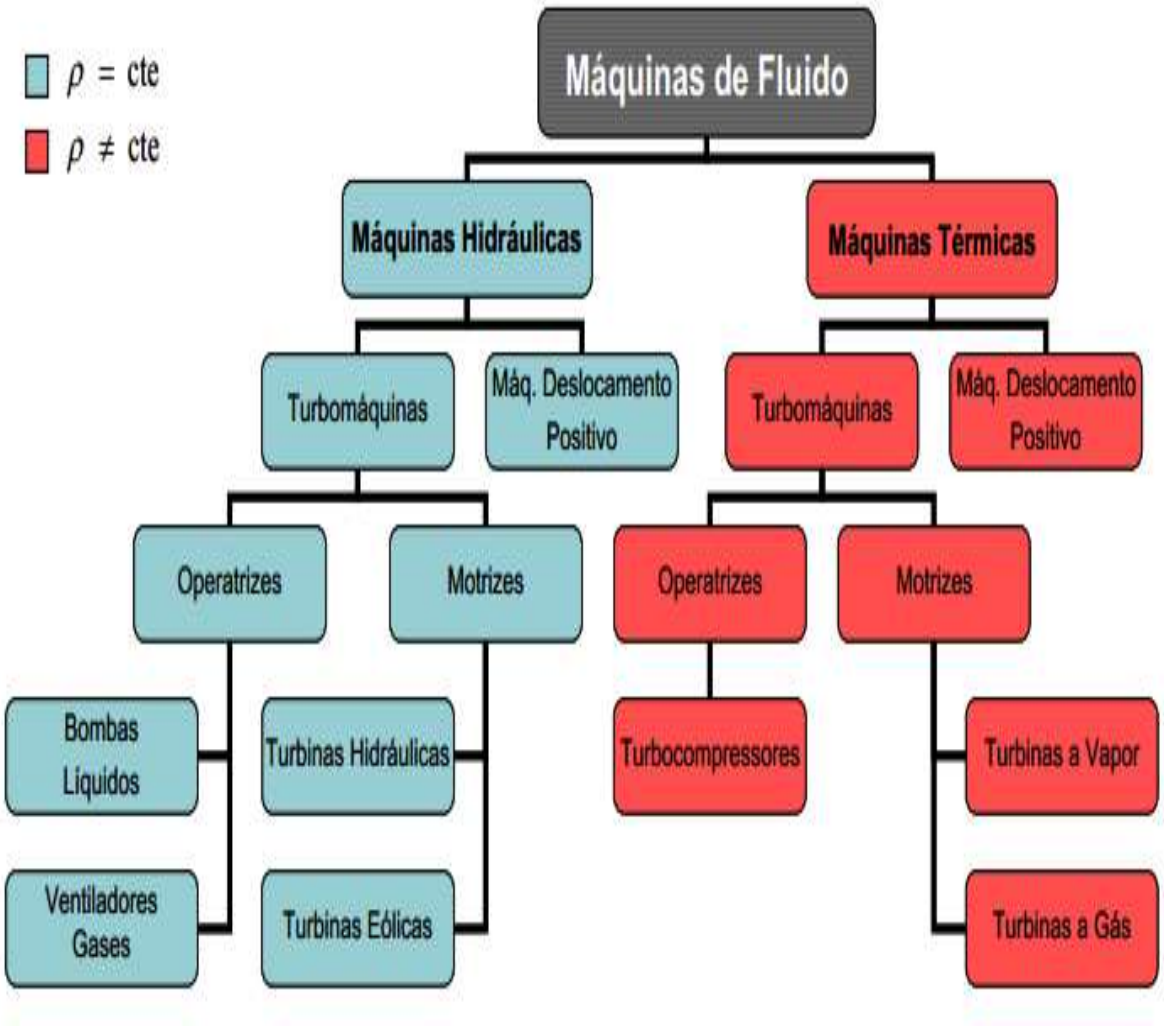


Figura 05: tipos de máquinas de fluido.

Fonte: Bran; Souza (1980).

3.4.1 Análise do Fluxo de Fluidos nas Turbomáquinas

Com base na lei de Newton para sistemas abertos pode-se afirmar que a conservação do momento angular para um *volume de fluido em uma máquina de fluxo é*:

$$E = \frac{d\,(\dot{m}\,V)}{dt} \qquad (73)$$

onde [E] é as forças neste volume, [ṁ] a sua massa e [V] é a velocidade deste.

Se forem integrados o volume fechado, onde 1 é a entrada e o 2 é a saída na turbomáquina, podemos obter o seguinte resultado:

$$\iiint_1^2 E = \iiint_1^1 \frac{d\,(\dot{m}\,V)}{dt} \;.\; F = \dot{m}\;(V_1 - V_2) \qquad (74)$$

Para a dedução da *Equação Fundamental de Euler para as Turbomáquinas* serão feitas as seguintes hipóteses :

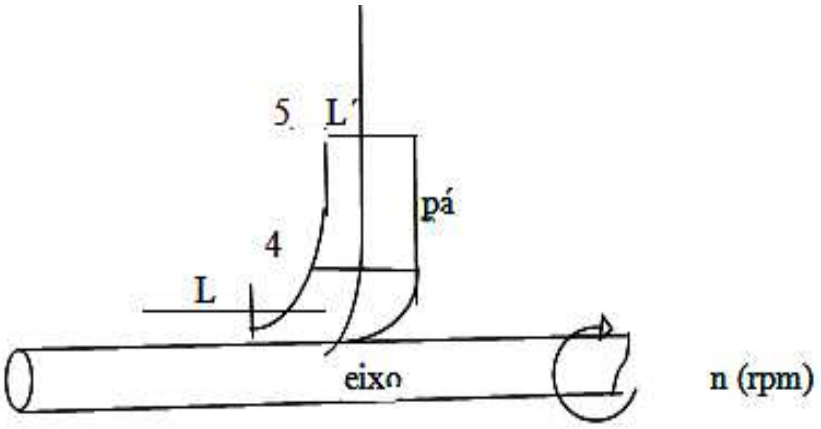


Figura 06: cinemática de um rotor
Fonte: adaptado do Livro de Menter (2009)

Considerando um rotor de uma máquina hidráulica, como mostra figura 06, e aplicando o princípio das quantidades de movimento na linha média LL (momento angular), com a vazão de dQ.

Para o cálculo das forças vamos considerar apenas a componente da força na direção X, escoamento mono-dimensional

$$d\vec{F}_x = dm\frac{dV_X}{dt} \quad (75)$$

.

Substituindo a massa desta expressão por m= ρV_{vol} , que significa massa específica [ρ] x Volume [V_{vol}] e usando também a expressão da vazão dQ= dV_{vol} /dt , o volume será dado por dV_{vol} = dQ dt.

A massa será então substituída por :

dm = ρ dQ dt

$$d\vec{F}_x = dm\frac{dV_X}{dt} = \rho\, dQ\, dt\, \frac{dV_X}{dt} \quad (76)$$

Integrando esta equação com relação à velocidade desde os pontos 4 e 5, onde ela passará a se chamar de V_4 e V_5, tem-se:

$$d\vec{F}_x = \rho\, dQ \int_4^5 dV_x = \rho\, dQ(V_5 - V_4) \quad (77)$$

De acordo com Menter (2009), aplicando o momento angular da quantidade de movimento em relação ao eixo do rotor têm-se :

$$dM = d\vec{F}_x L = \rho\, dQ(L_5 V_5 - L_4 V_4) \quad (78)$$

Integrando novamente, temos: $M_{t\infty} = \rho\, Q(L_5 V_5 - L_4 V_4)$ (79)

Para obter a potência (P_t) multiplicamos pela velocidade angular, ou seja:

$$P_{t\infty} = w.M_{t\infty} = w\rho\, Q(L_5 V_5 - L_4 V_4) \quad (80)$$

As figuras 07 e 08 mostram a evolução das velocidades:

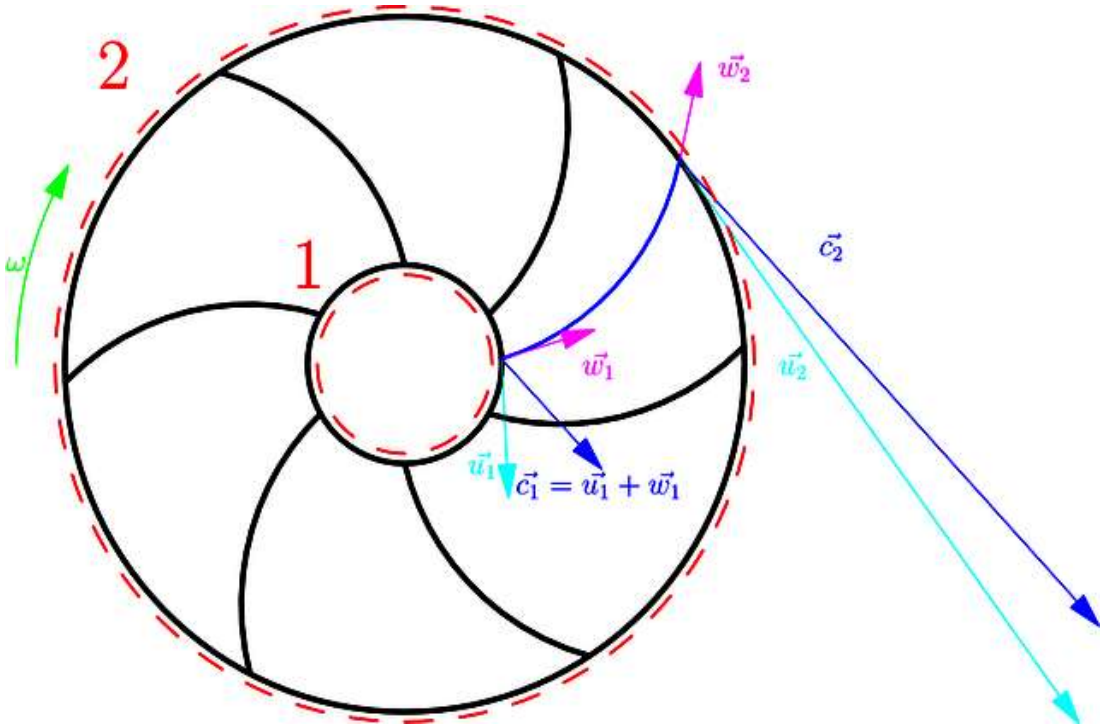


Figura 07: momentos angulares de um rotor

Fonte: Mattingly; Pratt (2002).

Onde [*w*] é a velocidade angular, [Q] a vazão, [p] massa específica, [V = c] velocidade do fluido e a [u] velocidade do impulsor.

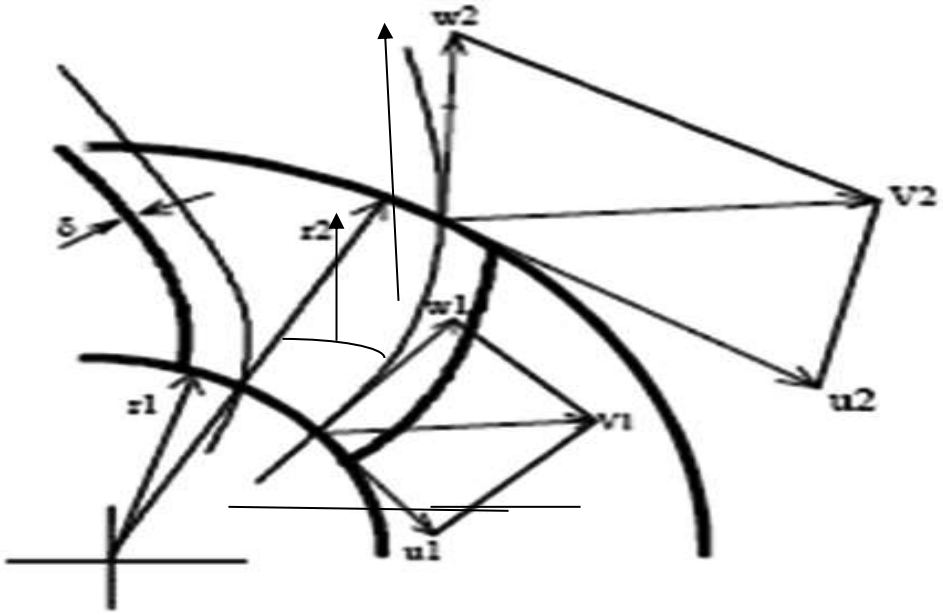


Figura 08: cinemática de um rotor

Fonte: adaptado do livro de Menter (2009).

Onde o L_5 e L_4 são obtidos da figura 08 por:

$$L_5 = r_5 \cos\alpha_5 \qquad L_4 = r_4 \cos\alpha_4$$

$$P_{t\infty} = w\rho\, Q(L_5 V_5 - L_4 V_4) = w\rho\, Q(V_5 \cos\alpha_5 r_5 - V_4 \cos\alpha_4 r_4) \quad (81)$$

$$V_5 \cos\alpha_5 = Vu_5 \qquad V_4 \cos\alpha_4 = Vu_4$$

$$wr_5 = u_5 \qquad wr_4 = u_4$$

$$P_{t\infty} = w\rho\, Q(V_5 \cos\alpha_5 r_5 - V_4 \cos\alpha_4 r_4) = \rho\, Q(V_{u5} u_5 - V_{u4} u_4) \quad (82)$$

$$P_{t\infty} = \rho\, Q(V_{u5} u_5 - V_{u4} u_4) = \gamma\, Q\, H_{t\infty} \quad (83)$$

Como o que estamos procurando é a energia, teremos então a expressão final:

$$H_{t\infty} = \pm \frac{1}{g}(u_5 V_{u5} - u_4 V_{u4}) \quad (84)$$

Esta é a *equação fundamental ou de Euler para turbomáquinas*, onde o sinal [+] para máquinas geradoras e o sinal [-] para motoras, que são válidas para máquinas radiais e axiais.

Para as máquinas axiais: $u_5 = u_4 = u$ a equação fundamental passa a ser:

$$H_{t\infty} = \pm \frac{1}{g} u(V_{u5} - V_{u4}) \quad (85)$$

- No projeto de turbinas *(MOV01)* procura-se diminuir ao máximo Vu_5, portanto para esta condição, tem-se $Vu_5 \cong 0$ e $\alpha_5 = 90^0$, como pode ser observado em um triângulo de velocidades na saída.

- Para o projeto de bombas *(MOV02)* impõe-se a condição de entrada natural (sem choque), o que leva a α_5=90^0, e consequentemente Vu_4=0. Com aletas direcionais na entrada, pode ser imposto um valor de α_5 diferente de 90^0.

Nestas condições, tem-se a equação fundamental simplificada para os tipos de movimentos:

$$Ht_\infty = \frac{1}{g} u_4 Vu_4 \qquad \textit{MOV01} \text{ (Turbinas)} \qquad (86)$$

$$Ht_\infty = \frac{1}{g} u_5 Vu_5 \qquad \textit{MOV02} \text{ (Bombas)} \qquad (87)$$

Do triângulo de velocidades de entrada de um rotor de turbina, deduz-se trigonometricamente que:

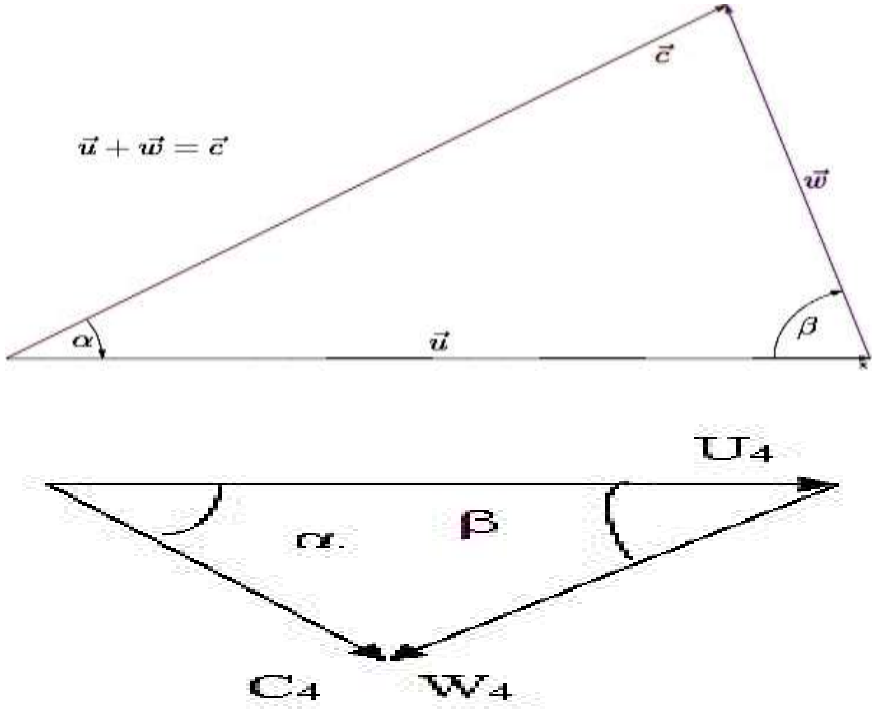


Figura 09: triângulos de velocidades

Fonte: adaptado do Livro de Menter (2009).

Na figura 09 a letra (c) é equivalente a velocidade (V)

$$\mathbf{W_4}^2 = \mathbf{U_4}^2 + \mathbf{V_4}^2 - 2\mathbf{U_4}\mathbf{V_4}\cos\boldsymbol{\alpha_4} \qquad (88)$$

Onde $V_4\cos\alpha_4 = V_{u4}$, substituindo a expressão passa a ser :

$$W_4^{\,2} = U_4^{\,2} + V_4^{\,2} - 2U_4V_{u4} \qquad (89)$$

isolando U_4V_{u4} tem-se o seguinte:

$$U_4V_{u4} = \frac{1}{2}\left(U_4^{\,2} + V_4^{\,2} - W_4^{\,2}\right) \qquad (90)$$

Da mesma maneira para a saída:

$$U_5V_{u5} = \frac{1}{2}\left(U_5^{\,2} + V_5^{\,2} - W_5^{\,2}\right) \qquad (91)$$

Substituindo na equação de EULER, teremos:

$$Ht_\infty = \frac{1}{g}\left[\left(\frac{V_4^2 - V_5^2}{2}\right) + \left(\frac{u_4^2 - u_5^2}{2}\right) + \left(\frac{W_5^2 - W_4^2}{2}\right)\right] \text{ para máquinas motoras MOV01} \qquad (92)$$

$$Ht_\infty = \frac{1}{g}\left[\left(\frac{V_5^2 - V_4^2}{2}\right) + \left(\frac{u_5^2 - u_4^2}{2}\right) + \left(\frac{W_4^2 - W_5^2}{2}\right)\right] \text{ para máquinas geradoras MOV02} \qquad (93)$$

$$Ht_\infty = \pm\frac{1}{g}\left[\left(\frac{V_5^2 - V_4^2}{2}\right) + \left(\frac{u_5^2 - u_4^2}{2}\right) + \left(\frac{W_4^2 - W_5^2}{2}\right)\right] \text{ sinal [+] MOV02 e sinal [-] MOV01} \qquad (94)$$

A altura teórica infinita pode ser escrita também pela equação da energia de Bernoulli (ΔH_{est}) ou seja :

$$\Delta H_{est} = \left(\frac{p_5 - p_4}{\rho g} + \frac{V_5^2 - V_4^2}{2g} + Z_5 - Z_4\right) \quad \text{[+] MOV02 e o sinal [-] MOV01} \qquad (95)$$

Supondo que $Z_5 - Z_4 \cong 0$, resulta:

$$\Delta H_{est} = \pm\left(\frac{p_5 - p_4}{\rho g} + \frac{V_5^2 - V_4^2}{2g} \right) \quad (96)$$

Comparando estas equações resulta em:

$$\Delta H_{est} = \pm\left(\frac{p_5 - p_4}{\rho g} \right) = \pm \frac{1}{g}\left[\left(\frac{u_5^2 - u_4^2}{2} \right) + \left(\frac{W_4^2 - W_5^2}{2} \right) \right] \quad (97)$$

$$\Delta H_{din} = \pm \frac{1}{g}\left[\left(\frac{V_5^2 - V_4^2}{2} \right) \right] \quad (98)$$

Com a aplicação da 1ª Lei da Termodinâmica (Equação da Conservação da Energia) a este Volume de Controle leva a:

$$\Delta H_{est} = \frac{p_5 - p_4}{\rho g} + \frac{V_5^2 - V_4^2}{2g} + Z_5 - Z_4 \quad (99)$$

Onde [P] representa a pressão, [V] a velocidade absoluta, os subscritos 4 e 5, neste caso, representam as regiões de entrada e saída do rotor e [Z] representa a diferença de elevação média entre a entrada e a saída do rotor (SILVA, 2010).

3.5. MOTORES À COMBUSTÃO

O motor é um dispositivo que converte a energia calorífica produzida pela combustão de um combustível em energia mecânica, capaz de imprimir movimento ou energia para um determinado sistema mecânico ou elétrico (COSTA, 2002).

2.6.1. Características dos Motores:

a) *A Combustão Externa*: São aqueles onde o calor dissipado, por uma combustão, é transferido a um fluido intermediário (ar, hidrogênio, vapor d`água etc). Este fluido intermediário é o gerador do trabalho mecânico.

b) *A Combustão Interna*: São os motores onde os produtos da combustão constituem eles mesmos o fluido de trabalho.

No caso dos motores a *Combustão Interna* podemos distinguir ainda:

- *Motores Alternativos*: do tipo a “ignição por centelha” e motores a ignição por compressão ou “Diesel”. Sendo que os de ignição por centelha seguem o Ciclo Otto que possui os seguintes processos: uma admissão isobárica, uma compressão adiabática, uma combustão isocórica, uma expansão adiabática e a abertura da válvula com posterior exaustão.

  No modo de ignição por compressão, do Ciclo Diesel, o ar é admitido pela câmara no primeiro ciclo entrando na câmara. No segundo ciclo, o pistão faz a compressão dessa massa de ar e no término da compressão injeta-se combustível sob pressão no interior da câmara. Dada as altas temperatura e pressão no interior da câmara a mistura sofre a explosão ao final do ciclo. A figura 10 mostra as partes de um motor:

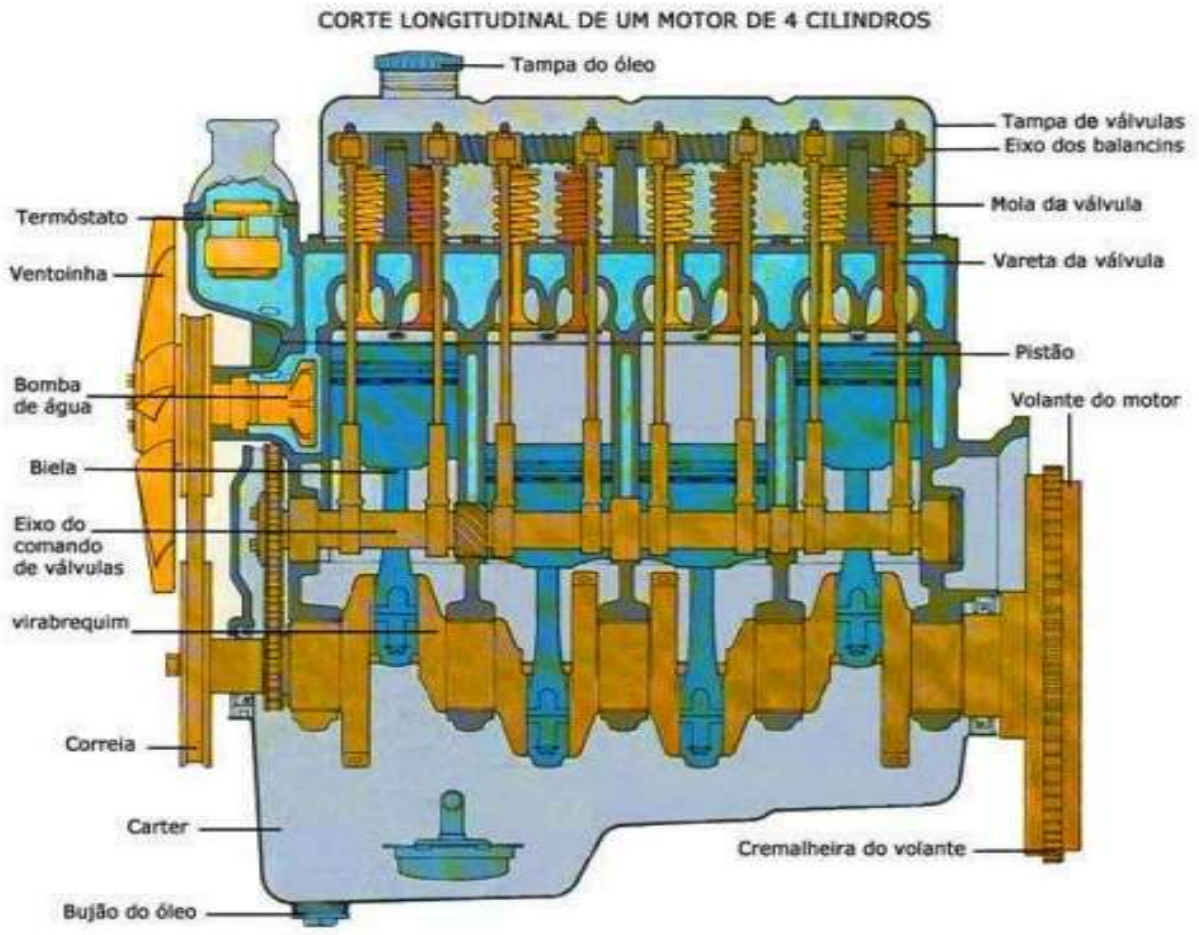


Figura 10: motor alternativo diesel.

Fonte: Costa (2002).

- *Motores Axiais*: onde as diferentes evoluções do fluido no motor acontecem em espaços sucessivos e justapostos, como por exemplo nas turbinas a gás como mostra a figura 11.

Este tipo de motor segue o ciclo termodinâmico Brayton, onde primeiramente o ar em condição ambiente passa pelo compressor, onde ocorre compressão adiabática e isentrópica, com aumento de temperatura e consequente aumento de entalpia. Após ser comprimido o ar é direcionado às câmaras, onde se mistura com o combustível possibilitando a queima e aquecimento a pressão constante.

Ao sair da câmara de combustão, os gases, à alta pressão e temperatura se expandem conforme passam pela turbina idealmente sem variação de entropia. Na medida em que o fluido exerce trabalho sobre as palhetas, reduzem-se a pressão e a temperatura dos gases gerando potência mecânica (BENNETT;MYERS, 1978).

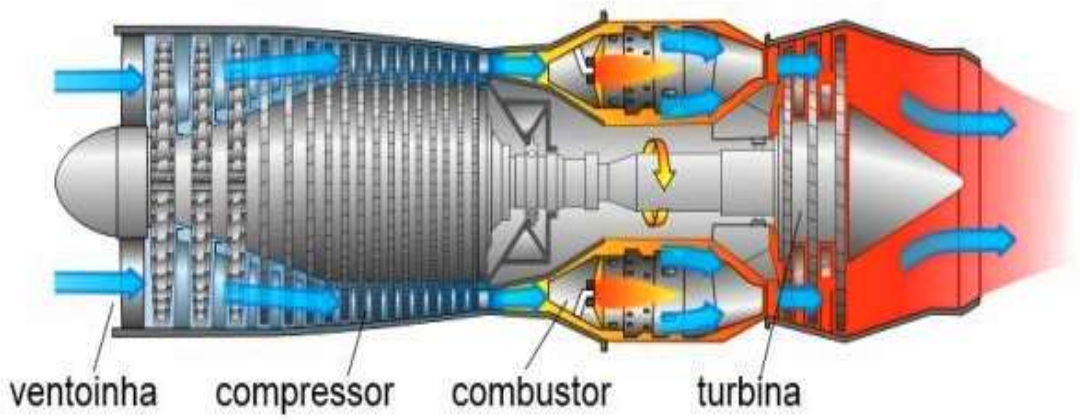


Figura 11: motor axial de uma turbina a gás.

Fonte: site Jet engine (2007).

4. A EVOLUÇÃO DOS SIMULADORES COMPUTACIONAIS

4.1. AMBIENTES VIRTUAIS CAD, CAM E CAE

O desenho técnico tem sido parte integrante da indústria desde a sua concepção como organização produtiva, pois o desenho técnico é o elo de ligação entre o departamento de projetos e a produção.

O termo CAD significa Computed Aided Design ou Desenho Assistido por Computador e o termo CAM significa Computed Aided Manufacturing ou Fabricação Assistida por Computador. Sendo que a integração entre sistemas digitais e os padrões de arquivos gráficos permite a interação entre os dados gerados na concepção e na contínua gestão do projeto, possibilitando a automação dos processos de monitoramento, controle e gerenciamento da manufatura. Os sistemas CAM como efetivo uso da tecnologia computacional no planejamento, gerenciamento e controle das funções de manufatura tornaram-se fundamentais para as empresas que possuem operações complexas, através de suas interfaces diretas ou indiretas (Groover; Zimers, 1984).

Segundo Rehg (1994), CAE (Computer Aided Engineering ou Engenharia Auxiliada por Computador) é a análise e resolução de projetos de engenharia usando técnicas baseadas em computação para calcular parâmetros operacionais, funcionais e de manufatura do produto que são muito complexos para os métodos clássicos.

O CAE é um complemento do CAD, pois com o CAD elaboram-se os projetos dos produtos, especificações, detalhamentos, características dos materiais (densidade e propriedades mecânicas, por exemplo) e dados para a programação de máquinas de usinagem. Tendo este projeto, passa-se então ao CAE que otimiza este projeto do produto, isto é feito através de cálculos de engenharia que fazem simulações de deformações mecânicas, dinâmica dos fluídos, termodinâmica entre outras funções.

Com o CAE é possível, por exemplo, ver qual parte do produto terá menos resistência com uma determinada carga atuando sobre ele, quanto de força um ponto (nó) está recebendo e se ele conseguirá resistir a esta força. Já com o CAD,

simulações deste nível não seriam possíveis, pois este visa desenvolver os projetos dos produtos. Alguns CADS mais sofisticados já suportam algumas simulações que identificam interferências, colisões, pontos de visualização de perfis, visualização do produto por diversos ângulos e estudo de movimentos, mas não chegam ao nível de sofisticação de dimensionamento dos elementos, que só são possíveis com o CAE.

Utilizar o CAE em combinação com CAD, como mostra figura 12, traz uma grande vantagem no desenvolvimento de um produto, pois pode-se simular situações reais de uso do produto e com isso muitas vezes diminuir a quantidade de material utilizado para a produção, também podemos utilizar um material mais adequado levando-se em consideração o custo e o benefício; e ter a certeza de que sobre determinadas situações o produto não apresentará problemas (ANSYS LIBRARY, 2009).

Figura 12: arquivo 3D CAD/CAE.

Fonte: site Nx cam teamcenter (2012).

4.2. OS PROCESSOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Donatelli (2002), define três tipos de abordagens que podem ser claramente utilizadas na construção das ferramentas de simulação, que serão descritas a seguir:

Simulador Modular Sequencial: nesta abordagem a estrutura do programa é modular e as variáveis interagidas são variáveis de fluxo de recirculação. Várias suposições são feitas para a obtenção da solução do problema, dentre elas:

- *As Variáveis Associadas aos Componentes*, isto é, as variáveis de projeto devem sempre ser definidas e não devem ser tratadas como incógnitas. A mesma suposição é feita para variáveis associadas com os fluxos que entram no processo.
- *O Fluxo de Informações* no modelo matemático que devem coincidir com os fluxos físicos da planta. Essa suposição possibilita agrupar as variáveis em sub-vetores associados com o fluxo físico e selecionar para cada função uma variável associada com o fluxo de saída do componente. Essa abordagem é apropriada para a simulação de sistemas e processos. Entretanto, as suposições feitas tornam o seu uso inadequado para o projeto e otimização de processos.

Simulador Modular Orientado à Projetos: a estrutura do programa é modular e as variáveis interagidas são variáveis de fluxo de recirculação; e as variáveis de projeto não são especificadas. Através desta estrutura orientada à projetos é possível, com limitações, otimizar sistemas.

Simulador Modular Orientado a Equações: nesta abordagem, apesar da sistemática, se considera a estrutura como sendo modular, visto que cada componente usado na configuração do sistema é modelado separadamente. No entanto, a modelagem do sistema como um todo, realizada através da seleção e interligação adequada dos componentes (módulos), produz um grande sistema de equações algébricas não lineares, cujo as soluções desses sistemas de equações são as iterações feitas simultaneamente sobre todas as incógnitas. Desta forma, têm-se total liberdade na definição das incógnitas, o que torna essa abordagem mais apropriada para projeto e otimização de sistemas.

Entre os principais resultados fornecidos por programas de simulação Computacional voltados para a engenharia, como o Ansys Workbench, Catia Analysis v6, PTC Creo Simulate, Solidworks Simulation e Autodesk Simulation (Mechanical, Inventor, Alias Automotive, Moldflow, Robot Structural e CFD), podemos verificar em modelos tridimensionais (3D), além das características já citadas anteriormente, também: os deslocamentos, tensões, pressões de contato, deformações, fatores de fadiga e de mecânica da fratura, analise de temperaturas de trabalho, coeficientes de filme, velocidades de escoamento de fluidos (líquidos e gases), concentrações de misturas, campos magnéticos e elétricos, acoplamentos,

eixos, molas, suportes e estruturas metálicas; e a análise por elementos finitos gerando malhas paramétricas e o uso de NURBS (B-Spline Racional Não Uniforme) para superfícies curvas.

No mercado existe uma ampla e diversificada gama de outros simuladores computacionais que podem gerar desde simples simulações de layout até simulações complexas ou então podem simular uma imersão em realidade virtual (CAVE 3D); e também existem àqueles que geram uma realidade aumentada (Revista Cadware, 2013). Como mostram as figuras a seguir:

Figura 13: CAVE 3D para análises de turbinas.

Fonte: site Nuntiustec (2012).

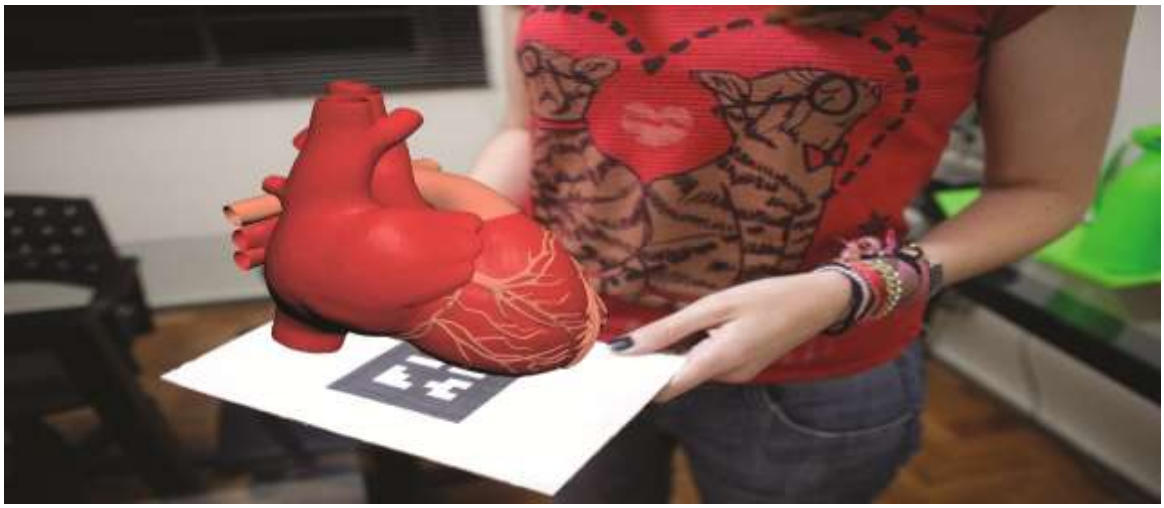


Figura 14: realidade aumentada de um coração virtual para estudos.

