

ANÁLISE ESTRUTURAL DO ROTOR DE UM TURBOGERADOR DE ALTA ROTAÇÃO

Bento, R. T.⁽¹⁾; Ferrus Filho, A.⁽¹⁾.

Rua Emílio Ribas, nº 91, 09185-380 – Vl. Apiaí – Santo André – SP
rodrigo.tbento@usp.br

⁽¹⁾FTT – Faculdade de Tecnologia Termomecânica

RESUMO

O aproveitamento de recursos térmicos para a geração de energia, transporte e realização de tarefas cotidianas sempre foi tido como útil para o homem. Contudo, devido à preocupação em relação à dependência energética brasileira, concentrada nos recursos hídricos, fontes alternativas de geração de energia são cada vez mais estudadas. Desta necessidade, este projeto visa, através do modelamento de um turbogerador, realizar a análise estrutural do rotor do componente citado, empregando-se o Método de Elementos Finitos. Para validação do perfil geométrico do turbogerador, foi desenvolvido um estudo de materiais, avaliando o desempenho sob os esforços solicitados de acordo com as condições do projeto. Através da análise estrutural, foi constatado que a liga de alumínio 7075 e o aço SAE 4340, temperado e revenido, foram os materiais que apresentaram os melhores resultados, suportando os esforços de trabalho, concluindo-se que são os mais indicados para a construção do rotor da turbina nessas condições.

Palavras-chave: Turbogenerador; Elementos Finitos; Análise Estrutural; Materiais.

INTRODUÇÃO

Turbogeradores, segundo De Carvalho et al ⁽¹⁾, são motores rotativos exotérmicos de circuito fechado que convertem energia cinética - produzida por uma corrente de água, gás ou vapor - em trabalho mecânico na forma de torque e velocidade de rotação. Essa energia gerada é transferida para um eixo, podendo ser utilizada para o acionamento de bombas, compressores, sopradores, propulsão,

geradores elétricos, uma hélice, entre outras diversas aplicações. A passagem do vapor produz resultantes tangenciais que, aplicadas às palhetas, gera um movimento rotacional, fazendo o rotor girar.

O presente projeto foi elaborado com o objetivo de realizar a análise estrutural do rotor de um turbogerador de alta rotação através do Método de Elementos Finitos (MEF). Uma turbina a vapor do tipo De Laval, alocada na extremidade do eixo, deve suportar as condições de pressão, causada pela injeção do vapor d'água sobre as palhetas, e a resultante centrífuga gerada por uma rotação de 30000 rpm aplicada ao sistema através de um motor assíncrono localizado na extremidade oposta do eixo.

Diversos trabalhos apresentam como linha de pesquisa o estudo de turbinas empregando o MEF. Gangele e Ahmed ⁽²⁾ e Kang et al ⁽³⁾ analisaram dinamicamente as palhetas de turbinas eólicas, considerando diferentes parâmetros geométricos e as propriedades dos materiais. Gangele e Ahmed ⁽²⁾ investigaram, por elementos finitos, o modo de vibração das pás confeccionadas em Kevlar® e Technora, comparando com sua frequência natural. Já Kang et al ⁽³⁾ tiveram como objetivo a análise da fibra de carbono e da fibra de vidro, onde ambas demonstraram coeficientes de segurança satisfatórios. Thrinadh, Bandaru e Venkatesh ⁽⁴⁾ não se limitaram em estudar dinamicamente as palhetas de uma turbina, mas realizaram análises estáticas por elementos finitos. Foram seis materiais propostos no estudo: Kevlar® 149, Technora, fibra de vidro (Glass-E e Glass-S), fibra de boro e grafite. Comparando os resultados obtidos, verificaram que as fibras de vidro apresentaram os menores valores de deformação em baixas frequências naturais de vibração.

MATERIAIS E MÉTODOS

Com base nos estudos desenvolvidos sobre turbogeradores e diversas pesquisas na área de Termodinâmica, foi adotado como base projetual o estudo proposto por De Carvalho et al ⁽¹⁾, além de determinados artigos da área ⁽²⁻⁴⁾, incorporando algumas de suas ideias com inovações que possam contribuir para a evolução nessa linha de pesquisa.

Tabela 1 – Parâmetros Gerais da Turbina

Dados da Turbina	Valor	Unidade
Potência desejada	50	kW
Rotação do rotor	30000	rpm
	500	rps
Pressão de operação	2,2	MPa
Pressão de vapor de escape	0,6	MPa
Temperatura de vapor vivo	593,15	K
Entalpia de entrada	3064	MPa
Entalpia de saída	2771,96	MPa

Adotando os dados da Tab. 1, para o dimensionamento da turbina é necessário ter o conhecimento de parâmetros como: trabalho específico interno, fluxo de massa, o limite superior permissível para velocidade tangencial e, devido à resistência do rotor empregando-se pressão constante, a força centrífuga, força tangencial e a força axial, além das relações dimensionais de diâmetro médio das palhetas e o número de palhetas da turbina. Esses parâmetros são fundamentais para o estudo de movimentos e análise estrutural dos materiais empregados na construção do modelo, verificando se o mesmo suporta as solicitações a quais será exigido.

“As partes críticas de uma turbina são aquelas em contato com o vapor de admissão” ⁽¹⁾, baseando-se no conceito de que as características mecânicas de um metal sofrem grandes modificações com a elevação da temperatura.

Os parâmetros analisados nesta escolha foram boa resistência à corrosão e oxidação, boa estabilidade estrutural em altas temperaturas durante um espaço de tempo prolongado (fluência), baixa densidade e elevada resistência mecânica.

O aço é o material mais utilizado na construção de turbinas a vapor, principalmente os classificados como aços inoxidáveis, por possuírem elevada resistência mecânica, alta resistência à corrosão, 100% recicláveis, além de inertes ^(1,5).

Contudo, devido a possuírem elementos de liga caros em sua composição (Cromo, Molibdênio, Níquel, Vanádio, Magnésio) e por sua alta densidade ($7870 \frac{kg}{m^3}$), optou-se por compará-lo com uma liga de alumínio, por este material gerar um custo

menor de produção e, principalmente, por ser três vezes mais leve que o aço, conforme Askeland, Fulay e Wright ⁽⁵⁾.

Os materiais de referência selecionados para o projeto da turbina foram, desta maneira, o aço inoxidável martensítico AISI 420, o aço SAE 4340 normalizado e a liga de alumínio 7075-T6, indicada para aplicações em estruturas sob altas tensões, cujas propriedades estão expressas na Tab. 2.

Tabela 2 – Propriedades dos materiais em estudo

Principais Características dos Materiais Ensaiaados			
Propriedade	AISI 420	SAE 4340	Alumínio 7075
Densidade	8000 kg/m ³	7850 kg/m ³	2810 kg/m ³
Módulo de Elasticidade	195 GPa	205 GPa	75 GPa
Coefficiente de Poisson	0,27	0,32	0,33
Módulo de Cisalhamento	77 GPa	80 GPa	26,9 GPa
Resistência à tração	655 MPa	1110 MPa	570 MPa
Limite de Escoamento	275 MPa	710 MPa	505 MPa
Tensão de Ruptura	1095 MPa	1900 MPa	2042 MPa

Fonte: adaptado da biblioteca do software *SolidWorks Simulation* 2016.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Definem-se, inicialmente, as restrições de apoio, onde há um engastamento em toda a superfície do suporte de encaixe do rotor, além da adição de restrição de contato em toda a superfície externa do aro de consolidação, simulando a carcaça da turbina a vapor. A Fig. 1 apresenta as restrições aplicadas na turbina e a malha empregada para a realização das análises.

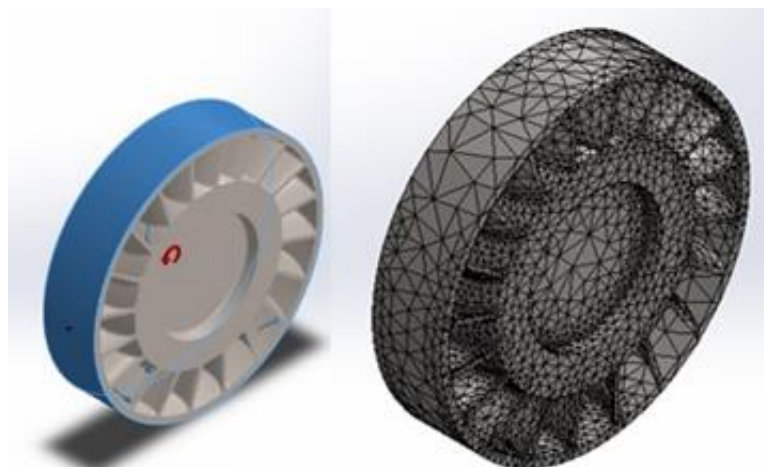


Figura 1 – Condições de contorno e malha utilizada para as análises por MEF
Fonte: Própria. Adaptado das telas captadas do software *SolidWorks Simulation* 2016.