Fonte: site Detalhes.Educação (2013).

A adaptação das empresas para trabalharem “virtualmente” seus protótipos, se disseminou pelo mundo por causa das soluções viáveis e mais acessíveis, que tornaram os simuladores compatíveis com os custos e operações de todos os tipos de empresas. Atualmente, segundo Souza e Ullbrich (2009), estima-se que haja mais de 70 empresas criadoras de software competindo no mercado mundial. De acordo com relatórios elaborado pela consultoria Frost & Sullivan, em 2008, dentre as principais empresas destacam-se a Dassault Systems , Autodesk, PTC (Pró/Engineer), Ansys Corporation e Siemens PLM (atual Unigraphics).

4.3. ASPECTOS DA PROTOTIPAGEM SIMULADA

Os protótipos buscam criar replicas reais ou virtuais de produtos, como mostra figura 15, onde serão feitos os testes simulados necessários para validar as suas características ou para gerar aprendizado sobre o seu funcionamento.

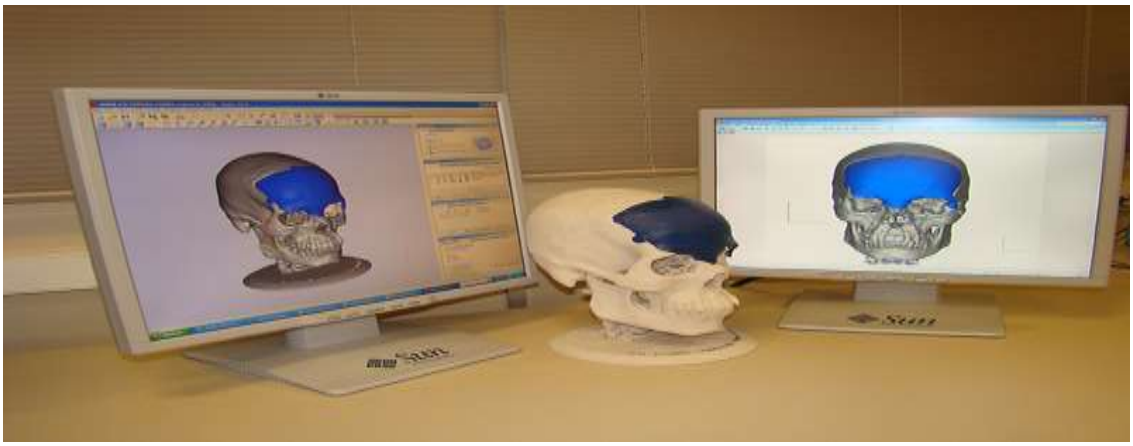


Figura 15: um protótipo de prótese craniana real e virtual

Fonte: site jornal GGN (2013).

4.3.1. Protótipos Virtuais

Nas empresas tornou-se comum o abandono das antigas pranchetas de desenho técnico e o uso de modelagens de produtos em ambiente virtual, que são criados pelos usuários de CAD, que normalmente são ligados ao departamento de desenho e criação de produtos(DMU – Digital Mock-Up), sendo que as modelagens 2D e 3D passaram a ser associadas à uma forma estruturada de organizar os arquivos que contém as informações geométricas de cada peça que compõem o

produto, gerando assim, através da modelagem 3D, protótipos virtuais e ultrapassando assim os limites da engenharia de produtos e fazendo uma interligação simultânea com todo os outros setores da empresa (MILBURN, 2004).

O protótipo virtual ao receber recursos de configuração e normas de utilização gera um referencial oficial do produto almejado, para ser produzido pela empresa ou utilizado como protótipo conceito ou funcional, que são utilizados respectivamente como parâmetros de forma e aplicação para o desenvolvimento de um novo produto ou renovação de uma linha de produtos já existentes.

Ao longo dos anos a concorrência entre as empresas fabricantes de simuladores tem aumentado a diversidade de sistemas computacionais e de sistemas embarcados em simuladores físicos, que trabalham com gráficos em realidade virtual. Sendo assim, podemos encontrar simuladores que variam desde simples softwares com alto poder gráfico e interfaces voltados para a simulação, que podem ser utilizados em computadores pessoais que possuam um bom desempenho de memória e processamento.

Assim como também encontramos máquinas simuladoras grandes com inteligência artificial avançada, que possuem também aplicativos de simulação fazendo parte da sua programação, como à exemplo dos programas utilizados nos simuladores físicos aerodinâmicos de túnel de vento, como mostra figura 16, que são muito utilizados na indústria automobilística e aeronáutica (FISCHLER, 2005).

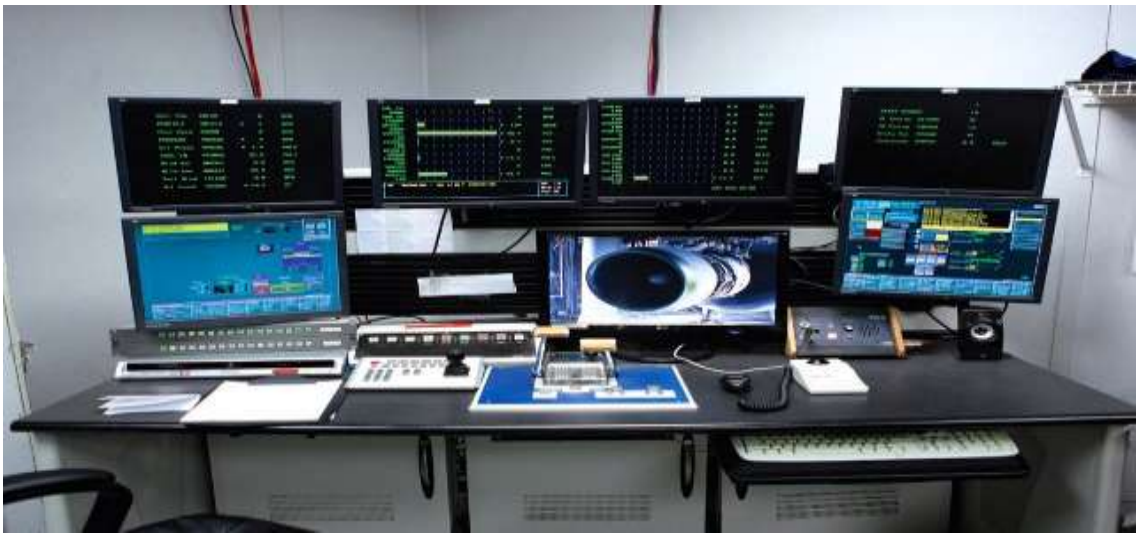


Figura 16: sistemas computacionais de um simulador de túnel de vento.

Fonte: site Questione.blogspot (2010).

4.3.2. Protótipos Físicos

O uso de protótipos físicos são obrigatórios no desenvolvimento de um produto, pois assim simularemos características de segurança e ergonomia que não foram possíveis de serem simuladas no ambiente virtual de um CAD 3D ou buscando-se confirmar características do fluxo de fluidos e funcionamento de componentes testados no simulador computacional.

Os protótipos físicos ou reais podem ser fabricados em escala natural, reduzida ou expandida, dependendo dos custos envolvidos, maquinário disponível para construção e as necessidades da avaliação exigida. Em alguns casos, os elementos têm que ser feitos em partes, para o cumprimento da escala escolhida. Quanto ao tipo de material, observam-se a construção de protótipos com os mais variados materiais, tais como: papel, isopor, madeira, fios de arames, resinas, ceras, polímeros, metais, entre outros.

Normalmente, quando se trata de protótipos conceituais, pode-se utilizar materiais com características compatíveis com o original, tais como consistências, texturas e cores. Entretanto, para os protótipos físicos funcionais, onde a avaliação do elemento considera aspectos como: resistência mecânica, características térmicas e elétricas, entre outras; o material a ser utilizado geralmente é o mesmo do produto final (SOUZA;ULBRICH, 2009).

Segundo Stoecker (1989), os protótipos reais podem ser desenvolvidos não só visando os elementos que compõem o produto propriamente dito, mas também as ferramentas para sua fabricação, tais como modelos para fundição, matrizes de conformação, de estampagem e de injeção. Assim, através de pré-séries de elementos fabricados com estas ferramentas, pode-se construir produtos para a avaliação.

Geralmente utiliza-se a prototipagem rápida (Rapid Prototyping) para construir protótipos físicos industriais, sendo que está técnica consiste em diversos métodos como: Estereolitografia, Modelação por Deposição Fundida, Laser de Moldagem de Pó, entre outros; onde são adicionados finas camadas ou pequenas partículas de materiais, que são aglutinadas e assim formam um objeto. Este método de

fabricação depende de arquivos CAD 3D, ao contrário da fabricação de protótipos por retirada de material (usinagem tradicional).

Nos últimos anos com advento das impressoras 3D temos vislumbrado a possibilidade real destas impressoras poderem construir produtos rapidamente, não tão somente utilizando polímeros (ABS), mas também gerar produtos tridimensionais em cerâmicas, metais e outros materiais com alta resistência, que após serem simulados no computador poderiam ser fabricados diretamente, como por exemplo no tipo de impressora 3D, como mostra figura 17, cujo o protótipo físico já está sendo testado na Universidade da Califórnia do Sul, nos EUA, e que constrói uma casa inteira de fibrocimento a partir de um desenho CAD e simulação CAE, sem necessitar do uso de mão de obra (PINHO; FREITAS;TRAMONTANO, 2003).

Figura 17: protótipo de impressora 3D que constrói casas inteiras.

Fonte: site Engenharia-Civil. blog (2014).

4.4. A IMPORTÂNCIA DOS PROJETOS 3D SIMULADOS

Os projetos industriais sempre são organizados e planejados por uma equipe diversa, que envolve desde diretores, gerentes de diversos setores, corpo de engenheiros e até mesmo colaboradores, que possam contribuir com ideias em alguma fase do planejamento do projeto, que pode envolver desde simples intervenções no processo fabril até modificações completas e complexas para modificar um produto, uma linha inteira de produtos ou para atender à uma demanda especifica e unitária ou muito alta e diversificada (TUBINO, 2009).

Segundo Ferreira (2007), a necessidade de redução nos prazos de entrega e o aumento da produtividade da produção, além do aumento na competitividade do mercado e exigência de uma maior qualidade nos produtos, têm contribuído para a maior complexidade dos produtos e exigido um número maior de profissionais envolvidos em todo o seu processo de desenvolvimento, por isso durante o processo de projeto, são definidas as principais diretrizes dos empreendimentos que influenciam diretamente nos custos, prazos e métodos de produção.

A disponibilidade e acessibilidade de tecnologias avançadas de computação preparam o caminho para utilização crescente de protótipos digitais, ao invés de físicos. Um protótipo virtual pode ser representado como uma série de imagens gráficas criadas na forma de modelos matemáticos e desenvolvido através de apresentações, testes e análises em 3D, para então se criar um protótipo físico (ZORRIASSATINE et al., 2003).

Em geral, são requeridos protótipos para três propósitos principais: visualização do projeto do produto, desenvolvimento de características e testes do produto ou operação fabril, por isso em qualquer montagem mecânica utilizando protótipos virtuais devem estar bem claros onde e como cada componente faz sua pré-montagem com os demais componentes do produto ou produção. Devem ser incluídas também tolerâncias dimensionais nos desenhos para permitir as variações dos processos inerentes a estes, pois ajustes e estudos de interferência contribuem para reduzir os custos e evitar modificações inerentes à problemas de montagem.

Usando o protótipo virtual é possível avaliar automaticamente com grande precisão e acelerar os resultados de todas estas interferências. Também é visualmente possível inspecionar os protótipos virtuais, sua montagem e interferências em áreas específicas do modelo, que podem ser realçadas com cores diferentes, facilitando a análise e entendimento do problema.

Os protótipos virtuais têm sido utilizados para aprovar alternativas de projeto, fazer análises de engenharia, apoiar o planejamento da produção e apresentar o produto aos clientes. Dessa forma, possibilitam despender menos tempo e recursos nas tomadas de decisões, assim como antecipam problemas que possam gerar dificuldades na produção (FERREIRA, 2007).

Os protótipos virtuais geralmente apresentam maior flexibilidade para ajustes do que os protótipos físicos, pois os virtuais permitem que as alterações sejam efetuadas a menores custos e em menor espaço de tempo. Normalmente as alterações em protótipos físicos demandam a execução de um novo protótipo e, em geral, são mais caras e demoradas. A prototipagem virtual, geralmente, precede a prototipagem física, porém não necessariamente elimina esta segunda, havendo uma complementaridade entre ambas (PINHO; FREITAS; TRAMONTANO, 2003).

De acordo com Ulrich e Eppinger (2000), a prototipagem virtual ocorre ao longo de praticamente todas as fases do projeto, uma vez que as informações fornecidas pela realização de simulações nos protótipos são necessárias para dar continuidade à definição do produto ou da produção e por isso não é possível fixá-las em alguma etapa particular.

Os protótipos virtuais além de reduzirem o tempo de desenvolvimento dos produtos e assim reduzirem os custos dos projetos e de produção, geram diversos outros benefícios como:

a) A simulação é uma ferramenta especial para explorar e eliminar projetos conceito e ideias muito criativas, mas pouco funcionais ou inseguras. Da mesma forma é excelente para comprovar que muitos projetos conceito inovadores poderão gerar produtos reais de alta qualidade;

b) A modelagem 3D pode ser modificada inúmeras vezes no computador sem gerar grande gastos, por isso fica mais fácil para se avaliar e reavaliar projetos e modificar as políticas empresariais propostas;

c) A metodologia de análise utilizada pela simulação permite a avaliação e otimização de um sistema proposto, sendo essenciais para projetos complexos de automação para a manufatura ágil, que utiliza massivamente sistemas robóticos com inteligência artificial avançada, por isso o Workspace Robot Simulation e Robot Studio são alguns dos exemplos de softwares, essenciais para o planejamento simulado de um layout fabril robótico;

d) A simulação computacional é, geralmente, mais fácil de ser aplicada do que os métodos analíticos convencionais, pois estes requerem um número muito

grande de simplificações para torná-los matematicamente tratáveis, sendo que os modelos de simulação não apresentam tais restrições. Além disso, nos modelos analíticos as análises recaem apenas sobre um número limitado de medidas de desempenho. De maneira contrária, os dados gerados pelos modelos de simulação, permitem a análise de praticamente qualquer medida concebível, podendo-se avaliar hipóteses sobre como certos fenômenos físicos aconteceram (MARTIN;CARVALHO,2004) ;

e) O tempo pode ser controlado, pode ser comprimido ou expandido, permitindo reproduzir os fenômenos de maneira lenta ou acelerada, para que se possa melhor estudá-los;

f) É possível compreender melhor quais variáveis são as mais importantes em relação ao desempenho e como as mesmas interagem, de acordo com os materiais empregados e os outros elementos do sistema;

g) A identificação de “gargalos” que geram perdas e são a preocupação maior no gerenciamento operacional de inúmeros sistemas, tais como fluxos de materiais, fluxo de informações e de produtos; podem ser obtidas de forma facilitada, principalmente com a ajuda visual de simuladores;

h) Um estudo baseado em simulação computacional costuma mostrar como realmente um sistema opera, em oposição à maneira com que todos o pensam ou o imaginam, gerando assim conhecimento aprofundado sobre diversos fatores físicos, químicos e funcionais.

De acordo com Forti (2005), apesar de todos os benefícios trazidos com a implementação da prototipagem virtual nos projetos industriais de qualquer organização, podemos destacar também algumas desvantagens:

a) Os programas CAD, CAM e CAE necessitam de mão de obra especializada, que muitas vezes não estão disponíveis no mercado, nem mesmo entre os recém graduados, obrigando as empresas a terem que fornecer treinamento específico constante nestas áreas;

b) A falta de certificações nacionais e internacionais para simuladores e programas de simulação criados por colaboradores ou programadores independentes, por isso não temos uma maior ampliação do mercado de softwares nesta área e por consequência não ocorre uma maior diminuição nos valores destes sistemas;

c) A falta de mais programadores no âmbito nacional e internacional, que possam criar novos programas que possibilitem a exploração de novas características, como: simulação estrutural para nanotubos de carbono e também a criação de simuladores que utilizem, de forma mais intensa os princípios e teoremas da mecânica quântica nos simuladores computacionais, possibilitando assim simular a física de partículas sem necessitar de estruturas e laboratórios muito caros.

Segundo Milburn (2004), os processos digitais simulados na engenharia de produto reduzem o tempo e aumentam o número de problemas resolvidos em uma produção, como mostra o gráfico a seguir:

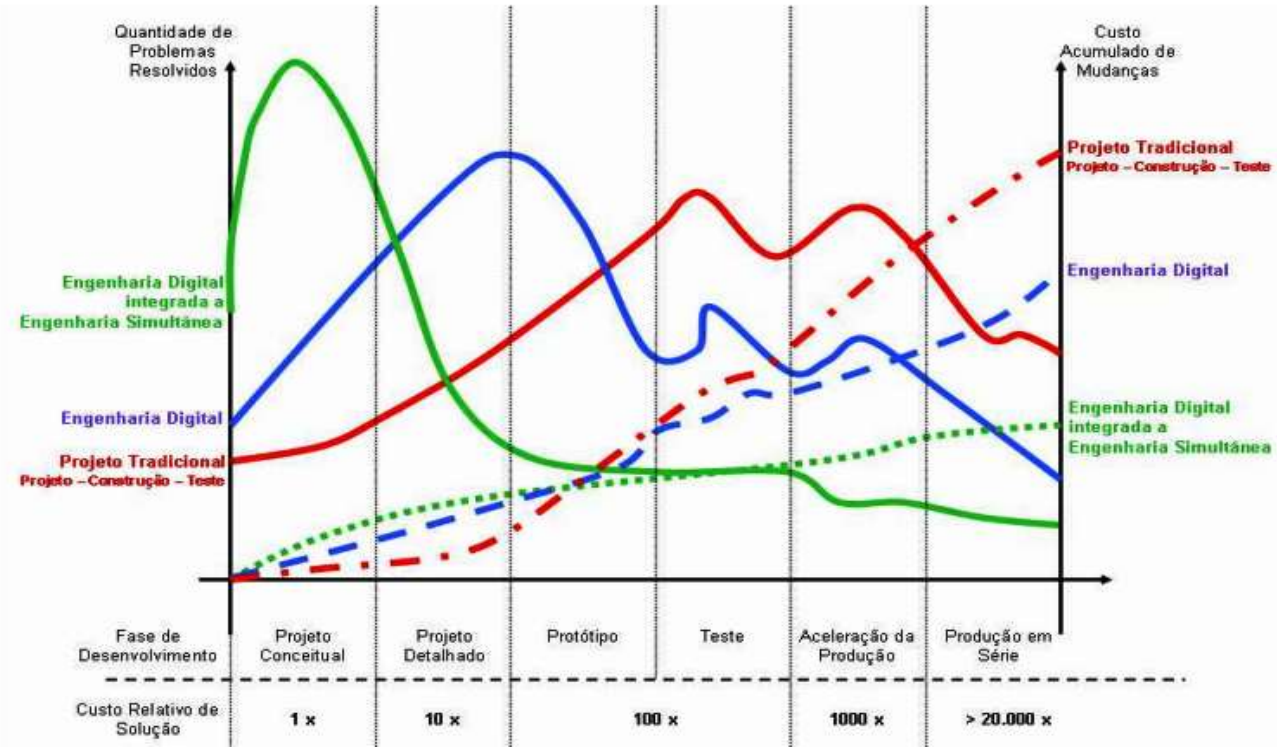


Gráfico 01: comparativo entre engenharia digital e tradicional.

Fonte: Milburn (2004).

De acordo com pesquisa da Aberdeen Group (2006), feita no mercado americano sobre a transição do 2D para prototipagem 3D simulada, podemos verificar que os principais fabricantes dos produtos mais complexos conseguem colocar no mercado com 41 dias de antecedência e redução de custos de desenvolvimento de produto no valor de US$ 14.733, por produto, se comparados aos fabricantes que possuem desenvolvedores comuns, que não utilizam recursos 3D.

Em geral as economias que os principais fabricantes obtêm quanto ao tempo, redução de custos, concepção e colocação de produtos no mercado são de mais de 84% quando comparados com os fabricantes que não utilizam recursos simulados tridimensionais, por isso as empresas americanas que utilizam recurso digitais conseguem criar e lançar no mercado um produto novo simples em 77 dias e um complexo em menos de 100 dias. Outra grande vantagem apontada na pesquisa é o fato das empresas Melhores no Mercado, que utilizam CADS e simuladores sofisticados, terem menos pedidos de troca ou alteração nos seus produtos finais quando comparados com os produtos de empresas Comuns, que utilizam CADS e simuladores da geração passada; e estas também leva vantagem sobre as empresas Mais Atrasadas, que raramente utilizam sistemas CAD e de simulação, como mostra o gráfico a seguir:

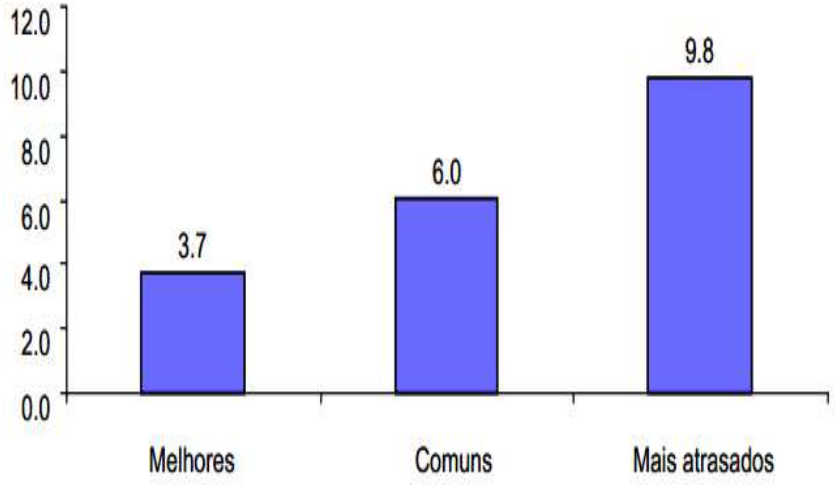


Gráfico 02: percentual de pedidos de alteração no produto.

Fonte: pesquisa Aberdeen Group (2006).

4.5. A APLICAÇÃO DE SIMULADORES 3D EM PROJETOS

Ao analisarmos as operações produtivas de diversas empresas no mundo, verificamos que a simulação tridimensional está presente em diversas fases do desenvolvimento de produtos e da produção destas empresas, como a :

- **Airbus**: esta empresa possui um consórcio com outras quatro empresas fornecedoras de equipamentos espalhadas por toda a Europa, sendo que cada empresa realiza simulações próprias, para diferentes partes, que irão compor a criação completa dos projetos aeronáuticos da empresa, que são criados, simulados e construídos por partes em diferentes lugares e depois reunidos para dar origem a um novo avião. Os resultados das simulações são armazenados e compartilhados, podendo ser utilizados por todas as empresas do consórcio (LUCINDA, 2012).

- **Boeing** : possui quinze subsidiárias principais com larga experiência na criação, simulação de produtos e peças aeronáuticas, fornecendo assim equipamentos para diversas outras empresas, inclusive e principalmente para a Boeing, que utiliza a simulação computacional e a realidade virtual para testar e treinar suas equipes, em equipamentos desenvolvidos em parceria com as universidades americanas (FISCHLER, 2005).

- **Caterpillar**: que criou um ambiente virtual para testes de novos projetos e melhoria dos processos de montagem de equipamentos pesados. Esses testes são para avaliar o design do veículo e determinar a visibilidade proveniente da cabine de comando do trator. Neste projeto, após os testes no computador o operador senta-se numa plataforma digital equipada com os mesmos controles de uma cabine real de um trator. Nesta plataforma está localizada um CAVE 3D onde são exibidas as animações gráficas (OLIVEIRA, 2001).

- **Chrysler-Jeep**: onde foram desenvolvidos modelos digitais dinâmicos de seus veículos. Esses modelos passam por uma rigorosa análise dos possíveis problemas que podem ocorrer e que antes só poderiam ser gerados em grandes terrenos ao ar livre, com vários e caros protótipos reais dos veículos a serem testados (MURPHY; PEREIRA, 2002).

- **Embraer**: possui cinco divisões de sua empresa espalhadas pelo mundo, porém as suas simulações dependem da parceria com os seus fornecedores, como por exemplo a General Electic, Honeywell, C&D Aerospace, entre outros, que compartilham parte de sua tecnologia e fazem o treinamento dos funcionários que irão trabalhar com os simuladores computacionais e de realidade virtual. A Embraer segue a tendência de outras empresas aeronáuticas e por isso também desenvolve os seus aviões em ambiente virtual e compartilha online com as suas diversas subsidiárias e seus fornecedores, que contribuem com modificações e realizam simulações 3D e realísticas, como mostra figura 18, em conjunto com a matriz brasileira, reduzindo assim os custos e aumentando o grau de tecnologia embarcada nas aeronaves, que recebem softwares inovadores criados pelos funcionários da empresa (LIMA et al., 2005).

Figura 18: simuladores virtuais de voo da Embraer.

Fonte: site Mundo.Aero (2012).

- **Ford Motors**: esta montadora utiliza sofisticados ambientes tecnológicos virtuais para projeto e engenharia de automóveis, trata-se da divisão CAVSE (Core & Advanced Vehicle System Engineering), que utiliza a imersão em realidade virtual em cavernas digitais (CAVE 3D) para simulação e prototipagem virtual,

como mostra figura 19, tomando como principais pontos de pesquisa: a aerodinâmica, a ergonomia e a modelagem de superfície do protótipo do veículo a ser construído (SOUZA, 2009).

Figura 19: simulador de realidade virtual da Ford.

Fonte: site Carbody design (2012).

- **General Motors**: esta empresa utiliza em seus projetos um sistema CAVE 3D, denominado Virtual Eye, para facilitar o desenvolvimento de novos modelos de veículos e sua unidade de montagem de caminhões (Detroit, Michigan nos EUA) utiliza softwares da empresa Deneb Robotics (Deneb Robotics,1997) para prototipação e avaliação da montagem de seus veículos (MURPHY;PERERA, 2002);

- **Land Rover Tata Motors**: utiliza a realidade virtual para projetar e validar rápidas prototipagens dos seus novos modelos de veículos e para auxiliar na ampliação de sua fábrica (NICODEMOS, 2011);

- **Renault Design**: simula todos os seus produtos antes de serem fabricados, por isso foi feita uma simulação da performance do protótipo de um de seus carros, o Racoon, utilizando uma técnica de filmagem que mistura ambientes reais com objetos virtuais (SOUZA, 2009).

4.6. A CAVERNA DIGITAL DA PETROBRAS

Vasculhar um reservatório no fundo da terra em busca de hidrocarbonetos, acompanhar em tempo real o avanço da broca poço adentro no fundo do oceano e o passo a passo da produção num campo remoto, tornaram-se procedimentos de rotina para os profissionais de exploração e produção da Petrobras. A realidade virtual simulada é a face mais visível das modernas tecnologias de informação e de computação gráfica aplicadas às operações em mar e terra, que estão otimizando o conhecimento e a experiência de engenheiros, geólogos e geofísicos da área de Engenharia e Petróleo (E&P). O saldo final é mais eficiência, segurança e resultados vitais para a meta da companhia de dobrar a produção de óleo e gás natural na próxima década.

O Centro de Realidade Virtual (CRV) da área de E&P, no edifício sede da Petrobras no Centro do Rio de Janeiro, é a grande referência das inovações que permitem "ver" de perto o que sequer pode ser visto no mundo real, como: novos prospectos exploratórios, reservatórios de campos descobertos, poços, linhas de produção com o petróleo e o gás subindo às plataformas. Por isso "Quantificar essa contribuição tecnológica não é fácil, mas nos últimos anos estamos tendo um aumento considerável da produção e do fator de recuperação dos nossos campos, com impacto na acumulação de reservas. Sem essas tecnologias, provavelmente não teríamos tantas descobertas", afirma o gerente geral de Reservas e Reservatórios da Engenharia de Produção (ENGP), Carlos Eugênio Melro Silva da Ressurreição.

No CRV e nas muitas outras salas colaborativas de visualização, simulação e monitoramento em tempo real, espalhadas pelas unidades de negócio da companhia, o compartilhamento de imagens e gráficos entre muitos profissionais está fortalecendo uma cultura operacional cooperativa. "A ideia é que, nas plataformas, decisões no dia a dia, como fechar um poço ou abrir uma zona de produção, não sejam mais tomadas de forma isolada", diz o gerente geral de Tecnologia de Processos e Produção da ENGP, Tuerte Amaral Rolim. Em um ambiente colaborativo, as decisões ficam mais robustas e agregam mais valor aos processos (MUNDOGEO, 2012).

O uso dos recursos de simulação 3D não se restringem à fase de exploração, pois os geofísicos e geólogos estudam de maneira exaustiva o potencial petrolífero das bacias sedimentares e dos blocos exploratórios, definindo os prospectos com possibilidade de apresentar indícios geológicos de reservatórios de óleo e gás natural, além de reduzir o tempo entre a aquisição e o processamento de dados sísmicos e a perfuração de poços exploratórios.

A integração interdisciplinar nas salas de visualização, como mostra figura 20, permite mais precisão e rapidez no desenvolvimento da produção. Também graças à simulação dos fluxos de óleo, gás e água nos reservatórios os engenheiros podem rever o comportamento do campo de petróleo ao longo da sua vida. Munidos de óculos especiais ou, nas novas salas 3D, a olho nu é como se geólogos, geofísicos e engenheiros estivessem dentro do campo de petróleo (PETROBRAS MAGAZINE, 2012).

Figura 20: CRV da Petrobras.

Fonte: revista Petrobras (2012).

5. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UMA TURBINA FRANCIS

As turbinas Francis são as mais utilizadas no Brasil, podendo ser aplicadas em diferentes situações que visam à produção de energia elétrica, porém os seus aspectos de regime de operação muitas vezes são negligenciados, por isso o uso de simulações computacionais para estas, poderiam prever e até diminuir os gastos com suas manutenções, pois as simulações ajudam a elucidar características e problemas que possam vir a acontecer com a contínua operação destas turbinas em regimes fluviais adversos.

5.1. ASPECTOS GERAIS

Turbinas Francis são máquinas hidráulicas de reação porque o escoamento na zona da roda se processa a uma pressão inferior à pressão atmosférica. Esta turbina é caracterizada por ter aletas fixas, as quais constituem uma série de canais que recebem a água e a orientam para a saída do rotor, como mostra a figura 21.

A entrada na turbina ocorre simultaneamente por múltiplas comportas de admissão dispostas ao redor da roda e o trabalho é feito sobre todas as aletas ao mesmo tempo para fazer girar a turbina e o gerador. Os outros componentes desta turbina são a câmara de entrada que pode ser aberta ou fechada como um espiral; o distribuidor constituído por uma roda de aletas fixas ou móveis que regulam a vazão; e o tubo de saída da água (GIZEM, 2010).

Figura 21: rotor Francis.

Fonte: site Jaibana.udea (2008).

Estas turbinas podem ser utilizadas em quedas úteis entre 15 e 250 metros, possuindo assim uma grande adaptabilidade a diferentes quedas e vazões. Possuindo boas características de desempenho sob cargas parciais de até 70% da carga nominal, funcionando também adequadamente entre 50 e 70 % da carga, embora com perda progressiva do rendimento. A usina hidrelétrica de Itaipu; assim como a usina hidrelétrica de Tucuruí, usina hidrelétrica de Furnas, usina hidrelétrica de Foz do Areia, AHE de Salto Pilão são exemplos de usinas brasileiras que funcionam com turbinas tipo Francis, com quedas d` água entre 70 e 196 metros.

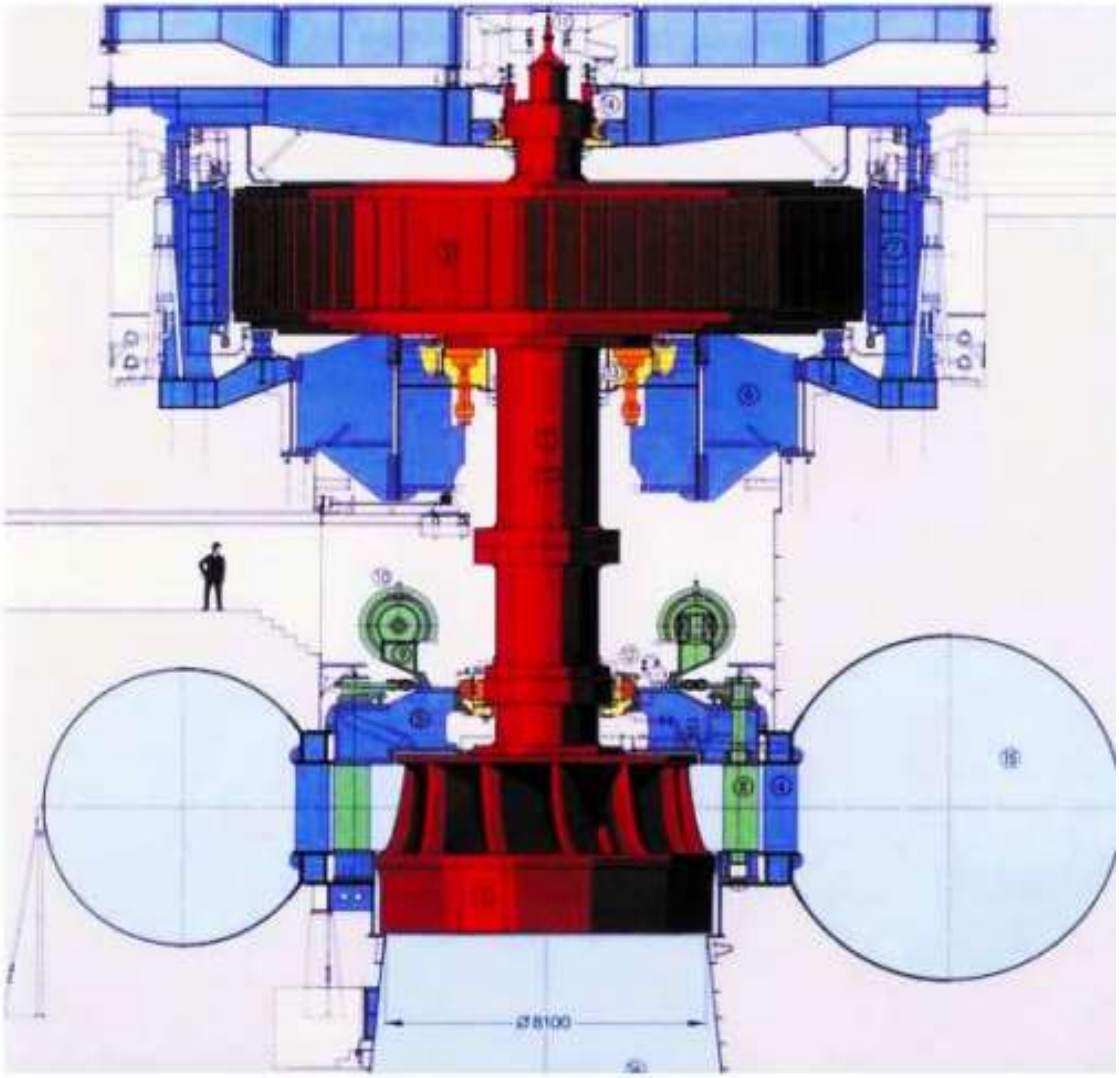


Figura 22: turbina Francis.

Fonte: site Jaibana.udea (2008).

5.2. CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS

Nas turbinas Francis o diâmetro do rotor varia de 1 a 10 m e a potência varia de 10 a 800 mW. Os tipos de turbinas podem ser:

Tabela 01: tipos de turbinas Francis.