A definição adequada das condições de contorno é um ponto crítico em simulações computacionais devido à necessidade limitar o domínio do modelo, produzindo um contorno artificial próximo ao real. Tal efeito foi obtido fixando na região de engastamento do rotor as restrições de deslocamento e rotação, levando-se em consideração que a tensão resultante está diretamente ligada a resultante centrífuga gerada pelo movimento rotacional do sistema. Quanto mais próximas forem aplicadas as restrições de contorno, em relação às condições reais de trabalho, mais confiáveis serão os resultados obtidos.

As análises, em primeiro plano, obtiveram conclusões insatisfatórias em razão dos valores encontrados. Observa-se na Fig. 2 que a tensão máxima, assim como a máxima deformação, ocorre nas regiões próximas ao engastamento, causado pelo deslocamento da massa do centro do rotor pela resultante centrífuga, e na região de saída do vapor, por ser a maior área com incidência de pressão. Desta forma, pode-se afirmar que o componente sofrerá ruptura em qualquer situação apresentada, pois as tensões encontradas nas análises superaram os limites de escoamento dos materiais, validando que, nessas condições, eles não suportarão os esforços exigidos. Vale ressaltar que, além de se trabalhar na zona elástica dos materiais, foi utilizado nas análises de tensão e deformação das estruturas o Método de Von Misés, “critério que apresenta resultados mais confiáveis visto que considera a tensão intermediária” (1).

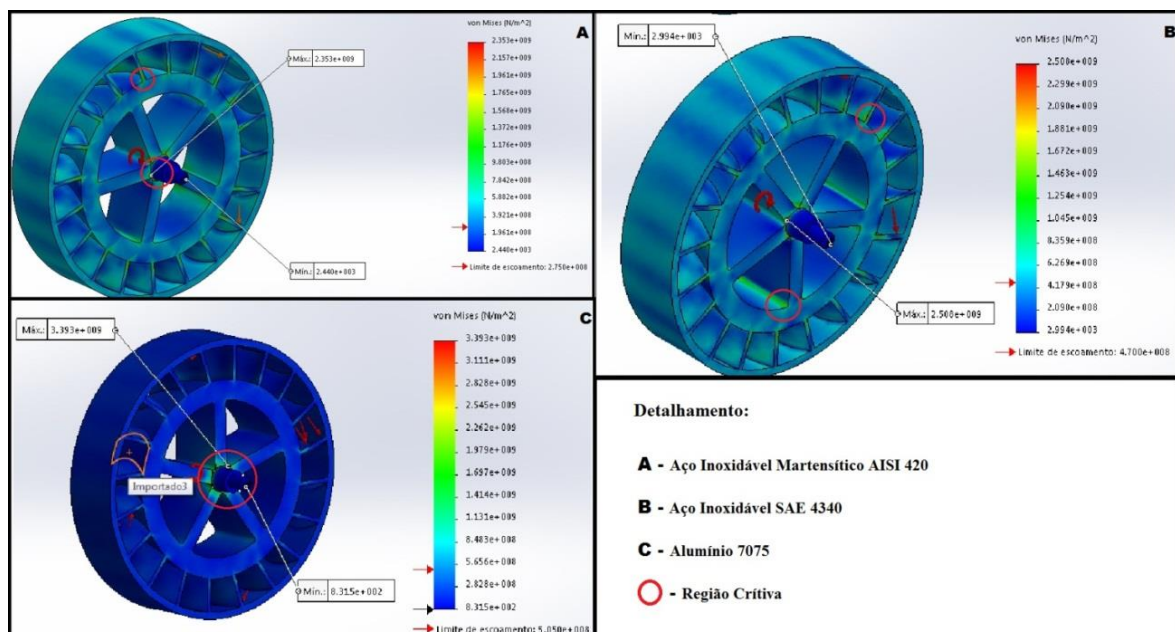


Figura 2 – Máxima tensão equivalente, respectivamente, no aço inox AISI 420 [A], no aço SAE 4340 [B] e na liga de alumínio 7075 [C], apresentando algumas das principais regiões críticas.
Fonte: Própria. Adaptado das telas captadas do software *SolidWorks Simulation* 2016.

Ademais, o Fator de Segurança, definido como “a relação entre tensão para qual o componente foi projetado e a carga aplicada” ⁽⁵⁾, isto é, a razão do limite de escoamento pela tensão admissível. O limite de segurança, deve ser um número maior que 1, a fim de evitar maior possibilidade de falha do projeto. Por exemplo, um componente que será submetido a uma carga de 50 MPa será projetado de tal modo que possa resistir a 100 MPa. Nesse caso, o coeficiente de segurança do projeto é de 2. Foi determinado um fator de segurança a partir de 1,2, indicando que a turbina poderá suportar um esforço 20% maior que o aplicado.

Analisando-se os resultados obtidos, observou-se uma necessidade de retificação do projeto. Os alívios de massa modelados, por apresentarem “cantos vivos”, geravam uma elevada concentração de tensão, assim como as regiões de aresta das palhetas, podendo vir a provocar a ruptura por fadiga nessas superfícies. Para solucionar esse problema, o rotor da turbina foi remodelado, eliminando as zonas de tensão concentrada através da criação de filetes nos ângulos retos – arestas das palhetas e a área de apoio do suporte de conexão com o eixo – e pelo ajuste dos alívios de massa, dando continuidade ao processo de análise estrutural, aplicando a mesma metodologia empregada anteriormente, com os mesmos parâmetros.

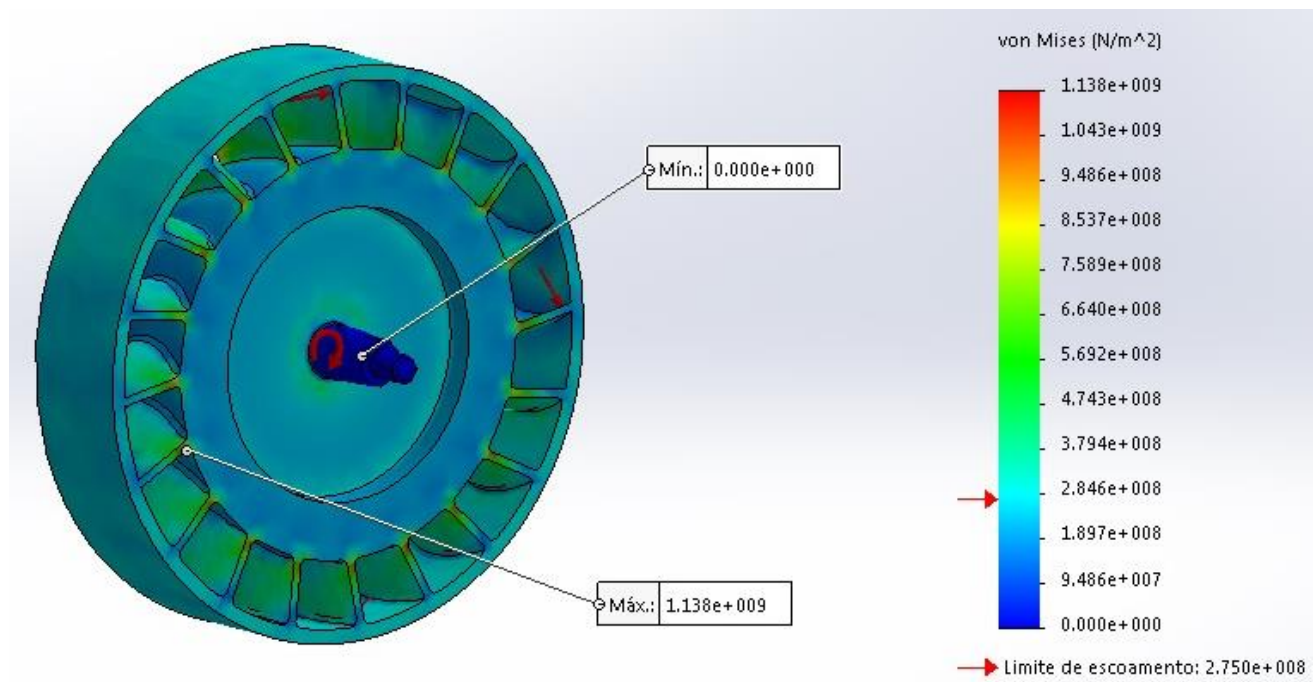


Figura 3 – Máxima tensão equivalente no aço inox AISI 420
Fonte: Própria. Adaptado das telas captadas do software *SolidWorks Simulation* 2016.