Tipos de turbinas		n_s (rpm)	H (m)
Francis	Muito lenta	55-70	600-200
	Lenta	71-120	200-100
	Normal	121-200	100-70
	Rápida	201-300	70-25
	Extra –rápida	301-450	25-15

Fonte: site Jaibana.udea (2008).

Na tabela 01: *(n_s)* significa velocidade em rpm e *(H)* altura em metros.

As partes de uma turbina Francis são:

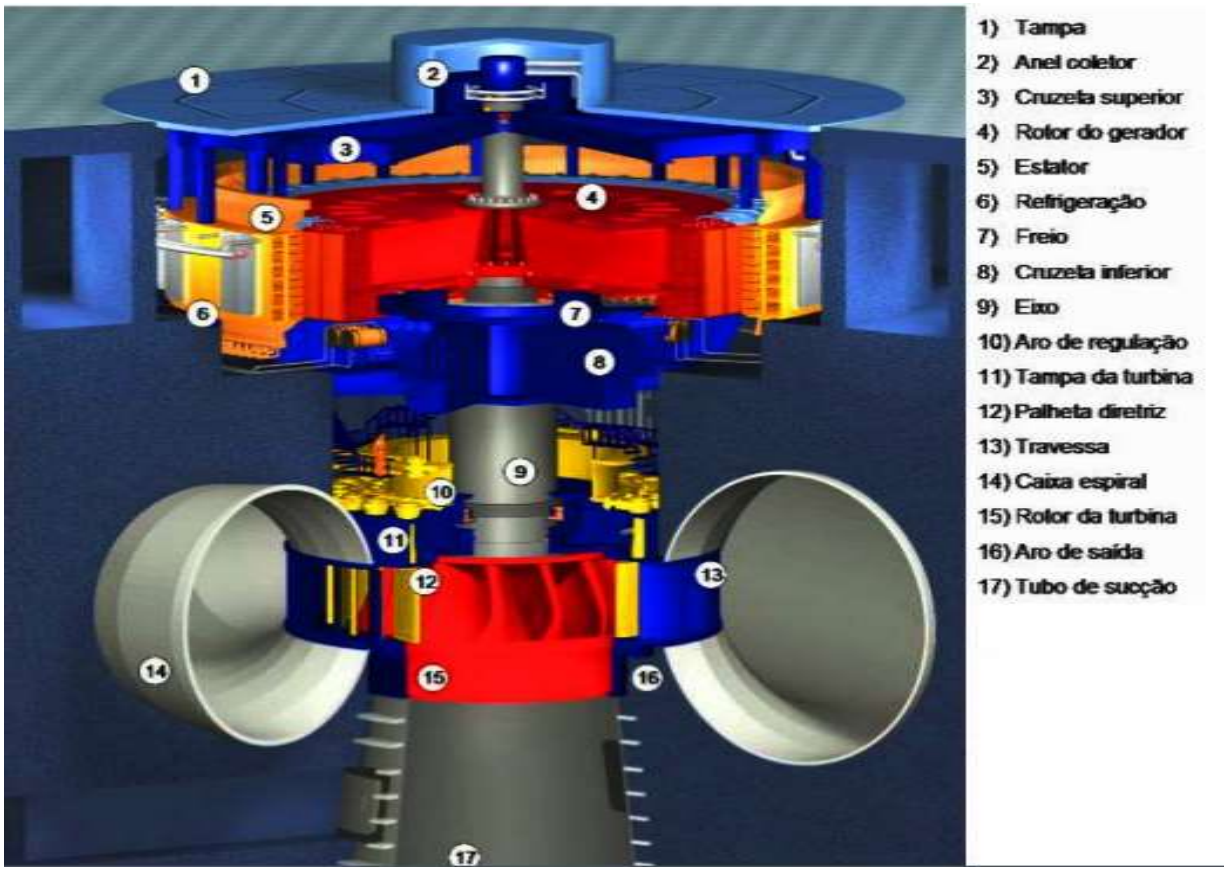


Figura 23: partes de uma turbina Francis.

Fonte: site Jaibana.udea (2008).

5.3. MODELAGEM TRIDIMENSIONAL

Na configuração convencional de fabricação real de uma turbina Francis, são utilizados para a construção da tampa, cruzeta superior, rotor do gerador, estator e o eixo principal a matéria prima aço, que é uma liga metálica composta por aproximadamente 98,5% de Fe (ferro), 0,5 a 1,7% de C (carbono) com traços menores de Si (silício), S (enxofre), P (fósforo); e também com porções medianas adicionadas de cromo e níquel no aço são construídos de forma fundida as pás do rotor da turbina.

Quanto a tubulação hidráulica é utilizado para a sua construção o ferro fundido, que possui boa resistência mecânica por causa da combinação do carbono e silício na sua composição.

Todos estes materiais descritos acima, foram aplicados na configuração da modelagem tridimensional da turbina, como mostra figura 24, que foram feitos utilizando o programa Inventor 2013.

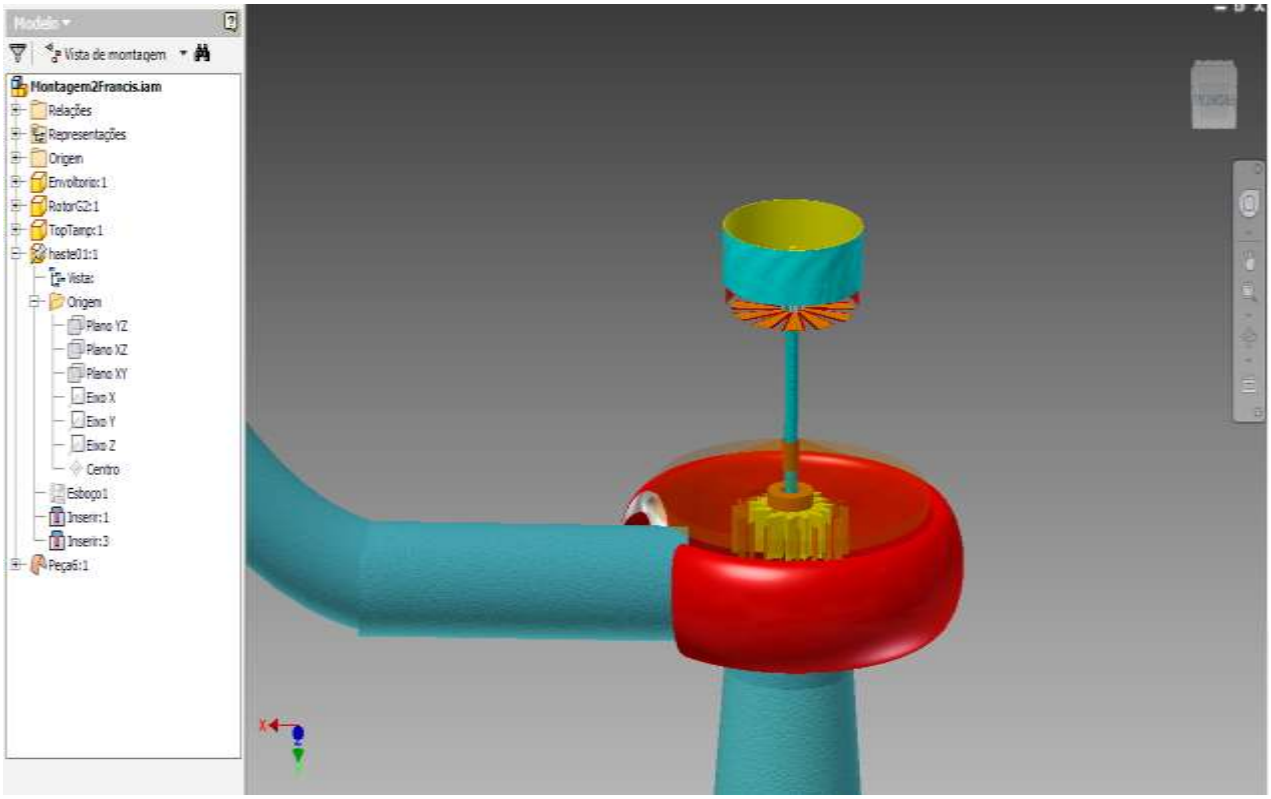


Figura 24: modelagem 3D de uma turbina Francis.

Fonte: próprio autor.

5.4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

As configurações de simulação visam reproduzir o ambiente descrito para uma das comportas da usina de Itaipu, possuindo portanto uma vazão (Q) de 660m³/s, uma queda de água com uma altura nominal (H_1) de 100 m e, sem perdas, uma altura (H_1) de 118,4 m no total, gerando uma potência de 800 mW (ITAIPU BINACIONAL, 2012).

Uma turbina Francis deve ser utilizada em quedas de no máximo 650 m com no máximo 1000 rpm, para assim gerar uma potência que varia de 10 a 800 mW (VOITH, 2013).

A modelagem tridimensional da turbina foi simulada no Mechanical Simulation, quanto aos seus aspectos dinâmicos e tensões geradas; e também foi simulada no CFD Simulation, onde as malhas geradas foram testadas rotacionando o fluído água em temperatura ambiente.

5.5. ANÁLISE DE RESULTADOS

5.5.1. Simulação CFD

A análise de simulação utilizando água como fluido utilizou como pressão (P) do fluido é obtida por: P= peso específico (Y) x altura nominal da queda (H_1)

$$P = Y \, x \, H_1 \qquad (100)$$

Sendo o peso específico da água igual a 10.000 N/m^3 e a altura nominal igual a 100m, obteremos: $P = 1000.000 \, N/m^2$

Para descrever a velocidade inicial (V) do regime fluvial utilizaremos a equação de Bernoulli:

$$V^2 = 2 \, x \, g \, (Z + P / Y) \qquad (101)$$

onde a gravidade (g) é igual a 10m/s² e a energia potencial (Z) é o valor da altura H_2, ou seja 118,4 m. Obtendo assim como resultado:

$$V = 66 \, m/s$$

A vazão pode gerar velocidades que varia de 0 até 1.515 x 10^6 mm/s e gera na direção - X da vazão do liquido (água) múltiplas direções vetoriais, que variam de menos 841604 até 505148 mm/s em sua velocidade dentro da tubulação. Ocorrendo na turbina, na direção –Y, uma vazão que gera rotações com velocidades que podem variar de 4000 até 19233,1 mm/s como mostram as figuras abaixo:

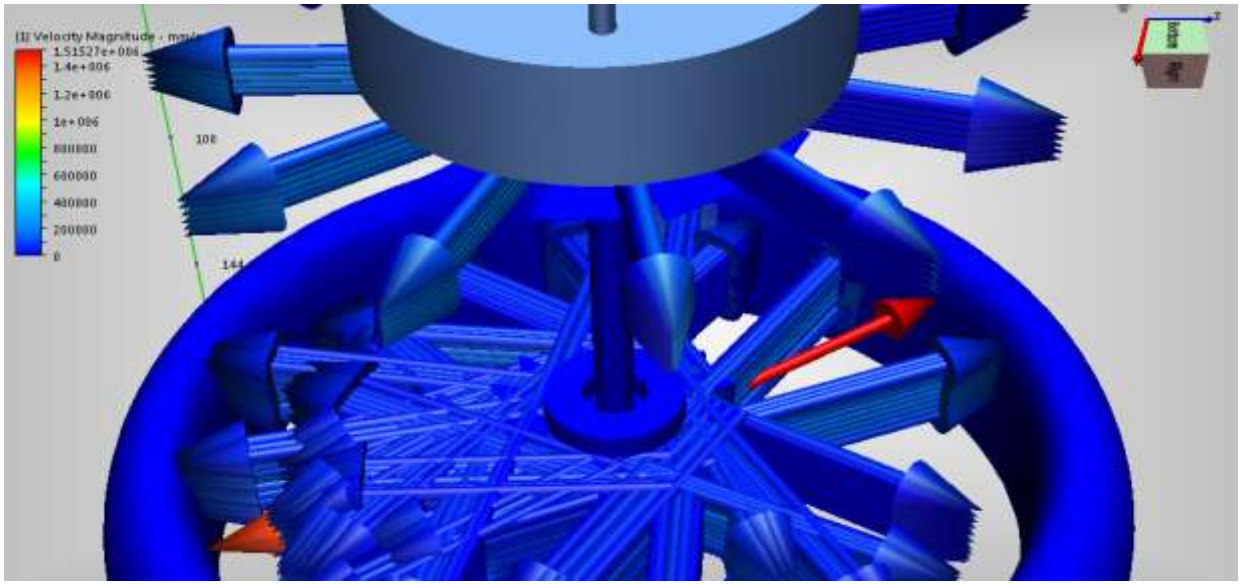


Figura 25: velocidade magnitude da turbina Francis.

Fonte: próprio autor.

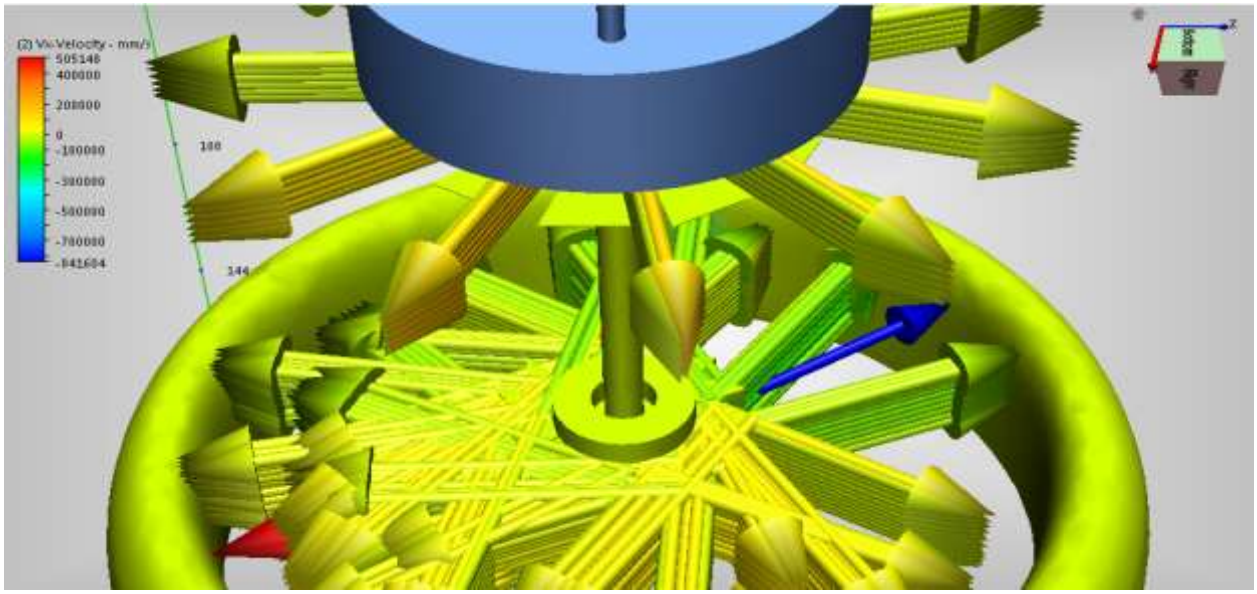


Figura 26: velocidade do fluido na direção –X.

Fonte: próprio autor.

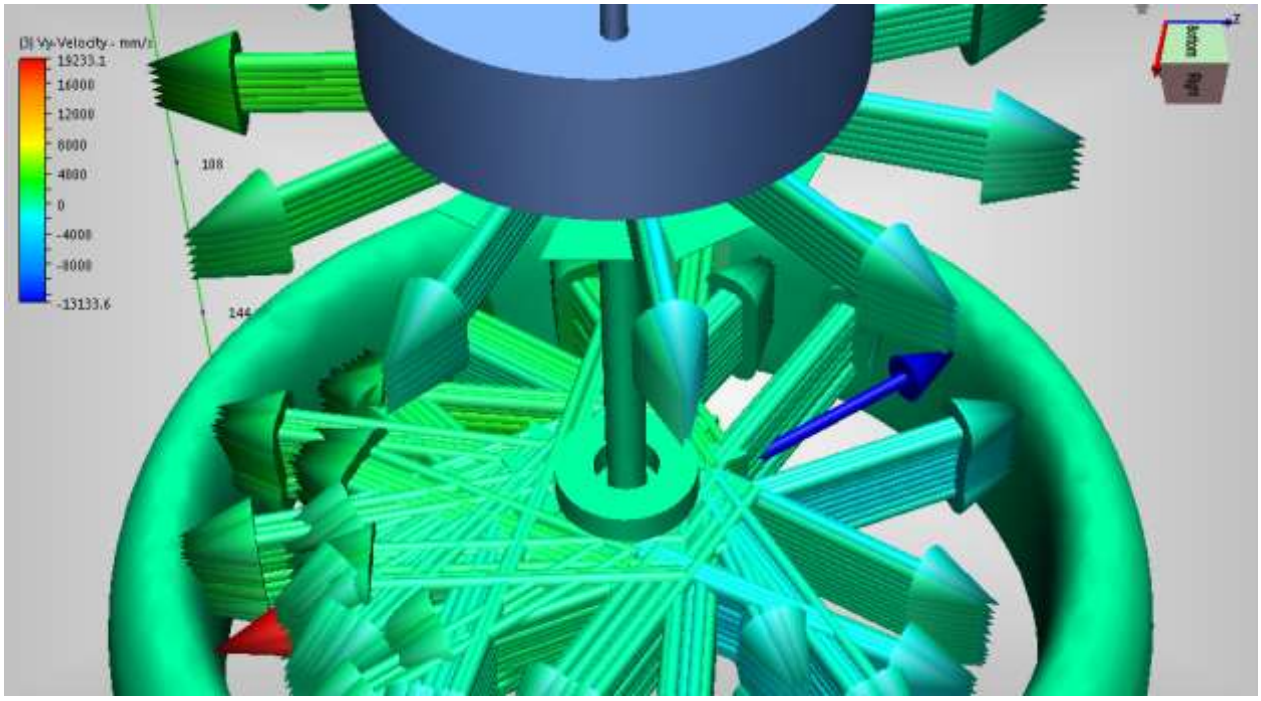


Figura 27: velocidade do rotor da turbina Francis na direção –Y.

Fonte: próprio autor.

Durante a simulação as tensões de cisalhamento assumem valores mínimos.

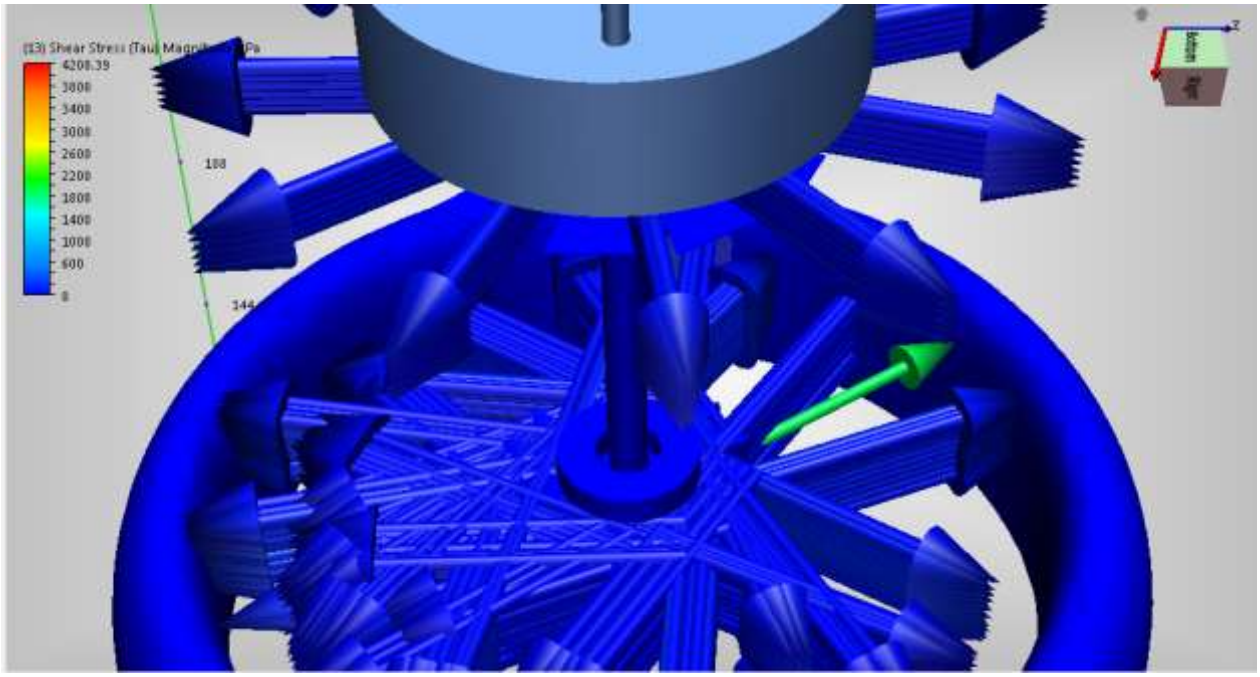


Figura 28: tensões de cisalhamento na turbina Francis.

Fonte: próprio autor.

Mesmo em temperatura ambiente de 20° C a pressão não diminui muito e a velocidade se mantém constante, não gerando portanto nenhuma vaporização local do líquido, por isso a turbina Francis neste exemplo não apresenta tendência a sofrerem processos deteriorativos causados por cavitação como mostram a figura a seguir:

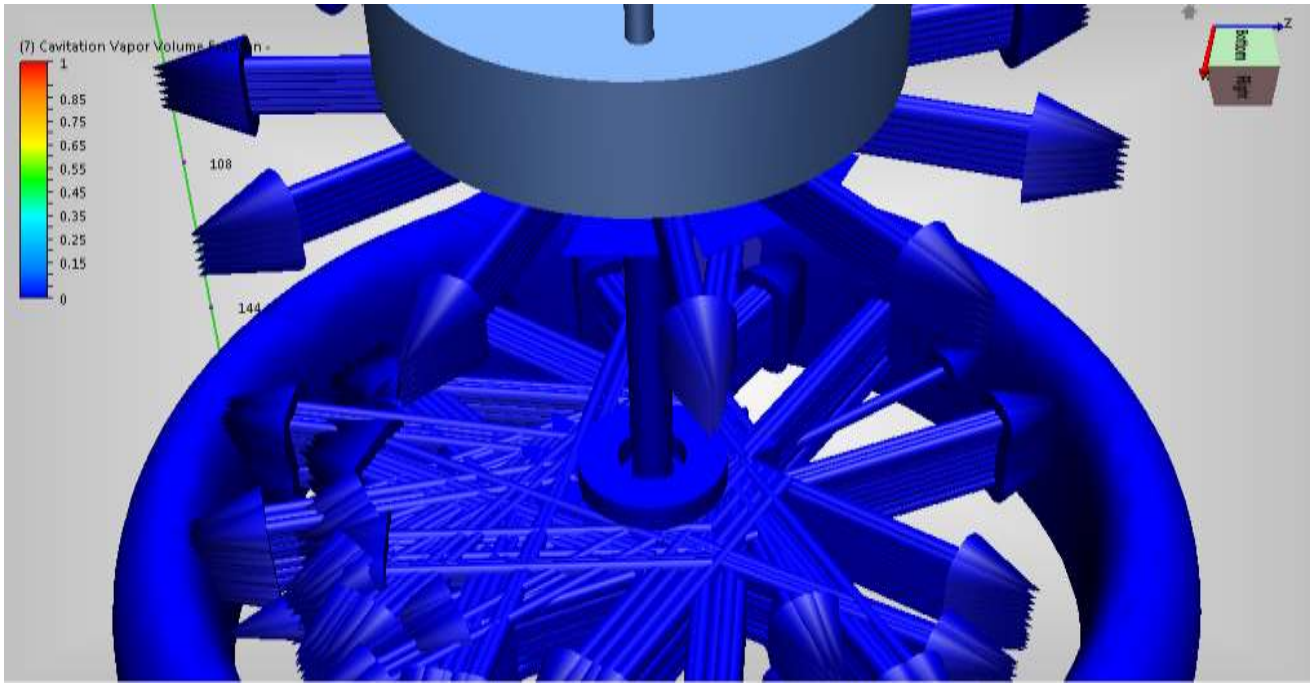


Figura 29: cavitação gerada na turbina Francis.

Fonte: próprio autor.

5.5.2. Simulação Dinâmica

Nesta análise computacional utilizaremos para obtermos o torque (T) a seguinte fórmula: Torque(T) = Potência (Pt) / velocidade angular (ω) x 2 pi

$$T = \frac{\mathrm{Pt}}{\omega \; x \; 2\pi} \qquad (102)$$

Para a simulação dinâmica utilizaremos os valores de: 3,14 para (pi) e a potência será a mesma gerada em uma das comportas da usina de Itaipu que é de 800 mW, porém a rotação da turbina será fora dos padrões recomendados, que é de até 1000 rpm ou 16.6Hz, para podermos verificar o que acontece quando as condições de

operação de uma máquina não são observadas e elevadas para 3600 rpm ou 60 Hz em termos de velocidade angular (ω), portanto solucionando a equação teremos:

$$T = 2123000\ N.mm$$

5.5.3. Analise de Tensão por Critério de Von Mises

Foram aplicados os mesmos torques da simulação dinâmica, de *2123000 mm/s*, para podermos avaliar as reações do rotor em máximas rotações com suas tensões resultantes.

As tensões geraram deslocamentos de até 19,5mm, que podem gerar em uma situação real a quebra de algumas pás do rotor do gerador como mostra a figura:

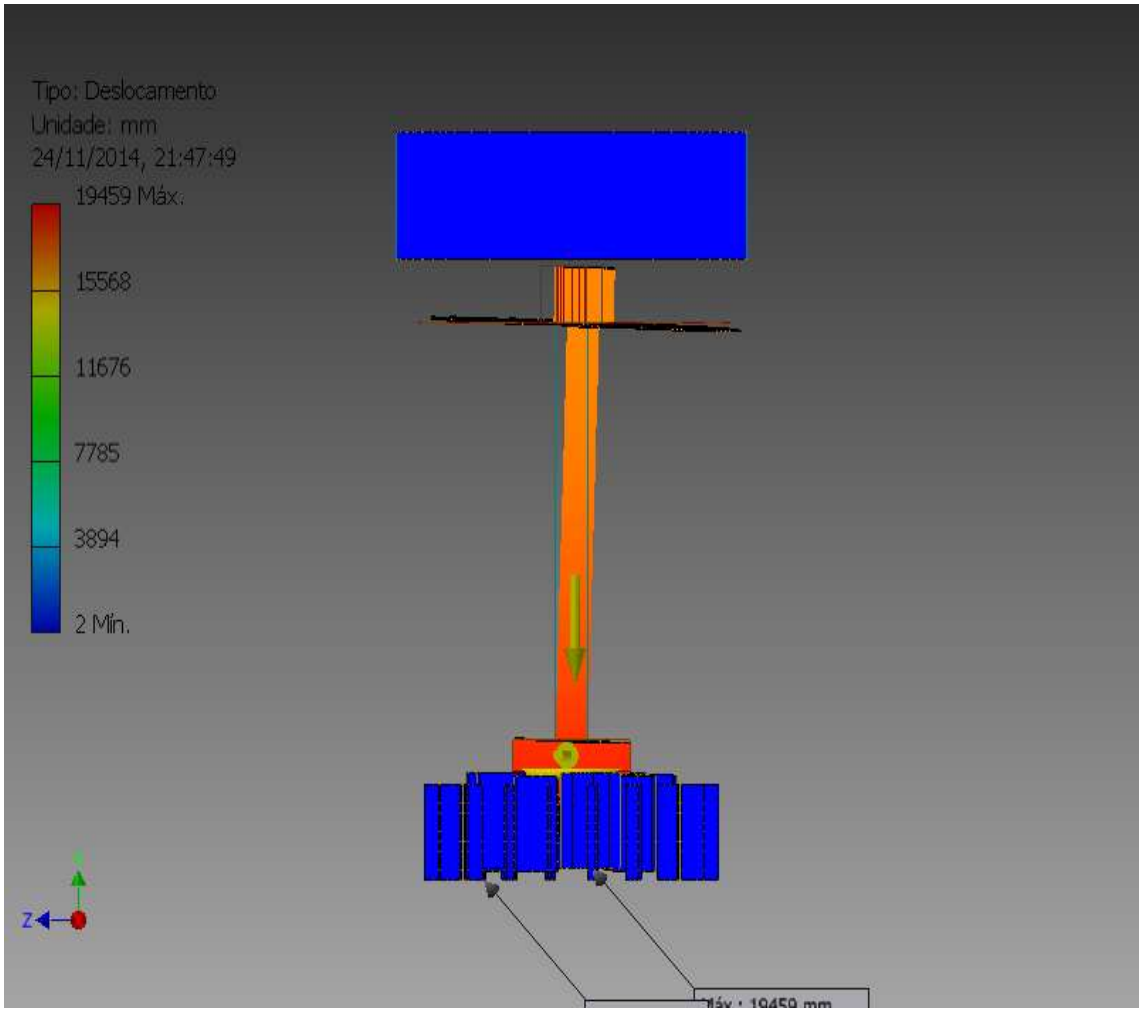


Figura 30: deslocamentos gerados por tensões na turbina Francis.

Fonte: próprio autor.

A figura a seguir demonstra que os deslocamentos pequenos à altas velocidades podem gerar sobrecargas elevadas nos rotores.

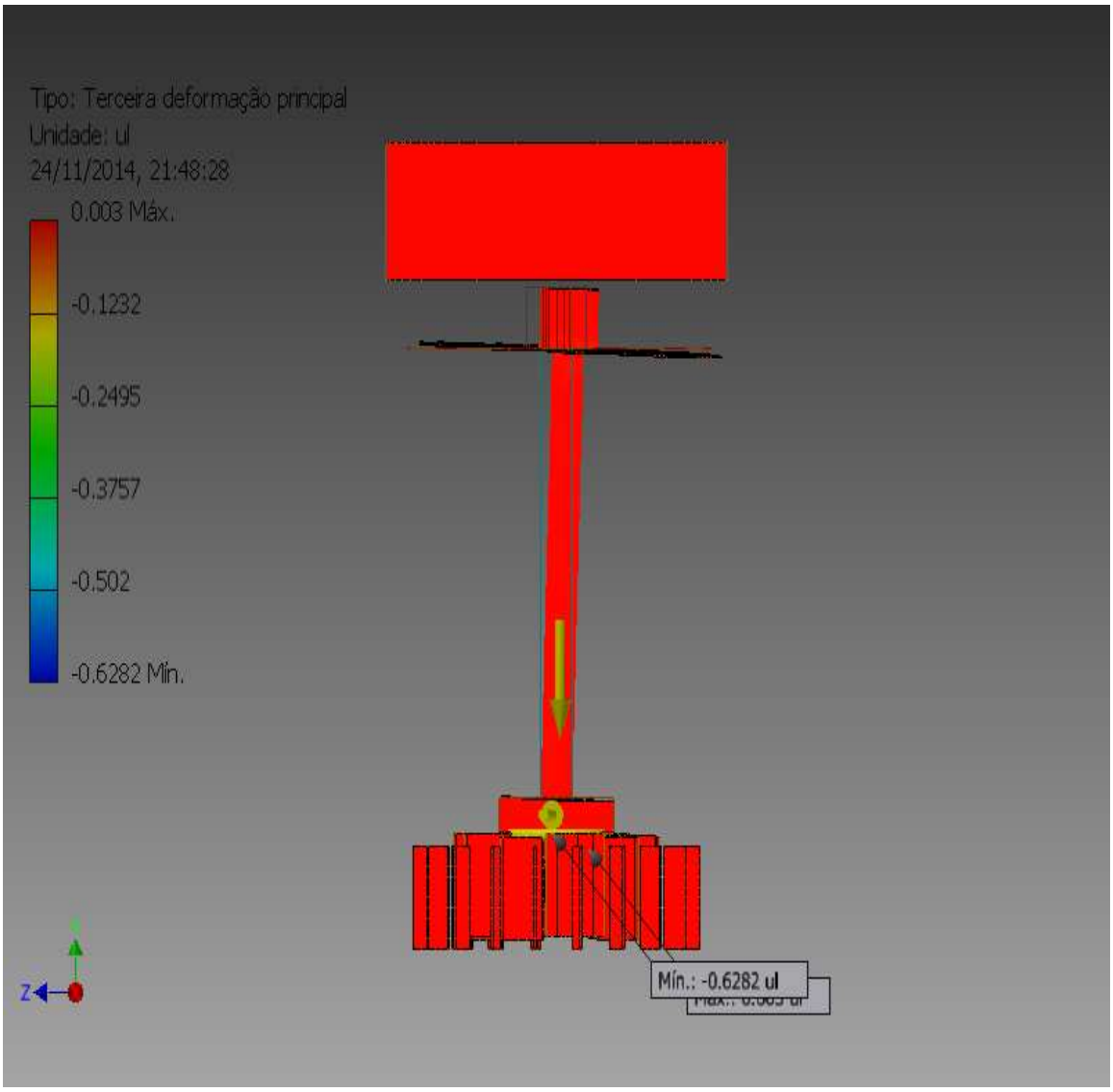


Figura 31: terceira deformação no eixo principal da turbina Francis.

Fonte: próprio autor.

A tensão de Von Mises gera valores muito elevados no rotor, significando que a peça tende ao colapso:

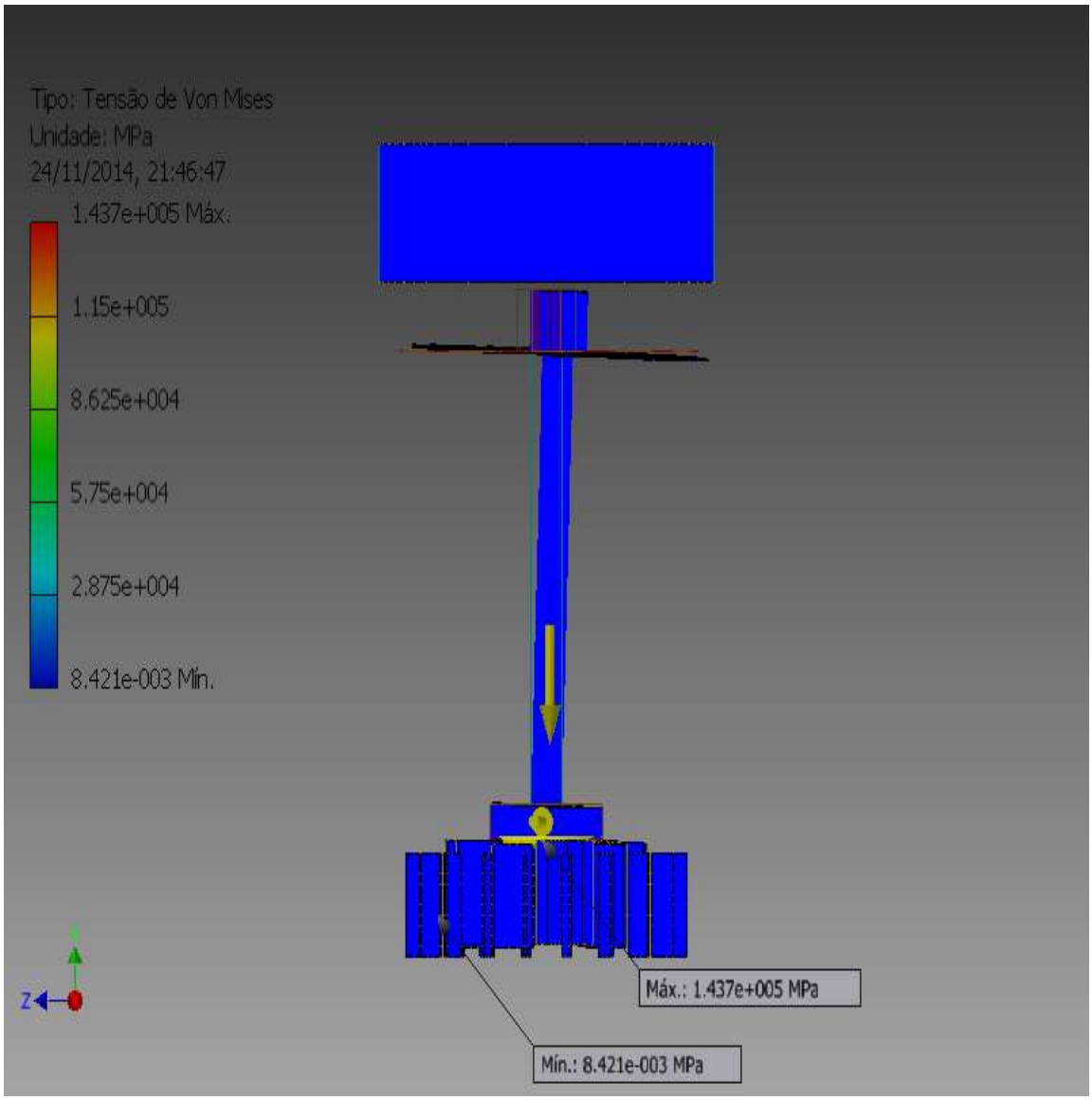


Figura 32: tensão de Von Mises para a turbina Francis.