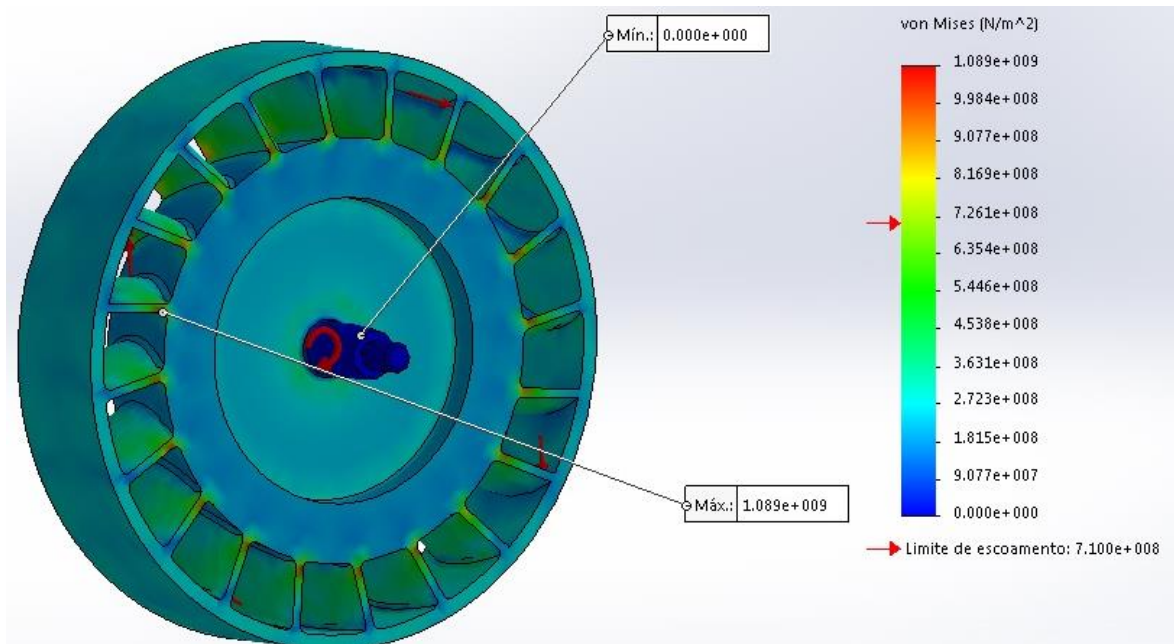


Figura 4 – Máxima tensão equivalente no aço SAE 4340
Fonte: Própria. Adaptado das telas captadas do software *SolidWorks Simulation* 2016.