Fonte: próprio autor.

Como o fator de segurança é zero significa que o eixo principal da Francis quebrará por causa da alta velocidade, portanto a análise revelou que nem sempre alta velocidade significa boa eficiência mecânica, principalmente quando estão fora do patamar recomendado por testes de fabricação, que é de até 1000 rpm, por isso

qualquer elevação fora do recomendado gera a quebra das pás do rotor e também pode levar ao rompimento do eixo principal, como mostra a figura a seguir:

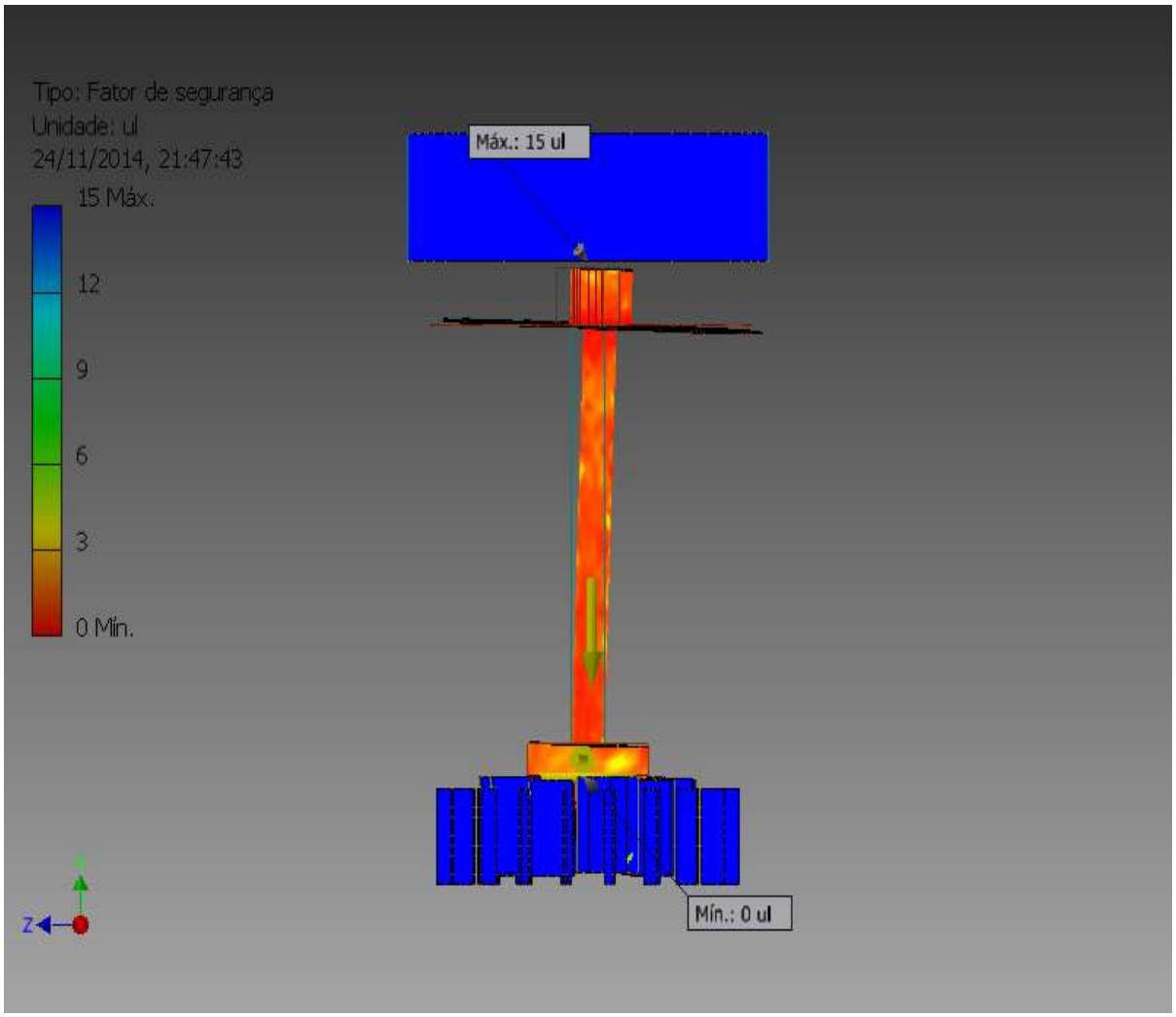


Figura 33: fator de segurança da turbina Francis.

Fonte: próprio autor.

6. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UMA TURBINA TURBOFAN

Os aviões possuem normalmente duas turbinas, mas são projetados para voarem e pousarem com apenas uma turbina, caso em pleno voo seja perdida ou danificada uma das suas turbinas, por isso toda turbina aeronáutica é testada com cargas máximas nas simulações virtuais e reais, visando maior segurança em situações adversas e extremas.

6.1. ASPECTOS GERAIS

O turbofan, como mostra a figura 34, atualmente é o tipo mais utilizado para propulsão de aeronaves. A sua construção é semelhante à de um turborreator, onde a turbina apenas produz potência suficiente para acionar o compressor, deixando o restante da energia para produzir o impulso e a sua turbina a gás liberta então ar quente que se expande através de uma conduta convergente para produzir uma alta velocidade. A diferença fundamental reside num ventilador " fan " de grandes dimensões que está montado antes do compressor.

Apenas parte do ar que passa pelo ventilador é queimado na câmara de combustão, assim consegue-se impulso de duas formas: tal como nos turborreatores, onde o ar que passa pela turbina a gás resultante do jato a alta velocidade; e do ar que apenas passa no ventilador e que não entra no processo de combustão.

Consegue-se então um chamado impulso frio e um impulso quente. A relação entre o ar utilizado para impulso frio e impulso quente chama-se relação de desvio (BPR – By Pass Ratio). O ar by-pass, apesar de ser obtido até mesmo com menores velocidades, é muito maior em volume gerando assim um impulso significativo. O jato final, resultante da mistura do ar que passa na turbina a gás com o do "by-pass" tem uma velocidade menor, porém consegue-se uma maior eficiência de propulsão, menor ruído e menor consumo de combustível, tornando o turbofan ideal para aviação civil (MALCEVIC;GHATTAS, 2002).

Figura 34: turbofan Rolls Royce Trent.

Fonte: site Rolls Royce (2013).

6.2. CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS

Um turbofan possui as seguintes divisões :

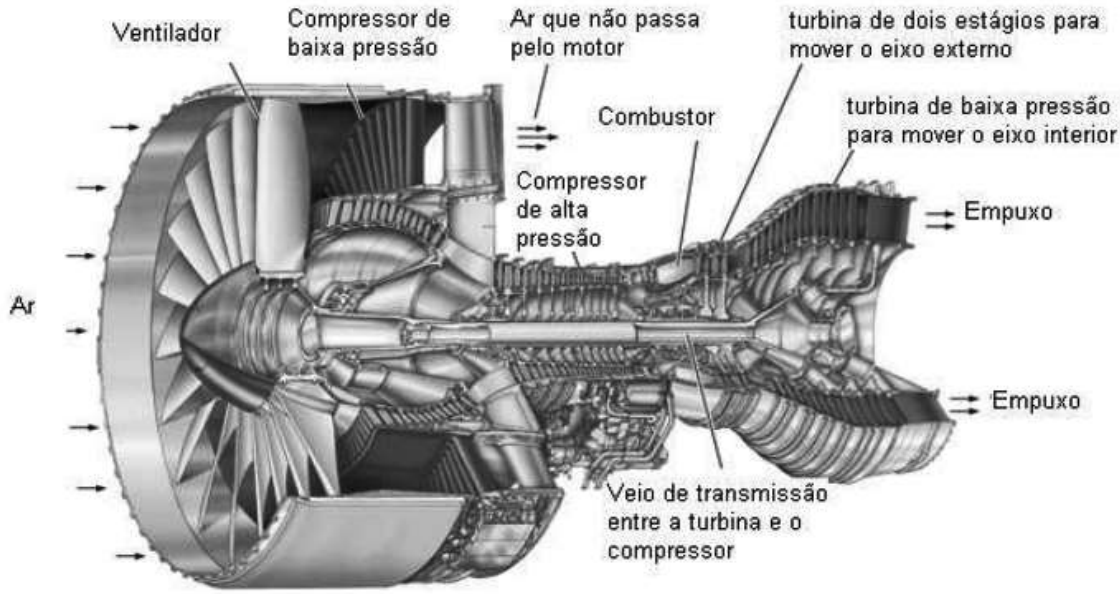


Figura 35: partes de uma turbofan.

Fonte: site Rolls Royce (2011).

As temperaturas de trabalho da turbofan são:

Tabela 02: níveis térmicos de uma turbofan.

Zona	Temperatura
Ventilador	–50 +50ºC
Compressor	–50 ºC +650ºC
Câmara de combustão	1050ºC
Veios	300ºC
Discos de Turbina	700ºC
Pás de turbina	1150ºC
Reaquecimento	1050ºC

Fonte: site Airbus.A380 (2011).

6.3. MODELAGEM TRIDIMENSIONAL

As modelagens tridimensionais, como mostra figura 36, feitas no software Inventor 2013 utilizam os mesmos materiais aplicados na fabricação real das turbofans Rolls Royce Trent 900 do A380, por isso teremos:

a) *Ventilador fan e Compressores de baixa pressão*: são feitos de titânio, que é uma material dúctil, que resiste muito bem à altas temperaturas e possui excelente resistência mecânica;

b) *Compressores de alta pressão*: são feitos com ligas de alumínio das sérias aeronáuticas (ligas 2XXX e 7XXX), possuindo como características principais elevada resistência mecânica, com baixa densidade do metal e alta facilidade de conformação e usinagem;

c) *Turbinas pós-combustor de dois estágios e de baixa pressão*: são construídas em níquel que é um metal dúctil, que suporta grandes temperaturas e possui boa resistência mecânica à corrosão e a oxidação;

d) *Veios de transmissão*: podem ser fabricados em aço inoxidável austenítico, que possuem 17% de cromo e 8% de níquel, gerando nestes uma excelente ductilidade com altos índices de conformação e tenacidade.

e) *Fuselagem*: que é uma proteção, onde são inseridos os seus revestimentos térmicos e os diversos equipamentos eletrônicos de monitoramento da

turbina. Esta fuselagem possui na sua parte externa a predominância do material PRFV, que são polímeros reforçados com fibra de vidro com baixo peso e alta resistência à tração, flexão e impactos.

6.4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

As simulações foram realizadas nos softwares da Autodesk Mechanical Simulation e CFD Simulation, gerando nestes, malhas paramétricas e realizando simulações mecânicas dinâmicas de análise de tensões modais e por critério de Von Mises nos compressores, ventilador fan e veios de transmissão. Também foram realizados simulações de desempenho dos rotores, quando submetidos ao fluido ar em um ambiente de temperatura de 450° C e posteriormente em uma segunda simulação CFD foi aplicado uma temperatura de 1700° C.

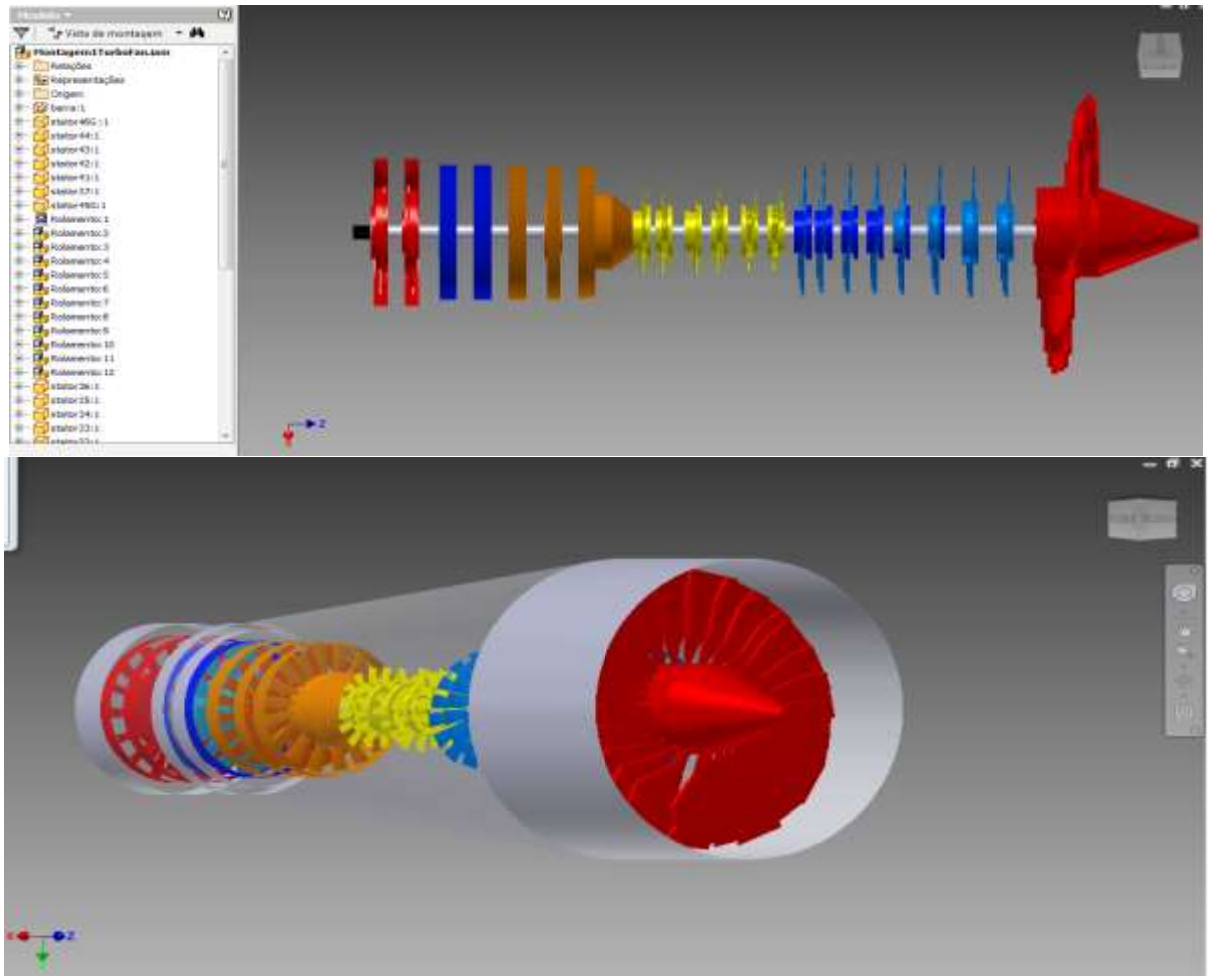


Figura 36 : modelagem 3D de uma turbina turbofan.

Fonte: próprio autor

6.5. ANÁLISE DE RESULTADOS

6.5.1. Simulação Dinâmica

Nesta análise foi aplicado a força do vento (Fv) gerando revoluções na turbofan, sendo:

$$Fv = 0.5 \; x \; \rho_{Ar} \; x \; V_t{}^2 x \; A_s \; x \; C_A \qquad (103)$$

Onde: a massa específica do ar (ρ_{Ar}) = 1,25 g/l ; velocidade do vento na troposfera (V_t)= 16.66 m/s ; área (A_s) = 720 m² e coeficiente de atrito (C_A) = 1 (REASONABLE POWER, 2008).

$$Fv = 124900\ N$$

A força originou momentos de até 2500 x 10^8 N.mm, como mostra o gráfico abaixo:

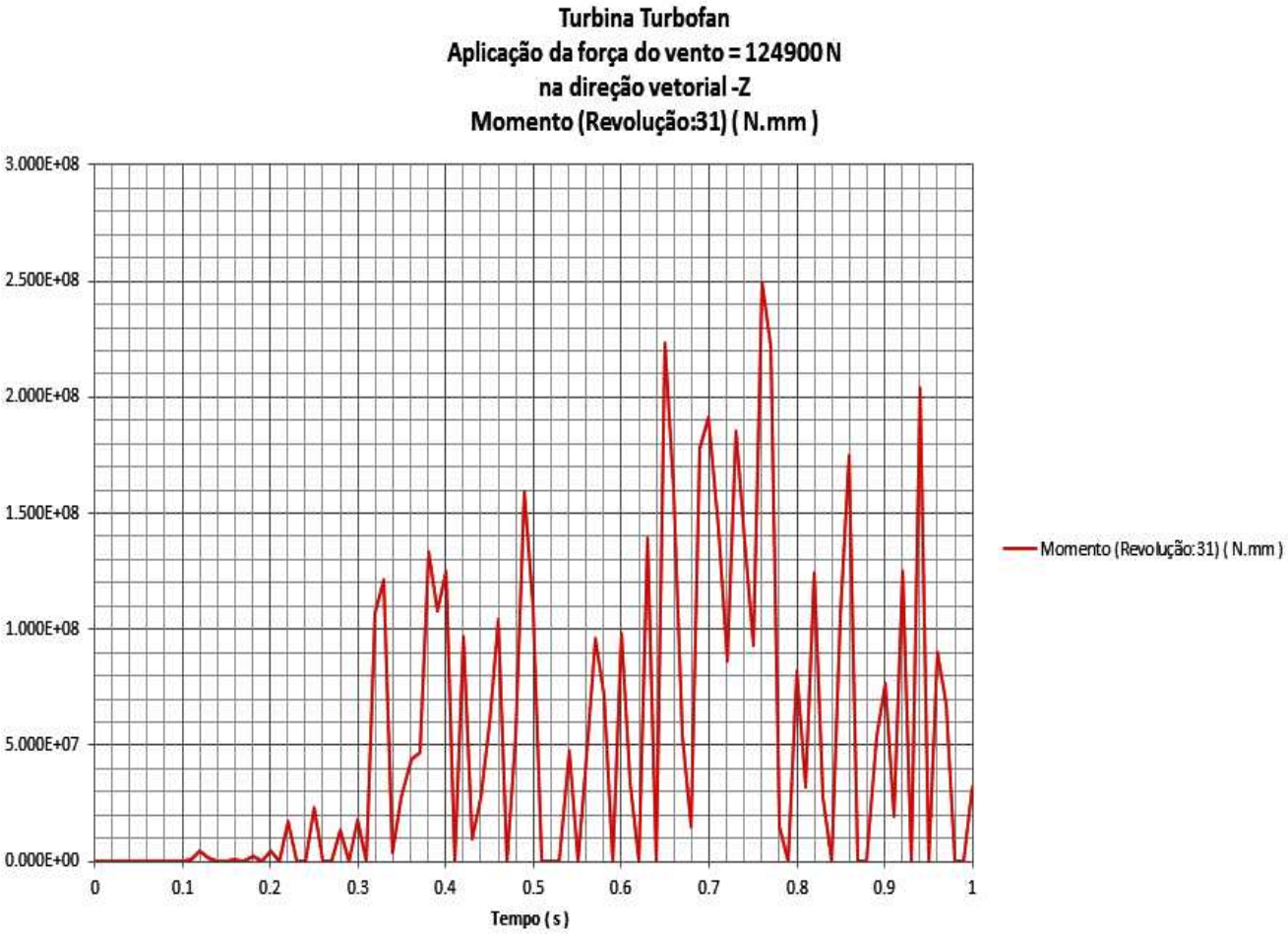


Gráfico 03: evolução dos momentos gerados na turbofan.

Fonte: próprio autor.

6.5.2. Análise de Tensões Modais

Nesta análise calcularemos a potência mecânica (Pm) utilizando os valores da massa específica do ar (ρ_{ar}) que é de 1,25 g/l, da área mediana ($\mathrm{S_{área}}$) que é de 720 m^2, do coeficiente de sustentação de um A380 no ar ($\mathrm{C_x}$) que é de 1,4 e a velocidade (V) de cruzeiro do mesmo A380 que é de 262,5 m/s (AIRBUS A380, 2011).

$$\mathrm{P_m} = 0.5 \text{ x } \rho_{ar} \text{ x } \mathrm{S_{área}} \text{ x } \mathrm{C_x} \text{ x } \mathrm{V^3} \qquad (104)$$

$$\mathrm{P_m} = 0.5x\ 1.25\ x\ 720\ x\ 1{,}4\ x\ 262{,}5^3$$

$$\mathrm{P_m} = 11395371093{,}75\ \mathrm{W}$$

Para o torque (T_q) utilizaremos os valores da potência (Pt) que será igual a potência mecânica (Pm), a velocidade angular (ω) que para as turbofans varia de 20 mil até 200 mil rpm, portanto adotaremos o valor máximo necessário para decolagem do Airbus A380, que é de até 100 mil rpm, que será multiplicado por 2π ou 6.28 (AIRBUS A380, 2011).

$$T = \frac{\mathrm{Pt}}{\omega\ x\ 2\pi} \qquad (105)$$

$$\mathrm{T_q} = 18145\ \mathrm{N.mm}$$

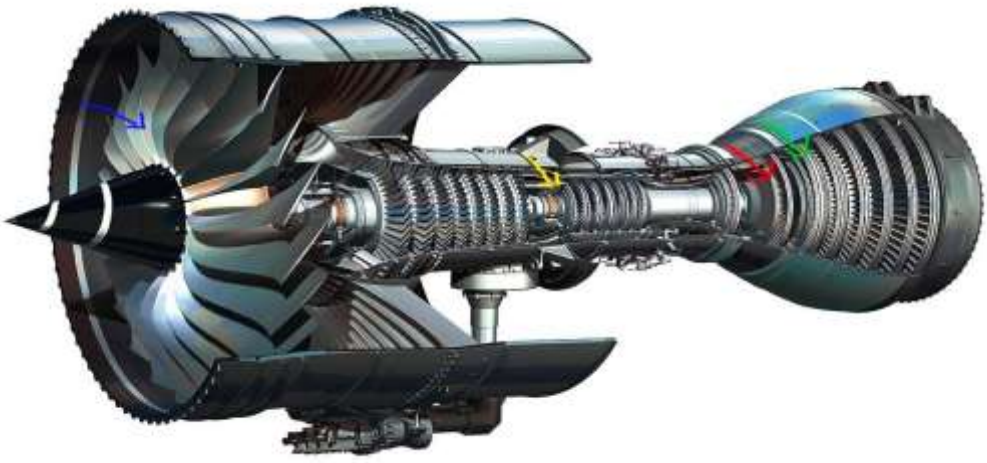
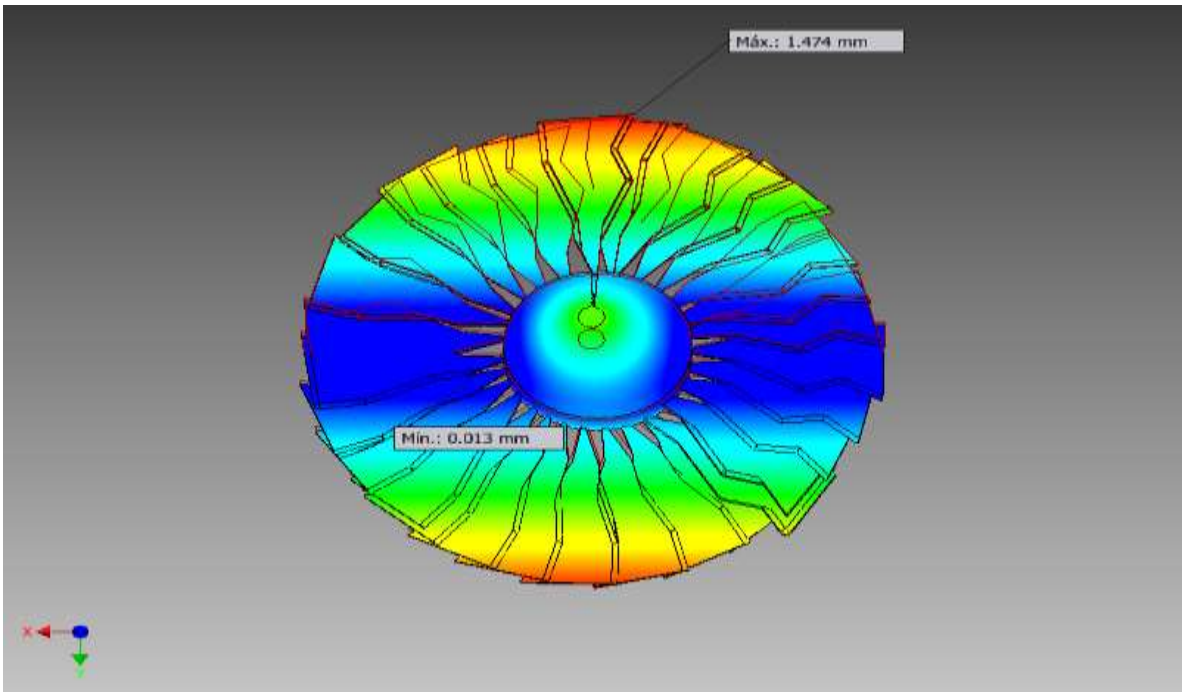


Figura 37: sentido das rotações de uma tubofan.

Fonte: site Rolls Royce Trent; com alterações.

A análise do rotor fan apresentou deslocamentos maiores nas suas aletas que estão a +90° C e – 90°C, porém mesmo desbalanceada o rotor fan manteve padrões normais como mostram as figuras a seguir:

⊟ F4 0.00 Hz Deslocamento



⊟ F8 1702.27 Hz Deslocamento

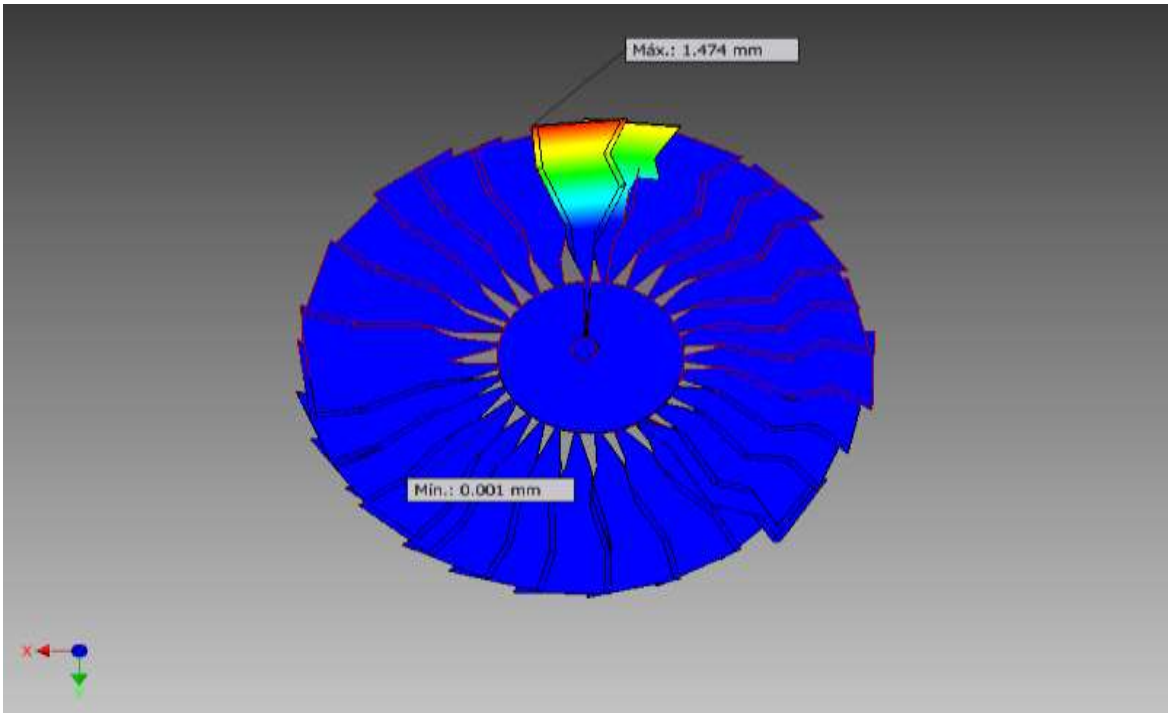


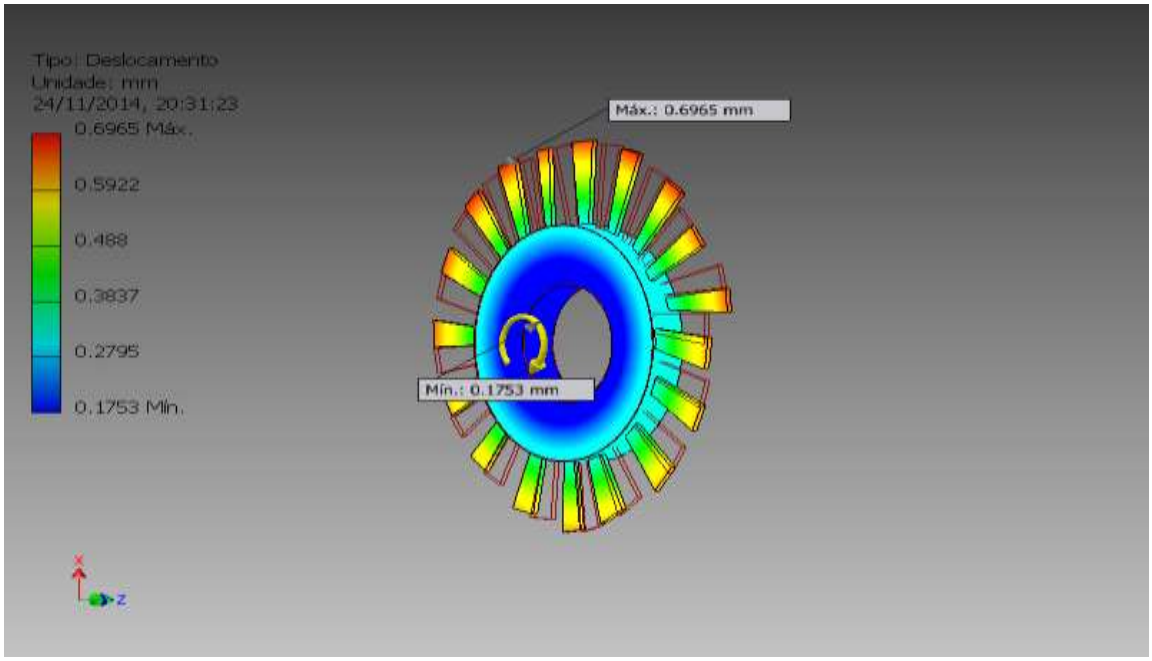
Figura 38: análise de tensões modais no rotor fan.

Fonte: próprio autor.

O material utilizado para a construção dos compressores e do contra-rotor mostrou-se eficaz, apresentando deslocamentos pequenos como mostram as figuras abaixo:

.

⊟ F2 0.00 Hz Deslocamento



⊟ F8 15836.01 Hz Deslocamento

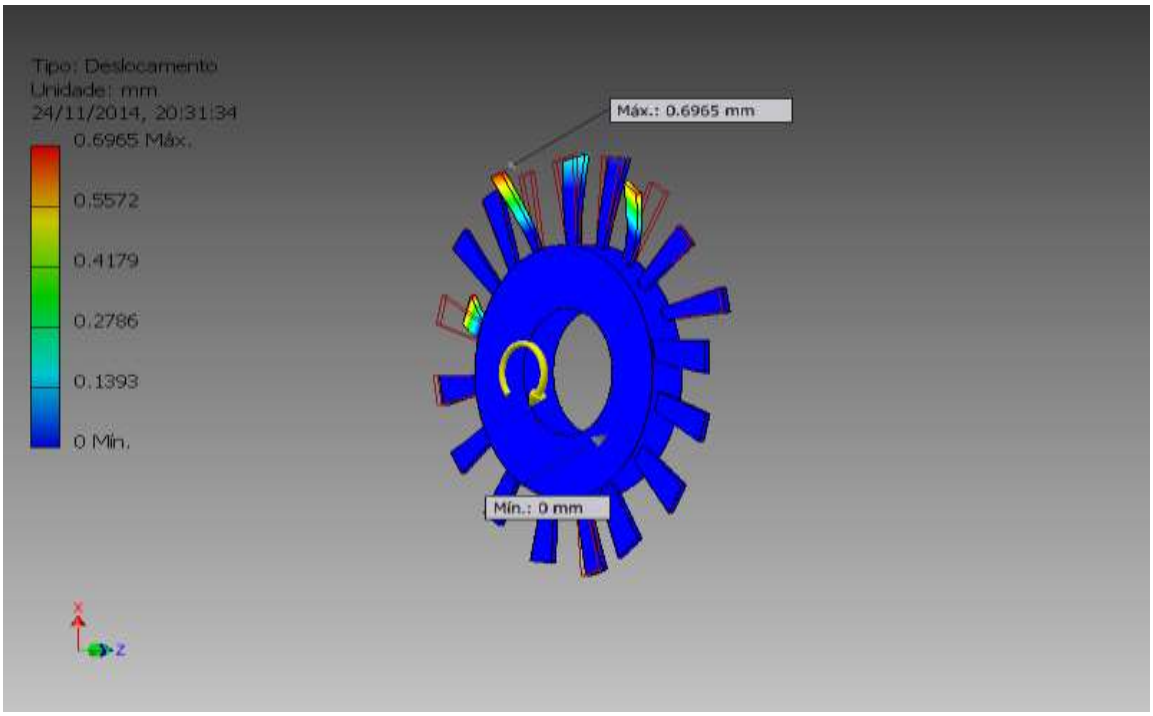
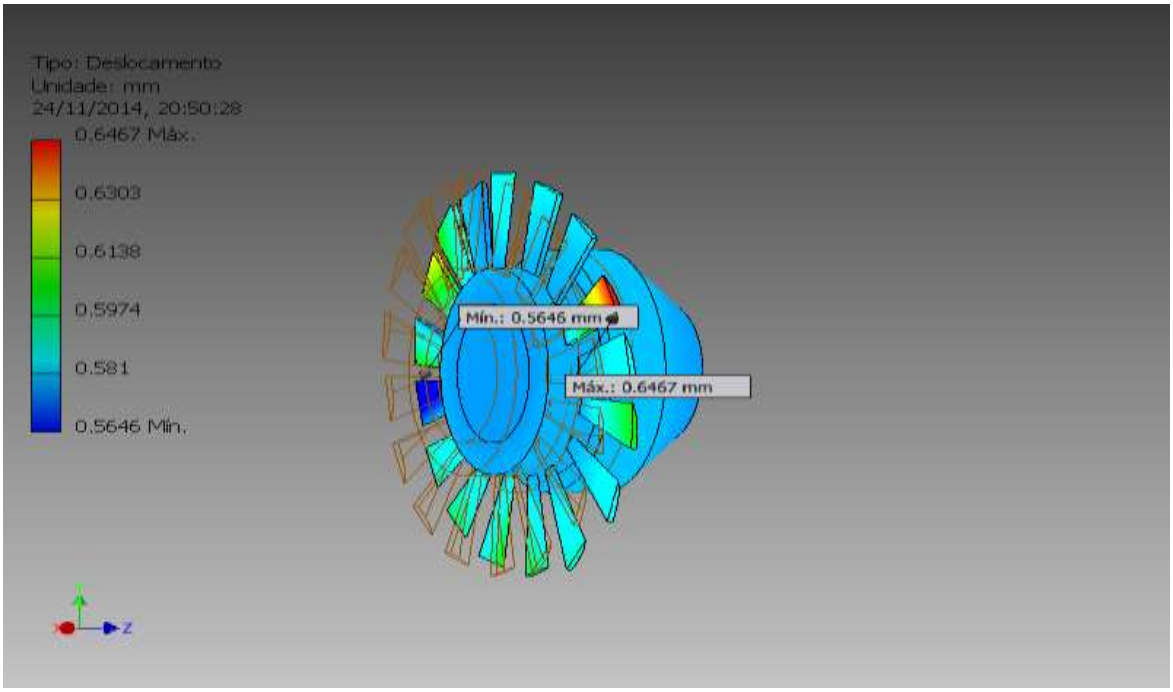


Figura 39: análise de tensão do rotor do compressor

Fonte: próprio autor.