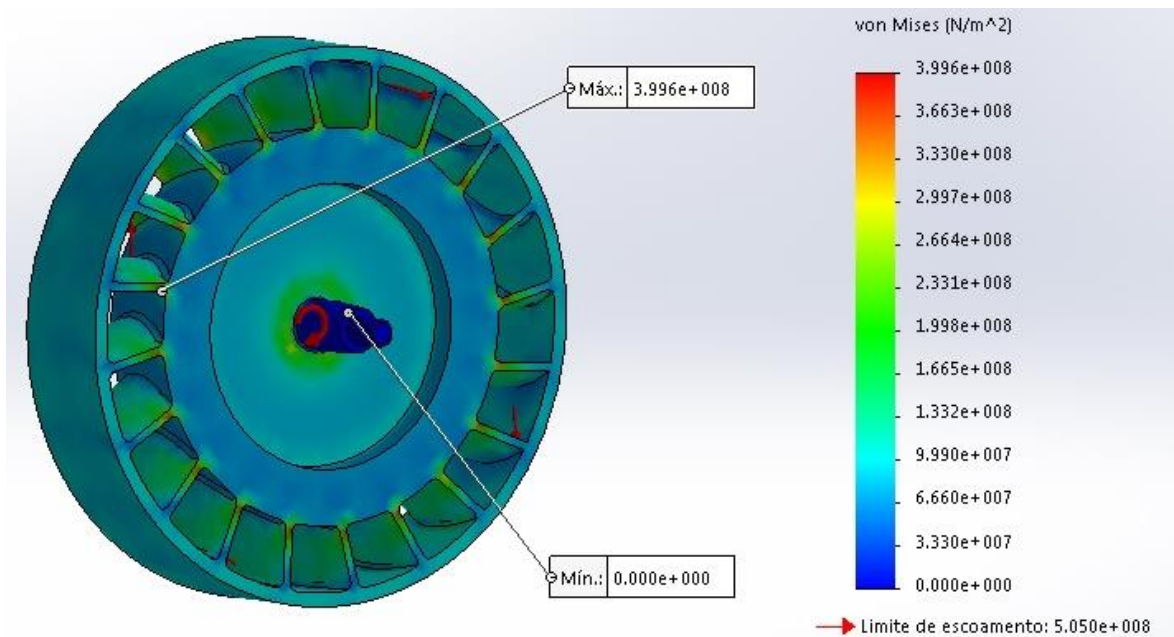


Figura 5 – Máxima tensão equivalente na liga de alumínio 7075
Fonte: Própria. Adaptado das telas captadas do software *SolidWorks Simulation* 2016.

Examinando-se os estudos apresentados nas Fig. 3 e Fig. 4, nota-se que o aço inox AISI 420 e o aço SAE 4340 não suportaram novamente os esforços exigidos, pois a tensão máxima foi, respectivamente, 1138 MPa (o limite de escoamento do AISI 420 é de 275 MPa) e 1089 Mpa (o limite de escoamento do SAE 4340 é de 710 MPa).

A liga de alumínio 7075 (Fig. 5), por outro lado, não sofreu nenhuma fratura prematura como os demais materiais, pois a tensão máxima encontrada foi de 399,6 MPa, 20,8% menor que seu limite de escoamento (505 MPa). Além disso, o rotor sofreu um deslocamento de apenas 0,45 mm (Fig. 6), relativamente baixo em relação à precisão de movimento do corpo, com um fator de segurança em 1,26. Desta forma, constata-se que a liga de alumínio 7075 pode ser empregada para a construção do rotor da turbina nessas condições.

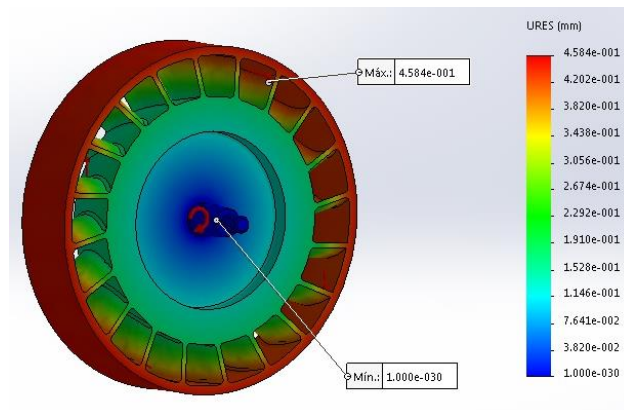


Figura 6 – Deslocamento máximo gerado pela resultante centrífuga na liga de alumínio 7075
Fonte: Própria. Adaptado das telas captadas do software *SolidWorks Simulation 2016*.

Com o objetivo de reduzir a massa da turbina e, conseqüentemente, os esforços provocados pela resultante centrífuga, foi realizada uma análise eliminando o aro de consolidação do rotor (Fig. 7), empregando a liga de alumínio 7075. No entanto, como era de se esperar, o componente não suportou a pressão exercida sobre as palhetas, pois é necessário um biengastamento de apoio sobre elas para que resista ao esforço aplicado.

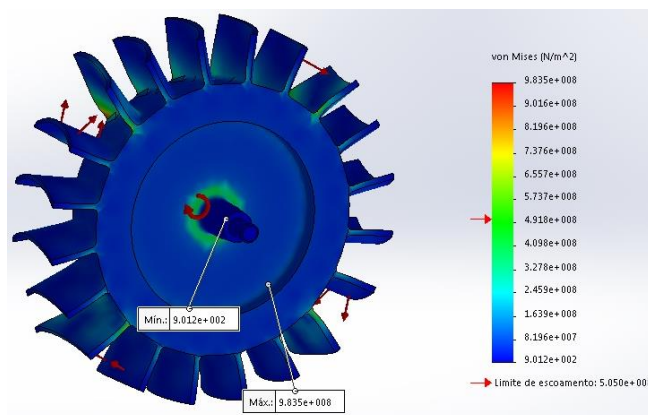


Figura 7 – Máxima tensão equivalente sobre o rotor sem aro de consolidação
Fonte: Própria. Adaptado das telas captadas do software *SolidWorks Simulation 2016*.

Segundo a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL), o processo de tratamento térmico (aquecimento ou resfriamento controlado) a que os materiais são sujeitos tem como finalidade aumentar suas propriedades físicas e mecânicas, sem alterar a forma do produto final. Sendo assim, decidimos estudar o comportamento do aço SAE 4340, temperado e revenido, empregando nossas condições de projeto. Esse material apresenta um limite de escoamento de 1800 MPa, além de uma tensão de ruptura de 2250 MPa (dados obtidos do software *SolidWorks Simulation* 2016), extremamente superiores às propriedades do mesmo material sem tratamento.

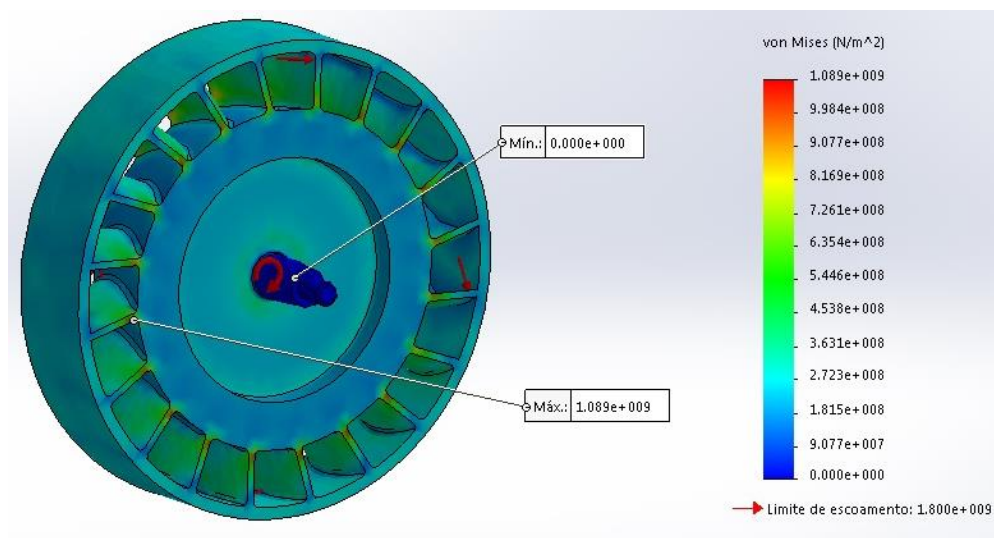


Figura 8 – Máxima tensão equivalente no aço SAE 4340 temperado e revenido
Fonte: Própria. Adaptado das telas captadas do software *SolidWorks Simulation* 2016.

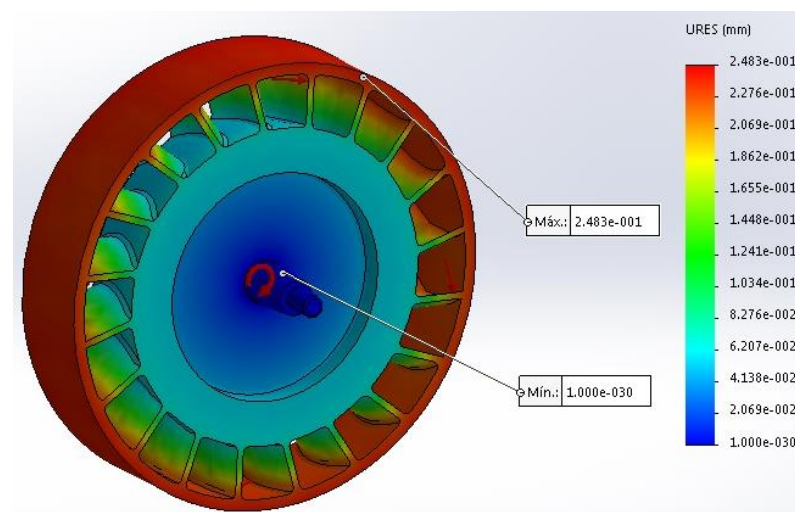


Figura 9 – Deslocamento máximo gerado pela resultante centrífuga no aço SAE 4340 temperado e revenido
Fonte: Própria. Adaptado das telas captadas do software *SolidWorks Simulation* 2016.