⊟ **F1 584.84 Hz Deslocamento**



⊟ **F8 10039.11 Hz Deslocamento**

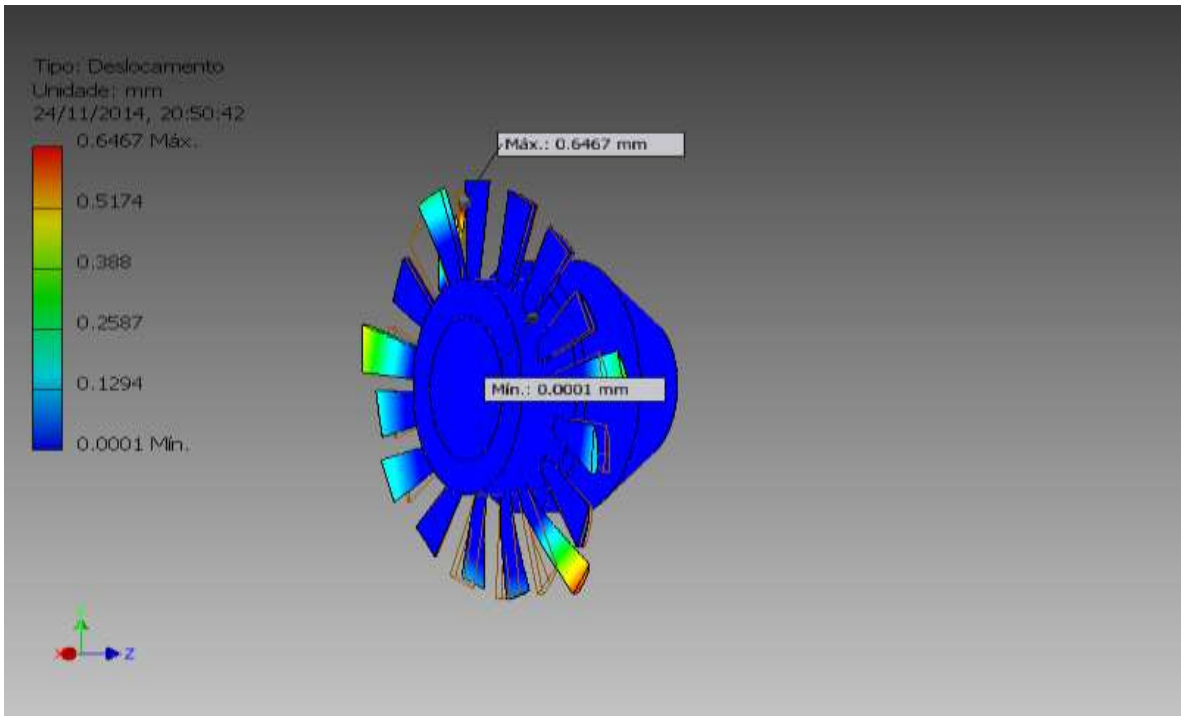
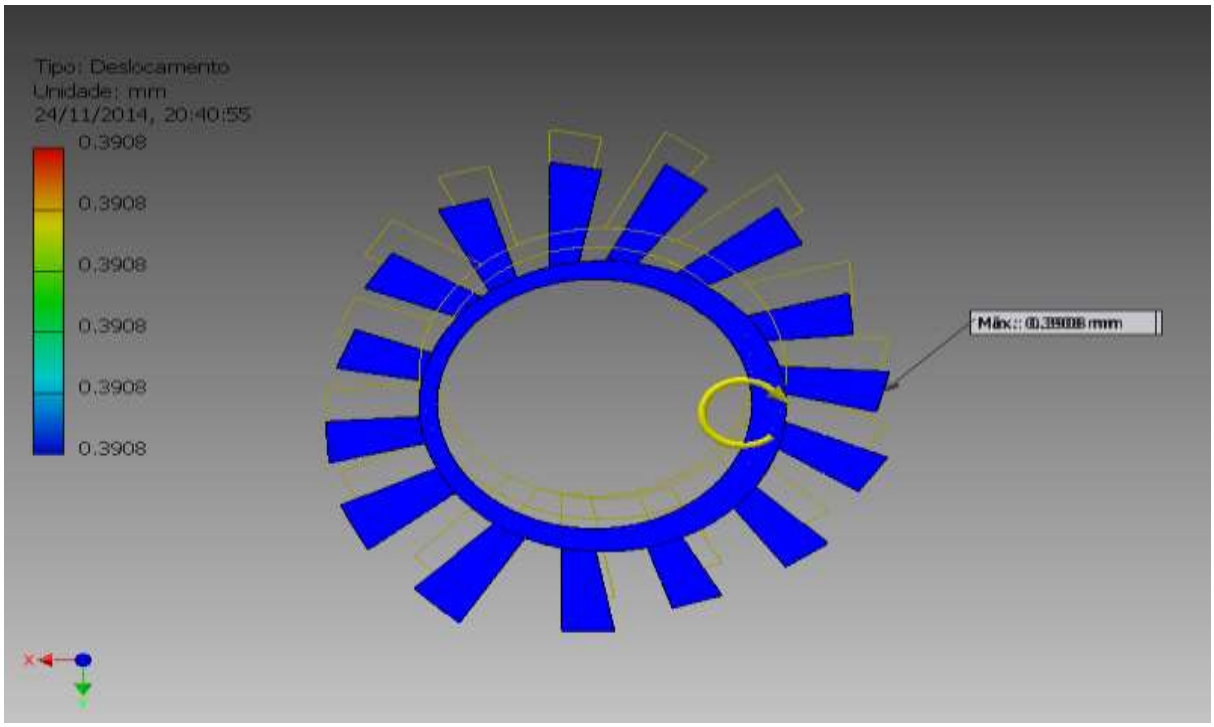


Figura 40: análise de tensão do rotor do compressor.
Fonte: próprio autor.

O rotor da turbina pós-combustor também obteve um desempenho com pequenas oscilações, como mostram as figuras a seguir:

⊟ F1 0.00 Hz Deslocamento



⊟ F8 44248.67 Hz Deslocamento

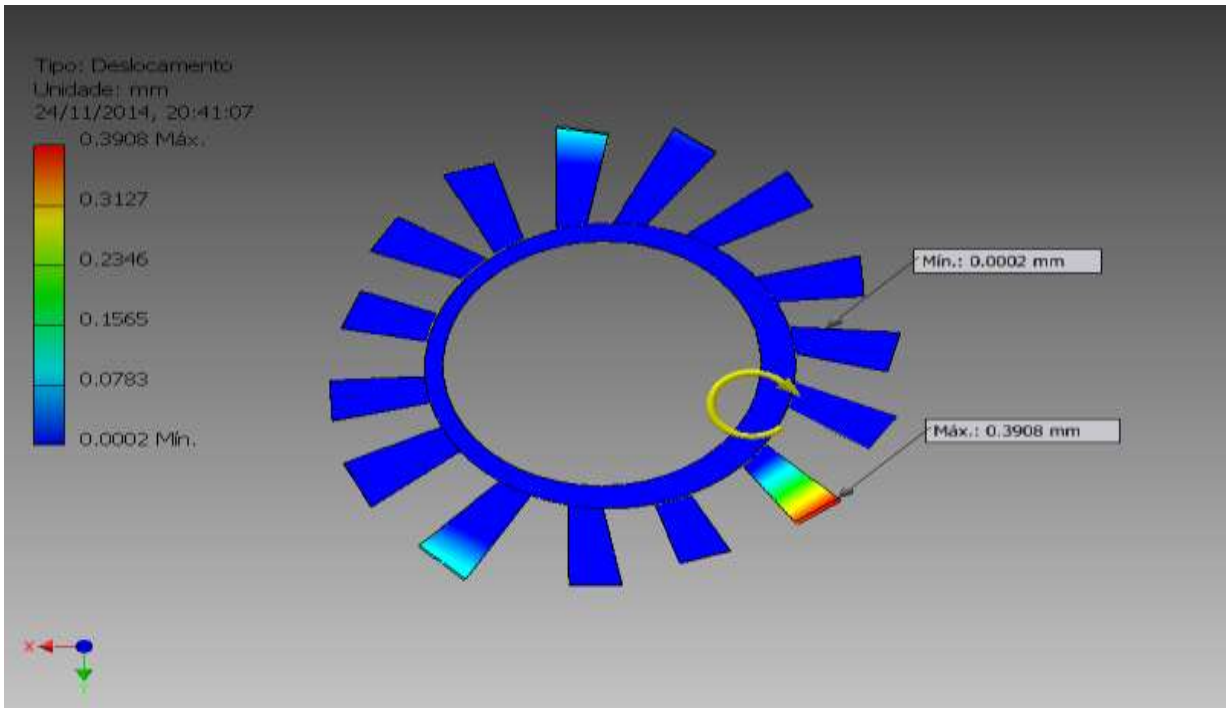


Figura 41: análise de tensão do rotor da turbina.

Fonte: próprio autor.

6.5.3. Análise de Tensão por Critério de Von Mises

Nesta análise utilizaremos momentos de carga nos componentes da turbofan, objetivando que estas cargas dificultem o seu rolamento, cujo o valor será de 18145 N.mm. Os resultados demonstraram valores muito altos para os veios de transmissão, por isso concluímos que o material utilizado nos veios mostrou-se insuficiente, como mostram as figuras a seguir:

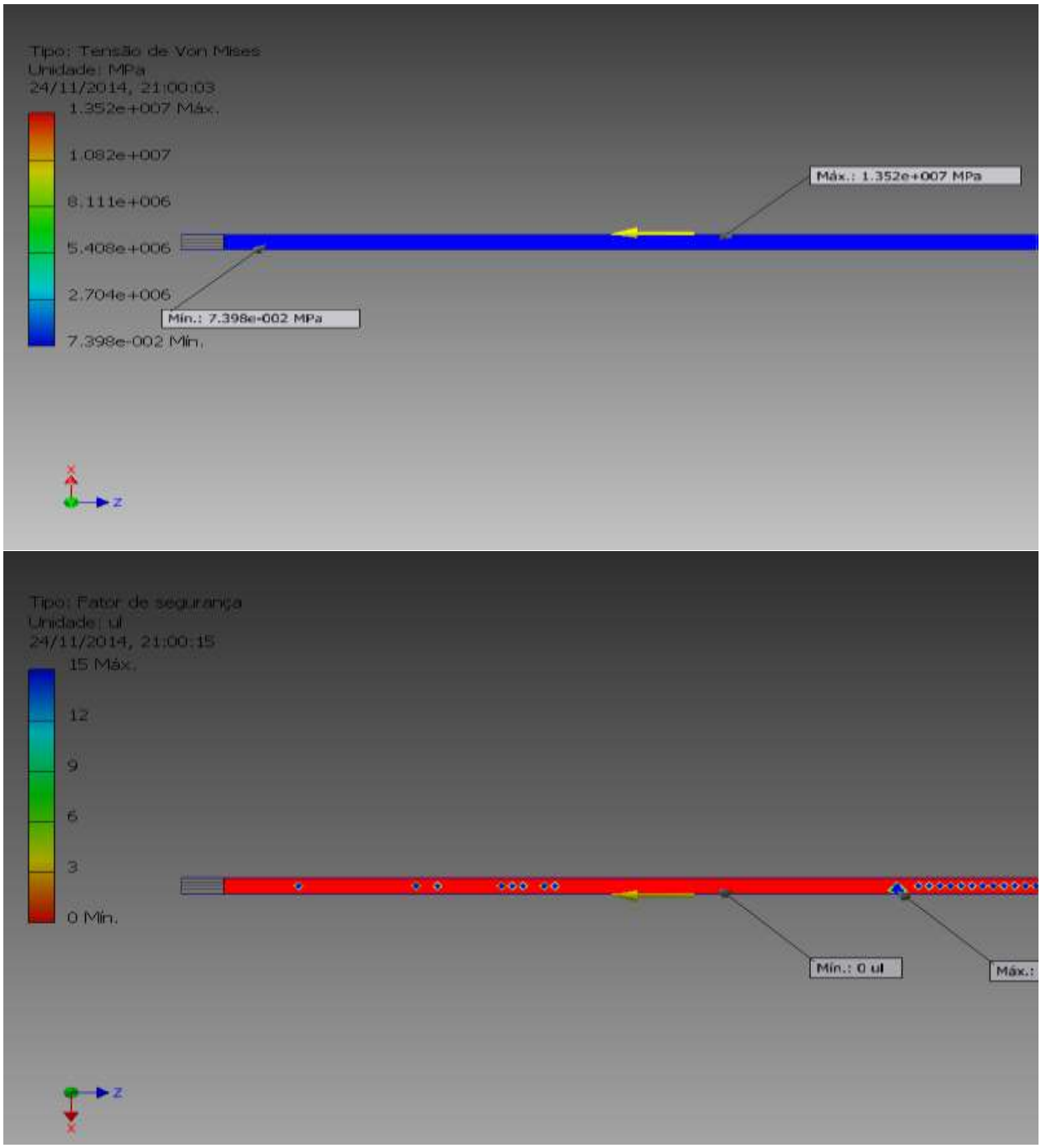


Figura 42: análise por critério de Von Mises e o fator de segurança dos veios.
Fonte: próprio autor.

6.5.4. Simulação CFD

Na simulação dinâmica de fluidos os fatores preponderantes serão a velocidade do vento na troposfera, que é de 16,66 m/s ou 16666 mm/s e as temperaturas de 450°C e de 1700°C (ROLLS ROYCE, 2013).

As velocidades alcançadas e o número de Mach menor que 1, demonstram que as turbofans privilegiam a formação de potências que geram maior torque e não grandes velocidades que venham a superar a velocidade do som, como mostram as figuras abaixo:

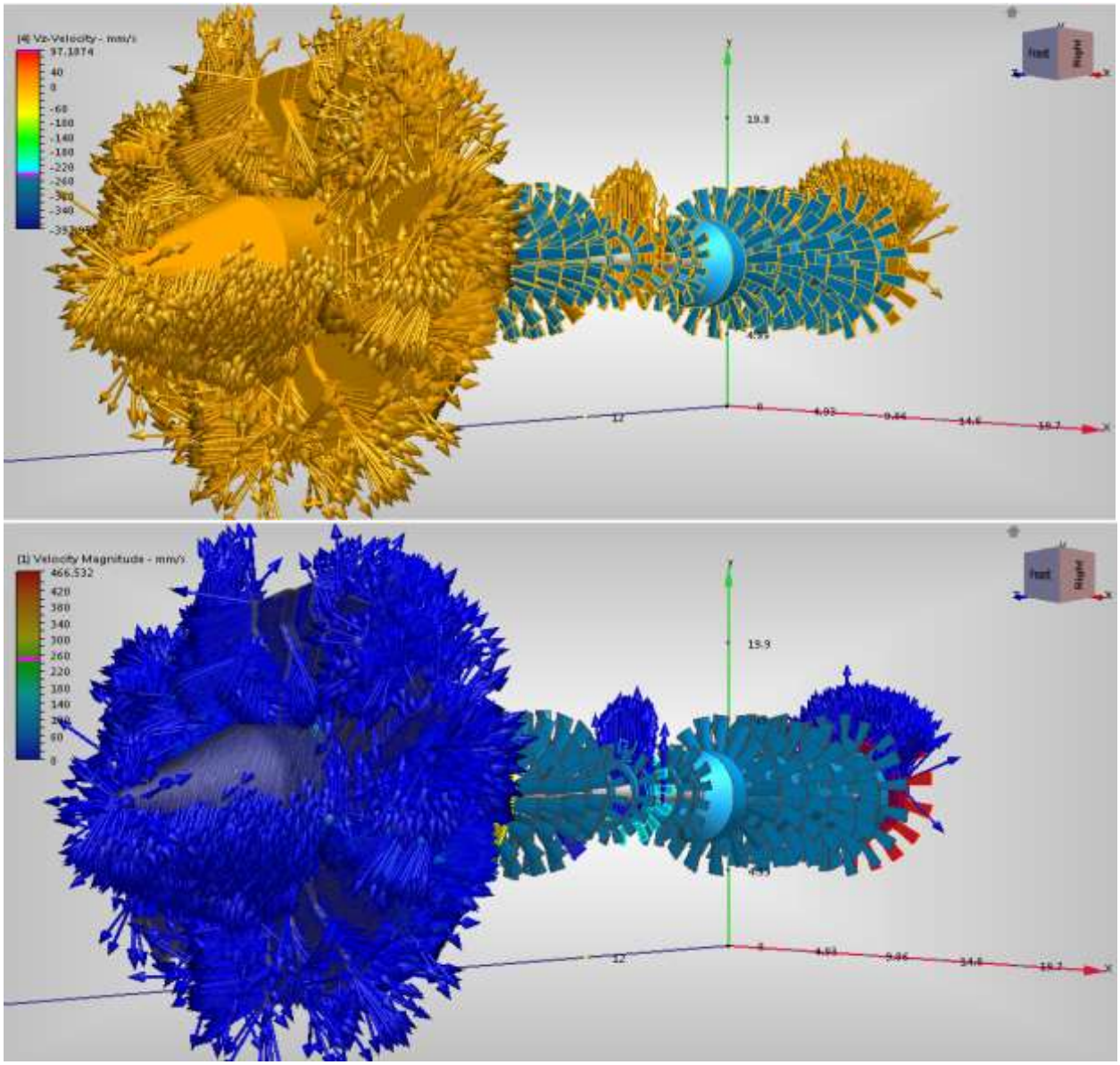


Figura 43: velocidades desenvolvidas por uma turbofan no teste CFD.

Fonte: próprio autor.

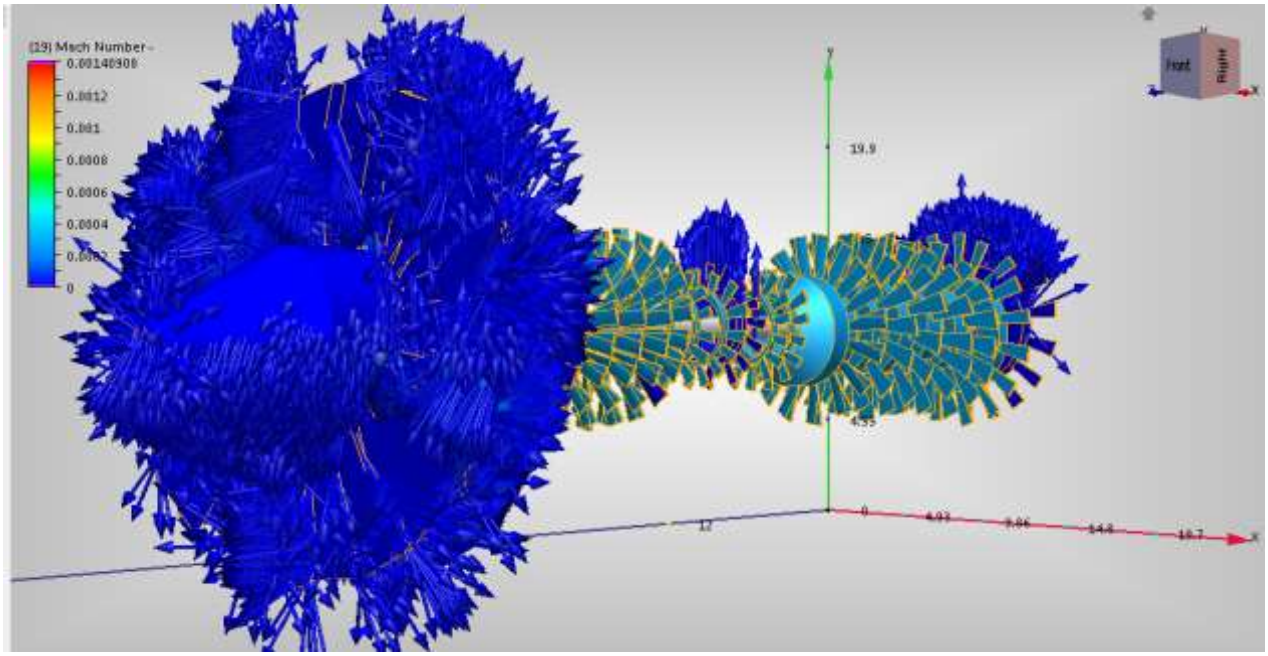


Figura 44: número de Mach da turbofan no CFD.

Fonte: próprio autor.

As tensões de cisalhamento mostraram valores mínimos, porém cabe ressaltar que em testes CFD os valores de cisalhamento só apresentam divergências, quando a malha possui erros nos contatos das montagens, por isso os valores de cisalhamento servem apenas como parâmetro iniciais, como mostra a figura abaixo:

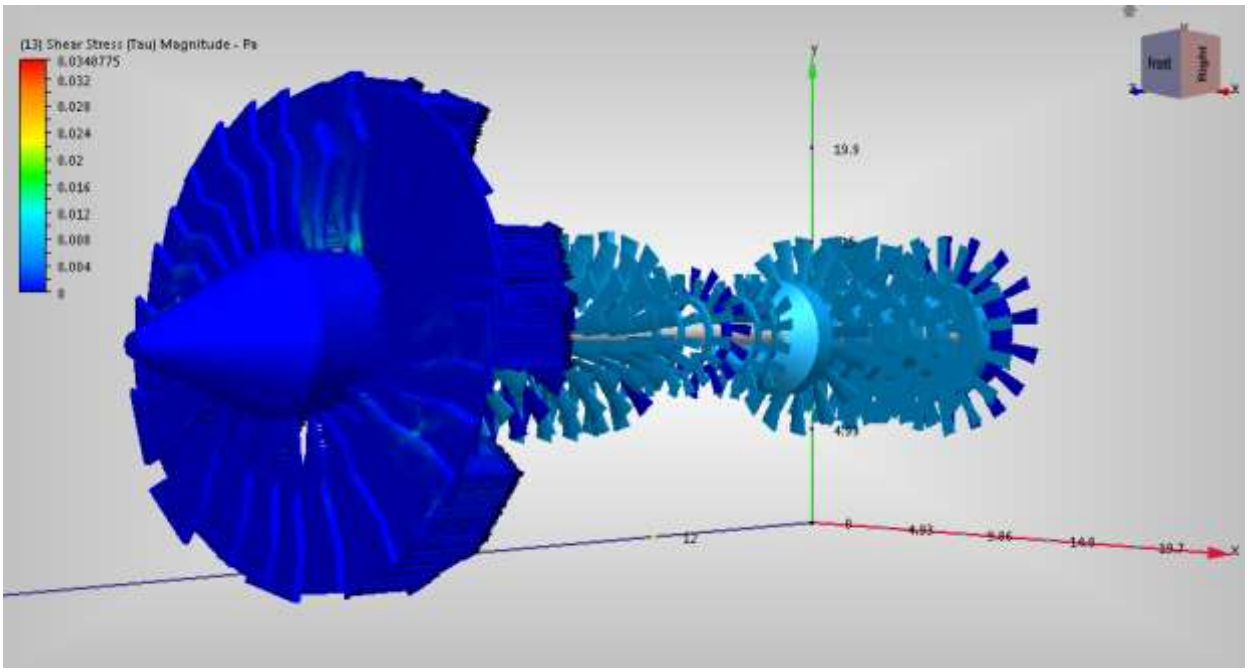


Figura 45: tensões de cisalhamento da turbofan no CFD.

Fonte: próprio autor.

Com a expansão dos gases quentes é produzida maior quantidade de energia, sendo possível a geração de trabalho útil, além do necessário, para mover a turbina.

O rotor fan garante as turbofans maior vazão de ar sem a necessidade de grandes velocidades para obter maior força, gerando também menor consumo e barulho nas turbinas, porém para haver maior trabalho é necessário maior potência, que por sua vez depende do aumento da pressão do ar dentro da turbina, mas para isso são necessárias altas temperaturas, que são desenvolvidas por uma maior vazão acelerada do ar dentro da turbina em consonância com o aumento da queima de combustíveis no combustor antes da expansão dos gases(MANTTINGLY; PRATT, 2002).

Podemos então deduzir que qualquer aumento de temperatura, gera maior vazão mássica de ar, que por sua vez gera maior pressão, que por consequência gera maior potência e assim garante um rendimento maior para a turbina.

As turbinas aeronáuticas são delimitadas no seu rendimento quando são utilizados na sua fabricação materiais menos nobres, que não resistem à altas temperaturas de trabalho ou que geram maior peso desnecessário, por isso que os materiais utilizados nas turbinas aeronáuticas são sempre muito caros, pois a relação menor peso e maior resistência mecânica são fatores difíceis de serem conciliados em um mesmo material. Além disso, estes materiais precisam ser resistentes aos empuxos gerados com a constante pressão exercida pelo ar no avião e suas turbinas, tendo que muitas vezes serem suficientemente dúcteis e tenazes, para não gerarem quebras repentinas e drásticas nas turbofans, pois estas devem estar preparadas para enfrentar ventos fortes em uma turbulência, que podem chegar até 220 km/h e forçam as turbinas à darem respostas rápidas em meio a oscilações de pressões de ar e trepidações constantes do avião (MODEL BENDERS, 2008) .

Nos gráficos a seguir, podemos verificar que com temperaturas medianas, de 450°C; a pressão, a potência e a velocidade se mantém, mas são insuficientes, porém em altas temperaturas de 1700°C, a pressão aumenta e a potência gera maiores velocidades progressivas, garantindo assim respostas rápidas da turbina, mesmo nos seus períodos rotativos iniciais .

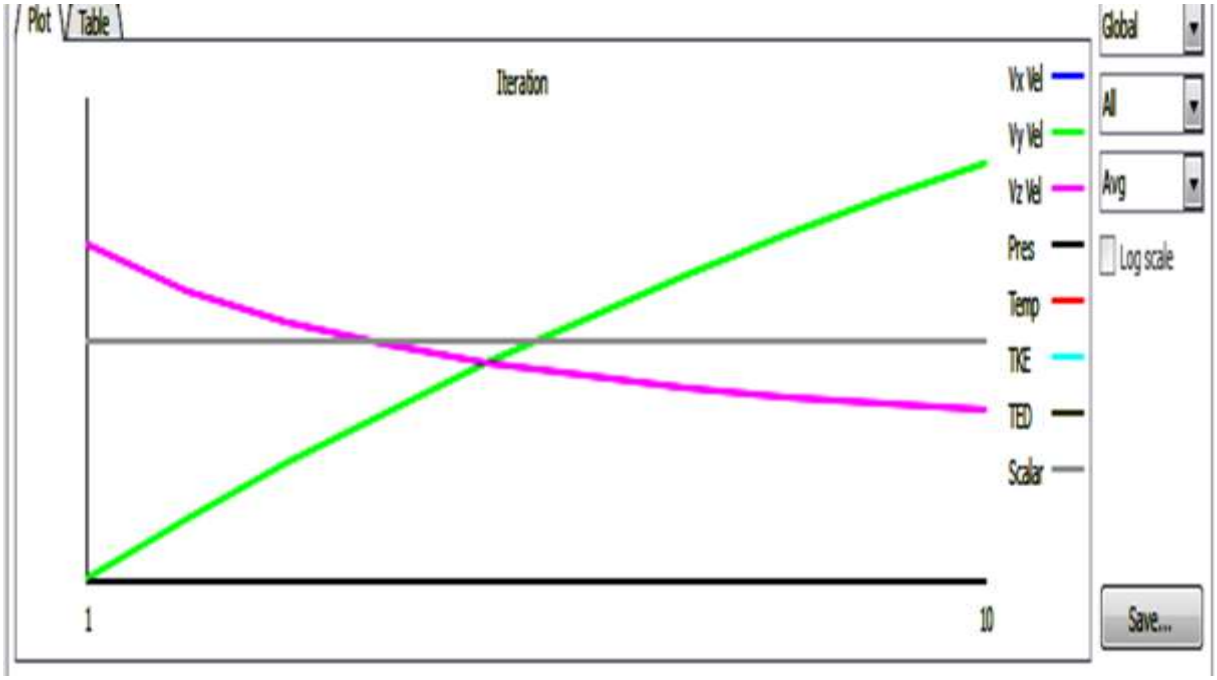


Gráfico 04: resultado CFD da turbofan com temperatura constante de 450°C.

Fonte: próprio autor.

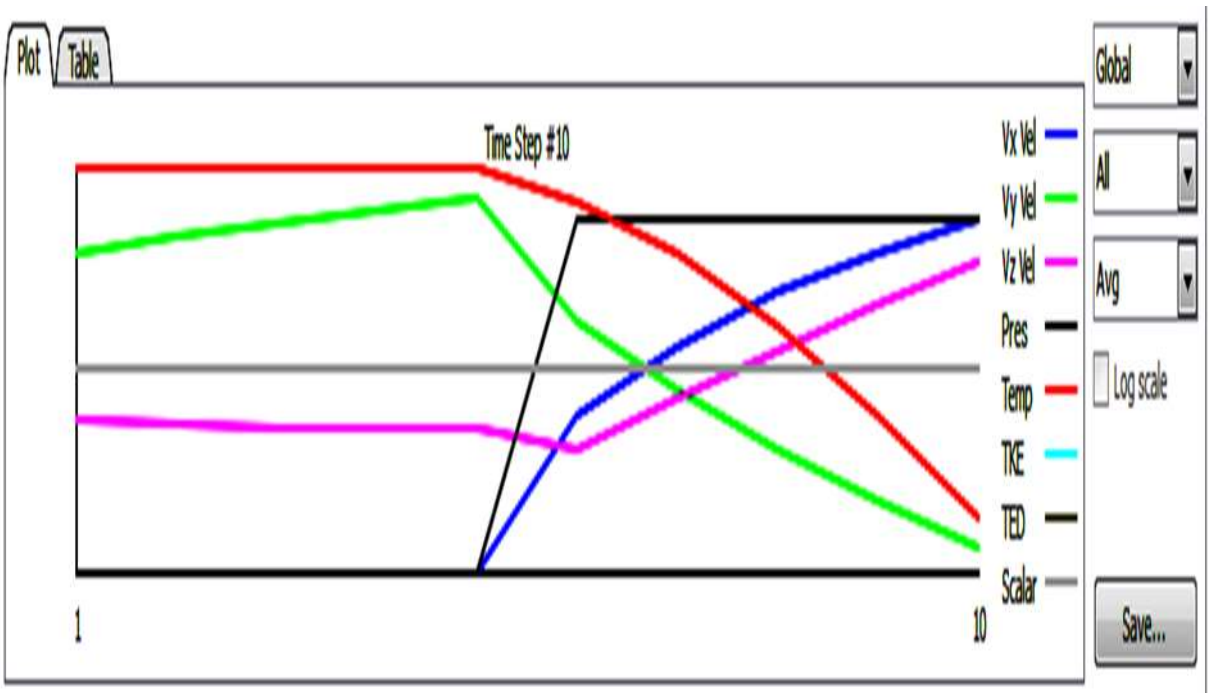


Gráfico 05: resultado CFD da turbofan com temperatura constante de 1700°C.

Fonte: próprio autor.

7. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DOS EIXOS DE UM MOTOR

Nesta simulação virtual mecânica faremos um comparativo entre as peças centrais de um bloco de um motor quatro tempos de dezesseis válvulas, modelando em 3D no programa Inventor 2014, suas válvulas, bielas, pistões, virabrequim, correia dentada e eixo de comando de válvulas, utilizando posteriormente o software Autodesk Mechanical, para em uma primeira etapa simular no computador todas estas peças utilizando materiais tradicionais, que são amplamente utilizados por toda indústria automobilística e em uma segunda etapa repetiu-se as mesmas modelagens, configurações e procedimentos no simulador que foram utilizados na primeira etapa, porém foram modificados os materiais empregados na sua fabricação, buscando-se nesta segunda etapa avaliar os resultados de todos os componentes quando constituídos por plásticos de engenharia, comparando estes com os componentes da primeira etapa, que foram fabricados com materiais tradicionais.

7.1. ASPECTOS GERAIS

A indústria automobilística vêm ao longo das últimas décadas buscando testar novos materiais que garantam maior leveza à carroceria dos veículos e ao mesmo tempo não diminua a segurança e a longevidade dos componentes, quando comparados com os veículos que utilizam componentes com materiais tradicionais como o aço, ligas de aço, ferro fundido e ligas de alumínio.

As peças fabricadas com plásticos de engenharia, como a poliamida nylon 6.6 e o plástico reforçado com fibra de carbono (CFRP), teoricamente, poderiam reduzir o peso dos veículos em até 35%, gerando menor força de arrasto aerodinâmico, menor consumo de combustível, maior torque, força, desempenho e também maior segurança, pois fisicamente em acidentes veiculares, com choques a velocidades medianas, as ferragens de veículos com materiais tradicionais geram maiores danos aos passageiros do que os destroços de um carro feito de poliamida, que utilize plástico com fibra de vidro, nylon 6.6 e o CFRP.

Entretanto o uso de novos materiais esbarra, principalmente, na falta de um amplo espectro de testes que visem aperfeiçoar os plásticos de engenharia para o

uso em veículos não tão somente em algumas partes da sua carroceria, mas também para componentes principais, por isso esta análise visa verificar se seriam viáveis projetos que pretendem utilizar estes plásticos nos eixos principais de um veículo ou se estes materiais precisam de maiores evoluções nas suas composições.

7.2. CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS

Os materiais do motor tradicional, como mostra figura 46, possuem as seguintes características:

a) Ferro Fundido: de acordo com Reed-Hill; Abbaschian (1992), este material contém na sua constituição 2.5% de silício, 0.65% manganês e 3.5% de carbono (presente como flocos de grafite) o que confere a este tipo de ferro uma grande resistência ao desgaste, melhor rigidez, maior facilidade para ser trabalhado e uma maior resistência a corrosão. Na modelagem o ferro fundido foi utilizado no virabrequim e seus eixos, possuindo estes a cor *laranja* na vista 3D do motor.

b) Alumínio: é constituído por 11% de silício e 0.5% de manganês nas suas ligas, que possuem uma elevada resistência mecânica e excelente condutividade térmica, por isso é capaz de dissipar o calor mais rápido do que o ferro fundido. Logo o alumínio leva a uma maior eficiência térmica, pois o motor obtém melhor desempenho também à baixas temperaturas e portanto melhora as características gerais de funcionamento do motor de um automóvel. Mas a característica principal do alumínio, como a exemplo o AL-3105-H18, é o seu baixo peso, que tem proporcionado aos projetos de engenharia automotiva maior flexibilidade quanto ao seu uso em diversas matrizes, que originam novas peças. Na modelagem o Alumínio 3105-H18 foi utilizado na construção das bielas, pistões, bronzinas e suportes (peça11) dos eixos do comando de válvulas, possuindo todos estes a cor *amarela* no desenho tridimensional.

c) Aços: segundo Zagonel (2006), são ligas a base de ferro deformáveis no estado sólido. De forma geral, são ligas com menos de 2,1% (em peso) de carbono. Sendo que suas variações são:

- *Aço-carbono*: liga ferro-carbono contendo até 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais resultantes de processos de fabricação (Mn, Si, P e S). Contém em geral, basicamente, os seguintes elementos: Fe, C, Mn, Si, P e S;

- *Aço-liga*: são aço-carbonos que contém outros elementos de liga ou apresenta os elementos residuais em teores acima dos que são considerados normais. Contém em geral os seguintes elementos de liga: Al, Pb, Nb, Ta, B, H, Cr, Mo, Ti, Cu, Ni, W, Co, N e V;

- *Aço Inoxidáveis*: são aço-carbonos que possui certos elementos de liga que os tornam resistentes a corrosão atmosférica e a ação de alguns meios gasosos ou líquidos. Contém basicamente os seguintes elementos de liga: Cr, Ni, Si, Mo, Al, Nb, Ti, Ta e Cu;

- *Aço Rápido*: são aço-carbonos que contém elementos de liga que mantêm a dureza do aço elevada mesmo a altas temperaturas. Possuindo na sua composição os seguintes elementos de liga: W, Cr, Mo, Co e V.

As propriedades gerais dos aços são: alta resistência mecânica (Tração), boa retenção de corte (aço rápido), boa usinabilidade, baixo custo e alta resistência a corrosão (aço cromo e inox).

Os eixos do comando de válvulas e todos os seus componentes, assim como os balancins (em *azul*), hastes (em *branco*) e as buchas (em *azul*) das válvulas, foram construídos na modelagem com aço de alta resistência e baixa liga.

Os anéis (em *azul*) dos pistões em cromo. As válvulas, os eixos, com rolamento rolling bearing, pertencentes à arvore de válvulas e suas correias foram construídos utilizando aço carbono, aço rápido e aço liga respectivamente, possuindo estes as cores *verde*, *azul* e *branco* no desenho modelado 3D.

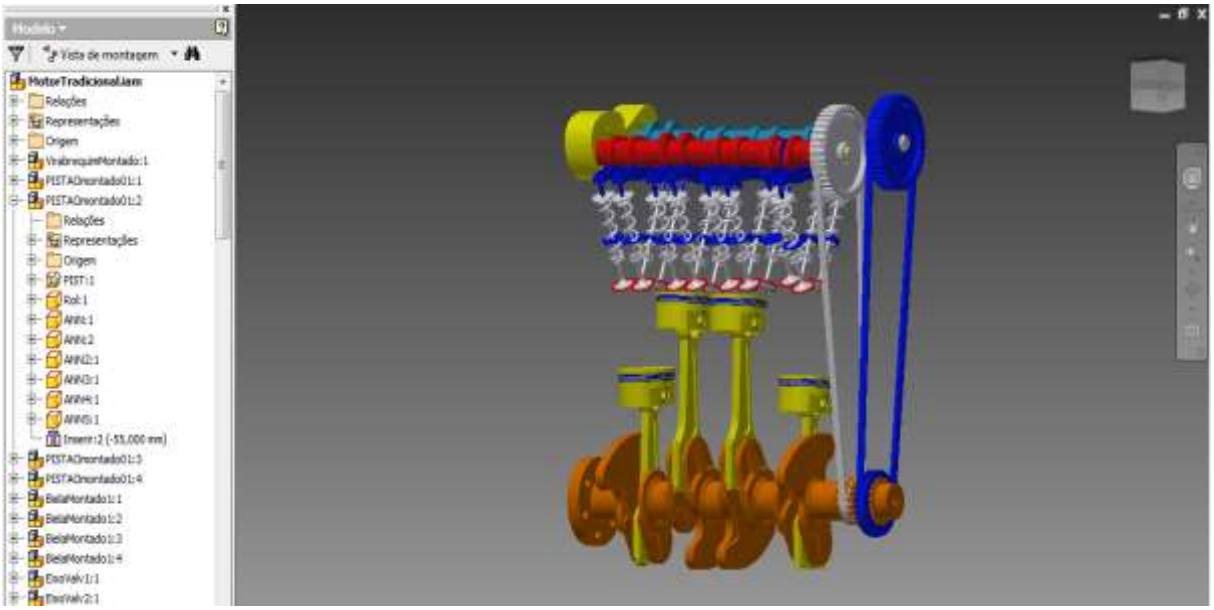


Figura 46: modelagem motor tradicional.

Fonte: próprio autor.

Os materiais do Motor de Plástico (figura 47), possuem as seguintes características:

a) Poliamida 6.6 ou Nylon 6.6 : é um plástico de engenharia que possuem hexametilenodiamina e ácido adípico com seis átomos de carbono cada uma, que possuem amidas polares de curta distância e assim uma trama molecular que garante baixa taxa de impermeabilização e boa resistência mecânica e térmica, conseguindo assim suportar as temperaturas de trabalho de um motor veicular bem lubrificado , que normalmente variam entre 75 a 110 °C, pois a sua resistência térmica pode suportar temperaturas de até 240°C. Outros fatores qualitativos são a sua boa resistência ao impacto, à fadiga, alta fluidez, boa impermeabilização e boas propriedades mecânicas.

   Os seus pontos desfavoráveis estão na sua baixa resistência a álcool benzílico, fenóis e cresóis; assim como aos ácidos nítricos, clorídricos e sulfúricos. Este material foi utilizado para construir os eixos e rolamentos da árvore de came de válvulas, pistões e válvulas, que no desenho 3D possuem respectivamente as cores *amarela* para eixos e válvulas; *branco* para o eixo secundário; *azul* e *laranja* para os eixos de rolamento da árvore de válvulas; e pistões em *vermelho*.

b) Plástico Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP): consiste de um polímero (normalmente duroplastics, termoplásticos) utilizado como um material de matriz em que as fibras de carbono, com um diâmetro de poucos micrómetros, são incorporados. Processos diferentes podem ser utilizados para o fabricante de produtos semi-acabados e produtos finais, dependendo do perfil de geometria e exigência envolvidos. Estes outros processos incluem: fibras por processo de enrolamento, autoclave por pressão calorífica, uso de placas de pressão, moldagem por transferência de resina RTM (método de injeção de resina) ou laminação manual para produção de série individual e pequena (OTOSSON, 2002).

O material CFRP possue baixa densidade, excelentes propriedades de amortecimento e uma alta resistência à impactos combinada com expansão térmica variável, que se adequa muito bem a perfis variados e complexos, porém possui como desvantagens o seu alto custo de produção que depende de mão de obra muito qualificada e processos complexos de produção de seus materiais, que geram coeficientes de fadiga muito variados. Na modelagem 3D os componentes que usam este material são o virabrequim e seus eixos, nas cores *branca*; balancins na cor *verde* e os suportes do eixo do comando de válvulas na cor *vermelha*.

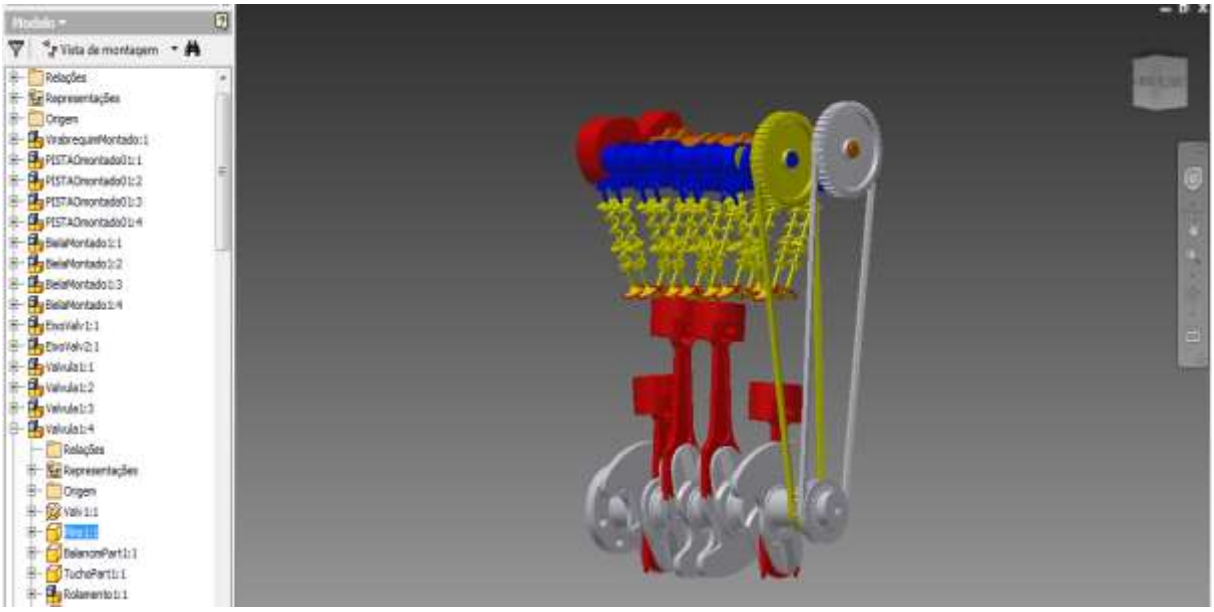


Figura 47: modelagem motor de plástico.
Fonte: próprio autor.

As correias dentadas e os rolamentos internos rolling bearing, foram mantidos com os seus materiais de fabricação originais (aço liga) tanto no motor tradicional quanto no motor de plástico.

7.3. MODELAGEM TRIDIMENSIONAL

As configurações dos materiais são pré-determinadas pelo programa, ficando adequações como padrões de cores, rolamentos internos, tipos de molas, tipos de correias e fatores relativos a resistência mecânica, podendo estas serem adequadas pelo usuário do Inventor 2014.

Os dados adotados foram de um sedan médio da marca Renault, possuindo portanto 16 válvulas, 115 cv, taxa de compressão de 10.8:1, peso de 1045 kg no total, distribuídos em 60% na parte dianteira e 40% na parte traseira, possuindo o bloco do motor 70% do peso da parte dianteira e gerando um torque de 16 kgfm aos 3750 rpm, sendo que a sua taxa de trabalho normal varia de 1600 rpm e vai até 5750 rpm, com lubrificação teórica ideal, trabalhando portanto à uma temperatura média de 85°C (RENAULT SYMBOL, 2013).

7.4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

As simulações computacionais foram feitas em modelagens tridimensionais geradas no Inventor 2014 e transportadas para o Autodesk Mechanical, onde foram realizadas simulações dinâmicas no motor tradicional e posteriormente no motor de plástico, assim como foram feitas análises de tensões modais, que simulam frequências dinâmicas em estado plano, que foram geradas no virabrequim e seus eixos, assim como nos eixos do comando de válvulas e seus cames, possuindo estes as configurações dos materiais do motor tradicional e depois as configurações do motor de plástico.

Além destas análises foram realizadas verificações na biela, pistão e haste da válvula, que possui mola de fator mínimo 8 com 20 mm de comprimento, onde foram feitos análises de tensão por critério de Von Mises, que analisa a taxa de carregamento suportada até a tensão máxima que causa o escoamento do material.

7.5. ANÁLISE DE RESULTADOS

7.5.1. Simulação Dinâmica: Nesta etapa os eixos centrais do motor tradicional e do motor de plástico foram testados com o mesmo Momento em X, cujo o valor foi de 16 kgfm ou 156906,4 N.mm, que se traduz em força rotacional nos eixos do virabrequim e da árvore de cames.

Na primeira revolução nos eixos do motor tradicional apresenta valor máximo de $1750x10^9$ N.mm e nos eixos do motor plástico um valor máximo de $5200x10^8$ N.mm. Como mostram os gráficos a seguir:

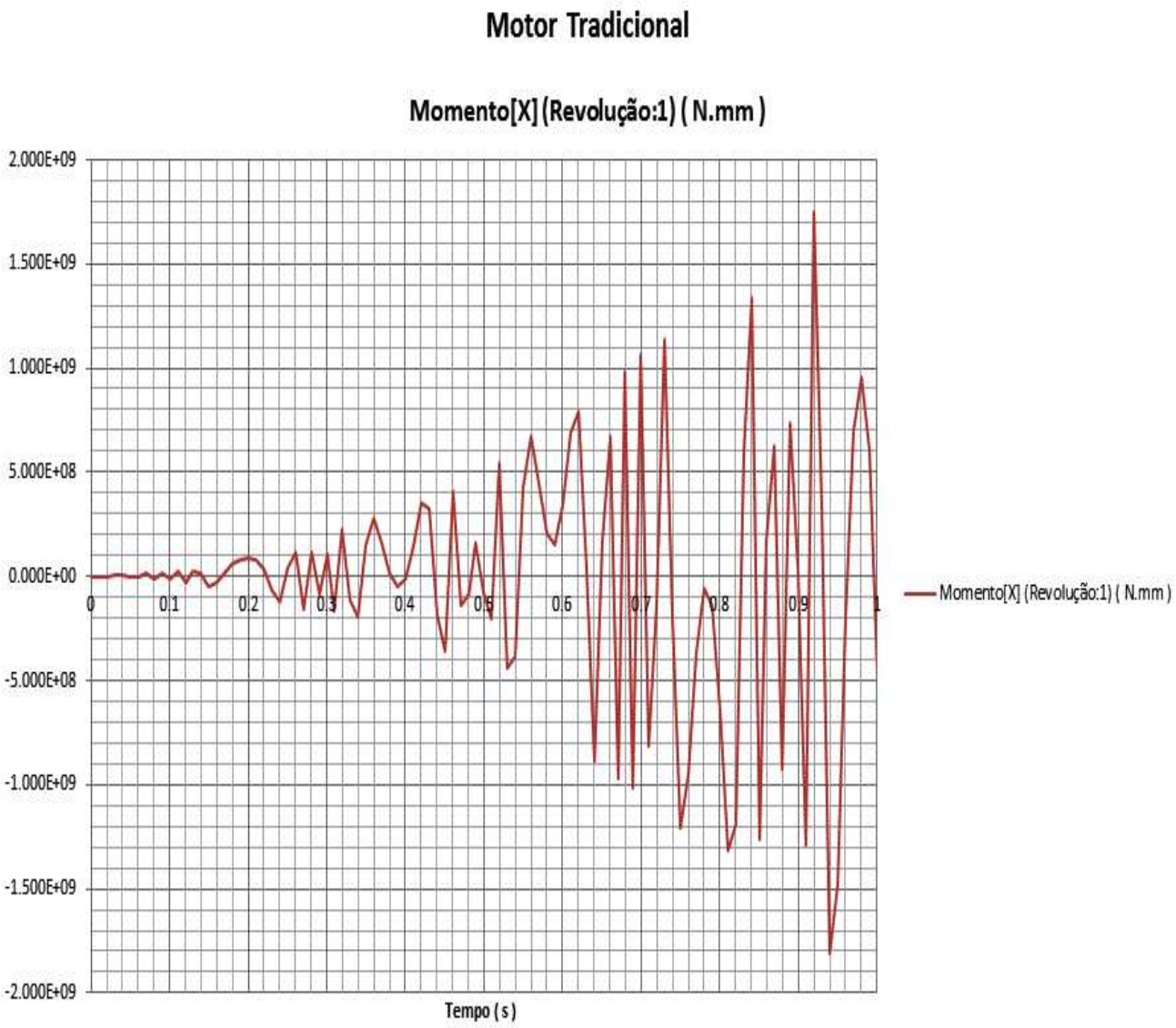


Gráfico 06: momentos na revolução 01 dos eixos do motor tradicional.

Fonte: próprio autor.

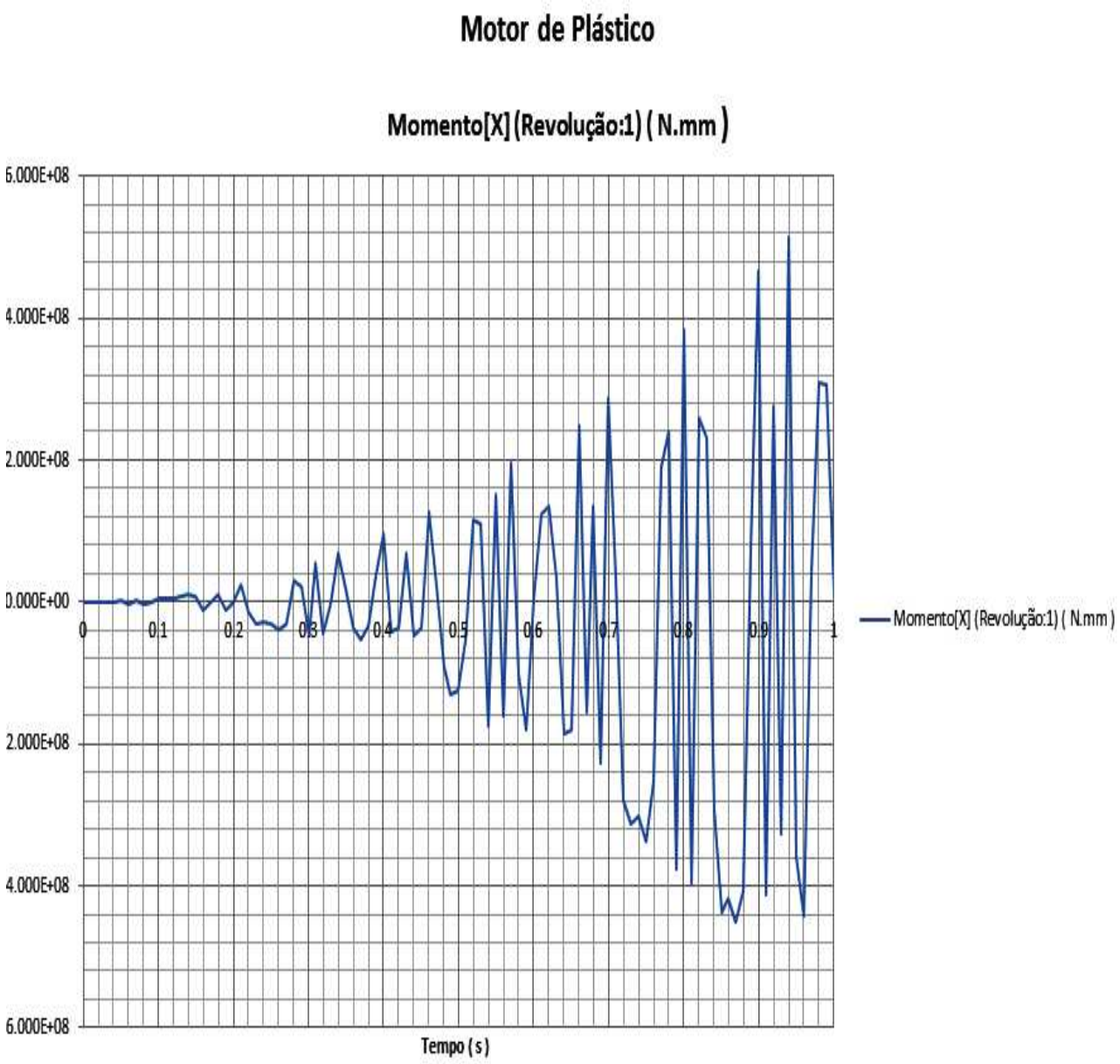


Gráfico 07: momentos na revolução 01 dos eixos do motor de plástico.

Fonte: próprio autor.

As forças geradas na primeira revolução são maiores no tradicional (4600x10^6 N.mm) e menores no de plástico (3800 x10^6 N.mm), como mostram os gráficos:

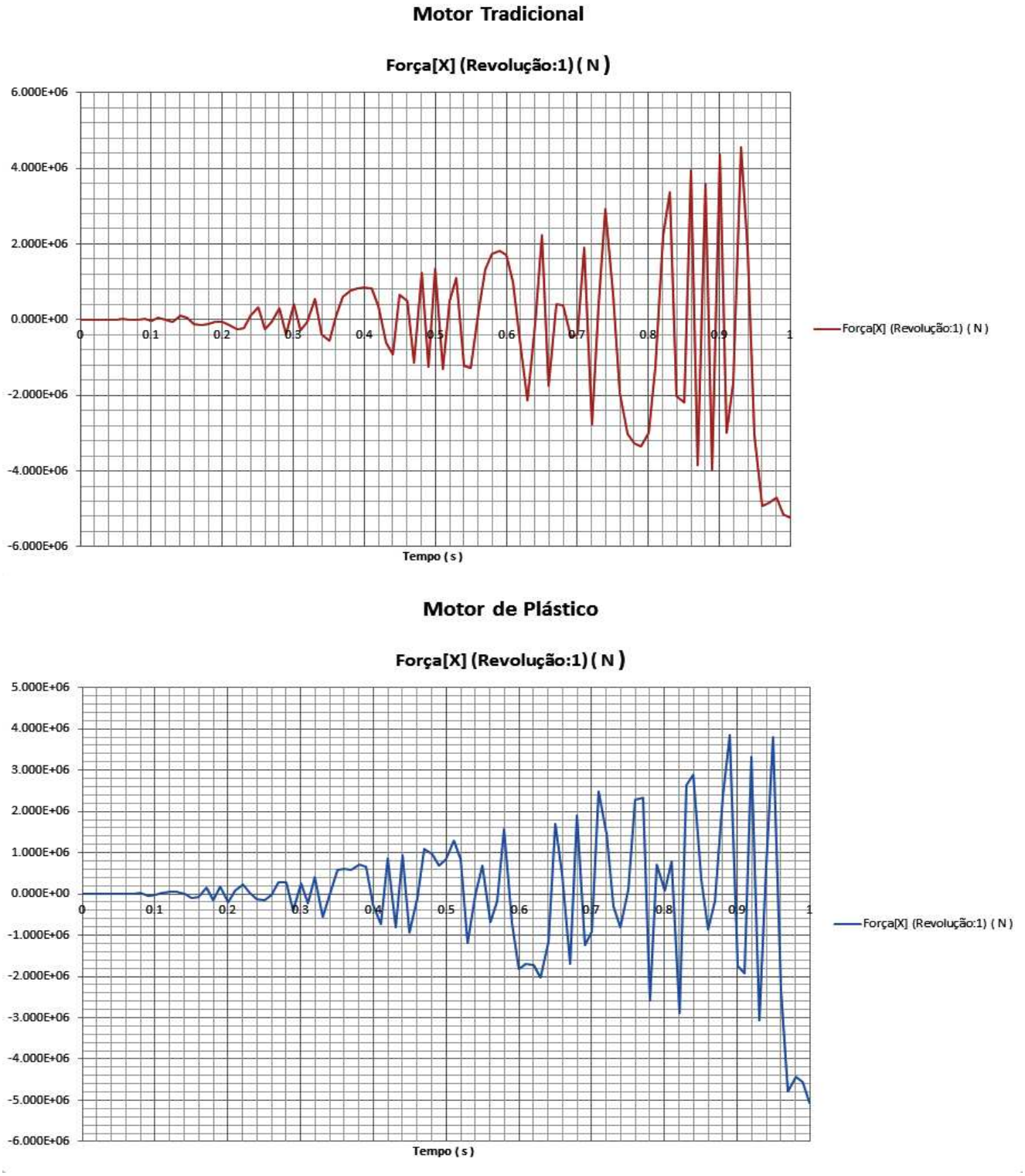


Gráfico 08: forças geradas na revolução 01 dos eixos dos motores.

Fonte: próprio autor.

Na revolução vinte e nove os momentos começam a se equivalerem em $1450x10^{10}$ N.mm e as forças também em $3100x10^{7}$ N.mm, deixando evidente que o eixo do motor plástico consegue desenvolver força suficiente para gerar o mesmo desempenho, com velocidades iguais ou maiores que os eixos do motor tradicional. Como mostram os gráficos a seguir:

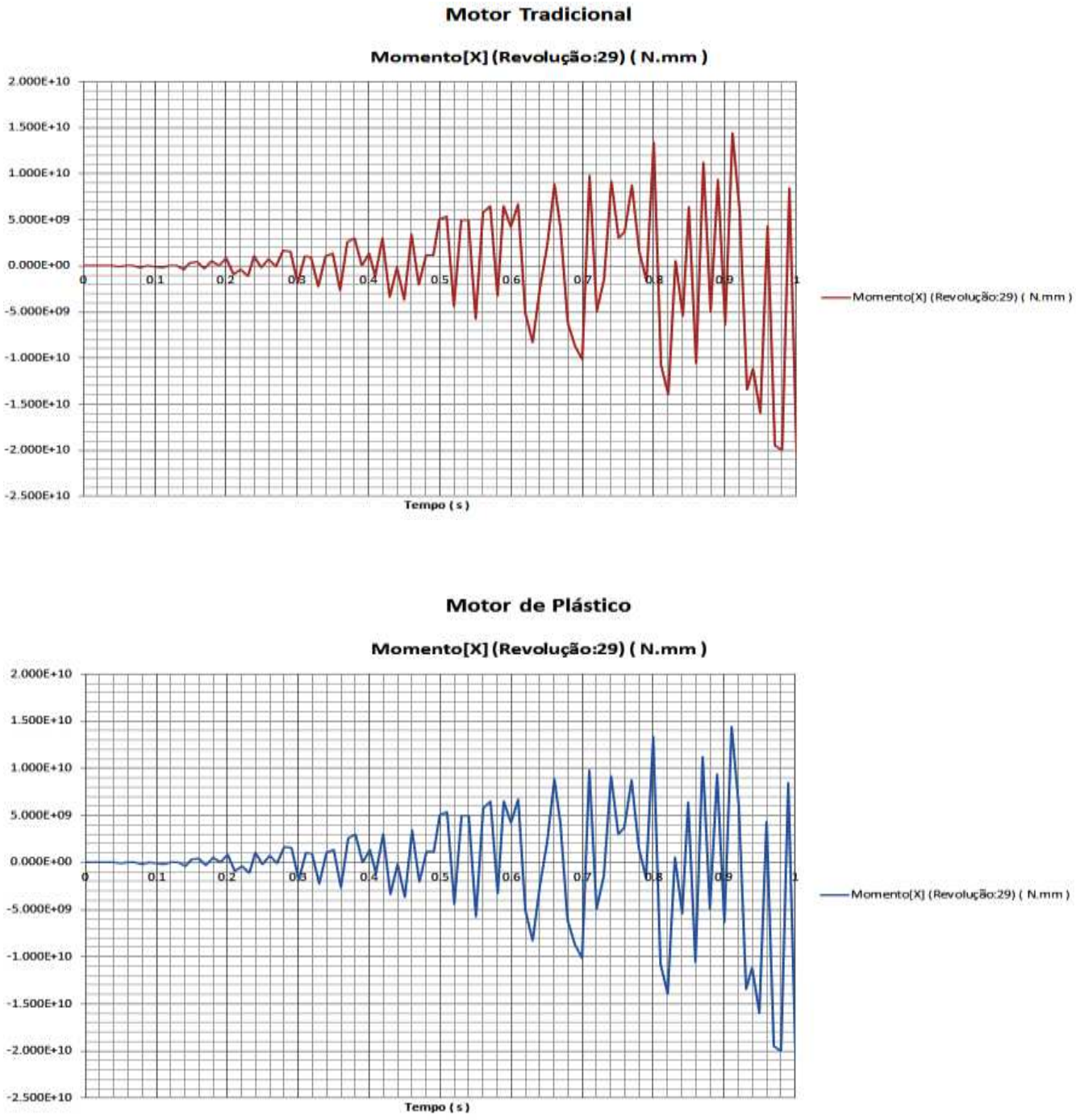
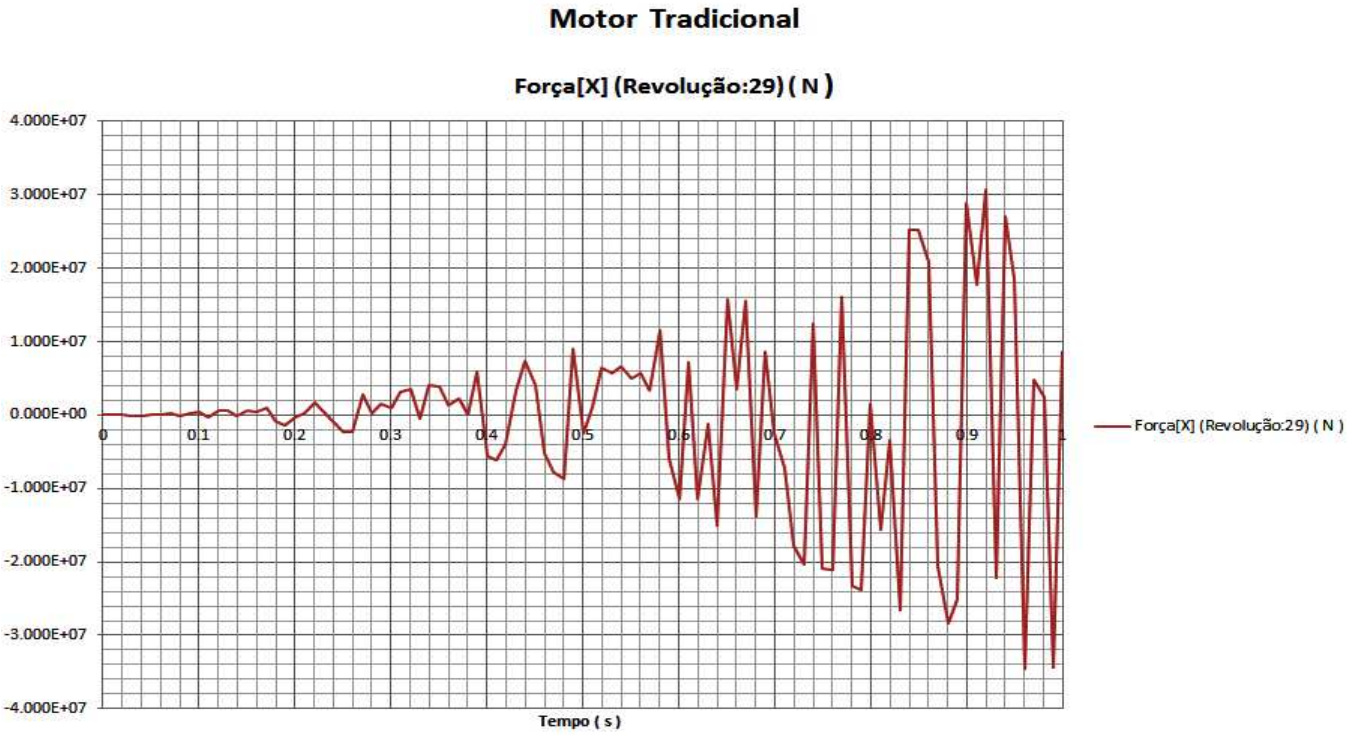


Gráfico 09: momentos na revolução 29 dos eixos dos motores.

Fonte: próprio autor.



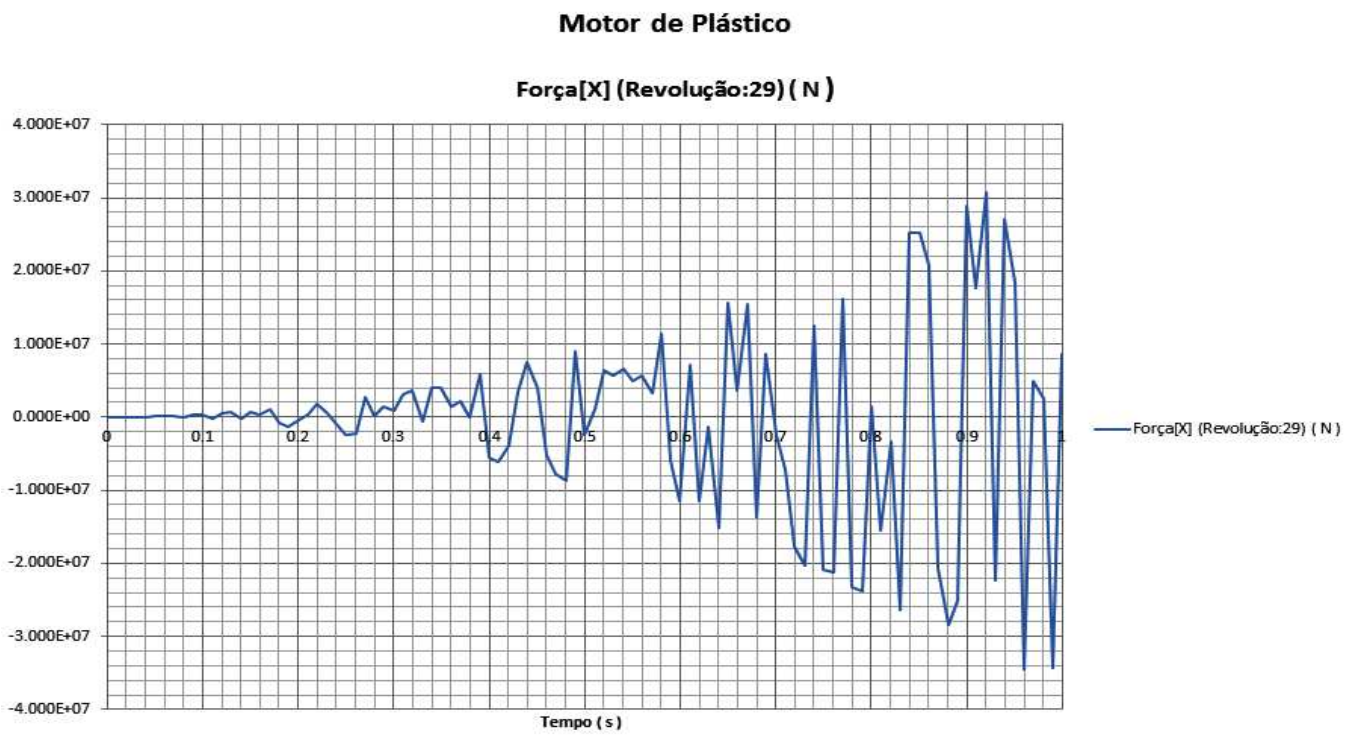


Gráfico 10: forças geradas na revolução 29 dos eixos dos motores.

Fonte: próprio autor .