O aço SAE 4340, temperado e revenido, apresentou uma otimização significativa, como apresentado na Fig. 8, pois a tensão máxima sofrida pelo rotor foi de apenas 60,5% do seu limite de escoamento, o deslocamento máximo (Fig. 9) foi de apenas 0,248 mm, 55% menor que o deslocamento sofrido com a liga de alumínio 7075, e com o maior fator de segurança alcançado em todos os ensaios: 1,65. Nessas condições, o aço SAE 4340 tratado termicamente torna-se uma excelente alternativa para a fabricação da turbina.

Os valores de tensão estão diretamente ligados à resultante centrífuga gerada pelo movimento rotacional do sistema. Desta forma, sabendo-se que tal força é diretamente proporcional a massa da turbina, ao comprimento do raio do rotor e ao módulo da velocidade angular, percebe-se a variação nos resultados é dada pela diferença de densidade dos materiais propostos em estudo. A tensão máxima sofrida pela liga de alumínio, em comparação aos valores encontrados com ambos os aços, é em torno de três vezes menor – assim como ocorre entre as massas específicas dos materiais – validando os cálculos dimensionais.

CONCLUSÃO

Considerando as pressões, forças e restrições aplicadas no rotor da turbina De Laval, após as análises estruturais realizadas através do Método de Elementos Finitos, é possível concluir que os materiais que obtiveram resultados satisfatórios e se apresentaram como excelentes opções para a construção do componente foram a liga de alumínio 7075 e o aço SAE 4340, temperado e revenido. Ambos os materiais suportaram os esforços a que foram exigidos sem sofrer ruptura, deslocamento mecânico aceitável e com ótimo coeficiente de segurança.

Durante o desenvolvimento do projeto, verificamos a necessidade da aplicação de alívios de tensão no componente, que podem ser alcançadas através de um tratamento térmico, como recozimento, normalização e revenimento, por exemplo, além de notarmos a indispensabilidade do uso do aro de consolidação, vedando as palhetas e o meio externo e conferindo uma maior rigidez e resistência mecânica às palhetas, diminuindo a tendência de vibração do sistema.

REFERÊNCIAS

1. DE CARVALHO, Sergio Luiz Ramos, et al. **Projeto do rotor de uma turbina De Laval**. 2011. 84f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Mogi das Cruzes, Mogi das Cruzes, 2011, p. 15-84.
2. GANGELE, A.; AHMED, S. Modal analysis of S809 wind turbine blade considering different geometrical and material parameters. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 94, n. 3, 2013, p. 225-228.
3. KANG, B. et al. Dynamic analysis of hybrid wind power composite blades according to stacking properties method. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 13, n. 7, 2012, p. 1161-1166.
4. THRINADH, D.; BANDARU, S.; VENKATESH, P.H.J., Static and dynamic analysis of wind turbine blade. **International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences**, v. 3, 2015, p. 1-7.
5. ASKELAND, D. R.; FULAY, P. P.; WRIGHT, W. J., **The science and engineering of materials**. São Paulo: CENGAGE Learning, 6. Ed. 2010. 949 p.

STRUCTURAL ANALYSIS OF THE ROTOR OF A HIGH SPEED TURBOGENERATOR

ABSTRACT

The use of thermal resources for power generation, transport and performing daily tasks has always been regarded as useful to man. However, due to concern about the Brazilian energy dependence, focused on water resources, alternative sources of power generation are increasingly studied. On this need, this project aims, through modeling of a turbogenerator, conduct structural analysis of the rotor of component cited, using the Finite Element Method. To validate the geometric profile turbogenerator, a study of materials was developed, assessing performance under the required efforts in accordance with the design conditions. Through structural analysis, it was found that the aluminum alloy 7075 and the steel SAE 4340, hardened and tempered, were the materials that best resisted the efforts of work, concluding that they are the most suitable for the construction of the rotor's turbine with these conditions.

Key words: Turbogenerator; Finite Element; Structural analysis; Materials.