7.5.2. Analise de Tensões Modais

- *Virabrequim*: as cargas neste foram geradas no vetor Y, onde foi posicionado a gravidade cujo o valor foi de 9810 mm/s^2 e nos eixos posicionados em X foi gerado um torque de 15906,4 N.mm. Sendo que as frequências modais paramétricas geradas foram:

Tabela 03: frequências modais do virabrequim

FREQUÊNCIAS MODAIS	VALOES EM HZ
F1	0.30
F2	0.35
F3	0.40
F4	0.45
F5	0.50
F6	0.55
F7	0.60
F8	0.65

Fonte: próprio autor

Na análise com F1 o eixo de plástico obteve ligeira desvantagem nos valores:

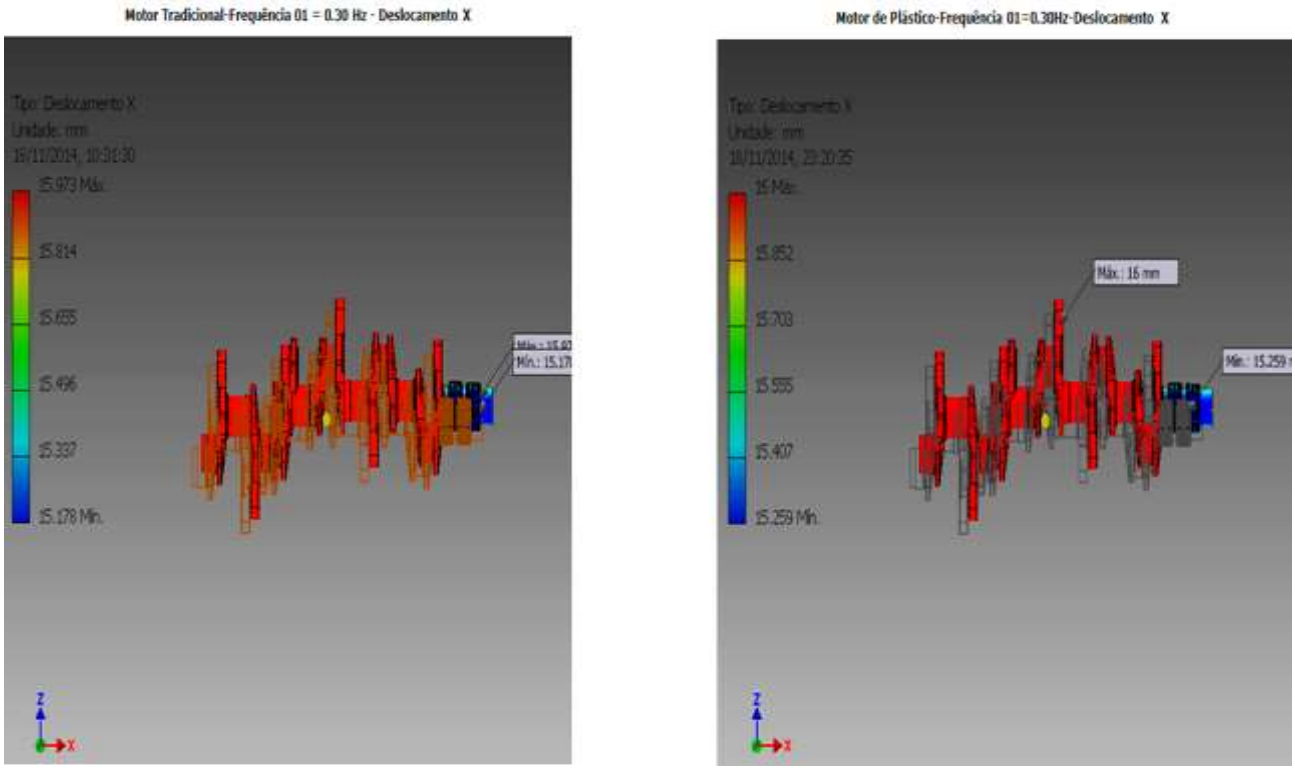


Figura 48: deslocamentos com F1 do virabrequim.

Fonte: próprio autor.

No eixo do vetor X a F2 causa deslocamentos com pontos mínimos vibratórios desiguais e deslocamentos vibratórios menores no eixo do motor tradicional. Como mostram as figuras a seguir:

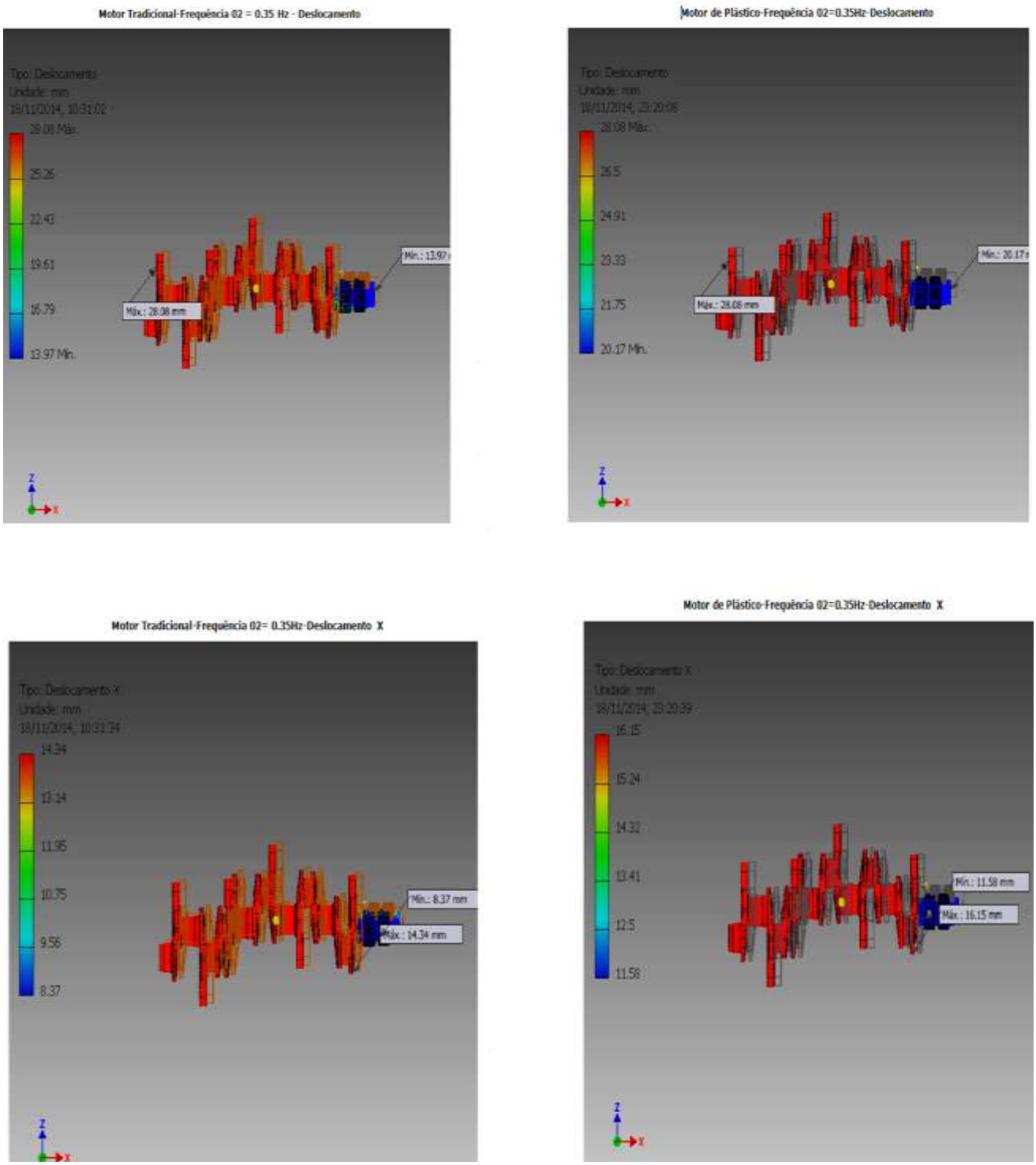


Figura 49: deslocamentos com F2 do virabrequim.

Fonte: próprio autor.

Com a frequência no modo 03 o eixo do motor de plástico só apresenta valores menores de deslocamentos, quando ocorridos nos eixos no sentido Y e Z :

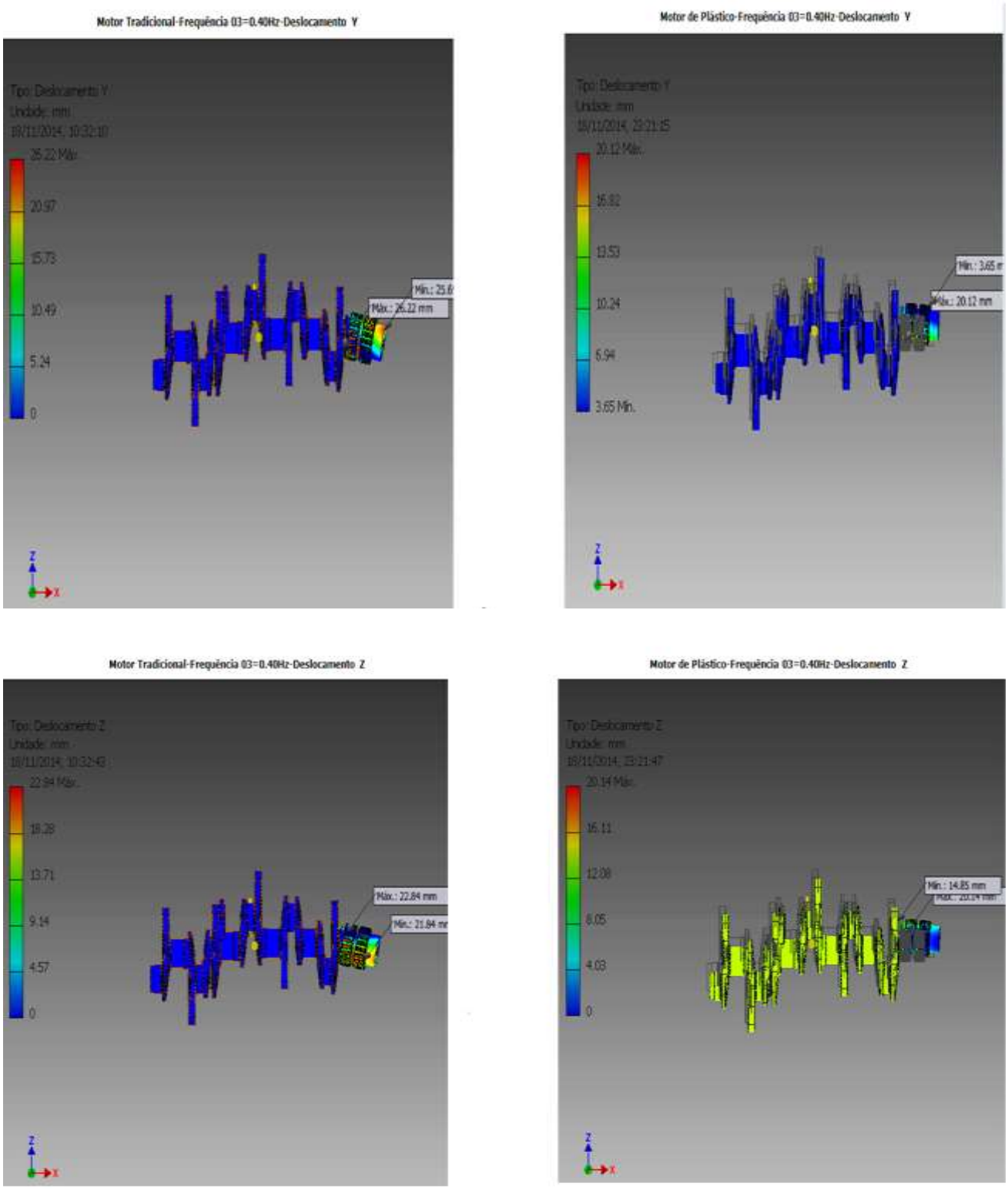


Figura 50: deslocamentos em F03 do virabrequim.

Fonte: próprio autor.

Com frequências medianas o eixo motor de plástico apresenta melhora na sua resistência quando comparado com o eixo do motor tradicional, que por sua vez apresenta valores desfavoráveis, principalmente no eixo principal do virabrequim :

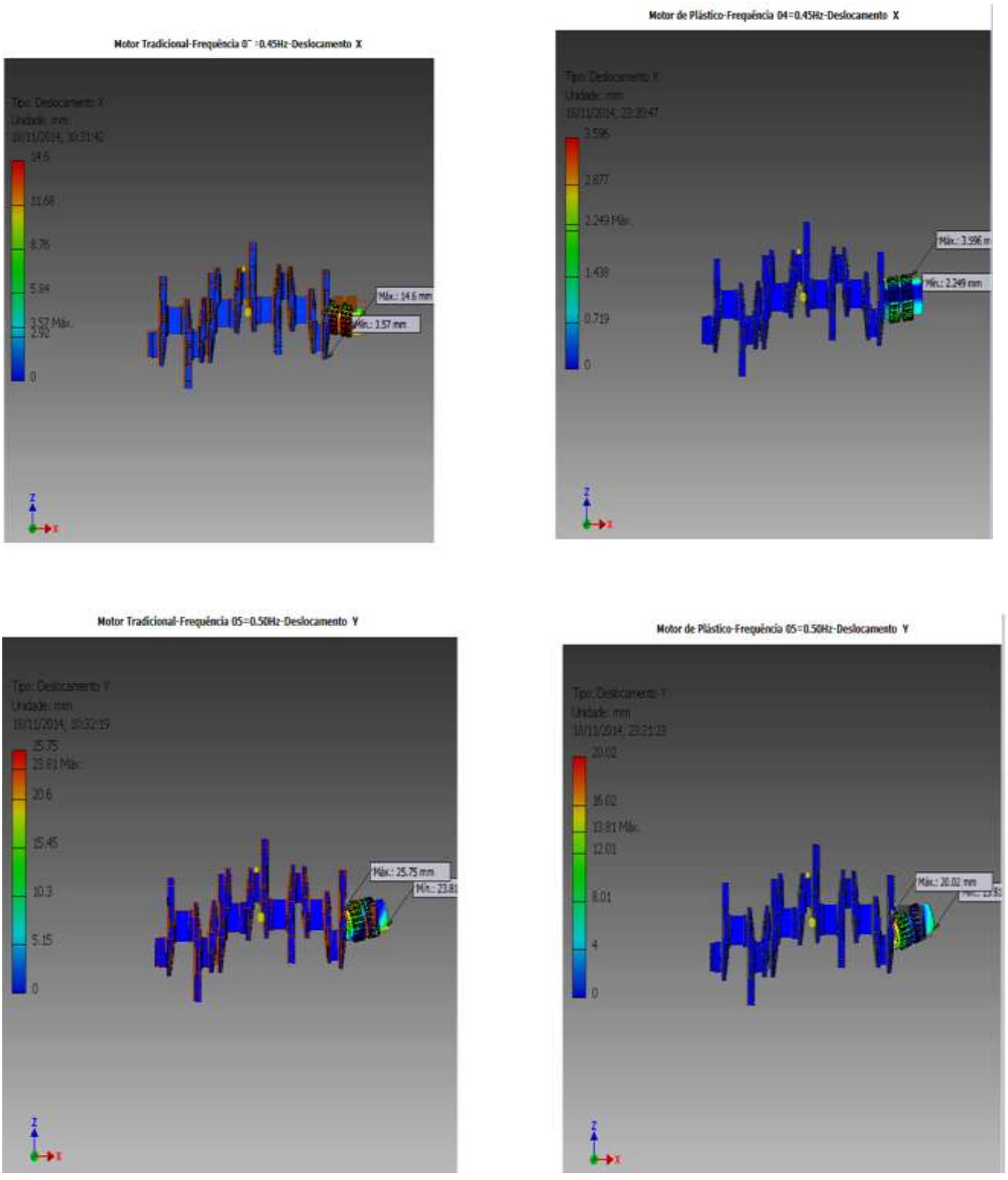


Figura 51: deslocamentos críticos em F04 e F05 do virabrequim.

Fonte: próprio autor.

Para vibrações maiores e contínuas, mesmo em um estado plano de tensões, o eixo do motor tradicional mostrou-se melhor ao longo do tempo do que o eixo do motor de plástico, caracterizando assim uma maior durabilidade de seus componentes .Como mostram as figuras a seguir:

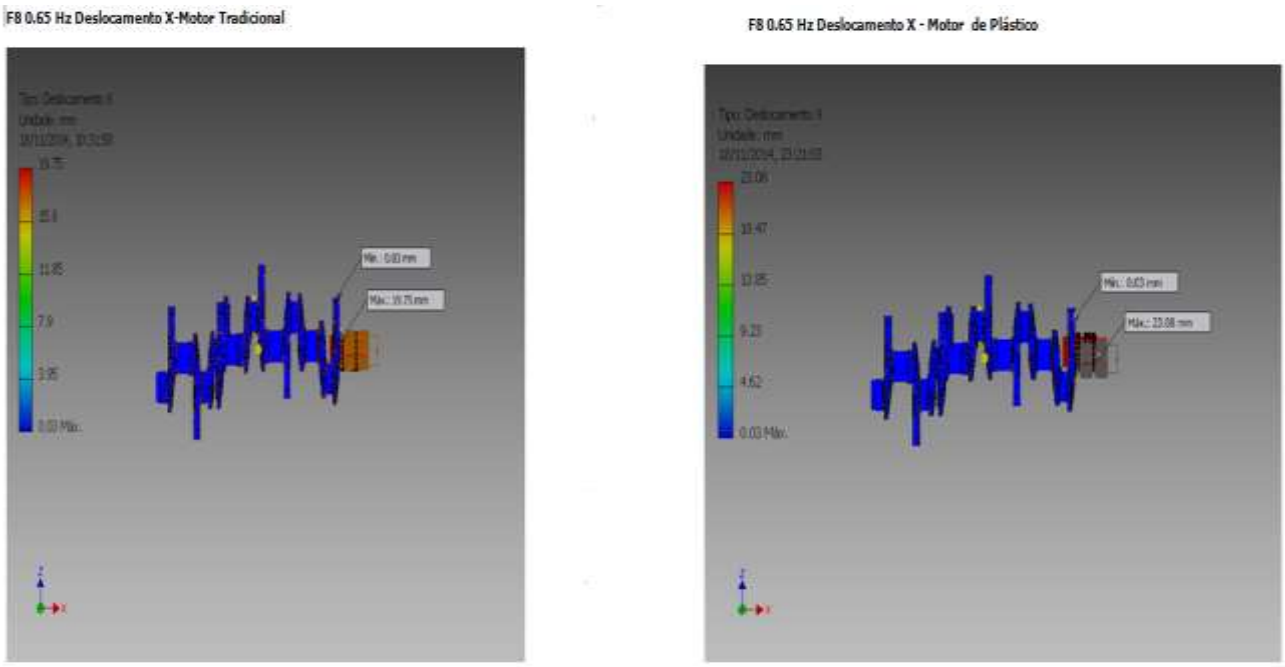


Figura 52: deslocamentos em F8 do virabrequim.

Fonte: próprio autor.

- *Eixo do Comando de Válvulas* : foram aplicados carga de rolamento no valor de 3N e Momento em X de 156906,4 N.mm. Os modos de frequência paramétricos gerados foram:

Tabela 04: frequências modais do eixo da arvore de cames

FREQUÊNCIAS MODAIS	VALOES EM HZ
F1	4.49
F2	4.53
F3	4.69
F4	4.99
F5	5.03
F6	5.29
F7	5.33
F8	5.49

Fonte: próprio autor.

Nas frequências iniciais o eixo de plástico possui valores modais menores:

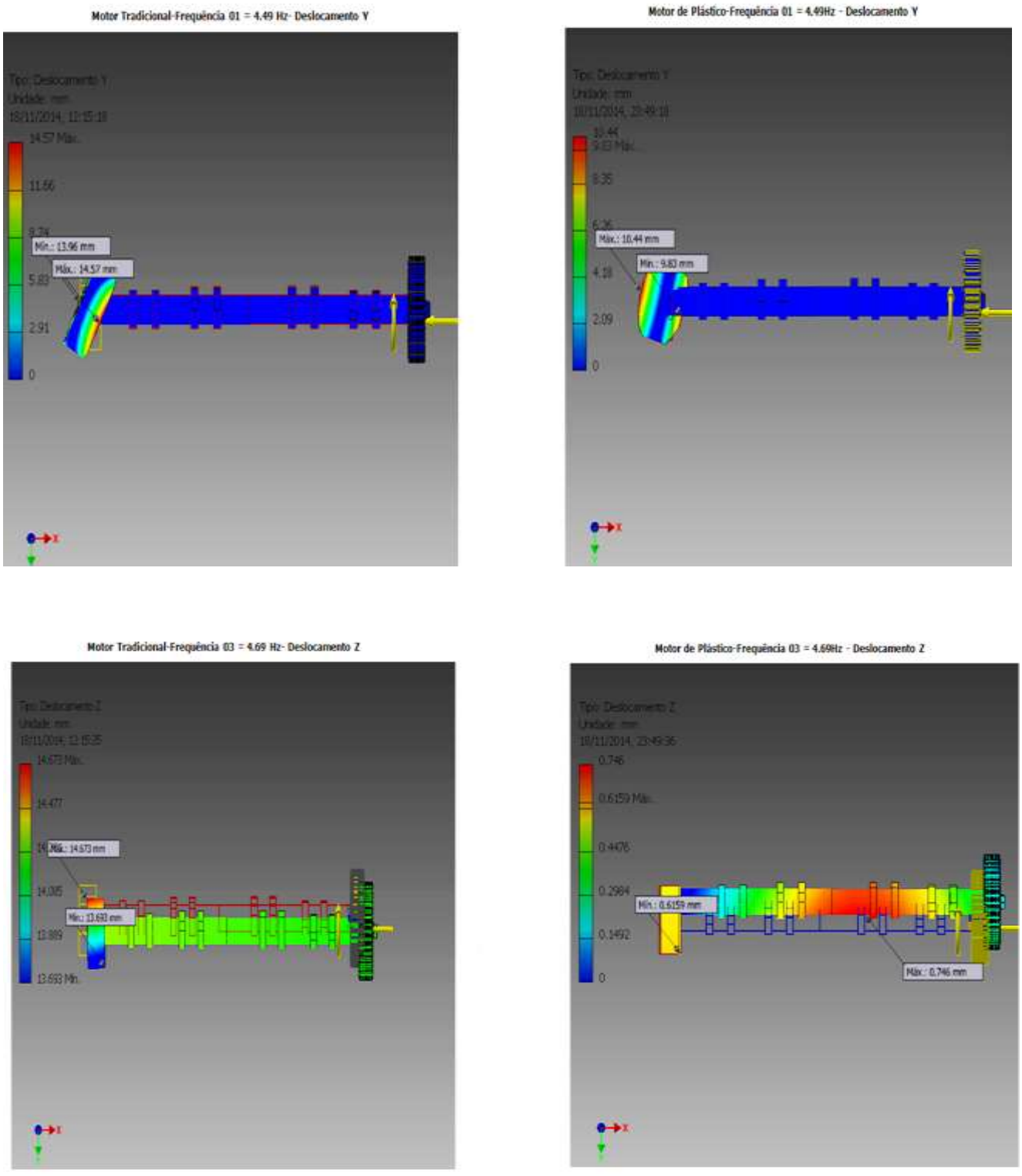


Figura 53: deslocamentos com F01 e F03 do eixo do comando de válvulas.

Fonte: próprio autor.

Ao longo do tempo os deslocamentos modais demonstram que os eixos do comando de válvulas com material tradicional suportam mais frequências modais ou vibrações do que os eixos do motor de plástico, como demonstra as imagens dos deslocamentos causados por F08 na direção Y e Z:

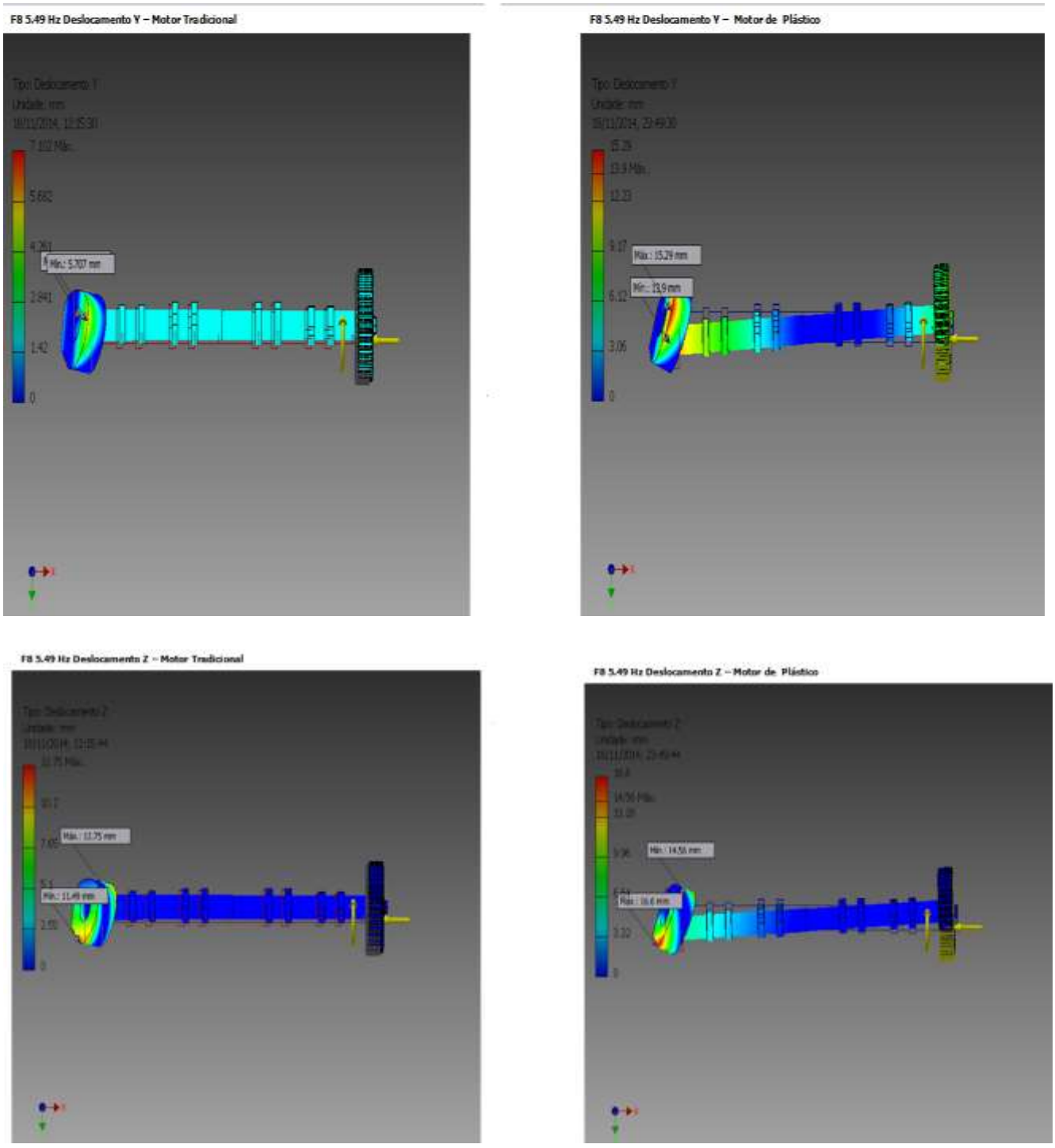


Figura 54: deslocamentos com F08 do eixo do comando de válvulas.

Fonte: próprio autor.

7.5.3. Analise de Tensão por Critério de Von Mises

- *Válvulas* : para a simulação foi gerado uma carga de pressão estática de 0.014 mPa e de força de -1N no vetor Z. As faces selecionadas foram:

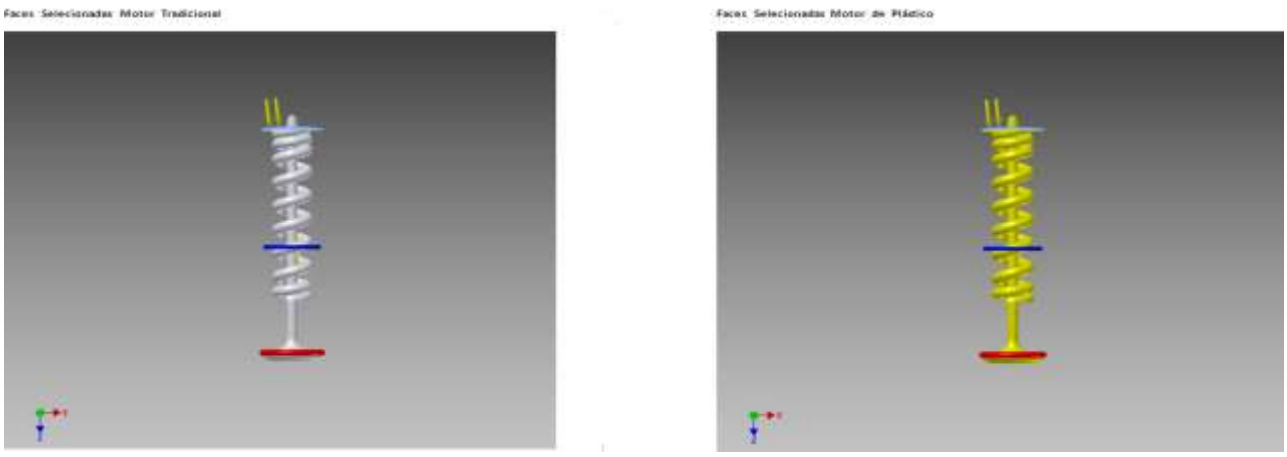


Figura 55: faces selecionadas das válvulas

Fonte: próprio autor

O aço de alta resistência e baixa liga do motor tradicional mostrou-se tão eficaz quanto o Náilon 6.6 da válvula de plástico. Como mostram as figuras a seguir:

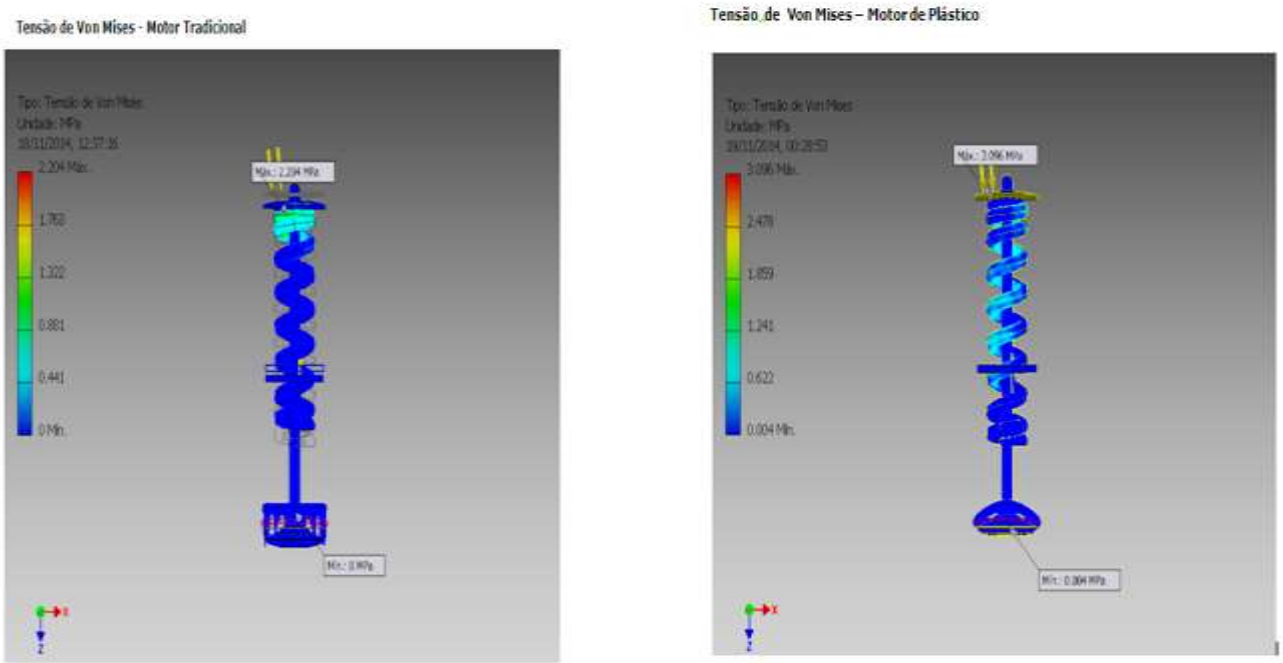


Figura 56: tensão de Von Mises das válvulas.

Fonte: próprio autor

A tensão máxima elástica (Primeira deformação principal) e a tensão máxima de compressão (Terceira tensão principal) são melhor suportadas na válvula tradicional. Como mostram as figuras abaixo:

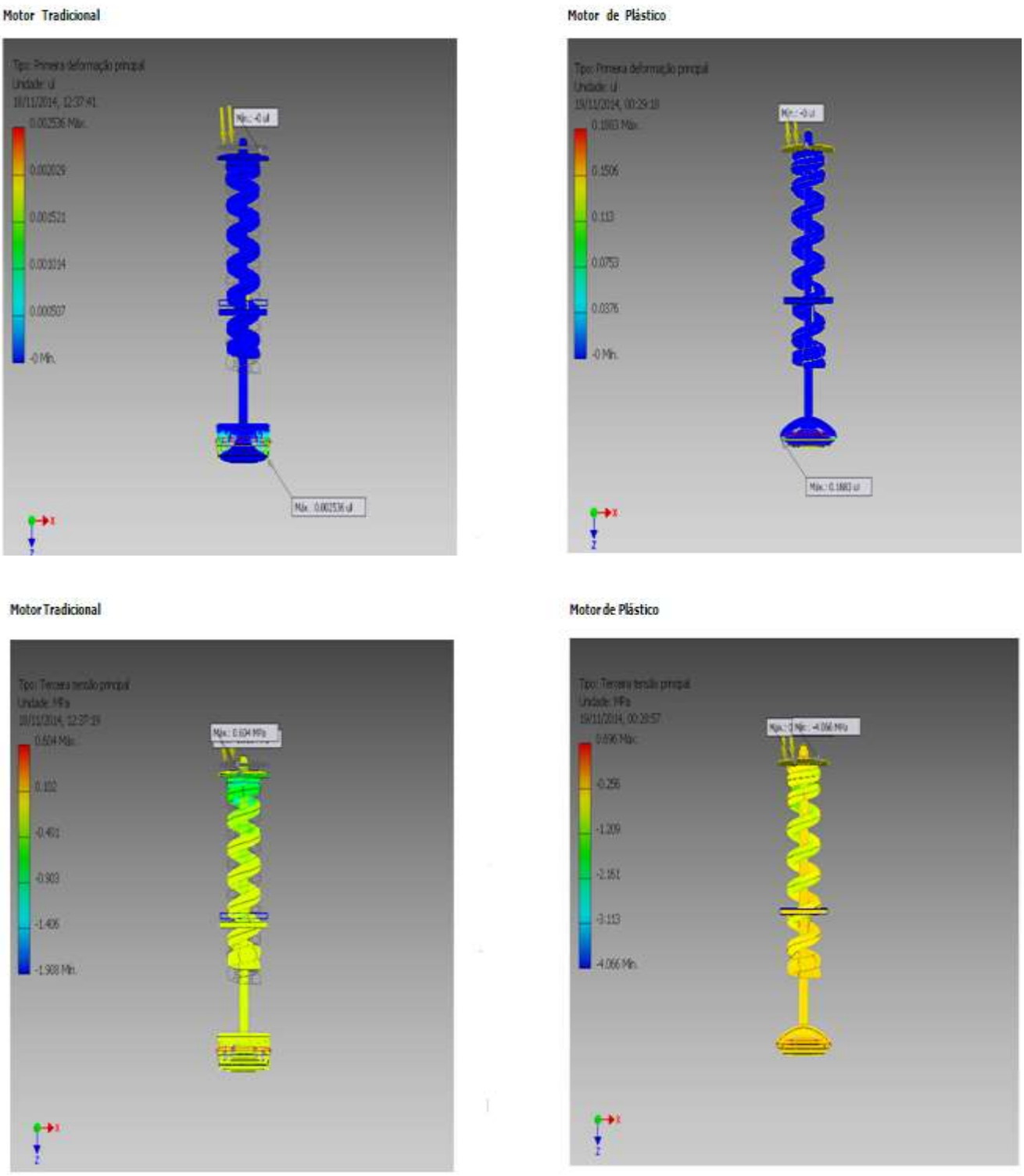


Figura 57: primeira e terceira tensões das válvulas.

Fonte: próprio autor.

Os deslocamentos são maiores na válvula de plástico, podendo ocasionar para esta uma vida mais breve em operação, como mostram as figuras:

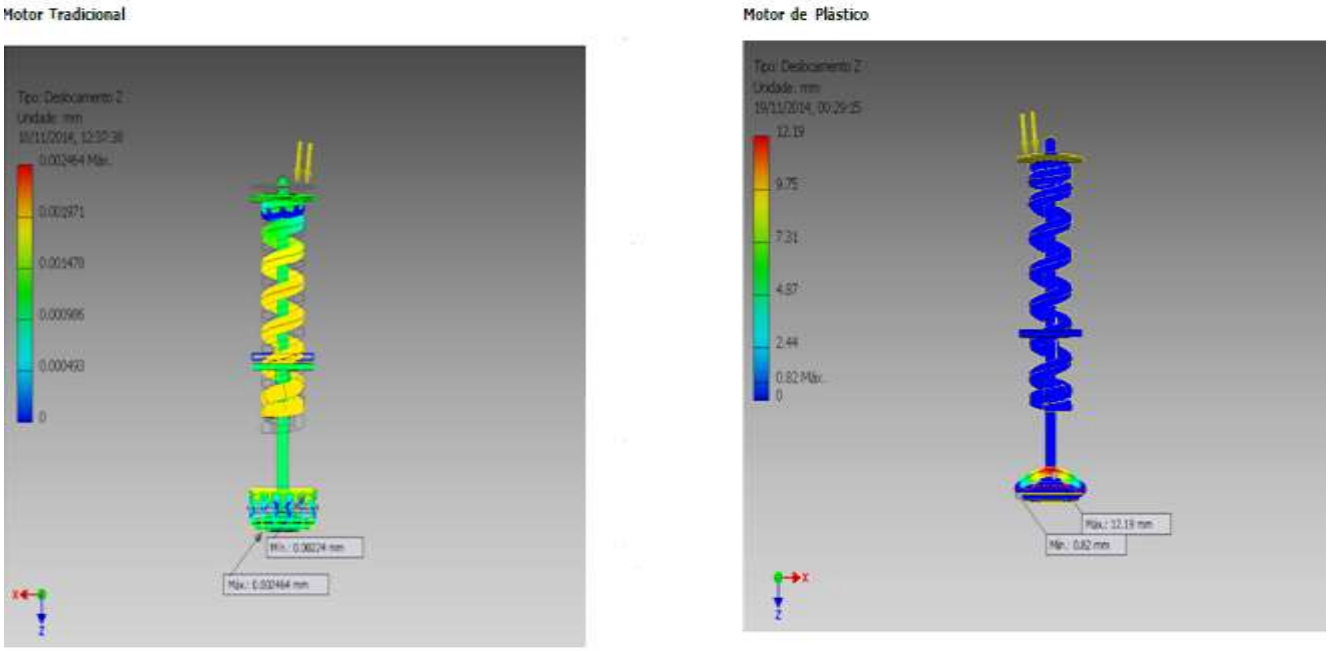


Figura 58: deslocamento Z por tensões nas válvulas.

Fonte: próprio autor.

- Biela e Pistão : Nesta modelagem montada foram gerados uma carga de pressão de 0.014 mPa e de - 3N de força no sentido do vetor Z. As faces selecionadas foram:

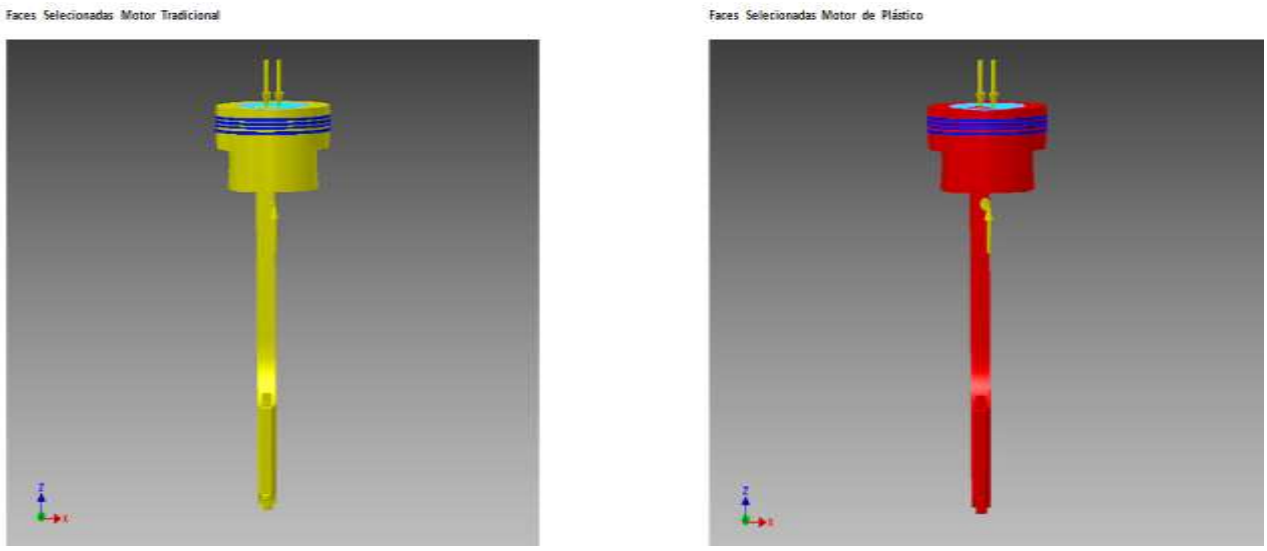


Figura 59: faces selecionadas das bielas e pistões.
Fonte: próprio autor.

A biela e o pistão feitos de alumínio 3105-H18 e de CFRP se equivalem em todos os parâmetros, como mostram as figuras:

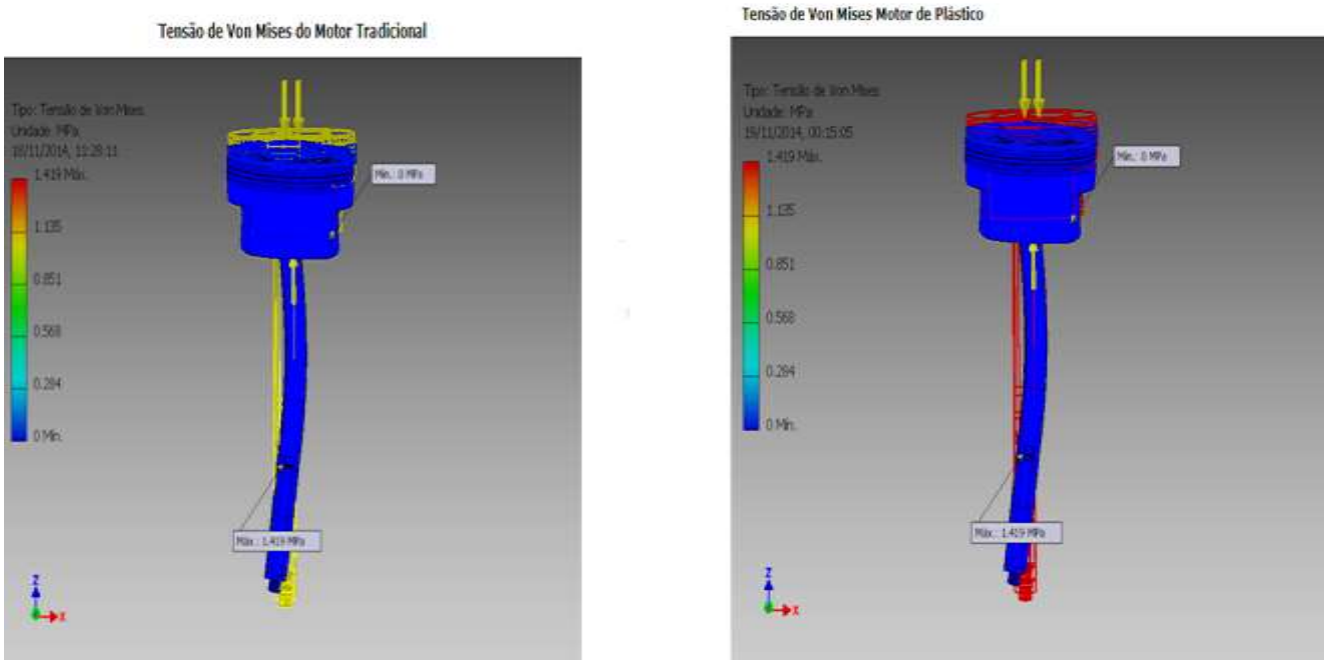


Figura 60: tensão de Von Mises nas bielas e pistões.
Fonte: próprio autor.

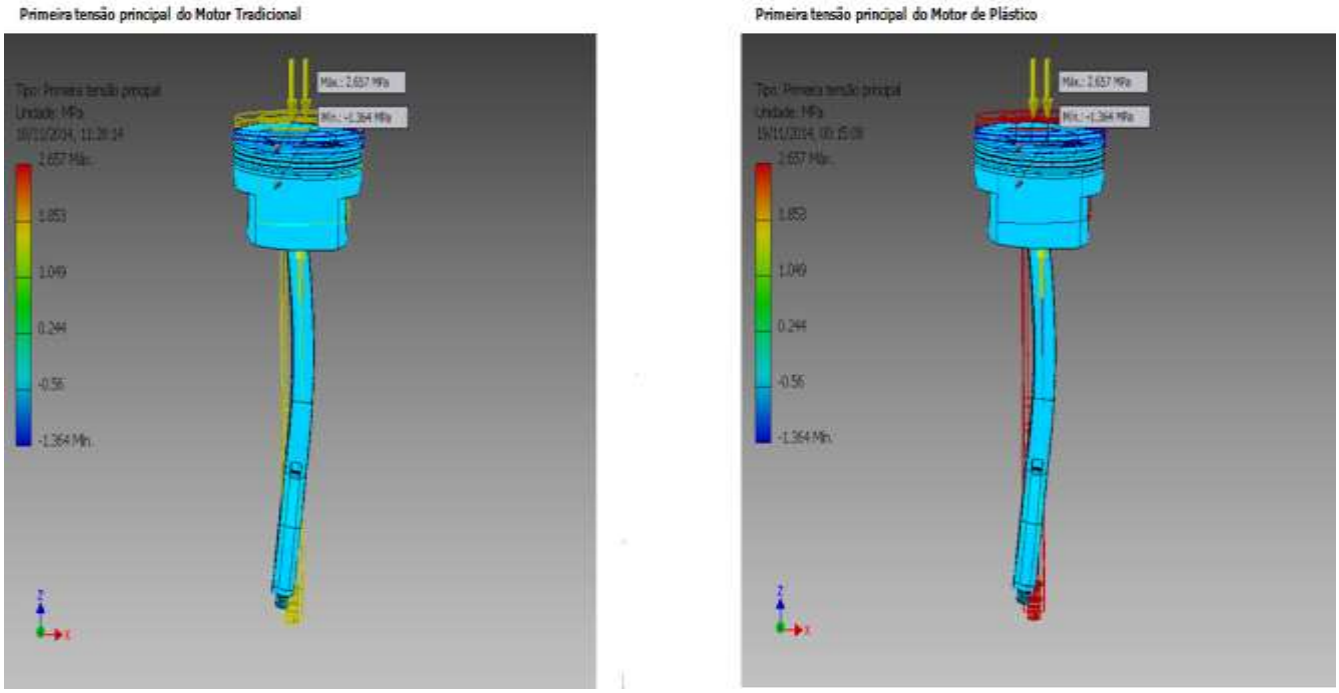


Figura 61: primeira tensão principal da biela e pistão.
Fonte: próprio autor.

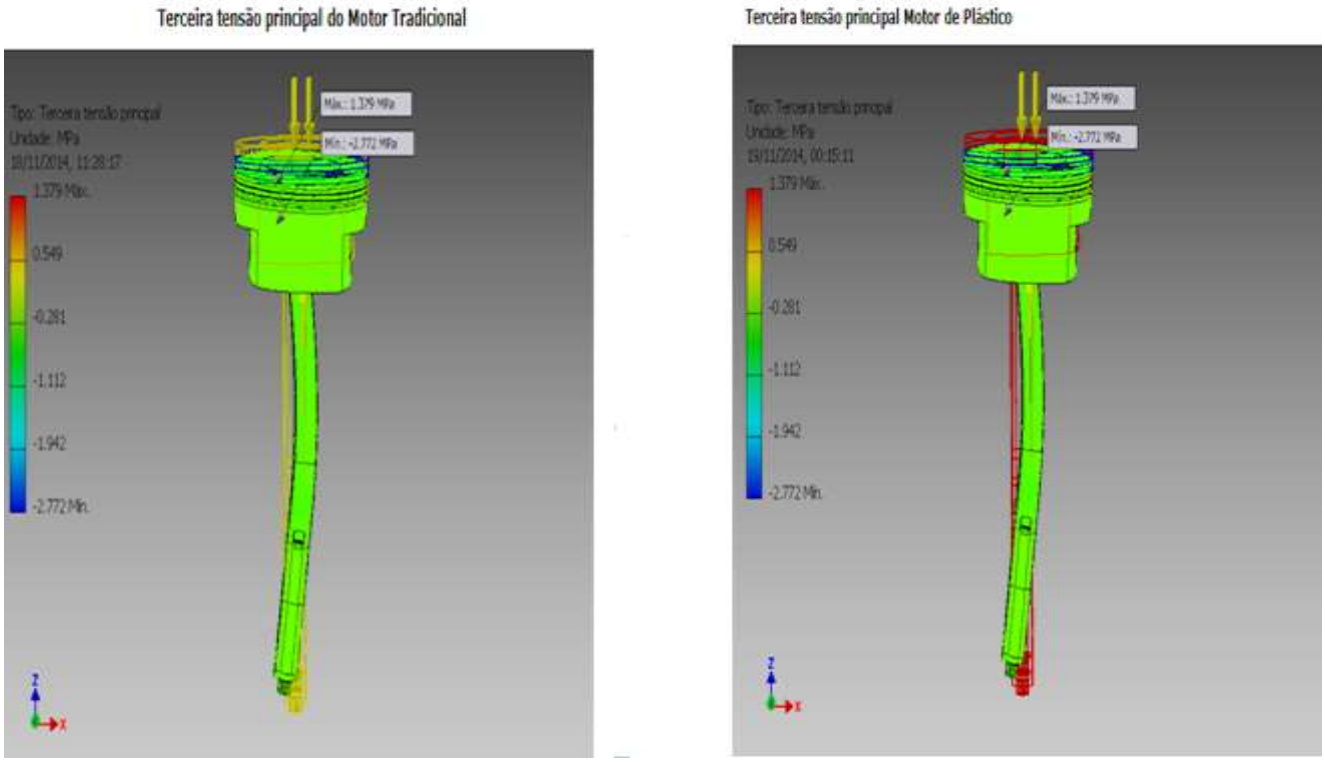


Figura 62: terceira tensão principal da biela e pistão.
Fonte: próprio autor.

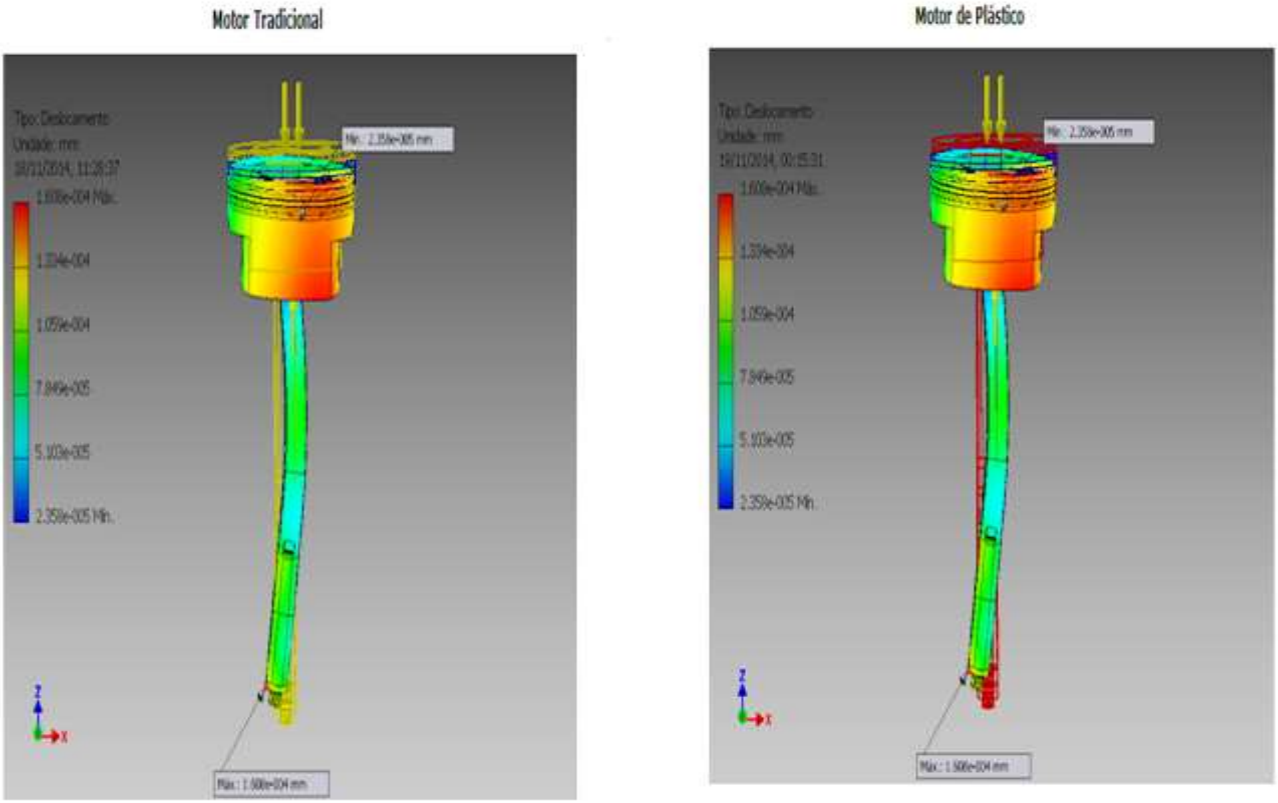


Figura 63: deslocamentos por tensões nas bielas e pistões.
Fonte: próprio autor.

Somente a biela e o pistão de plástico mostraram resultados satisfatórios, porém estes possuem uma temperatura de trabalho de até 110°C, por isso recomenda-se que o pistão tenha um envoltório protetor feito de alumínio ou aço carbono.

Em uma análise industrial somente a biela e o pistão de plástico, com envoltório protetor, avançariam nos testes onde posteriormente seriam gerados protótipos físicos, ocorrendo assim uma redução de custos no projeto com a não criação, desnecessária, de protótipos físicos de componentes como virabrequim, hastes e eixos de plástico, que falharam em simulações computacionais.

Entretanto as análises revelaram que os componentes com materiais polímeros não possuem um desempenho drástico, que impeça a continuidade de pesquisas semelhantes, que visam diminuir o peso e os custos de fabricação dos veículos de passeio, pois os materiais polímeros demonstraram possuir um bom desempenho com cargas medianas, porém para serem utilizados de forma mais abrangente e segura nos veículos de passeio, precisam ter uma durabilidade maior.

O uso de envoltórios protetores ou outras técnicas de fabricação que combinem PRFV, CFRP e Náilon 6.6, podem ser alternativas que futuramente possam vir a melhorar a eficácia destes materiais, fazendo assim com que estes possam ser seguros, quando utilizados em partes do motor que exijam uma carga de trabalho maior ao longo do tempo.

8. CONCLUSÕES

As análises realizadas demonstraram que mesmo em computadores pessoais de pequeno porte, podemos realizar uma série de testes simulados, que elucidam uma série de características importantes para o êxito dos projetos industriais. Sendo assim a disseminação das técnicas de CAD com o auxílio de simuladores, poderiam representar para o aprendizado de diversos profissionais uma constante e versátil fonte de apoio à sua inovação, pois as ferramentas CAD ajudam a desenvolver a criatividade e os simuladores determinam, em análises computacionais, o quanto estes inventos criativos podem alcançar em termos de resultados práticos, pois nem toda ideia é viável ou segura de ser produzida.

A busca de novas formas e procedimentos serão sempre essenciais para as empresas que desejam se manter na vanguarda tecnológica, desde que estas inovações gerem custos de desenvolvimento e produção menores, por isso o uso de simuladores ajuda não tão somente a gerar novos conceitos inovadores, mas ajudam também a prevermos o quanto tais inovações gerarão impactos positivos ou negativos para a indústria, gerando economia nos gastos com protótipos físicos e ao mesmo tempo as ferramentas de simulação computacional geram uma grande variedade de possibilidades e novos produtos, que sem estas ferramentas de simulação demorariam vários anos sendo pesquisados, para depois, talvez poderem ser produzidos.

REFERÊNCIAS

ABERDEEN GROUP. **Projetos industriais simulados**. Página disponibiliza dados e pesquisas no mercado americano sobre atividades industriais. Disponível em:<https://www.advancedsolutionsonline.com/pdf/wp_sim_CostSavingStrategies.pdf><http://www.cadgroup.com.au/Data/Attachments/Aberdeen%20Group_Complementary%20Digital%20and%20Physical%20Prototyping%20Strategies.pdf><.http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/whitepaper/-WP-Impact-of-Strategic-Simulation-on-Product-Profitability.pdf>. Acesso em: 27 Set. 2014.

AIRBUS. **Turbinas Aeronáuticas**. Página possui informações sobre simulações do A380.2011.Disponível em: <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family/>. Acesso em: 27 Set. 2014.

ANSYS. **Manuals Ansys**: analysis procedures, theory e elements. 12. ed. Pittsburgh: Ansys Inc, 2009.

ASSAN, A.E. **Método dos Elementos Finitos**. 2. ed. Campinas: Apostilas UNICAMP, 2003.

AUTOBLOG. **Renderizações**. Página possui fotos 3D de arquivos do Solidworks. Disponível em:<http://www.autoblog.com/photos/hennessey-venom-gt/>. Acesso em: 20 Out. 2014.

AZEVEDO, Álvaro F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 1. ed. Porto: Faculdade de Engenharia do Porto. Disponível em :< http:// www.fe.up.pt/~alvaro> .Acesso em: 18 Ago. 2014.

BATHE, K. J. **FEA: Finite Element Procedures**. New Jersey: Prestice Hall, 2007.

BRAN, R. & De Souza, Z. **Máquinas de Fluxo**. Curitiba: LTC, 1980.

BENNETT,C.O.; MYERS, J.E**. Fenômenos de Transporte**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill Ltda, 1978.

CADWARE INDÚSTRIA. **Manufatura Digital**. Revista disponibiliza artigos sobre novas tecnologias industriais. 30. ed. São Paulo: Cadware technology editora, 2013.

CARBODY DESIGN. **Realidade Virtual Ford**. Página disponibiliza artigo sobre evoluções tecnológicas. Disponível em: http://www.carbodydesign.com/2013/05/ virtual-reality-at-ford-3d-glasses-virtual-projections-and-3d-printing/>. Acesso em: 23 Set. 2014.

CARROCERIA BLOGSPOT. **Renderizações**. Página possui arquivos CAD 3D do Solidworks. Disponível em:<//carroceria.blogspot.com.br/2013_05_05_archive.html>. Acesso em: 23 Out. 2014.

COSTA, PAULO G. **A Bíblia do Carro**. 3. ed. Apostila, 2002. Disponível em: <http://www.rastrum.com.br/dir_smb/manuais/automotivos/Mecanica%20Automotiva. PDF>. Acesso em: 19 Ago. 2014.

CUNHA, José da et al. **Computação gráfica e suas aplicações em CAD**. São Paulo: Atlas, 1987.

DESKENG. **Renderização Airbus 380**. Página possui detalhes sobre simulações PTC. Disponível em:< http://www.deskeng.com/de/simulation-visualization-confronts-the-digital-data-monster/>. Acesso: 03 Nov. 2014.

DETALHES EDUCAÇÃO. **Realidade Aumentada**. Página possui artigos sobre novas tecnologias. Disponível em: < http://www.detalheseducacao.com.br/blog/cate gory/ realidade-aumentada-2/>. Acesso em: 13 Set. 2014.

DONATELLI, J. L. **Otimização estrutural e paramétrica de sistemas de cogeração utilizando superestruturas**. Tese (Doutorado) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

DUPONT, P. **Virtual reality today**: computer bulletin, 1996. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-530X1998000200002&script=sci_arttext>. Acesso em: 13 Out. 2014..

ENGENHARIA CIVIL. **Impressora 3D civil**. Página disponibiliza artigos sobre informações sobre novas tecnologias. Disponível em: <http://www.engenhariacivil .com/impressora-3d-constroi-casas>. Acesso em: 20 Out. 2014.

FERREIRA, R. C. **Uso do CAD 3D na Compatibilização Espacial em Projetos de Produção de Vedações Verticais em Edificações**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

FISCHLER, E. **A aplicação de Simulação no Processo de Desenvolvimento de Produtos na Indústria Automobilística**. Tese de Mestrado. 132p. São Paulo: USP, 2005.

FLOYD, C. A.; BUDDE, R.; KUHLENKAMP, K.; ZULLIGOHOVEN,H. **Systematic Look at Prototyping**. 12-20 pp. Approaches to Prototyping. Berlim: Springer, 1984.

FORTI, F. S. D. **Uma Avaliação do Ensino da Prototipagem Virtual nas Graduações de Design de Produto do Estado do Rio de Janeiro**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2005.

FOX, Robert W. ; MCDONALD, Alan T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos S.A, 2001.

GGN. **Prótese 3D**. Página de notícias disponibilizou artigo sobre impressão 3D de placas ortopédicas. Disponível em:< http://jornalggn.com.br/noticia/clipping-do-dia-315>. Acesso: 14 Nov. 2014.

GIZEM, O. **Utilization of CFD Tools in the Design Process of a Francis Turbine**: A Thesis submitted to The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Turkey.2010. Disponível em:< http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12612452/index.pdf>. Acesso em: 13 Out. 2014.

GROOVER, M.P.; Zimers E. W. Jr. **CAD/CAM Computer Aided Design and Manufacturing**. New Jersey: Prentice-Hall, 1984.

GROOVER M.P.; Weis M.; Nagel R. N.; Odrey N.G. **Industrial Robotics Technology**: programming and applications. New York: McGraw-Hill, 1986.

HIBBELER, Russel Charles. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

INOVA BRASIL. **Investimentos da Petrobras**. Página possui artigos sobre as tecnologias de extração de petróleo. Disponível em: < http://inovabrasil.bblogspot.com.br/2010/07/petrobras-e-inmetro-inaugurados.html> .Acesso em: 25 Out. 2014.

ITAIPU BINACIONAL. **Instalações hidrelétricas**. Página possui informações sobre as características da usina. 2012. Disponível em: <www.itaipu.gov.br>. Acesso em: 14 Out. 2014.

JAIBANA EDU. **Rotores de turbinas**. Página disponibiliza visualizações de vários tipos de máquinas. Disponível em: <http://jaibana.udea.edu.co/grupos/centrales/ingles%20imagenes%20turbinas.html>. Acesso em: 14 Out. 2014.

JALURIA, Y**. Design and optimization of thermal systems**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1998.

JET ENGINE. **Elementos de uma turbina a gás**. Página possui artigos sobre as características das turbinas. Disponível em: <http://Jet_engine_spanish.svg/800px-Jet_engine_spanish.svg.png>. Acesso em: 25 Out. 2014.

LIMA, Jorge Claúdio Cavalcante de Oliveira; PINTO, Marco Aurélio Cabral; MIGON, Marcio Nobre; MONTORO, Guilherme Castanho Franco. **A Cadeia Aeronáutica Brasileira e o Desafio da Inovação**. 1. ed. Rio de Janeiro: Projeto de Pesquisa da UERJ/BNDES, 2005.

LUCINDA, Claúdio Ribeiro. **Relatório sobre a Indústria Aeronáutica EBC**- Núcleo de Estudos de Economias de Baixo Carbono. 2. ed. Ribeirão Preto: Projeto de Pesquisa FUNDACE- BNDES, 2012.

MALCEVIC, Ivan; GHATTAS, Omar. **Dynamics Mesh Finite Element Method for Lagrange Computacional Fluid Dynamics**. Amsterdan: Springer – Verlag, 2002.

MACINTYRE, J. A. **Máquinas Motrizes Hidráulicas**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A, 1983.

MARTIN, Ana Cristina Mongelli; CARVALHO, Marly Monteiro. **Os Benefícios e as Restrinções do Uso de Simulação Virtual no Processo de Desenvolvimento de Produtos**. Artigo e pesquisa. Florianópolis: Encontro Nacional de Engenheiros de Produção- ENEGEP-XXIV, 2004.

MATTINGLY, J. D. ; W. H. ; Pratt, D. T. **Aircraft Engine Design**. 2. ed. AIAA Education Series. pp. 38-71,2002. Disponível em :< http://arc.aiaa.org/series/4.es>. Acesso em: 13 Out. 2014.

MENTER, Florian R. **Review of the Shear-Stress transport turbulence model experience from industrial perspective**. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2009. Disponível em: < http://www.tandfonline.com/toc/gcfd20 /current>. Acesso em: 19 Out 2014.

MICHELS, A. **Proposta de Modelo de Aproveitamento Hidroenergético em Pequena Bacia**: sujeito a condicionantes ambientais e de uso múltiplo da água. Tese (Doutorado). UFRGS. Porto Alegre, 1999.

MILBURN, T. J. **The New Product Development Paradigm Led by Simulation and Testing**. SAE Commercial Vehicle Engineering Congress and Exhibition, Chicago, Illinois, Outubro de 2004. SAE Technical Paper Series nº 2004-01-2667.

MODEL BENDERS. **Simulações militares**. Página possui artigo sobre a evolução das simulações, 2008. Disponível em: <http://www.modelbenders.com/papers/RSmith_IITSEC10_Surgical_Simulation.pdf>. Acesso em: 14 Out. 2014.

MUNDOAERO. **Simuladores de Voo Embraer**. Página possui artigos sobre o desenvolvimento tecnológico na engenharia aeronautica. Disponível em: < http://www.mundoaero.blogspot.com.br/2010/08/simulador-de-voo-do-phenom-300>. Acesso em: 20 Out. 2014.

MUNDOGEO. **Centro de Pesquisas da Petrobras**. Página disponibiliza reportagem sobre os avanços tecnológicos do CENPES. Disponível em : < http://mundogeo.com/blog/2012/07/12/centro-de-pesquisas-da-petrobras-investe-em-alta-tecnologia/ > . Acesso em: 13 Set. 2014.

MURPHY, S.P. ; PERERA, T. **Successes and failures in UK/US development of simulation. Simulation Practice and Theory**. Artigo n. 9, 2002.

NAO-QUESTIONE. **Sistemas do túnel de vento**. Página disponibiliza informações culturais e cientificas. Disponível em:<http://nao-questione.blogspot.com.br/2013/12/digite-um-tunel-de-vento-monstro-usado.html. Acesso em: 23 Out. 2014.

NICODEMOS, R. M. **Introdução aos simuladores de processos**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 29 f. 2011. Projeto Auxiliado por Computador de Processos do Programa de Pós Graduação em Engenharia Química na

Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <http://www.slideshare.net/giselerabelo/processo-industrial-de-extra o- dos-leos-do-fruto-da-macaba>. Acesso em: 10 Set. 2014.

NUNTIUSTEC. **Caverna digital**. Página possui artigo sobre inovações tecnológicas. Disponível em: <http://www.nuntiustec.com.br/realidadevirtual.html>. Acesso em: 27 Set. 2014.

OLIVEIRA, J. H. A. **Avaliação das Mudanças Ocorridas no Desenvolvimento de Produtos Devidas à Utilização de Modelos Produzidos por Prototipagem Rápida**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica-Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

OTOSSON, S. **Virtual Reality in the Product Development Process**. Journal of Engineering Design, v. 13, n. 2, p. 159-172 , 2002.

PCE ENGENHARIA LTDA. **Potencial Hidrelétrico**. Página dispõe de informações sobre centrais elétricas. Disponível em:<http://www.pce.com.br/intro_fea.html/>. Acesso em: 27 Set. 2014.

PETROBRAS-MAGAZINE. **Inovações tecnológicas em perfuração**. Página disponibiliza reportagens sobre as atividades da empresa na extração de petróleo. Disponível em: <http://www.revista.petrobras.com.br/revistapetrobras/files/pdfs/Mate ria%20de%20Capa.pdf><http://www.petrobras.com/pt/magazine/files/Materia%20de %20Capa>. Acesso: 27 Set. 2014.

PINHO, A. C.; FREITAS, U. C.; TRAMONTANO, M. **A Modelagem Digital Aplicada ao Processo de Projeto de Edifícios de Apartamentos**. Artigo. Workshop Brasileiro de Gestão do Processo de Projeto na Construção de Edifícios. 3. Belo Horizonte: Anais, 2003.

POULOS, H.G. **Simulation of the Performance and Remediation of Imperfect Pile Groups**. Deep Foundations on Bored and Auger Piles – Van Impe & Van Impe. London: Taylor & Francis Group, 2009, pp. 143 - 159.

REED-HILL, Robert E. ; ABBASCHIAN, Reza. **Physical Metallurgy Principles**. 3. ed. New York: Litton Company, 1992.

REDDY, J. N. **An Introduction to the Finite Element Method**. 3. ed. New York: McGraw–Hill, 2006.

REHG, James A. **Computer integrated manufacturing**. New Jersey : Prentice Hall, 1994.

RENAULT SYMBOL. **Fichas técnicas .** Página fornece informações sobre veículos. 2013. Disponível em: <http: //imprensa.renault.com.br/page/fichas/ficha-symbol> Acesso em: 22 Set. 2014.

RENDER. **Tutoriais sobre Modelagem 3D**. Página dispõe de exemplos de como criar modelagens. Disponível em: <http://www.render.com.br> . Acesso em: 18 Set. 2014.

REASONABLE POWER. **Calculo de Turbinas Eólicas**. Página dispõe de dados sobre o ação do vento e fórmulas. 2008. Disponível em: < http://www.reasonable power.com/nice_to_know/an_introduction_to_wind_loads.htm>.Acesso: 25 Set. 2014.

ROLLS ROYCE. **Turbofan 900**. Página possui informações sobre turbinas aeronáuticas. 2013. Disponível em:<http://www.rolls-royce.com/civil/products/largeaircr aft/trent_900/>.Acesso em: 27 Set. 2014.

SARRATE, I. L.;ALBRECHT, K. **Motores Hidráulicos**: La Escuela del Técnico Mecânico. Barcelona: Labor S. A. 1951.

SILVA, Emílio Carlos Nelli. **Máquinas de Fluxo**. Apostila. Escola Politécnica-USP .DEMEC, 2010. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2481/Aula01-Int.pdf>. Acesso em: 12 Set. 2014.

SOUZA, Adriano Fagali de; ULBRICH, Cristiane Brasil Lima. **Engenharia Integrada por Computador e Sistemas CAD/CAM/CNC**: Princípios e Aplicações. São Paulo: Artliber, 2009.

STOECKER, W. F. **Design of thermal systems**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1989.

TUBINO, Dalvio Ferrari. **Planejamento e Controle da Produção-Teoria e Prática**. 2. ed.. São Paulo: Atlas, 2009.

UDESC-SC. **Caverna Digital da Ford**. Página possui artigos sobre novidades no setor fabril e educacional. Disponível em: <http://www2.joinville.udesc.br/~larva /dvqi/dcc6gap/historico.html>. Acesso em: 27 Set. 2014.

ULRICH, K.T.; EPPINGER,S.D. **Product Design and Development**. 2. ed. Londres: McGraw-Hill, 2000.

VOITH. **Características das Turbinas Francis**. Página possui detalhes sobre o desempenho das turbinas. 2013.Disponível em: <www.voith.com./br/produtose_/turb inas/ turbinas-francis-561.html>. Acesso: 20 Out. 2014.

XU, Hong. **Concept and Concurrent Analysis and Optimization in a Product Design and Development Process**: International Truck & BusMeeting & Exposition. Indiana: SAE Technical Paper Series nº 982808, 1998.

ZAGONEL, Evaldo. **Implantação do fluxo unitário de peças numa célula de usinagem**: estudo de caso por meio de simulação. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Curitiba: UFPR, 2006.

ZORRIASSATINE, F. ; WYKES, C.; PARKIN, R.; GINDY, N. **A survey of virtual prototyping techniques for mechanical product development**. London: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2003.